



Titre: Système de vision pour la cartographie tridimensionnelle de
précision de structures sous-marines

Auteur: François Mirallès
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Mirallès, F. (2007). Système de vision pour la cartographie tridimensionnelle de
Citation: précision de structures sous-marines [Thèse de doctorat, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7992/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7992/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Romano M. De Santis, & Richard Hurteau
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SYSTÈME DE VISION POUR LA CARTOGRAPHIE TRIDIMENSIONNELLE
DE PRÉCISION DE STRUCTURES SOUS-MARINES

FRANÇOIS MIRALLÈS
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(SPÉCIALISATION AUTOMATIQUE)
DÉCEMBRE 2007



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-37132-9

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-37132-9

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

SYSTÈME DE VISION POUR LA CARTOGRAPHIE TRIDIMENSIONNELLE
DE PRÉCISION DE STRUCTURES SOUS-MARINES

présentée par: MIRALLÈS François

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., président

M. DE SANTIS Romano M., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. HURTEAU Richard, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. BIRGLEN Lionel, Ph.D., membre

M. SAAD Maarouf, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier M. Romano de Santis, mon directeur de thèse, pour les discussions nombreuses et enrichissantes que nous avons eu aussi bien sur des questions scientifiques que humaines. Son enseignement va bien au delà du domaine académique et m’a permis d’aborder bien des problèmes sous un angle nouveau.

Je n’aurais pas pu poursuivre ce projet sans le soutien financier du département de Génie Électrique de l’École Polytechnique de Montréal en la personne de M. Richard Hurteau, mon co-directeur, à qui j’adresse ma plus vive gratitude.

La recherche présentée est le fruit d’une collaboration avec les chercheurs de l’unité Automatisation et Systèmes de Mesure de l’Institut de Recherche d’Hydro-Québec (IREQ). L’idée originale a été proposée par Régis Houde. J’ai grandement apprécié son style d’encadrement et sa disponibilité.

Mes remerciements vont aussi bien sûr aux membres de l’équipe du projet de diagnostic immergé qui s’est finalement constituée au fur et à mesure des avancées que nous réalisons. En particulier Michel Blain, dont le regard visionnaire et l’énergie ont permis au projet d’avoir une existence réelle au sein de l’entreprise. Le travail acharné, les talents d’organisation et la maîtrise technique de Julien Beaudry ont permis de mettre en place la structure opérationnelle avec laquelle nous avons obtenu les résultats expérimentaux présentés aux chapitres 5 et 6. Bien entendu, tout cela n’aurait pas eu lieu sans l’expérience d’André Robert et de Michel Belley. Je remercie également Louis Beaumont et Nicolas Gagné pour leur excellente contribution à la conception du porteur lors de leur stage.

Le cadre de travail sain que j’ai trouvé à l’IREQ pendant ces dernières années m’a

permis de vivre une expérience agréable. Je remercie donc tous les membres du laboratoire que j'ai pu côtoyer en m'excusant de ne pas citer de noms tellement ils sont nombreux.

Je remercie enfin tout particulièrement mes parents qui m'ont supporté pendant toutes ces années. Leur exemple est une des sources de ma motivation et de ma détermination.

RÉSUMÉ

La recherche présentée dans cette thèse est motivée par une problématique industrielle. Le problème traité est celui de la cartographie haute précision de structures immergées telles que celles que l'on retrouve dans un barrage hydroélectrique.

La difficulté du projet réside dans le fait que nous cherchons à mettre au point un système destiné à être utilisé sur site, par une équipe de non spécialistes et dans un environnement caractérisé par plusieurs sources de perturbations et d'incertitudes. Nous présentons un cadre conceptuel et matériel pour la formalisation et la résolution de ce problème. Dans ce cadre, l'exploitation du modèle du système et de la structure de l'environnement permettent le développement d'une approche scientifique capable d'assurer l'intégrité des mesures et d'augmenter la robustesse. La structure de la scène peut aussi être mise à profit pour ajuster automatiquement les paramètres internes du système fournissant ainsi une plus grande flexibilité et une plus grande autonomie d'opération.

Afin de répondre au problème industriel qui nous est posé, nous avons développé un prototype et implémenté notre approche. Le système que nous avons conçu se compose d'une caméra et de deux lasers qui projettent chacun un plan de lumière sur la structure à inspecter. De part sa configuration innovante, ce système résoud à la fois le problème de sa localisation et le problème de la cartographie de la structure. Le fonctionnement du système est validé en simulation et de façon expérimentale par des essais en laboratoire et sur site. Les premiers résultats obtenus en laboratoire indiquent que le système permet d'établir la carte d'une structure avec une précision de l'ordre du millimètre. Les résultats obtenus sur site démontrent que le système est tout à fait utilisable en milieu industriel.

ABSTRACT

The research presented in this thesis is driven by an industrial issue. We address the problem of the high-precision mapping of underwater structures such as those found in a hydroelectric dam.

The difficulty of the project lies in the fact that we are trying to develop a system to be used in the field by a team of non specialists and in an environment characterized by multiple sources of perturbations and uncertainties. We present a conceptual framework as well as the design and the implementation of a system for the formalization and the resolution of this problem. In this framework, the use of the system model and the structure of the environment lead to the development of a scientific approach ensuring the integrity of the measures and increasing the robustness of the system. The structure of the scene can also be used to automatically adjust the intrinsic parameters of the system thus providing a greater flexibility and a greater autonomy of operation.

In order to solve the industrial problem posed to us, we developed a prototype and implemented our approach. Our system consists of a camera and two lasers that project a plan of structured light on the structure to be inspected. Thanks to its innovative configuration, the system solves both the problem of its localization and the problem of mapping the structure. Our approach is validated in simulation and also by experimental tests in laboratory as well as in the field. The first results obtained in laboratory indicate that the system can build the map of a structure with an accuracy in the order of a millimeter. The results obtained in the field show that the system is fully usable in the industry.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xix
LISTE DES TABLEAUX	xxii
LISTE DES ANNEXES	xxiv
CHAPITRE 1 POSITION DU PROBLÈME	1
1.1 Contexte et objectifs de l'étude	1
1.2 Démarche et organisation du manuscrit	9
1.3 Contributions	9
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART	11
2.1 Systèmes de cartographie 3D en milieu sous-marin	11
2.2 Calibrage des systèmes de cartographie 3D basés sur la lumière struc- turée	15
2.2.1 Calibrage dans un cadre projectif	16
2.2.2 Calibrage via une modélisation non linéaire	20
2.2.3 Auto-calibrage	21
2.3 Calcul et manipulation d'incertitude en robotique et en vision par ordinateur	22

2.4	Conclusion	24
CHAPITRE 3 APPROCHE PROPOSÉE		27
3.1	Cadre conceptuel	27
3.2	Conception du système de cartographie	29
3.2.1	Le porteur	29
3.2.2	L'unité de mesure	31
3.2.3	Principe d'opération	31
3.3	Modélisation des composantes et de l'ensemble de l'unité de mesure .	36
3.3.1	Modélisation d'une caméra à base de CCD	36
3.3.1.1	Caméra perspective linéaire	36
3.3.1.2	Distorsions optiques	40
3.3.2	Modélisation d'un laser	43
3.3.2.1	Changement de repère des paramètres d'un plan . .	43
3.3.3	Modélisation de l'unité de mesure	44
3.3.3.1	Notations et repères	44
3.3.3.2	Modèle direct	47
3.3.3.3	Modèle inverse	49
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE L'APPROCHE PROPOSÉE . . .		51
4.1	Calibrage	51
4.1.1	Calibrage de la caméra	51
4.1.1.1	Notations	52
4.1.1.2	Homographie entre le plan de calibrage et son image	53
4.1.1.3	Contrainte sur les paramètres intrinsèques	54
4.1.1.4	Solution pour le calibrage de la caméra	56
4.1.1.5	Niveau de confiance dans les estimés des paramètres intrinsèques	58
4.1.2	Calibrage d'un laser	60

4.1.2.1	Estimation par la matrice de covariance	62
4.1.2.2	Robustesse de la méthode	64
4.1.2.3	Validation du calibrage	65
4.1.2.4	Niveau de confiance dans les estimés	66
4.2	Localisation de l'unité de mesure	66
4.2.1	Localisation par une solution exacte	66
4.2.1.1	Détermination de la translation	68
4.2.1.2	Détermination de la rotation	69
4.2.1.3	Intégrité de la localisation de l'unité	71
4.2.1.4	Estimation de l'incertitude sur la transformation	73
4.3	Cartographie	73
4.4	Conclusion	74
CHAPITRE 5 EXPÉRIENCES MENÉES EN LABORATOIRE		75
5.1	Contexte des expériences	75
5.2	Design et implémentation	75
5.2.1	Structure à inspecter	76
5.2.2	Porteur	76
5.2.3	Unité de mesure	76
5.2.3.1	Logiciel d'aide à l'implémentation	77
5.2.3.2	Implémentation de l'unité	81
5.2.4	Unité de traitement	82
5.3	Évaluation des algorithmes de traitement	84
5.3.1	Calibrage de l'unité de mesure	84
5.3.1.1	Calibrage de la caméra	84
5.3.1.2	Calibrage des plans lasers	88
5.3.2	Localisation de l'unité de mesure	91
5.3.2.1	Intégrité de la localisation	97

5.3.3	Cartographie de la surface	99
5.3.3.1	Quelques précisions sur le protocole pour la collecte des données	99
5.3.3.2	Post-traitement des données collectées	99
5.3.4	Test de précision sur la mesure de points appartenant à la surface inspectée	99
5.4	Identification des améliorations possibles	107
5.5	Conclusion	109
CHAPITRE 6 EXPÉRIENCES SUR SITE		111
6.1	Situation des zones inspectées	111
6.2	Objectifs des inspections	113
6.3	Protocole expérimental	114
6.4	Calibrage de l'unité de mesure	116
6.5	Résultats de la première série d'essais (octobre 2006)	117
6.6	Résultats de la deuxième série d'essais (janvier 2007)	120
6.7	Difficultés rencontrées	123
6.7.1	Calibrage de l'unité de mesure	123
6.7.2	Post-traitement	126
6.7.2.1	Recalage des données	126
6.7.3	Fonctionnement du système en conditions perturbées	127
6.7.3.1	Détection des points laser	127
6.7.3.2	Vitesse de translation de l'unité	128
6.8	Conclusion	128
CHAPITRE 7 AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DU SYSTÈME		129
7.1	Différentes voies d'améliorations	129
7.2	Paramètres du simulateur	130

7.3	Sensibilité de l'estimé de la position d'un point de la scène à une variation des paramètres intrinsèques	131
7.4	Incertitude sur l'estimé de la position d'un point de la scène en fonction de l'incertitude sur les paramètres de l'unité et sur les mesures prises dans l'image	133
7.4.1	Procédure d'analyse	133
7.4.2	Résultats	136
7.4.2.1	Effet d'incertitudes faibles sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image	137
7.4.2.2	Effet d'une grande incertitude sur les plans lasers	142
7.5	Réduction de l'incertitude sur l'estimation d'un point	147
7.5.1	Estimation de la pose par filtrage	149
7.5.2	Estimation d'un point de la scène par filtrage	151
7.5.3	Résultats	153
7.5.4	Propagation de l'incertitude de mesure d'un point de la scène	160
7.6	Rejet des mesures aberrantes	161
7.7	Calibrage devant la scène	162
7.8	Algorithme de haut niveau	163
7.9	Conclusion	164
CHAPITRE 8	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	167
8.1	Conclusion	167
8.1.1	Cadre conceptuel et matériel	167
8.1.2	Conception, design, implémentation et validation d'un prototype	169
8.2	Perspectives	170
8.2.1	Mesure d'une structure	170
8.2.1.1	Implantation complète de l'approche	170
8.2.1.2	Calibrage sur site	172

8.2.1.3	Modélisation physique	172
8.2.1.4	Développement matériel	173
8.2.2	Construction et manipulation d'un modèle 3D	173
RÉFÉRENCES		176
ANNEXES		185

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Deux exemples de porteur.	4
Figure 1.2	Le système à réaliser.	7
Figure 1.3	Exemple de structure à inspecter.	8
Figure 2.1	Les repères du modèle de Chen & Kak, Reid et Huynh.	17
Figure 3.1	Cadre conceptuel de l'approche proposée.	28
Figure 3.2	Le porteur.	30
Figure 3.3	L'unité de mesure.	32
Figure 3.4	Calcul des coordonnées 3D d'un point de la surface à inspecter.	34
Figure 3.5	La chaîne d'acquisition.	35
Figure 3.6	Les opérations réalisées par le système de cartographie.	36
Figure 3.7	Modèle de la projection perspective.	37
Figure 3.8	Les repères de la projection perspective	38
Figure 3.9	Correspondance entre coordonnées rétinienne et coordonnées image.	39
Figure 3.10	Modèle d'un plan dans l'espace.	44
Figure 3.11	Changement de repère des paramètres d'un plan.	45
Figure 3.12	Les repères du modèle de l'unité de mesure.	46
Figure 3.13	Une image typique de la scène.	48
Figure 4.1	Procédure pour le calcul d'un estimé des paramètres intrin- sèques et extrinsèques de la caméra.	59
Figure 4.2	Une procédure pour la validation du calibrage d'un plan laser.	65
Figure 4.3	Vérification du calibrage des paramètres extrinsèques de l'unité de mesure.	72
Figure 5.1	Fonction de la procédure de calcul pour l'aide à l'implémentation	78
Figure 5.2	Définition de la résolution de mesure	79

Figure 5.3	Configuration géométrique adoptée pour une résolution de mesure théorique de 0,3 mm.	80
Figure 5.4	Résolution théorique de l'unité de mesure	81
Figure 5.5	Photographie du système de vision.	82
Figure 5.6	Image de la cible à 77 points sous l'eau.	86
Figure 5.7	Image de la cible à 4 points dans l'eau.	89
Figure 5.8	Images de la cible pour le calibrage des plans lasers.	95
Figure 5.9	Reprojection du plan laser estimé avec et sans élimination des mesures aberrantes par RANSAC.	96
Figure 5.10	Reprojection des points \hat{P}_{M_i} dans l'image.	98
Figure 5.11	Carte du linteau obtenue dans l'air.	100
Figure 5.12	Carte du linteau obtenue dans l'eau.	101
Figure 5.13	Cartographie d'une surface dans l'air.	103
Figure 5.14	Cartographie d'une surface dans l'eau.	104
Figure 5.15	Vue de profil des plaques 1 et 2 mesurées dans l'air.	106
Figure 5.16	Vue de coupe du profil long mesuré dans l'air à $X = 60$ mm. .	107
Figure 5.17	Vue de profil des plaques 1 et 2 mesurées dans l'eau.	108
Figure 5.18	Vue de coupe du profil long mesuré dans l'eau à $X = 74$ mm.	109
Figure 6.1	Situation géographique de la centrale de Beauharnois.	112
Figure 6.2	Situation de la zone cartographiée.	113
Figure 6.3	Photographie du système de vision.	117
Figure 6.4	Reconstruction de la surface du linteau 2A.	120
Figure 6.5	Une reconstruction de la surface du linteau 2B.	121
Figure 6.6	Une reconstruction de la surface du linteau 3B.	122
Figure 6.7	Une reconstruction de la surface du linteau 11A.	124
Figure 6.8	Une reconstruction de la surface du linteau 11B.	125
Figure 7.1	Le problème d'estimation de l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$	135

Figure 7.2	Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une vue 3D d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.	138
Figure 7.3	Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan XY d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.	140
Figure 7.4	Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. (a) et (b) montrent des projections sur les plans XZ et YZ du repère lié aux fils d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités. On remarque que ces projections sont étirées selon un certain axe.	141
Figure 7.5	Incertitude sur $[P_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une vue 3D d'un nuage de 1000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.	143
Figure 7.6	Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan XY d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.	144

Figure 7.7	<p>Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. (a) et (b) montrent des projections sur les plans XZ et YZ du repère lié aux fils d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités. On remarque que ces projections sont très étirées selon un certain axe.</p>	145
Figure 7.8	<p>Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS} = [-22, 0 \ 0, 0 \ 37, 1909]^T$ mm pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. On remarque que le nuage n'est plus étiré.</p>	146
Figure 7.9	Algorithme de haut niveau utilisant le filtrage.	148
Figure 7.10	Filtrage de Kalman étendu (adapté de (Gourdeau, 2006)). . .	152
Figure 7.11	<p>Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ avec un filtrage sur 3 images versus sans filtrage.</p>	156
Figure 7.12	<p>Projection sur le plan XY d'un nuage de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés avec une incertitude faible sur les paramètres et les mesures prises dans l'image.</p>	157
Figure 7.13	<p>Projections d'un nuage de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés avec une incertitude réaliste sur les paramètres et les mesures prises dans l'image.</p>	158

Figure 7.14	Comparaison des incertitudes estimées sur une population de 5000 points $[\hat{P}_S]_{CAM}$ et par filtrage de Kalman. Nous considérons ici une forte incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan YZ du nuage de 5000 points $[\hat{P}_S]_{CAM}$ calculés à partir des paramètres bruités. Le filtrage de Kalman a été fait sur 3 images.	159
Figure 7.15	Le problème de la propagation de l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$. . .	160
Figure 7.16	Algorithme de haut niveau robuste.	161
Figure 7.17	L'algorithme de haut niveau	165
Figure 8.1	Étapes pour l'acquisition et le traitement de la carte d'une structure.	171

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

Abréviations

2D	Bidimensionnel.
3D	Tridimensionnel.
CCD	Charged Coupled Device (dispositif à transfert de charges).
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec.

Calcul matriciel et vectoriel

\mathbf{X}, \mathbf{X}^T	Matrice, transposée d'une matrice.
\mathbf{X}^{-T}	Transposée de l'inverse d'une matrice; \mathbf{X}^{-T} est équivalent à $(\mathbf{X}^{-1})^T$.
\mathbf{x}	Vecteur.
$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle$	Produit scalaire de deux vecteurs.
$\mathbf{x} \times \mathbf{y}$	Produit vectoriel de deux vecteurs.

Opérateurs

$\bar{\mathbf{x}} = E[\mathbf{x}]$	Espérance du vecteur aléatoire \mathbf{x} .
$\Sigma_{\mathbf{x}}$	Matrice de covariance du vecteur aléatoire \mathbf{x} .
$\text{dist}(X, Y)$	Distance entre deux points.
$\text{Rot}(A, B)$	Matrice de rotation qui désigne l'orientation du repère B par rapport au repère A .
$\text{Trans}(A, B)$	Vecteur qui désigne la translation du repère B par rapport au repère A .
$\text{Pose}(A, B)$	Matrice 3×4 qui désigne la pose du repère B par rapport au repère A ; $\text{Pose}(A, B) = \mathbf{T}_{3 \times 4} = [\text{Rot}(A, B) \text{ Trans}(A, B)]$; la matrice $\mathbf{T}_{3 \times 4}$ est formée de la juxtaposition d'une matrice de rotation et d'un vecteur de translation.

Repères

<i>CAM</i>	Repère mobile lié à la caméra.
<i>FILS</i>	Repère mobile lié aux fils.
<i>IMG</i>	Repère lié au plan image ayant pour origine le coin supérieur gauche de l'image.
<i>MONDE</i>	Repère fixe lié à une structure inspectée.
<i>RET</i>	Repère lié au plan image ayant pour origine le point principal.
<i>UNITE</i>	Repère mobile lié à l'unité de mesure; ce repère coïncide avec le repère caméra et donc l'un peut être pris pour l'autre.

Éléments de la scène

P	Point de la scène; ses coordonnées homogènes sont $\tilde{P} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$.
$[P]_A$	Point P décrit dans le repère A .
P_M	Point d'intersection d'un plan laser avec un fils.
P_L	Point contenu dans un plan laser.
P_S	Point d'une surface inspectée.
P_T	Point fixe situé sur un fils.
\tilde{P}	Mesure de P soumise à un bruit.
\hat{P}	Estimé de P .

Paramètres

γ	Paramètres du système de cartographie; $\gamma = [\gamma_i \ \gamma_e]^T$.
γ_i	Paramètres intrinsèques du système de cartographie; $\gamma_i = [\gamma_C \ \gamma_L \ h]^T$.
γ_C	Paramètres intrinsèques de la caméra; $\gamma_C = [\alpha_u \ \alpha_v \ u_0 \ v_0 \ k_1 \ k_2]^T$.

γ_L	Paramètres des plans lasers; $\gamma_L = [a_1 \ b_1 \ c_1 \ d_1 \ a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2]^T$.
γ_e	Paramètres extrinsèques du système de cartographie; $\gamma_e = \text{Pose}(\textit{MONDE}, \textit{CAM})$.
\mathbf{K}	Matrice des paramètres intrinsèques de la caméra.
f	Distance focale en millimètres.
k_u, k_v	Facteurs d'échelle en pixels/mm.
$\alpha_u \ \alpha_v$	Distances focales le long des axes de l'image en pixels.
u_0, v_0	Coordonnées du point principal en pixels.
k_1, k_2	Coefficients de distorsion radiale.
$\mathbf{n} = [a \ b \ c]^T$	Vecteur unitaire normal au plan laser.
d	Distance de l'origine au plan laser.
h	Distance d'un fil à l'origine du repère lié aux fils selon l'axe Y_F .

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Correspondance avec les notations de Zhang.	53
Tableau 5.1	Paramètres de la caméra calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la première série d'expériences.	85
Tableau 5.2	Paramètres de la caméra calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences.	85
Tableau 5.3	Paramètres de la caméra calibrée à partir d'une cible à quatre points.	89
Tableau 5.4	Paramètres des plans lasers calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la première série d'expériences.	92
Tableau 5.5	Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'air lors de la première série d'expériences.	92
Tableau 5.6	Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans laser dans l'eau lors de la première série d'expériences.	93
Tableau 5.7	Paramètres des plans lasers calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences.	93
Tableau 5.8	Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'air lors de la deuxième série d'expériences.	94
Tableau 5.9	Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences.	94
Tableau 5.10	Mesure de profondeur.	102
Tableau 5.11	Mesure d'objets 2D.	105
Tableau 6.1	Paramètres de l'unité de mesure calibrés pour les essais menés à la centrale de Beauharnois en octobre 2006 et janvier 2007.	118
Tableau 7.1	Paramètres de l'unité de mesure utilisés pour les simulations.	131
Tableau 7.2	Sensibilité de $[P_S]_{FILS}$ à une variation de $\pm 1\%$ des paramètres intrinsèques de l'unité.	134

Tableau 7.3	Statistiques calculées pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image.	139
Tableau 7.4	Statistiques calculées pour une incertitude faible sur les paramètres et les mesures. Les valeurs présentées sont des valeurs moyennes calculées sur 50 nuages de 5000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$. . .	155

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	MÉTHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE . . .	185
ANNEXE II	CALIBRAGE D'UN PLAN LASER PAR L'ÉCRITURE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE SURDÉTERMINÉ	187
ANNEXE III	ALGORITHME DE RANSAC	189

CHAPITRE 1

POSITION DU PROBLÈME

Nous présentons tout d'abord le problème d'un point de vue industriel. Cette présentation nous permettra de comprendre le contexte de cette étude ainsi que les difficultés dans la résolution de notre problème. Nous formulons ensuite les objectifs visés puis la démarche que nous comptons entreprendre pour atteindre ces objectifs. Les développements que nous présentons dans cette thèse ont donné lieu à plusieurs contributions que nous reprenons en fin de chapitre.

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Le maintien en état d'un barrage hydroélectrique nécessite l'inspection et la réparation de structures qui peuvent être immergées. Une simple inspection visuelle à partir de photographies ou de vidéos peut fournir une information qualitative. Ce type d'inspection permet par exemple de vérifier l'état de surface des structures ou bien de détecter la présence de fissures. Cependant pour établir une évaluation plus exploitable de l'état des installations, il est nécessaire de disposer d'informations quantitatives. On voudrait par exemple non seulement détecter des fissures mais aussi les localiser et les dimensionner précisément; ou encore on voudrait établir le relevé complet d'une structure pour estimer sa déformation¹.

L'inspection d'une structure sous-marine peut se faire par différents moyens. Une

¹Dans le cas du béton, c'est la réaction alcali-granulat qui provoque ce type de détériorations. Cette réaction correspond à un échange ionique entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. Les déformations peuvent atteindre plusieurs centimètres d'amplitude (Durand, 2003).

première solution consiste à envoyer des scaphandriers prendre les mesures. La réalisation de l'inspection est alors soumise à plusieurs contraintes. Il faut en premier lieu que la zone soit physiquement accessible et que cet accès soit autorisé par les règles de sécurité. L'environnement d'un barrage cumule effectivement les dangers du milieu sous-marin et du milieu industriel. Les scaphandriers ont ensuite besoin d'une visibilité suffisante pour pouvoir prendre les mesures. L'eau peut être troublée par des particules en suspension provenant de la végétation, d'organismes aquatiques ou de la corrosion des pièces métalliques. Ensuite la qualité des mesures dépend de l'habileté et de l'expérience des scaphandriers. Étant donné que la prise de mesure est manuelle, les résultats ne comportent aucune notion de confiance ou d'incertitude. Enfin le temps nécessaire à la prise de mesure peut être long alors que l'arrêt d'une partie d'un barrage pendant l'inspection peut coûter plusieurs dizaines de milliers de dollars par jour. Toutes ces contraintes font que les installations qui le nécessitent ne sont pas toujours inspectées régulièrement. Dans ce cas l'état du barrage se détériore jusqu'au jour où une de ses parties entre en dysfonction. En somme, une inspection par scaphandriers n'est pas toujours réalisable, a un coût élevé, comporte des dangers pour la vie humaine et limite une exploitation quantitative rigoureuse des résultats.

Une deuxième solution pour l'inspection sous-marine est l'utilisation d'un système robotique. La figure 1.1 montre les photographies de deux types de robots sous-marins. De façon générale, il peut s'agir de tout système téléopéré ou autonome permettant de collecter les données. Dans cette classe, on retrouve les robots mobiles tels que les ROV (remotely operated vehicle) et les AUV (autonomous underwater vehicle). L'utilisation d'un robot offre de nombreux avantages et de nouvelles capacités par rapport à une inspection par scaphandrier:

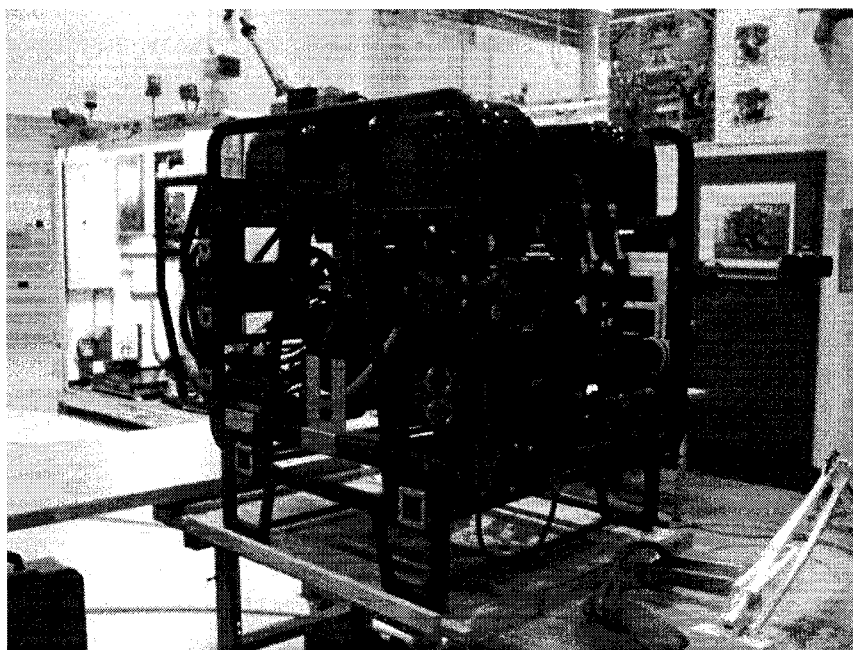
- les contraintes de sécurité ne sont pas les mêmes puisqu'aucun opérateur n'est directement présent dans la zone à inspecter.

- les données peuvent être collectées par un plus grand nombre de capteurs différents : caméra, caméra vidéo mais aussi sonar, système de vision passif ou actif.
- il est possible de combiner l'utilisation de ces capteurs afin de prendre des mesures dans différentes conditions. Par exemple l'utilisation d'un système de vision offre une bonne précision pour une inspection locale mais un système acoustique permet de collecter des données sur une plus grande plage et dans de mauvaises conditions de visibilité.
- le filtrage et la fusion des mesures provenant de plusieurs capteurs peut réduire leur incertitude.
- le volume de données recueilli est plus grand. En disposant d'une densité de mesure suffisante, on réduit les risques de ne pas détecter une anomalie. Une plus grande capacité d'acquisition rend aussi possible l'inspection de structures à grande échelle.

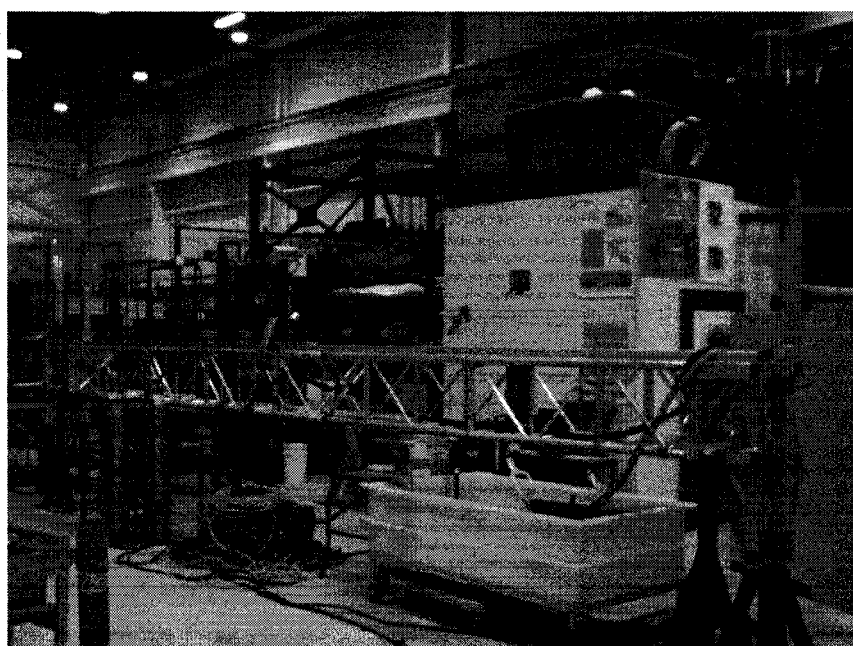
C'est pour ces raisons que les robots sous-marins sont activement développés depuis plus de trente ans. La maturité de la technologie rend maintenant leur utilisation possible en industrie.

Les systèmes d'inspection robotisés comportent de nombreux avantages mais leur mise au point pose de nouveaux problèmes et leur fonctionnement peut être mis en défaut dans certaines conditions particulières:

- Bien que les données peuvent être collectées par différents types de capteurs, nous verrons au chapitre 2 que chaque capteur est performant pour un usage particulier. Il convient donc de bien choisir le capteur adapté à notre application.
- Un des problèmes commun aux robots sous-marins est la localisation précise du



(a) Le sous-marin MASKI de l'IREQ.



(b) Le porteur cartésien rigide de l'IREQ. Le porteur est une structure d'une longueur de 8 m sous forme de treillis. Le porteur peut embarquer un instrument de mesure ou un outil et fournit 2 degrés de liberté. Ce porteur est utilisé pour effectuer certaines opérations d'inspection et de maintenance dans des environnements de géométrie particulière.

Figure 1.1 Deux exemples de porteur.

système, or, pour être utilisable, les données collectées doivent être référencées dans un même repère global. Cependant, aux abords d'un barrage, le robot évolue parfois dans un milieu fermé, ce qui peut mettre en défaut son système de localisation. Par exemple, dans le cas des systèmes acoustiques, les ondes émises rebondissent sur les parois et faussent l'interprétation du signal réfléchi; ou encore, dans le cas des boussoles, le champ magnétique terrestre est déformé par la présence des armatures du béton et empêche une bonne lecture de l'orientation.

- L'inspection de certaines structures nécessite une grande précision de mesure. Pour cela, il faut à la fois que le capteur qui réalise effectivement la mesure soit précis mais il faut que le système de localisation du robot le soit également. Actuellement, on arrive en général à une précision de mesure sur les données exprimées dans un repère global de l'ordre du centimètre ce qui est insuffisant pour notre application.
- Notons qu'il n'est pas suffisant d'avoir une grande précision de mesure mais que nous avons aussi besoin d'un niveau de confiance dans la mesure. Ce niveau de confiance indique la fiabilité du système et dépend à la fois du système de localisation et du capteur qui réalise la mesure.
- Le système d'inspection est destiné à fonctionner sur site et sera donc soumis aux perturbations que l'on rencontre couramment dans le milieu (particules en suspension, vibrations, chocs). Ainsi, même si le système a une bonne précision de mesure en conditions idéales, cette précision se dégradera en conditions réelles.

L'inspection d'une structure sous-marine par un système robotique se révèle être un problème complexe. L'application que nous visons nécessite la mise au point d'un système doté des caractéristiques suivantes :

- **l'intégrité.** En conditions normales d'opération, le système est soumis à différentes perturbations de plus ou moins fortes intensités. Le système doit donc être capable de déterminer lui-même si une mesure est valide ou non. Une mesure est valide si l'on juge que l'erreur de mesure engendrée par les perturbations est acceptable.
- **la précision.** De façon ultime on voudrait pouvoir mesurer une structure avec une précision de l'ordre d'une fraction de millimètre. Les surfaces de certaines structures métalliques sont en effet soumises à des forces importantes. Il est donc nécessaire que ces forces soient bien réparties de façon à minimiser les déformations de la structure. De plus, à chaque mesure devrait être associée une évaluation de son incertitude.
- **la robustesse.** Le système doit garder la même précision de mesure même lorsqu'il est soumis à des perturbations.
- **l'autonomie d'opération.** Le système d'inspection est destiné à être utilisé par des non spécialistes dans un lieu qui peut être éloigné de plusieurs centaines de kilomètres du laboratoire. L'opération du système doit donc être aussi automatisée que possible. En particulier, un problème délicat est l'étalonnage du système. Pour les instruments de précision, l'étalonnage reste souvent une affaire de spécialiste mais les spécialistes ne sont pas les seuls utilisateurs du système. D'autre part, on peut très bien calibrer le système en laboratoire avant son utilisation; cependant, si le système subit un choc pendant le transport ou bien encore s'il subit un changement de température important, ses paramètres varieront. Nous étudierons donc au chapitre 2 les différentes méthodes existantes pour le calibrage de notre système.
- **la flexibilité.** La flexibilité d'un système correspond à sa facilité de mise en place et à sa facilité d'utilisation. Une plus grande flexibilité permet un

temps de prise de mesures plus réduit. Cela est un avantage technique pour les utilisateurs du système mais aussi un avantage du point de vue économique. Un temps de prise de mesures réduit signifie un temps d'arrêt de production réduit.

La description du problème nous amène à formuler une première conceptualisation. Avec référence à la figure 1.2, le problème est de localiser un porteur robotisé et d'établir une carte de profondeur d'une surface qui caractérise une structure à inspecter. Plus précisément le système doit fournir, en fonction de cette structure et en fonction de l'état du porteur, la position et l'orientation du porteur par rapport à la surface de travail et une carte de profondeur de cette surface. À partir de la mesure d'éléments présents dans la scène, le système doit pouvoir ajuster ses paramètres automatiquement. La figure 1.3 donne une idée de la nature physique d'une structure typique ainsi que le résultat de son inspection.

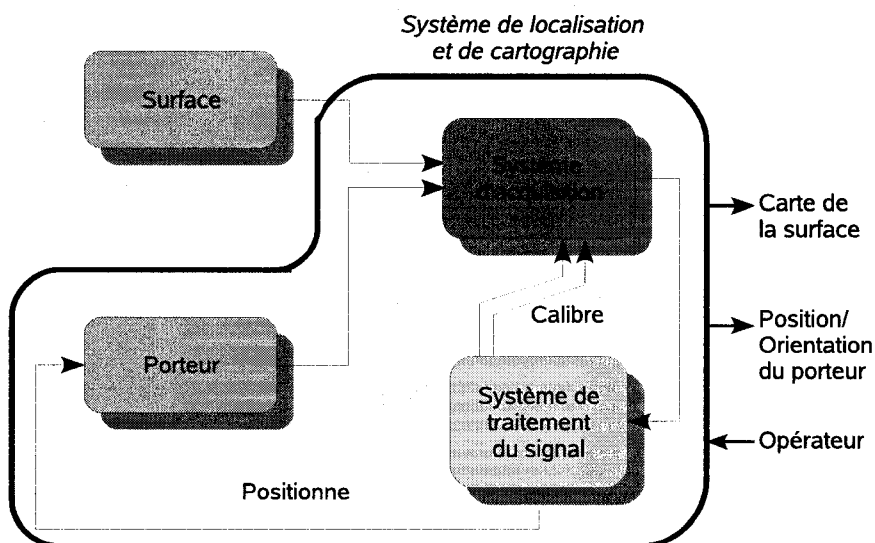


Figure 1.2 Le système à réaliser.

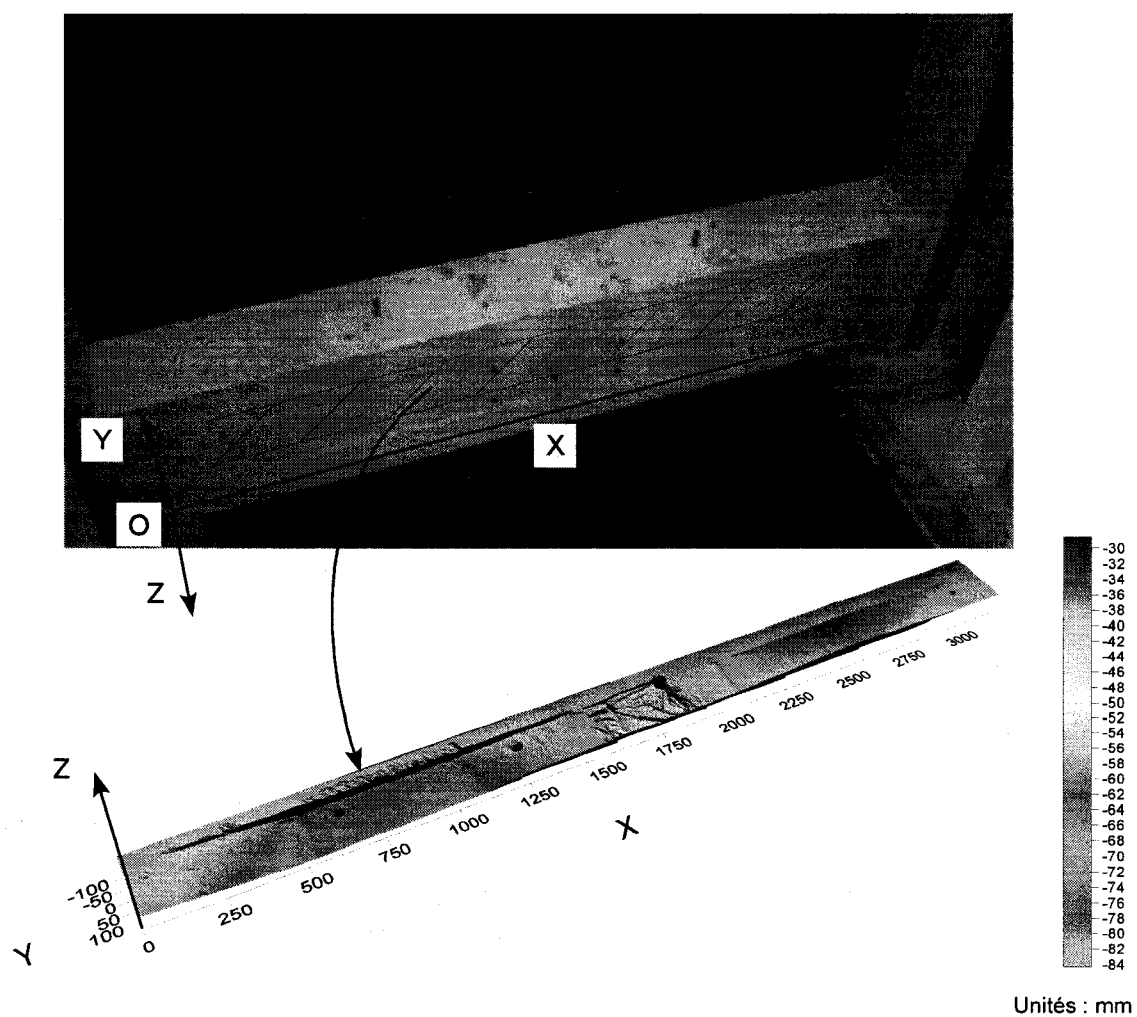


Figure 1.3 Exemple de structure à inspecter. La photographie en haut montre une structure en béton que l'on souhaite cartographier. L'image en bas montre une carte de cette même structure où la couleur correspond à une certaine élévation. La carte est géoréférencée dans un repère fixe (O, X, Y, Z), attaché à la structure.

1.2 Démarche et organisation du manuscrit

La démarche que nous allons entreprendre pour résoudre le problème qui nous est posé est la suivante:

- Revue de littérature afin de voir quelles contributions pourraient être mises à profit.
- Conception d'un cadre conceptuel et matériel pour la résolution du problème.
- Développement de l'approche proposée.
- Validation expérimentale en laboratoire des algorithmes choisis pour le traitement.
- Validation expérimentale sur site du système conçu.
- À partir des résultats expérimentaux, proposition d'améliorations du traitement effectué.

La thèse est organisée en 6 chapitres où nous développons chaque étape de notre démarche.

1.3 Contributions

Les contributions de cette thèse sont les suivantes:

- **Le développement d'un cadre conceptuel et matériel pour la formalisation et pour la résolution d'un problème d'ingénierie complexe et d'un fort intérêt industriel.**

Nous avons mené une étude afin de déterminer quels étaient les besoins et les

contraintes pour l'inspection de certaines structures immergées d'un barrage. Les résultats de cette étude ont conduit au choix de la technologie la mieux adaptée pour résoudre notre problème. La solution que nous proposons utilise un système de vision composé d'une caméra et de deux lasers qui projettent chacun un plan de lumière sur la surface inspectée. Le cadre conceptuel que nous avons développé utilise à la fois le modèle du système et la structure de l'environnement pour fournir au système un haut niveau d'intégrité et une grande robustesse aux perturbations.

- **La mise au point d'un système à la frontière de l'état de l'art qui est capable de résoudre ce problème d'une façon originale, non évidente et efficace.**

Afin de fournir une réponse au problème industriel qui nous était posé, nous avons mis au point un prototype du système de cartographie. Les deux premières difficultés à résoudre étaient la localisation du système dans un environnement de dimensions réduites puis la construction d'une carte de la structure inspectée en conditions perturbées. La solution proposée permet la résolution de ces deux problèmes. La scène observée est structurée par deux fils tendus parallèles et contenus dans un plan. Ces deux fils permettent de localiser le système de cartographie et forment une référence pour les mesures. Notre solution a été validée par des expériences en laboratoire et nous avons fait fonctionner le système de cartographie sur site à deux reprises avec succès. Les résultats expérimentaux obtenus donnent une première mesure de la performance du système et fournissent une preuve de concept de notre solution.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Dans son ensemble, le problème étudié est original et, dans son ensemble, n'a pas été traité par la littérature. Cependant, le problème comporte plusieurs facettes dont certaines ont déjà fait l'objet de travaux existants. Nous faisons ici la revue de ces travaux avec comme objectif de voir quelles sont leurs principales contributions et dans quelle mesure les solutions proposées peuvent nous aider à atteindre nos objectifs.

2.1 Systèmes de cartographie 3D en milieu sous-marin

Pour prendre des mesures en milieu sous-marin, il existe plusieurs types de capteurs, basés sur des principes physiques différents. Chaque capteur a un usage adapté à une certaine tâche de cartographie. La revue des technologies disponibles nous permettra de choisir le capteur adapté à notre application.

Les applications qui nécessitent l'utilisation de systèmes de cartographie sont nombreuses. On compte par exemple l'exploration et l'exploitation des fonds marins (George, 2006), (Stevenson, Nicholson, & Heyns, 2006), le maintien en état des constructions immergées (Tetlow & Spours, 1999), (Kondo & Ura, 2004) et les études scientifiques dans le domaine de la géologie (Mosher, Bigg, & LaPierre, 2006), l'archéologie, l'hydrologie (Gonzalez, Diaz-Pache, Mosquera, & Agudo, 2007) ou encore la biologie (Craig, Nareid, & Watson, 1999), (Negahdaripour & Madjidi, 2003), (Saez, Hogue, Escolano, & Jenkin, 2006).

La carte d'un fond marin peut être réalisée par un capteur basé sur le temps de vol d'une onde comme par exemple le sonar (acronyme de sound navigation and ranging) (George, 2006), (Mosher et al., 2006), (Coiras, Petillot, & Lane, 2007). Le sonar utilise des ondes acoustiques et les zones couvertes peuvent s'étendre de quelques dizaines de m^2 à plusieurs km^2 . Ce type de capteur a cependant l'inconvénient que les données collectées sont à basse résolution; de l'ordre de un à plusieurs centimètres. D'autre part, il est difficile voire impossible de l'utiliser dans des zones où l'accès est restreint par des obstacles puisque les ondes émises peuvent rebondir et ainsi fausser les mesures. Le LIDAR (light detection and ranging) est un autre capteur basé sur le temps de vol qui utilise une onde laser haute puissance. Les longueurs d'onde utilisées peuvent être dans le visible, l'ultraviolet ou l'infrarouge. Pour les applications sous-marines, on utilise plutôt une longueur d'onde de 532 nm (vert), car c'est la longueur d'onde la moins absorbée par l'eau. Embarqué dans un avion, un LIDAR permet la cartographie d'un fond marin jusqu'à une profondeur de 50 m sur une bande d'une largeur de 250 m avec une précision de 0,25 m (Kocak & Caimi, 2005).

La cartographie de zone à accès restreint peut très bien se faire avec des systèmes de vision stéréo passive. Le principe de fonctionnement est celui de la triangulation optique. Elle est dans ce cas dite passive car le système reçoit uniquement l'énergie émise par l'environnement. Les zones couvertes sont ainsi plus petites. Cette restriction est imposée par la faible visibilité des fonds marins. Le problème de mise en correspondance de points mesurés dans différentes images devient plus difficile à mesure que le contraste diminue. La référence (Negahdaripour & Madjidi, 2003) fait état d'une carte couvrant une zone de 30×30 m. Plusieurs cartes sont recalées en utilisant des techniques de SLAM (simultaneous localization and mapping). Quand la visibilité le permet, les données collectées peuvent avoir une plus forte résolution que les capteurs basés sur le temps de vol.

Le problème de mise en correspondance dans des images à faible contraste rencontré

par les systèmes passifs est résolu jusqu'à un certain point par les systèmes à triangulation optique active. Dans ce cas, le système de vision émet de l'énergie. Ces systèmes sont habituellement constitués d'une caméra et d'un projecteur de lumière structurée qui illumine la scène inspectée. Les systèmes actifs ont connu un fort développement depuis une vingtaine d'années (Blais, 2004), tout d'abord en laboratoire dans les années 80 puis de nombreuses applications commerciales sont apparues dans les années 90. Au niveau technologique, ces réalisations ont été rendues possible grâce au développement des capteurs CCD, des diodes laser et à l'augmentation de la puissance de calcul et de la capacité de stockage des ordinateurs. À un niveau plus conceptuel, le développement des techniques de graphisme par ordinateur pour la reconstruction 3D a permis de traiter plus efficacement un plus grand volume de données. Les capteurs actifs peuvent également fournir des résolutions élevées et une forte densité de mesure. Par contre, de la même façon qu'avec les systèmes passifs, la résolution décroît à mesure que la scène inspectée s'éloigne. Ces capteurs se révèlent donc être bien adaptés pour la cartographie locale. Les résolutions typiques obtenues pour les capteurs actifs varient de quelques centimètres à quelques dizaines de micromètres dans l'air.

Jusqu'à un certain point, les systèmes de vision actifs permettent d'inspecter une scène en eau trouble. Les plages de mesures vont de quelques centimètres à quelques mètres. Ce problème de visibilité, qui est finalement commun aux systèmes actifs et passifs, est étudié dans plusieurs travaux. Une première approche pour augmenter la plage de mesure est de synchroniser la caméra et le projecteur laser de telle sorte que seule la lumière réfléchiée par l'objet inspecté est captée par la caméra (range-gated laser scanner) (Jaffe, Moore, McLean, & Strand, 2001). Des méthodes plus récentes, comme celle présentée dans (Narasimhan & Nayar, 2005), proposent des solutions algorithmiques basées sur un modèle physique de propagation de la lumière dans un milieu diffusant.

On peut compter de nombreuses applications pour les systèmes à triangulation optique active telles l'inspection de zone portuaires (Kondo & Ura, 2004), (Chau-Chang, Shiahn-Wern, & Shi-Her, 2000), l'inspection de sites de travail (Czajewski & Sluzek, 1999), (Tetlow & Spours, 1999) ou encore l'établissement de cartes des fonds (Caimi, Kocak, & Asper, 1996), (Moore, Jaffe, & Ochoa, 2000), (Dalglish, Tetlow, & Allwood, 2004).

