



HAL
open science

Imagerie 3D du "tube entier" des tunnels navigables

Emmanuel Moisan

► **To cite this version:**

Emmanuel Moisan. Imagerie 3D du "tube entier" des tunnels navigables. Ingénierie assistée par ordinateur. Université de Strasbourg, 2017. Français. NNT: 2017STRAD023 . tel-01710763

HAL Id: tel-01710763

<https://theses.hal.science/tel-01710763>

Submitted on 16 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE N° 269
MATHÉMATIQUES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'INGÉNIEUR (MSII)

Laboratoire ICube - UMR 7357, équipe TRIO

THÈSE

présentée par :

Emmanuel MOISAN

soutenue le : 19 Septembre 2017

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline : *Sciences de l'ingénieur*
Spécialité : *Topographie - Vision par ordinateur*

Imagerie 3D du « tube entier » des tunnels navigables

PRÉSIDENT DU JURY :

M. Christophe COLLET *Professeur des Universités, Telecom Physique Strasbourg*

RAPPORTEURS :

M. François GOULETTE *Professeur, Mines ParisTech*
M. Pierre DRAP *Chargé de recherche, LSIS-CNRS UMR 7296*

THÈSE CO-DIRIGÉE PAR :

M. Pierre GRUSSENMEYER *Professeur des Universités, INSA de Strasbourg*
M. Pierre CHARBONNIER *Directeur de recherche, Cerema Est*

*Entre dans la mer par les petits ruisseaux, non d'un trait ;
car c'est par le plus facile qu'il convient d'aller au plus difficile.
Tel est mon avis et ma recommandation.*

Premier des seize conseils de Saint Thomas d'Aquin
pour acquérir le trésor de la science

Remerciements

DEO GRATIAS !

L'aventure doctorale, bien que personnelle, est loin d'être solitaire. Aussi, il convient d'associer à ce travail un grand nombre de personnes, et les remerciements qui suivent ne sont qu'une faible expression de l'estime que j'ai pour elles.

Pour commencer, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers ceux qui ont accepté d'être membres de mon jury :

- à François Goulette et Pierre Drap, rapporteurs de la thèse. C'est pour moi un honneur que vous ayez consenti à ce rôle. Vous avez toute ma reconnaissance pour avoir pris le temps de la relecture et pour votre travail d'analyse. Vos conseils me sont très précieux.
- à Christophe Collet, président de ce jury. Je suis honoré de l'attention que vous portez à mon travail.

Outre cette tâche d'examen, vous avez su me communiquer lors de nos rencontres, que ce soit au cours du mi-thèse ou des conférences auxquelles nous nous retrouvions, vos regards experts sur mon travail. Ceux-ci ont été essentiels dans l'orientation de mes recherches. Pour cela, je vous suis de nouveau reconnaissant.

À ces premiers membres du jury s'ajoutent ceux qui, continuellement durant ces trois années, m'ont dirigé et soutenu dans mes démarches et auprès desquels j'ai tellement appris, que ce soit en termes de connaissances ou de méthodologie. Ainsi j'adresse mes profonds remerciements :

- à Pierre Grussenmeyer, directeur de thèse, sans qui je n'aurais jamais entrepris ce doctorat. En effet, j'espère que ce modeste travail est à la hauteur de la confiance que vous m'avez faite en me proposant ce sujet de thèse. Je tiens aussi à vous remercier pour m'avoir accompagné depuis mon arrivée à l'INSA en 2009. Il est certain que je vous dois beaucoup dans ce parcours qui m'a conduit jusqu'au doctorat.
- à Pierre Charbonnier, directeur de thèse. Mes remerciements ne suffiront pas à égaler ce que j'ai reçu de votre part, car vous êtes pour beaucoup dans la réussite de

cette thèse. Outre vos compétences scientifiques, desquelles j'ai pu profiter pour m'ouvrir à d'autres champs de recherche, je souhaite saluer votre rigueur qui m'a incité à me dépasser, votre patience qui a été remarquable, votre bienveillance face à mes faiblesses, votre investissement sans faille. Pour tout ce que vous m'avez apporté, merci!

- à Philippe Foucher, encadrant de la thèse et membre invité du jury. Je vous suis reconnaissant pour votre accompagnement quotidien durant la thèse. Vos conseils ont été d'une grande valeur et votre aide a souvent été salutaire.

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce au financement de celle-ci par le Cerema. Ainsi, je tiens à remercier la direction de cet institut pour la confiance qu'elle m'a faite en m'accordant ce projet. Je veux aussi remercier Georges Kuntz et Philippe Thirion, directeurs successifs du Laboratoire de Strasbourg du Cerema, pour leur accueil au sein de leur structure.

Je remercie vivement l'ensemble de mes collègues du laboratoire de Strasbourg du Cerema et plus particulièrement :

- Christophe Heinkelé qui a mis au point le processus de traitement sous Micmac. Un grand merci pour ces nombreux échanges que nous avons pu avoir.
- Thibaut Perrin pour m'avoir donné quelques connaissances dans le domaine de l'inspection des ouvrages d'art.
- les membres de l'équipe Méthodes Physiques : Alex, Aude, Clément, Guillaume, Patrick, Sébastien, Stéphane, Valérie. Je vous remercie d'avoir apporté votre contribution lors des expérimentations.

Ce fut pour moi une grande joie de vivre cette aventure à vos côtés. Je ne pouvais espérer meilleur cadre de travail pour mener à bien ce doctorat.

Au cours de cette thèse, plusieurs campagnes de mesure ont été menées sur le terrain. Celles-ci ont nécessité le concours de plusieurs intervenants. Tout d'abord VNF a permis l'accès aux sites d'expérimentations et l'emploi de leurs bateaux. À ce titre, je remercie Vincent Steimer, Bernard Singer, Pascal Froehlicher, Fabrice Nicomette et toute l'équipe de Niderviller, Jean-Luc Wendling, Vincent Duval, pour l'écluse n° 50, Francis Couvert et toute l'équipe de Revin. Ensuite, la société Sub-C-Marine est intervenue pour les acquisitions sonar. Pour cela, je remercie Olivier Samat et Christophe Pagès pour leur disponibilité et leur professionnalisme. Enfin, je remercie Claude Fontaine de la société Geotopo qui a participé à titre gracieux aux levés tachéométriques.

Cette thèse étant aussi sous l'égide de l'INSA de Strasbourg, je tiens à remercier l'équipe de recherche de cet institut :

- Samuel Guillemin et Matthieu Kœhl pour leur participation aux expérimentations et leur aide quotidienne.

- Elena, Élise, Hélène, Arnadi et Xiucheng, co-doctorants. Votre amitié m'est précieuse. À ceux qui sont en cours de thèse, j'adresse mes encouragements.
- l'ensemble du corps professoral de la spécialité topographie pour leur intérêt au projet et leurs conseils.
- Claire Cadieux et Simon Vauclare qui ont aussi participé à cette thèse par l'intermédiaire de projets d'étude.

Pour achever ce manuscrit, j'ai fait appel à un groupe commando composé de correcteurs d'élite. La mission fut rapide et précise. Pour ce franc succès, je remercie l'ensemble de cette équipe : Christine, Élise, Étienne, Hélène, Hélène et Marie-Thérèse.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont entouré durant ces trois années. Il m'est difficile de citer ici vous tous qui m'êtes proches, mais sachez que vous êtes importants à mes yeux et que sans vous je n'aurais pas tenu dans cette épreuve. J'aimerais remercier spécialement mes deux colocataires Louis et Antoine qui se sont succédé. Vous avez été d'un grand soutien malgré les désagréments qu'un colocataire thésard peut créer. J'aimerais aussi adresser toute ma gratitude à ma fratrie de cœur dont les moments de partage m'ont fortifié. Enfin, j'ai une pensée pour tous mes amis qui se sont engagés dans le mariage au cours de la thèse ainsi que tous les enfants qui sont nés durant cette même période.

Pour terminer, je souhaite dédier ce travail à ma très chère maman Jeanne-Marie, mon très cher papa Jacques et ma très chère sœur Myriam à laquelle j'associe maintenant Henry, pour l'amour qu'ils me donnent inconditionnellement depuis tant d'années. C'est aussi à toute ma famille que je souhaite rendre hommage, notamment à mes grands-parents maternels que je n'ai pas connu mais sans qui je ne serais pas là, à celle qui est ma grand-mère maternelle de cœur, à mes grands-parents paternels pour l'exemple qu'ils ont été pour moi, à ceux qui ont rejoint les cieux : Christiane, Jean-Paul et Roseline qui est chère à mon cœur et à qui nous avons dit au revoir il y a presque un an.

Cette thèse de doctorat a été financée par le Cerema sous la forme du contrat doctoral n° 2014/0002CD. Elle a été réalisée au sein du Laboratoire de Strasbourg du Cerema Est (Groupe Méthodes Physiques) et de l'équipe TRIO du laboratoire ICube à l'INSA de Strasbourg, sous la co-direction de Pierre Grussenmeyer et de Pierre Charbonnier, et l'encadrement de Philippe Foucher. Elle a bénéficié du soutien logistique de VNF.