La plupart du temps, le système de cartographie est embarqué sur un robot mobile. L'exploitation des données collectées nécessite d'exprimer ces données dans un repère fixe lié à la scène. Ces données peuvent se présenter sous la forme d'un seul, ou bien de plusieurs ensembles de points si la carte est construite en plusieurs passes. Dans le cas de plusieurs ensembles de points, il se peut que les données soient exprimées dans des référentiels différents. Le problème est donc celui de recalcr les données dans un même référentiel. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature. La première est donnée par l'utilisation d'un système de positionnement global externe en association avec le système de navigation du robot. Comme système de positionnement global externe sous-marin, on trouve couramment les systèmes acoustiques (LBL (long baseline), SBL (short baseline), USBL (ultrashort baseline)), composés de une ou plusieurs balises en surface ou attachées au fond. La deuxième solution est de recalcr les nuages de façon algorithmique. Salvi, Matabosch, Fofi, et Forest (2007) font une revue des méthodes existantes. Les algorithmes les plus utilisés actuellement sont les algorithmes de type ICP (iterative closest point, plus proche voisin itératif (Rusinkiewicz & Levoy, 2001)). Dans ce cas, on prend pour hypothèse que le véhicule effectue un mouvement rigide. Ceci implique que pour que le recalage soit possible, il faut que les variations de la géométrie de la surface soient supérieures aux erreurs de mesure et aux erreurs de suivi de trajectoire du véhicule.

Enfin certains systèmes permettent d'établir des cartes volumiques. La référence (Watson, 2006) porte sur un système d'holographie. Originellement conçu pour

l'inspection d'installations d'exploitations pétrolières et gazières sous-marines, le système a été adapté pour le comptage de particules en suspension comme le plancton. Les particules détectées ont une taille de l'ordre de $10\text{ }\mu\text{m}$ à quelques millimètres. Ce type de système permet de collecter des données dans un faible volume d'eau; typiquement un cylindre de 500 mm de long et d'un diamètre de 90 mm. L'image du volume inspectée est ensuite reproduite en laboratoire. Une exploitation quantitative des données peut ensuite être réalisée par voie logicielle utilisant des techniques de traitement d'image.

2.2 Calibrage des systèmes de cartographie 3D basés sur la lumière structurée

Une des conditions nécessaires à l'obtention d'une carte 3D précise est que la valeur des paramètres du système de mesure soit bien connue. L'opération visant à connaître ces paramètres est habituellement référée sous le nom de calibrage ou étalonnage. Le calibrage est d'autant plus un point clef pour notre système qu'il est destiné à être utilisé sur site; il faut donc disposer d'une méthode qui soit facile à mettre en oeuvre.

Le système que nous considérons se compose d'une caméra à matrice CCD et d'un laser qui projette un plan de lumière structurée. La caméra et le projecteur laser sont fixés rigidement l'un à l'autre. Le principe d'opération du système considéré est le même que celui que nous décrivons au chapitre 3 : le système translate devant la scène à inspecter suivant un mouvement rigide; à intervalle régulier, le système mesure les coordonnées 3D de points de la scène. Les modèles de la caméra et du projecteur laser sont également décrits au chapitre 3.

Un grand nombre de méthodes de calibrage a déjà été proposé dans la littérature.

Ce grand nombre de méthodes reflète la variété des systèmes mais aussi la difficulté de mettre au point une méthode qui soit à la fois performante, flexible et économique. Les articles revus peuvent être regroupés en trois catégories qui se distinguent par le traitement proposé. Dans la première catégorie, on retrouve comme articles typiques les développements de Chen et Kak (1987), Reid (1996) et Huynh (1997). Les auteurs résolvent le problème du calibrage dans un cadre de géométrie projective. La deuxième catégorie d'approche (McIvor, 1999) repose sur une formulation non linéaire du problème. Dans la troisième catégorie, on retrouve les travaux de Jokinen (1999) et de Strobl et al. (2004). Les auteurs qualifient leur méthode d'autocalibrante puisque très peu d'hypothèses de départ et très peu d'interventions de la part d'un opérateur sont nécessaires pour estimer les paramètres.

2.2.1 Calibrage dans un cadre projectif

Chen et Kak ont été les premiers à modéliser l'ensemble du système de cartographie en utilisant la géométrie projective. Le modèle du système fait intervenir les repères représentés à la figure 2.1:

- le repère monde (O_W, X_W, Y_W, Z_W) est un repère 3D fixe lié à la scène,
- le repère caméra (O_C, X_C, Y_C, Z_C) est un repère 3D lié à la caméra,
- le repère image (u, v) est un repère 2D lié au plan image,
- le repère laser (O_{2L}, X_{2L}, Y_{2L}) est un repère 2D contenu et lié au plan laser,
- le repère laser (O_L, X_L, Y_L, Z_L) est un repère 3D lié au plan laser et qui coïncide avec le repère $(O_{2L}, X_{2L}, Y_{2L}, Z_{2L})$.

Dans la suite de ce document, nous utiliserons la notation \tilde{P} pour désigner les coordonnées homogènes d'un point P . Les coordonnées homogènes s'obtiennent en

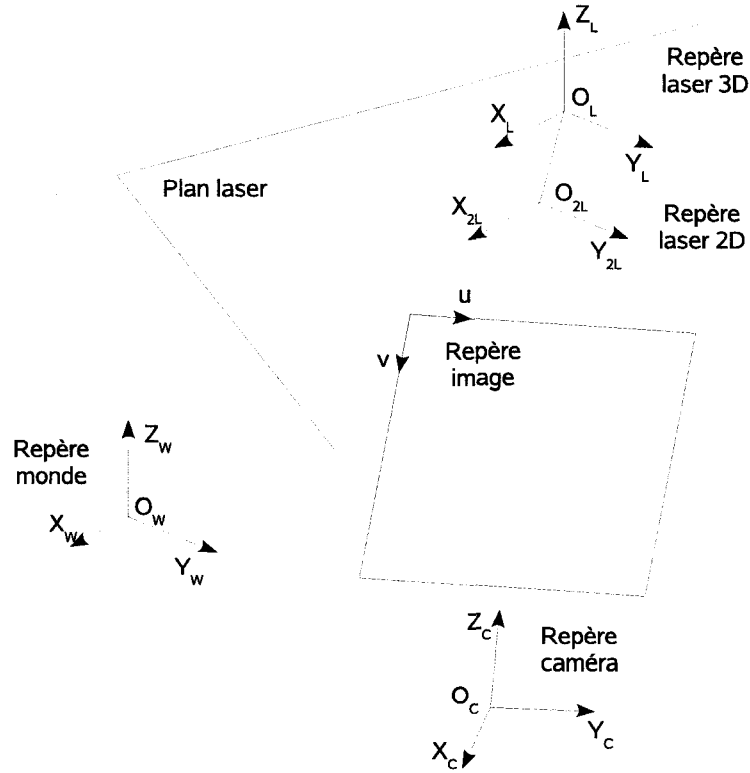


Figure 2.1 Les repères du modèle de Chen & Kak, Reid et Huynh (adapté de (Chen & Kak, 1987)).

ajoutant un 1 à la suite des coordonnées cartésiennes du point. On aura par exemple $[\tilde{P}]_{CAM} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$. Ou encore $[\tilde{P}]_{IMG} = [u \ v \ 1]^T$

Le modèle utilisé peut se décrire par une suite de transformations entre les repères représentés à la figure 2.1. La transformation du repère image au repère laser 2D peut être représentée par une homographie plan-plan. De manière générale, une homographie désigne toute transformation \mathcal{H} de \mathbb{P}^n où \mathbb{P}^n désigne l'espace projectif de dimension n , linéaire en coordonnées projective et inversible. Elle est décrite par une matrice \mathbf{H} non singulière de taille $(n+1) \times (n+1)$ telle que l'image de $[P]_B$ est $[P]_A$:

$$[P]_A = \mathbf{H}[P]_B \quad (2.1)$$

On a donc la relation:

$$[\tilde{P}]_{LASER\ 2D} = \mathbf{H}_{3 \times 3} [\tilde{P}]_{IMG} \quad (2.2)$$

Puisque les repères laser 2D et 3D coïncident et que le plan (X_L, Y_L) coïncide avec le plan laser, il suffit de rajouter une coordonnée nulle suivant Z_L pour passer au repère laser 3D:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{LASER} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}_{LASER\ 2D} \quad (2.3)$$

Le passage du repère laser 3D au repère monde se fait par une matrice de transformation homogène $\mathbf{T}_{4 \times 4}$:

$$[\tilde{P}]_{MONDE} = \mathbf{T}_{4 \times 4} [\tilde{P}]_{LASER} \quad (2.4)$$

Finalement le modèle peut s'écrire:

$$[\tilde{P}]_{MONDE} = \mathbf{T}_{4 \times 3} [\tilde{P}]_{IMG} \quad (2.5)$$

où $\mathbf{T}_{4 \times 3}$ est une matrice 4×3 qui encapsule les transformations successives entre les différents repères du modèle.

Pour calibrer le système composé de la caméra et du projecteur laser, il faut déterminer les paramètres de la matrice $\mathbf{T}_{4 \times 3}$. En théorie, les éléments de $\mathbf{T}_{4 \times 3}$ peuvent être estimés à partir de quatre points coplanaires non colinéaires connus dans le repère monde et mesurés dans l'image. En pratique, il est difficile de viser précisément un point connu avec le projecteur laser puisque le système de mesure se déplace à des intervalles discrets. Chen et Kak généralisent la méthode pour estimer $\mathbf{T}_{4 \times 3}$

à partir de l'observation de points contenus dans des droites connues. Par la suite Reid étend la méthode à partir de l'observation de points contenus dans des plans connus.

Dans ces deux méthodes, la pose du système de mesure dans un repère monde est connue par le biais d'un système de positionnement externe: un bras robotique calibré dans le cas de Chen et Kak et le système de navigation d'un robot mobile dans le cas de Reid. Ceci permet donc un mouvement du système de mesure afin de cartographier la scène.

L'intérêt de cette approche réside dans sa simplicité conceptuelle. L'ensemble du système est modélisé par une matrice de transformation dont les éléments sont estimés par la résolution d'un système linéaire. Cependant l'utilisation d'un modèle linéaire suppose que l'image donnée par la caméra ne comporte pas de distorsions; ce qui n'est pas toujours vérifié en pratique.

Huynh (1997; 1999) développe, dans le même cadre projectif, une méthode pour estimer $T_{4 \times 3}$ directement à partir de la mise en correspondance de points et non plus à partir de la mise en correspondance de lignes avec des points ou de plans avec des points. Comme il est difficile de viser des points connus avec le projecteur, il propose de construire des points de calibrage à partir de l'observation de quatre ensembles non coplanaires de trois points colinéaires. La méthode utilise la conservation du birapport de quatre points situés sur des droites concourantes pour calculer les coordonnées de points appartenant au plan laser exprimées dans un repère monde. L'originalité de la méthode vient de l'utilisation du birapport pour construire les points de calibrage.

L'idée de Huynh est reprise dans les références (Wei, Zhang, & Xu, 2003), (Zhou & Zhang, 2005) et (Zhou, Zhang, & Jiang, 2005) où les auteurs calibrent uniquement les paramètres de l'équation du plan laser. La caméra est modélisée par une projection

perspective avec distorsions. Ce modèle est identique à celui que nous utilisons dans cette étude. Nous le décrivons en détail dans les sections 3.3.1 et 3.3.2. Dans les travaux cités, les auteurs supposent que la caméra est déjà calibrée avec une méthode existante (Tsai, 1987; Heikkila & Silven, 1997; Zhang, 1999 par exemple). Dans ce cas l'approche perd de son intérêt puisque la caméra et le plan laser sont calibrés séparément.

2.2.2 Calibrage via une modélisation non linéaire

McIvor remarque que la plupart du temps, les caméras utilisent des filtres optiques très sélectifs afin de ne capter que le signal du projecteur laser. Dans ce cas, il est difficile de calibrer la caméra avec des méthodes classiques puisque la cible de calibrage n'est pas visible. Par ailleurs, le calibrage séparé de la caméra et du projecteur laser résulte en un ensemble de paramètres sous optimal. Ce problème est traité dans (McIvor, 1999) puis plus en détail dans (McIvor, 2002).

Le dispositif expérimental utilisé se compose du système de vision, d'une table de translation et d'une cible de calibrage cubique. Trois faces de cette cible sont visibles par la caméra. Des cercles blancs sont disposés à des positions connues sur chaque face du cube. Seule la longueur d'onde de la lumière émise par le projecteur est captée par la caméra au moyen d'un filtre optique. Ainsi seule la ligne laser est visible par la caméra. Quand la ligne laser tombe sur un cercle blanc de la cible de calibrage, la lumière captée par la caméra est plus intense. Ceci permet de reproduire une image de la cible qui translate devant le système de vision.

Le modèle utilisé est celui que nous décrivons aux sections 3.3.1 et 3.3.2. Les paramètres estimés sont les paramètres intrinsèques de la caméra, les paramètres du plan laser et la direction du vecteur de translation de la table de translation.

Le problème d'estimation des paramètres est posé sous la forme d'un problème d'optimisation non linéaire et résolu par des techniques classiques (l'algorithme de Levenberg-Marquadt par exemple). Un estimé initial est obtenu en résolvant un système qui est une approximation linéaire. La fonction coût minimisée est la somme des distances géométriques entre les points mesurés et les points estimés par le modèle:

$$\sum_{i=1}^N \|[P_i]_{IMG} - [\hat{P}(\hat{\gamma}, [P_i]_{CIBLE})]_{IMG}\|^2 \quad (2.6)$$

où $[P_i]_{IMG}$ est le point de calibrage i exprimé dans le repère image et $[\hat{P}(\hat{\gamma}, [P_i]_{CIBLE})]_{IMG}$ est la valeur estimée du point de calibrage P_i basé sur l'estimé courant des paramètres $\hat{\gamma}$ et des coordonnées de $[P_i]_{CIBLE}$.

2.2.3 Auto-calibrage

Afin de se libérer des cibles de calibrage peu pratiques pour une utilisation sur site, une dernière catégorie d'approche tente d'estimer les paramètres du plan laser en mesurant une scène à partir de plusieurs points de vue et à partir de la connaissance de valeurs approximatives des paramètres du plan laser et d'hypothèses sur la scène, faites a priori. Cette technique a été proposée initialement par Jokinen (1999).

Dans (Jokinen, 1999), la géométrie de la scène doit avoir une certaine complexité pour que la méthode converge et le système de mesure doit effectuer des déplacements rigides lors de la cartographie. L'intérêt de cette méthode est que très peu d'hypothèses sont nécessaires pour calibrer le plan laser: la rigidité de la scène et du mouvement. Dans notre cas, l'approche n'est pas utilisable puisque nous ne disposons pas de scène très structurée et nous ne pouvons pas mesurer la scène depuis plusieurs points de vue différents car il n'est pas facile d'actionner l'unité de mesure sous l'eau aussi bien pour des raisons techniques que économiques.

Strobl et al. (2004) reprennent l'approche proposée par Jokinen et la simplifient en rajoutant une hypothèse: l'estimé des paramètres du plan laser est actualisé en fonction de la déformation d'un plan de la scène mesuré avec des paramètres grossiers connus a priori. Cette dernière approche est similaire aux méthodes de correction de distorsions d'une image telles que celles présentées dans (Brand, Mohr, & Bobet, 1993) ou encore (Devernay & Faugeras, 2001). Ces méthodes corrigent les distorsions d'une lentille à partir de la déformation de droites projetées dans l'image. Ici, la même idée est appliquée mais sur un plan en trois dimensions. Le dispositif expérimental de Strobl et al. utilise un système de localisation externe afin de connaître la pose de l'unité de mesure dans un repère fixe lié à la scène. Ils évitent ainsi de résoudre le problème de mise en correspondance de Jokinen. L'approche est intéressante car conceptuellement simple. Mais son utilisation dans notre cas n'est pas non plus possible car l'unité de mesure doit elle-même déterminer sa localisation. De plus, pour les mêmes raisons que précédemment, nous voulons éviter d'actionner l'unité de mesure sous l'eau.

2.3 Calcul et manipulation d'incertitude en robotique et en vision par ordinateur

Le système que nous visons à mettre au point évolue dans un environnement incertain. Il est donc important qu'on puisse établir un niveau de confiance dans les résultats qu'il fournit. On veut par exemple connaître la pose du porteur mais aussi connaître l'incertitude sur cette pose. Ou encore, on veut établir une carte de l'environnement dans lequel le porteur se déplace mais aussi connaître l'incertitude sur la localisation des éléments de cet environnement. La connaissance des incertitudes de mesure permet de prédire si une opération peut être exécutée avec un certain degré de confiance ou non.

Le calcul et la manipulation d'incertitude occupent une place centrale dans plusieurs travaux en robotique et en vision par ordinateur. Ainsi Smith et Cheeseman (1986) s'intéressent au transfert de l'incertitude sur la relation spatiale entre deux entités au travers de plusieurs référentiels. C'est à notre connaissance le premier travail traitant du problème de SLAM (simultaneous localization and mapping) où le robot cherche à se localiser dans un environnement dont il construit la carte à mesure qu'il se déplace. Smith et Cheeseman définissent des opérations d'agrégation et de fusion de ces incertitudes. L'agrégation permet de propager l'incertitude afin de prévoir le niveau de confiance d'une opération que l'on projette d'effectuer tandis que la fusion permet de réduire l'incertitude d'une relation en utilisant l'information délivrée par plusieurs capteurs. Les auteurs utilisent le filtrage de Kalman étendu pour la fusion.

Beaucoup de travaux de recherche en vision par ordinateur appliquée à la robotique portent sur la reconnaissance et l'estimation d'entités géométriques d'un niveau de complexité plus élevé que celui d'un point. On ne veut pas seulement estimer les coordonnées de points de la scène mais on veut aussi estimer les paramètres de trièdres ou de cubes par exemple. Une application typique est la navigation d'un robot dans un environnement industriel tel qu'une centrale nucléaire. Ce type d'environnement contient habituellement des tuyaux, des murs et différents repères aux formes géométriques simples. Durrant-Whyte (1988) modélise la mesure d'un point par une variable aléatoire et remarque que l'on ne peut pas généraliser directement l'incertitude sur une variable aléatoire à une entité géométrique d'une complexité supérieure (trièdre, cube...). Par exemple on ne peut pas traiter l'incertitude sur un cube comme on traite l'incertitude sur un point car le cube doit respecter certaines contraintes définies par sa forme. Durrant-Whyte propose de modéliser l'incertitude comme une partie intrinsèque d'une entité géométrique et propose aussi des mécanismes pour manipuler cette incertitude. Il introduit les concepts de topologie stochastique et d'invariant stochastique. Pour être consistante, la manipulation

de l'incertitude doit maintenir l'invariance de la topologie stochastique d'une entité géométrique. Par la suite Pennec (1996) formalise cette approche et généralise les méthodes statistiques classiques aux entités géométriques de complexité supérieure. Dans sa thèse, Pennec montre une application de sa théorie au recalage d'images médicales et au recalage de représentations 3D de molécules.

Habituellement les auteurs prennent l'hypothèse d'un bruit gaussien isotrope indépendant et identiquement distribué. Dans ce cas, Kanatani démontre que les approches traditionnelles d'estimation aux moindres carrés basées sur des mesures issues d'un capteur de vision sont biaisées. Il développe une méthode de renormalisation qui permet à la fois de diminuer ce biais et d'estimer l'incertitude sur les quantités estimées. Il applique sa méthode au cas de l'estimation de l'incertitude d'une rotation optimale (Kanazawa & Kanatani, 1995), d'un plan (Kanazawa & Kanatani, 1995) ou encore d'une homographie (Kanatani, Ohta, & Kanazawa, 2000). Ses résultats sont regroupés dans la monographie (Kanatani, 1996).

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons revu différents types de systèmes de cartographie 3D utilisés en milieu sous-marin. Les systèmes de vision basés sur la lumière structurée se trouvent être les mieux adaptés pour l'application que nous visons. Ils permettent d'effectuer des mesures dans des conditions de visibilité réduite et la résolution et la densité de mesure des cartes délivrées sont compatibles avec les besoins d'une inspection de précision.

Au chapitre 1, nous avons énoncé des qualités désirables d'autonomie et de flexibilité pour un système de mesure. D'un autre côté, le calibrage est une procédure nécessaire pour garantir la précision des mesures. Nous avons vu dans ce chapitre qu'un certain

nombre de méthodes de calibrage existent mais les procédures se déroulent la plupart du temps en laboratoire, sont exécutées par un spécialiste et nécessitent l'utilisation de cibles ou de dispositifs externes particuliers. Nous verrons au chapitre suivant l'approche que nous avons adopté pour résoudre ce problème.

Le dernier sujet que nous avons revu a porté sur l'évaluation et la manipulation de l'incertitude de mesure. Il apparaît que la littérature fournit un certain nombre de solutions pour la résolution de ce problème. Il s'agit maintenant de savoir comment elles s'appliquent à notre cas. Comme nous allons le voir, notre scène est peu structurée et donc elle contient peu d'information. Il sera donc nécessaire d'adopter un traitement utilisant plusieurs images afin de filtrer les mesures et d'obtenir un estimé précis de leur incertitude.

Nous reformulons maintenant le problème énoncé au chapitre 1 en trois points:

- Le problème est de localiser un porteur robotisé et d'établir une carte de profondeur d'une surface qui caractérise la structure à inspecter. Plus précisément le système doit fournir, en fonction de cette structure et en fonction de l'état du porteur, la position et l'orientation du porteur par rapport à la surface de travail et une carte de profondeur de cette surface.
- Chaque mesure d'un point de la surface devra avoir une précision voulue. La question est de savoir combien d'images sont nécessaires pour atteindre cette précision étant donné un certain niveau de bruit sur les mesures prises dans l'image et une certaine incertitude sur les paramètres du système. Nous voudrions aussi fournir un estimé de l'erreur de mesure en fonction de l'incertitude sur les paramètres du système et du bruit de mesure dans l'image. Comme le temps nécessaire pour la collecte des données doit être réduit au maximum, notamment pour des raisons économiques, nous pouvons reformuler la question de la façon suivante: quelle est le traitement du signal approprié permettant

d'atteindre la précision voulue en un nombre minimum d'images ?

- Dans une phase qui précède la cartographie, le problème est de calibrer les paramètres du système de mesure à partir d'éléments déjà présents dans la scène.

CHAPITRE 3

APPROCHE PROPOSÉE

Nous proposons la structure conceptuelle et matérielle d'un système pour la résolution du problème étudié. Nous développons ensuite un modèle mathématique du système qui nous permettra d'exploiter le potentiel de notre approche de solution.

3.1 Cadre conceptuel

La figure 3.1 présente un cadre conceptuel que nous proposons pour la solution de notre problème. Suivant ce cadre, le système de cartographie à mettre en place se compose de quatre unités:

- l'interface homme-machine,
- l'unité de mesure,
- l'unité de traitement,
- le porteur.

La fonction de l'interface opérateur est de communiquer avec l'algorithme de traitement de façon à l'initialiser et à récupérer les informations recherchées: carte de la surface, position-orientation du porteur, paramètres de l'unité de mesure.

La fonction de l'unité de mesure est de fournir des mesures assez riches pour déterminer ces informations. L'unité de mesure est pour nous le capteur qui réalise effectivement la mesure mais aussi les éléments structurants qu'il faudra introduire afin que cette mesure soit significative.

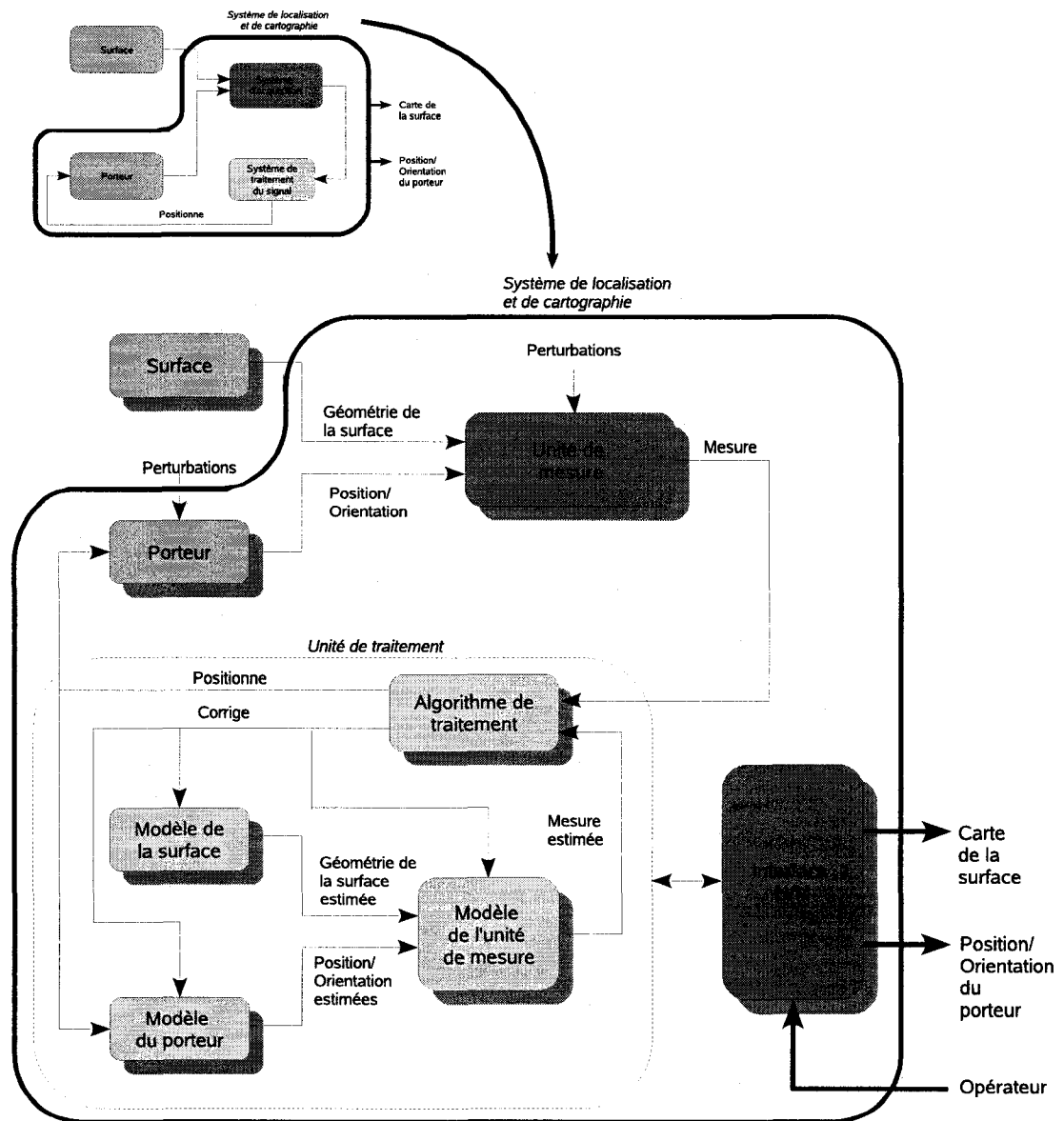


Figure 3.1 Cadre conceptuel de l'approche proposée.

L'unité de traitement a quant à elle trois fonctions: positionner le porteur pour une meilleure collecte des mesures, déterminer la position-orientation du porteur par rapport à la surface de travail ainsi que la carte de profondeur de cette surface et ajuster les paramètres du modèle de l'unité à partir des mesures fournies par l'unité de mesure.

3.2 Conception du système de cartographie

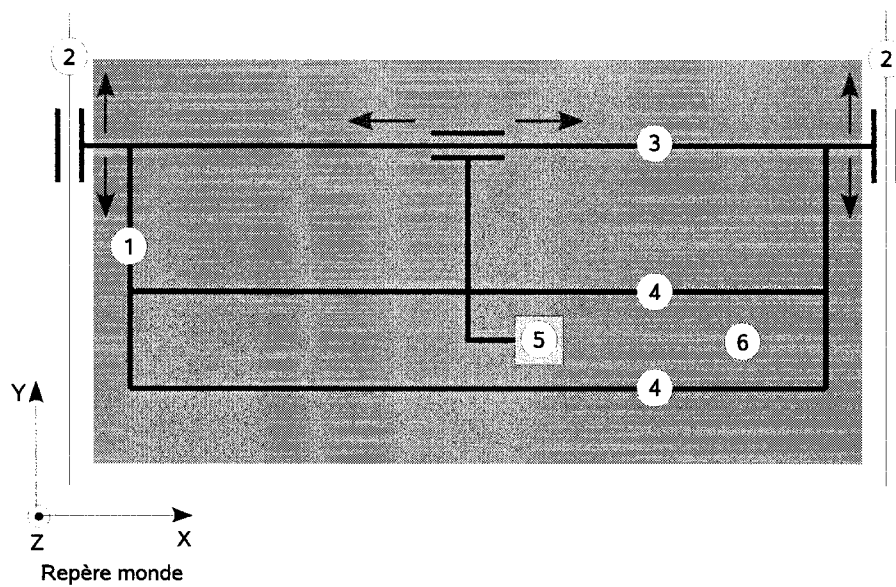
La structure physique du système de cartographie est composé du porteur et de l'unité de mesure.

3.2.1 Le porteur

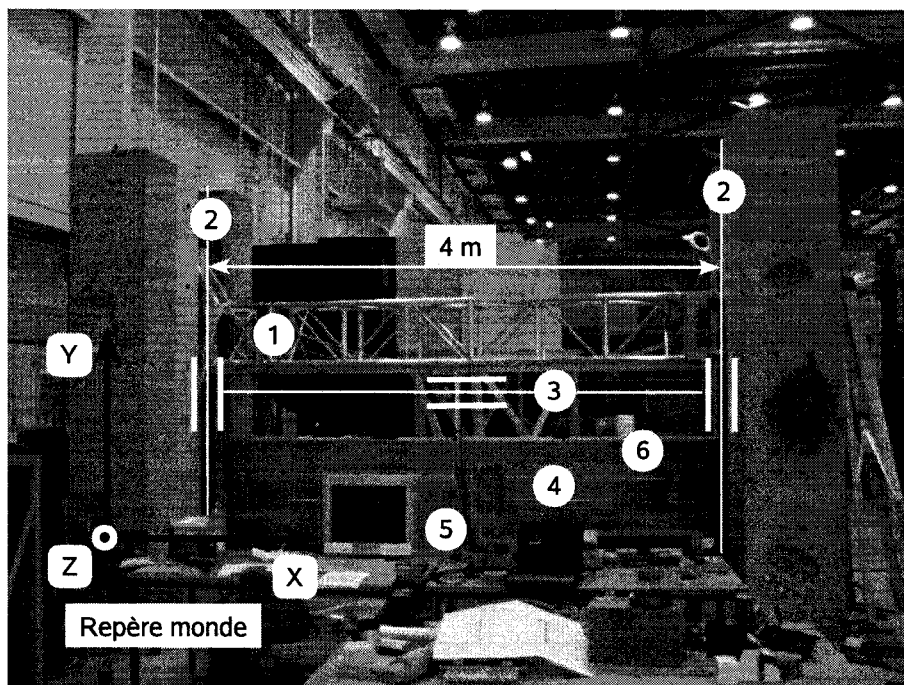
Le porteur permet d'atteindre la surface à inspecter et de se déplacer devant cette même surface afin d'en construire la carte. La figure 3.2 montre le schéma de concept et la photographie du porteur qui a été réalisé à l'IREQ. Le porteur doit être vu comme un porte outils modulaire : d'autres instruments peuvent être montés dessus et sa géométrie peut être adaptée à la zone où se tient l'inspection. Sa conception est décrite en détail dans (Beaudry, Mirallès, Gagné, & Blain, 2006).

Le porteur est constitué d'un treillis rigide et fournit deux degrés de liberté à l'unité de mesure:

- la translation selon l'axe vertical permet de se placer au niveau de la surface à inspecter,
- la translation selon l'axe longitudinal permet de cartographier la surface.



(a) Schéma de concept du porteur.



- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. Porteur cartésien rigide | 4. Fils |
| 2. Guide latéral | 5. Unité de mesure |
| 3. Guide longitudinal | 6. Surface à inspecter |

(b) Le porteur placé devant une surface à inspecter.

Figure 3.2 Le porteur.

3.2.2 L'unité de mesure

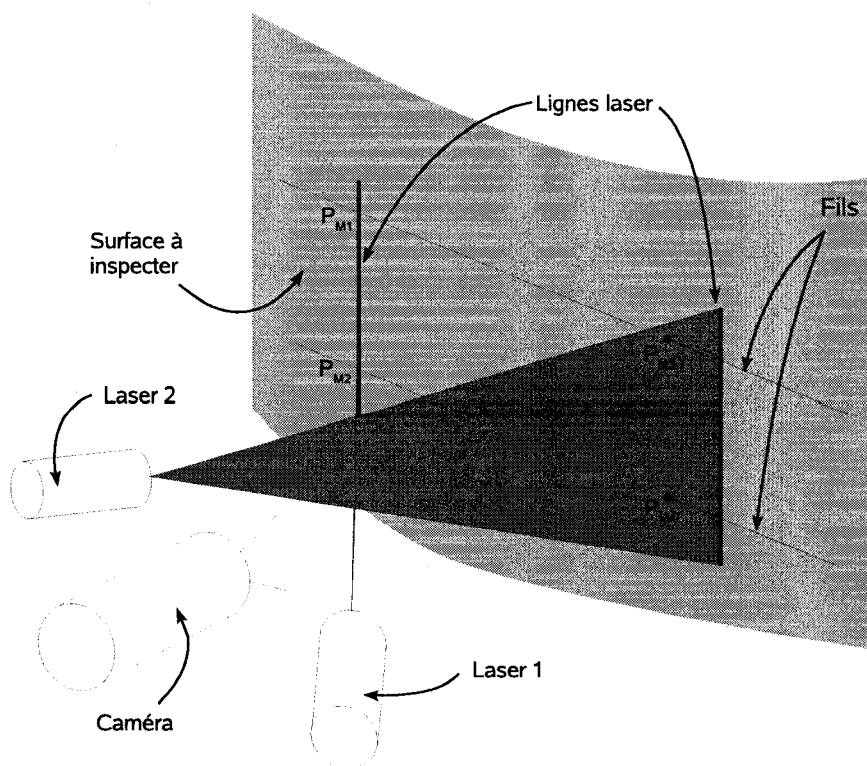
Tel qu'illustré à la figure 3.3, l'unité de mesure que nous avons conçue comporte les éléments suivants:

- une plate-forme de capteurs: elle est constituée d'une caméra et de deux lasers qui projettent chacun un plan de lumière. Les lasers sont fixés rigidement à la caméra. Comme nous le verrons par la suite, un plan de lumière suffit pour la cartographie mais il faut un minimum de deux plans de lumière afin de pouvoir localiser l'unité de mesure.
- deux fils installés le long de la structure à inspecter (éléments structurants).

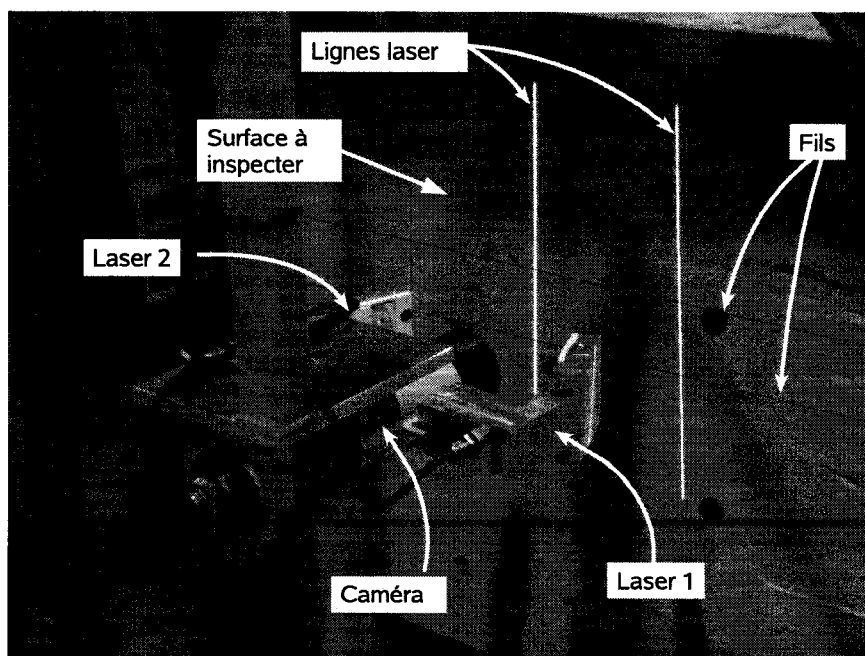
3.2.3 Principe d'opération

Le principe d'opération de l'unité de mesure montée sur le porteur rigide cartésien est le suivant:

1. Le porteur translate selon l'axe vertical afin de placer l'unité de mesure à la hauteur de la surface à inspecter.
2. Une fois que le porteur est arrivé devant la surface, on bloque sa translation selon l'axe vertical.
3. L'unité de mesure ajuste ses paramètres internes en se basant sur des éléments de la scène.
4. L'unité de mesure translate selon l'axe longitudinal afin de construire la carte de la surface. La translation peut se faire de façon continue ou bien pas à pas. Dans ce dernier cas, le système prend plusieurs mesures à chaque arrêt afin



(a) Schéma de concept de l'unité de mesure.



(b) Photographie de l'unité de mesure.

Figure 3.3 L'unité de mesure.

d'augmenter le niveau de confiance dans les mesures. Le principe d'opération de l'unité est le suivant:

- localisation de l'unité: les plans projetés par les lasers coupent les fils en quatre points notés P_{M1} , P_{M2} , P_{M3} et P_{M4} à la figure 3.3(a). À partir de la position de ces quatre points dans l'image donnée par la caméra, on détermine l'orientation et la position de l'unité de mesure relativement au plan des fils.
- cartographie de la surface: les plans projetés par les lasers sur la surface à inspecter apparaissent sous la forme de lignes dans l'image. À partir des paramètres du système et des coordonnées des points de ces lignes notés $[P_S]_{IMG}$, on détermine par triangulation les coordonnées 3D de ces points dans le repère lié à l'unité. Les lignes sont indexées au moyen d'un encodeur optique qui donne la position de l'unité de mesure sur le rail du porteur.
- on effectue ensuite un changement de repère pour obtenir les coordonnées de ces points dans le repère lié aux fils. La figure 3.4 montre cette transformation sous forme de diagramme.

La carte de la surface est ainsi construite ligne par ligne et est représentée par le système de cartographie sous la forme d'un nuage de points 3D.

5. La carte ainsi obtenue couvre une bande de la surface d'une certaine largeur. Si plusieurs bandes sont nécessaires pour cartographier l'ensemble de la surface, alors on revient à la première étape pour déplacer l'unité de mesure à la hauteur d'une zone contigüe. Notons que pour que les bandes puissent être recalées dans un même repère, il faut que la translation verticale du porteur se fasse dans un même plan.

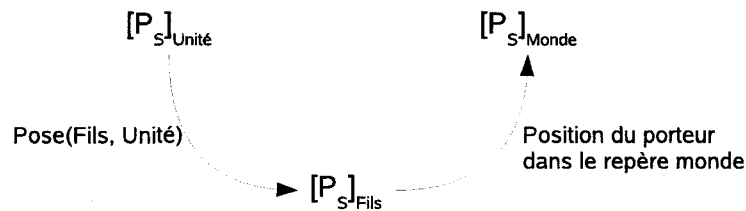


Figure 3.4 Calcul des coordonnées 3D d'un point de la surface à inspecter.

La figure 3.5 montre un schéma de la chaîne d'acquisition. Le système est contrôlé par deux ordinateurs:

- un premier ordinateur est relié à l'unité de mesure. Il récupère les images de la caméra et les traite pour localiser l'unité et cartographier la surface. Le traitement se fait en continu au taux de rafraîchissement de la caméra.
- un deuxième ordinateur contrôle les deux axes du porteur. Lors de la translation de l'unité de mesure selon l'axe longitudinal, l'ordinateur du porteur transmet à intervalles réguliers la position de l'unité en (X, Y) à l'ordinateur relié à l'unité de mesure et lui demande de mettre en mémoire une ligne de profil. Cette information est nécessaire pour exprimer les coordonnées des lignes laser dans un repère fixe attaché à la scène.

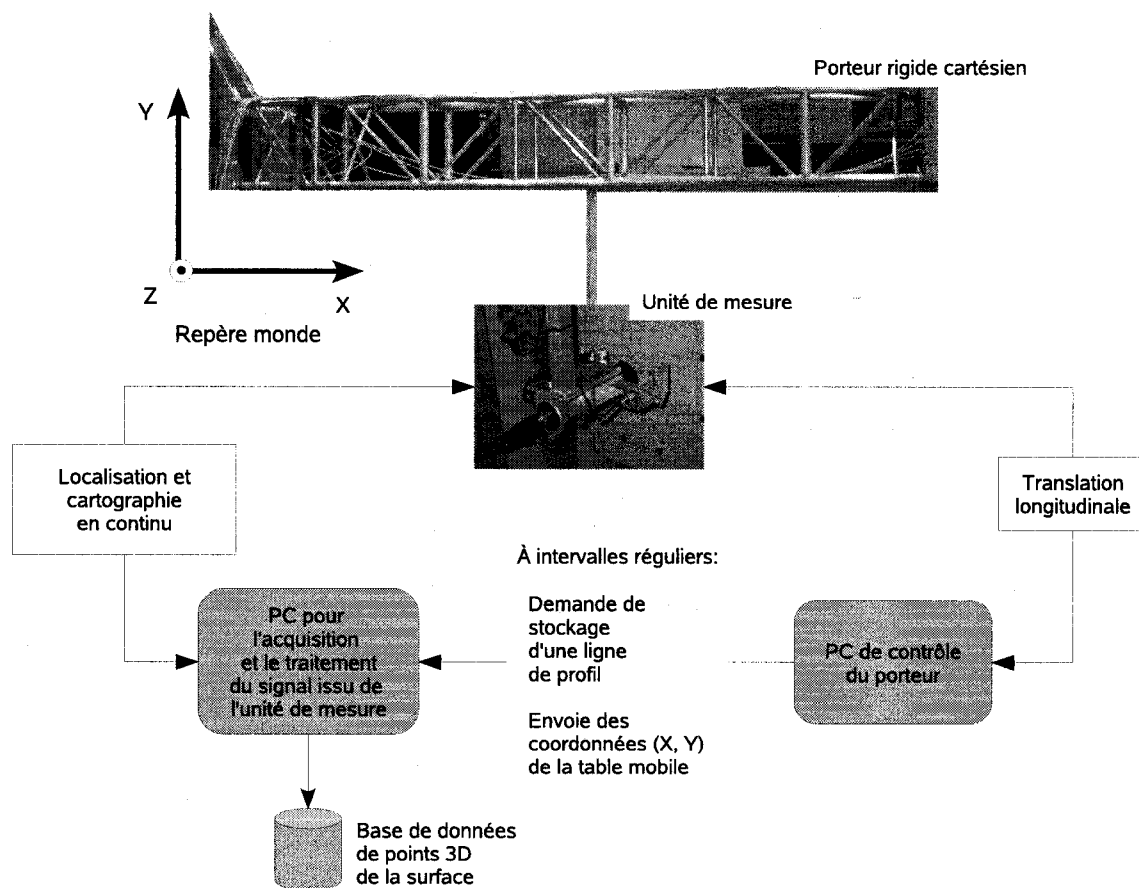


Figure 3.5 La chaîne d'acquisition.

3.3 Modélisation des composantes et de l'ensemble de l'unité de mesure

Le modèle de l'unité de mesure permettra de définir les opérations illustrées à la figure 3.6. Nous commençons par modéliser chaque composante de l'unité de mesure prise séparément puis nous donnons le modèle de l'unité de mesure.

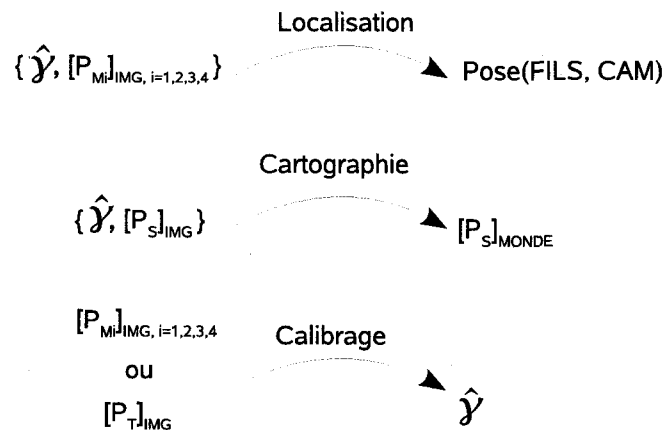


Figure 3.6 Les opérations réalisées par le système de cartographie.

3.3.1 Modélisation d'une caméra à base de CCD

3.3.1.1 Caméra perspective linéaire

On peut définir une caméra CCD comme un capteur qui réalise une projection du monde tridimensionnel sur une surface sensible bidimensionnelle.

Le modèle de la caméra est une application mathématique qui met en relation les coordonnées d'un point de la scène avec les coordonnées de ce point projeté dans l'image. Les modèles de caméras sont multiples. Parmi ces modèles, la projection perspective est le modèle le plus utilisé pour les caméras industrielles courantes, car il est le plus valide expérimentalement si on néglige ou corrige les effets non linéaires introduits par les systèmes optiques réels (Lingrand, 1999).

Avec référence à la figure 3.7, une projection perspective se définit comme la projection de centre C du monde 3D sur le plan image 2D. La distance entre le centre optique et le plan image est la distance focale f . La ligne qui passe par le centre de projection et qui est orthogonale au plan image est l'axe optique. L'axe optique coupe le plan image au point C_0 appelé point principal. La projection d'un point P de la scène est définie comme l'intersection du rayon optique $[CP]$ avec le plan image.

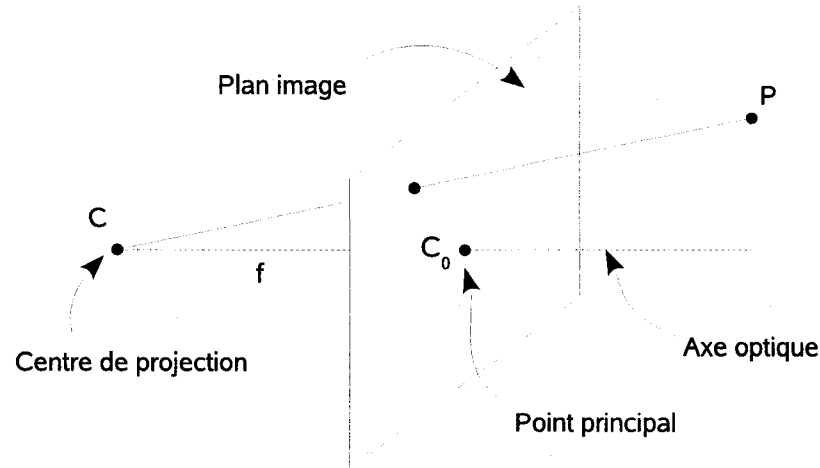


Figure 3.7 Modèle de la projection perspective, adapté de (Hartley & Zisserman, 2003).

Le modèle de la projection perspective fait intervenir les repères représentés à la figure 3.8:

- le repère caméra (O_C, X_C, Y_C, Z_C) est un repère de l'espace 3D attaché à la caméra. Il a pour origine le centre de projection. Son axe Z_C est dirigé selon l'axe optique qui est orthogonal au plan image.
- le repère rétinien (C_0, x_r, y_r) est un repère 2D lié au plan image avec pour origine le point principal.
- le repère image (O_i, u_i, v_i) est un repère 2D lié au plan image avec pour origine le coin supérieur gauche de celle-ci. Le plan (u_i, v_i) est parallèle au plan (X_C, Y_C) .

Y_C). Le repère image permet de référencer les points projetés par la caméra en unité de pixel.

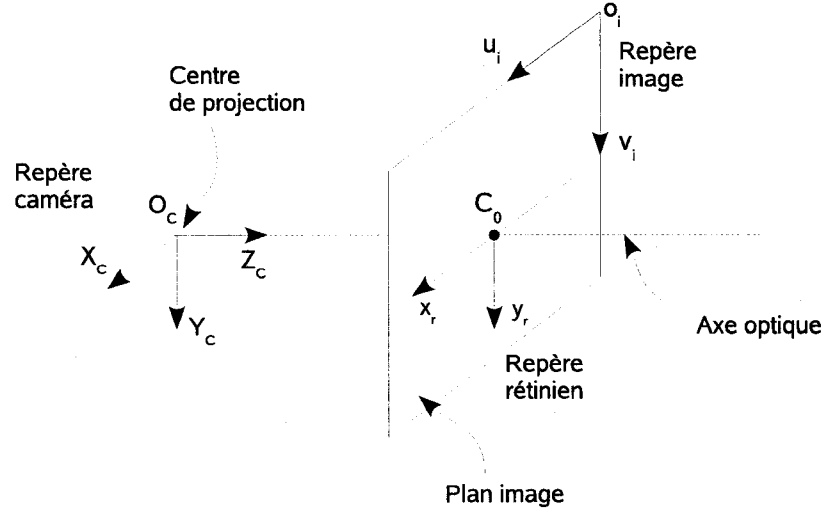


Figure 3.8 Les repères de la projection perspective, adapté de (Hartley & Zisserman, 2003).

Le modèle de la projection perspective peut se décrire par une suite de transformations entre les repères représentés à la figure 3.8. La transformation du repère caméra au repère image est la composée d'une projection perspective et d'un changement de repère. Un point P de la scène se projette dans le plan image suivant la relation

$$\begin{aligned}
 [\tilde{P}]_{RET} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{RET} &= \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CAM} \\
 &= \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{P}[P]_{CAM}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

où \mathbf{P} est la matrice de projection.

La figure 3.9 illustre le passage du repère rétinien au repère image. Cette transformation a pour équation:

$$[P]_{IMG} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & -k_u \cos(\alpha) & u_0 \\ 0 & k_v / \sin(\alpha) & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{RET} = \mathbf{A}[\tilde{P}]_{RET} \quad (3.2)$$

où k_u et k_v sont des facteurs d'échelle (en pixels/mm) et α est l'angle entre les axes u_i et v_i .

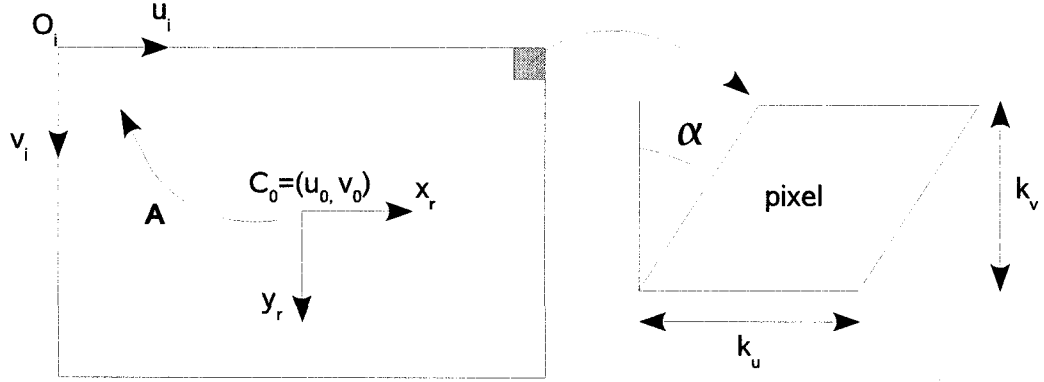


Figure 3.9 Correspondance entre coordonnées rétinienne et coordonnées image, adapté de (Pessel, 2003).

La transformation du repère caméra au repère image est la composée des transformations du repère caméra au repère rétinien et du repère rétinien au repère image. Elle est donné par la relation:

$$[P]_{IMG} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{A} \mathbf{P} [P]_{CAM} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{K} [P]_{CAM} \quad (3.3)$$

où \mathbf{K} est la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra. \mathbf{K} a pour expression:

$$\mathbf{K} = \mathbf{A} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} f k_u & -f k_u \cos(\alpha) & u_0 \\ 0 & f k_v / \sin(\alpha) & v_0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

On voit ici que la focale f est associée aux facteurs d'échelle k_u et k_v . On pose $\alpha_u = f k_u$ et $\alpha_v = f k_v$. Les paramètres α_u et α_v sont exprimés en pixels.

Dans la plupart des caméras modernes, l'angle entre les axes du repère image est

proche de $\frac{\pi}{2}$ (Faugeras, 1993). Dans ce cas la matrice des paramètres intrinsèques \mathbf{K} a une expression simplifiée:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Finalement, le modèle de la caméra s'écrit:

$$[P]_{IMG} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{IMG} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CAM} \quad (3.6)$$

3.3.1.2 Distorsions optiques

Les systèmes optiques réels introduisent des distorsions sur les coordonnées des points projetés. Un point image obtenu par une caméra réelle sera déplacé par rapport au point que l'on aurait obtenu avec une caméra perspective parfaitement linéaire. L'hypothèse du modèle perspectif linéaire était que le centre de projection, un point image et le point 3D correspondant étaient alignés. En réalité cette hypothèse n'est pas vérifiée.

Les distorsions peuvent être de différents types: distorsions radiales, distorsions tangentielles, distorsions prismatiques en sont des exemples. Elles proviennent d'un certain nombre de défauts des optiques. Dans le cadre de cette étude, nous ne considérons que les distorsions radiales. Elles sont causées par des défauts de courbure de la lentille. Ces distorsions sont habituellement les plus importantes par rapport aux autres et leur seule prise en compte nous a permis d'avoir un modèle suffisamment représentatif du système réel. Évidemment ce modèle ne sera certainement pas suffisant si l'on veut obtenir une précision plus grande que celle que nous recherchons.

Les distorsions interviennent au moment du passage du repère caméra au repère rétinien. Appelons $[P_d]_{RET}$ un point du plan image de coordonnées (x_d, y_d) obtenu par une projection perspective avec distorsions. $[P]_{RET}$ est le point de coordonnées (x, y) que l'on aurait obtenu avec une projection perspective linéaire. La fonction de distorsion peut s'exprimer sous la forme d'un polynôme (Zhang, 1999):

$$D(r) = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots \quad (3.7)$$

où $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ représente la distance radiale du centre des distorsions au point image distordu. Dans la pratique on prend le point principal C_0 comme centre des distorsions. D'après la littérature (Devernay & Faugeras, 2001), cela semble être une approximation acceptable.

Habituellement, les distorsions augmentent à mesure que la focale diminue. Il faut alors utiliser plus de coefficients dans le polynôme $D(r)$ pour modéliser ces distorsions. La prise en compte des deux premiers coefficients k_1 et k_2 s'est avérée suffisante pour modéliser la lentille que nous avons utilisée dans nos expériences.

Les coordonnées de $[P_d]_{RET}$ dépendent des coordonnées de $[P]_{RET}$ et des paramètres de la fonction de distorsion suivant la relation:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Les coordonnées de $[P_d]_{IMG}$ sont finalement obtenues par la transformation du repère rétinien au repère image suivant l'équation (3.2).

Correction des distorsions optiques. Il n'existe pas de solution analytique à l'équation (3.8) pour exprimer $[P]_{IMG}$ en fonction de $[P_d]_{IMG}$. Par contre les coordonnées de $[P]_{RET}$ peuvent être obtenues à partir des coordonnées de $[P_d]_{RET}$

de façon itérative en utilisant le théorème du petit gain. Écrivons l'équation (3.8) sous la forme:

$$\mathbf{X} = T(\mathbf{X}) \quad (3.9)$$

avec $\mathbf{X} = [x \ y]_{RET}^T$ et $T(\mathbf{X}) = \mathbf{C}/(1 + k_1\|\mathbf{X}\| + k_2\|\mathbf{X}\|^2)$ où $\mathbf{C} = [x_d \ y_d]_{RET}^T$.

D'après le théorème du petit gain, la suite $\mathbf{X}_n = T(\mathbf{X}_{n-1})$ converge vers un point fixe \mathbf{X}^* si T est une fonction contractive. $T : A \rightarrow A$ est une fonction contractive si il existe un réel strictement positif $k < 1$ tel que:

$$|T(\mathbf{X}) - T(\mathbf{Y})| \leq k |\mathbf{X} - \mathbf{Y}| \quad (3.10)$$

pour tout \mathbf{X}, \mathbf{Y} de A .

En prenant $\mathbf{X}_0 = [x_d \ y_d]_{RET}^T$, on observe en pratique que la suite converge bien vers un point fixe $\mathbf{X}^* = [x^* \ y^*]_{RET}$ solution de l'équation (3.8). Il suffit ensuite de transformer ces coordonnées dans le repère image suivant l'équation (3.2).

Il existe une autre classe de méthodes pour la correction de distorsion. Les algorithmes présentés dans (Brand et al., 1993), (Devernay & Faugeras, 2001) ou encore (Cucchiara, Grana, Prati, & Vezzani, 2003) sont basés sur la correction de droites dans l'image. Ils utilisent un théorème fondamental de géométrie projective selon lequel une droite de la scène se projette en une droite dans l'image. La déformation de droites supposées dans l'image nous informe sur les distorsions de la lentille et la position du point principal. Ces méthodes ont l'avantage qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser le modèle de caméra que nous avons présenté et qu'en principe, on peut estimer les distorsions d'une lentille en observant une scène qui contient des droites.

3.3.2 Modélisation d'un laser

Chaque projecteur laser de l'unité de mesure peut être modélisé par un plan dans l'espace. Le modèle d'un plan est une formule mathématique qui met en relation les coordonnées d'un point $P = [X \ Y \ Z]^T$ avec sa distance au plan $\text{dist}(\text{Plan}, P)$:

$$\text{dist}(\text{Plan}, P) = aX + bY + cZ - d \quad (3.11)$$

La figure 3.10 montre les paramètres qui interviennent dans la définition du modèle:

- $\mathbf{n} = [a \ b \ c]^T$ est le vecteur unitaire normal au plan qui pointe dans la direction de l'espace qui ne contient pas l'origine. Nous utilisons ici un plan orienté qui sépare l'espace en deux parties: l'espace intérieur (qui contient l'origine) et l'espace extérieur. Cette représentation évite ainsi des erreurs si l'on veut exprimer le plan en coordonnées sphériques.
- d est la distance de l'origine O au plan laser. Dans le cas d'un plan orienté, d définit une distance algébrique et peut donc être négative.

3.3.2.1 Changement de repère des paramètres d'un plan

Les paramètres du modèle d'un plan sont décrits dans un certain repère. Tel qu'illustré la figure 3.11, il est possible de décrire ces paramètres par rapport à un autre repère en utilisant la transformation suivante:

$$[\mathbf{n}]_B = \text{Rot}(B, A)[\mathbf{n}]_A \quad (3.12)$$

$$[d]_B = (\text{Rot}(B, A)K[\mathbf{n}]_A + \text{Trans}(B, A))[\mathbf{n}]_B \quad (3.13)$$

où A est le repère d'origine et B est le repère d'arrivée et $K = [d]_A / (\|\mathbf{n}\|_A)$ est un

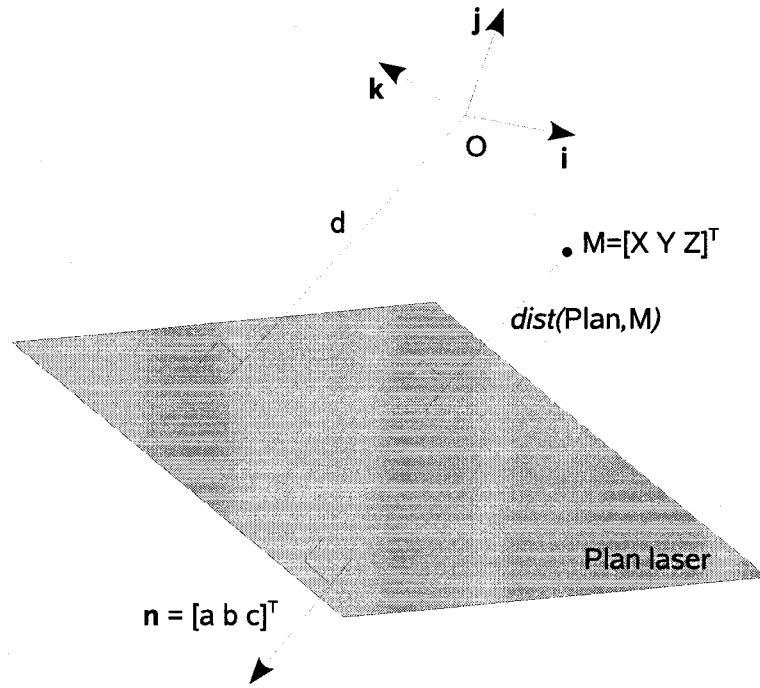


Figure 3.10 Modèle d'un plan dans l'espace.

coefficient de normalisation.

3.3.3 Modélisation de l'unité de mesure

3.3.3.1 Notations et repères

Le modèle de l'unité de mesure fait intervenir les repères représentés à la figure 3.12:

- Le repère attaché à l'unité coïncide avec le repère caméra (O_C, X_C, Y_C, Z_C) tel qu'il a été défini à la section 3.3.1;
- l'unité est référencée dans le repère fils (O_F, X_F, Y_F, Z_F), lié aux fils. L'origine O_F est prise comme le barycentre des points P_{M1}, P_{M2}, P_{M3} et P_{M4} . Les quatre points P_{M1}, P_{M2}, P_{M3} et P_{M4} sont les points d'intersection des plans laser avec les fils. Le barycentre est calculé par la formule suivante:

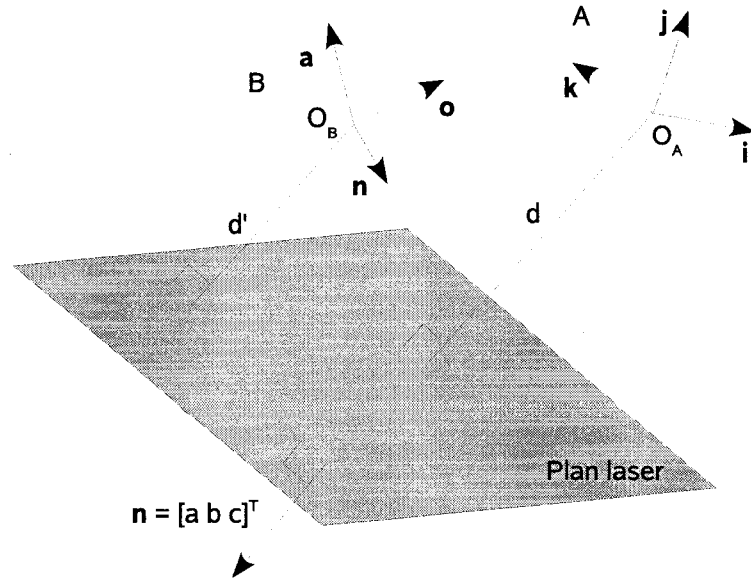


Figure 3.11 Changement de repère des paramètres d'un plan.

$$[O_F]_{FILS} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [P_{Mi}]_{FILS}$$

L'axe Z_F est colinéaire aux fils et l'axe X_F est perpendiculaire au plan formé par les fils.

Les paramètres intrinsèques de l'unité de mesure sont la réunion des paramètres intrinsèques de la caméra, des paramètres des plans laser et des paramètres de la scène. La scène peut être décrite par un seul paramètre qui est la distance entre les fils notée $2h$. On note $\gamma = [\gamma_C \ \gamma_L \ h]^T = [\alpha_u \ \alpha_v \ u_0 \ v_0 \ k_1 \ k_2 \ a_1 \ b_1 \ c_1 \ d_1 \ a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2 \ h]^T$ le vecteur des paramètres intrinsèques de l'unité.

La matrice de rotation $\text{Rot}(FILS, CAM)$ et le vecteur de translation $\text{Trans}(FILS, CAM)$ décrivent les paramètres extrinsèques de l'unité de mesure par rapport au repère fils. $\text{Rot}(FILS, CAM)$ est la matrice de rotation qui décrit l'orientation de l'unité par rapport au repère fils. $\text{Trans}(FILS, CAM)$ est le vecteur de translation qui décrit la position de l'unité par rapport au repère lié aux fils.

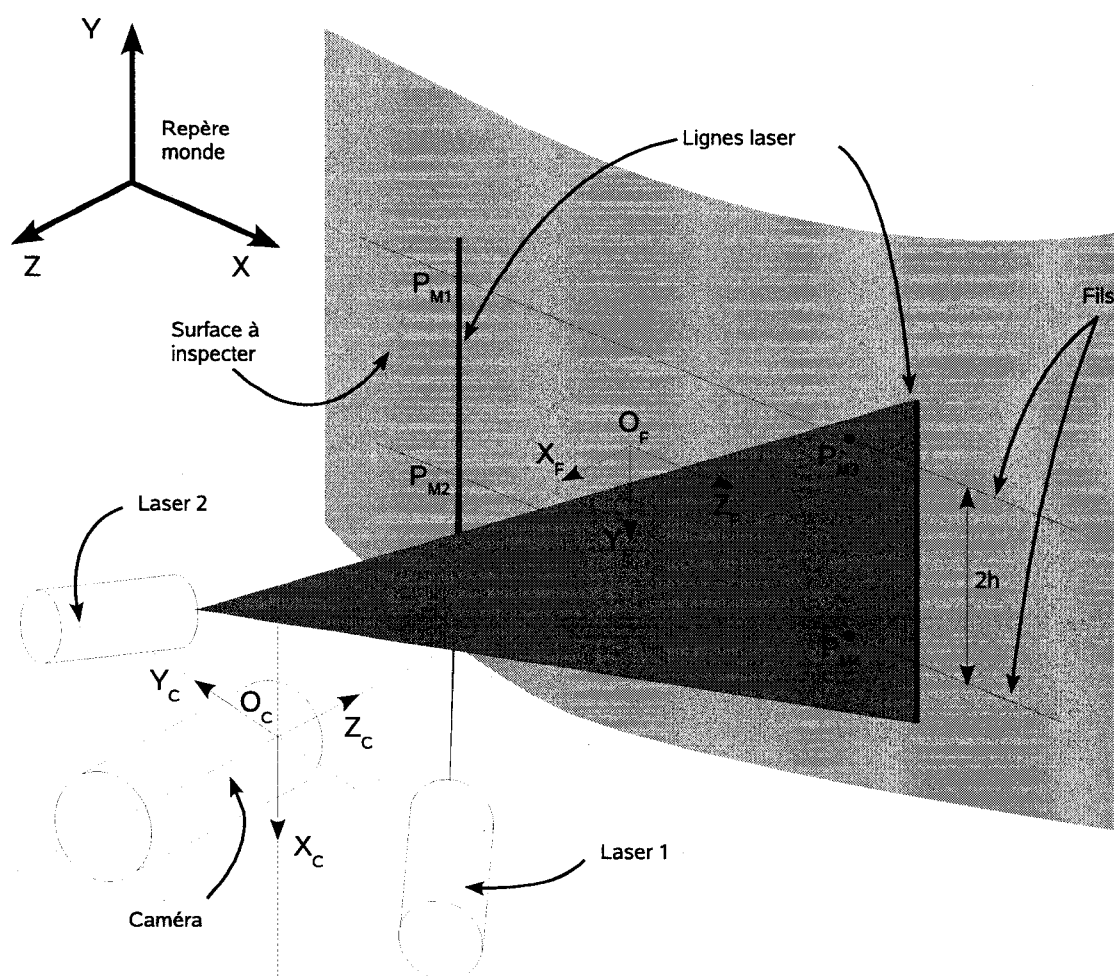


Figure 3.12 Les repères du modèle de l'unité de mesure.

La figure 3.13 montre une image typique de la scène capturée par la caméra. Les points lasers image sont numérotés suivant le laser par lequel ils sont allumés. Les points P_{M1} et P_{M2} sont les points allumés du sens négatif vers le sens positif de u_i par le laser 1, situé dans le demi plan négatif selon Y_C ; les points P_{M3} et P_{M4} sont les points allumés toujours du sens négatif vers le sens positif de u_i par le laser 2, situé dans le demi plan positif selon Y_C . En fonction de la pose de la caméra par rapport aux fils, les points lasers peuvent apparaître dans l'image dans différentes configurations.

3.3.3.2 Modèle direct

Le modèle direct de l'unité de mesure exprime la transformation des coordonnées d'un point P de la scène exprimé dans le repère lié aux fils vers ses coordonnées exprimées dans le repère image. La transformation entre le repère fils et le repère caméra peut être décrite par un mouvement rigide. Cette transformation relie les coordonnées du point P de la scène exprimées dans le repère lié aux fils à ses coordonnées exprimées dans le repère caméra par la matrice $\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS)$. Ici l'indice indique la taille de la matrice. Cette transformation s'écrit:

$$[P]_{CAM} = \mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS)[\tilde{P}]_{FILS} \quad (3.14)$$

La matrice $\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS)$ est la juxtaposition d'une matrice de rotation et d'un vecteur de translation. Elle est donc une fonction des paramètres extrinsèques de la caméra. La matrice $\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS)$ a pour expression:

$$\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS) = [\text{Rot}(CAM, FILS) \quad \text{Trans}(CAM, FILS)] \quad (3.15)$$

Les coordonnées de P dans le repère image sont ensuite obtenues avec l'équation (3.6) qui décrit le modèle de la projection perspective.

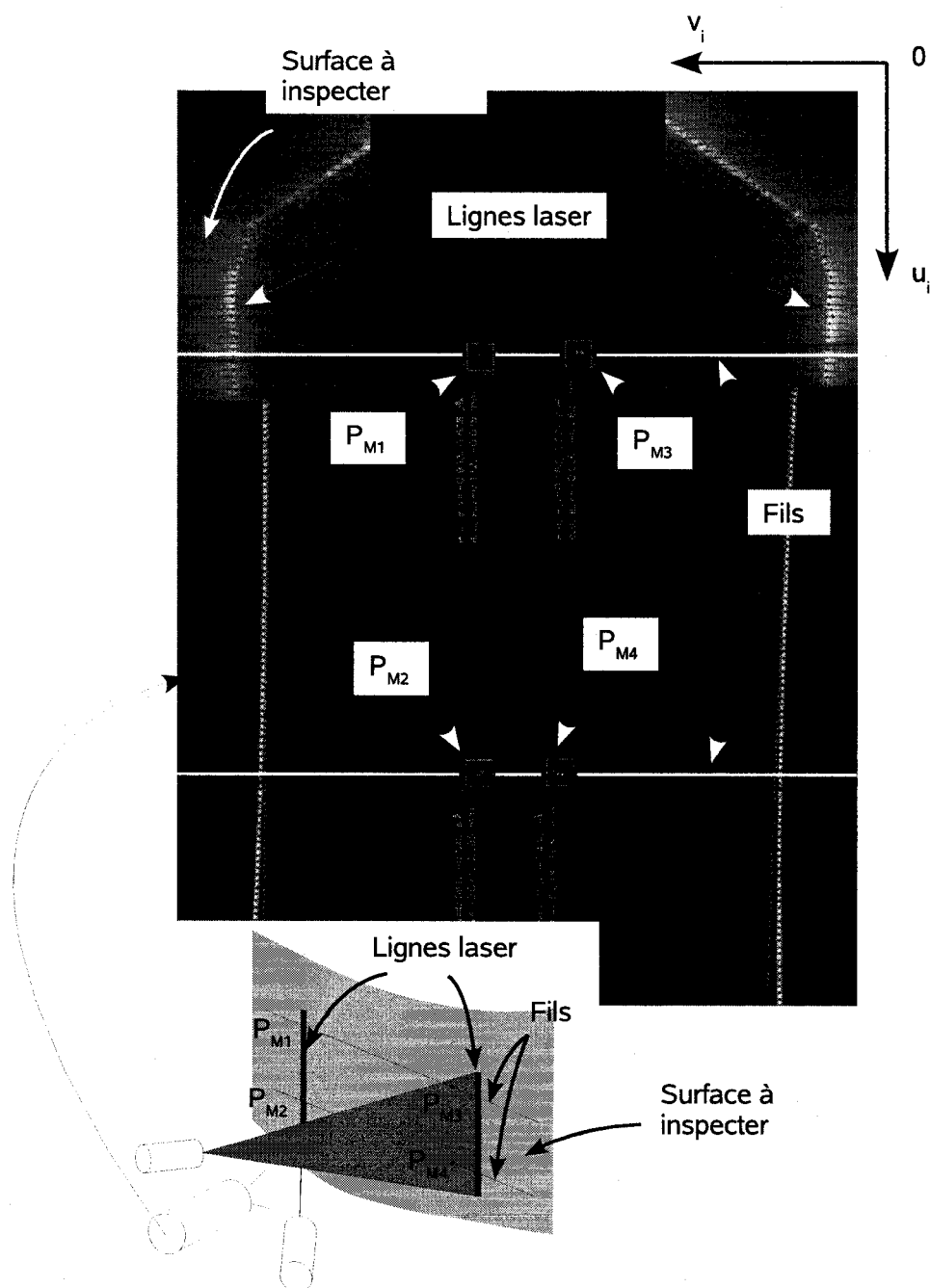


Figure 3.13 Une image typique de la scène.

Finalement le modèle direct de l'unité de mesure peut s'exprimer avec l'équation suivante:

$$[P]_{IMG} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}_{IMG} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{K} \mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{FILS} \quad (3.16)$$

3.3.3.3 Modèle inverse

Le modèle inverse exprime la transformation des coordonnées d'un point P de la scène mesurées dans l'image vers ses coordonnées mesurées dans le repère lié aux fils. Comme une caméra calibrée ne mesure que la direction d'un rayon lumineux, nous avons besoin d'une contrainte supplémentaire pour déterminer la distance de P à la caméra. Cette contrainte nous est fournie par le plan laser de paramètres (a, b, c, d) à condition que ce plan ne soit pas orthogonal au plan image, c'est à dire à condition que $c \neq 1$. En prenant pour hypothèse que la caméra peut être modélisée par une projection perspective linéaire, le point de la scène P de coordonnées $[P]_{CAM} = [X \ Y \ Z]^T$, sa projection $[P]_{IMG} = [u \ v]^T$ dans le plan image et le centre optique sont alignés et forment un rayon lumineux. Ce rayon coupe le plan laser. On a donc le système linéaire en coordonnées homogène

$$\mathbf{B}[\tilde{P}]_{CAM} = \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i & d_i \\ \alpha_u & 0 & u_0 - u & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 - v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{CAM} = \mathbf{0}_{3 \times 1}, \quad i = 1, 2 \quad (3.17)$$

La solution donne les coordonnées de $[P]_{CAM}$:

$$[P]_{CAM} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CAM} = \begin{bmatrix} (u - u_0)Z/\alpha_u \\ (v - v_0)Z/\alpha_v \\ -d/(a + \frac{b(u - u_0)}{\alpha_u} + \frac{c(v - v_0)}{\alpha_v}) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$[P]_{FILS}$ est obtenu par:

$$[P]_{FILS} = \mathbf{T}_{3 \times 4}(FILS, CAM)[P]_{CAM} \quad (3.19)$$

CHAPITRE 4

DÉVELOPPEMENT DE L'APPROCHE PROPOSÉE

Nous développons l'approche pour la résolution du problème en étude. La mise en place d'un système fonctionnel nécessite de résoudre trois problèmes. Dans un premier temps, nous traitons du calibrage des paramètres internes de l'unité de mesure; dans un deuxième temps, nous traitons le problème de la localisation de l'unité puis celui de la cartographie d'une surface.

4.1 Calibrage

4.1.1 Calibrage de la caméra

Le problème du calibrage d'une caméra est celui d'estimer ses paramètres intrinsèques. Nous rappelons que les paramètres intrinsèques sont les distances focales α_u et α_v , les coordonnées du point principal (u_0, v_0) et les coefficients de distorsion k_1 et k_2 .

Le principe est celui d'estimer les paramètres du modèle à partir de la mise en correspondance d'un ensemble de points d'un objet de géométrie connue mesurés dans l'image avec ces mêmes points estimés par le modèle.

Lors du calibrage, les paramètres extrinsèques sont aussi estimés. Ces paramètres sont l'orientation et la position de la caméra par rapport à la scène observée et pour chaque vue.

Le problème du calibrage d'une caméra est un sujet qui a été largement étudié et de

nombreuses méthodes ont été proposées. La méthode que nous revoyons ici est celle de Zhang (1999). Cette méthode est intéressante car nous verrons qu'elle est adaptée au calibrage à partir d'éléments présents dans notre scène. Elle offre donc une bonne souplesse au niveau expérimental en ayant à la fois une précision comparable aux méthodes plus anciennes.

La méthode de Zhang se décompose en deux étapes:

- dans un premier temps, un estimé initial des paramètres intrinsèques et des paramètres extrinsèques est calculé. Cet estimé initial est obtenu par une solution algébrique utilisant les contraintes fournies par la matrice de rotation qui définit l'orientation de la caméra par rapport à la scène pour chaque vue.
- dans un deuxième temps, un estimé de l'ensemble des paramètres du modèle est raffiné au moyen d'une optimisation non linéaire.

4.1.1.1 Notations

Le point P de coordonnées homogènes $\tilde{P} = [X \ Y \ Z \ 1]^T$ désigne un point de la scène. Sa mesure dans l'image $[P]_{IMG}$ est $(u, v, 1)$ en coordonnées homogènes. Le modèle de la projection perspective donne la relation entre $[P]_{MONDE}$ et $[P]_{IMG}$. Ce modèle a déjà été décrit à la section 3.3.1. Nous le reformulons ici afin d'employer les mêmes notations que celles de l'article de Zhang. Dans l'article original, le modèle de la projection perspective est donné par l'équation:

$$s\tilde{m} = \mathbf{A}\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, MONDE)\tilde{M} \quad (4.1)$$

où s est un facteur d'échelle arbitraire non nul, $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$ est un point de la scène décrit dans le repère image en coordonnées homogènes, \mathbf{A} est la matrice des paramètres intrinsèques et $\mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, MONDE) = [\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ est la matrice qui décrit

la transformation du repère monde au repère caméra. Cette dernière équation est une autre façon d'écrire l'équation 3.16 où $[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}$ est remplacé par s .

La matrice de calibrage \mathbf{A} s'écrit:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le tableau 4.1 donne la correspondance avec les notations que nous utilisons.

Tableau 4.1 Correspondance avec les notations de Zhang.

Notations de Zhang	Correspondance	Description
M	$[P]_{MONDE}$	Point de la scène mesuré dans le repère monde.
m	$[P]_{IMG}$	Point de la scène mesuré dans l'image.
α	α_u	Focale selon l'axe u_i .
β	α_v	Focale selon l'axe v_i .
γ	α	Angle entre les axes u_i et v_i .
\mathbf{R}	$\text{Rot}(CAM, MONDE)$	Orientation du repère objet par rapport au repère caméra.
\mathbf{t}	$\text{Trans}(CAM, MONDE)$	Translation du repère objet par rapport au repère caméra.

4.1.1.2 Homographie entre le plan de calibrage et son image

Sans perte de généralité, on considère que le repère objet, qui est attaché au plan de calibrage, coïncide avec le repère monde et que le plan de calibrage est dans le plan $Z = 0$. On note \mathbf{r}_i la colonne i de \mathbf{R} . D'après (4.1), nous avons:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

où λ est un facteur d'échelle arbitraire non nul.

Par abus de notation, $M = [X \ Y]^T$ désigne toujours un point 3D situé dans le plan de calibrage. Ses coordonnées homogènes s'écrivent $\tilde{M} = [X \ Y \ 1]^T$.

Une homographie entre le plan de calibrage et son image désigne une transformation décrite par une matrice \mathbf{H} non singulière de taille 3×3 telle que l'image de \tilde{M} est \tilde{m} :

$$\tilde{m} = \lambda \mathbf{H} \tilde{M} \tag{4.3}$$

L'homographie \mathbf{H} est définie à un facteur d'échelle prêt, noté s . D'après (4.2), on peut définir \mathbf{H} comme:

$$\mathbf{H} = s \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ t] \tag{4.4}$$

4.1.1.3 Contrainte sur les paramètres intrinsèques

Étant donnée une image du plan de calibrage, on peut calculer l'homographie \mathbf{H} correspondante. Théoriquement il faut au moins quatre points non colinéaires pour calculer \mathbf{H} . Plusieurs méthodes pour ce calcul sont données dans (Hartley & Zisser-

man, 2003). On note \mathbf{h}_i la colonne i de \mathbf{H} . D'après (4.4), on a:

$$[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \quad (4.5)$$

où λ est un facteur d'échelle arbitraire.

Le calcul d'un estimé initial des paramètres intrinsèques se base sur les contraintes fournies par \mathbf{R} qui décrit l'orientation du plan de calibrage par rapport à la caméra. Une matrice de rotation a la propriété que les vecteurs qui forment ses colonnes constituent une base orthonormée. On a donc:

$$\langle \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 \rangle = 0 \quad (4.6)$$

et

$$\|\mathbf{r}_1\| = \|\mathbf{r}_2\| \quad (4.7)$$

L'équation (4.5) donne:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1 &= \lambda \mathbf{A} \mathbf{r}_1 \\ \Leftrightarrow \mathbf{r}_1 &= \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \end{aligned} \quad (4.8)$$

De la même façon on obtient

$$\mathbf{r}_2 = \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (4.9)$$

En remplaçant dans l'équation (4.6) on obtient:

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \right]^T \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

De la même façon, en remplaçant dans l'équation(4.7), on obtient:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1, \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \right\rangle &= \left\langle \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2, \frac{1}{\lambda} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \right\rangle \\ \Leftrightarrow \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 &= \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

En posant $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1}$, les contraintes sur les paramètres intrinsèques s'écrivent:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (4.12)$$

et

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 \quad (4.13)$$

4.1.1.4 Solution pour le calibrage de la caméra

Solution algébrique

On pose:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}$$

\mathbf{B} est une matrice symétrique de taille 3×3 . Comme chaque image du plan de calibrage fournit deux contraintes, il faut au moins trois images pour déterminer \mathbf{B} .

On peut définir \mathbf{B} par le vecteur 6D \mathbf{b} :

$$\mathbf{b} = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]$$

Soit $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$ la colonne i de \mathbf{H} . On a:

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (4.14)$$

avec

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]$$

Cette formulation nous permet d'écrire les contraintes (4.12) et (4.13) sous la forme d'un système linéaire en \mathbf{b} :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{12}^T \\ (\mathbf{v}_{11} - \mathbf{v}_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (4.15)$$

En empilant les contraintes obtenues pour n images, on peut ainsi former un système linéaire de $2n$ équations:

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0 \quad (4.16)$$

où \mathbf{V} est une matrice de taille $2n \times 6$.

Le vecteur \mathbf{b} est défini à un facteur d'échelle prêt, ce qui représente cinq contraintes. Les paramètres intrinsèques sont ensuite extraits du vecteur \mathbf{b} .

Dès que la matrice des paramètres intrinsèques est connue les paramètres extrinsèques peuvent à leur tour être calculés.

Raffinement des estimés

Une fois que l'on a obtenu un estimé initial des paramètres, l'estimé de l'ensemble des paramètres du modèle est raffiné au moyen d'une optimisation non linéaire basée sur un critère de maximum de vraisemblance. Le critère qui est minimisé est la somme des distances géométriques entre les points mesurés et les points estimés par le modèle:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{dist}(m_{ij}, \hat{m}_{ij})^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \|m_{ij} - \hat{m}(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)\|^2 \quad (4.17)$$

où m_{ij} est le point de calibrage j de l'image i et $\hat{m}(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)$ est la projection selon l'équation 3.6 du point de calibrage M_j de la vue i basée sur l'estimé courant.

L'annexe I donne plus de détails sur la méthode du maximum de vraisemblance et justifie le critère utilisé. La figure 4.1 décrit les étapes de l'algorithme de calibrage de la caméra.

4.1.1.5 Niveau de confiance dans les estimés des paramètres intrinsèques

Nous aimerions maintenant donner le niveau de confiance que l'on a dans les paramètres estimés. Comme les paramètres extrinsèques changent dès que l'on bouge la caméra par rapport à la scène, on cherche ici à estimer la confiance que l'on a dans les paramètres intrinsèques, qui sont fixes.

L'estimateur à maximum de vraisemblance donne un estimé des paramètres qui minimise la distance géométrique entre les points mesurés et les points estimés par le modèle. Soit N le nombre de points utilisés pour l'estimation. Une première façon de mesurer la qualité du calibrage est de calculer l'écart type des points estimés par le modèle:

$$\sigma_{\text{erreur}} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \text{dist}([P_i]_{\text{IMG}}, [\hat{P}_i]_{\text{IMG}})^2} \quad (4.18)$$

σ_{erreur} donne une mesure de l'adéquation entre le modèle et les mesures prises avec

1. Les données sont recueillies en capturant plusieurs vues d'une cible de calibrage planaire dans différentes orientations par rapport à la caméra.
2. Pour chaque vue on calcule l'homographie \mathbf{H}_i entre le plan de calibrage et le plan image.
3. On calcule un estimé de \mathbf{B} à partir des contraintes fournies par les équations (4.12) et (4.13).
4. La matrice \mathbf{A} est déterminée à partir de $\mathbf{B} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ par une inversion et en utilisant une factorisation de Cholesky. Les détails de la méthode sont donnés dans (Hartley & Zisserman, 2003).
5. Une fois que l'on a un estimé de la matrice \mathbf{A} , les paramètres extrinsèques peuvent être calculés par

$$\mathbf{r}_{i1} = \lambda_i \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_{i1}$$

$$\mathbf{r}_{i2} = \lambda_i \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_{i2}$$

$$\mathbf{r}_{i3} = \mathbf{r}_{i1} \times \mathbf{r}_{i2}$$

$$\mathbf{t}_i = \lambda_i \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_{i3}$$

$$\text{où } \lambda_i = 1/\|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_{i1}\| = 1/\|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_{i2}\|$$

6. L'estimé des paramètres initiaux est ensuite raffiné par une méthode d'optimisation non linéaire qui minimise le critère de l'équation (4.17).

Figure 4.1 Procédure pour le calcul d'un estimé des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

le système réel¹. Cependant lorsque le nombre de points utilisés pour le calibrage augmente, la confiance que l'on a dans les paramètres devrait augmenter. Or, on voit d'après la formule que l'écart type ne va pas diminuer.

La covariance des paramètres estimés donne une mesure plus significative de l'incertitude. On prend ici pour hypothèse que les points de calibrage estimés sont soumis à un bruit blanc gaussien isotrope. Dans ce cas, la covariance sur les estimés se calcule comme (Hartley & Zisserman, 2003)

$$\Sigma_{\gamma_C} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \sigma_{\text{erreur}}^2 \quad (4.19)$$

où \mathbf{J} désigne la matrice jacobienne des points de calibrage par rapport aux paramètres. \mathbf{J} a pour expression:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial[\hat{P}_1]_{IMG}}{\partial\gamma_C} & \frac{\partial[\hat{P}_1]_{IMG}}{\partial\gamma_e} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial[\hat{P}_N]_{IMG}}{\partial\gamma_C} & \frac{\partial[\hat{P}_N]_{IMG}}{\partial\gamma_e} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

On prendra comme intervalle de confiance dans les paramètres

$$\Delta = 3\sqrt{\Sigma_{\gamma_C}} \quad (4.21)$$

De cette façon, les paramètres estimés sont dans un intervalle de $\gamma_C \pm \Delta$ avec une probabilité de 0.997.

4.1.2 Calibrage d'un laser

Le problème est celui d'estimer les paramètres (a, b, c, d) du plan laser. L'estimation

¹À toute fin pratique, on remplace donc $[P_i]_{IMG}$ par $[\tilde{P}_i]_{IMG}$ dans l'équation 4.18.

est réalisée à partir de la mesure d'un nombre suffisants de points 3D contenus dans le plan laser et exprimés dans le repère caméra. Théoriquement, il faut un minimum de trois points non colinéaires pour estimer les paramètres. En pratique on prend plus de points pour réduire l'incertitude sur les estimés. Cette incertitude est causée par le bruit de mesure mais vient aussi de l'incertitude des paramètres internes et externes de la caméra.

Le nuage de points 3D est obtenu de la façon suivante:

- On prend une image de la cible de calibrage puis on calcule sa pose par rapport à la caméra.
- On détecte les points de l'intersection entre le plan laser et la cible de calibrage.
- Les rayons qui passent par les points détectés coupent la cible de calibrage dont la pose est connue. On peut donc retrouver les coordonnées 3D de points contenus dans le plan laser dans le repère caméra par triangulation. Notons ces points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$, $i = 1, \dots, M$.
- On répète le processus pour N poses différentes de la cible jusqu'à avoir un nombre suffisant de points 3D.

L'estimation des paramètres (a, b, c, d) peut se faire par différentes méthodes. Nous donnons dans ce qui suit une solution pour résoudre ce problème (une seconde solution est donnée à l'annexe II). Cette solution est optimale sous l'hypothèse d'un bruit blanc gaussien isotrope et identiquement distribué. Ce modèle de bruit n'est pas forcément réaliste puisque les points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ sont déterminés par une triangulation qui est une transformation non linéaire. Cependant nous verrons aux chapitres 5 et 6 que notre méthode donne dans la pratique des résultats encore satisfaisants en regard de la précision des mesures délivrées par le système.

4.1.2.1 Estimation par la matrice de covariance

On considère un nuage de points 3D $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM} = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$, $i = 1 \dots M$ obtenu en utilisant le protocole que nous venons de décrire. Le problème est celui d'estimer les paramètres du plan tels que:

$$a\bar{X}_i + b\bar{Y}_i + c\bar{Z}_i + d = 0 \quad \forall \bar{P}_{L_i}, \ i = 1 \dots M \quad (4.22)$$

Ici, \bar{P}_i désigne la valeur réelle de P_{L_i} .

Comme les points \tilde{P}_{L_i} sont bruités, nous cherchons les paramètres qui minimisent

$$f(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^N (aX_i + bY_i + cZ_i + d)^2 \quad (4.23)$$

sous la contrainte

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (4.24)$$

On peut résoudre pour d en écrivant

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial d} &= 2 \sum_{i=1}^N (aX_i + bY_i + cZ_i + d) = 0 \\ \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N (aX_i + bY_i + cZ_i + d) &= 0 \\ \Leftrightarrow a \sum_{i=1}^N X_i + b \sum_{i=1}^N Y_i + c \sum_{i=1}^N Z_i + Nd &= 0 \\ \Leftrightarrow d &= -a \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} - b \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N} - c \frac{\sum_{i=1}^N Z_i}{N} \\ \Leftrightarrow d &= -a\bar{X} - b\bar{Y} - c\bar{Z} \end{aligned} \quad (4.25)$$

où $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ représentent maintenant les coordonnées du barycentre du nuage de points mesurés \tilde{P}_{L_i} .

En remplaçant d dans (4.23) on a

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^N \left(a(X_i - \bar{X}) + b(Y_i - \bar{Y}) + c(Z_i - \bar{Z}) \right)^2 \quad (4.26)$$

Ceci peut se réécrire en notation vectorielle:

$$f(a, b, c) = (\mathbf{v}^T \mathbf{M}^T) \mathbf{M} \mathbf{v} \quad (4.27)$$

où $\mathbf{v} = [a \ b \ c]^T$ est le vecteur normal au plan et \mathbf{M} est la matrice des points 3D en repère barycentrique.

On pose $\mathbf{A} = \mathbf{M}^T \mathbf{M}$. Le critère (4.27) devient:

$$f(a, b, c) = \mathbf{v}^T \mathbf{A} \mathbf{v} \quad (4.28)$$

Le problème est celui de minimiser $\mathbf{v}^T \mathbf{A} \mathbf{v}$ sous la contrainte $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1$.

On utilisant les multiplicateurs de Lagrange, on peut écrire l'hamiltonien

$$\mathcal{H}(\mathbf{v}) = -\mathbf{v}^T \mathbf{A} \mathbf{v} + \lambda(\mathbf{v}^T \mathbf{v} - 1) \quad (4.29)$$

La condition nécessaire pour avoir un point stationnaire est que

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{v}} &= -2\mathbf{A} \mathbf{v} + 2\lambda \mathbf{v} = 0 \\ \Leftrightarrow \mathbf{A} \mathbf{v} &= \lambda \mathbf{v} \end{aligned} \quad (4.30)$$

On peut voir ici que \mathbf{v} doit être un vecteur propre de \mathbf{A} et λ est la valeur propre associée à \mathbf{v} . $f(a, b, c)$ est minimisée quand \mathbf{v} est le vecteur propre associé à la plus petite valeur propre de \mathbf{A} .

4.1.2.2 Robustesse de la méthode

Un estimateur linéaire aux moindres carrés est optimal sous l'hypothèse d'un bruit blanc gaussien isotrope et identiquement distribué. Les estimés obtenus par une méthode aux moindres carrés seront donc biaisés en présence de mesures aberrantes. Un point aberrant est une mesure dont la distribution est différente de celle des autres points mesurés. Une façon de modéliser la distribution d'un ensemble de mesures avec un certain taux de mesures aberrantes est d'utiliser la somme de deux distributions gaussiennes (Zhang & Faugeras, 1992):

$$(1 - \epsilon)N(\mu, \Lambda) + \epsilon N(\mu_1, \Lambda_1) \quad (4.31)$$

où $N(\mu, \Lambda)$ représente une distribution gaussienne de moyenne μ et d'écart type σ , $\Lambda_1 \gg \Lambda$ et μ_1 est possiblement différent de μ . ϵ représente le taux de mesures aberrantes.

Il existe plusieurs techniques pour le diagnostic et l'élimination des mesures aberrantes. Les ouvrages de référence dans ce domaine sont ceux de (Huber, 1981), (Hampel, Ronchetti, & Rousseeuw, 1986) et (Rousseeuw & Leroy, 1987). On pourra consulter (Maronna R., 2006) pour un ouvrage plus récent. Un algorithme très répandu en vision par ordinateur est celui du RANSAC (Random Sample Consensus) (Fischler & Bolles, 1981). Les références (Torr & Zisserman, 2000), (Matas & Chum, 2005) et (Tordoff & Murray, 2005) proposent des perfectionnements de cet algorithme. Nous avons utilisé l'algorithme de RANSAC originalement proposé par Fischler et Bolles pour éliminer les mesures aberrantes avant l'estimation aux moindres carrés. L'annexe III donne plus de détails sur cet algorithme.

4.1.2.3 Validation du calibrage

Une fois que l'on a estimé les paramètres d'un plan laser, le calibrage peut être validé en reprojétant le plan laser estimé dans chaque image utilisée pour le calibrage. La figure 4.2 montre un schéma qui reprend les étapes du calibrage et cette étape de validation. Une meilleure validation serait de reprojeter les plans lasers estimés dans d'autres images que celles utilisées pour le calibrage. Cependant, dans la pratique, la reprojektion des plans lasers sur les images de calibrage permet au moins de valider les paramètres qui auraient pu être faussés par des mesures aberrantes.

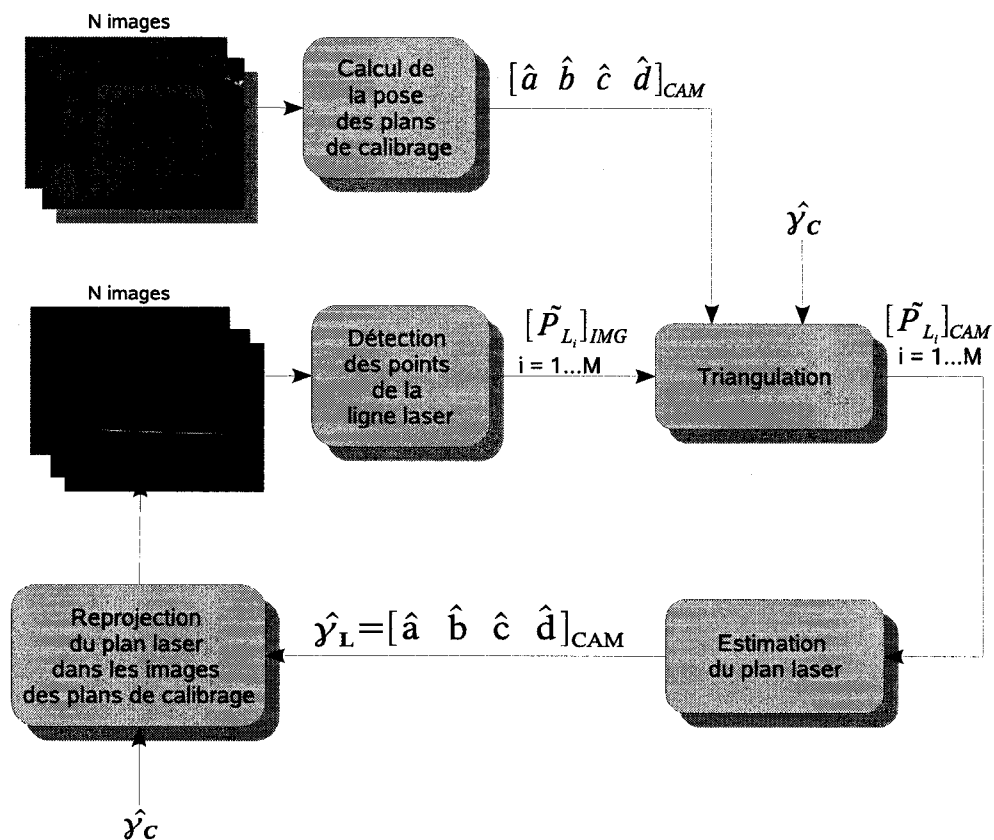


Figure 4.2 Une procédure pour la validation du calibrage d'un plan laser.

4.1.2.4 Niveau de confiance dans les estimés

On peut calculer la variance des paramètres estimés $(\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d})$ en adaptant la méthode que nous avons employé pour les paramètres de la caméra à la section 4.1.1.5. Les étapes de ce calcul sont les suivantes:

1. On calcule un estimé des paramètres du plan $(\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{d})$ avec une des méthodes que nous avons décrites.
2. On calcule les coordonnées de l'ensemble de points $[\hat{P}_i]_{CAM}$ par une retroprojection basée sur les mesures $[\tilde{P}_i]_{IMG}$ et sur les paramètres estimés $\hat{\gamma}_C, \hat{\gamma}_L$ en utilisant le modèle inverse de l'unité (équation 3.18).
3. On calcule la matrice jacobienne

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial[\hat{P}_{L_1}]_{CAM}}{\partial\gamma_L} & \frac{\partial[\hat{P}_{L_1}]_{CAM}}{\partial\gamma_C} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial[\hat{P}_{L_M}]_{CAM}}{\partial\gamma_L} & \frac{\partial[\hat{P}_{L_M}]_{CAM}}{\partial\gamma_C} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

4. La covariance des paramètres estimés est donnée par

$$(\mathbf{J}^T \boldsymbol{\Sigma}_{erreur}^{-1} \mathbf{J})^{-1} \quad (4.33)$$

où $\boldsymbol{\Sigma}_{erreur}$ est la matrice de covariance de l'erreur de reprojection:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{erreur} = E[(\hat{P}_i]_{CAM} - [\tilde{P}_i]_{CAM})^T ([\hat{P}_i]_{CAM} - [\tilde{P}_i]_{CAM})] \quad (4.34)$$

4.2 Localisation de l'unité de mesure

4.2.1 Localisation par une solution exacte

On cherche à estimer la transformation rigide entre le repère lié à l'unité de mesure

et le repère lié aux fils. Cette transformation rigide est définie par l'orientation et la translation de l'unité par rapport aux fils. Afin d'alléger les notations, on note $\mathbf{R} = \text{Rot}(FELS, CAM)$ et $\mathbf{t} = \text{Trans}(FELS, CAM)$.