Acronymes et appellations :

- Cerema** *Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*
- TRIO** *Téledétection, Radiométrie et Imagerie Optique*
- ICube** *Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie - UMR7357 sous l'égide du CNRS de l'Université de Strasbourg, de l'ENGEES et de l'INSA de Strasbourg)*
- INSA** *Institut National des Sciences Appliquées*
- VNF** *Voies Navigables de France*

Liste des acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales / pp. 118, 141, 142
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i> / pp. 25, 27, 57
CAO	Conception Assistée par Ordinateur / pp. 74, 75
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> / pp. 65, 82, 83
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement / pp. 1, 3, 15, 20, 64, 79, 88, 90, 108
CETMEF	Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales / p. 16
CETU	Centre d'Études des TUnnels / pp. 1, 15–18, 20, 108
CI	Centrale Inertielle / pp. 55, 56
CIPA	Comité International de Photogrammétrie Architecturale / p. 131
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> / p. 83
EKF-SLAM	<i>Extended Kalman Filter - SLAM</i> / p. 61
EMQ	Erreur Moyenne Quadratique / pp. 128, 129
GBF	Générateur de Basses Fréquences / p. 70
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> / pp. 55, 58, 78, 155
GPS	<i>Global Positioning System</i> / pp. 2, 18, 20, 53, 54, 56–58, 62, 71, 103, 155, 159
ICP	<i>Iterative Closest Point</i> / pp. 57, 58, 74–76, 103, 110, 120, 147
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière / p. 90
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> / p. 55
INSA	Institut National des Sciences Appliquées / pp. 1, 18, 79, 113, 123
IQOA	Image Qualité des Ouvrages d'Art / p. 16

ISPRS	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i> / p. 113
ITSEOA	Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art / p. 15
LBL	<i>Long BaseLine</i> / p. 57
MNT	Modèle Numérique de Terrain / p. 106
OVS	Odométrie Visuelle Simplifiée / pp. 19, 21, 82, 85, 88–90, 97, 156
RANSAC	<i>RANdom SAmple Consensus</i> / pp. 60, 87, 139
ROV	<i>Remotely Operated underwater Vehicle</i> / pp. 25, 27, 45, 57
SBL	<i>Short BaseLine</i> / p. 57
SBM	Sonar à Balayage Mécanique / pp. 105, 108–111, 113–117, 121–123, 125–127, 131–133, 135–138, 146, 148, 151, 153, 166, 167
SETRA	Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements / p. 16
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i> / pp. 59–61, 165
SLT	Scanner Laser Terrestre / pp. 73, 98, 110, 113–115, 120, 121, 123–126, 131–134, 136–138, 144, 146, 147, 151, 153, 155, 156, 166
SMF	Sondeur MultiFaisceaux / pp. 3, 4, 21, 44–49, 51, 52, 57, 67, 68, 71, 74, 93, 98, 100, 103, 105, 108, 110, 121, 125, 127, 132, 153, 158, 160, 165–167
TVG	<i>Time Varied Gain</i> / p. 46
USBL	<i>Ultra-Short BaseLine</i> / p. 57
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> / pp. 71, 103
VNF	Voies Navigables de France / pp. 1, 7, 9, 15, 18, 20, 79, 108, 113, 135

Table des matières

Liste des acronymes	xi
Introduction	1
Chap. 1 Contexte de la thèse	5
1.1 Les tunnels navigables	6
1.1.1 Des infrastructures du réseau fluvial	6
1.1.2 Typologie des tunnels navigables	9
1.1.3 Le tunnel test de Niderviller	12
1.2 Documentation et inspection des tunnels-canaux	14
1.2.1 La documentation des tunnels navigables	15
1.2.2 L'inspection des tunnels navigables	15
Dispositions légales pour l'inspection (15) • Typologie des désordres (16)	
1.2.3 Projet d'élaboration d'un système d'aide au diagnostic (2010-2015)	18
Réalizations du projet (19) • Positionnement de la thèse par rapport au projet (21)	
Conclusion du chapitre 1	21

Chap. 2 | État de l'art des méthodes de cartographie subaquatique 23

2.1	Acquisition de données comme support pour l'inspection subaquatique	24
2.1.1	Les capteurs employés pour l'inspection subaquatique	24
2.1.2	Moyens pour la mise en œuvre des capteurs	27
2.2	Acquisition sonar, principe et application	28
2.2.1	Généralités sur la mesure sonar	29
	Principe de la mesure sonar (29) • Mise en œuvre de la mesure sonar (31) • Propagation de l'onde acoustique (35) • Condition à la détection du signal sonar (37)	
2.2.2	Les technologies sonar	39
	Les appareils de types <i>imageur</i> (39) • Les appareils de type <i>sondeur</i> (43)	
2.2.3	Le sondeur multifaisceaux	44
	Principe de fonctionnement (45) • Détection de l'écho de la surface mesurée (47) • Les caractéristiques du sondeur multifaisceaux (48)	
2.3	Trajectographie	50
2.3.1	Méthodes traditionnelles en bathymétrie	50
2.3.2	Méthodes existantes en cartographie mobile	54
	Acquisition des données de navigation (54) • Calcul de la trajectoire (58)	
	Conclusion du chapitre 2	62

Chap. 3 | Méthode pour la modélisation 3D des tunnels navigables 63

3.1	Le système d'acquisition	64
3.1.1	Les capteurs embarqués	65
	Le système imageur (65) • Le sondeur multifaisceaux (67)	
3.1.2	Les configurations d'acquisition	68
3.1.3	La synchronisation	69
3.2	Le calibrage du système d'acquisition	71
3.2.1	Le calibrage des capteurs	71
3.2.2	Calibrage géométrique global du système	73

3.3	Mise en œuvre du système d'acquisition	77
3.3.1	Équipement du tunnel test	77
3.3.2	Expérimentation dans le tunnel-canal test	79
3.3.3	Pré-traitement des images	81
3.4	Construction du modèle 3D	83
3.4.1	Principes de la photogrammétrie	83
	Modèle de formation des images (83) • Ajustement de faisceau et reconstruction 3D (86)	
3.4.2	Mise en œuvre de la photogrammétrie	88
	L'Odométrie Visuelle Simplifiée (OVS) (88) • Reconstruction 3D par photogrammétrie avec l'outil Micmac (90) • Reconstruction 3D par photogrammétrie avec le logiciel Photoscan (92)	
3.4.3	Construction du modèle subaquatique	93
	Alignement spatial par la méthode de Procuste (95) • Interpolation temporelle de la trajectoire (96)	
3.5	Récapitulatif de l'approche	97
3.6	Résultats obtenus	98
	Conclusion du chapitre 3	103

Chap. 4 | Évaluation de la méthode développée **105**

4.1	Introduction à la procédure d'évaluation	106
4.1.1	Les méthodes de comparaison des modèles 3D	106
4.1.2	Le sondeur à balayage mécanique	108
	Description de l'appareil (108) • Mise en œuvre expérimentale (110)	
4.2	Évaluation des capacités du sonar	113
4.2.1	Approche employée pour l'évaluation des mesures sonar	113
	Expérimentation en écluse (113) • Construction du modèle subaquatique (116)	
4.2.2	Résultats de l'évaluation	121
	Bilan des artefacts observés (121) • Comparaison des modèles lasergrammétrique et bathymétrique (124) • Examen des détails observables (126)	
4.3	Évaluation du calcul de trajectoire	127
4.3.1	Analyse des distances inter caméra pour chaque acquisition	128
4.3.2	Comparaison des trajectoires	129
4.4	Évaluation de la reconstruction 3D	131

4.4.1	Acquisition des données pour la construction du modèle de références	131
	Mise en œuvre de l'expérimentation au tunnel-canal de Niderviller (131) • Premiers traitements appliqués aux numérisations (133)	
4.4.2	Géo-référencement des numérisations sonar	136
	Correction de l'orientation (137) • Correction de la translation verticale (137) • Correction de la translation horizontale (147) • Modèle de référence obtenu (148)	
4.4.3	Comparaison du modèle expérimental avec le modèle de référence	149
	Conclusion du chapitre 4	153

Conclusion générale et perspectives	155
-------------------------------------	------------

Publications de l'auteur	163
--------------------------	------------

Table de figures	165
------------------	------------

Liste des tableaux	167
--------------------	------------

Références bibliographiques	168
-----------------------------	------------

Annexes	181
---------	------------

A	Régression robuste de plans ou de lignes	181
B	Ajustement robuste simultané de lignes parallèles	182
C	Ajustement robuste simultané de lignes avec <i>a priori</i> de distance	183

Introduction

En France, 33 tunnels sont destinés à la navigation. Ces ouvrages singuliers sont des dispositifs essentiels du réseau fluvial français. Construits pour la plupart durant les XIXe et XXe siècles, ces tunnels sont encore aujourd'hui ouverts à la navigation commerciale et de plaisance. Par conséquent, ces infrastructures doivent être maintenues en bon état de service, à la fois pour garantir la sécurité des biens et des personnes qui les traversent et pour protéger ce patrimoine historique.

La programmation d'opérations de conservation résulte d'inspections périodiques. Les procédés appliqués traditionnellement pour examiner la structure des tunnels-canaux sont complexes à mettre en œuvre et nécessitent une intervention souvent longue. En effet, pour accéder à la voûte en vue de son étude, le moyen généralement employé est une barge sur laquelle est placé un échafaudage ou une nacelle (figure 1a). Pour les parties immergées, la tâche est encore plus ardue puisque : soit le tunnel est vidé (figure 1b), soit ce sont des plongeurs qui effectuent l'inspection (figure 1c). Dans le premier cas, l'ouvrage peut être fragilisé du fait de l'absence de la pression de l'eau qui agissait sur les murs. Dans le second cas, la forte turbidité de l'eau empêche une bonne visibilité des parois et les tunnels navigables sont des environnements à risque pour les plongeurs.