Plusieurs solutions à ce problème ont été proposées dans la littérature. Parmi les articles concernés on retrouve les travaux de B. K. P. Horn (1987; 1988) avec une modélisation de la rotation par un quaternion unitaire puis une technique de décomposition polaire, les travaux de Arun, Huang, et Blostein (1987) et Umeyama (1991) avec une technique basée sur une décomposition SVD (Singular Value Decomposition) et enfin (Walker, Shao, & Volz, 1991) avec une modélisation de la transformation rigide par un quaternion dual.

Ces solutions procèdent à partir d'appariements de points et minimisent un critère aux moindres carrés. La transformation recherchée est celle qui minimise le critère

$$C(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N \|[P_{M_i}]_{FELS} - \mathbf{R}[P_{M_i}]_{CAM} - \mathbf{t}\|^2 \quad (4.35)$$

Notons ici que l'on peut voir le problème sous deux angles équivalents: on apparie deux ensembles de points exprimés dans un même repère ou bien on apparie le même ensemble de points exprimé dans deux repères différents. Dans la suite, nous adoptons le deuxième point de vue.

Les solutions proposées dans les articles sus-cités sont toutes mathématiquement équivalentes puisqu'elles minimisent le même critère. Eggert, Lorusso, et Fisher (1997) comparent les solutions par SVD, décomposition polaire, quaternions et quaternions duaux d'un point de vue numérique et montrent que les seules différences sont au niveau de la sensibilité des algorithmes quand les points sont dans une configuration dégénérée.

4.2.1.1 Détermination de la translation

La translation optimale \mathbf{t}^* s'obtient en dérivant le critère par rapport à \mathbf{t} et en égalant à zéro:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \mathbf{t}} &= -2 \sum_{i=1}^N ([P_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{R}[P_{M_i}]_{CAM} - \mathbf{t})^T = 0 \\ \iff \sum_{i=1}^N [P_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{R} \sum_{i=1}^N [P_{M_i}]_{CAM} &= N\mathbf{t}^* \end{aligned} \quad (4.36)$$

Notons $\bar{P}_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{M_i}$ le barycentre des points laser. On obtient:

$$\mathbf{t}^* = [\bar{P}_M]_{FILS} - \mathbf{R}[\bar{P}_M]_{CAM} \quad (4.37)$$

Par définition, l'origine du repère lié aux fils est positionné au barycentre des points laser. On a donc:

$$\mathbf{t}^* = -\mathbf{R}[\bar{P}_M]_{CAM} \quad (4.38)$$

En exprimant les points lasers en repère barycentrique: $P'_{M_i} = P_{M_i} - \bar{P}_M$, le critère à minimiser se réécrit:

$$C'(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^N \|[P'_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{R}[P'_{M_i}]_{CAM}\|^2 \quad (4.39)$$

Dans la section suivante, nous supposons que les points lasers sont exprimés en repère barycentrique, ce qui permet de s'affranchir de la translation.

4.2.1.2 Détermination de la rotation

Pour déterminer l'orientation du repère caméra par rapport au repère fils, nous avons choisi d'utiliser la méthode décrite dans (B. K. P. Horn, 1987). Cette méthode s'applique bien à notre cas de quatre points coplanaires. De plus c'est la méthode qui offre le temps de calcul le plus court (Eggert et al., 1997).

La solution utilise les quaternions unitaires pour représenter les rotations. Un quaternion unitaire décrivant une rotation d'axe \mathbf{n} et d'angle θ est défini par le vecteur en quatre dimensions

$$\mathbf{q} = [r_0 \ r_x \ r_y \ r_z]^T$$

avec $r_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ et $[r_x \ r_y \ r_z]^T = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \mathbf{n}$.

Notons $\mathbf{q} = \mathbf{q}(FILS, CAM)$ l'orientation du repère caméra par rapport au repère fils. On peut donc réécrire le critère à minimiser:

$$C(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N \|[P_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{q}[P_{M_i}]_{CAM}\bar{\mathbf{q}}\|^2 \quad (4.40)$$

sous la contrainte $\|\mathbf{q}\|^2 = 1$. On peut ainsi écrire:

$$\begin{aligned} \|[P_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{q}[P_{M_i}]_{CAM}\bar{\mathbf{q}}\|^2 &= \|[P_{M_i}]_{FILS} - \mathbf{q}[P_{M_i}]_{CAM}\bar{\mathbf{q}}\|^2 \|\mathbf{q}\|^2 \\ &= \|[P_{M_i}]_{FILS} \mathbf{q} - \mathbf{q}[P_{M_i}]_{CAM}\bar{\mathbf{q}}\mathbf{q}\|^2 \\ &= \|[P_{M_i}]_{FILS} \mathbf{q} - \mathbf{q}[P_{M_i}]_{CAM}\|^2 \end{aligned}$$

Le produit de deux quaternions peut s'écrire sous forme matricielle de la façon suivante:

$$\mathbf{r} \mathbf{q} = \mathbf{Q}(\mathbf{r}) \mathbf{q} \quad \text{et} \quad \mathbf{q} \mathbf{r} = \mathbf{W}(\mathbf{r}) \mathbf{q} \quad (4.41)$$

avec $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$ et $\mathbf{W}(\mathbf{r})$ définies par:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} r_0 & -r_x & -r_y & -r_z \\ r_x & r_0 & -r_z & r_y \\ r_y & r_z & r_0 & -r_x \\ r_z & -r_y & r_x & r_0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{W}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} r_0 & -r_x & -r_y & -r_z \\ r_x & r_0 & r_z & -r_y \\ r_y & -r_z & r_0 & r_x \\ r_z & r_y & -r_x & r_0 \end{bmatrix}$$

On a donc:

$$[P_{M_i}]_{FILS} \mathbf{q} = \mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) \mathbf{q} \quad \text{et} \quad \mathbf{q} [P_{M_i}]_{CAM} = \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}) \mathbf{q}$$

Ce qui permet de simplifier le critère en:

$$\begin{aligned} \|[P_{M_i}]_{FILS} \mathbf{q} - \mathbf{q} [P_{M_i}]_{CAM}\|^2 = \\ ((\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}))^T ((\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM})) \mathbf{q}) = \mathbf{q}^T \mathbf{A}_i \mathbf{q} \end{aligned} \quad (4.42)$$

où \mathbf{A}_i est la matrice symétrique de dimension 4×4 définie par

$$\mathbf{A}_i = (\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}))^T (\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}))$$

Le critère à minimiser devient donc:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N \mathbf{q}^T \mathbf{A}_i \mathbf{q} &= \mathbf{q}^T \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_i \mathbf{q} \\ &= \mathbf{q}^T \mathbf{B} \mathbf{q} \end{aligned} \quad (4.43)$$

avec \mathbf{B} une matrice symétrique définie positive définie par:

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_i = \sum_{i=1}^N (\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}))^T (\mathbf{Q}([P_{M_i}]_{FILS}) - \mathbf{W}([P_{M_i}]_{CAM}))$$

Pour minimiser ce critère sous la contrainte $\|\mathbf{q}\|^2 = 1$, on écrit l'hamiltonien

$$\mathcal{H}(\mathbf{q}) = \mathbf{q}^T \mathbf{B} \mathbf{q} + \lambda(1 - \mathbf{q}^T \mathbf{q}) = \mathbf{q}^T (\mathbf{B} - \lambda \mathbf{I}_4) \mathbf{q} + \lambda \quad (4.44)$$

La condition de stationarité à l'optimum est obtenue quand:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{q}} = (\mathbf{B} - \lambda \mathbf{I}_4) \mathbf{q} = 0$$

Avec la contrainte $\|\mathbf{q}\|^2 = 1$, les optimums sont donc les valeurs propres unitaires de la matrice \mathbf{B} et le quaternion unitaire optimal est le vecteur propre associé à la plus petite des valeurs propres (nous rappelons qu'une matrice symétrique a des valeurs propres réelles et une matrice symétrique positive a toutes ses valeurs propres positives). La valeur du critère au minimum est alors $C^* = \lambda$.

4.2.1.3 Intégrité de la localisation de l'unité

La pose de l'unité de mesure peut être vérifiée en utilisant la structure de la scène constituée des deux fils. La figure 4.3 montre la procédure que nous employons.

Les coordonnées de $[P_{M_i}]_{FILS}$ sont calculées en spécialisant le modèle direct de l'unité de mesure. La projection perspective suit la relation

$$[P_{M_i}]_{IMG} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{K} \mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS) [P_{M_i}]_{FILS} \quad (4.45)$$

Or, par définition, $[P_{M_i}]_{FILS}$ respecte les trois contraintes

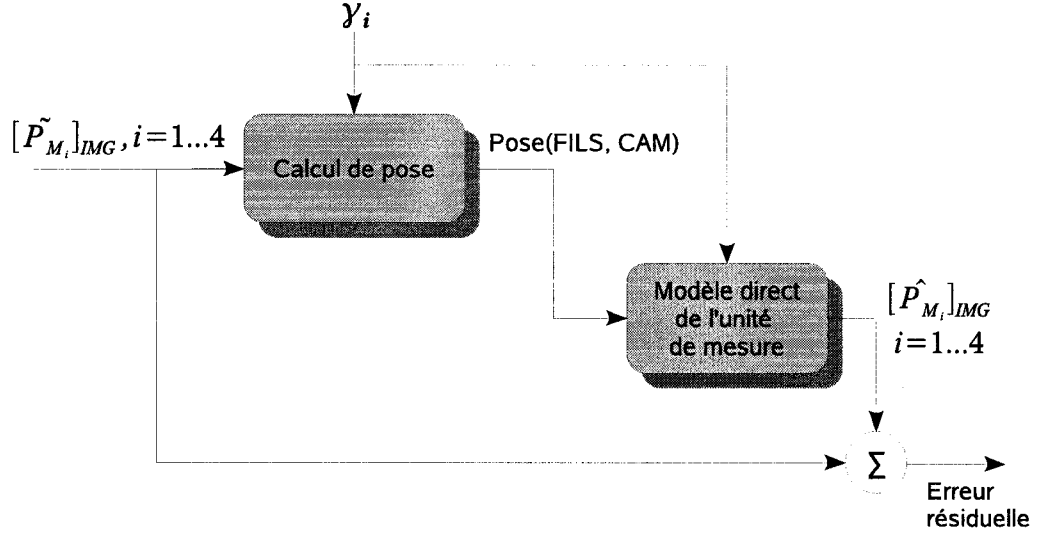


Figure 4.3 Vérification du calibrage des paramètres extrinsèques de l'unité de mesure.

$$[a \ b \ c \ d]_{FILS} [X \ Y \ Z \ 1]_{FILS}^T = 0 \quad (4.46)$$

$$[X]_{FILS} = 0 \quad (4.47)$$

$$[Y]_{FILS} = \pm h \quad (4.48)$$

On en déduit donc que:

$$[Z]_{FILS} = \frac{-d \pm bh}{c} \quad (4.49)$$

$[P_{M_i}]_{FILS}$ a donc pour coordonnées:

$$[P_{M_i}]_{FILS} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm h \\ (-d \pm bh)/c \end{bmatrix}_{FILS} \quad (4.50)$$

où b , c et d représentent les paramètres du plan laser.

On obtient la projection de P_{M_i} dans l'image en utilisant l'équation (4.45).

Les paramètres de laser et de la scène utilisés dans le modèle déterminent lequel des quatre points lasers de la scène est projeté dans l'image. On a par exemple:

$$[P_{M_1}]_{IMG} = \frac{1}{[P]_{CAM}^T [Z_C]_{CAM}} \mathbf{K} \mathbf{T}_{3 \times 4}(CAM, FILS) \begin{bmatrix} 0 \\ -h \\ (-d_1 + b_1 h)/c_1 \end{bmatrix}_{FILS} \quad (4.51)$$

Les paramètres du plan laser exprimés dans le repère lié aux fils peuvent être calculés à partir des paramètres exprimés dans le repère caméra et de la pose de l'unité en utilisant les équations (3.12) et (3.13).

4.2.1.4 Estimation de l'incertitude sur la transformation

D'après (Pennec, 1998), l'estimation de l'incertitude de la rotation calculée avec la technique que nous avons adopté n'est pas fiable pour des ensembles de moins de 15 points. Dans notre cas, nous ne disposons que de 4 points. Il faut donc nous tourner vers des techniques de filtrage pour estimer l'incertitude de la pose de la caméra.

4.3 Cartographie

Le système de vision délivre un nuage de points 3D qui décrit la géométrie de la surface inspectée. Cependant les données ne sont pas exploitables directement sous cette forme car un nuage peut contenir plusieurs centaines de milliers de points. Il convient donc de traiter le nuage de points afin d'obtenir une représentation qui soit plus facilement manipulable informatiquement.

L'approche classique en reconstruction 3D est d'approximer la géométrie de la structure par une surface construite à partir du nuage de points. Des techniques classiques

sont par exemple celles de la triangulation de Delaunay ou le krigeage. Dans ces techniques, la surface reconstruite est constituée d'un maillage polygonal.

Une autre approche consiste à se placer dans le domaine fréquentiel en calculant la transformée de Fourier du nuage de point. L'avantage de cette méthode est que l'on dispose ainsi d'une fonction analytique qui représente la carte de la structure. Cette représentation offre de nouvelles possibilités d'analyse des résultats. On peut par exemple imaginer que l'on puisse comparer les spectres de différentes structures pour déterminer si elles sont similaires ou bien déterminer si elles doivent être réparées.

La cartographie reste une voie à explorer puisque nous nous sommes concentré dans cette thèse sur le système de vision qui collecte les mesures.

4.4 Conclusion

La littérature propose des méthodes que nous pouvons directement utiliser pour résoudre les trois problèmes de calibrage et de localisation de l'unité de mesure ainsi que le problème de la cartographie d'une surface.

La localisation et la cartographie peuvent se faire à partir d'une seule image. Cependant une image ne contient pas assez d'information pour donner un niveau d'incertitude fiable sur les quantités estimées.

CHAPITRE 5

EXPÉRIENCES MENÉES EN LABORATOIRE

Nous présentons les résultats d'expériences que nous avons menées en laboratoire. Ces expériences visent à valider le modèle du système et à évaluer les performances des algorithmes de traitement que nous avons choisis. Nous donnons tout d'abord plus de détails sur l'implémentation du système de cartographie. Nous présentons ensuite les résultats obtenus pour le calibrage de l'unité de mesure dans l'air et dans l'eau puis des résultats de cartographie également dans l'air et dans l'eau.

5.1 Contexte des expériences

Les expériences ont été menées au bassin d'essai de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ). Elles ont été mises en oeuvre en même temps qu'un certain nombre de démonstrations à des clients intéressés à utiliser le système.

Lors de ces expériences, seuls les algorithmes de calibrage, de localisation et de cartographie étaient implémentés dans le prototype. Le système était donc capable de se localiser par rapport au repère lié aux fils et permettait de cartographier une surface. Les améliorations proposées au chapitre 7 n'étaient pas encore implémentées.

5.2 Design et implémentation

Nous détaillons dans les paragraphes qui suivent les composantes matérielles et logicielles qui constituent le système de cartographie ainsi que le banc d'essai.

5.2.1 Structure à inspecter

La structure à inspecter (représentée à la figure 3.2(b)) est une structure en béton qui reproduit à l'échelle 1:2 une structure semblable à celles que l'on peut trouver dans un barrage hydroélectrique. Plus précisément, la structure reproduit les guides latéraux destinés à accueillir une porte qui coulisse verticalement ainsi que le linteau sur lequel vient s'appuyer cette porte lorsqu'elle est complètement descendue dans la structure. La surface du linteau est la surface que l'on veut inspecter. La figure 6.2 donne une vue schématique de la structure.

5.2.2 Porteur

Les développements relatifs au porteur du système de cartographie sont décrits dans (Beaudry et al., 2006). À des fins de clarté, une brève description du porteur et de son fonctionnement sont donnés à la section 3.2.1.

5.2.3 Unité de mesure

L'implémentation de l'unité de mesure s'est faite en deux étapes:

- Tout d'abord nous avons conçu et mis en place une procédure de calcul qui met en relation les contraintes du cahier des charges qui nous était soumis avec les paramètres de l'unité.
- Les résultats fournis par notre procédure nous ont ensuite permis de choisir les composantes de l'unité qui permettaient de respecter les contraintes du cahier des charges.

5.2.3.1 Logiciel d'aide à l'implémentation

Le cahier des charges énonce essentiellement des contraintes de résolution de mesure, de distance de travail et de dimensions compactes de l'unité:

- La première application du système de cartographie nécessite de résoudre des variations de profondeur de l'ordre de 3 mm. Pour la conception de ce premier prototype, nous avons décidé de surdimensionner le système: nous avons choisi de fixer la résolution théorique voulue à 0,3 mm.
- La distance de travail minimale est de 10 cm.
- Les dimensions de l'unité doivent être telles qu'elle puisse être embarquée sur le porteur.

Nous avons mis au point une procédure de calcul qui prend en entrée la résolution voulue et les spécifications techniques d'un ensemble caméra-lentille disponible commercialement. Les spécifications que nous considérons sont le nombre de pixels de la matrice CCD de la caméra et la focale de la lentille. La procédure de calcul donne en sortie les dimensions de l'unité de mesure qui respectent la résolution demandée à la distance de travail maximale. Effectivement, la résolution varie sur la plage de mesure: elle est plus forte lorsque l'on est proche. En considérant la résolution à la distance de travail maximale, la résolution théorique est au pire égale à la résolution voulue. Il suffit finalement de décider si les dimensions calculées sont acceptables. La figure 5.1 montre un diagramme entrée-sortie de la procédure.

Nous avons calculé les dimensions de l'unité de mesure pour plusieurs matrices CCD et plusieurs lentilles que l'on trouve actuellement sur le marché. Ces dimensions ont été calculées en utilisant des fonctions d'optimisation. Les seules contraintes de distance de travail minimale et de résolution de mesure permettent de fixer la position-orientation des lasers de façon unique. Cette position-orientation est en fait

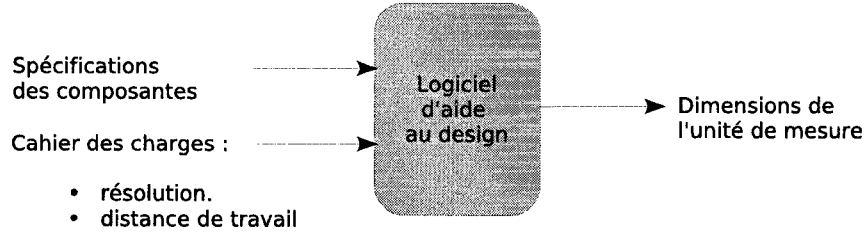


Figure 5.1 Fonction de la procédure de calcul pour l'aide à l'implémentation

définie dans un plan vertical et est décrite par deux paramètres: la distance du plan laser au centre optique et l'inclinaison du plan laser.

Pour calculer la résolution de mesure, nous nous plaçons dans le cas simplifié où la projection dans l'image d'un point P_L recouvre exactement un pixel. Les coordonnées 3D de P_L sont obtenues par triangulation au moyen de l'équation (3.18). Considérons les points de la scène $[P_{L_1}]_{CAM} = [X_1 \ Y_1 \ Z_1]_{CAM}^T$ et $[P_{L_2}]_{CAM} = [X_2 \ Y_2 \ Z_2]_{CAM}^T$ illustrés à la figure 5.2 et tels que $[P_{L_1}]_{IMG} = [u \ v]^T$ et $[P_{L_2}]_{IMG} = [u \ v - 1]^T$. La résolution de mesure ρ est alors la variation de distance $[\Delta Z]_{CAM}$ qui correspond à une variation de 1 pixel selon l'axe v_i du repère image:

$$\rho = [Z_1]_{CAM} - [Z_2]_{CAM} \quad (5.1)$$

La figure 5.3 montre le résultat que nous avons obtenu avec une matrice CCD d'une résolution de 1392 par 1040 pixels et une distance focale de $f = 8$ mm. Les lasers sont à une distance de 15 cm du centre optique et ont une inclinaison de 46° . Il n'est pas surprenant d'observer que plus la résolution de la matrice CCD augmente, plus le système peut être compact et avoir une plage de mesure plus grande.

L'unité de mesure a été construite en accord avec les résultats fournis par le logiciel. La figure 5.4 montre la résolution théorique de l'unité de mesure pour le jeu de paramètres reportés aux tableaux 5.1 et 5.4 calibrés dans l'eau. On observe que la résolution de mesure approche la résolution de 0,3 mm que nous nous étions fixé.

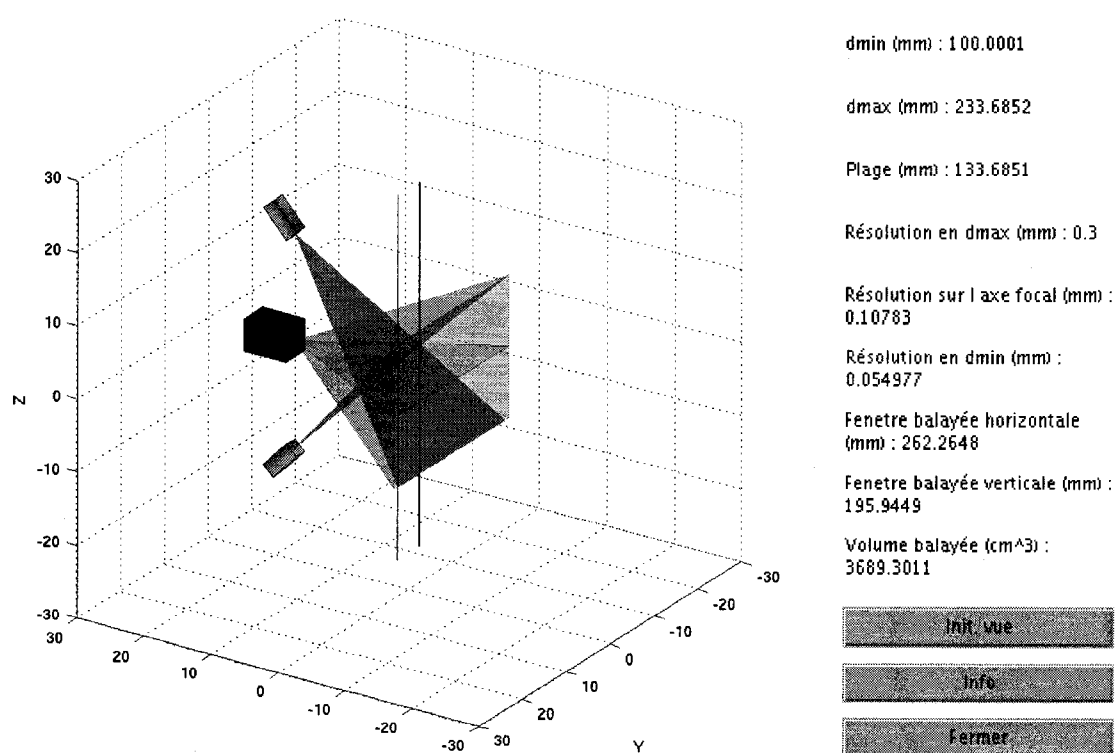


Figure 5.3 Configuration géométrique adoptée pour une résolution de mesure théorique de 0,3 mm.

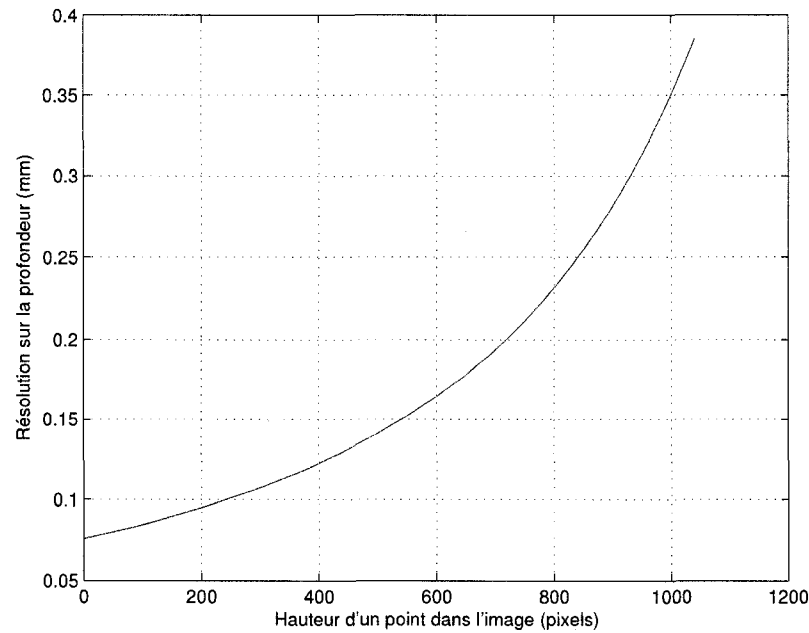


Figure 5.4 Résolution théorique de l'unité de mesure

5.2.3.2 Implémentation de l'unité

L'implémentation de l'unité utilise les composantes suivantes:

- Une caméra Pulnix TM1325CL: la caméra capture des images d'une résolution de 1392 par 1040 pixels à un taux de rafraîchissement de 30 images par seconde. Les images sont transmises à la mémoire centrale de l'ordinateur de traitement par voie numérique selon le protocole Camera Link. La zone mémoire où est stockée l'image correspond donc fidèlement à l'image capturée par le CCD (ceci n'était pas le cas avec une transmission analogique du signal video).
- Une lentille Moritex ML-M0814MP, d'une distance focale de 8 mm: nous verrons par la suite que la focale calibrée est de l'ordre de 8,4 mm dans l'air et de 11,3 mm dans l'eau.
- Un filtre optique passe haut à 610 nm: ce filtre ne laisse passer que les longueurs

d'onde supérieures à 610 nm. Cet élément facilite le traitement d'image puisqu'il permet en quelque sorte de rehausser le signal des projecteurs laser.

- Un convertisseur de signal EDT RCX-C-Link: le convertisseur envoie le signal video de la caméra à un ordinateur de traitement via une fibre optique. Tous les traitements sont faits à la surface par un ordinateur qui peut ainsi être situé à plusieurs centaines de mètres de l'unité de mesure.
- Deux projecteurs laser ligne StockerYale SNF: les projecteurs ont une puissance de 35 mW.

La figure 5.5 montre une photo des composantes de l'unité de mesure insérées dans le boîtier étanche visible à la figure 3.3(b).

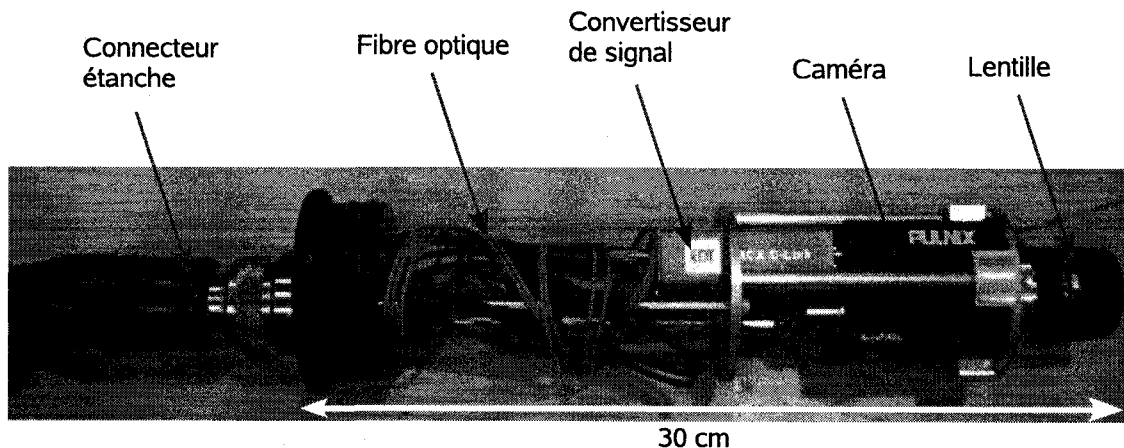


Figure 5.5 Photographie du système de vision.

5.2.4 Unité de traitement

L'acquisition et le traitement du signal issu de la caméra sont réalisés par un logiciel que nous avons programmé en C++. L'application utilise les fonctions de la librairie de robotique Microb (Microb, 2007) pour les objets mathématiques, la communication ainsi que certaines transformations. Le traitement d'image a été réalisé avec les

fonctions fournies par la librairie OpenCV (OpenCV, 2007). L'application est exécutée sous un système d'exploitation Linux Debian Sarge. Cette application traite les données en temps réel à 30 images par seconde. Bien que le système d'exploitation ne soit pas temps réel, nous nous sommes assurés que la période d'échantillonnage du système était bien respectée. Cette période d'échantillonnage est respectée tant que les canaux de transmission ne sont pas saturés et tant qu'un nombre restreint d'applications s'exécutent sur l'ordinateur de traitement. Éventuellement, le système de mesure pourrait être intégré dans une boucle de contrôle.

Les résultats donnés par l'application ont été testés rigoureusement, étape par étape. L'application peut fonctionner selon trois modes:

- Le premier mode, que nous avons appelé *mode mathématique*, simule uniquement les équations du système. C'est à dire que le traitement d'image n'intervient pas. Les résultats obtenus dans ce mode doivent avoir une erreur de l'ordre de la précision machine ($1e^{-12}$). Notons que les algorithmes testés dans ce mode de fonctionnement ont déjà été implémentés en Matlab, ce qui nous a fourni un autre moyen de validation.
- Le deuxième mode, appelé *mode synthétique*, est un mode de fonctionnement simulé où l'on génère des images synthétiques. Ces images sont traitées afin d'en extraire les informations utiles pour la localisation et la cartographie. Notons que le traitement d'image introduit une perturbation dans les mesures provenant de la discrétisation de l'image.
- Le troisième mode est le *mode expérimental*. Dans ce mode, les images sont capturées par la caméra réelle.

Le mode expérimental réutilise les fonctions du mode synthétique autant que possible. De la même manière, le mode synthétique réutilise les fonctions du mode

mathématique. On s'assure de cette façon que si notre logiciel donne des résultats valides en mode mathématique, alors les calculs seront aussi bien effectués mode synthétique et en mode expérimental.

5.3 Évaluation des algorithmes de traitement

5.3.1 Calibrage de l'unité de mesure

L'unité de mesure a été calibrée en utilisant les méthodes décrites aux sections 4.1.1 et 4.1.2. Le calibrage de la caméra utilise l'implémentation de la méthode de Zhang de la librairie OpenCV et le calibrage des lasers utilise notre propre implémentation. Ces implémentations ont été testées sur des images synthétiques et donnent des résultats valides. Nous donnons dans les sections suivantes des résultats d'expériences sur des données réelles.

5.3.1.1 Calibrage de la caméra

Les tableaux 5.1 et 5.2 présentent les résultats de deux séries d'expériences de calibrage dans l'air puis dans l'eau. Une première série d'expériences a été menée en juillet 2006. Les paramètres estimés à ce moment sont ceux que nous avons utilisés pour obtenir les résultats de cartographie que nous présentons dans ce chapitre. Une seconde série d'expériences a été menée en octobre 2006. Les paramètres estimés ont été utilisés pour obtenir les résultats que nous présentons au chapitre 6. On peut voir une amélioration des résultats au cours du temps puisque nous avons acquis une plus grande expérience pratique au cours des manipulations.

Notons que les expériences de calibrage de la première série (tableau 5.1) ont été effectuées à 1 mois d'intervalle alors que les expériences de la deuxième série ont été

Tableau 5.1 Paramètres de la caméra calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la première série d'expériences. Les paramètres ont été estimés à partir de 1078 points et 924 points respectivement. L'incertitude sur les valeurs estimées est caractérisée par un intervalle de confiance à 99% $\Delta = \pm 3\sigma$.

		Air		Eau	
		$\Delta = \pm 3\sigma$		$\Delta = \pm 3\sigma$	
f (mm)	8,42	$\pm 3,44e^{-2}$	11,24	$\pm 5,06e^{-2}$	
α_u (pix)	1307,87	$\pm 5,43e^{+0}$	1743,59	$\pm 7,96e^{+0}$	
α_v (pix)	1303,44	$\pm 5,20e^{+0}$	1741,44	$\pm 7,74e^{+0}$	
u_0 (pix)	735,25	$\pm 6,37e^{+0}$	736,18	$\pm 9,63e^{+0}$	
v_0 (pix)	502,34	$\pm 4,49e^{+0}$	512,89	$\pm 6,44e^{+0}$	
k_1	$-9,83e^{-2}$	$\pm 1,20e^{-2}$	$1,68e^{-1}$	$\pm 1,94e^{-2}$	
k_2	$1,70e^{-1}$	$\pm 5,24e^{-2}$	$4,20e^{-1}$	$\pm 1,60e^{-1}$	

Tableau 5.2 Paramètres de la caméra calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences. Les paramètres ont été estimés à partir de 1309 points et 1078 points respectivement. L'incertitude sur les valeurs estimées est caractérisée par un intervalle de confiance à 99% $\Delta = \pm 3\sigma$.

		Air		Eau	
		$\Delta = \pm 3\sigma$		$\Delta = \pm 3\sigma$	
f (mm)	8,44	$\pm 9,32e^{-3}$	11,21	$\pm 1,86e^{-2}$	
α_u (pix)	1306,07	$\pm 1,45e^{+0}$	1736,94	$\pm 2,98e^{+0}$	
α_v (pix)	1309,63	$\pm 1,44e^{+0}$	1740,38	$\pm 2,80e^{+0}$	
u_0 (pix)	721,25	$\pm 1,53e^{+0}$	711,94	$\pm 3,20e^{+0}$	
v_0 (pix)	501,56	$\pm 1,31e^{+0}$	504,10	$\pm 2,84e^{+0}$	
k_1	$-1,07e^{-1}$	$\pm 1,91e^{-3}$	$1,59e^{-1}$	$\pm 5,61e^{-3}$	
k_2	$1,76e^{-1}$	$\pm 4,44e^{-3}$	$4,03e^{-1}$	$\pm 3,04e^{-2}$	

effectuées dans la même journée. La cible utilisée pour toutes les expériences a été la même et comporte 77 points à 10,0 mm de distance les uns des autres selon le modèle d'un échiquier. La figure 5.6 montre une image de la cible sous l'eau.

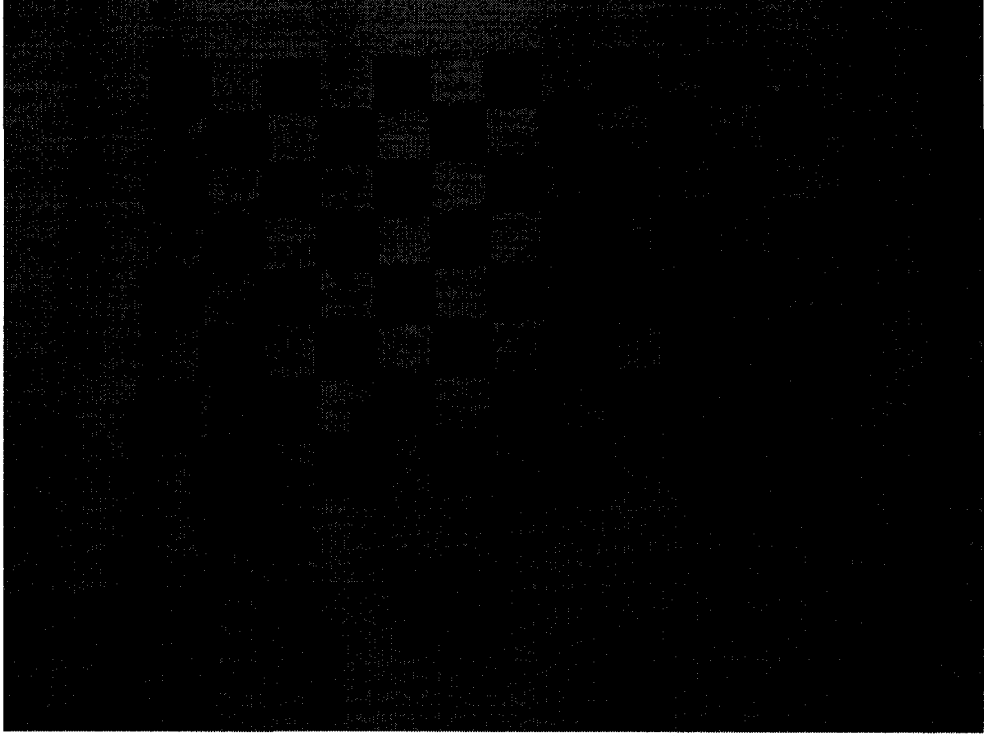


Figure 5.6 Image de la cible à 77 points sous l'eau.

L'écart type des erreurs de reprojection

$$\sigma_{erreur} = E \left[([\tilde{P}_i]_{IMG} - [\hat{P}_i]_{IMG})^T ([\tilde{P}_i]_{IMG} - [\hat{P}_i]_{IMG}) \right]$$

nous renseigne sur la validité du modèle de la caméra. On trouve $\sigma_{erreur,air} = [0, 60 \ 0, 44]$ pixels et $\sigma_{erreur,eau} = [0, 48 \ 0, 40]$ pixels pour la première série d'expériences et $\sigma_{erreur,air} = [0, 14 \ 0, 13]$ pixels et $\sigma_{erreur,eau} = [0, 23 \ 0, 21]$ pixels pour la deuxième série. Cette mesure montre que le modèle de la caméra est valide.

Les résultats permettent aussi de vérifier certaines des conclusions de l'étude de (Lavest, Rives, & Lapreste, 2002):

- La distance focale est multipliée par 1,33 quand on passe de l'air à l'eau. Ce

facteur correspond à l'indice de réfraction de l'eau. Notons ici que nous supposons que la vitre avant du boîtier étanche est à faces parallèles et parallèle au plan image. Cette hypothèse fait que l'on ignore la présence de la vitre. À partir de la distance focale dans l'air, on peut donc prévoir la distance focale dans l'eau:

$$\tilde{f}_{eau} = 8,42mm \times 1,33 = 11,20 \text{ mm}$$

L'erreur par rapport à la distance focale effectivement calibrée dans l'eau est de

$$\tilde{f}_{eau} - f_{eau} = 39\mu m$$

soit 0,34%. De la même façon, pour la deuxième série d'expériences, on observe que

$$\tilde{f}_{eau} = 8,44 \times 1,33 = 11,23 \text{ mm}$$

On obtient ainsi une erreur de

$$\tilde{f}_{eau} - f_{eau} = 5\mu m$$

soit 0.05%. On observe ici une erreur plus faible que précédemment car les deux calibrages ont été effectués l'un après l'autre dans la même journée, ce qui a limité la dérive des paramètres.

- Le centre de l'image reste presque à la même position. On note une variation pouvant aller jusqu'à 10 pixels selon un des axes de l'image. Ces variations peuvent avoir deux sources. Soit notre modèle ne représente pas le système de façon assez précise: la vitre du boîtier étanche de la caméra a par exemple une influence que nous n'avons pas pris en compte. Soit ces différences sont dues aux différences dans les données expérimentales (nous avons pris trop peu de données pour que l'influence du bruit soit masquée) et aux montages/démontages successifs de la lentille.

Même s'il n'existe pas de formule analytique pour évaluer les distorsions dans l'eau à partir des distorsions dans l'air, il serait certainement possible de prévoir ces distorsions comme le propose l'article de Lavest et al.. Cependant les résultats que nous avons obtenus jusqu'à présent ne permettent pas de confirmer ce résultat présenté

dans l'article.

Calibrage de la caméra à partir de quatre points

Nous avons vu à la section 4.1.1 que la caméra pouvait être calibrée à partir de plusieurs images d'une cible comportant un minimum de quatre points coplanaires. Nous avons réalisé cette expérience à partir d'une cible constituée d'un carré de 75 mm de côté. Une photo de cette cible utilisée lors d'un calibrage dans l'air est montrée à la figure 5.7. Les données pour le calibrage ont été collectées en capturant en continu des images d'une cible se déplaçant lentement devant la caméra. La cible est déplacée de telle façon que les quatre points soient capturés dans toutes les zones de l'image. Ceci s'avère nécessaire pour bien estimer les distorsions de la lentille. Le tableau 5.3 présente les paramètres estimés. Ces résultats sont à comparer avec ceux des tableaux 5.1 et 5.2. On observe que les paramètres estimés ne changent pas sensiblement compte tenu du fait que la lentille de la caméra a été démontée puis remontée plusieurs fois entre les expériences et que le focus et le diaphragme ont aussi été changés. On remarque enfin que les paramètres u_0 , k_1 et k_2 sortent de l'intervalle de confiance à 99% lorsque l'on rajoute plus de points pour l'estimation. Cette différence appelle une meilleure vérification de ces intervalles.

Ces résultats donnent une confirmation expérimentale que la caméra peut très bien être calibrée sous l'eau devant les fils auxquels on aura ajouté quatre points fixes. Dès lors que la caméra est calibrée, les lasers peuvent à leur tour aussi être calibrés. C'est la proposition que nous formulons à la section 7.7.

5.3.1.2 Calibrage des plans lasers

Les tables 5.4 et 5.7 présentent les paramètres des plans lasers que nous avons calibrés au cours des deux séries d'expériences. Les valeurs de la table 5.4 sont celles



Figure 5.7 Image de la cible à 4 points dans l'eau.

Tableau 5.3 Paramètres de la caméra calibrée à partir d'une cible à quatre points: nous donnons les résultats pour un calibrage utilisant 1316 points et 2400 points. Évidemment, plus le nombre d'image augmente, plus l'intervalle de confiance des paramètres $\Delta = \pm 3\sigma$ diminue.

1316 points			2400 points	
		$\Delta = \pm 3\sigma$		$\Delta = \pm 3\sigma$
f (mm)	8,41	$\pm 2,88e^{-2}$	8,40	$\pm 2,34e^{-2}$
α_u (pix)	1305,57	$\pm 4,41e^{+0}$	1302,86	$\pm 3,59e^{-0}$
α_v (pix)	1303,14	$\pm 4,53e^{+0}$	1300,66	$\pm 3,66e^{-0}$
u_0 (pix)	728,10	$\pm 2,93e^{+0}$	723,74	$\pm 1,86e^{-0}$
v_0 (pix)	512,90	$\pm 1,75e^{+0}$	511,79	$\pm 1,39e^{-0}$
k_1	$-1,13e^{-1}$	$\pm 5,23e^{-3}$	$-1,11e^{-1}$	$\pm 3,01e^{-3}$
k_2	$1,86e^{-1}$	$\pm 1,65e^{-2}$	$1,79e^{-1}$	$\pm 9,42e^{-3}$

que nous avons utilisées pour obtenir les résultats de cartographie présentés dans ce chapitre alors que les valeurs de la table 5.7 ont été utilisées lors de la première série d'expériences sur site. Ces résultats sont présentés au chapitre 6.

Que l'unité de mesure soit dans l'air ou dans l'eau, on se serait attendu à ce que les paramètres des plans lasers restent les mêmes. Les paramètres (a, b, c, d) représentent effectivement les paramètres extrinsèques des plans par rapport au repère caméra; et un point fixe dans l'espace reste à la même position que ce soit dans l'air ou dans l'eau. La comparaison des valeurs obtenues dans l'air et dans l'eau montre cependant une variation des paramètres. Ceci pourrait être normal pour la première série d'expériences puisqu'entre temps l'orientation des miroirs a été modifiée. Mais on observe aussi une différence dans la deuxième série. Il semble¹ que cette différence vient du fait que l'angle d'incidence du plan laser sur la vitre du boîtier est non nul. À cause du phénomène de réfraction, le plan laser change d'orientation lorsqu'il est plongé dans l'eau. La seule solution à ce problème est de spécifier au constructeur que l'angle d'incidence du plan laser soit nul. Cet angle d'incidence ne sera jamais exactement nul mais il doit être suffisamment faible pour que l'erreur soit négligeable. Il semble très difficile d'utiliser l'angle d'incidence pour appliquer une correction aux paramètres car même si nous connaissions cet angle, il nous faudrait aussi connaître la position de la vitre par rapport à la caméra pour appliquer la correction.

Les tables 5.5 et 5.6 puis 5.8 et 5.9 présentent des statistiques sur les résidus de l'estimation.

- Que ce soit dans l'air ou dans l'eau, on observe que les variances des distances des points mesurés $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan estimé sont de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Ces valeurs sont très faibles et montrent que les points sont peu bruités. L'algorithme de RANSAC utilisé pour éliminer les mesures aberrantes

¹Il faudrait vérifier cela par d'autres expériences.

prend en paramètre un seuil sur la distance entre un point et le plan estimé pour déterminer si la mesure est aberrante. Nous avons fixé ce seuil à $80 \mu m$. C'est en parti grâce à ce seuil que nous obtenons ces résultats. La taille initiale des données utilisées pour l'estimation est d'environ 7000 points. Après élimination des mesures aberrantes, l'algorithme garde 2000 à 3000 points. Notre choix de seuil est trop sélectif mais 2000 à 3000 points sont très suffisants pour estimer un plan.

- On observe par ailleurs que la moyenne des distances des points au plan n'est pas nulle. On désignera ici par nul une valeur ϵ très faible. Ici on observe systématiquement plusieurs micromètres de biais. Nous verrons par la suite que le bruit sur les points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ n'est pas isotrope et son amplitude dépend de la distance au centre optique. L'estimateur que nous utilisons est donc biaisé. Ce résultat est aussi développé dans un contexte plus théorique dans (Kanazawa & Kanatani, 1995) et (Kanatani, 1996).

Dans la pratique, les paramètres estimés sont directement vérifiés en visualisant les images de la reprojection des plans lasers sur les plans de calibrage. Cette méthode est expliquée à la section 4.1.2.3. Les figures 5.8 et 5.9 montrent le résultat d'une estimation avec et sans l'utilisation de l'algorithme de RANSAC en présence de mesures aberrantes: si la ligne laser reprojctée ne se superpose pas à la ligne laser mesurée, alors les paramètres sont faux. S'il y a une bonne superposition, alors les paramètres sont valides. Les résultats que nous avons obtenus non seulement donnent une validation supplémentaire du modèle de la caméra mais valident aussi l'ensemble de la caméra et des lasers, pris l'un après l'autre.

5.3.2 Localisation de l'unité de mesure

Le calcul de la pose de l'unité relativement au repère lié aux fils utilise l'algorithme

Tableau 5.4 Paramètres des plans lasers calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la première série d'expériences. Les paramètres ont été estimés à partir de 3423 points et 4128 points pour les lasers 1 et 2 dans l'air puis 1634 points et 1782 points pour les lasers 1 et 2 dans l'eau. L'incertitude sur les valeurs estimées est caractérisée par un intervalle de confiance à 99% $\Delta = \pm 3\sigma$.

Air			Eau	
		$\Delta = \pm 3\sigma$		$\Delta = \pm 3\sigma$
a_1	$-6,685e^{-1}$	$\pm 3,17e^{-5}$	$-6,552e^{-1}$	$\pm 5,60e^{-5}$
b_1	$-4,016e^{-3}$	$\pm 3,03e^{-5}$	$-2,017e^{-2}$	$\pm 5,78e^{-5}$
c_1	$7,437e^{-1}$	$\pm 2,85e^{-5}$	$7,551e^{-1}$	$\pm 4,84e^{-5}$
d_1 (mm)	-106,980	$\pm 5,90e^{-3}$	-113,157	$\pm 1,46e^{-2}$
a_2	$-6,224e^{-1}$	$\pm 3,72e^{-5}$	$-6,239e^{-1}$	$\pm 4,15e^{-5}$
b_2	$2,495e^{-2}$	$\pm 3,11e^{-5}$	$2,925e^{-2}$	$\pm 5,46e^{-5}$
c_2	$-7,822e^{-1}$	$\pm 2,95e^{-5}$	$-7,810e^{-1}$	$\pm 3,29e^{-5}$
d_2 (mm)	-106,908	$\pm 7,08e^{-3}$	-114,195	$\pm 1,05e^{-2}$

Tableau 5.5 Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'air lors de la première série d'expériences.

	Plan laser 1	Plan laser 2
Distance maximale des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	116,85 μm	179,03 μm
Distance moyenne des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	4,73 μm	-2,01 μm
Écart type des distances des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	45,57 μm	52,12 μm

Tableau 5.6 Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans laser dans l'eau lors de la première série d'expériences.

	Plan laser 1	Plan laser 2
Distance maximale des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	98,84 μm	135,52 μm
Distance moyenne des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	0,88 μm	11,51 μm
Écart type des distances des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	43,29 μm	47,42 μm

Tableau 5.7 Paramètres des plans lasers calibrés dans l'air puis dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences. Les paramètres ont été estimés à partir de 2819 points et 2467 points pour les lasers 1 et 2 dans l'air puis 2739 points et 3179 points pour les lasers 1 et 2 dans l'eau. L'incertitude sur les valeurs estimées est caractérisée par un intervalle de confiance à 99% $\Delta = \pm 3\sigma$.

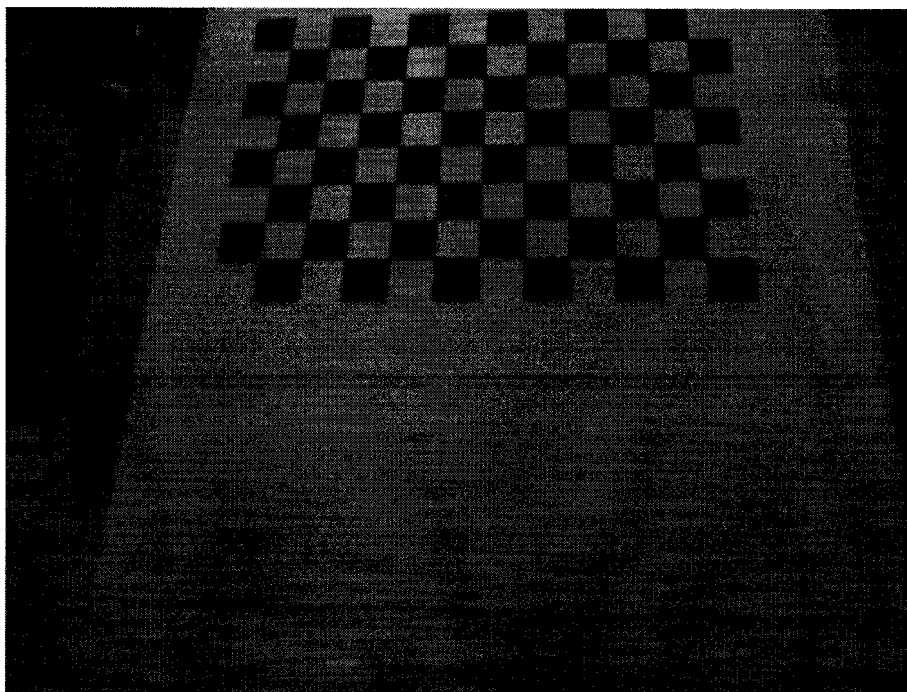
Air			Eau	
$\Delta = \pm 3\sigma$			$\Delta = \pm 3\sigma$	
a_1	-6,176e ⁻¹	$\pm 3,24e^{-5}$	-6,147e ⁻¹	$\pm 2,98e^{-5}$
b_1	1,402e ⁻²	$\pm 3,69e^{-5}$	1,625e ⁻²	$\pm 3,43e^{-5}$
c_1	7,863e ⁻¹	$\pm 2,53e^{-5}$	7,886e ⁻¹	$\pm 2,34e^{-5}$
d_1 (mm)	-113,215	$\pm 7,50e^{-3}$	-120,133	$\pm 8,50e^{-3}$
a_2	-5,928e ⁻¹	$\pm 2,82e^{-5}$	-5,983e ⁻¹	$\pm 3,59e^{-5}$
b_2	-3,748e ⁻²	$\pm 2,66e^{-5}$	-3,330e ⁻²	$\pm 4,73e^{-5}$
c_2	-8,044e ⁻¹	$\pm 2,10e^{-5}$	-8,006e ⁻¹	$\pm 2,72e^{-5}$
d_2 (mm)	-114,598	$\pm 6,50e^{-3}$	-120,997	$\pm 9,35e^{-3}$

Tableau 5.8 Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'air lors de la deuxième série d'expériences.

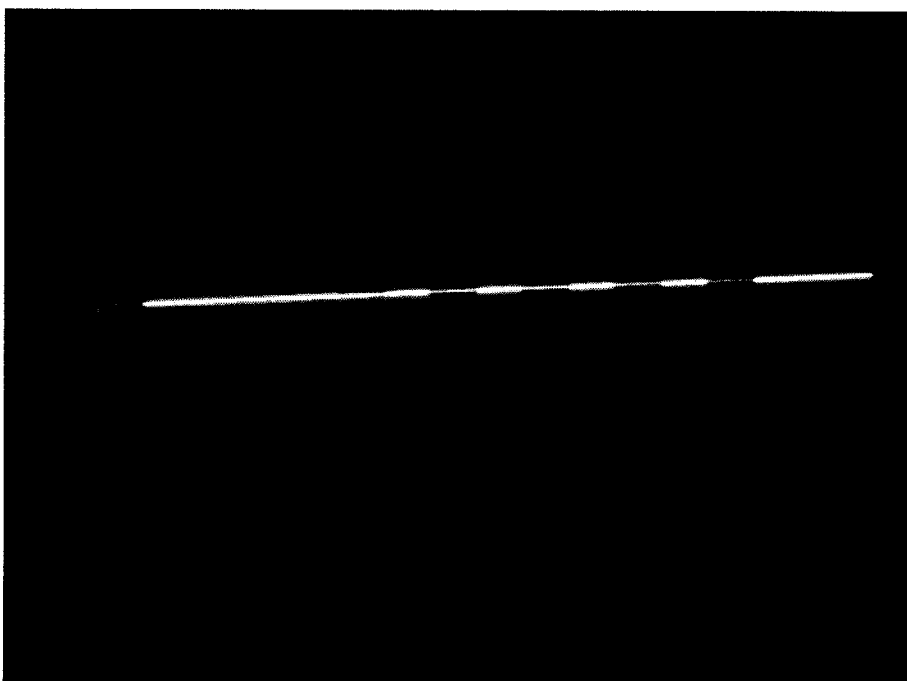
	Plan laser 1	Plan laser 2
Distance maximale des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	160,27 μm	105,32 μm
Distance moyenne des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	-30,35 μm	1,21 μm
Écart type des distances des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	47,82 μm	35,82 μm

Tableau 5.9 Statistiques des erreurs résiduelles pour le calibrage des plans lasers dans l'eau lors de la deuxième série d'expériences.

	Plan laser 1	Plan laser 2
Distance maximale des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	145,53 μm	192,43 μm
Distance moyenne des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	8,22 μm	-10,21 μm
Écart type des distances des points $[\tilde{P}_{L_i}]_{CAM}$ au plan laser estimé	50,19 μm	59,60 μm

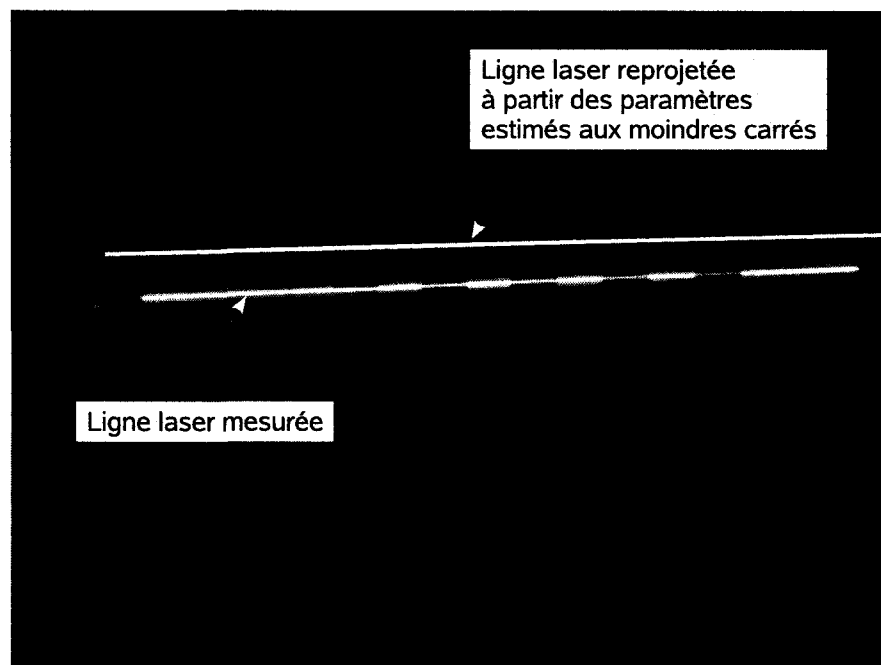


(a) Image de la cible de calibrage.

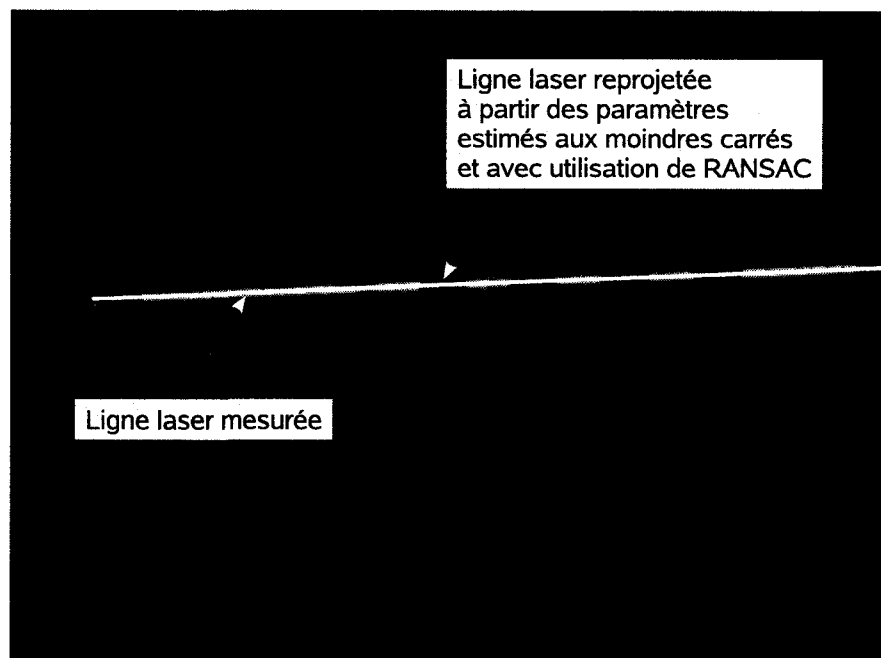


(b) Image du plan laser projeté sur la cible.

Figure 5.8 Images de la cible pour le calibrage des plans lasers.



(a) Reprojection du plan estimé aux moindres carrés.



(b) Reprojection du plan estimé aux moindres carrés avec utilisation de RANSAC.

Figure 5.9 Reprojection du plan laser estimé avec et sans élimination des mesures aberrantes par RANSAC. Dans le cas d'une estimation aux moindres carrés, on observe que la ligne reprojétée est biaisée.

décrit à la section 4.2.1. Le calcul de pose peut être vérifié avec la méthode que nous avons décrite à la section 4.2.1.3.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode, le dernier paramètre fixe qui nous reste à estimer est l'écartement des fils. La mesure de cette distance au micromètre donne $2h = 75,00$ mm.

La figure 5.10 montre une image des points $[\tilde{P}_{M_i}]_{IMG}$ capturés avec la caméra au repos avec, en surimpression, la reprojection des points $[\hat{P}_{M_i}]_{IMG}$ estimés par le modèle, sur la base des paramètres internes et externes du système. Le résultat montre une très faible erreur de reprojection, moins de 0,5 pixels en moyenne, ce qui montre que le modèle de l'unité de mesure et la méthode que nous utilisons pour la localisation sont valides.

Comme nous l'avons précisé à la section 4.2.1.4, il ne semble pas possible de calculer une incertitude sur la pose à partir de seulement quatre mises en correspondance dans une seule image.

5.3.2.1 Intégrité de la localisation

L'intégrité de la localisation de l'unité est vérifiée en suivant la procédure illustrée à la figure 4.3: si l'erreur de reprojection dépasse un certain seuil, la pose calculée est rejetée et les points de la scène mesurés dans l'image courante ne sont pas pris en compte dans la carte. Sans rétroaction entre le système de cartographie et le porteur, cette stratégie donne lieu à des trous dans les cartes puisque le système continue à balayer la surface.

Une façon de choisir le seuil sur l'erreur de reprojection est de calculer la variation des points $[P_{M_i}]_{IMG}$ qui correspond à une translation de 1 mm de l'unité de mesure

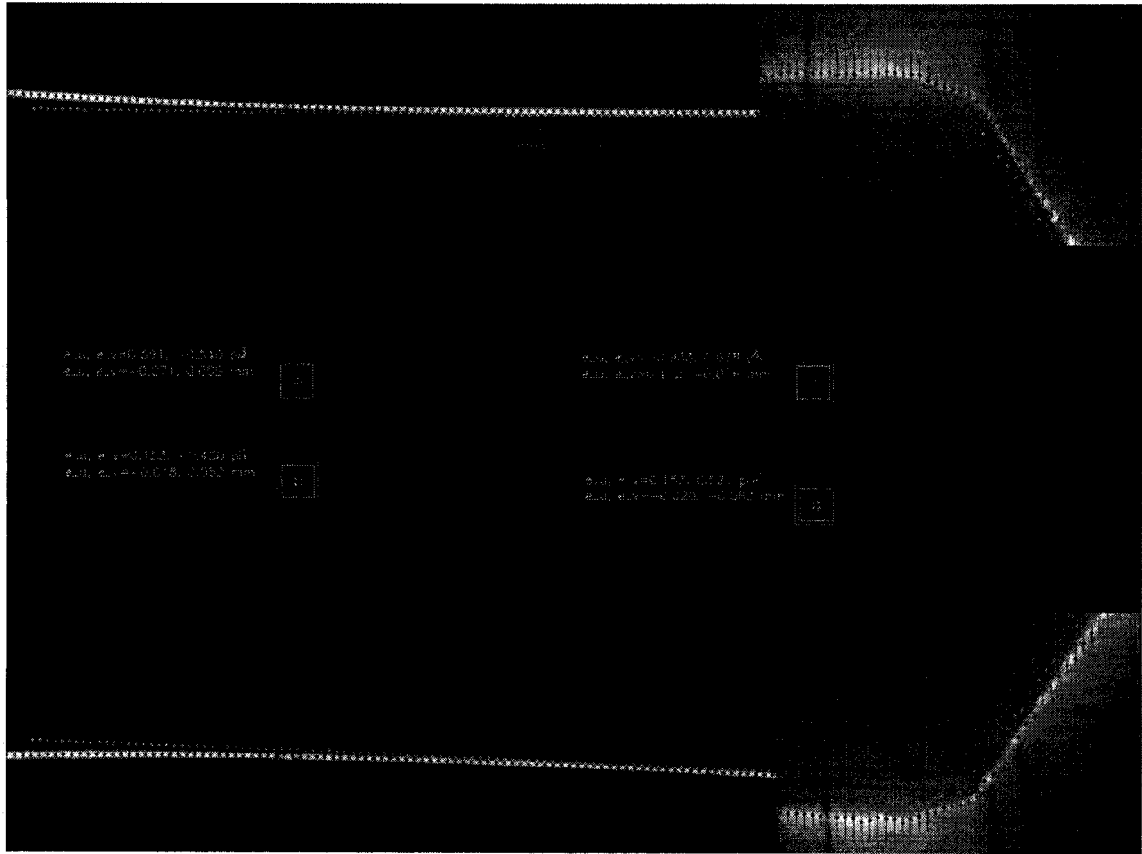


Figure 5.10 Reprojection des points \hat{P}_{M_i} dans l'image. On mesure des erreurs de reprojection $[\hat{P}_{M_i}]_{IMG} - [\tilde{P}_{M_i}]_{IMG}$ de (0,15, 0,43) pixels, (0,16, 0,52) pixels, (0,59, 0,54) pixels, (0,93, 0,64) pixels pour les points P_{M_1} , P_{M_2} , P_{M_3} et P_{M_4} respectivement.

suivant un axe perpendiculaire au plan des fils.

Notre capacité à vérifier l'intégrité de la mesure de la surface est limitée par le fait que cette partie de la scène n'est pas structurée. Comme nous le verrons au chapitre 7, notre seule possibilité au niveau de la capture des données est de prendre plusieurs mesures pour estimer un point de la surface.

5.3.3 Cartographie de la surface

5.3.3.1 Quelques précisions sur le protocole pour la collecte des données

Le système de cartographie donne en sortie un nuage de points 3D qui caractérise la surface inspectée. Ce nuage de points est mesuré selon le protocole décrit à la section 3.2.3. Nous précisons ici qu'une ligne de profil est mesurée à partir d'une seule image. Dans les résultats présentés, les lignes de profil de la surface ont été capturées à un intervalle de 1 mm. Les points d'une ligne de profil sont espacés de 1,5 mm. Un nuage de points représente donc un quadrillage dont les mailles ont environ 1,0 mm par 1,5 mm de côté. Lors des expériences, la vitesse de translation de l'unité de mesure était d'environ 3,8 mm par seconde. Il faut donc environ 17 minutes pour mesurer le linteau d'essai qui mesure 4 m.

5.3.3.2 Post-traitement des données collectées

Les figures 5.11 et 5.12 montrent des images de la surface du linteau. Ces surfaces ont été construites à partir des nuages de points 3D par triangulation de Delaunay. Ce traitement a été effectué avec le logiciel Surfer (Golden Software, 2007).

5.3.4 Test de précision sur la mesure de points appartenant à la surface inspectée

Afin d'estimer la précision du système, nous avons disposé des éléments de dimensions connues sur la surface du linteau. Les mesures de référence de ces éléments ont été prises au micromètre. Ces mêmes éléments ont ensuite été mesurés par le système de cartographie dans l'air puis dans l'eau.

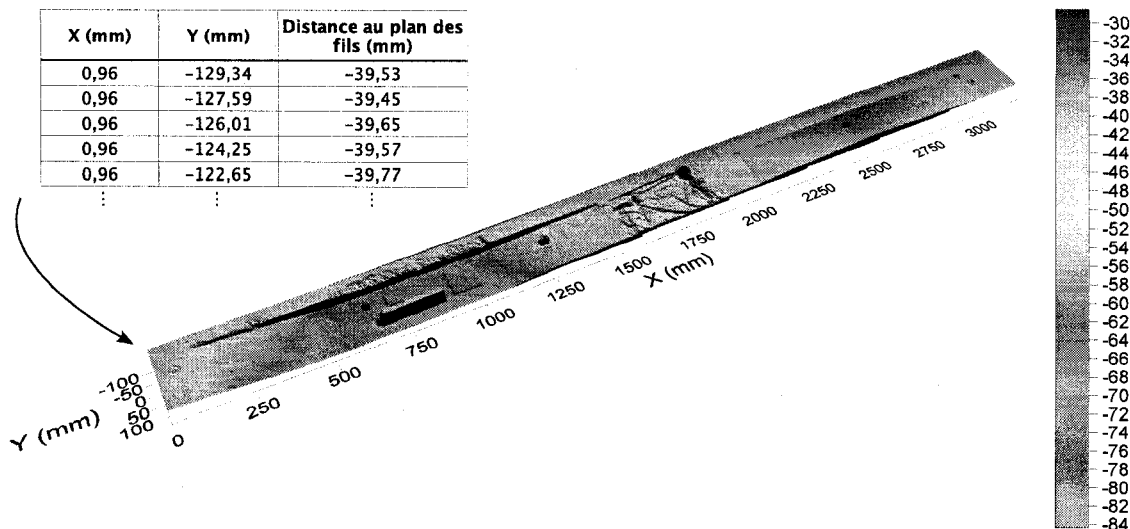


Figure 5.11 Carte du linteau obtenue dans l'air: l'image montre la surface reconstruite à partir du nuage de points 3D. La couleur est fonction de la distance au plan des fils.

La figure 5.13(a) montre une photographie des éléments disposés sur la surface et les figures 5.13(b) et 5.14(a) montrent les cartes de ces éléments obtenues respectivement dans l'air et dans l'eau.

Les points qui délimitent les objets dans les cartes 2D ont été extraits manuellement en cliquant sur les cartes. Cette extraction comporte des erreurs car la surface des objets est réfléchissante et la limite d'un objet est une discontinuité. D'après (Curlless, 1997), la mesure d'une discontinuité par triangulation optique active purement spatiale induit une erreur sur la mesure de la position de cette discontinuité. Étant données les conditions, nous avons déterminé les limites de chaque objet en pointant les changements d'intensité. En reproduisant plusieurs fois l'extraction des points, nous avons obtenu une variation de l'ordre du dixième de millimètre. Par contre, la réflexion de la ligne laser a pour effet que certaines mesures sont aberrantes et que les contours des objets restent mal définis.

Nous avons mesuré l'épaisseur des objets selon la méthode suivante:

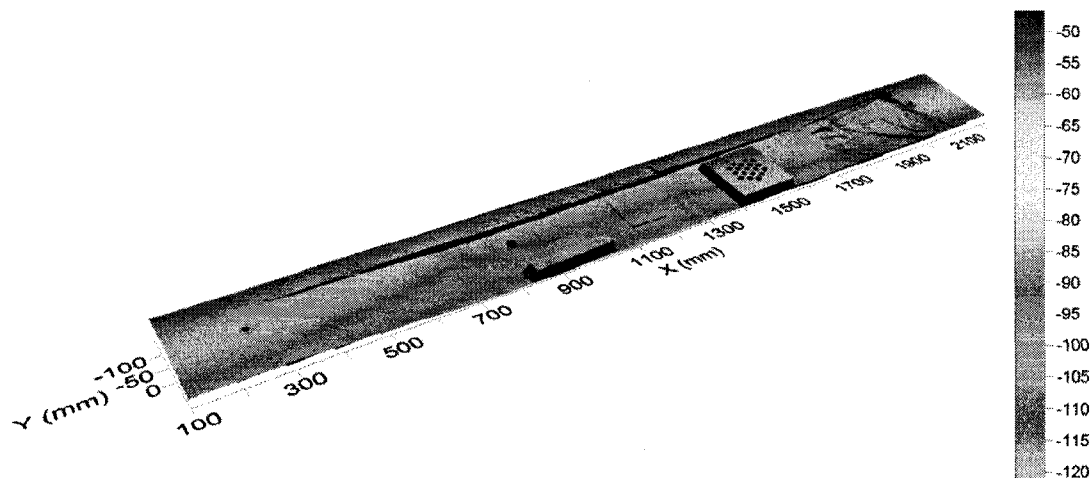


Figure 5.12 Carte du linteau obtenue dans l'eau. Le traitement pour obtenir la surface et le mode de représentation sont les mêmes que ceux de la figure 5.11.

1. Extraction des points 3D de la surface de l'objet: cette surface correspond à environ 90% de la surface qui délimite l'objet de façon à éliminer les effets de bord.
2. Estimation des paramètres du plan qui passe au mieux par les points de la surface de l'objet. Les paramètres estimés sont ceux qui minimisent la somme des distances des points au plan.
3. Calcul de la moyenne et de l'écart type des points par rapport au plan estimé. La moyenne est de l'ordre de quelques micromètres et l'écart type donne une indication sur le bruit de mesure de l'épaisseur de l'objet.
4. Estimation de l'épaisseur de l'objet en prenant pour référence zéro la zone autour de l'objet. Étant donné que cette zone est une surface en béton, elle présente une certaine rugosité qui induit des erreurs de mesure sur l'épaisseur.

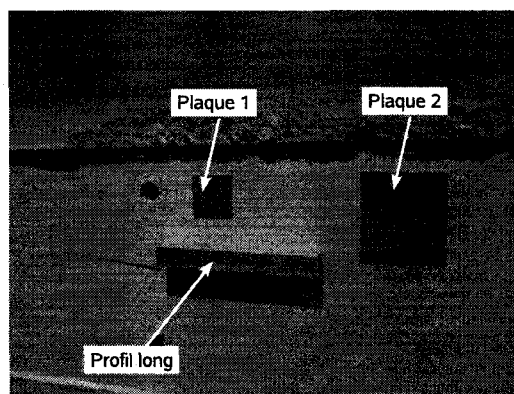
Les tables 5.10 et 5.11 rapportent les mesures obtenues. Ces résultats nous donnent une idée de deux caractéristiques du système:

- Dans de bonnes conditions, on peut voir que la précision de mesure est de l'ordre du millimètre. On note une erreur de mesure légèrement supérieure dans l'eau. Comme nous l'avons dit précédemment, ces erreurs de mesure peuvent avoir deux sources qu'il nous faudra investiguer dans la suite du projet: d'une part, il se peut qu'il faille prendre en compte plus d'éléments dans notre modèle, d'autre part, comme les manipulations dans l'eau sont plus difficiles à réaliser que dans l'air, il nous faut acquérir plus de savoir faire.
- L'écart type sur la mesure de la profondeur d'un point par rapport aux fils est de l'ordre de 0,2 mm. Une telle valeur provient d'une combinaison d'effets: l'algorithme de détection des points $[P_S]_{IMG}$ traite des valeurs entières, une variation de la coordonnée v d'un point image correspond à une certaine variation de profondeur déterminée par les paramètres du système. Théoriquement, cette variation de profondeur est de l'ordre de 0,3 mm pour une distance de travail d'environ 23 cm.

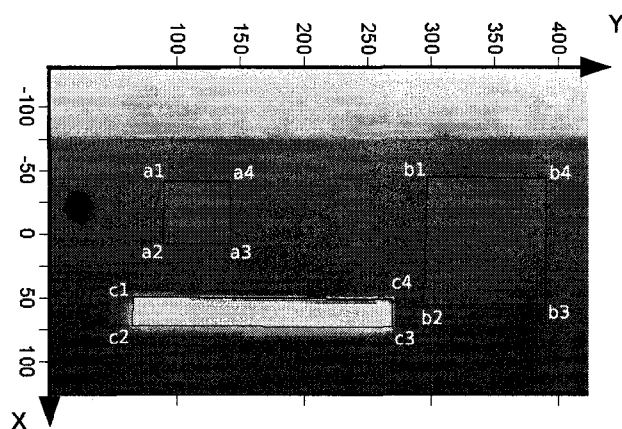
Tableau 5.10 Mesure de profondeur.

Élément	Épaisseur mesurée au micromètre (mm)	Épaisseur moyenne mesurée avec le système de cartographie (mm)			
		Air		Eau	
		σ		σ	
Profil long	25,64	25,74	0,11	26,02	0,17
Plaque 1	1,56	1,56	0,14	1,62	0,20
Plaque 2	1,64	1,71	0,14	2,02	0,22

Les figures 5.15 et 5.16 puis 5.17 et 5.18 montrent des vues de coupe des éléments de référence disposés sur la surface inspectée. On peut voir en surimpression les profils attendus de ces objets. Les figures montrent une superposition plutôt bonne. Ce résultat donne une validation supplémentaire du modèle de l'unité de mesure.



(a)

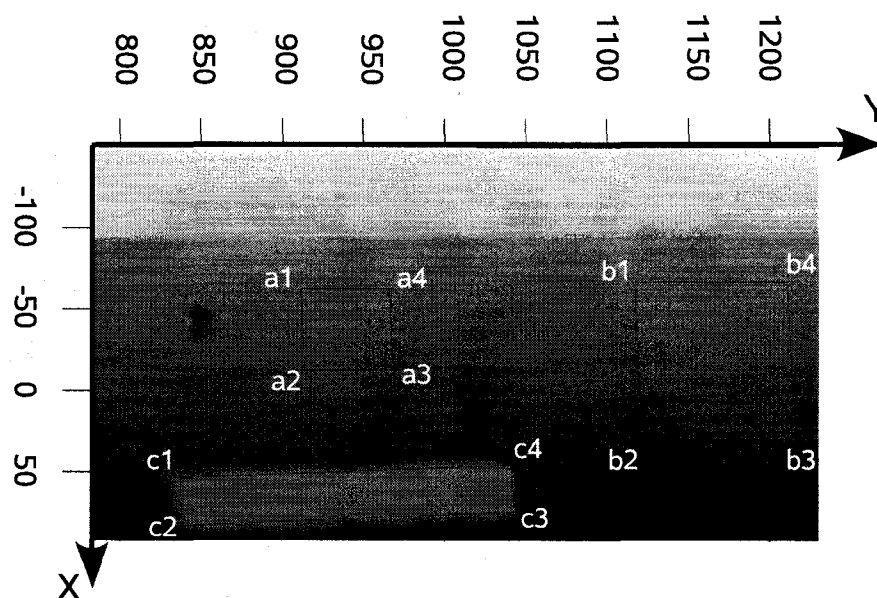


(b)

Point	Coordonnées (X, Y)	Point	Coordonnées (X, Y)	Point	Coordonnées (X, Y)
a_1	(-41,55, 89,51)	b_1	(-45,11, 296,30)	c_1	(49,16, 65,40)
a_2	(7,61, 88,35)	b_2	(55,54, 293,69)	c_2	(72,05, 64,95)
a_3	(7,48, 141,37)	b_3	(54,84, 389,66)	c_3	(72,74, 269,08)
a_4	(-41,42, 141,50)	b_4	(-44,59, 390,87)	c_4	(51,00, 269,32)

(c)

Figure 5.13 Cartographie d'une surface dans l'air. (a) montre une photographie des éléments disposés sur la surface. (b) montre la carte obtenue, présentée sous la forme d'une image en niveaux de gris où l'intensité est inversement proportionnelle à l'élévation. L'image montre la surface d'un point de vue aérien. (c) rapporte les coordonnées de points mesurés sur la carte.



(a)

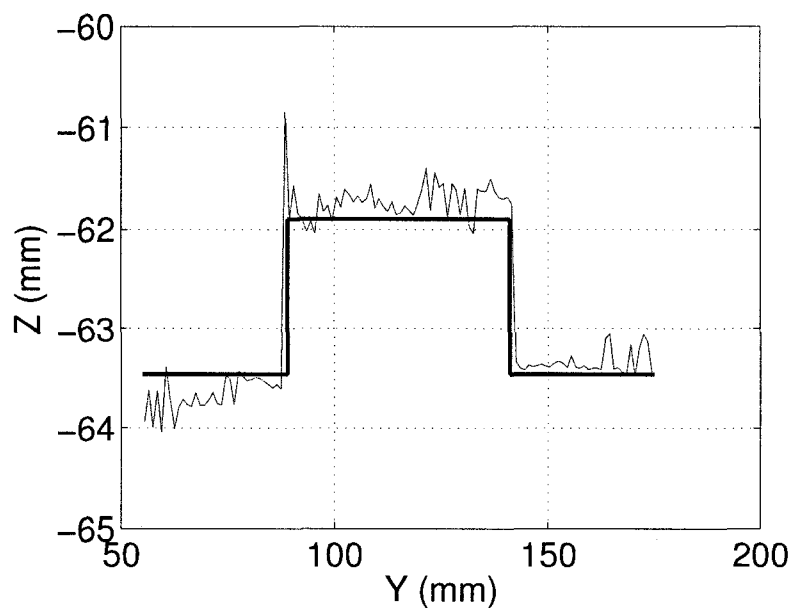
Point	Coordonnées (X, Y)	Point	Coordonnées (X, Y)	Point	Coordonnées (X, Y)
a_1	(-64,36, 910,88)	b_1	(-67,88, 1117,139)	c_1	(53,12, 838,71)
a_2	(-15,01, 913,23)	b_2	(31,88, 1122,59)	c_2	(82,54, 839,48)
a_3	(-14,64, 965,80)	b_3	(31,88, 1215,14)	c_3	(73,19, 1041,73)
a_4	(-64,12, 965,80)	b_4	(-66,71, 1211,83)	c_4	(47,079, 1041,15)

(b)

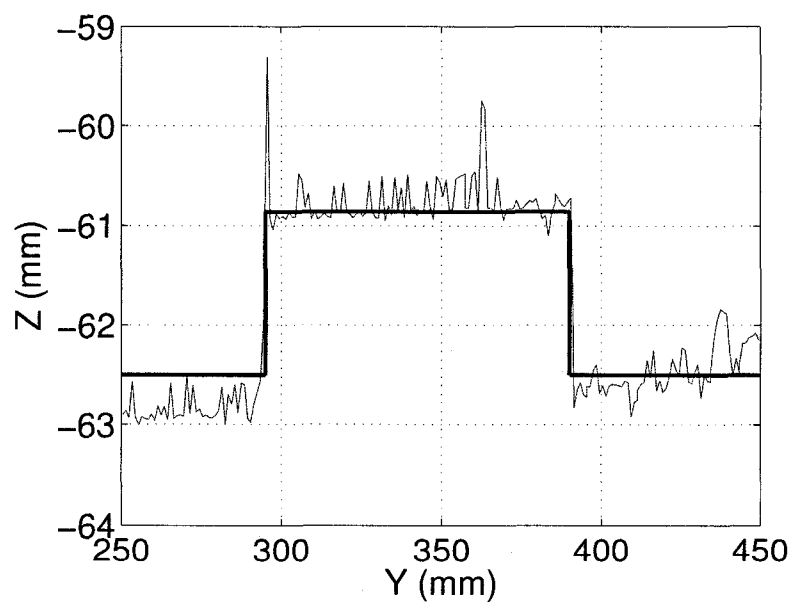
Figure 5.14 Cartographie d'une surface dans l'eau. Les éléments cartographiés sont les mêmes que ceux montrés à la figure 5.13(a). (a) montre la carte obtenue et (b) rapporte les coordonnées de points mesurés sur la carte. La représentation de la carte est du même type que celle utilisée pour la carte de la figure 5.13(b)

Tableau 5.11 Mesure d'objets 2D.

Segment	Mesure au micromètre (mm)	Mesure avec le système de cartographie (mm)		Erreur de mesure (mm)	
		Air	Eau	Air	Eau
$[a_1a_2]$	49,0	49,25	49,40	+0,25	+0,40
$[a_2a_3]$	52,0	52,71	52,57	+0,71	+0,57
$[a_3a_4]$	49,0	48,90	49,48	-0,10	+0,48
$[a_4a_1]$	52,0	52,35	54,30	+0,35	+2,30
$[b_1b_2]$	100,00	100,68	99,91	+0,68	-0,09
$[b_2b_3]$	95,00	95,97	92,55	+0,97	-2,45
$[b_3b_4]$	100,00	99,44	98,65	-0,56	-1,35
$[b_4b_1]$	95,00	94,58	94,70	-0,42	-0,3
$[c_1c_2]$	22,0	22,89	29,43	+0,89	+7,43
$[c_2c_3]$	204,0	204,13	202,46	+0,13	-1,54
$[c_3c_4]$	22,0	21,74	26,11	-0,26	+4,11
$[c_4c_1]$	204,0	203,93	202,53	-0,07	-1,57



(a) Vue de coupe de la plaque 1 mesurée dans l'air à $X = 0$ mm.



(b) Vue de coupe de la plaque 2 mesurée dans l'air à $X = 0$ mm

Figure 5.15 Vue de profil des plaques 1 et 2 mesurées dans l'air. Le trait plein épais représente le profil mesuré au micromètre.

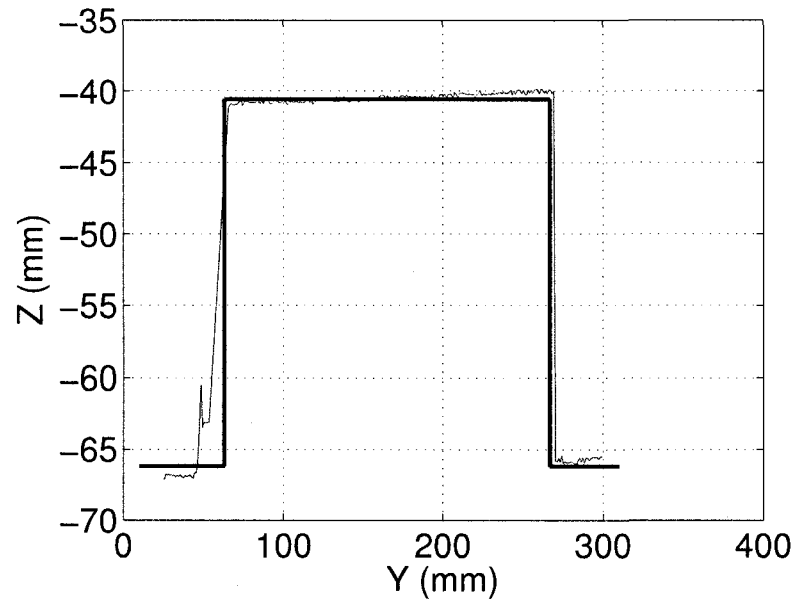
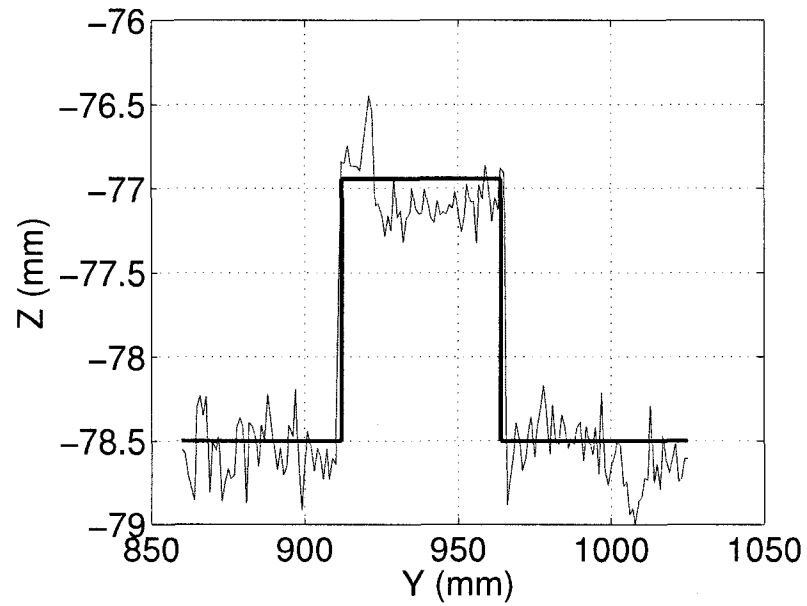


Figure 5.16 Vue de coupe du profil long mesuré dans l'air à $X = 60$ mm. Le trait plein épais représente le profil mesuré au micromètre.

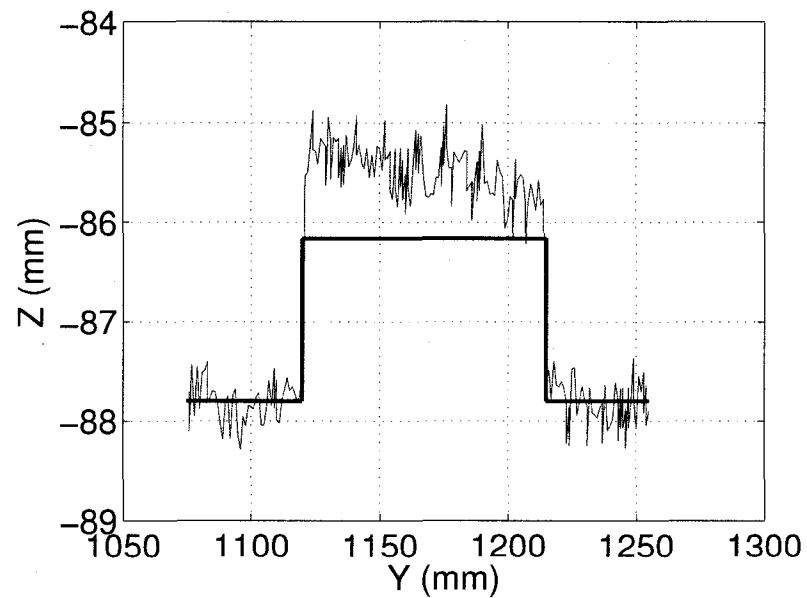
5.4 Identification des améliorations possibles

Les résultats présentés ont permis de valider le fonctionnement du système de mesure dans des conditions proches des conditions réelles. Ils mettent aussi en évidence un certain nombre d'améliorations possibles. Ces améliorations peuvent être décrites du point de vue des caractéristiques désirables du système, énoncées au chapitre 1:

- L'algorithme de cartographie doit offrir une plus grande robustesse: on note dans les résultats plusieurs mesures aberrantes.
- On ne peut pas estimer l'incertitude de mesure à partir d'une seule image.
- Le système n'atteint pas le niveau de flexibilité voulu. Pendant les expériences, il nous a fallu recalibrer plusieurs fois le système dans l'eau. Les manipulations prennent du temps et ne sont pas évidentes à réaliser.
- Le système de cartographie effectue une triangulation optique basée sur une



(a) Vue de coupe de la plaque 1 mesurée dans l'eau à $X = -49$ mm.



(b) Vue de coupe de la plaque 2 mesurée dans l'eau à $X = 0$ mm.

Figure 5.17 Vue de profil des plaques 1 et 2 mesurées dans l'eau. Le trait plein épais représente le profil mesuré au micromètre.

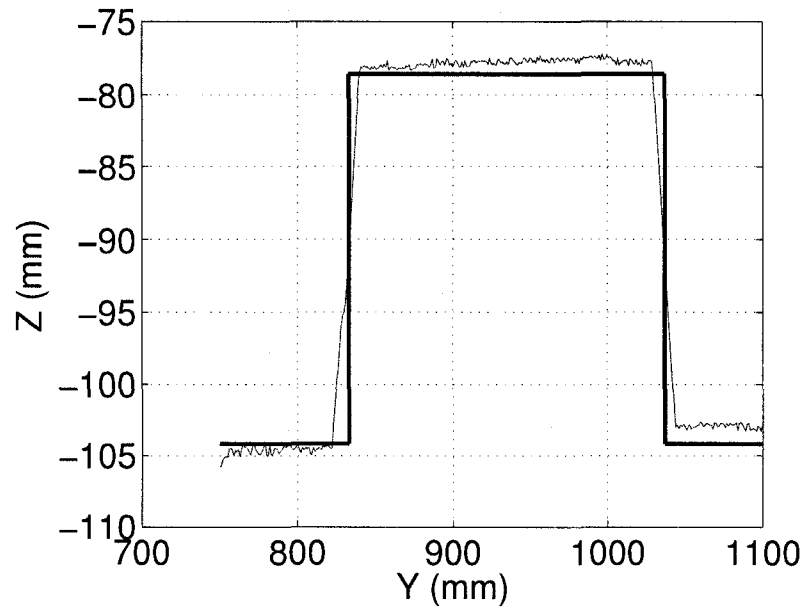


Figure 5.18 Vue de coupe du profil long mesuré dans l'eau à $X = 74$ mm. Le trait plein épais représente le profil mesuré au micromètre.

analyse purement spatiale de l'image. Le système est donc soumis à toutes les erreurs de mesure décrites dans (Curless, 1997). Curless propose une méthode dite de triangulation spatio-temporelle qui permettrait d'améliorer la précision de mesure.

5.5 Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre nous montrent que le modèle de l'unité de mesure adopté est suffisamment représentatif du système réel. Cette conclusion est basée sur trois résultats:

- L'analyse des résultats de calibrage indique que les paramètres sont estimés avec une grande précision. Le modèle arrive à prédire les mesures avec une erreur à l'échelle sous-pixel.

- L'erreur de reprojection des points $[\hat{P}_{M_i}]_{IMG}$ de moins de 0,5 pixels en moyenne indique que la localisation de l'unité est aussi très précise.
- Les mesures de la scène de référence sont valides et ont une précision de l'ordre du millimètre. Compte tenu des diverses perturbations rencontrées (réflexions du plan laser, vibrations du support de la caméra) et compte tenue de l'expérience que nous avons avec le système, ce résultat pourra être amélioré.

Lorsque le système est plongé dans l'eau, on observe une légère diminution du niveau de confiance dans les paramètres internes mais, à la précision à laquelle nous travaillons, cela ne détériore pas de manière significative la qualité des mesures.

Étant donné que l'on ne dispose que de quatre appariements, il n'est pas possible d'estimer l'incertitude de la pose calculée à partir d'une seule image de façon fiable.

On remarque que l'algorithme que nous utilisons pour le calibrage des lasers est biaisé. À l'avenir, il serait donc préférable d'utiliser un modèle de bruit plus réaliste. L'estimation pourrait se faire avec la technique de renormalisation proposée par Kanatani (1996). En pratique le biais est tellement faible qu'il ne fausse pas nos résultats de manière significative. Il existe d'autres sources d'erreurs aux effets plus importants comme par exemple les mesures aberrantes.

Les démonstrations qui se sont déroulées en même temps que les expériences ont aussi fourni une preuve de concept du système de mesure. Les performances du système ont été jugées satisfaisantes et nous avons eu la possibilité de mener des essais sur le site de la centrale hydroélectrique de Beauharnois. Les résultats de ces essais sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 6

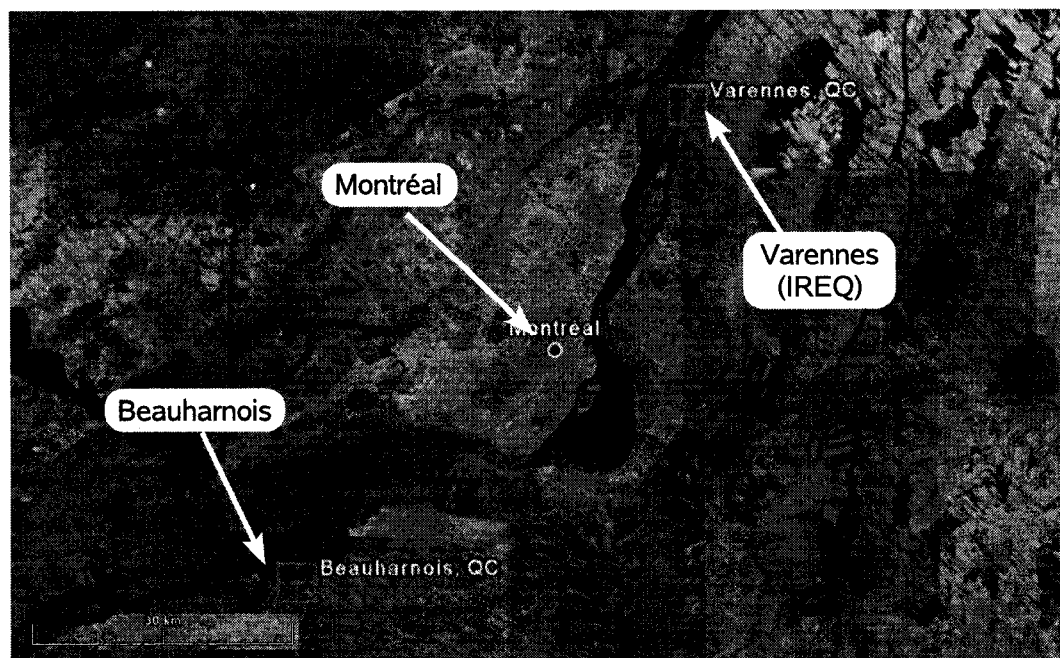
EXPÉRIENCES SUR SITE

Nous présentons les résultats que nous avons obtenus lors de deux séries d'essais menés sur site. Ces résultats donnent une validation de concept du système de cartographie pour une utilisation industrielle.

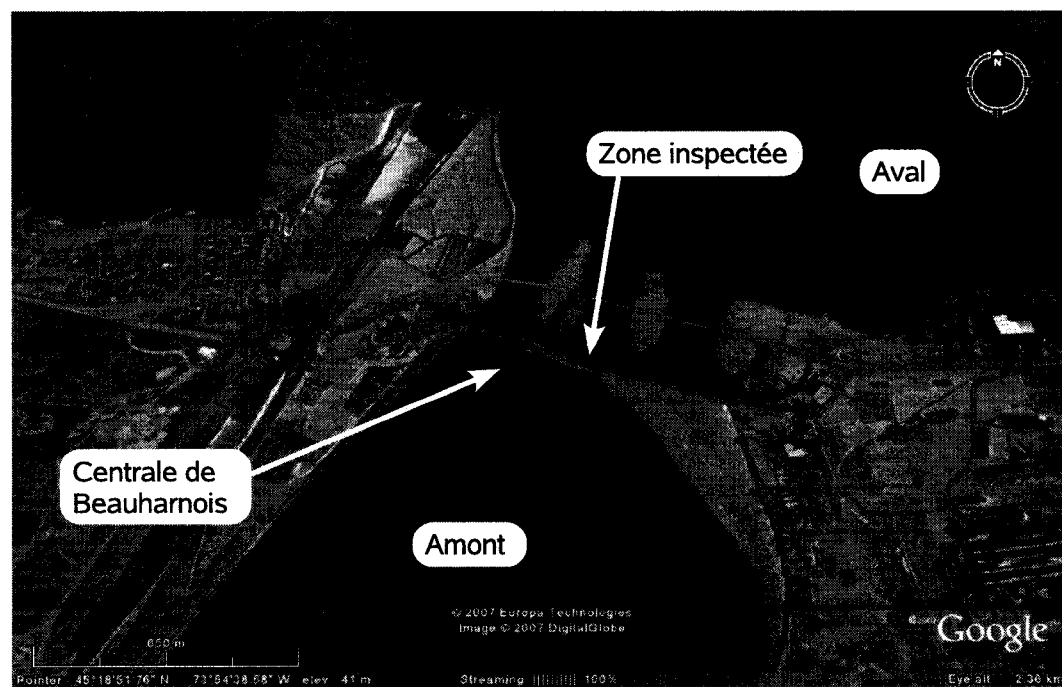
6.1 Situation des zones inspectées

Les expériences ont eu lieu à la centrale hydroélectrique de Beauharnois. La figure 6.1 montre deux cartes satellites à différentes échelles pour situer la centrale. L'aménagement hydroélectrique de Beauharnois est situé à une trentaine de kilomètres au sud-ouest de Montréal entre les lacs St-François et St-Louis. Il a été construit en trois étapes : 1932-1941, 1950-1953 et 1959-1961. Il s'agit d'une centrale-barrages-poids au fil de l'eau de 1 km équipée de 36 groupes turbines-alternateurs principaux et deux groupes auxiliaires; la puissance totale est de 1657 MW. L'ensemble est essentiellement constitué de deux barrages-poids en rives gauche et droite (126 et 72 m) faisant un angle avec les trois centrales-barrages-poids (817 m), de deux barrages en remblai en rive droite et gauche (335 m et 488 m), d'un évacuateur (41 m) et d'une passe-à-débris (3 m).