Afin de répondre aux besoins de rendement et de sécurité, le développement d'un outil d'inspection automatique s'avère nécessaire. C'est ainsi que Voies Navigables de France (VNF), le Centre d'Études des TUnnels (CETU) et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) (qui a financé la thèse) se sont associés pour mettre au point cette méthode. L'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg s'est joint au projet pour apporter son expertise dans la topographie et la reconstruction 3D.

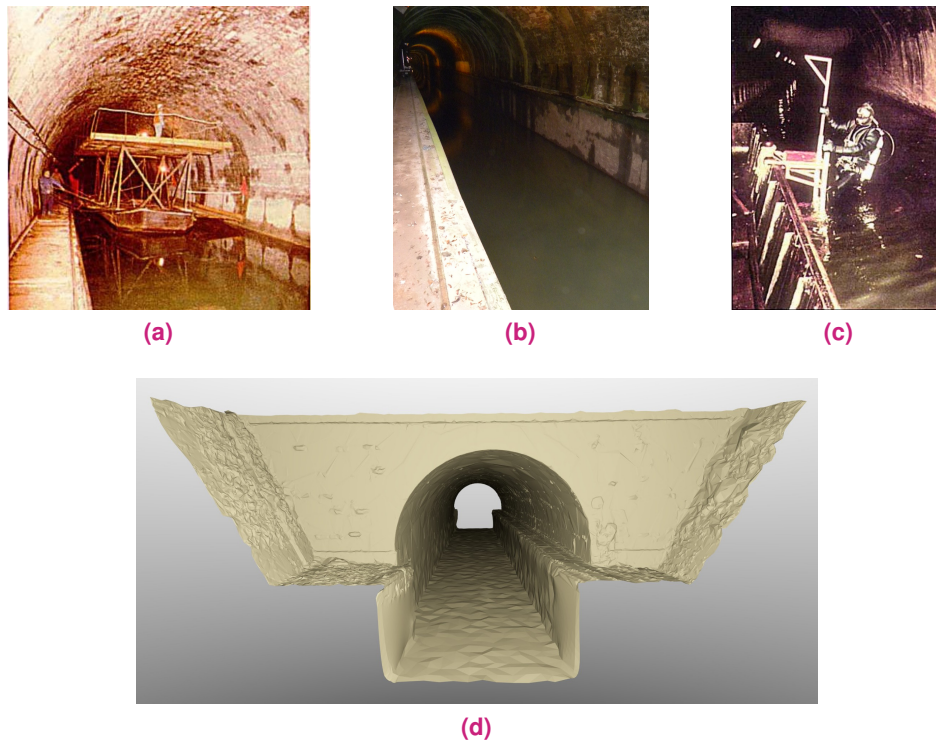


FIGURE 1 – Inspection des parties émergées d’un tunnel-canal depuis une barge (a) et des parties immergées en vidant le tunnel (b) ou par un plongeur (c). Exemple de modèle 3D « tube entier » reconstruit (d). Les photographies (a) (c) et sont issues de (FAGON et al., 2002a).

Dans ce contexte, l’objectif de la thèse est de développer une méthode pour la numérisation 3D des tunnels navigables dans leur entier (parties émergées et immergées, figure 1d). Les modèles tridimensionnels obtenus peuvent avoir deux utilités. La première est de fournir une documentation précise de ces tunnels afin de faciliter leur exploitation. La seconde est d’apporter un support pour les inspections périodiques de ces souterrains, le modèle 3D permettant de détecter, d’analyser et d’interpréter les désordres présents.

Pour atteindre cet objectif, nous devons répondre à plusieurs contraintes soulevées par l’environnement. Tout d’abord, la forte turbidité de l’eau limite la visibilité dans le canal et perturbe les mesures des capteurs optiques et lasers. Seules les acquisitions sonar sont exploitables dans ces circonstances. De cette manière, le levé simultané des parties situées hors de l’eau et sous l’eau requiert l’emploi de deux types de capteurs. Les données produites sont donc hétérogènes et acquises dans des référentiels différents, ce qui complexifie leur agrégation. Une autre contrainte consiste à réduire de manière significative le temps d’intervention et ne pas interrompre le trafic. Aussi, les mesures doivent être effectuées en dynamique depuis un bateau. La construction d’un modèle 3D à partir de cette méthode nécessite de connaître la trajectoire de l’embarcation. Toutefois le GPS (*Global Positioning System*), qui constitue la méthode de localisation privilégiée pour la cartographie mobile, n’est pas opérationnel dans les souterrains. C’est pourquoi des

méthodes alternatives doivent être mises au point pour positionner et orienter le système dans les tunnels-canaux qui, de plus, sont des environnements confinés et tubulaires, ce qui complique également le problème.

L'approche conçue dans la thèse pour répondre à ces problématiques combine la photogrammétrie et la bathymétrie. Des travaux préalables effectués au sein de l'équipe de recherche du Cerema ont démontré le potentiel de la photogrammétrie pour la modélisation des voûtes et piédroits. En plus de cette fonction de numérisation, nous utilisons le calcul photogrammétrique pour estimer la trajectoire du bateau dans le but de géoréférencer les données subaquatiques. Ainsi, la contribution de la thèse est de mettre en œuvre cette solution en développant les méthodes nécessaires afin d'obtenir un modèle 3D de l'ensemble de la structure d'un tunnel navigable. Dans ce mémoire de thèse, nous décrivons l'ensemble de la chaîne de traitement mise au point et les résultats obtenus à partir de données réelles acquises sur le terrain lors d'une campagne expérimentale. Afin d'évaluer les capacités de la méthode plusieurs études ont été menées. Celles-ci ont nécessité l'emploi d'une technologie récente pour laquelle nous avons élaboré deux procédés de mise en œuvre.

Le document est organisé comme suit.

Dans le premier chapitre, nous introduisons ces ouvrages indispensables à la navigation intérieure que sont les tunnels navigables. Leur typologie ainsi que les pathologies qui sont à l'origine de leur dégradation sont ensuite détaillées afin de mieux appréhender l'objet de la modélisation. Dans le but d'aider à l'inspection des tunnels, le Cerema met au point depuis 2009 un outil d'inspection automatique, dont nous rappelons les étapes du développement. Enfin, nous positionnons la thèse par rapport au cadre général de ce projet de développement.

Dans le second chapitre, nous présentons les différentes méthodes possibles pour la cartographie subaquatique. Étant donné que seules les mesures acoustiques sont disponibles, nous nous concentrons sur cette science en rappelant ses principes et en décrivant les appareils qui l'utilise. D'après cette étude, l'outil qui semble le plus adapté à nos besoins est le Sondeur MultiFaisceaux (SMF). C'est pourquoi nous présentons plus en détail ce dispositif. Nous décrivons ensuite le procédé spécifique à la bathymétrie pour géoréférencer ces données sonar acquises en dynamique et nous ouvrons sur les méthodes généralement employées en cartographie mobile.

Dans le troisième chapitre, nous introduisons l'approche que nous souhaitons tester pour la numérisation des tunnels navigables. Dans un premier temps, nous proposons un système composé de plusieurs capteurs qui a été mis en œuvre dans le tunnel test de Niderviller. Dans un second temps, nous développons le processus employé pour traiter l'ensemble des données produites pour la construction des modèles 3D des parties

émergées et immergées du tunnel. Enfin, les premiers résultats obtenus par cette méthode sont présentés et analysés visuellement.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons une analyse quantitative de l'approche. Pour cela, trois études sont effectuées : la première cherche à qualifier les mesures sonar, la seconde analyse la trajectoire obtenue par photogrammétrie et la troisième est une comparaison du modèle 3D produit avec un modèle de référence. Pour la première et la troisième étude, nous avons eu recours à un appareil récent qui emploie le même SMF que celui de notre système d'acquisition en dynamique, mais, cette fois-ci, placé sur dispositif mécanique de manière à effectuer une numérisation à 360° depuis une position fixe. Cet appareil a nécessité le développement de méthodes que nous décrivons, pour construire des modèles 3D à partir des numérisations qu'il produit.

Au terme de ces quatre chapitres, nous revenons sur les contributions qu'apporte cette thèse. Nous proposons des pistes d'amélioration à partir de l'analyse des premières expérimentations de la méthode. Enfin, nous terminons sur les perspectives ouvertes par ce travail.

1

Contexte de la thèse

Dans cette thèse nous cherchons à mettre au point un processus de numérisation 3D. Afin de mieux appréhender cet objectif, il convient de définir l'objet que l'on souhaite numériser et l'utilisation visée du modèle 3D généré.

Ainsi, dans un premier temps nous introduisons les tunnels navigables. Tout d'abord, nous apportons quelques informations concernant le réseau fluvial français auquel ces ouvrages appartiennent. Puis nous donnons une typologie des tunnels-canaux afin de comprendre cet environnement que nous souhaitons numériser, pour ensuite décrire le tunnel de Niderviller dans lequel s'est déroulé nos expérimentations.

Dans un second temps, nous abordons plus en détail les objectifs de documentation et d'aide à l'inspection auxquels la méthode de modélisation 3D élaborée au cours de cette thèse doit répondre. Enfin, nous rappelons le projet à la suite duquel la thèse s'inscrit et dont plusieurs développements ont été mis à profit.

1.1 Les tunnels navigables

1.1.1 Des infrastructures du réseau fluvial

Dès l'antiquité, la navigation intérieure est un moyen de communication majeur. À l'origine, les voies empruntées sont naturelles, mais très rapidement, elles ont été aménagées pour faciliter la navigation (MIQUEL, 1994). La conception, par l'homme, de tracés artificiels existe aussi depuis plusieurs millénaires, par exemple les Fosses Mariennes (VELLA et al., 1999). Mais la forme moderne des canaux, dont l'une des spécificités est de recourir à des écluses pour franchir les reliefs, est apparue en France au XVIIe siècle. De cette façon, une importante contrainte pour la création est surmontée, et de ce fait, les canaux construits, parcourent de plus grandes distances. Le premier exemple de canal de ce type est le canal de Briare (construit entre 1604 et 1642), mais l'ouvrage qui marquera son temps est le canal du midi (construit entre 1666 et 1681). Pierre-Paul Riquet, ingénieur sous le règne de Louis XIV, entreprend le projet ambitieux de relier deux mers : la mer Méditerranée et l'océan Atlantique. Cette épopée trouva son apogée dans la construction d'un ouvrage inédit : le tunnel-canal de Malpas, qui permet de franchir la colline d'Enserune. La nature très friable du sol manque de mettre fin au projet, mais l'obstination de son instigateur aura raison de ses nombreux détracteurs et le tunnel sera finalement achevé en 1680, peu avant la mort de Riquet.

À la suite de ces premiers succès, de nombreux projets voient le jour au XVIIIe siècle pour joindre, notamment, l'axe Rhône-Saône et le bassin de la Seine, et établir des liaisons entre Paris et les régions riches de Flandre et de Picardie (MIQUEL, 1994). Beaucoup de ces projets n'aboutiront cependant qu'au siècle suivant, en raison notamment de la Révolution. C'est au XIXe siècle qu'est réalisée la construction d'un grand nombre de canaux (voir figure 1.1). En effet, à cette époque, le bateau est l'un des principaux moyens de transport. Outre les aspects purement commerciaux et les questions de développement du territoire, certains projets avaient une motivation stratégique, comme le canal de Nantes à Brest qui permettait d'approvisionner les arsenaux malgré le blocus maritime anglais. Avec le début de la révolution industrielle, les besoins se faisant plus importants, plusieurs directives gouvernementales sont édictées afin de moderniser et développer le réseau fluvial. En 1879 est établi le gabarit Freycinet (du nom de son ordonnateur : Charles de Freycinet). Cette norme (DUVERGIER, 1879) définit les dimensions des canaux pour le passage d'embarcations standardisées (écluses de 38,5 m de long et 5,20 m de large). Cette législation prévoit aussi une hauteur libre de 3,70 m. Beaucoup de canaux

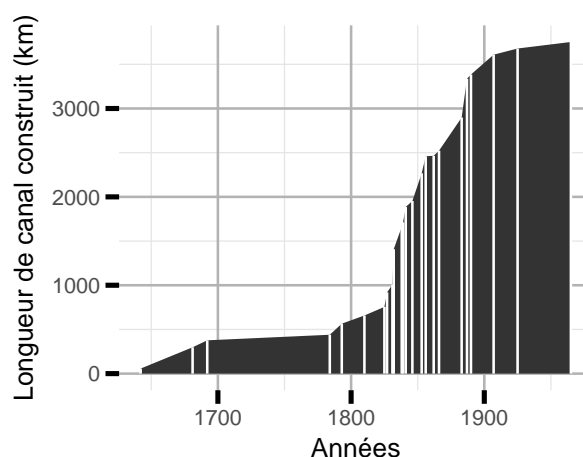


FIGURE 1.1 – Graphique de l'extension des voies de navigation artificielles au cours des années.

sont encore à ces dimensions en France (voies en bleu sur la carte de la figure 1.2). C'est donc, naturellement, à cette époque qu'a été construite la plus grande partie des tunnels navigables (29 des 36 creusés au total), voir figure 1.3.

À partir du XXe siècle, la construction des canaux diminue grandement. Les deux guerres mondiales et le développement des réseaux ferroviaire et surtout routier ont raison de l'antique moyen de transport. Les constructions de canaux sont abandonnées, à l'exemple du canal de la Haute-Saône sur lequel avait été creusé un tunnel (tunnel-canal de Chérimont, 1884-1897) qui ne sera jamais utilisé, le canal ayant perdu son utilité suite au traité de Versailles. La plupart des travaux entrepris sont souvent l'agrandissement des canaux existants. Toutefois, c'est aussi durant ce siècle qu'est creusé près de Marseille le tunnel-canal du Rove. Ses dimensions exceptionnelles (7120 m de long, 22 m de large et 15 m de haut) en font le plus grand jamais construit au monde. Le 16 juin 1963, soit seulement 36 années après sa mise en service, une partie de la voûte s'effondre, condamnant ainsi le souterrain. Depuis, la réouverture du tunnel n'a jamais été entreprise. Seul le projet d'un passage d'eau est prévu pour préserver l'étang de Berre que le tunnel alimentait en eau salée.

À ce jour, le réseau fluvial français est long de 8500 km¹, ce qui en fait le plus grand d'Europe. Paradoxalement, seulement 4 % du transport à l'intérieur du territoire empruntent ses voies, ce qui est bien inférieur à l'Allemagne (11,4 %) ou les Pays-Bas (39,1 %) (données Eurostat 2015). L'une des principales raisons à cette incohérence est le sous-dimensionnement du réseau. En effet, seulement 1868 km du réseau permettent la navigation des bateaux de grand gabarit qui sont les plus rentables pour ce moyen de transport. De plus, un autre désavantage est le temps d'acheminement beaucoup plus long. Pour des entreprises fonctionnant à flux tendu, ce type d'acheminement est complexe

1. Dont 5928 km pour le petit gabarit (bateaux de moins de 38,5 m). Au total, 6700 km, soit 79 % du réseau, sont confiés à VNF. Les chiffres cités dans la suite de cette section sont issus des brochures d'information de VNF, disponibles sur le site <http://vnf.fr>

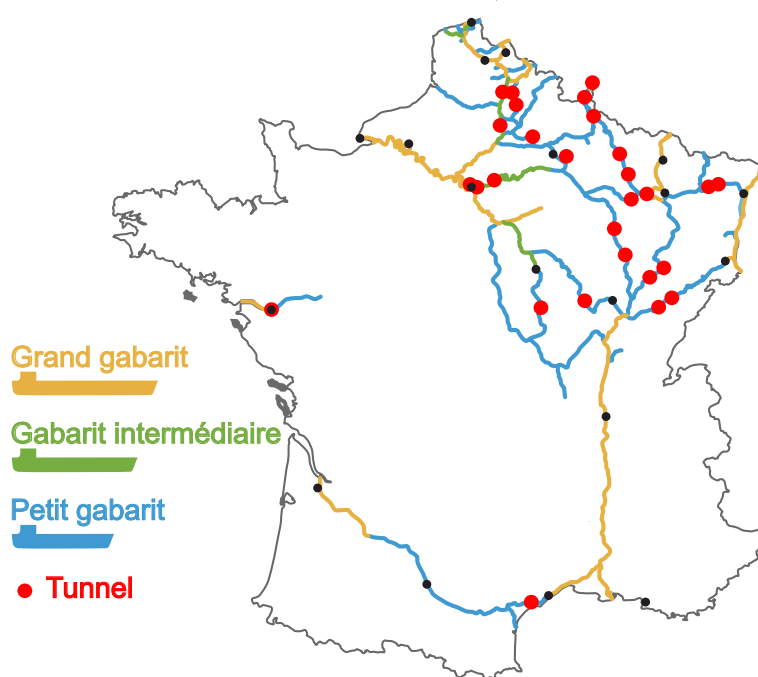


FIGURE 1.2 – Carte de la navigation fluviale (grand gabarit : bateaux de 90 m et plus, gabarit intermédiaire : bateaux de plus de 38,5 m et moins de 90 m, petit gabarit : bateaux de 38,5 m et moins).

à gérer. Toutefois, depuis ces dernières années, il y a un nouvel attrait pour le transport fluvial, dont la flotte française compte tout de même 1089 bateaux, puisque économiquement il reste plus avantageux. De plus, en ces temps où les aspirations écologiques se font de plus en plus grandes, l'argument écologique, qu'avance la navigation fluviale, est non négligeable. Ainsi, on estime qu'une péniche au gabarit Freycinet équivaut à 14 camions en termes de capacité d'emport et certains convois poussés, à 440 camions. Enfin, il existe d'autres avantages à ce type de transport, comme la régularité ou encore la sûreté, notamment pour les matières dangereuses. Ainsi, l'état français prévoit la construction prochaine d'un nouveau canal de grand gabarit reliant l'Oise à l'Escaut². Selon les chiffres de 2016, 53 millions de tonnes de marchandises ont transité par le réseau fluvial cette année là. Ce sont principalement des matériaux de construction (42 %) et des produits agro-alimentaires (24 %).

À ce jour, les voies de navigation intérieure sont surtout utilisées pour le tourisme fluvial, que ce soit sous forme de croisières fluviales, bateaux promenade, location de bateaux ou plaisance privée. Cette activité concerne annuellement un total de 9,9 millions de passagers toutes filières confondues, dont 13500 plaisanciers privés, ainsi que 24000 contrats de location. On considère que les retombées économiques du tourisme fluvial correspondent à 500 M€ par an. Certains sites, comme le plan incliné d'Arzwiller, situés à proximité des tunnels étudiés, concentrent plus de 5000 passages de bateaux par an.