Les surfaces que nous avons cartographiées sont celles de linteaux qui se trouvent à la sortie des évacuateurs de la centrale. L'inspection a donc eu lieu du côté aval. La figure 6.2 montre une vue schématique de l'environnement où a eu lieu l'inspection. Deux structures (A et B) telles que celle que nous avons représentées se trouvent au niveau de chaque évacuateur de la centrale. La géométrie de cet environnement est



(a)



(b)

Figure 6.1 Situation géographique de la centrale de Beauharnois (tiré de (Google Earth, 2007)).

très proche du banc d'essai visible à la figure 3.2. En réalité le linteau de la centrale a une longueur de 8 m. Le porteur a donc été adapté pour couvrir cette distance.

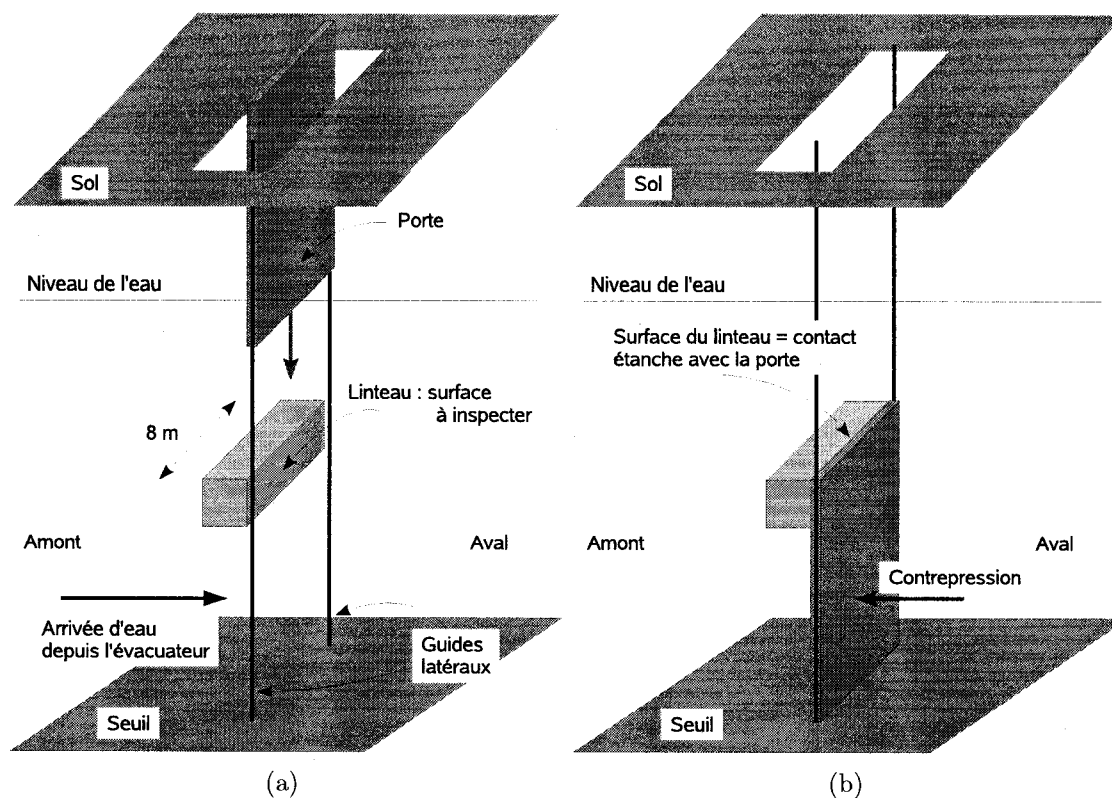


Figure 6.2 Situation de la zone cartographiée : (a) L'arrivée d'eau est coupée en amont de l'évacuateur. La porte est ensuite abaissée. (b) Quand la porte est complètement abaissée, la zone située derrière la porte est alors asséchée. La contrepression empêche l'eau de pénétrer dans l'évacuateur. Pour que la zone située derrière la porte reste à sec, il faut que le contact entre le linteau et la porte soit étanche.

6.2 Objectifs des inspections

Deux séries d'essais ont eu lieu en octobre 2006 et janvier 2007, avec deux objectifs différents. Lors de la première série d'essais, nous avons cartographié les linéaux 2A, 2B et 3B. Les linéaux 2A et 2B ont été cartographiés afin de déterminer des différences entre leurs propriétés géométriques qui puissent expliquer la différence du niveau d'étanchéité du contact entre le linteau 2A et la porte. La carte du linteau

3B a permis de vérifier les travaux de réfection de sa surface. Comme le linteau 3B avait été réfectionné, nous nous attendions à mesurer une surface plane. La surface du linteau 3B a donc servi de témoin. Lors de la deuxième série d'essais, nous avons cartographié les linteaux 11A et 11B. Les cartes ont été établies juste avant la réfection des surfaces. Il est prévu de refaire la même inspection après les travaux à des fins de vérification. Étant donné le type de structure inspecté, la précision de mesure demandée était de l'ordre du millimètre. Dans ce qui suit, nous éviterons d'interpréter les résultats au delà de ce qui est en rapport avec l'instrument en lui-même. Nous laissons l'analyse des résultats en vue d'expliquer la source des problèmes évoqués aux spécialistes en méthodes de construction.

Du point de vue du projet, l'objectif de ces inspections était aussi de démontrer que le système pouvait fonctionner en dehors du laboratoire, en conditions réelles. Le système de cartographie représente une évolution par rapport aux méthodes employées dans ce secteur de l'industrie. Le système fournit en effet plus de données, avec plus de précision, plus rapidement, avec plus de sécurité et à moindre coût que les méthodes que nous avons revues aux chapitres 1 et 2. Il s'agissait donc pour nous de le prouver expérimentalement à des utilisateurs potentiels.

6.3 Protocole expérimental

Comme les expériences menées en laboratoire au cours de l'été 2006 ont donné des résultats qui répondaient aux objectifs fixés, le système de cartographie utilisé pour les essais sur site n'a subi aucune modification aussi bien au niveau matériel que logiciel.

Le protocole que nous avons suivi lors de l'exécution des essais comporte les points suivants :

1. Quelques jours avant les essais :

- l'unité de mesure est calibrée dans un bac d'eau claire, en laboratoire. Le protocole est le même que celui décrit aux sections 4.1.1 et 4.1.2.

2. Lors des essais :

- le premier jour, l'unité est transportée à l'abri des chocs sur le lieu où se tiennent les essais. Le porteur est transporté séparément par semi-remorque,
- l'unité de mesure est fixée sur le porteur juste avant la première descente dans l'eau. L'unité reste fixée au porteur pendant toute la durée des essais. À ce moment les fils sont montés sur le porteur; ils y restent fixés eux aussi pendant toute la durée des essais,
- les fils sont peints en blanc afin de faciliter la détection des points laser,
- la structure descend vers la surface à cartographier au moyen de grues fixées à ses deux extrémités,
- une fois la structure arrivée devant la surface, ses mouvements sont bloqués au moyen de vérins pneumatiques,
- une fois la structure bloquée, les données sont collectées selon le principe d'opération décrit à la section 3.2.3. Nous précisons cependant ici que le mouvement de translation de l'unité de mesure est continu et que la mesure d'une ligne de profil est faite au moyen d'une seule image à tous les millimètres. L'unité de mesure translate à une vitesse de 3,8 mm/sec. Pour chaque essai, la durée totale pour parcourir toute la longueur du linteau a été d'environ 35 minutes.
- pour construire la carte du linteau, plusieurs passes sont nécessaires. Dès que l'unité de mesure a parcouru la longueur du linteau, elle est ramenée à son point de départ. Le porteur est ensuite monté ou descendu de façon

a cartographier une zone adjacente. Deux zones adjacentes doivent se recouvrir partiellement pour pouvoir par la suite recaler les nuages de points 3D. L'opération est renouvelée autant de fois que nécessaire pour obtenir la carte complète du linteau.

3. Après les essais :

- les données collectées sont stockées sous la forme de plusieurs nuages de points 3D qui représentent la surface du linteau exprimés chacun dans un repère attaché au linteau. Afin de construire une carte plus large, les nuages de points sont recalés dans le même repère. Ce recalage a été effectué avec le logiciel Polyworks (InnovMetric, 2007).
- Le nuage de points recalés sert pour l'analyse des résultats. C'est à partir de cet ensemble de données que sont construites des images de la surface inspectée ou bien des coupes longitudinales de ces surfaces.

Notons qu'il n'est pas forcément nécessaire de peindre les fils en blanc puisque l'on peut très bien détecter les points laser sur des fils mats de couleur sombre. Cependant, pour une première série d'essais en conditions réelles, nous avons jugé plus prudent de faciliter la détection des points lasers. Avec des points plus lumineux, nous avons pu fermer le diaphragme de la caméra un peu plus et donc les algorithmes de détection ont été moins sensibles aux particules en suspension éclairées par les lasers. L'impact de cette modification est pour le moment mineur puisque la précision des mesures obtenues répond aux spécifications.

6.4 Calibrage de l'unité de mesure

Le tableau 6.1 présente les résultats de l'estimation des paramètres de l'unité de mesure. Ce sont ces paramètres qui ont été utilisés lors des deux séries d'expériences.

L'écartement des fils a été mesuré au micromètre alors qu'ils étaient montés sur le porteur. La comparaison des valeurs estimées montre que les paramètres de l'unité présentent de faibles variations. Les paramètres de la caméra et des lasers sont très stables. La structure mécanique de l'unité de mesure n'a effectivement pas subi de modification entre les deux séries d'essais. Cela donne une indication sur la stabilité mécanique de l'unité qui semble suffisante pour la précision que nous recherchions. Les différences sont certainement dues aux différences numériques entre les deux ensembles de données causées par les bruits de mesure ou encore de légères différences d'éclairage.

6.5 Résultats de la première série d'essais (octobre 2006)

Les essais d'octobre 2006 se sont déroulés du 23 au 27 octobre. La figure 6.3 montre la chronologie des actions entreprises lors de cette semaine.

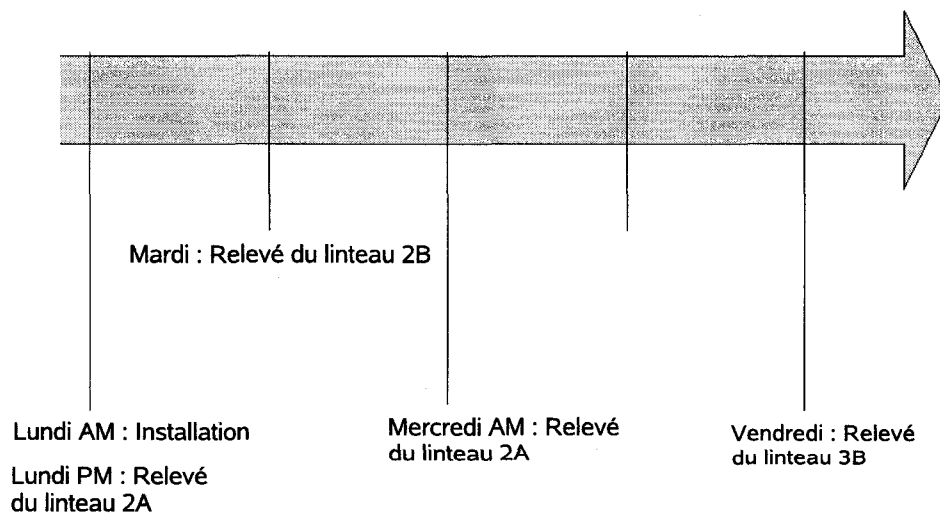


Figure 6.3 Chronologie des actions entreprises lors des essais d'octobre 2006.

À partir des données fournies par le système de cartographie, nous pouvons présenter

Tableau 6.1 Paramètres de l'unité de mesure calibrés pour les essais menés à la centrale de Beauharnois en octobre 2006 et janvier 2007 : pour les essais d'octobre 2006, la caméra a été calibrée à partir de 14 images, le laser 1 à partir de 12 images et le laser 2 à partir de 9 images. Pour les essais de janvier 2007, la caméra a été calibrée à partir de 22 images, le laser 1 à partir de 10 images et le laser 2 à partir de 11 images.

Octobre 2006			Janvier 2007	
		$\Delta = \pm 3\sigma$		$\Delta = \pm 3\sigma$
f (mm)	11,21	$\pm 1,86e^{-2}$	11,24	$\pm 2,04e^{-2}$
α_u (pix)	1736,94	$\pm 2,98e^{+0}$	1740,16	$\pm 3,13e^{+0}$
α_v (pix)	1740,38	$\pm 2,80e^{+0}$	1743,89	$\pm 3,20e^{+0}$
u_0 (pix)	711,94	$\pm 3,20e^{+0}$	718,16	$\pm 3,14e^{+0}$
v_0 (pix)	504,10	$\pm 2,84e^{+0}$	500,86	$\pm 2,73e^{+0}$
k_1	$1,59e^{-1}$	$\pm 5,61e^{-3}$	$1,77e^{-1}$	$\pm 5,60e^{-3}$
k_2	$4,03e^{-1}$	$\pm 3,04e^{-2}$	$4,59e^{-1}$	$\pm 3,00e^{-2}$
a_1	$-6,147e^{-1}$	$\pm 2,98e^{-5}$	$-6,177e^{-1}$	$\pm 0,86e^{-5}$
b_1	$1,625e^{-2}$	$\pm 3,43e^{-5}$	$9,497e^{-3}$	$\pm 1,05e^{-5}$
c_1	$7,886e^{-1}$	$\pm 2,34e^{-5}$	$7,863e^{-1}$	$\pm 0,67e^{-5}$
d_1 (mm)	-120,133	$\pm 8,50e^{-3}$	-119,869	$\pm 2,42e^{-3}$
a_2	$-5,983e^{-1}$	$\pm 3,59e^{-5}$	$-5,956e^{-1}$	$\pm 1,02e^{-5}$
b_2	$-3,330e^{-2}$	$\pm 4,73e^{-5}$	$-2,946e^{-2}$	$\pm 1,29e^{-5}$
c_2	$-8,006e^{-1}$	$\pm 2,72e^{-5}$	$-8,027e^{-1}$	$\pm 0,75e^{-5}$
d_2 (mm)	-120,997	$\pm 9,35e^{-3}$	-120,975	$\pm 2,73e^{-3}$
h (mm)	38,25		38,00	

deux types de résultats :

- des cartes 3D des surfaces inspectées. Les cartes 3D ont été produites de la même manière que pour les expériences en laboratoire.
- des coupes longitudinales dans la surface. Notons que les coupes longitudinales sont effectuées directement dans le nuage de points 3D et non la surface reconstruite à partir du nuage.

Les figures 6.4, 6.5 et 6.6 montrent des reconstructions 3D des surfaces inspectées. Chaque reconstruction correspond à deux passes de mesures recalées. L'échelle à droite des surfaces donne la correspondance entre la distance d'un point de la surface par rapport au plan des fils et la couleur du point dans la reconstruction.

- Le pertuis 2A présente un dénivelé d'est en ouest de l'ordre de 30 mm à un niveau de 16072 mm au dessus du niveau de la mer. Ce dénivelé correspond au gonflement du béton que l'on rencontre couramment dans les centrales hydroélectriques. Ce gonflement est dû à la réaction alcali-granat qui correspond à un échange ionique entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment.
- Le pertuis 2B présente un dénivelé du même ordre de grandeur que le pertuis 2A mais les variations de niveau sont plutôt dues à des morceaux de béton sous forme de taches situées à environ 1,3 m du début de la carte.
- Le pertuis 3B ayant été refait, nous mesurons un dénivelé de l'ordre de 2,5 mm d'est en ouest. Sur les coupes longitudinales, nous pouvons observer la présence de cinq plaques soudées les unes aux autres. C'est effectivement la technique qui est utilisée pour rectifier la planéité du linteau. Des plongeurs ont tout d'abord enlevé de la matière par une opération de bouchardage puis la surface a été lissée. Des plaques ont enfin été juxtaposées sur la surface du linteau puis

soudées les unes aux autres.

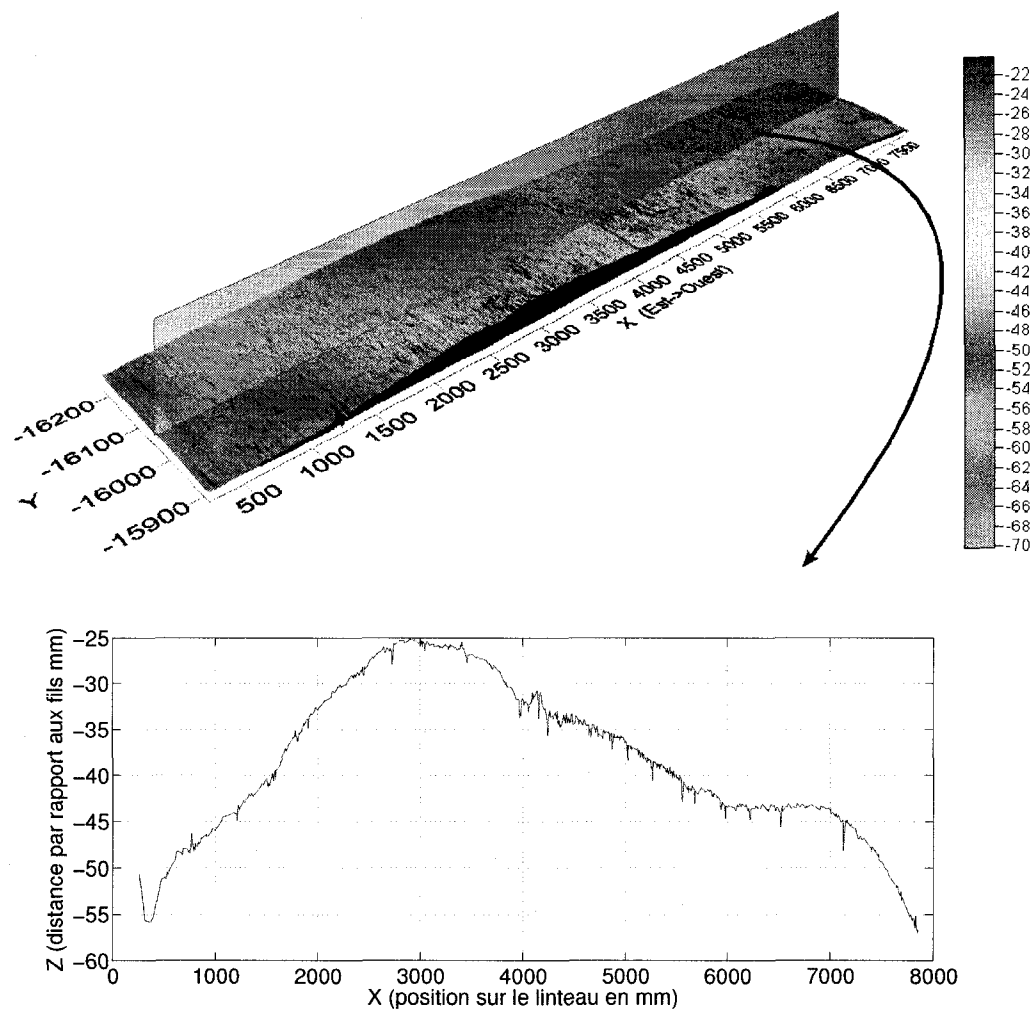


Figure 6.4 Une reconstruction de la surface du linteau 2A avec coupe longitudinale dans la surface d'est en ouest à un niveau de 16072 mm au dessus du niveau de la mer. (Unités : mm)

6.6 Résultats de la deuxième série d'essais (janvier 2007)

Les essais de janvier 2007 se sont déroulés du 8 au 12 janvier en suivant le même mode de déploiement que précédemment.

Les figures 6.7 et 6.8 montrent une carte 3D des surfaces des linteaux 11A et 11B

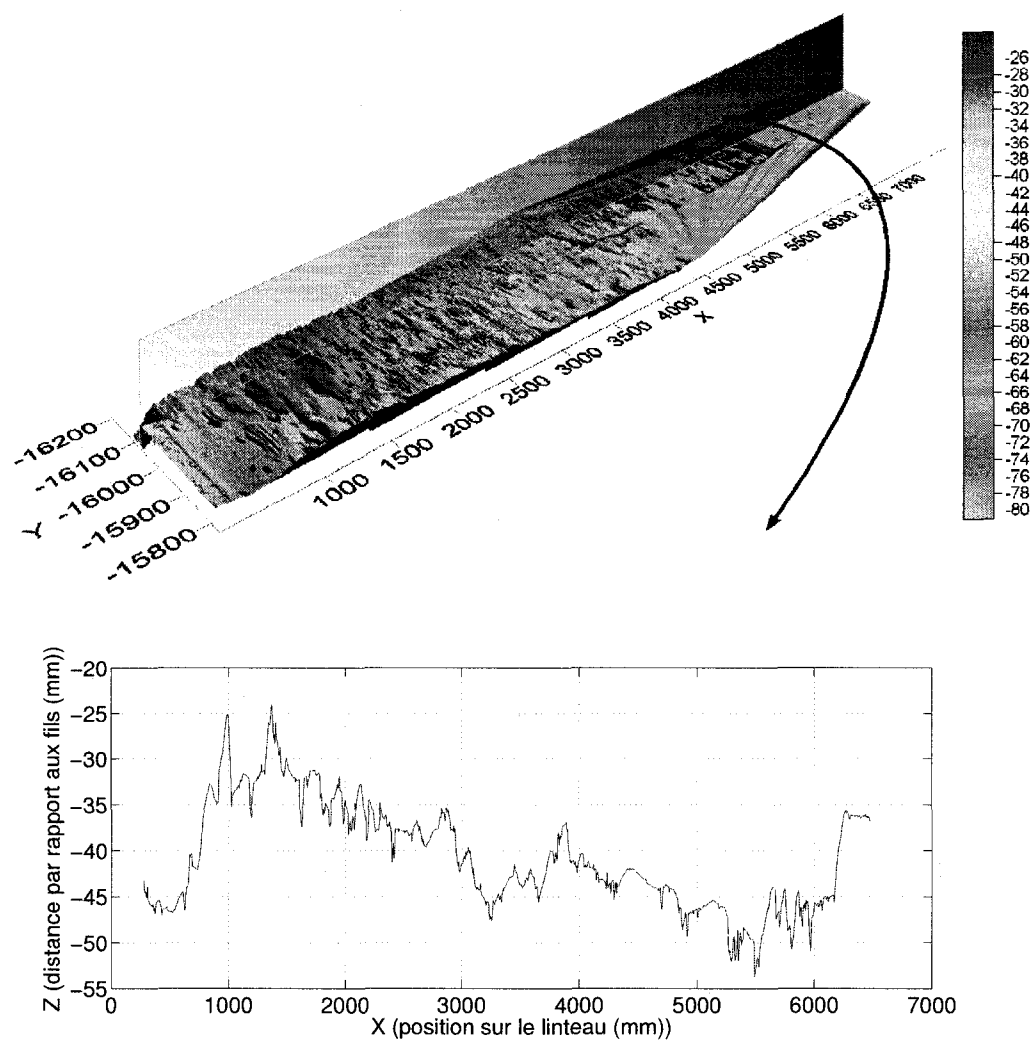


Figure 6.5 Une reconstruction de la surface du linteau 2B avec coupe longitudinale dans la surface d'est en ouest à un niveau de 16000 mm au dessus du niveau de la mer. (Unités : mm)

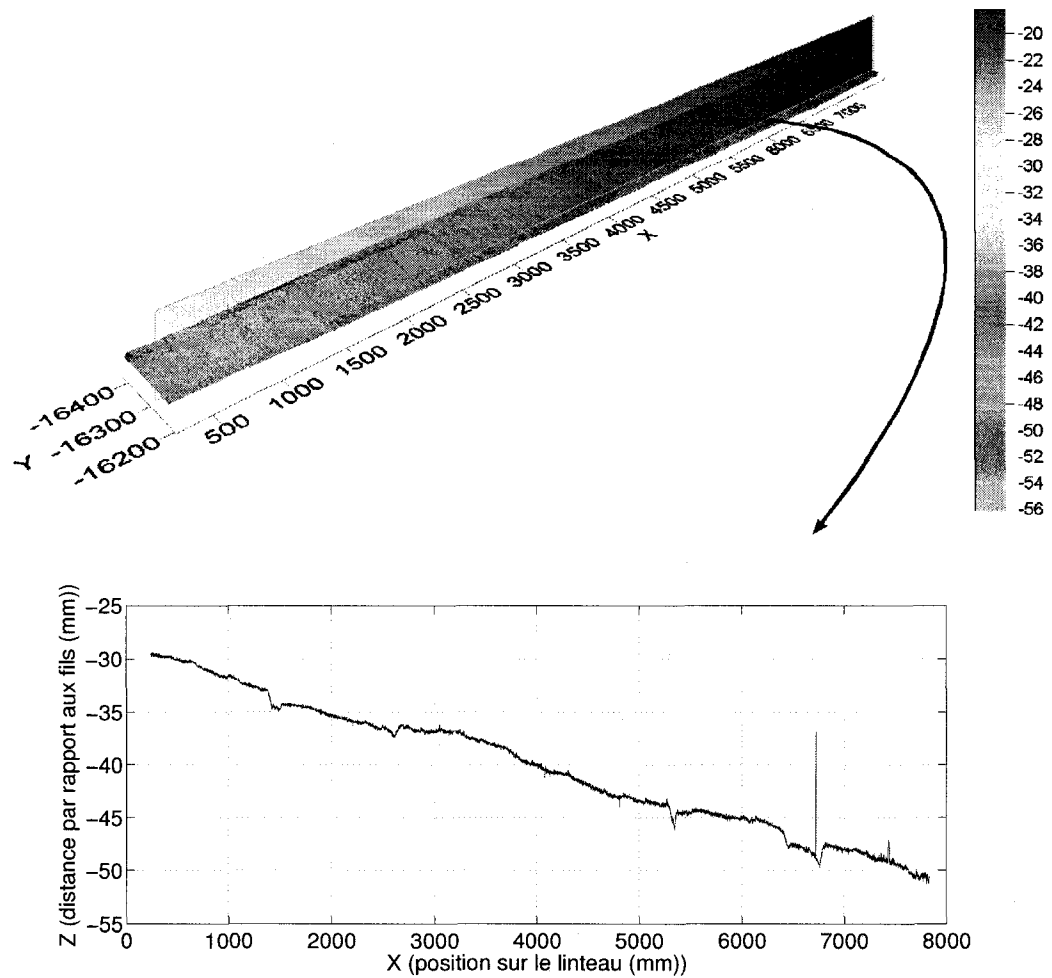


Figure 6.6 Une reconstruction de la surface du linteau 3B avec coupe longitudinale dans la surface d'est en ouest à un niveau de 16300 mm au dessus du niveau de la mer. (Unités : mm)

ainsi qu'une coupe longitudinale de chacun de ces linteaux. Nous avons mesuré un dénivelé de 25 mm dans le cas du linteau 11A et 10 mm dans le cas du linteau 11B.

6.7 Difficultés rencontrées

6.7.1 Calibrage de l'unité de mesure

Comme nous l'avons vu aux sections 4.1.1 et 4.1.2, les manipulations pour le calibrage sont faciles à réaliser en elles-mêmes. Mais l'opération est lourde à gérer quand il s'agit de calibrer l'unité de mesure sur site. Le calibrage se fait pour le moment dans un bac d'eau et avec toute la chaîne d'acquisition autour, en extérieur et par des températures qui peuvent être proches, voire en dessous de 0°C. Que faire en effet si l'on s'aperçoit juste avant de rentrer dans l'eau que les paramètres internes ont changé ? D'autre part, le temps que l'on dispose pour collecter les données est limité puisque l'arrêt d'un groupe coûte plusieurs milliers de dollars par jour. Un recalibrage de l'unité sur site ajoute des délais et peut donc faire échouer l'intervention.

Plusieurs facteurs sont susceptibles de modifier les paramètres de la caméra mais surtout des plans lasers. Ce sont effectivement les miroirs qui sont les pièces les plus sensibles de l'unité de mesure. Ces facteurs sont les vibrations, les chocs et les fortes variations de température. Aux précisions auxquelles nous avons travaillé, nous avons supposé que les variations de température n'étaient pas un problème. Par contre les vibrations et les chocs sont un problème majeur. Lors des essais, nous avons pris un soin particulier pour manipuler l'unité de mesure. Ce soin nécessaire lors des manipulations rend le système moins facile à mettre en place dans un milieu industriel.

D'un autre point de vue, on voudrait pouvoir modifier la plage de mesure en ligne.

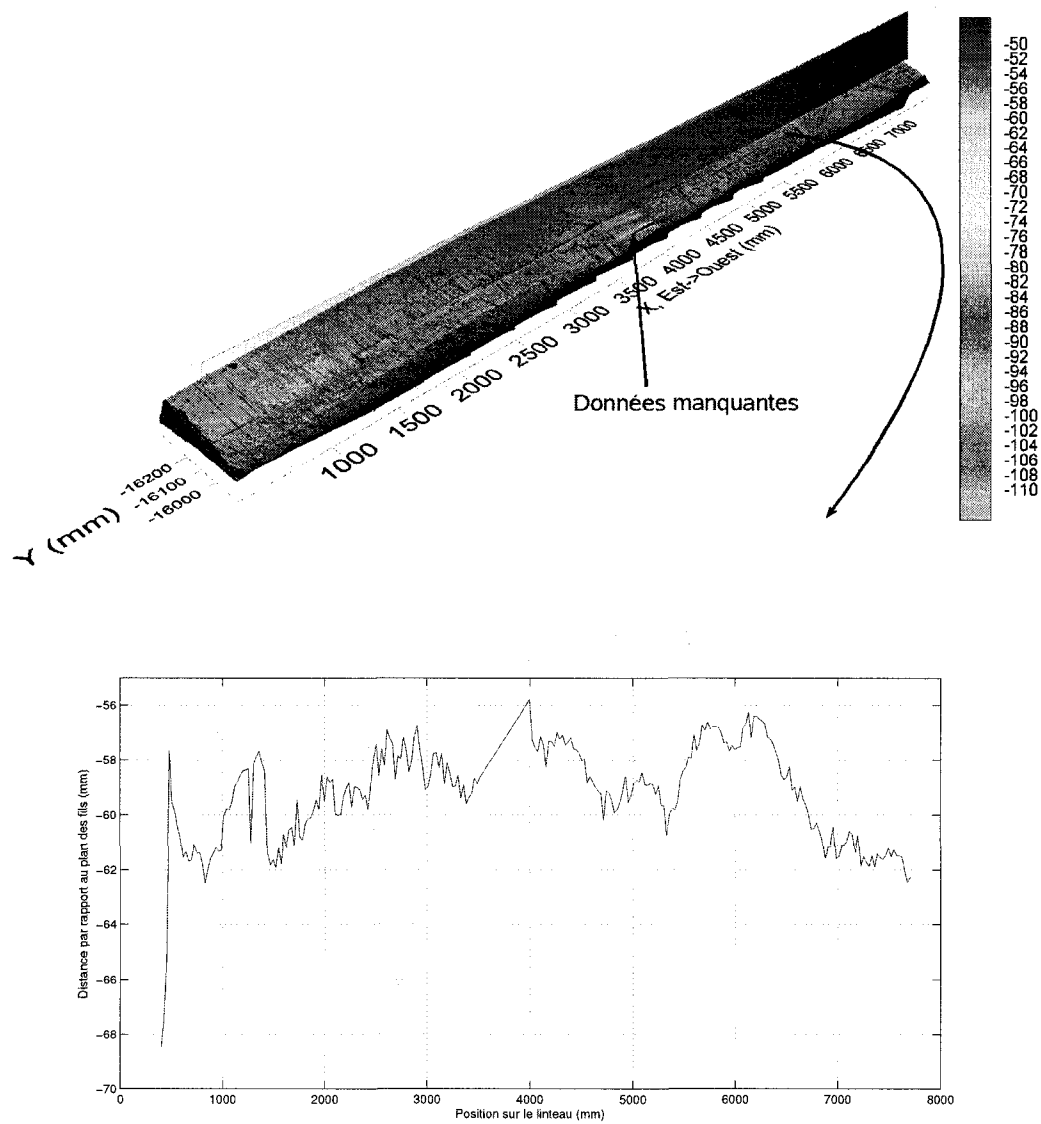


Figure 6.7 Une reconstruction de la surface du linteau 11A avec coupe longitudinale dans la surface d'est en ouest à un niveau de 16122 mm au dessus du niveau de la mer. L'échelle de couleur sur la droite représente la distance d'un point de la surface par rapport au plan des fils. (Unités : mm)

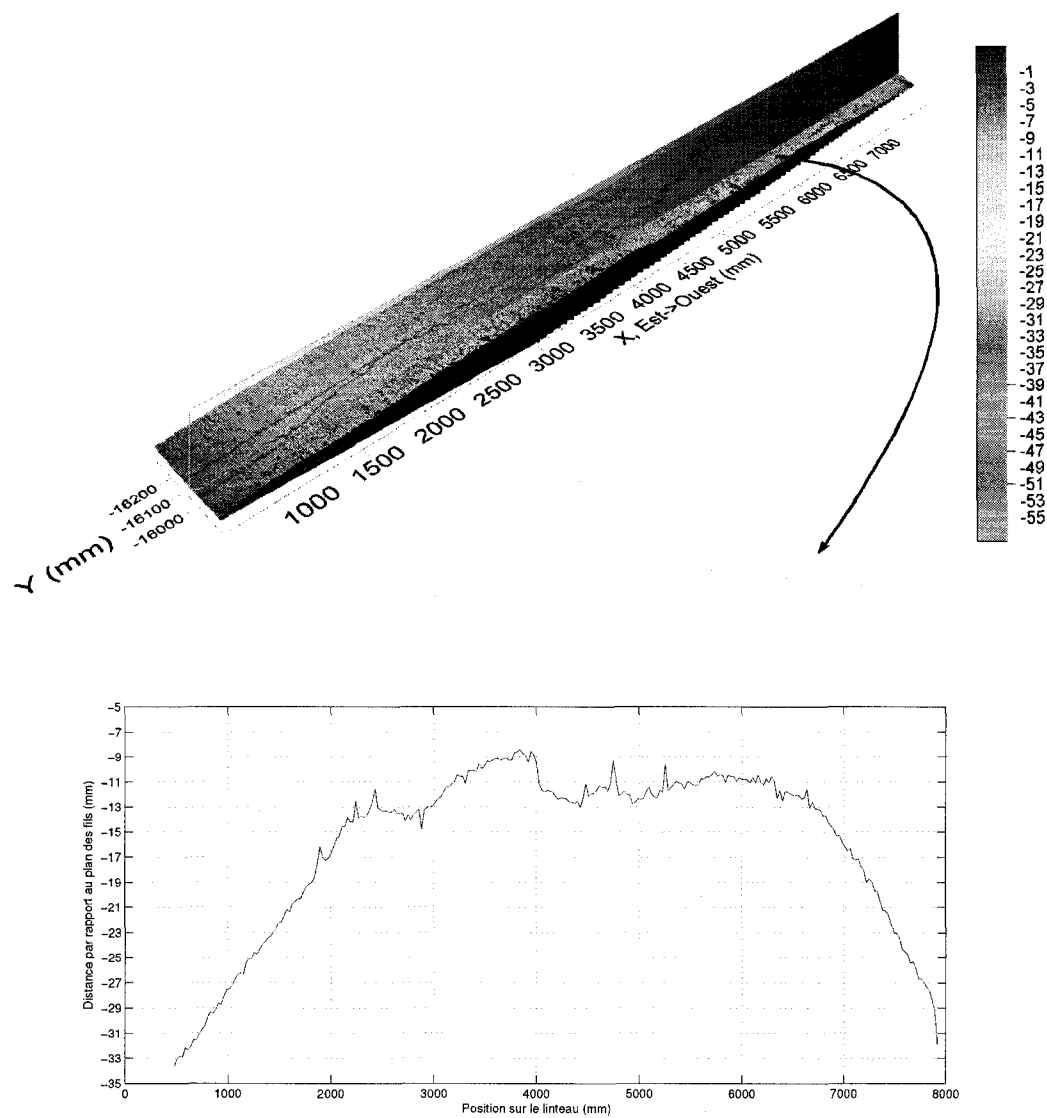


Figure 6.8 Une reconstruction de la surface du linteau 11B avec coupe longitudinale dans la surface d'est en ouest à un niveau de 16072 mm au dessus du niveau de la mer. L'échelle de couleur sur la droite représente la distance d'un point de la surface par rapport au plan des fils. (Unités : mm)

La plage actuelle est de 10 cm. Or, la surface inspectée peut très bien se situer en dehors de cette plage à certains endroits à cause d'une forte déformation. Il serait donc bénéfique de pouvoir changer l'orientation des miroirs puis de recalibrer le système en ligne.

6.7.2 Post-traitement

6.7.2.1 Recalage des données

Lorsqu'une surface est mesurée en plusieurs passes, il faut recaler les nuages de points pour pouvoir produire une seule reconstruction 3D de la structure. Il y a deux possibilités pour cela :

- Si le porteur translate dans un plan vertical et que l'on peut mesurer cette translation avec les instruments du porteur, on peut se contenter de juxtaposer les passes successives. Cette première solution ne fonctionne pas car, en réalité, le porteur ne translate pas exactement dans un plan vertical à cause des défauts de surface des guides latéraux. On voit donc apparaître des sauts au niveau des jonctions entre les passes.
- Une autre solution est d'utiliser des algorithmes de type ICP (Rusinkiewicz & Levoy, 2001). C'est la solution que nous avons employé. Cependant cette solution comporte également plusieurs problèmes :
 - On peut voir à la figure 6.6 que la surface est très plate et ne présente pas d'éléments caractéristiques. Dans ce cas, il nous a été impossible de recaler les données dans un même repère puisque les nuages de points glissent les uns par rapport aux autres sans que l'algorithme de recalage ne puisse converger. Le bon fonctionnement de l'algorithme dépend de la présence d'éléments caractéristiques dans les deux nuages.

- Pour que l'algorithme de recalage fonctionne, il faut un recouvrement suffisant des nuages de points. Mais même dans ce cas, les nuages de points peuvent pivoter autour d'un axe longitudinal car les surfaces sont longues et étroites.
- Une dernière solution utilise la maximisation de la corrélation entre les deux nuages décrits dans l'espace de Fourier.

6.7.3 Fonctionnement du système en conditions perturbées

6.7.3.1 Détection des points laser

Lorsqu'il est soumis à des perturbations¹, le système de cartographie peut se retrouver dans l'incapacité de collecter des données. On observe par exemple des trous dans la carte du linteau 3B (figure 6.6) et dans la carte du linteau 11A (figure 6.7). Dans le cas du linteau 3B, les parties manquantes sont dues à des mouvements des fils. Notre procédure de vérification de l'intégrité de la pose a fonctionné et donc les mesures ont été rejetées. Nous avons utilisé un seuil de 15 pixels sur l'erreur de reprojection $[\hat{P}_{M_i}]_{FILS} - [\tilde{P}_{M_i}]_{FILS}$. Dans le cas du linteau 11B, les trous proviennent de la perte complète du signal à cause de bulles d'air qui sont venues se coller sur la vitre du laser. Dans la version actuelle, l'unité de mesure continue de translater suivant un mouvement continu avec pour résultat de laisser des trous dans la carte. Dans le cadre de l'approche que nous proposons, une rétroaction entre le porteur et le système de mesure devrait permettre d'éviter ces trous. Par exemple, l'unité de mesure peut s'arrêter jusqu'à ce que la perturbation disparaisse puis revenir sur la zone pour compléter la carte.

¹Le seuil de perturbations que nous devrions tolérer correspond à un mouvement des points $[\tilde{P}_{M_i}]_{FILS}$ engendré par un mouvement de l'unité de mesure de au plus 1 mm selon l'axe X_{FILS} .

6.7.3.2 Vitesse de translation de l'unité

Suite à différents problèmes techniques survenus lors de l'installation du porteur, nous avons dû réduire le temps nécessaire pour cartographier la surface du linteau du pertuis 11A. À vitesse normale, le système peut mesurer une bande de 8 m de long en 35 minutes. Pour les essais de janvier 2007, le pertuis 11A a été cartographié en 15 minutes. Dans ce dernier cas, l'unité de mesure s'est déplacée à une vitesse d'environ 8 mm/sec. En plus de la perte de données à certains endroits, la carte présente aussi des défauts réguliers sous forme de stries.

6.8 Conclusion

Bien que les résultats que nous avons présentés ne sont pas comparables à une base connue, ils n'infirmement pas ce que nous avons dit précédemment. Par contre ils valident le concept du système de mesure et sont une première étape vers une éventuelle implantation industrielle.

Le système fournit de nouvelles capacités pour le diagnostic des installations immergées d'une centrale. Grâce à la forte densité de mesures, les cartes 3D permettent d'apprécier l'état de surface du béton. Il est par exemple possible de déterminer quel type d'opération a été effectuée (bouchardage, meulage, ou bien tout simplement aucune opération) ou encore il est possible de repérer des accidents dans la surface (trait de scie, creux, bosse). Les coupes permettent de visualiser la déformation du béton à une certaine profondeur et de mesurer le dénivelé maximal de la surface.

Bien que le système fonctionne bien en environnement contrôlé, ses performances se dégradent rapidement sous l'influence de perturbations. Il est donc nécessaire d'implanter la totalité de notre approche.

CHAPITRE 7

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DU SYSTÈME

Nous proposons certaines modifications de l'unité de traitement qui visent à améliorer le fonctionnement du système dans les conditions que nous avons pu rencontrer au cours des essais sur site. Nous étudions tout d'abord la sensibilité du système aux erreurs qui interviennent sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. L'étude de la sensibilité du système nous permettra de comprendre la propagation de ces erreurs sur la mesure d'un point de la scène. Nous montrons ensuite comment nous pouvons réduire l'incertitude de mesure par filtrage. Nous proposons enfin une adaptation de la scène qui rend possible le calibrage de l'unité lors de la phase d'opération normale du système.

7.1 Différentes voies d'améliorations

Il y a deux voies pour l'amélioration des performances du système. La première est matérielle. Si l'on garde la même structure pour l'unité de mesure, les améliorations se font par un choix de meilleures composantes:

- Un filtre optique plus sélectif offrirait une plus grande robustesse aux algorithmes de traitement d'image.
- Des projecteurs laser avec une longueur d'onde correspondant à la couleur verte (532 nm) augmenterait la visibilité du plan laser projeté sur la scène. Dans l'eau, la couleur verte est en effet moins absorbée que le rouge.
- Des optiques de meilleure qualité augmenteraient certainement la précision de

mesure.

Ces modifications n'offrent pas de nouvelles caractéristiques au système mais renforcent ce qui est déjà présent.

La deuxième voie d'amélioration est algorithmique. Nous allons voir dans les sections qui suivent que l'ajout de redondance dans les mesures augmente la précision et la robustesse du système. D'autre part, la vérification continue de certaines contraintes géométriques qui décrivent la structure de la scène assure l'intégrité des mesures délivrées. L'étude que nous présentons est faite en simulation. Cependant, nous utilisons autant que possible l'expérience obtenue lors des essais en laboratoire et sur site afin de présenter des résultats réalistes.

7.2 Paramètres du simulateur

Tous les résultats de simulation que nous présentons ont été obtenus avec un système dont les paramètres intrinsèques sont pratiquement ceux que nous avons identifiés pour une unité de mesure dans l'eau en octobre 2006. Ces paramètres sont reportés au tableau 6.1. Pour des raisons de symétrie, nous avons pris $b_1 = b_2 = 0,0$ puis nous avons égalisé les paramètres du plan laser 1 aux paramètres du plan laser 2. Le tableau 7.1 présente les paramètres utilisés pour les simulations. Sauf indication contraire, l'unité de mesure est fixe et a une pose nominale de $[\phi \ \theta \ \psi \ x \ y] = [0 \ 0 \ 0 \ 230 \ 0]$ (angles en radians, distances en millimètres). Pour la caméra, nous avons repris les intervalles de confiance qui ont été estimés. Par contre, nous n'indiquons pas ces intervalles pour les paramètres des plans lasers puisqu'ils seront modifiés au cours des simulations.

Tableau 7.1 Paramètres de l'unité de mesure utilisés pour les simulations.

Paramètres de la caméra			Paramètres des lasers	
$\Delta = \pm 3\sigma$			a_1	$-5,983e^{-1}$
f (mm)	11,21	$\pm 1,86e^{-2}$	b_1	$0,000e^0$
α_u (pix)	1736,94	$\pm 2,98e^{+0}$	c_1	$8,006e^{-1}$
α_v (pix)	1740,38	$\pm 2,80e^{+0}$	d_1 (mm)	$-120,997$
u_0 (pix)	711,94	$\pm 3,20e^{+0}$	a_2	$-5,983e^{-1}$
v_0 (pix)	504,10	$\pm 2,84e^{+0}$	b_2	$0,000e^0$
k_1	$1,59e^{-1}$	$\pm 5,61e^{-3}$	c_2	$-8,006e^{-1}$
k_2	$4,03e^{-1}$	$\pm 3,04e^{-2}$	d_2 (mm)	$-120,997$

7.3 Sensibilité de l'estimé de la position d'un point de la scène à une variation des paramètres intrinsèques

La position d'un point d'une surface inspectée $[P_S]_{FILS}$ est déterminée par une suite de transformations qui font intervenir les paramètres γ de l'unité de mesure. Nous nous intéressons ici à la sensibilité de l'estimé de la position de $[P_S]_{FILS}$ à une variation appliquée à chaque paramètre interne de l'unité, l'un après l'autre. Comme ces paramètres ont des échelles et des unités différentes, nous considérons l'effet d'une variation de $\pm 1\%$ de leur valeur.

Soit $[\hat{P}_S]_{FILS}$ l'estimé du point de la scène $[P_S]_{FILS}$. Prenons pour hypothèse que $[\hat{P}_S]_{FILS}$ a été déterminé sur la base des paramètres intrinsèques réels à l'exception d'un seul qui comporte une certaine erreur. On peut caractériser l'erreur d'estimé par la norme de l'erreur:

$$d_e = \|[\hat{P}_S]_{FILS} - [P_S]_{FILS}\| \quad (7.1)$$

L'indice de sensibilité du paramètre erroné est l'erreur d'estimé qui correspond à une variation de $\pm 1\%$ de ce paramètre.

Les étapes menant au calcul d'un indice de sensibilité suivent exactement le mode de fonctionnement de l'unité décrit à la section 3.2.3:

1. On fixe des valeurs pour les paramètres intrinsèques γ_C et γ_L .
2. On se donne un point $[P_S]_{IMG} = [464 \ -200]^T$ pixels. Ce point est choisi tel qu'il ne se situe pas sur un des axes du repère rétinien. Ainsi on évite de se placer dans un cas particulier. D'autre part, par effet de symétrie, les conclusions que l'on tire à partir de ce point sont aussi valables pour les autres points situés dans les autres zones de l'image. $[P_S]_{IMG}$ n'est pas perturbé puisque l'on s'intéresse ici à la sensibilité aux paramètres intrinsèques.
3. On calcule les coordonnées réelles de $[P_S]_{FILS}$ en se basant sur la valeur réelle de la pose et des paramètres intrinsèques.
4. On calcule les coordonnées des points $[P_{M_i}]_{IMG}$, $i = 1...4$ à partir des paramètres intrinsèques et de la pose réels. Pour la même raison que précédemment, ces points ne sont pas perturbés.
5. On ajoute une perturbation de $\pm 1\%$ à un des paramètres intrinsèques.
6. Localisation: on estime la pose de l'unité de mesure à partir des paramètres perturbés et des mesures de $[P_{M_i}]_{IMG}$, $i = 1...4$. La méthode utilisée pour la localisation est la méthode analytique que nous avons décrite à la section 4.2.1.
7. Cartographie: on calcule les coordonnées de $[\hat{P}_S]_{CAM}$ en se basant sur les paramètres perturbés et à partir de l'équation (3.18).
8. Changement de repère: on calcule $[\hat{P}_S]_{FILS}$ à partir de l'équation (3.14).

9. On calcule l'indice de sensibilité d_e .

Le tableau 7.2 présente les indices de sensibilité des paramètres intrinsèques. La lecture de ces valeurs nous révèle deux choses:

- Les erreurs d'estimé sur la position de $[P_S]_{FILS}$ ne sont pas symétriques selon que l'on ajoute ou que l'on enlève 1% de la valeur d'un paramètre. Ceci est l'effet de la non linéarité de la transformation de $[P_S]_{IMG}$ à $[P_S]_{FILS}$.
- Même si les erreurs d'estimés ne sont pas symétriques, on remarque la même tendance: les paramètres les plus sensibles sont les paramètres des plans lasers puis le paramètre v_0 de la caméra. Cela se comprend bien si l'on se rappelle le principe de la triangulation optique: la distance d'un point au centre optique est une fonction de sa hauteur dans l'image et cette distance varie d'autant plus rapidement que le plan laser est incliné.

7.4 Incertitude sur l'estimé de la position d'un point de la scène en fonction de l'incertitude sur les paramètres de l'unité et sur les mesures prises dans l'image

7.4.1 Procédure d'analyse

Nous considérons maintenant les variables du système comme des variables aléatoires. Soit le vecteur $\mathbf{\Gamma} = [[P_S]_{IMG} \ [P_{M_i}]_{IMG} \ \gamma_C \ \gamma_L]$. $\mathbf{\Gamma}$ peut être vu comme un point dans un espace de dimension égale à la taille du vecteur, soit 24. Nous prenons l'hypothèse que $\mathbf{\Gamma}$ est bruité par un bruit blanc gaussien $\mathbf{\nu}$. L'incertitude sur la position de $\mathbf{\Gamma}$ peut être représentée par une hyperellipsoïde centrée sur sa position réelle et dont le contour délimite une surface d'équiprobabilité. Une mesure de l'incertitude sur le vecteur aléatoire $\mathbf{\Gamma}$ est donnée par sa matrice de covariance $\Sigma_{\mathbf{\Gamma}}$.