2. <https://www.canal-seine-nord-europe.fr/>

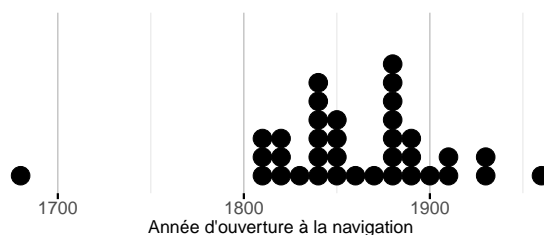


FIGURE 1.3 – *Années de mise en service des tunnels navigables.*

Cette activité permet en grande partie l’entretien de ce réseau qui a aussi une portée historique. Partant du constat que 87 % du réseau VNF se situent à moins de 5 km d’un itinéraire inscrit au Schéma national des véloroutes, le tourisme « fluvestre », qui conjugue tourisme fluvial et tourisme terrestre, cherche actuellement à se structurer, sous l’égide de VNF et de l’association des Départements et Régions cyclables. Enfin, les voies navigables ont d’autres fonctions, telles que l’approvisionnement en eau, l’alimentation de centrales électriques ou encore la protection contre les crues.

Ainsi, les tunnels-canaux représentent un patrimoine historique, touristique et économique important. Les maintenir en bon état est un enjeu fort, tant pour la sécurité des biens et des personnes qui les empruntent, que pour le développement durable des territoires.

1.1.2 Typologie des tunnels navigables

En France 36 tunnels-canaux ont été construits. Comme déjà mentionné, le plus ancien de ces tunnels est celui de Malpas. La grande majorité des tunnels navigables ont été excavés aux XIXe et XXe siècles, au moment du grand développement du réseau fluvial (voir figure 1.3). À ce jour, 3 d’entre eux ne sont plus en service (les tunnels du Rove, de Chérimont et de Liverdun). Les 33 autres tunnels sont toujours exploités pour la plupart par VNF (25 tunnels), mais aussi par la ville de Paris (4) ou par les Conseils Départementaux de la Nièvre (3) et de Loire Atlantique (1). Leur fréquentation est variable, mais en règle générale, plusieurs milliers de bateaux empruntent ces tunnels chaque année.

L’utilité de ces tunnels est généralement d’éviter la succession d’écluses rapprochées pour franchir une dénivelée importante. Dans certains cas, il s’agit aussi de couper des boucles que les cours d’eau canalisés forment (tunnels-canaux de Saint-Maur, de Revin, etc.). Au total, il y a en France 41,9 km de voies navigables souterraines cumulées, dont 30 km

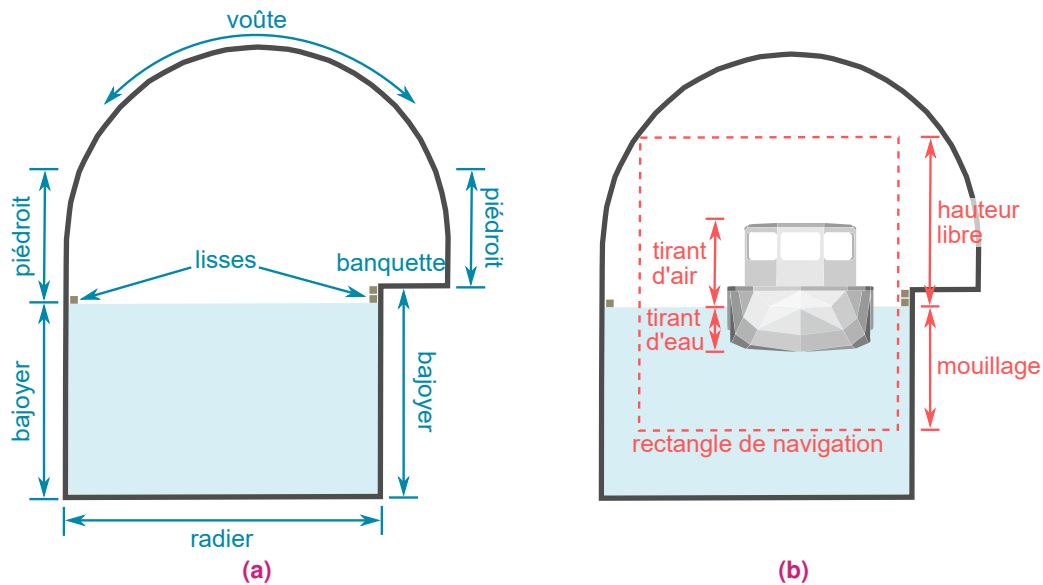


FIGURE 1.4 – Éléments de vocabulaire du génie civil (a) et de la batellerie (b) relatifs aux tunnels-canaux, d'après (FAGON et al., 2002a; VNF, 2014).

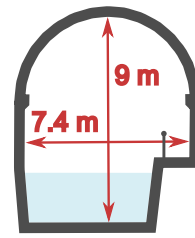
sont constitués des 8 plus longs tunnels (voir figure 1.6a). Le plus long d'entre eux est le tunnel de Riqueval (5681 m), (voir figure 1.5b) et le plus court se trouve à Verdun (47 m); 11 tunnels ont une longueur supérieure à 1 km et 15 sont inférieurs à 500 m. Sur le plan géométrique, le tracé des tunnels est généralement linéaire ou quasi linéaire. Seuls trois tunnels-canaux présentent des courbures.

D'un point de vue architectural, la forme des tunnels varie, voir figure 1.5. Une première différence peut être faite concernant la forme des voûtes. Bien que la majorité de celles-ci soient de plein cintre, quelques unes d'entre elles sont elliptiques (par exemple : voûte Richard-Lenoir, figure 1.5c) ou en anse de panier (par exemple : les tunnels-canaux situés sur le canal du Nivernais). Ensuite les dimensions d'une section de tunnel diffèrent. Dans certains tunnels, il est possible de passer à plusieurs bateaux (par exemple : le tunnel de Condes), Pour d'autres, le tirant d'eau étant trop faible, il était nécessaire de placer le bateau dans un bac afin de l'abaisser (le tunnel de Pouilly-en-Auxois), système aujourd'hui abandonné. En outre, le nombre de voies de service varie (voir figure 1.6c) : parfois les deux parois en possèdent, mais plus généralement seul un des piédroits en est équipé, et parfois il n'y en a aucune. Ces voies de service peuvent être des banquettes, ou des consoles reposant sur des piliers, ou encore des corniches.

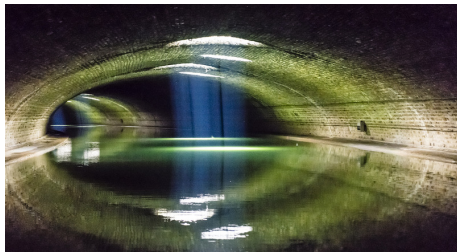
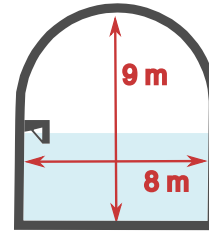
Les tunnels se distinguent aussi par la nature des matériaux employés pour les conceptions (figure 1.6b). Pour certains souterrains, la roche est à nu (par exemple, le tunnel-canal de Revin), mais les tunnels sont le plus souvent constitués de parements de pierres ou de briques. Le béton a aussi été employé pour la construction de tunnels navigables, ou encore lors de leur restauration.



(a) Tunnel-canal de Malpas (photographie issue du site du canal du midi)



(b) Tunnel-canal de Riqueval (photographie issue du site du conseil départemental de l'Aisne)



(c) Voûte Richard-Lenoir (Paris) (photographie issue du site de la ville de Paris)

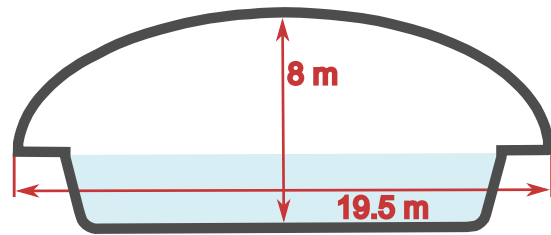


FIGURE 1.5 – Photographies et coupes de trois tunnels-canaux : Malpas (a), Riqueval (b) et Richard-Lenoir (c). Les coupes ont été dessinées à partir de celles de (BENAÏSSA et al., 1999).

Enfin, les tunnels navigables possèdent plusieurs équipements, que ce soit pour la signalisation, l'éclairage ou encore la ventilation. Cette dernière peut être naturelle grâce à des cheminées, mais plusieurs tunnels ont aussi été équipés de ventilateurs. Certains tunnels présentent aussi les vestiges d'un système de touage. Le principe de celui-ci était de tracter les bateaux voulant traverser le tunnel à l'aide d'un bateau toueur qui avance en tirant sur une chaîne située au fond de l'eau. Le seul tunnel-canal au monde qui emploie toujours ce système est celui de Riqueval. En effet, la grande longueur du tunnel et l'absence de ventilation rendent dangereux l'utilisation des moteurs.

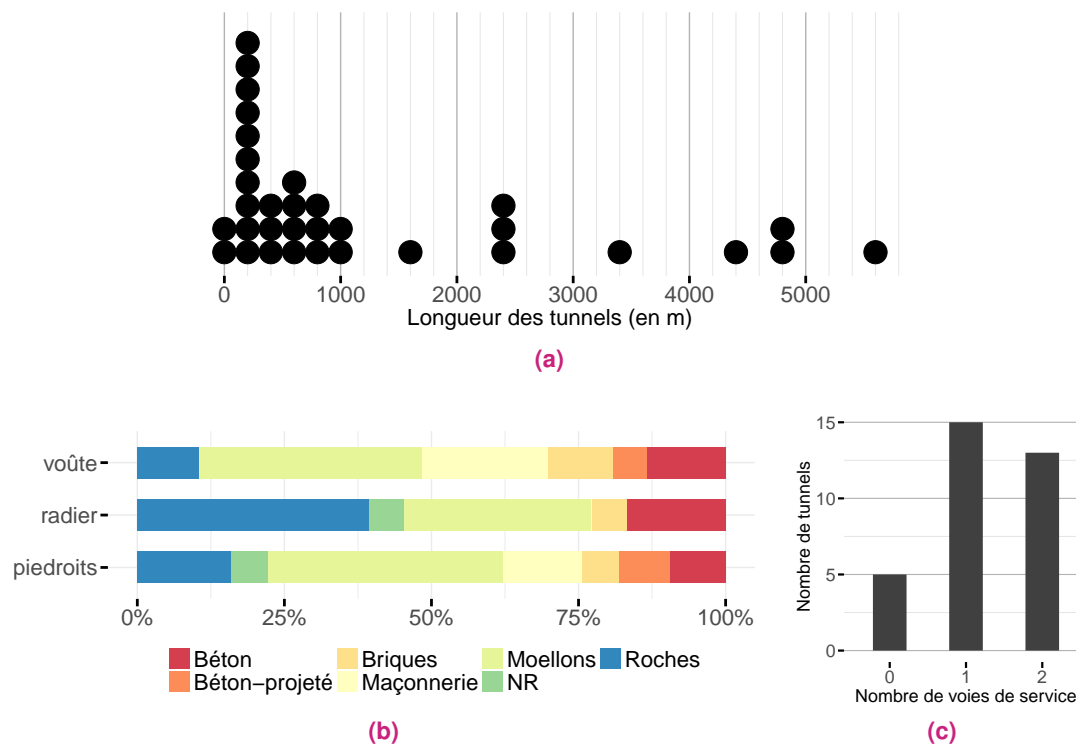


FIGURE 1.6 – Trois graphiques permettant de classer les tunnels navigables. Le premier apporte la répartition des tunnels suivant leur longueur (a). Le second indique les proportions des matériaux employés pour leur construction suivant les 3 parties composant le tube entier (b). Enfin, le troisième graphique donne le nombre de tunnels ayant deux, ou une, ou encore aucune voie(s) de service (c).

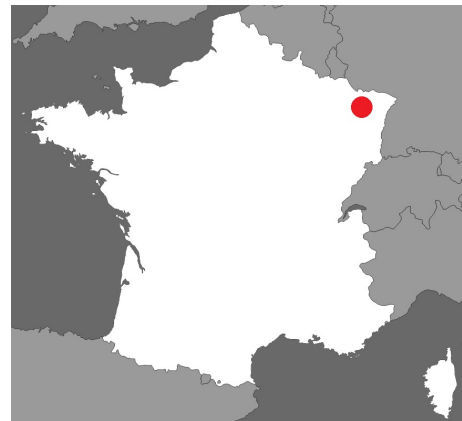
1.1.3 Le tunnel test de Niderviller

Le tunnel-canal dans lequel s'est déroulée l'expérimentation de notre système d'acquisition est le tunnel-canal de Niderviller qui est situé à 48 km à l'ouest de Strasbourg, voir figure 1.7).

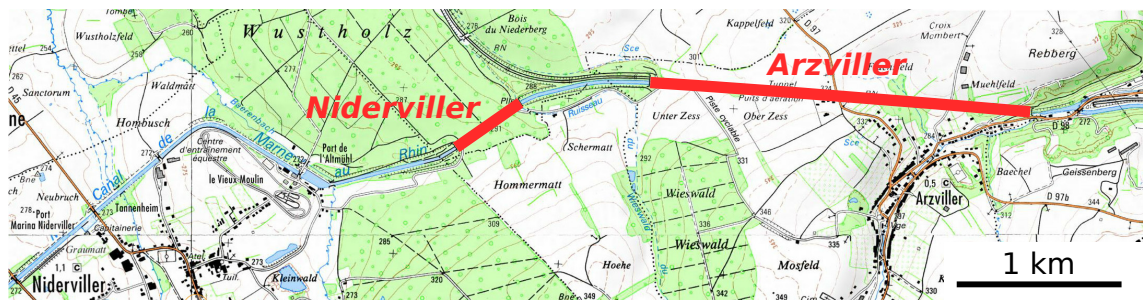
Ce souterrain est situé sur le canal de la Marne au Rhin. Cette voie fluviale longue de 314 km relie la Marne, depuis Vitry-le-François, au Rhin, au niveau de Strasbourg. Ce canal est stratégique puisqu'il permet de traverser la moitié Est du pays et de rejoindre l'Allemagne depuis le bassin de la Seine. Dès 1580, l'idée de construire un tel ouvrage a été émise par le Comte Georg von Veldenz-Lutzenstein, appelé l'ingénieur (KITTEL, 2002), mais elle sera jugée impossible à réaliser par la société de l'époque. Au XVIIIe siècle, le projet de construction de cette voie est à nouveau considéré. Une étude est réalisée par les officiers supérieurs du génie militaire, Arson et Lafitte de Clavé, à la demande du roi Louis XVI. Elle démontre la faisabilité du projet. Il faudra toutefois attendre les travaux de l'ingénieur des ponts et chaussées Barnabé Brisson en 1826 pour que la construction



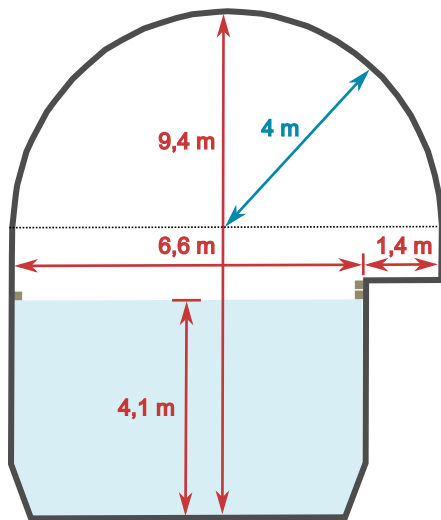
(a)



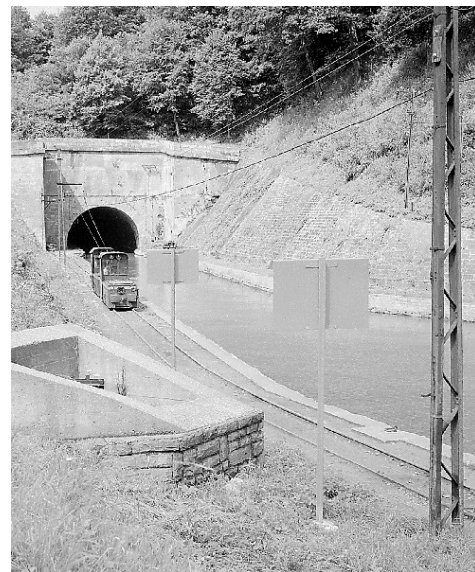
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURE 1.7 – Présentation du tunnel-canal de Niderviller : photographie de l'entrée (a), localisation à l'échelle du pays (b) et à l'échelle locale (c), coupe du tunnel de Niderviller (d) issue de (BENAISSA et al., 1999) et photographie (source : <http://www.cfchanteraines.fr>) de la locomotive de halage à l'entrée du tunnel d'Arzviller (e).

du canal débute en 1853 sous la direction de Charles-Étienne Collignon. La mise à l'eau du canal débuta en 1849 et la mise en service du tracé complet eut lieu en 1853. Il compte actuellement 154 écluses (178 à l'origine), 12 pont-canaux (un 13e a été désaffecté), 4 tunnels navigables (un 5e a été fermé) et un plan incliné qui a été mis en service en janvier 1969 afin d'éviter 17 écluses. Cet ouvrage, ainsi que les tunnels-canaux d'Arzviller et Niderviller permettent aux bateaux de franchir le massif des Vosges non loin du col de Saverne. Le plan incliné est situé à 6,5 km à l'Est du tunnel-canal de Niderviller et le tunnel-canal d'Arzviller (2306 m de long), à moins de 800 m également à l'Est, voir figure 1.7c.

Le tunnel-canal de Niderviller a été construit comme son homologue d'Arzviller entre 1839 et 1849. Il est long de 475,45 m et son tracé est rectiligne. L'ensemble de la structure est maçonnée. Il possède un chemin de halage sur un des côtés afin de permettre le remorquage des bateaux. Historiquement, cette tâche fut d'abord assurée par traction animale ou humaine puis grâce à des tracteurs électriques placés sur des rails, toujours en place aujourd'hui. Depuis, ce système a été abandonné et les bateaux traversent avec leur propre moteur le souterrain. Toutefois, la vitesse y est limitée (entre 3 et 6 km/h environ). De plus, deux bateaux ne peuvent pas se croiser dans le tunnel, donc la circulation y est alternée. Quelque 7000 bateaux empruntent cette voie souterraine chaque année, selon une statistique de 2012. Le trafic dans le tunnel est très majoritairement lié à la plaisance.

1.2 Documentation et inspection des tunnels-canaux

La construction de modèles 3D des tunnels navigables présente deux principaux intérêts : connaître ces ouvrages en les documentant et obtenir le diagnostic de leur état par leur inspection.

1.2.1 La documentation des tunnels navigables

La documentation concernant les tunnels navigables est, au niveau national, relativement faible. Seul un document édité en 1999 (BENAISSA et al., 1999) catalogue les ouvrages. Pour chaque souterrain est reporté : une présentation générale, la forme géométrique de l'ouvrage, les matériaux employés, une coupe de la structure et les différents équipements présents (ventilation, éclairage, signalisation, etc.). En 2010, ces informations ont été complétées à l'occasion du projet VNF-Cerema-CETU, décrit en section 1.2.3. Le tableau résultant de cette étude n'a pas été publié.