Tableau 7.2 Sensibilité de $[P_S]_{FILS}$ à une variation de $\pm 1\%$ des paramètres intrinsèques de l'unité.

Paramètre	Sensibilité à une variation de +1% (mm/%)	Sensibilité à une variation de -1% (mm/%)
α_u	3,36	4,09
α_v	6,71	8,74
u_0	1,21	1,30
v_0	21,76	15,47
k_1	0,074	0,075
k_2	0,0097	0,0097

Paramètre	Sensibilité à une variation de +1% (mm/%)	Sensibilité à une variation de -1% (mm/%)
a_1	23,44	18,73
b_1	0,00	0,00
c_1	3,00	3,07
d_1 (mm)	16,44	22,99
a_2	18,07	32,50
b_2	0,00	0,00
c_2	5,21	4,56
d_2 (mm)	24,72	19,29

Soit $f : \mathbb{R}^{24} \rightarrow \mathbb{R}^3$ une fonction non linéaire telle que $[P_S]_{FILS} = f(\Gamma)$. Le problème, illustré à la figure 7.1, est celui d'estimer l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$ en fonction de l'incertitude sur Γ .

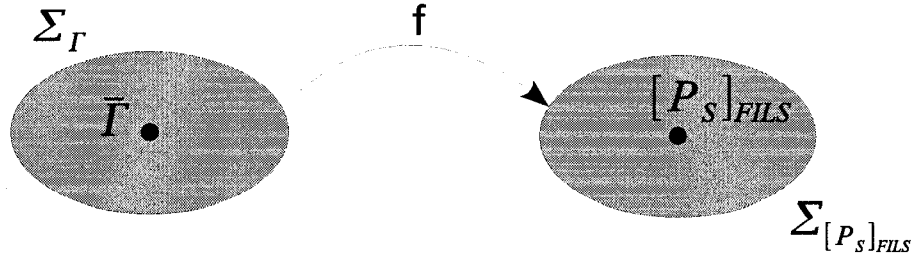


Figure 7.1 Le problème d'estimation de l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$.

Nous avons choisi d'estimer l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$ par une méthode statistique. Cette méthode est connue sous le nom de simulation Monte Carlo. Elle est basée sur une simulation exhaustive du système. L'idée est qu'une approximation de la moyenne et de la covariance d'une variable aléatoire est obtenue en appliquant la loi des grands nombres: si nous avons un nombre assez grand de réalisations \mathbf{X}_i d'un vecteur aléatoire \mathbf{X} , alors $E[\mathbf{X}]$ est approximée par la moyenne discrète:

$$E_N[\mathbf{X}_i] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{X}_i \quad (7.2)$$

et la covariance $\Sigma_{\mathbf{X}}$ est approximée par:

$$E_N[(\mathbf{X}_i - E_N[\mathbf{X}_i])(\mathbf{X}_i - E_N[\mathbf{X}_i])^T] \quad (7.3)$$

Les étapes de la simulation sont similaires à celles qui ont été suivies pour le calcul des indices de sensibilité. La différence est qu'ici nous ajoutons un bruit sur toutes les variables en même temps, y compris les mesures prises dans l'image. Une simulation se déroule de la façon suivante:

1. On fixe des valeurs pour les paramètres intrinsèques γ_C et γ_L .

2. On se donne un point $[P_S]_{FILS}$ appartenant au plan laser 2.
3. On calcule $[P_S]_{IMG}$ sur la base de la pose et des paramètres réels. $[P_S]_{IMG}$ est donc la mesure réelle du point de la scène.
4. On perturbe les paramètres intrinsèques ainsi que les mesures de $[P_{M_i}]_{IMG}$ et $[P_S]_{IMG}$ avec un bruit blanc gaussien ν .
5. Localisation: on estime la pose de l'unité de mesure à partir des paramètres et des mesures perturbés.
6. Cartographie: on calcule les coordonnées de $[\hat{P}_S]_{CAM}$ à partir des paramètres perturbés.
7. Changement de repère: on replace les coordonnées de P_S dans le repère lié aux fils.
8. Les étapes 4 à 7 sont répétées un nombre suffisant de fois.

7.4.2 Résultats

Les résultats présentés dans les paragraphes suivants sont des valeurs moyennes calculées sur 100 simulations d'une population de 10000 points. Nous appliquons ici le théorème de la limite centrale qui dit que toute somme de variables aléatoires identiquement distribuées tend vers une certaine variable aléatoire. Dans notre cas par exemple, une valeur maximale sera la moyenne des valeurs maximales obtenues sur les 100 nuages de points.

7.4.2.1 Effet d'incertitudes faibles sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image

Nous considérons le point de la scène $[P_S]_{FILS} = [-26, 0 \quad -22, 0 \quad -37, 1909] \text{ mm}$. Ce point a été choisi tel qu'il ne se situe pas sur un axe du repère rétinien; une telle situation limiterait notre interprétation des résultats à cause des effets de symétrie. Par contre, par effet de symétrie, les conclusions que l'on tire sont aussi valables pour les points situés dans les trois autres quarts de l'image.

Les paramètres intrinsèques de l'unité sont soumis à un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et d'écart type:

- égal à celui que nous avons mesuré lors du calibrage de la caméra. Les valeurs sont présentées au tableau 7.1,
- de 0,1% des valeurs estimées pour les paramètres des lasers.

Les valeurs mesurées dans l'image sont également soumises à un bruit blanc gaussien mais avec des écarts types:

- de 0,1 pixel pour les points $[P_{M_i}]_{IMG}$: nous utilisons un détecteur qui fonctionne en virgule flottante.
- de 1 pixel pour le point $[P_S]_{IMG}$: nous utilisons un détecteur de ligne qui fonctionne en entier.

La figure 7.2 représente un des 100 nuages de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ que nous avons calculés. Une ellipsoïde centrée sur la moyenne de $[P_S]_{FILS}$, notée $[\bar{P}_S]_{FILS}$, permet de visualiser l'incertitude. Les demi-axes de l'ellipsoïde ont une longueur égale à 2,935 fois la racine carrée des valeurs propres de la matrice de covariance du nuage de points $[P_S]_{FILS}$, noté $\Sigma_{[P_S]_{FILS}}$. Dans le cas d'une variable aléatoire à trois degrés

de liberté qui suit une distribution gaussienne, un facteur égale à 2,935 correspond à un intervalle de confiance d'environ 99%¹.

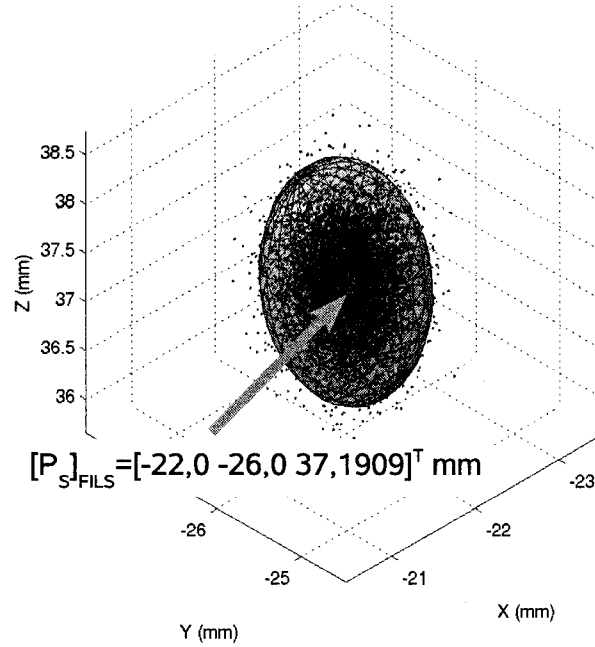


Figure 7.2 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une vue 3D d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.

Les statistiques présentées au tableau 7.3 nous montrent plusieurs choses:

- La moyenne du nuage semble bien approximer la valeur réelle de $[P_S]_{FILS}$. La norme de l'erreur d'estimé est de $d_e = 14 \mu m$.
- L'écart type de la norme de l'erreur d'estimé de $[P_S]_{FILS}$ est tel que l'intervalle de confiance à 99% est une boule de rayon 0.72 mm.
- Si l'on regarde uniquement l'erreur selon l'axe X, l'intervalle de confiance à 99% est de $\pm 0,96$ mm.

¹Notre facteur de confiance est calculé en utilisant une correction de Bonferroni (Rawlings, Pantula, & Dickey, 1998, chap. 4).

Tableau 7.3 Statistiques calculées pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image.

$[P_S]_{FILS}$ (mm)	[-22,0 -26,0 37,1909]
$[\bar{P}_S]_{FILS}$ (mm)	[-22,0089 -26,0086 37,1978]
$\sigma_{[P_S]_{FILS}}$ (mm)	[0,3158 0,1558 0,4135]
Erreur d'estimé, $[\bar{P}_S]_{FILS} - [P_S]_{FILS}$ (mm)	[0,0089 0,0086 -0,0070]
$\max d_e$ (mm)	1,63
\bar{d}_e (mm)	0,49
σ_{d_e} (mm)	0,24

La projection du nuage sur le plan XY, visible à la figure 7.3, semble montrer une distribution gaussienne des points. Cependant, on remarque que les projections sur les plans XZ et YZ, à la figure 7.4, sont orientées et s'étirent légèrement selon certains axes. L'orientation du nuage dans le plan XZ peut être expliquée à partir des résultats de l'étude de la sensibilité des paramètres intrinsèques. Rappelons nous que la position de $[\hat{P}_S]_{CAM}$ est déterminée par triangulation avec le plan laser 2. L'incertitude sur un plan laser a tendance à déplacer ce plan d'avant en arrière par rapport à la caméra ou de changer son inclinaison (angle de tangage). Une incertitude sur les paramètres de ce plan aura donc tendance à déplacer $[\hat{P}_S]_{CAM}$ sur un axe perpendiculaire au plan laser, c'est à dire dirigé selon la ligne de vue de $[\tilde{P}_S]_{IMG}$. Comme l'incertitude sur les paramètres des plans lasers est dominante, c'est effectivement ce que l'on observe sur la projection du nuage sur le plan XZ. Nous confirmons et développons cette interprétation dans la section suivante.

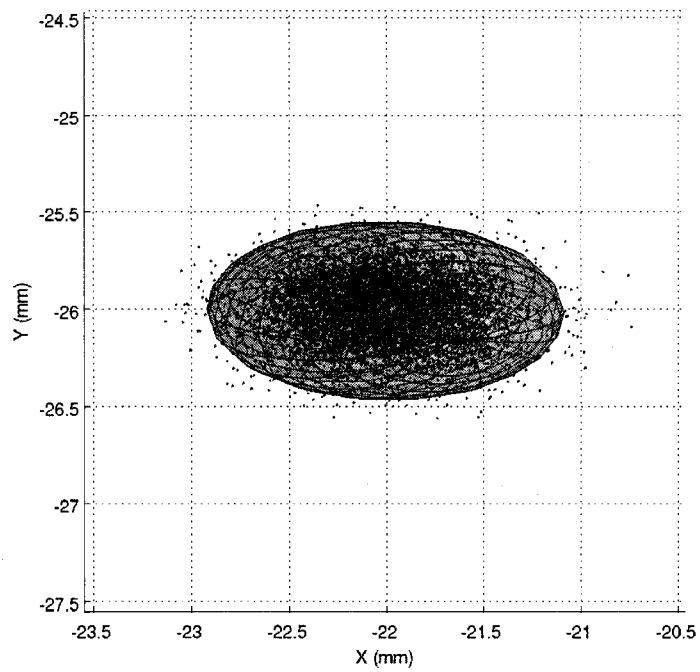
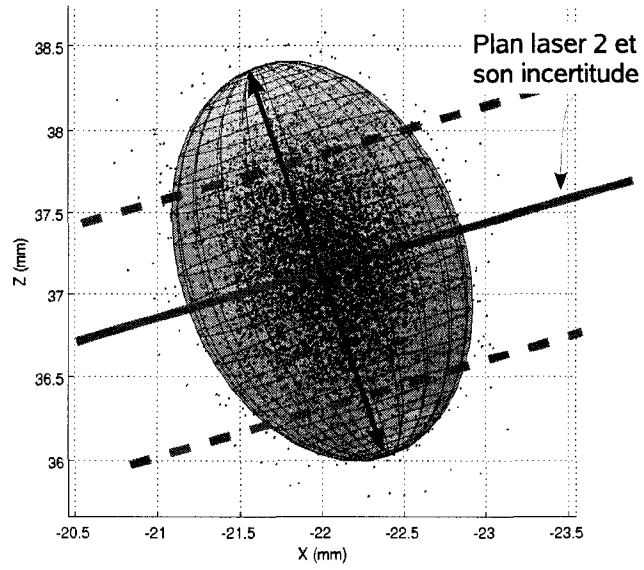
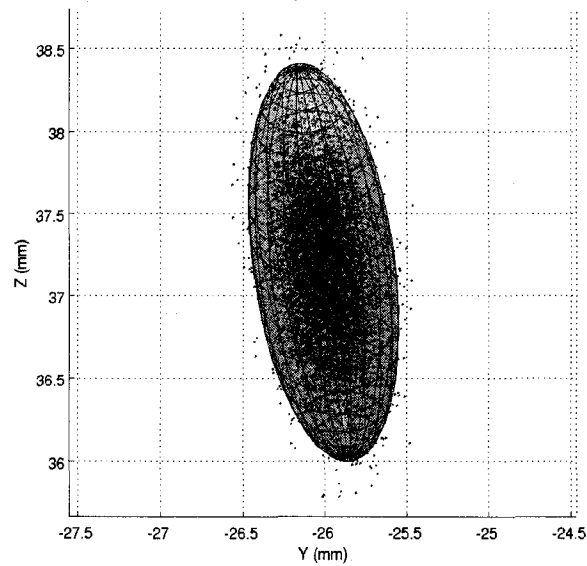


Figure 7.3 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan XY d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.



(a)



(b)

Figure 7.4 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une incertitude faible sur les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. (a) et (b) montrent des projections sur les plans XZ et YZ du repère lié aux fils d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités. On remarque que ces projections sont étirées selon un certain axe.

7.4.2.2 Effet d'une grande incertitude sur les plans lasers

Quel est l'effet d'une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers ? Afin d'étudier cette question, nous avons reproduit les mêmes simulations qu'au paragraphe précédent à la différence que nous avons pris un écart type de 1% des valeurs des paramètres des plans lasers.

Les figures 7.5, 7.6 et 7.7 montrent une vue 3D d'un des nuages de points parmi les 100 nuages que nous avons calculés et sa projection sur les plans XY, XZ, YZ du repère lié aux fils. On voit maintenant très nettement que le nuage de points est étiré selon certains axes.

La projection sur le plan XZ montre un étirement asymétrique du nuage. Cette asymétrie vient du fait que les indices de sensibilité ne sont pas les mêmes suivant le sens selon lequel on ajoute une erreur sur les paramètres des plans lasers. Les coordonnées de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ sont plus sensibles à mesure que le plan laser utilisé pour la triangulation est plus incliné et plus proche du repère caméra. Autrement dit la déviation de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ est plus grande pour un plan laser plus proche et plus incliné. Cette déformation montre aussi qu'une propagation de l'incertitude basée sur une approximation au premier ordre sera moins valide avec une grande erreur sur les paramètres intrinsèques et les mesures.

La projection du nuage de points sur le plan YZ est elle aussi orientée. Pour expliquer cela, il faut se rappeler que le point que nous considérons est situé sur le côté gauche de la caméra: $[P_S]_{FILS} = [-22, 0 \quad -26, 0 \quad -37, 1909]^T \text{ mm}$. Comme le plan laser 2 bouge d'avant en arrière par rapport à la caméra et change d'inclinaison, le nuage de points est aussi étiré perpendiculairement à la ligne de vue de $[\tilde{P}_S]_{IMG}$. Cette ligne de vue et son incertitude sont représentés par des flèches sur la figure 7.5. Encore une fois, cet effet est dominant car les paramètres des plans lasers sont les plus sensibles.

La figure 7.8 montre la projection d'un nuage de points pour $[P_S]_{FILS} = [-22, 0, 0, 0 - 37, 1909]^T \text{ mm}$. Nous considérons donc ici un point de la scène centré sur l'axe optique. On peut voir que la déformation du nuage selon cet axe n'apparaît plus. On trouve une valeur moyenne de $[\bar{P}_S]_{FILS} = [-21, 8426 - 0, 0004, 37, 2503]^T \text{ mm}$. L'estimé de $[P_S]_{FILS}$ est biaisé; on peut voir que la déformation dans le plan XZ subsiste; mais l'erreur selon la coordonnée Y est très faible.

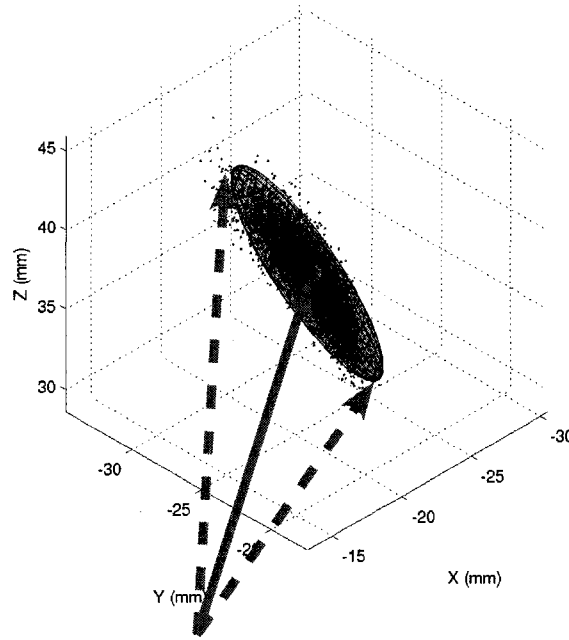


Figure 7.5 Incertitude sur $[P_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une vue 3D d'un nuage de 1000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.

Ces résultats sur la propagation de l'incertitude montrent enfin que le calcul de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ à partir de plusieurs images et d'un filtre de Kalman étendu sera biaisé. Ce problème a déjà été revu dans la littérature. Julier et Uhlmann (2004) décrivent le problème de l'estimation d'une variable au travers d'une transformation de coordonnées polaires vers des coordonnées cartésiennes. C'est aussi le cas de notre système car une caméra, en tant que machine projective, mesure essentiellement des directions

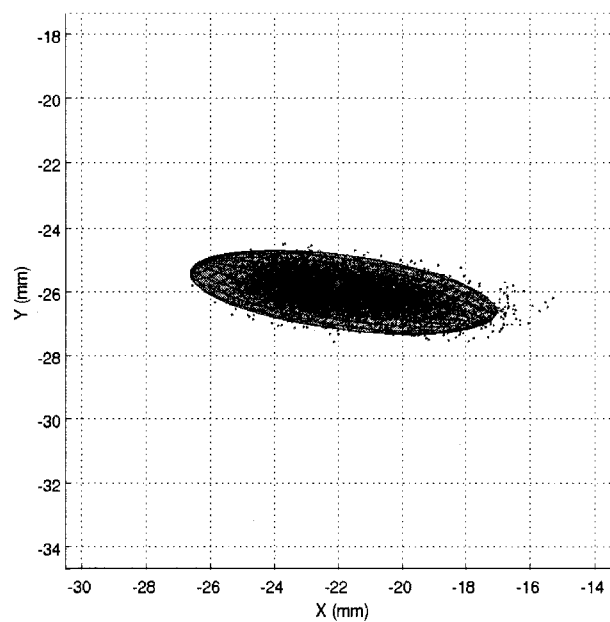
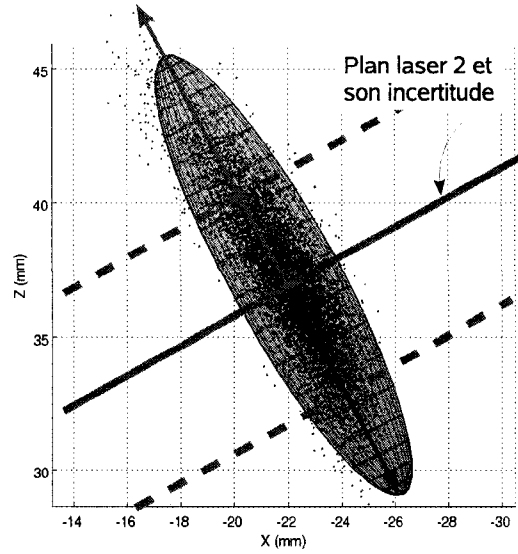
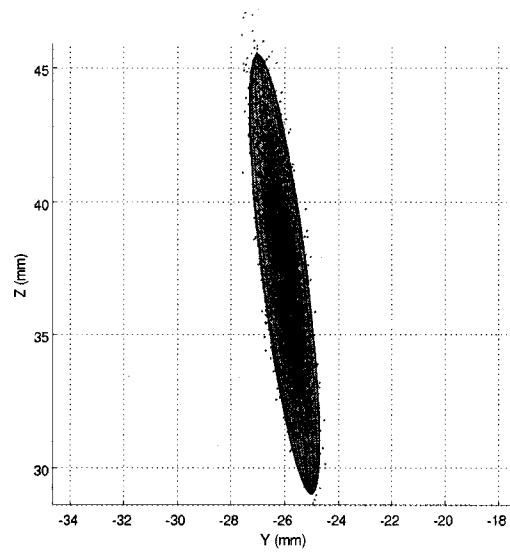


Figure 7.6 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan XY d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités.



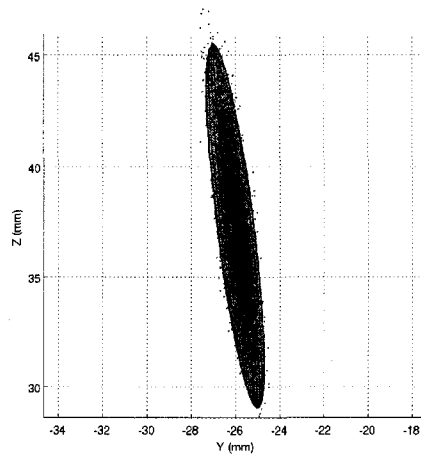
(a)



(b)

Figure 7.7 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. (a) et (b) montrent des projections sur les plans XZ et YZ du repère lié aux fils d'un nuage de 10000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés à partir de paramètres bruités. On remarque que ces projections sont très étirées selon un certain axe.

$$[P_S]_{FILS} = [-22,0 \ -26,0 \ 37,1909]^T \text{ mm}$$



$$P_S]_{FILS} = [-22,0 \ 0,0 \ 37,1909]^T \text{ mm}$$

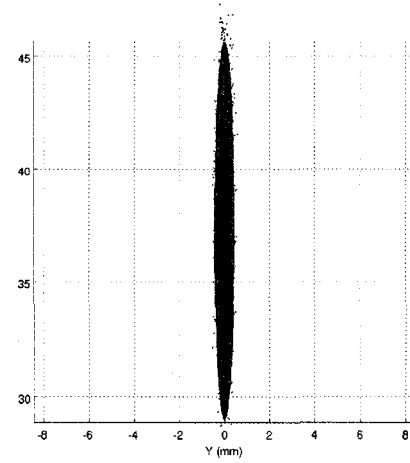


Figure 7.8 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS} = [-22,0 \ 0,0 \ 37,1909]^T \text{ mm}$ pour une grande incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. On remarque que le nuage n'est plus étiré.

dans l'espace. Or, nous voulons obtenir les coordonnées cartésiennes de $[P_S]_{FILS}$. Plusieurs techniques existent pour réduire le biais dans ces conditions. Nous pourrions par exemple utiliser la technique du filtre de Kalman *unscented* présentée par Julier et Uhlmann.

7.5 Réduction de l'incertitude sur l'estimation d'un point

Nous avons étudié l'influence de deux facteurs sur l'incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$: l'un provenant d'une incertitude sur les paramètres intrinsèques, l'autre venant du bruit de mesure. L'incertitude provenant du bruit de mesure, c'est à dire les bruits sur les mesures de $[\tilde{P}_{M_i}]_{IMG}$ et $[\tilde{P}_S]_{IMG}$, peut être réduite par filtrage.

Nous avons vu précédemment que la transformation f était suffisamment linéaire dans le voisinage de $[P_S]_{FILS}$ pour de petites erreurs sur les paramètres et les mesures. Le biais introduit est de l'ordre de $14 \mu m$ et donc pour le moment négligeable par rapport à la précision que nous recherchons (de l'ordre du millimètre). Nous avons donc choisi d'utiliser un filtre de Kalman étendu pour estimer la pose et $[P_S]_{CAM}$. La figure 7.9 présente un schéma bloc de l'algorithme haut niveau que nous proposons. Ce schéma détaille la structure de l'unité de traitement de la figure 3.1.

Les calculs d'incertitudes sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ que nous présentons dans cette section sont également réalisés par simulation Monte Carlo. Une simulation suit les étapes suivantes:

1. On fixe des valeurs pour les paramètres intrinsèques γ_i .
2. On se donne un point $[P_S]_{FILS}$ appartenant au plan laser 2.
3. On calcule $[P_S]_{IMG}$ sur la base de la pose et des paramètres intrinsèques réels. $[P_S]_{IMG}$ est donc la mesure réelle du point de la scène.

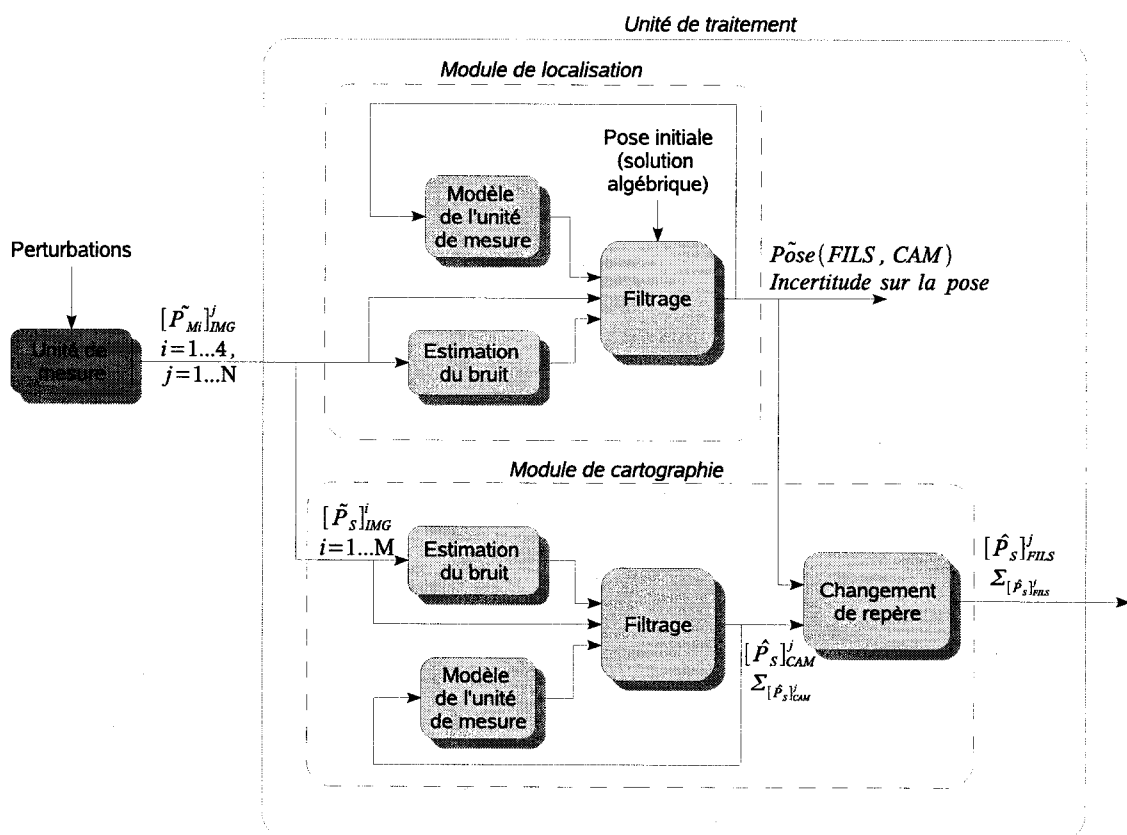


Figure 7.9 Algorithme de haut niveau utilisant le filtrage.

4. On perturbe les paramètres intrinsèques avec un bruit blanc gaussien $\boldsymbol{\nu}_i$.
5. On perturbe les mesures de $[P_{M_i}]_{IMG}$ et $[P_S]_{IMG}$ avec un bruit blanc gaussien $\boldsymbol{\nu}_m$.
6. Localisation: on initialise l'estimé de la pose de l'unité de mesure à partir des paramètres et des mesures perturbés. Cet estimé initial est obtenu par la méthode analytique présentée à la section 4.2.1.
7. Cartographie: on initialise l'estimé de $[P_S]_{CAM}$ à partir des paramètres perturbés. Le calcul utilise les formules de triangulation établies à la section 3.3.3.
8. Filtrage: on corrige l'estimé de la pose et $[\hat{P}_S]_{CAM}$ à partir d'un certain nombre d'images. Les mesures sont à chaque fois perturbées par un bruit gaussien $\boldsymbol{\nu}_m$.
9. Changement de repère: on replace les coordonnées de P_S dans le repère lié aux fils.
10. On réitère les six dernières étapes de la simulation un nombre suffisant de fois.

7.5.1 Estimation de la pose par filtrage

Les résultats suivants sont tirés de (Bryson & Ho, 1975). Soit un ensemble de mesures \mathbf{z} et une variable d'état \mathbf{x} tels que pour chaque mesure $\mathbf{z}(k)$, $k = 1...N$ exacte, on a la relation:

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}[\mathbf{x}(k), k] \quad (7.4)$$

La fonction \mathbf{H} est appelée fonction de mesure. Dans notre cas, la variable d'état \mathbf{x} est la pose de l'unité de mesure:

$$\mathbf{x} = [\phi \quad \theta \quad \psi \quad x \quad y]^T \quad (7.5)$$

et une mesure $\mathbf{z}(k)$ est la mesure des points $[P_{M_i}]_{IMG}^{(k)}$:

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} [P_{M_1}]_{IMG}^{(k)} & [P_{M_2}]_{IMG}^{(k)} & [P_{M_3}]_{IMG}^{(k)} & [P_{M_4}]_{IMG}^{(k)} \end{bmatrix}^T \quad (7.6)$$

Le modèle du système est représenté par l'équation

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi[\mathbf{x}(k), k] \quad (7.7)$$

Comme les mesures et le procédé sont bruitées, nous connaissons seulement les valeurs observées

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}[\mathbf{x}(k), k] + \boldsymbol{\nu}(k) \quad (7.8)$$

et le modèle du système s'écrit plutôt

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi[\mathbf{x}(k), k] + \Gamma[\mathbf{x}(k), k]\boldsymbol{\omega}(k) \quad (7.9)$$

On suppose que les bruits $\boldsymbol{\omega}(k)$ et $\boldsymbol{\nu}(k)$ sont des séquences gaussiennes indépendantes ayant les caractéristiques suivantes:

$$E[\boldsymbol{\omega}(k)] = 0 \quad (7.10)$$

$$\text{cov}[\boldsymbol{\omega}(k), \boldsymbol{\omega}(j)] = \mathbf{Q}(k)\delta_D(k-j) \quad (7.11)$$

$$E[\boldsymbol{\nu}(k)] = 0 \quad (7.12)$$

$$\text{cov}[\boldsymbol{\nu}(k), \boldsymbol{\nu}(j)] = \mathbf{R}(k)\delta_D(k-j) \quad (7.13)$$

$$\text{cov}[\boldsymbol{\omega}(k), \boldsymbol{\nu}(j)] = \text{cov}[\boldsymbol{\omega}(k), \mathbf{x}(k_0)] = 0 \quad (7.14)$$

$$\text{cov}[\boldsymbol{\nu}(k), \mathbf{x}(j)] = 0 \quad (7.15)$$

Le problème est celui d'estimer la variable d'état \mathbf{x} . Le filtre de Kalman fournit une solution sous la forme d'une procédure récursive. Cette procédure permet d'estimer \mathbf{x} de façon optimale au sens du minimum de variance. L'estimé $\hat{\mathbf{x}}$ est calculé sur la base

d'une prédiction de \mathbf{x} et d'une correction proportionnelle à l'erreur entre les mesures observées et les mesures estimées par le modèle. La plupart du temps, \mathbf{H} n'est pas une fonction linéaire. Dans ce cas, un estimé de \mathbf{x} peut être obtenu en linéarisant \mathbf{H} à chaque itération autour de l'estimé courant $\hat{\mathbf{x}}(k-1)$ par un développement en série de Taylor. Dans le cas non linéaire, l'estimé obtenu est sous-optimal. Les étapes du calcul du filtre sont résumées à la figure 7.10.

Quand l'unité translate dans un plan parallèle au plan des fils, les coordonnées des points $[P_{M_i}]_{IMG}$ ne varient pas. On dira que l'unité de mesure se déplace suivant un axe non sensible. Nous prenons donc comme modèle du système $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k)$.

Notre fonction de mesure \mathbf{H} est la spécialisation du modèle direct de l'unité de mesure dérivé à la section 4.2.1.3. La fonction de mesure encapsule les contraintes géométriques de la scène. Sa dérivation est basée sur les hypothèses que les fils sont dans un plan et à une distance l'un de l'autre de $2h$. Le filtre de Kalman va minimiser l'erreur $[\tilde{P}_{M_i}]_{IMG} - [\hat{P}_{M_i}]_{IMG}$ fournissant ainsi une façon de nous assurer que les contraintes géométriques propres à la scène sont respectées.

7.5.2 Estimation d'un point de la scène par filtrage

Dans le cas de l'estimation d'un point de la scène $[P_S]_{CAM} = [X \ Y \ Z]^T$, la contrainte est que le point est contenu dans un plan laser. On a donc

$$Z = -\frac{d + aX + bY}{c} \quad (7.16)$$

La variable d'état est $\mathbf{x} = [X \ Y]^T$ et la fonction de mesure s'écrit

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \alpha_u \frac{X}{Z} + u_0 \\ \alpha_v \frac{Y}{Z} + v_0 \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

1. On considère le système non linéaire stationnaire

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Gamma[\mathbf{x}(k), k]\boldsymbol{\omega}(k)$$

pour lequel on peut observer

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}[\mathbf{x}(k), k] + \boldsymbol{\nu}(k)$$

2. Si la valeur de $\mathbf{H}[\mathbf{x}(k), k]$ peut être approximée par

$$\mathbf{H}[\mathbf{x}(k), k] \approx \mathbf{H}[\bar{\mathbf{x}}(k), k] + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \bar{\mathbf{x}}}[\mathbf{x}(k) - \bar{\mathbf{x}}(k)]$$

L'algorithme de filtrage suivant peut être utilisé:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \bar{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K}(k)(\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}[\bar{\mathbf{x}}(k), k])$$

Ici, $\bar{\mathbf{x}}(k)$ est l'estimé de $\mathbf{x}(k)$ utilisant les mesures jusqu'à $\mathbf{z}(k)$ résultant de la prédiction

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k-1)$$

L'algorithme du calcul du gain est

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k) \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \mathbf{R}^{-1}(k)$$

où $\mathbf{P}(k)$ est calculé en utilisant la variance à priori donnée par

$$\mathbf{M}(k) = \mathbf{P}(k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{Q}(k-1)\Gamma^T(k-1)$$

et l'algorithme de la variance de l'erreur:

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{M}(k) - \mathbf{M}(k) \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \left[\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \mathbf{M}(k) \frac{\partial \mathbf{H}^T}{\partial \bar{\mathbf{x}}} + \mathbf{R}(k) \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \mathbf{M}(k)$$

Figure 7.10 Filtrage de Kalman étendu (adapté de (Gourdeau, 2006)).

Comme le point estimé est fixe, le modèle du système est $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k)$.

7.5.3 Résultats

Les résultats présentés dans les paragraphes suivants sont des valeurs moyennes calculées sur 50 simulations d'une population de 5000 points. Les simulations utilisent les paramètres suivants:

Paramètres du filtre sur la pose:

$$\mathbf{Q}(k) = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

$$\mathbf{R}(k) = \mathbf{R} = 0,05^2 \mathbf{I}_8 \quad (7.19)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(0) = \text{Initialisation avec la méthode analytique} \quad (7.20)$$

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 0,05^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

Paramètres du filtre sur $[\mathbf{P}_S]_{CAM}$:

$$\mathbf{Q}(k) = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

$$\mathbf{R}(k) = \mathbf{R} = \mathbf{I}_2 \quad (7.23)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(0) = \text{Initialisation avec la méthode analytique} \quad (7.24)$$

$$\mathbf{P}(0) = \begin{bmatrix} 0,1^2 & 0 \\ 0 & 0,1^2 \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Le tableau 7.4 donne des statistiques calculées pour des filtrages à partir de 2, 3 puis 7 images. L'initialisation des filtres nécessite une image supplémentaire. Ces valeurs nous permettent de remarquer deux choses:

- En accord avec la théorie et comme nous l'avons observé précédemment, $[\hat{P}_S]_{FILS}$ est biaisée.
- Le filtrage permet de réduire l'incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$. L'incertitude après filtrage est attribuable à l'incertitude sur les paramètres intrinsèques. D'un point de vue quantitatif, le filtrage nous permet de réduire l'incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ d'environ 37% à partir de 3 images.

Notons ici que nous ne parlons pas de la covariance estimée par le filtre de Kalman mais de la covariance estimée sur la population des points $[\hat{P}_S]_{FILS}$. La figure 7.14 compare justement ces deux covariances pour $[\hat{P}_S]_{CAM}$ et dans le plan YZ du repère caméra. On voit que le filtre de Kalman donne une covariance bien trop optimiste mais la direction de l'ellipse correspondante est similaire à celle que nous avons tracée à partir de la covariance de la population des points $[\hat{P}_S]_{CAM}$.

La présence de perturbations peut produire des mesures aberrantes. Dans ces conditions, même un total de 4 images pour une mesure ne pourrait pas être suffisant.

Tableau 7.4 Statistiques calculées pour une incertitude faible sur les paramètres et les mesures. Les valeurs présentées sont des valeurs moyennes calculées sur 50 nuages de 5000 points $[\hat{P}_S]_{FILS}$.

	Sans filtrage	Filtrage sur 2 images	Filtrage sur 3 images	Filtrage sur 7 images
$[P_S]_{FILS}$ (mm)	[-22,0 -26,0 -37,1909]	[-22,0 -26,0 -37,1909]	[-22,0 -26,0 -37,1909]	[-22,0 -26,0 -37,1909]
$[\bar{P}_S]_{FILS}$ (mm)	[-22,0043 -26,0081 37,2040]	[-22,0082 -26,0080 37,2043]	[-22,0084 -26,0080 37,2038]	[-22,0079 -26,0078 37,2036]
$\sigma_{[P_S]_{FILS}}$ (mm)	[0,3143 0,1554 0,4140]	[0,2393 0,1050 0,2627]	[0,2253 0,0946 0,2555]	[0,2006 0,0762 0,2439]
Erreur d'estimé, $[\bar{P}_S]_{FILS} -$ $[P_S]_{FILS}$ (mm)	[0,0043 0,0081 -0,0131]	[0,0082 0,0080 -0,0135]	[0,0084 0,0080 -0,0129]	[0,0079 0,0078 -0,0128]
$\max d_e$ (mm)	1,7662	1,0995	1,1029	1,0504
\bar{d}_e (mm)	0,4875	0,3347	0,3179	0,2892
σ_{d_e} (mm)	0,2388	0,1601	0,1556	0,1489

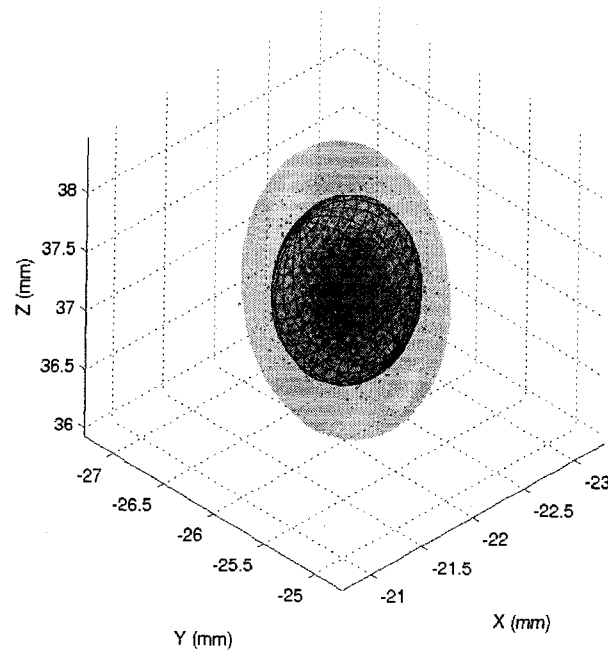


Figure 7.11 Incertitude sur $[\hat{P}_S]_{FILS}$ avec un filtrage sur 3 images versus sans filtrage.

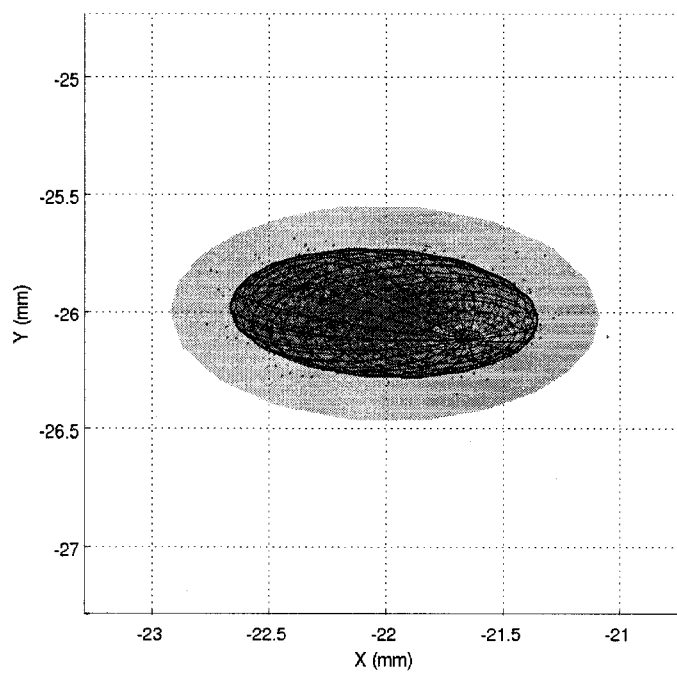
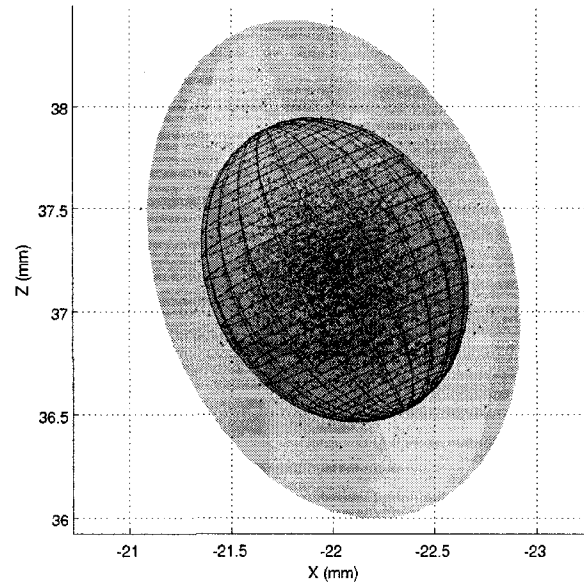
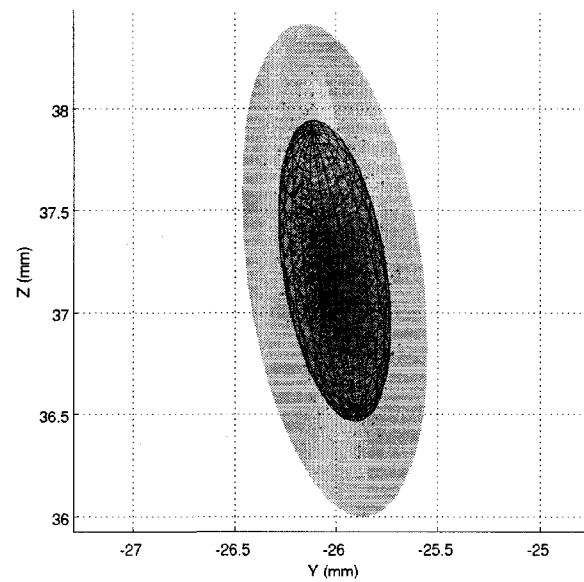


Figure 7.12 Projection sur le plan XY d'un nuage de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés avec une incertitude faible sur les paramètres et les mesures prises dans l'image.



(a)



(b)

Figure 7.13 Projections d'un nuage de $[\hat{P}_S]_{FILS}$ calculés avec une incertitude faible sur les paramètres et les mesures prises dans l'image. (a), (b) montrent des projections d'un nuage de 10000 points respectivement sur les plans XZ et YZ du repère lié aux fils. On remarque que ces projections sont étirées selon un certain axe.

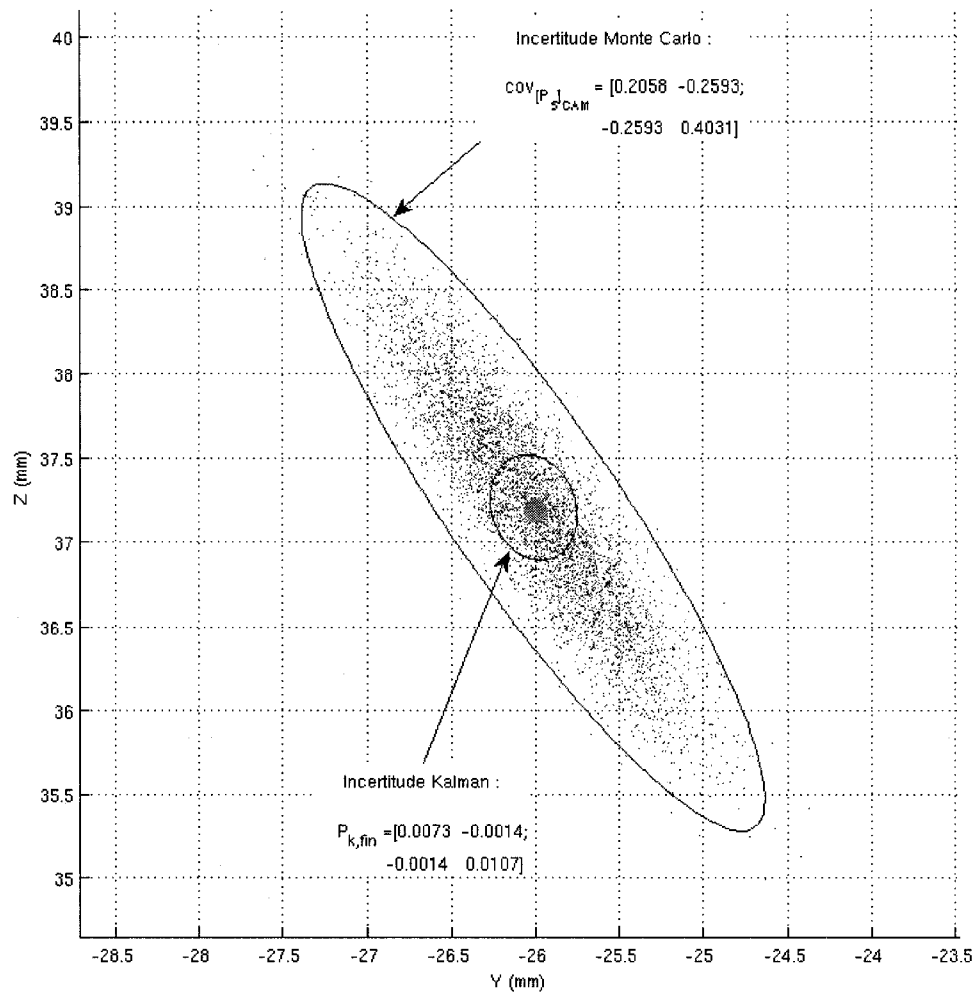


Figure 7.14 Comparaison des incertitudes estimées sur une population de 5000 points $[\hat{P}_S]_{CAM}$ et par filtrage de Kalman. Nous considérons ici une forte incertitude sur les paramètres des plans lasers et des incertitudes faibles sur les autres paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image. La figure montre une projection sur le plan YZ du nuage de 5000 points $[\hat{P}_S]_{CAM}$ calculés à partir des paramètres bruités. Le filtrage de Kalman a été fait sur 3 images.

7.5.4 Propagation de l'incertitude de mesure d'un point de la scène

Une fois que l'on a un estimé de $[P_S]_{CAM}$ et un estimé de son incertitude $\Sigma_{[P_S]_{CAM}}$, le problème est celui de propager cette incertitude dans le repère lié aux fils. En reprenant la même idée que précédemment, la figure 7.15 illustre le problème à résoudre.

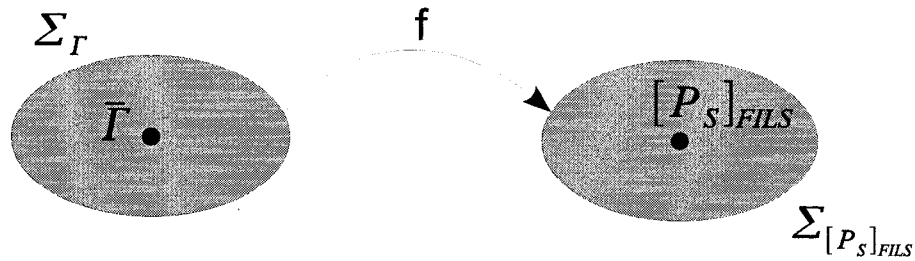


Figure 7.15 Le problème de la propagation de l'incertitude sur $[P_S]_{FILS}$.