Dans le but de recenser tous les ouvrages ponctuels ou linéaires qui composent son réseau, VNF met actuellement en œuvre une Base de Données d'Ouvrages. Ce travail concerne quelque 3760 km de digues, 1500 écluses, 365 barrages, 675 ouvrages de franchissement, 316 systèmes d'alimentation, 117 ponts-canaux et 25 tunnels-canaux. Pour compléter cet outil, les renseignements indiqués sont principalement le fruit de visites sur site, effectuées suivant une procédure fixée par des guides.

On comprend aisément que le recensement des tunnels ne représente pas, actuellement, un enjeu très prioritaire au regard des autres ouvrages, beaucoup plus nombreux et souvent plus sensibles. Néanmoins, leur documentation 3D est de toute façon souhaitable, car ses applications potentielles sont nombreuses. Par exemple, VNF a récemment lancé une consultation pour la remise aux normes (éclairage, sécurité) des tunnels d'Arzviller et Niderviller. Le Cerema a été interrogé dans ce cadre sur la possibilité de fournir un modèle 3D de la partie hors d'eau des tunnels. L'objectif était de faciliter la visualisation des équipements existants et de permettre la prise de mesures sans nécessité d'intervenir sur site, ce qui est toujours plus contraignant.

1.2.2 L'inspection des tunnels navigables

1.2.2.a Dispositions légales pour l'inspection

L'inspection des ouvrages d'art est une obligation comprise dans la loi. Afin de donner les éléments techniques définissant l'inspection et sa mise en œuvre, un ensemble de documents a été produit en 1979. Cette Instruction Technique pour la Surveillance et

L'Entretien des Ouvrages d'Art (ITSEOA) a été constituée suite à l'effondrement du pont Wilson à Tours (9 et 10 avril 1978). En 2010, elle a été complètement révisée. Outre les documents généraux, s'appliquant à l'ensemble des ouvrages d'art, un certain nombre de fascicules ont été produits afin d'apporter des spécifications à l'inspection suivant le type de structure, mais aucun ne concerne les tunnels navigables. Les deux fascicules les plus proches sont : le fascicule 40, élaboré par le CETU, relatif aux tunnels (CETU, 2012) et le fascicule 10, rédigé par le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) devenu la Direction Technique Infrastructures Transport Mobilité du **Cerema**, qui est destiné aux structures fondées en site aquatique (SETRA, 2013). En plus, de ces documents, il existe des guides qui ont été édités par les services techniques administratifs en charge des différents types d'ouvrages. Ainsi, le CETU a produit en janvier 2015 celui concernant l'inspection des tunnels routiers (CETU, 2015a,b). De plus, en l'absence de réglementation, le Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), actuellement **Cerema** Direction technique Eau, Mer et Fleuves) a publié un guide pour l'exploitation des tunnels navigables en 2002 (FAGON et al., 2002a,b).

Ce cadre législatif indique des actions ponctuelles et périodiques pour la surveillance des ouvrages d'art. Les instructions différencient aussi deux principaux degrés de contrôles : le contrôle annuel, qui consiste à rendre compte des événements liés à l'ouvrage qui ont eu lieu pendant l'année et à effectuer une visite de celui-ci, et l'inspection détaillée, pour laquelle les opérations à mener sont beaucoup plus contraignantes. Les inspections détaillées sont effectuées ponctuellement et périodiquement. La fréquence dépend des ouvrages, mais elle est communément de 6 ans (3 pour les ouvrages les plus robustes et 9 pour les plus sensibles). À l'issue de cette opération, l'ouvrage est classé suivant la cotation Image Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA).

Pour les tunnels navigables, en l'absence de cadre réglementaire, la périodicité des inspections détaillées proposées des parties émergées varie de 6 à 9 ans suivant les risques liés à l'ouvrage. Elle est de 12 ans pour les parties immergées.

1.2.2.b Typologie des désordres

La nomenclature appliquée pour l'inspection différencie un défaut (ou malfaçon) et un désordre. Le premier correspond à une imperfection dans la conception ou à des spécifications non appliquées (par exemple, un défaut d'alignement dans le parement). Les défauts, sont visibles ou invisibles, ponctuels ou systématiques. Ils sont le plus souvent sans danger pour l'ouvrage. Toutefois, ils peuvent être à l'origine de désordres ou du moins les aggraver. Quant au désordre, il est un symptôme qui affecte un élément ou une partie de l'ouvrage (par exemple une fissure). Il se manifeste de manière évolutive ou

soudaine. Lors de l'inspection d'un tunnel, ce sont les désordres qui sont recherchés, car les problèmes qu'ils traduisent peuvent mettre à mal le bon fonctionnement d'un tunnel, voire le détruire.

Les désordres que l'on retrouve dans les tunnels navigables sont sensiblement les mêmes que dans tous les autres types de tunnels. Toutefois, la présence de l'eau est un facteur aggravant de détérioration des structures et particulièrement celles immergées. Dans le guide d'inspection établi par le CETU (CETU, 2015b), 47 principaux désordres sont recensés. Ceux-ci sont classés selon plusieurs familles que nous résumons de la sorte :

- les désordres liés à l'eau (venues d'eau, concrétions, etc.);
- les désordres de la zone d'influence (présence de karsts et cavités, désordres aux entrées, etc.);
- les désordres des tronçons non revêtus (détachements de blocs);
- les altérations des matériaux qui constituent les revêtements et plus particulièrement ceux, spécifiques aux moellons et briques, qui sont très présents dans les tunnels-canaux (alvéolisation, desquamation, exfoliation, écaillage mécanique, déjoints), voir figure 1.8;
- les désordres des dispositifs d'étanchéité;
- les désordres affectant la structure et la géométrie de l'ouvrage que sont les fissures, les déformations ou les malfaçons;
- les désordres liés aux événements (accidents, incendies, défauts d'entretien, etc.).

Sous l'eau, en plus des désordres déjà cités, l'action de l'eau entraîne aussi l'érosion des parois, l'envasement du radier. De plus, les contraintes physiques imposées aux parois peuvent engendrer le soulèvement du radier.

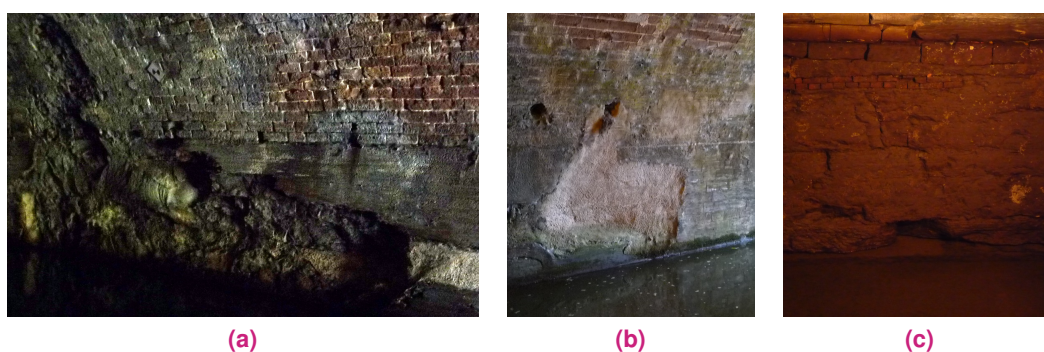


FIGURE 1.8 – Illustration de désordres observés dans le tunnel-canal de Niderviller : le détachement de blocs de la paroi (a), l'exfoliation des moellons (b), l'absence d'un moellon et le phénomène de déjoints (c).

Les facteurs des désordres sont variés. En premier lieu, les conditions géologiques, géotechniques et hydrologiques du massif dans lequel a été creusé le tunnel sont à l'origine d'importantes contraintes que les structures subissent. En second lieu, les défauts de conception, mais aussi les modifications apportées, ou encore la nature des matériaux employés sont la cause d'un grand nombre de désordres dans les tunnels. Enfin, l'ouvrage est soumis aux effets du temps et de son exploitation.

1.2.3 Projet d'élaboration d'un système d'aide au diagnostic (2010-2015)

C'est en 2009 que VNF fait appel au **Cerema** afin de mettre au point un outil pour l'inspection des tunnels navigables. Le CETU rejoindra ensuite le projet puisqu'il s'agit de l'organisme de référence pour ce qui est des tunnels. En conséquence, le projet ciblera aussi les tunnels routiers. La convention associant ces trois services est signée fin 2010. L'INSA de Strasbourg prend part au projet dès le début de l'année suivant la signature, apportant ainsi son expertise en termes de topographie, de cartographie et de numérisation 3D laser et par photogrammétrie.

La mise en œuvre d'une inspection détaillée est contraignante, car elle nécessite d'observer l'ensemble de l'ouvrage à une distance proche de celui-ci. Dans ce contexte, l'objectif initial du projet est la conception d'un outil de reconnaissance à grand rendement des parois des tunnels routiers et navigables. Par conséquent, deux axes sont à développer. Le premier concerne l'acquisition des données. Le but de celle-ci est de produire le support à la cartographie des désordres. Il s'agit d'abord d'avoir un outil adapté à la mesure dans les tunnels. Ensuite, la donnée produite doit être suffisamment précise pour permettre l'évaluation de l'état des structures. Enfin, le temps d'acquisition doit être réduit. Une problématique rapidement identifiée a été la localisation dans le tunnel en l'absence de signaux GPS. Le second axe de recherche s'intéresse à automatiser la détection des désordres. Pour cela, l'outil doit pouvoir traiter différents types de pathologies, mais il doit aussi s'adapter aux différents types de tunnels.