Ici, nous prenons $\Gamma = [[P_S]_{CAM} \ \gamma]^T$. En prenant pour hypothèse que l'on a de petites erreurs sur Γ , on peut utiliser la formule classique de la propagation de la covariance au travers d'une fonction non linéaire. On aura donc:

$$\Sigma_{[P_S]_{FILS}} = \mathbf{J} \Sigma_{erreur} \mathbf{J}^{-1} \quad (7.26)$$

où \mathbf{J} est la matrice jacobienne de la fonction f :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial [P_S]_{CAM}} & \frac{\partial f}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial [P_S]_{CAM}} & \frac{\partial f}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

Dans notre cas, f est une transformation rigide.

7.6 Rejet des mesures aberrantes

Lorsque le système est en opération, les mesures aberrantes peuvent survenir pour les multiples raisons que nous avons évoquées au premier chapitre.

Nous proposons de rajouter des étapes de prétraitement avant le filtrage afin d'éliminer ces mesures aberrantes. La figure 7.16 montre le nouvel algorithme de traitement de haut niveau.

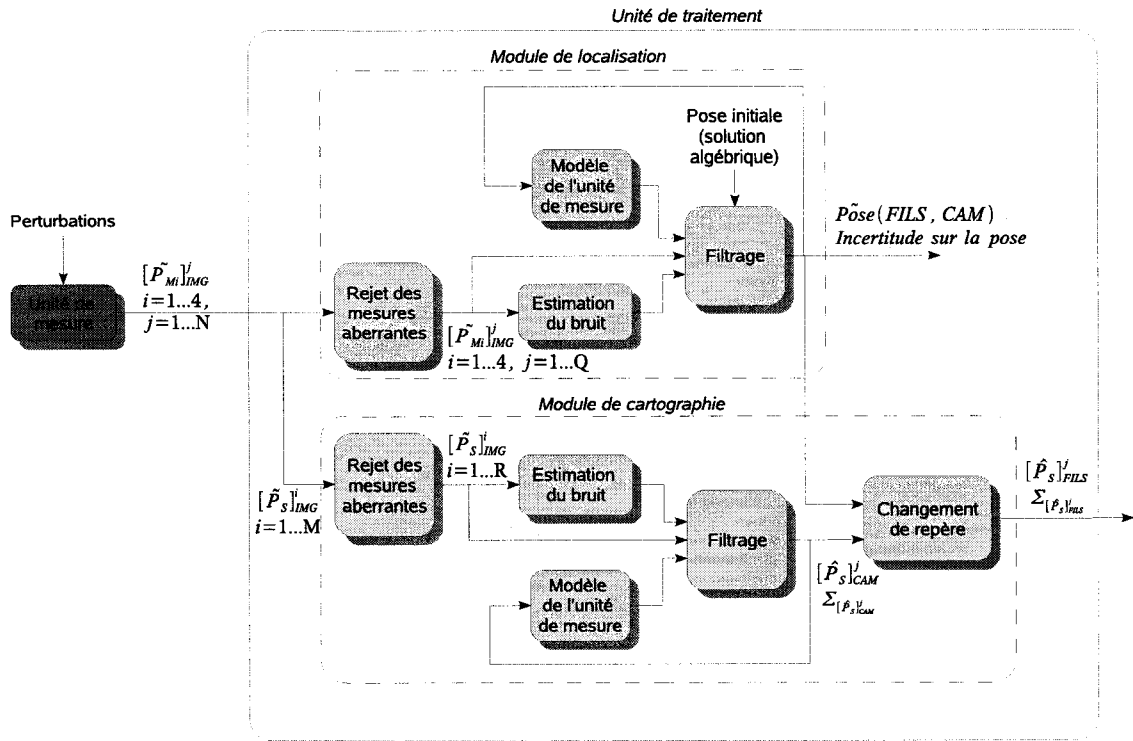


Figure 7.16 Algorithme de haut niveau robuste.

Pour le calibrage des lasers, nous avons utilisé l'algorithme de RANSAC. Nous pouvons également ici utiliser RANSAC pour éliminer les mesures aberrantes. Théoriquement, le taux de mesures aberrantes que l'algorithme peut supporter peut aller jusqu'à 50% (Fischler & Bolles, 1981).

7.7 Calibrage devant la scène

Après filtrage, l'incertitude résiduelle $[\hat{P}_S]_{FILS}$ est dans une certaine mesure attribuable à l'incertitude sur les paramètres intrinsèques. On voudrait donc réduire l'incertitude sur ces paramètres.

La méthode de Zhang pour le calibrage de la caméra nécessite plusieurs images d'une cible qui comporte au moins quatre points coplanaires. Zhang conseille de capturer des images de la cible dans différentes orientations devant la caméra. Effectivement, si les plans de la cible dans différentes images sont parallèles, cela n'apporte aucune information supplémentaire car les homographies entre le plan image et le plan de la cible sont déterminées à un facteur d'échelle prêt. Par contre, si la translation entre les plans est connue, il est possible d'estimer ce facteur d'échelle et ainsi estimer les paramètres de la caméra.

Les résultats suivants sont tirés de (Zhang, 1999). À partir des images i et j , on a la contrainte:

$$\mathbf{t}^{ij} = \mathbf{t}^i - \mathbf{t}^j = \mathbf{A}^{-1}(\alpha^i \mathbf{h}_3^i - \alpha^j \mathbf{h}_3^j) \quad (7.28)$$

Si l'on ne connaît que la direction de la translation, alors on a deux contraintes sur \mathbf{A} . Si on connaît aussi l'amplitude de la translation alors on obtient une contrainte supplémentaire sur \mathbf{A} et le calibrage de l'ensemble des paramètres de la caméra est possible à partir de deux plans parallèles.

L'intersection des plans lasers avec les fils allument quatre points coplanaires. Malheureusement, nous ne connaissons pas les coordonnées de ces quatre points. De plus, la position de ces points changent quand la caméra bouge. Il ne semble donc pas possible d'utiliser directement la méthode de Zhang pour calibrer la caméra devant la scène. Par contre, si l'on adapte la scène en allumant quatre points fixes sur

les fils, le calibrage est possible. Nous verrons que l'image de la caméra est filtrée optiquement à une certaine longueur d'onde. Pour faire apparaître quatre points fixes dans l'image il serait peut-être possible d'utiliser des diodes électroluminescentes qui émettent à la bonne longueur d'onde ou bien une peinture fluorescente pour dessiner les points directement sur les fils.

Une fois que l'on peut détecter quatre points fixes sur les fils et les quatre points $[P_{M_i}]_{IMG}$, le calibrage des plans lasers peut se faire avec les mêmes méthodes que nous avons déjà exposées.

7.8 Algorithme de haut niveau

La figure 7.17 détaille la structure de l'unité de traitement qui intègre les améliorations que nous proposons. L'unité de traitement est décomposée en trois modules qui contiennent des algorithmes de haut niveau. Nous introduisons ici un module décisionnel qui gère la rétroaction entre l'unité de mesure et le porteur.

- Le module de localisation est chargé d'estimer la pose du porteur par rapport au repère lié aux fils. Les données en entrée sont passées à un algorithme de type RANSAC pour éliminer les mesures aberrantes. Un filtre est ensuite initialisé avec la méthode analytique de calcul de pose. Ce filtre peut être un filtre de Kalman étendu ou bien un filtre de Kalman unscented si l'on désire réduire le biais de l'estimateur.
- Le module de cartographie prend en entrée des mesures de points appartenant à la ligne laser. De la même façon que précédemment, les mesures aberrantes sont éliminées par un algorithme de type RANSAC. Les points de la surface sont ensuite estimés par filtrage. Ces points sont stockés dans une base de données. Cette base de données est utilisée pour constituer un modèle de la

surface mais est aussi consultée par le module décisionnel.

- Le module décisionnel, que nous laissons pour un développement futur, consulte la base de données des points de la surface afin de positionner le porteur de façon à récolter les mesures. On peut penser à un ensemble de règles qui définissent un certain comportement du système (mesure rapide pour une prévisualisation, mesure précise, autres types de modes de fonctionnement destinés à l'analyse). Ce module communique avec l'interface homme-machine qui présente le modèle de la surface, la position de l'unité de mesure devant les fils et tout autres renseignements utiles à l'opération du système. A tout moment l'opérateur peut prendre le contrôle du système au moyen de l'interface homme-machine.

7.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes tout d'abord intéressés à l'incertitude sur la mesure d'un point de la scène déterminé par les méthodes analytiques. Les résultats obtenus par simulation Monte Carlo donnent une référence pour l'amélioration de la performance du système dans un contexte où les paramètres intrinsèques et les mesures prises dans l'image comportent un certain degré d'incertitude.

Nous avons ensuite détaillé la structure d'une unité de traitement qui estime la pose de l'unité et la position d'un point de la scène par filtrage. Dans les deux cas, des filtres de Kalman étendus ont été utilisés. Les résultats montrent que le filtrage à partir de 3 images réduit l'incertitude sur la mesure d'un point de la scène d'environ 37%. Les valeurs estimées sont par contre biaisées; il serait donc intéressant d'étudier d'autres types de filtres tels que le filtre de Kalman unscented afin de diminuer ce biais.

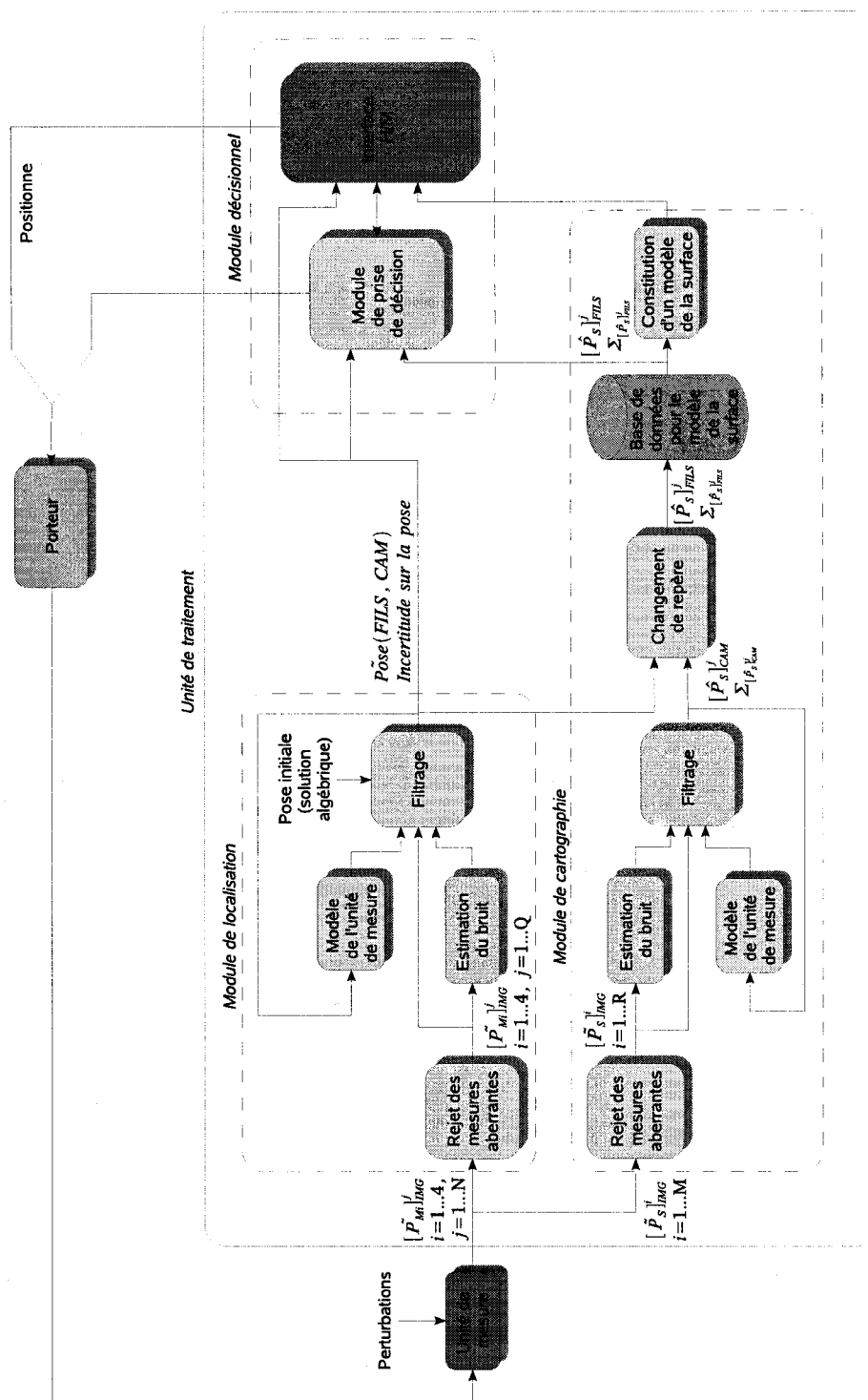


Figure 7.17 L'algorithme de haut niveau

Dans la pratique, il sera nécessaire d'utiliser une procédure pour l'élimination des mesures aberrantes. Nous avons proposé pour cela l'utilisation de l'algorithme de RANSAC. Bien que l'effet bénéfique de l'utilisation de cet algorithme n'ait pas été montrée ici, les expériences de calibrage des plans lasers démontrent son utilité.

Enfin, nous proposons une modification mineure de la scène qui rendrait possible le calibrage de l'unité alors que le système est en opération. Le calibrage en ligne offre une meilleure flexibilité et une meilleure autonomie au système.

Les améliorations que nous proposons sont basées sur un traitement statistique du signal. Ce type de traitement a un coût en terme de capacité d'acquisition de mesures. Il faut donc choisir: veut-on un système qui délivre beaucoup de mesures potentiellement fausses ou imprécises, ou bien un système qui délivre moins de mesures mais plus intègres et plus précises ? La réponse est claire si l'on considère l'environnement d'opération du système.

Il y a bien entendu bien d'autres voies d'améliorations que nous n'avons pas explorées comme par exemple au niveau du traitement d'image. La variance de $[\hat{P}_S]_{IMG}$ pourrait être réduite en utilisant un détecteur du pic d'intensité de la ligne laser dans l'image avec une précision sous-pixéllique comme ceux présentés dans (Fisher & Naidu, 1996). Une autre amélioration concerne l'analyse spatio-temporelle du signal réfléchi sur la surface. Dans sa thèse, Curless (1997) analyse les différentes sources d'erreurs des systèmes de cartographie 3D basés sur le même principe que le notre. Il observe que des changements de réflectance de la surface et des défauts de continuité induisent des erreurs lors de la triangulation. Ces erreurs peuvent être corrigées en analysant l'évolution de la réflexion du signal envoyé sur la surface et capté par la caméra.

CHAPITRE 8

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans cette thèse ont été menés afin de proposer une solution pour résoudre le problème de la cartographie tridimensionnelle d'une structure immergée. Notre approche est basée sur un cadre conceptuel et matériel qui permet la résolution de ce problème. Nous revoyons dans la section suivante les contributions de cette thèse puis nous décrivons quelques perspectives de recherche qui pourraient être développées dans le futur.

8.1 Conclusion

8.1.1 Cadre conceptuel et matériel

Le problème que nous avons traité est celui de la cartographie tridimensionnelle haute précision d'une structure immergée, dans un environnement de dimensions restreintes et soumis à de nombreuses perturbations. Ces perturbations sont par exemple des particules en suspension, des bulles d'air et des vibrations du système ou de la structure inspectée. Le système de cartographie est par ailleurs destiné à être utilisé sur un site éloigné, par des opérateurs ayant un minimum de connaissances sur le système lui-même.

La solution proposée utilise un système de vision composé d'une caméra et de deux lasers qui projettent chacun un plan de lumière sur la surface à inspecter. La scène est structurée par deux fils tendus installés le long de la structure. Ces deux fils sont parallèles entre eux et se situent dans un même plan. Le cadre conceptuel présenté

dans cette thèse exploite le modèle du système et les informations qui caractérisent la scène afin d'obtenir une plus grande intégrité et une plus grande robustesse. Dans ce cadre, il est également possible d'ajuster automatiquement les paramètres internes du système fournissant ainsi une plus grande flexibilité et une plus grande autonomie d'opération.

Plus précisément, l'intégrité du système est assurée par la vérification continue de contraintes géométriques qui décrivent la structure de la scène. Le système peut déterminer lui-même si une mesure est valide ou non par l'utilisation d'un seuil sur l'erreur de reprojection des points $[\tilde{P}_{M_i}]_{IMG}$. Par exemple, si l'erreur de reprojection est grande et si le système est calibré, cela signifie que les fils qui servent de référence ont bougé lors de la mesure. Dans ce cas, la mesure est rejetée. Si l'erreur de reprojection est inférieure à un certain seuil, la mesure est valide.

Il est possible que les mesures faites par le système de vision soient aberrantes, et ce même lorsque les fils ne bougent pas. L'utilisation d'algorithmes RANSAC permet d'éliminer ces mesures aberrantes. Le système est ainsi plus robuste face aux perturbations. En contrepartie, il devient nécessaire de capturer plusieurs images pour faire une mesure.

La précision de mesure et l'estimation d'un niveau de confiance ne peuvent être assurés que par des techniques de filtrage. La scène est en effet trop peu structurée pour assurer une certaine précision et estimer un niveau de confiance à partir d'une seule image. Bien que nous ayons étudié ce problème en simulation, plus d'expériences en laboratoire et sur site nous dirons combien d'images sont nécessaires pour garantir une certaine précision.

D'un point de vue plus global, cette thèse présente aussi une méthode de conception d'un système robotique qui est en l'occurrence un système de mesure. Mais cette méthode de conception pourrait être appliquée à tout autre type de système

robotique.

8.1.2 Conception, design, implémentation et validation d'un prototype

Une autre contribution de notre travail est la conception, le design, l'implémentation et la validation d'un prototype. Ce prototype est basé sur le principe innovant que nous avons décrit et fait actuellement l'objet d'une demande de brevet.

Une partie de notre approche a été implantée dans le prototype et ses performances ont été évaluées par des expériences en laboratoire et des essais sur le site de la centrale hydroélectrique de Beauharnois. Les résultats obtenus fournissent une preuve de concept du système de cartographie et montrent le potentiel du système: les cartes obtenues ont une précision de l'ordre du millimètre et une densité d'environ 100 points par cm^2 .

On peut se demander si une telle précision et une telle densité de mesure sont nécessaires ? Dans notre cas, les caractéristiques les plus importantes sont l'intégrité et la robustesse dont la conséquence est finalement la maîtrise d'une certaine précision voulue. Mais la mesure de structures comme certains guides latéraux demande une précision de l'ordre de 0,1 mm. D'autre part, la forte densité de mesures permet d'apprécier la qualité de surface de la structure inspectée de façon référencée. Ceci fournit une capacité supplémentaire pour le diagnostic.

Le système que nous avons conçu a été dimensionné tel que la précision de mesure est de l'ordre de 1 mm; cependant le système peut tout à fait atteindre une précision plus grande si ses dimensions sont recalculées comme nous l'avons vu à la section 5.2.3.1.

8.2 Perspectives

Les perspectives de recherche sont formulées à partir de l'usage qui est projeté pour le système de cartographie. Ce système est destiné à fournir des modèles 3D dans le but de donner une information aux exploitants de centrale sur l'état des installations et éventuellement aux chercheurs intéressés par l'évolution de l'état de ces installations. Pour délivrer cette information, il faut donc d'une part être en mesure de visualiser et de manipuler ces modèles à temps interactif, et d'autre part être en mesure de les analyser. Dans une deuxième phase, les modèles 3D servent pour la réfection des structures. Plusieurs projets à l'IREQ portent sur la réfection robotisée et les modèles 3D peuvent ainsi venir en entrée d'un système qui réalise des opérations sur la structure. Un exemple d'un tel système est le ROV3 développé à l'IREQ et visible à la figure 1.1(a). L'objectif d'un des projets autour du ROV est de réparer une structure par un bras robotique contrôlé en position-force.

Afin de dégager des perspectives pour un développement futur du système, reprenons les étapes d'acquisition et de traitement de la carte d'une structure, illustrées à la figure 8.1.

8.2.1 Mesure d'une structure

8.2.1.1 Implantation complète de l'approche

La première étape est la prise de mesure. C'est l'étape sur laquelle a porté la recherche que nous avons présentée. Au moment des expériences, notre approche n'était pas encore complètement implantée. Seule la vérification des contraintes géométriques a permis d'assurer l'intégrité des mesures. Il faut par ailleurs garder à l'esprit que les conditions pour la préparation et le déroulement des expériences

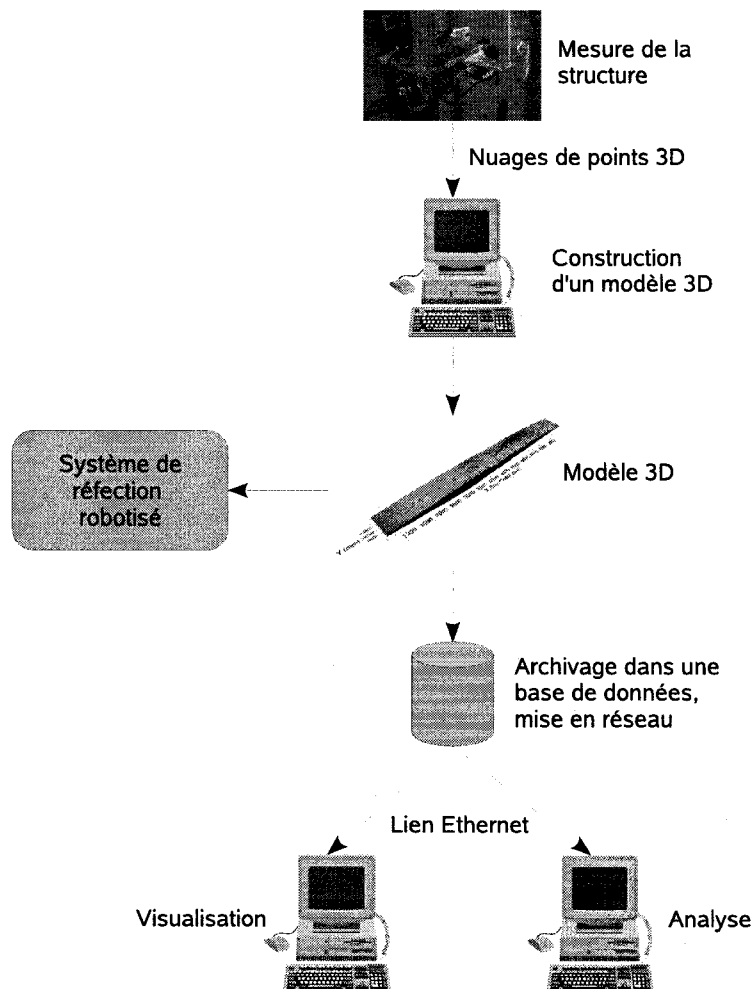


Figure 8.1 Étapes pour l'acquisition et le traitement de la carte d'une structure.

à la centrale de Beauharnois étaient particulièrement favorables: le site est proche du laboratoire, la visibilité dans l'eau est bonne et les installations sont en bon état par rapport à d'autres sites. Pourtant les cartes que nous avons obtenues présentent des trous à certains endroits à cause de la perte de signal suite aux perturbations. Ces résultats nous indiquent que l'approche que nous proposons est nécessaire pour assurer le fonctionnement du système dans des conditions plus difficiles. Il reste donc à implanter et tester la totalité de notre approche sur un cas réel.

8.2.1.2 Calibrage sur site

Afin d'utiliser la méthode de calibrage sur site que nous proposons, la scène nécessite d'être adaptée en fixant 4 points sur les fils. Outre le fait que le calibrage de la caméra et des lasers se fait de façon séparée ce qui résulte en des estimés sous-optimaux, il n'est pas évident de détecter 4 points fixes sur les fils puisque l'on utilise un filtre optique très sélectif. Il serait donc préférable de calibrer l'unité de mesure directement à partir des points d'intersections entre les plans lasers et les fils. La question dans ce cas est de savoir quels sont les paramètres que l'on peut observer ? Si l'on actionne la caméra, est-il possible de calibrer l'unité à partir des 4 points $[P_{M_i}]_{CAM}$ et la connaissance du mouvement de l'unité ? Si le système est statique, il est prévisible que l'on ne pourra pas estimer les paramètres des plans lasers uniquement à partir de 4 points coplanaires. Que se passe-t-il si l'on rajoute un troisième fils situé dans un plan parallèle au plan formé par les deux premiers ?

8.2.1.3 Modélisation physique

Un point essentiel pour maîtriser la précision de mesure est la modélisation physique du capteur. Nous avons adopté un certain modèle et plusieurs résultats d'expériences nous montrent qu'il est jusqu'à présent adéquat. Mais quelles sont les barrières physiques à la précision de mesure ? Les travaux de Curless et de Blais fournissent des éléments de réponse. Comment alors déterminer ces barrières physiques dans le cas de notre système ? D'autre part, quels sont les éléments du système qui ont une influence sur la précision de mesure et que nous n'avons pas pris en compte ? On peut se demander aussi comment se dégrade la précision des mesures quand nos hypothèses de base ne sont pas respectées, c'est à dire quand les fils ne sont pas parallèles et ne forment pas un plan, et que faire dans ce cas ?

8.2.1.4 Développement matériel

Pour profiter du potentiel de notre approche mais aussi pour réduire le temps nécessaire à la prise de mesure, nous aurions intérêt à augmenter sa capacité d'acquisition. Pour cela, il y a plusieurs configurations alternatives à celle de notre système. La caméra que nous utilisons dans le prototype a une haute résolution mais son taux d'acquisition est limité à 30 images par seconde. Peut-on conserver une bonne précision de mesure avec une caméra à plus faible résolution mais plus sensible et avec un taux d'acquisition plus grand ? Tout en gardant les projecteurs lasers, l'usage de deux caméras montées en paire stéréo pourrait aussi être adopté. En plus d'augmenter le taux d'acquisition, cela aurait aussi pour avantage de réduire les problèmes d'occlusion. Par ailleurs, on a récemment vu apparaître des systèmes de vision qui utilisent plusieurs caméras synchronisées montées en grille. Ces configurations permettent d'augmenter le taux d'acquisition du système total (voir par exemple (Wilburn, Joshi, Vaish, Levoy, & Horowitz, 2004)). L'utilisation d'une telle configuration est-elle possible dans notre cas ? Le taux d'acquisition pourrait enfin être augmenté par l'utilisation de projecteurs multilinéaires ou même surfacique.

8.2.2 Construction et manipulation d'un modèle 3D

Un aspect que nous avons peu développé est celui de la construction d'un modèle 3D de la structure. Le système de cartographie est bien adapté pour l'inspection de surfaces longues et étroites. La mesure de plusieurs bandes de surface est donc nécessaire pour construire la carte d'une structure. La construction d'un modèle 3D pose ainsi le problème du recalage des bandes de surface. Dans cette étude, les nuages de points ont été recalés en utilisant la boîte à outils IMAlign du logiciel PolyWorks qui utilise un algorithme de type ICP. Cette opération ne peut se faire qu'en post-traitement et nécessite l'intervention d'un opérateur formé pour l'utilisation de ce

logiciel complexe.

Les modèles que nous avons présentés ont ensuite été construits par triangulation de Delaunay en utilisant Surfer, un autre logiciel commercial. Le volume de données à manipuler dans le futur peut être très grand car un des objectifs du projet à court terme est d'inspecter non plus un linteau mais un cadre de porte au complet: linteau, guides latéraux et seuil. Le modèle 3D peut donc être difficile à visualiser, à analyser et à transmettre. On peut par exemple imaginer que l'on veuille mettre les modèles 3D à disposition des chercheurs et des exploitants de centrale via un réseau. Le type de modèle que nous utilisons actuellement limiterait cette application. La construction d'un modèle 3D reste donc problématique. Quelle description adopter de façon à rendre le modèle facilement manipulable informatiquement ?

Le problème du recalage et celui de la représentation du modèle 3D montrent que l'utilisation de logiciels commerciaux n'est pas la mieux adaptée. Actuellement, l'exploitation des données issues du système de vision passe par une phase de post-traitement éclatée sur plusieurs logiciels commerciaux. L'utilisation du système serait facilitée si les outils nécessaires au traitement étaient regroupés dans un même logiciel. Il serait par exemple bon de pouvoir recalibrer les nuages de points automatiquement, lors de la prise de mesure. De la même façon, on voudrait reconstruire la surface pendant la prise de mesure pour fournir un retour à l'opérateur.

Dans la section 4.3, nous avons évoqué l'utilisation possible d'une représentation du modèle dans le domaine fréquentiel. Une telle représentation offre un certain potentiel qui à notre connaissance n'est exploité actuellement par aucune application commerciale:

- Le recalage peut être automatisé comme cela est montré dans (Lucchese, Doretto, & Cortelazzo, 2002).

- Afin d'archiver et de transmettre plus facilement les modèles 3D, nous pourrions utiliser des techniques de compression similaires à celles décrites dans les normes JPEG ou JPEG2000 mais appliquées à notre modèle 3D.

Enfin, nous pourrions étudier des techniques de représentation multirésolution pour faciliter la manipulation des modèles 3D.

La thèse que nous avons présentée est une première étape vers la constitution d'un système de cartographie sous-marin. Nous avons démontré que nous pouvions recueillir les mesures recherchées. Dans l'optique d'un développement scientifique, les étapes suivantes de la recherche devraient porter sur l'amélioration des performances du système actuel mais aussi la création d'outils logiciels spécialisés afin d'exploiter l'information recueillie.

RÉFÉRENCES

- Arun, K., Huang, T., & Blostein, S. (1987). Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-9*(5), 698-700.
- Beaudry, J., Mirallès, F., Gagné, N., & Blain, M. (2006). *Conception d'un système pour le diagnostic de linteau pour la Centrale Beauharnois* (Rapport technique). IREQ.
- Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging, 13*(1), 231-43.
- Brand, P., Mohr, R., & Bobet, P. (1993). *Distorsions optiques : Correction dans un modèle projectif* (Rapport technique). INRIA.
- Bryson, A. E., & Ho, Y.-C. (1975). *Applied optimal control*. Taylor & Francis.
- Caimi, F. M., Kocak, D. M., & Asper, V. L. (1996). Developments in laser-line scanned undersea surface mapping and image analysis systems for scientific applications. *Proceedings of the prospects for the 21st century conference* (Vol. Supp, p. 75-81). Fort Lauderdale, FL, United States.
- Chau-Chang, W., Shiahn-Wern, S., & Shi-Her, C. (2000). Underwater structure inspection with laser light stripes. *Proceedings of the 2000 international symposium on underwater technology* (p. 201-5). Tokyo, Japan.
- Chen, C., & Kak, A. (1987). Modeling and calibration of a structured light scanner for 3D robot vision. *Proceedings of the 1987 IEEE international conference on robotics and automation* (Vol. 2, p. 807-15). Raleigh, NC, United States.
- Coiras, E., Petillot, Y., & Lane, D. (2007). Multiresolution 3-D reconstruction from side-scan sonar images. *IEEE Transactions on Image Processing, 16*(2), 382-90.

- Craig, G., Nareid, H., & Watson, J. (1999). Underwater holography in the field. *IEE Colloquium*(143), 39-42.
- Cucchiara, R., Grana, C., Prati, A., & Vezzani, R. (2003). A Hough transform-based method for radial lens distortion correction. *Proceedings of the 12th international conference on image analysis and processing* (p. 182-7). Mantova, Italy.
- Curless, B. L. (1997). *New methods for surface reconstruction from range images*. Thèse de doctorat, Stanford University.
- Czajewski, W., & Sluzek, A. (1999). Development of a laser-based vision system for an underwater vehicle. *IEEE international symposium on industrial electronics* (Vol. 1, p. 173-7). Bled, Slovenia.
- Dalgleish, F., Tetlow, S., & Allwood, R. (2004). Experiments in laser-assisted visual sensing for AUV navigation. *Control Engineering Practice*, 12(12), 1561-73.
- Devernay, F., & Faugeras, O. (2001). Straight lines have to be straight. Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. *Machine Vision and Applications*, 13(1), 14-24.
- Durand, B. (2003). Réactions alcalis-granulats : Étude du potentiel d'expansion résiduelle du barrage La Tuque. *Conférence ACI Section du Québec et de l'Est de l'Ontario* (p. 1-16). Montreal, QC, Canada.
- Durrant-Whyte, H. (1988). Uncertain geometry in robotics. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 4(1), 23-31.
- Eggert, D., Lorusso, A., & Fisher, R. (1997). Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*, 9(5-6), 272-90.
- Faugeras, O. D. (1993). *Three-dimensional computer vision*. MIT Press.

- Fischler, M., & Bolles, R. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-95.
- Fisher, R., & Naidu, D. (1996). A comparison of algorithms for subpixel peak detection. Springer-Verlag (Ed.), *Image technology: Advances in image processing, multimedia and machine vision*. Heidelberg.
- George, R. (2006). Advances in AUV remote-sensing technology for imaging deep-water geohazards. *Leading Edge*, 25(12), 1478-83.
- Golden Software. (2007). *Page d'accueil*. Golden Software. Consulté le 28 juin 2007, tiré de <http://www.goldensoftware.com/>.
- Gonzalez, E., Diaz-Pache, F.-T., Mosquera, L., & Agudo, J. (2007). Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-scanner. *Optics and Laser Technology*, 39(3), 481-9.
- Google Earth. (2007). *Page d'accueil*. Google. Consulté le 28 juin 2007, tiré de <http://earth.google.com/>.
- Gourdeau, R. (2006). *Notes de cours de commande optimale*. École Polytechnique de Montréal.
- Hampel, F., Ronchetti, E., & Rousseeuw, P. (1986). *Robust statistics: The approach based on influence functions*. Wiley.
- Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision* (deuxième ed.). Cambridge University Press.
- Heikkila, J., & Silven, O. (1997). Four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of the 1997 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (p. 1106-12). San Juan, Puerto Rico.

Horn, B., Hilden, H., & Negahdaripour, S. (1988). Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices. *Journal of the Optical Society of America*, 5(7), 1127-35.

Horn, B. K. P. (1987). Closed form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society*, 4(4), 629-42.

Huber, P. J. (1981). *Robust statistics*. John Wiley & Sons.

Huynh, D. (1997). Calibration of a structured light system : a projective approach. *Proceedings of the 1997 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (p. 225-30). San Juan, Puerto Rico.

Huynh, D., Owens, R., & Hartmann, P. (1999). Calibration of a structured light stripe system : a novel approach. *International Journal of Computer Vision*, 33(1), 76-86.

InnovMetric. (2007). *Page d'accueil*. InnovMetric. Consulté le 28 juin 2007, tiré de <http://www.innovmetric.com/>.

Jaffe, J., Moore, K. D., McLean, J., & Strand, M. (2001). Underwater optical imaging: Status and prospects. *Oceanography*, 14(3), 66-76.

Jokinen, O. (1999). Self-calibration of a light striping system by matching multiple 3-D profile maps. *Second international conference on 3-D digital imaging and modeling* (p. 180-90). Ottawa, ONT, Canada.

Julier, S., & Uhlmann, J. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401-22.

Kanatani, K. (1996). *Statistical optimization for geometric computation: Theory and practice*. Elsevier Science.

Kanatani, K., Ohta, N., & Kanazawa, Y. (2000). Optimal homography computation with a reliability measure. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E83-D(7), 1369-74.

Kanazawa, Y., & Kanatani, K. (1995). Reliability of fitting a plane to range data. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E78-D(2), 1630-5.

Kocak, D. M., & Caimi, F. M. (2005). The current art of underwater imaging - with a glimpse of the past and vision of the future. *Marine Technology Society Journal*, 39(3), 5-26.

Kondo, H., & Ura, T. (2004). Navigation of an AUV for investigation of underwater structures. *Control Engineering Practice*, 12(12), 1551-9.

Lavest, J. M., Rives, G., & Lapreste, J. T. (2002). Dry camera calibration for underwater applications. *Machine Vision and Applications*, 13(5-6), 245-53.

Lingrand, D. (1999). *Approximations de la projection perspective : modèle combiné et étude des singularités homographiques* (Rapport technique). INRIA.

Lucchese, L., Doretto, G., & Cortelazzo, G. (2002). A frequency domain technique for range data registration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(11), 1468-84.

Maronna R., Y. V., Martin D. (2006). *Robust statistics: Theory and methods*. John Wiley & Sons.

Matas, J., & Chum, O. (2005). Randomized RANSAC with sequential probability ratio test. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (Vol. II, p. 1727-32). Beijing, China.

McIvor, A. (1999). Calibration of a laser stripe profiler. *Second international conference on 3-D digital imaging and modeling* (p. 92-8). Ottawa, ONT, Canada.

- McIvor, A. (2002). Nonlinear calibration of a laser stripe profiler. *Optical Engineering*, 41(1), 205-12.
- Microb. (2007). *Modules intégrés pour le contrôle de robots*. Institut de recherche d'Hydro-Québec. Consulté le 28 juin 2007, tiré de <http://www.robotique.ireq.ca/microb/>.
- Moore, K., Jaffe, J., & Ochoa, B. (2000). Development of a new underwater bathymetric laser imaging system : L-bath. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(8), 1106 - 17.
- Mosher, D., Bigg, S., & LaPierre, A. (2006). 3D seismic versus multibeam sonar seafloor surface renderings for geohazard assessment: Case examples from the central scotian slope. *Leading Edge*, 25(12), 1484-94.
- Narasimhan, S. G., & Nayar, S. K. (2005). Structured light methods for underwater imaging: Light stripe scanning and photometric stereo. *Proceedings of the MTS/IEEE oceans 2005 conference* (Vol. 2005, p. 1640165).
- Negahdaripour, S., & Madjidi, H. (2003). Stereovision imaging on submersible platforms for 3-D mapping of benthic habitats and sea-floor structures. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28(4), 625-50.
- OpenCV. (2007). *Open computer vision library*. Sourceforge. Consulté le 28 juin 2007, tiré de <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/>.
- Pennec, X. (1996). *L'incertitude dans les problèmes de reconnaissance et de recalage – applications en imagerie médicale et biologie moléculaire*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
- Pennec, X. (1998, January). *Registration of uncertain geometric features: Estimating the pose and its accuracy* (Rapport technique No. AIM-1623). MIT Artificial Intelligence Lab.

- Pessel, N. (2003). *Auto-calibrage d'une caméra en milieu sous-marin*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Rawlings, J. O., Pantula, S. G., & Dickey, D. A. (1998). *Applied regression analysis: a research tool*. New York: Springer-Verlag.
- Reid, I. (1996). Projective calibration of a laser-stripe range finder. *Image and Vision Computing*, 14(9), 659-66.
- Rousseeuw, P. J., & Leroy, A. M. (1987). *Robust regression and outlier detection*. New York: John Wiley & Sons.
- Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the icp algorithm. *Proceedings of the third international conference on 3-D digital imaging and modeling* (p. 145-52). Quebec City, Qc, Canada.
- Saez, J. M., Hogue, A., Escolano, F., & Jenkin, M. (2006). Underwater 3D SLAM through entropy minimization. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006*, 3562-7.
- Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D., & Forest, J. (2007). A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing*, 25(6), 578-96.
- Smith, R., & Cheeseman, P. (1986). On the representation and estimation of spatial uncertainty. *International Journal of Robotics Research*, 5(4), 56-68.
- Stevenson, I., Nicholson, P., & Heyns, T. (2006). High-resolution 3D geophysics in marine diamond mining. *Sea Technology*, 47(8), 10-5.
- Strobl, K., Sepp, W., Wahl, E., Bodenmuller, T., Suppa, M., Seara, J., et al. (2004). The DLR multisensory hand-guided device: the laser stripe profiler. *Proceedings of the 2004 IEEE international conference on robotics and automation* (Vol. 2, p. 1927-32). New Orleans, LA, United States.

- Tetlow, S., & Spours, J. (1999). Three-dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light. *Measurement Science and Technology*, 10(12), 1162-7.
- Tordoff, B., & Murray, D. (2005). Guided-MLESAC: Faster image transform estimation by using matching priors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10), 1523-35.
- Torr, P., & Zisserman, A. (2000). MLESAC: a new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1), 138-56.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(4), 323-44.
- Umeyama, S. (1991). Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(4), 376-80.
- Walker, M., Shao, L., & Volz, R. (1991). Estimating 3-D location parameters using dual number quaternions. *CVGIP: Image Understanding*, 54(3), 358-67.
- Watson, J. (2006). Underwater holography - past and future. *Proceedings of SPIE - the international society for optical engineering* (Vol. 6252, p. 62521). Varna, Bulgaria.
- Wei, Z., Zhang, G., & Xu, Y. (2003). Calibration approach for structured-light-stripe vision sensor based on the invariance of double cross-ratio. *Optical Engineering*, 42(10), 2956-66.
- Wilburn, B., Joshi, N., Vaish, V., Levoy, M., & Horowitz, M. (2004). High-speed videography using a dense camera array. *Proceedings of the 2004 IEEE computer*

society conference on computer vision and pattern recognition (Vol. 2, p. 294-301). Washington, DC, United States.

Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision* (Vol. 1, p. 666-73). Kerkyra, Greece.

Zhang, Z., & Faugeras, O. (1992). *3D dynamic scene analysis*. Springer-Verlag.

Zhou, F., & Zhang, G. (2005). Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations. *Image and Vision Computing*, 23(1), 59-67.

Zhou, F., Zhang, G., & Jiang, J. (2005). Constructing feature points for calibrating a structured light vision sensor by viewing a plane from unknown orientations. *Optics and Laser Engineering*, 43(10), 1056-70.

ANNEXE I

MÉTHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

La méthode du maximum de vraisemblance est une technique statistique d'estimation qui permet d'estimer un jeu de paramètres qui maximise la probabilité d'apparition d'un échantillon observé $\{m_1, \dots, m_n\}$ comme provenant d'un échantillon théorique dont la loi de probabilité est connue.

Le principe est celui de construire une fonction appelée fonction de vraisemblance et de la maximiser par rapport aux variables recherchées.

La fonction de vraisemblance est construite à partir de la loi de probabilité de l'échantillon observé. Dans notre cas il s'agit de la loi normale:

$$Pr(m) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right) \exp \left[\frac{-\text{dist}(m, \bar{m})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{I.1})$$

où m est un point mesuré et \bar{m} est le point réel.

La probabilité d'apparition a priori de l'échantillon $\{m_1, \dots, m_n\}$ peut être caractérisée par le produit des probabilités d'apparitions des réalisations m_i :

$$Pr(\{m_{ij}\} | (A, R_i, t_i, M_j)) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^M \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right) \exp \left[\frac{-\text{dist}(m_{ij}, \bar{m}_{ij})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (\text{I.2})$$

$Pr(\{m_{ij}\} | (\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j))$ est la probabilité d'obtenir le point mesuré m_{ij} sachant que le vrai ensemble de paramètres est $(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)$.

La fonction de vraisemblance s'écrit comme le logarithme de (I.2):

$$\log [Pr(\{m_{ij}\} | (\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j))] = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{dist}(m_{ij}, \bar{m}_{ij})^2 + \text{constante}$$

L'estimé des paramètres qui maximise la fonction de vraisemblance est celui qui minimise

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{dist}(m_{ij}, \bar{m}_{ij})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^m \|m_{ij} - \bar{m}(\mathbf{A}, k_1, k_2, p_1, p_2, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, M_j)\|^2$$

Ainsi l'estimateur à maximum de vraisemblance est celui qui minimise la distance géométrique entre les points mesurés et les points estimés par le modèle.

ANNEXE II

CALIBRAGE D'UN PLAN LASER PAR L'ÉCRITURE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE SURDÉTERMINÉ

Nous donnons dans ce qui suit une autre méthode pour calibrer un plan laser. Cette méthode est mathématiquement équivalente à celle qui est donnée dans le texte de la thèse et donne donc des paramètres identiques lorsqu'il n'y a pas de mesures aberrantes. Par contre, en présence de mesures aberrantes, le comportement des méthodes est difficile à prévoir mais dans ce cas les paramètres sont toujours faux.

Un point qui appartient au plan doit respecter la contrainte

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Ceci devrait être vrai pour chaque point du plan. Dans la pratique, on aura donc:

$$\sum_{i=1}^N \left(\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \right) \leq \epsilon \quad (\text{II.2})$$

où ϵ désigne le résidu de l'estimation.

En empilant les points 3D, on peut écrire la contrainte

$$\mathbf{AB} \leq \epsilon \quad (\text{II.3})$$

où

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Estimer les paramètres du plan revient donc à calculer l'espace nul de \mathbf{A} . Le système est ici surdéterminé et la solution minimise le critère $\|\mathbf{AB}\|_2$ qui est la somme des carrés des distances des points du nuage au plan.

Il y a plusieurs méthodes pour résoudre ce type de système. On peut par exemple écrire la décomposition en valeur singulière de \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (\text{II.5})$$

où \mathbf{U} et \mathbf{V} sont des matrices orthogonales et $\mathbf{\Sigma}$ est une matrice diagonale dont les éléments (supérieurs à zéro) sont généralement classés en ordre décroissant.

Les paramètres a, b, c, d du plan sont la dernière colonne de \mathbf{V} .

Par définition, les vecteurs singuliers droits \mathbf{u} et gauche \mathbf{v} et la valeur singulière correspondante σ d'une matrice \mathbf{A} sont tels que

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \sigma\mathbf{u}$$

Le vecteur singulier correspondant à la valeur singulière la plus petite sous-tend l'espace nul de \mathbf{A} .

ANNEXE III

ALGORITHME DE RANSAC

L'algorithme de RANSAC (Fischler & Bolles, 1981) est utilisé pour la détection de mesures aberrantes dans un ensemble de données S à partir duquel on veut estimer les paramètres d'un modèle.

Le principe est le suivant : on considère un échantillon minimal S_i , pris au hasard parmi l'ensemble des données S . Un échantillon est minimal quand il contient juste assez de données pour définir complètement le modèle. C'est par exemple deux points pour une droite, trois points pour un plan ou encore quatre points pour une homographie. On calcule ensuite le support qu'obtient cet ensemble. Le support correspond au nombre de données qui vérifient le modèle. Une donnée vérifie le modèle quand sa distance par rapport au modèle est en dessous d'un certain seuil t . Si le support atteint un certain niveau alors on estime le modèle en considérant tous les points valides et l'algorithme se termine. Sinon on tire de nouveau un ensemble minimal pris au hasard. L'opération est réitérée un certain nombre de fois. Si l'on atteint le nombre d'itérations maximal N , alors on estime le modèle à partir de l'ensemble qui a le plus grand support ou bien on termine l'algorithme par un échec.

Trois questions se posent :

Comment déterminer le seuil de distance par rapport au modèle ? Le seuil peut être déterminé à partir de l'écart type des données non contaminées et des intervalles de confiance.

Combien d'itérations sont nécessaires ? Idéalement on voudrait vérifier tous les échantillons possibles parmi la population. Mais cela n'est pas forcément réalisable

puisque'il y faudrait tester tous les échantillons de taille s parmi une population de taille m , c'est à dire C_m^s combinaisons possibles. Au lieu de cela, on choisit le nombre d'itérations N qui assure avec une probabilité p de tirer au moins un échantillon minimal sans mesures aberrantes. En général, on prend $p = 0.99$.

En prenant w la probabilité qu'une mesure sélectionnée soit valide, $\epsilon = 1 - w$ est la probabilité que cette mesure soit aberrante. Pour un échantillon de taille s , la probabilité que l'échantillon sélectionné contienne une mesure aberrante est donc $1 - w^s$. Donc pour N tirages, cette probabilité devient $(1 - w^s)^N$. Ce qui conduit à l'égalité $(1 - w^s)^N = 1 - p$ et donc le nombre de tirages est

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \epsilon)^s)} \quad (\text{III.1})$$

Cette procédure d'autant plus réalisable que le nombre de tirages est fonction de la proportion de mesures aberrantes et non du nombre de ces mesures.

Quelle doit être la taille de l'ensemble de points valides ? La taille de l'ensemble de données valides est fonction de la proportion de données aberrantes que l'on s'attend à trouver.

Les paramètres définis par l'utilisateur sont :

- t , le seuil de distance pour qu'une mesure vérifie le modèle,
- ϵ , la proportion à priori de mesures aberrantes,
- p , la probabilité de tirer un échantillon qui ne contient pas de mesures aberrantes.

Détermination de la proportion de mesures aberrantes de façon adaptative

On ne connaît pas toujours la proportion a priori de mesures aberrantes, ϵ . La stratégie consiste alors à commencer l'algorithme avec une valeur conservatrice de ϵ puis d'ajuster cette valeur au fur et à mesure que l'on trouve plus de données valides lors du calcul du support d'un échantillon :

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{nombre de points valides}}{\text{total de points}} \quad (\text{III.2})$$

Une fois que l'on a une nouvelle valeur de ϵ , on recalcule N , le nombre d'itérations maximales.

Lors de l'estimation du modèle à partir de l'ensemble de mesures valides déterminé par RANSAC, il se peut que des points jugés comme aberrants deviennent alors des mesures valides. Dans ce cas il faut ajouter ces nouvelles mesures valides et réestimer le modèle à partir du nouvel ensemble. On recommence cette étape jusqu'à ce que le nombre de mesures valides se stabilise. A cette étape on peut utiliser un algorithme de moindres carrés pondérés par la distance au modèle.