1.2.3.a Réalisations du projet

Depuis 2009, le projet a connu plusieurs phases. Dans ces parties, nous traiterons de manière plus spécifique de l'application dans les tunnels navigables. Les principaux résultats du projet sont décrits dans (CHARBONNIER et al., 2014; FOUCHER et al., 2016b).

En premier lieu, des essais préalables ont été menés dans les tunnels-canaux de Niderviller et Arzviller dans le but d'évaluer les possibilités de développement d'un système dédié à l'inspection de ces structures. Le premier dispositif utilisait une draine pour déplacer le système d'acquisition sur la banquette des tunnels. Deux caméras étaient disposées en stéréo et fixées à un mât horizontal de manière à ce que les prises de vues soient faites depuis l'axe du tunnel. Quoique limité, le système permit de valider l'utilisation de l'image comme donnée support au diagnostic.

À partir de 2010, un premier prototype de prises de vues a été conçu. Celui-ci acquiert une couverture complète des parties émergées en image grâce à un ensemble de caméras et à un système d'éclairage adapté, placés sur un bateau, voir figure 1.9. La réalisation des acquisitions photographiques pendant l'avancement du bateau permet une grande rapidité d'exécution. Ce système qui a servi de base au prototype de la thèse, sera détaillé dans la section 3.1.



FIGURE 1.9 – Prototype d'acquisition d'images dans le tunnel-canal de Niderviller.

Dans un deuxième temps, une solution de localisation dans le tunnel a été recherchée. La méthode proposée est appelée Odométrie Visuelle Simplifiée (OVS). Elle utilise les équations du mouvement et de la stéréovision, ainsi que quelques hypothèses simplificatrices, et ne nécessite pas de moyens supplémentaires aux caméras. Les expérimentations menées dans le tunnel ont démontré que la précision en abscisse curviligne obtenue par l'OVS est de l'ordre du décimètre (CHARBONNIER et al., 2014). Par conséquent, cette méthode offre un très bon rapport coût de traitement/précision. Comme nous l'utilisons

dans la chaîne de traitement développée pour la thèse, elle sera expliquée plus en détail à la section 3.4.2.

Afin de tester ce prototype, plusieurs expérimentations ont été menées principalement dans le tunnel test de Niderviller (cf. paragraphe 1.1.3) mais aussi dans le tunnel d'Arzviller, ainsi que dans le tunnel-canal de Revin (08), voir figure 1.10a. Enfin, un troisième site localisé en zone urbaine (quartier de la Petite France, Strasbourg) a aussi été utilisé afin d'expérimenter le système pour une application présentant des problématiques proches de celles dans le tunnel, à savoir l'absence de signal GPS, voir figure 1.10b.



FIGURE 1.10 – Photographies des expérimentations réalisées à Revin (a) et dans le quartier de la Petite France à Strasbourg (b).

Dans le but d'obtenir une chaîne complète, un logiciel de visualisation a été développé. Celui-ci permet d'accéder aux séquences d'images ordonnées de manière cohérente, mais aussi de les annoter manuellement. Un outil semi-automatique permet notamment d'assister l'opérateur dans la représentation des fissures. La détection automatique des désordres à partir des images a fait l'objet d'une première étude (FOUCHER et al., 2016a). L'approche expérimentée s'appuie sur des méthodes de classification.

Deux pistes ont été explorées en parallèle au projet VNF-Cerema-CETU, et ont débouché sur la définition du sujet de la thèse. La première a été d'utiliser les images pour reconstruire en 3D les voûtes et piédroits des tunnels grâce à la photogrammétrie. Le modèle obtenu a été évalué en le comparant à une référence obtenue par lasergrammétrie. Pour cela, une méthode originale a été conçue (CHARBONNIER et al., 2013). Les résultats obtenus ont motivé le choix de continuer à étudier le procédé. En effet, si la reconstruction des tunnels par photogrammétrie nécessite le développement de méthodes adaptées aux structures tubulaires, elle offre des possibilités de localisation précise.

La seconde piste a été d'intégrer un système d'imagerie subaquatique (sonar latéral) au dispositif existant. Ce système a été testé à Niderviller et à la Petite France (CHAMPIER, 2014) Le résultat de ce premier levé subaquatique est prometteur car il offre une visuali-

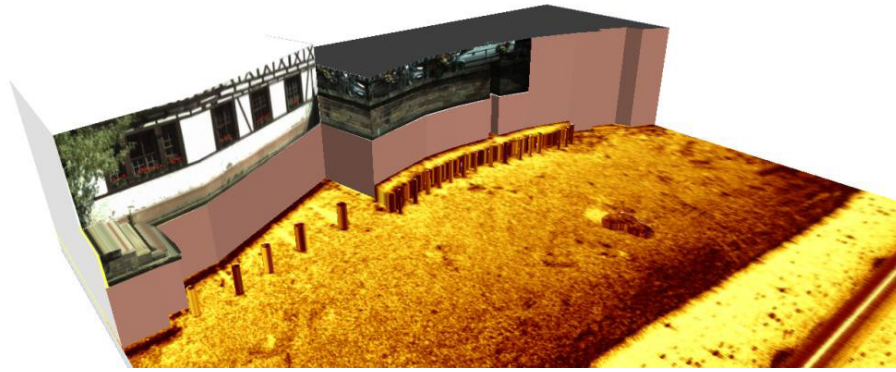


FIGURE 1.11 – Modèle 3D simplifié d'une zone de la Petite France, sur lequel ont été projetées à la fois l'image acoustique du sonar latéral des parties immergées et les photographies des parties émergées. Illustration issue de (CHAMPIER, 2014).

sation des structures immergées, même si ce type de capteur produit une information sommaire pour l'inspection, voir figure 1.11. Une autre limite était la localisation très approximative des mesures. En conséquence, les recherches devaient être poursuivies pour obtenir une donnée suffisante à l'inspection subaquatique.

1.2.3.b Positionnement de la thèse par rapport au projet

L'objectif de la thèse est de développer à la fois un prototype d'acquisition et la méthode de traitement des données afin de construire un modèle 3D du « tube entier » des tunnels navigables.

Pour atteindre ce but, la méthode mise au point se base sur certains développements apportés précédemment dans le projet. En particulier, le système d'acquisition reprend en grande partie celui employé jusqu'alors. De plus, l'approche de localisation par OVS s'est avérée utile pour construire le modèle 3D des voûtes et piédroits par photogrammétrie.

Dans le cadre de la thèse, les parties subaquatiques sont modélisées en 3D pour générer le modèle complet du tunnel. Dans ce but, une technologie sonar 3D doit être employée à savoir le SMF. Cette méthode nécessite de connaître la trajectoire du bateau avec une précision centimétrique. Par conséquent, le procédé de localisation est à améliorer : on exploitera pleinement les capacités de la photogrammétrie pour déterminer la position et l'orientation du système à chaque instant. Enfin, la technologie employée et les performances de modélisation de l'approche doivent être évaluées, notamment pour la partie subaquatique. Ainsi, de nouvelles recherches ont été nécessaires afin d'obtenir des données de référence auxquelles ont été comparées les données produites par notre méthode.

Conclusion du chapitre 1

- Les tunnels navigables sont des structures essentielles au réseau fluvial français.
- Maintenir ces structures constitue un enjeu important pour le transport fluvial.
- Pour cela, les tunnels-canaux doivent être documentés pour aider à leur exploitation et inspectés régulièrement pour les maintenir en bon état de service.
- La construction du modèle 3D de ces ouvrages offre une information quasi exhaustive de leur géométrie. Le modèle peut servir à la fois à la documentation et comme support à l'inspection.
- Cette thèse s'inscrit dans la continuité d'un projet dont le but est de concevoir un système semi-automatique à grand rendement d'aide au diagnostic.
- Elle se distingue du projet par son objectif qui consiste à développer et à évaluer une méthode de reconstruction permettant d'obtenir un modèle complet du tunnel, ce qui nécessite d'effectuer des mesures en 3D sous l'eau dans un environnement confiné.

2

État de l'art des méthodes de cartographie subaquatique

Pour obtenir le modèle 3D « tube entier » des tunnels navigables, le système d'acquisition dédié doit intégrer une solution pour mesurer les parties immergées des tunnels-canaux. L'objectif de ce chapitre est d'étudier les différentes méthodes disponibles pour la numérisation subaquatique afin de déterminer celle qui serait la plus appropriée à notre application. Pour cela, plusieurs critères sont à prendre en compte. En premier lieu, la méthode doit pouvoir être mise en œuvre dans les tunnels-canaux. Donc le procédé employé doit être capable de mesurer dans une eau turbide et il doit produire des données exploitables dans un milieu confiné. De plus, le temps nécessaire aux acquisitions doit être raisonnable et son application ne doit pas perturber le trafic. En second lieu, les données produites doivent pouvoir être utilisées pour la documentation et l'inspection. Par conséquent, la résolution spatiale et la précision des mesures effectuées doivent être suffisantes pour cette application.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans un premier temps nous passons en revue les différents capteurs employés pour la cartographie subaquatique, ainsi que les moyens pour les appliquer. Dans un second temps, nous évoquons plus en détails les technologies sonar, qui semblent les mieux répondre à nos contraintes, en commençant par donner les principes de ce type d'acquisition. En outre, nous présentons plus particulièrement le sondeur multifaisceaux qui est le dispositif que nous avons choisi d'utiliser. Comme cet appareil est employé en dynamique, il est nécessaire de connaître les données de navigation du bateau auquel il est attaché. Aussi, dans un troisième temps, nous abordons les méthodes existantes pour déterminer la trajectoire d'un mobile.

2.1 Acquisition de données comme support pour l'inspection subaquatique

2.1.1 Les capteurs employés pour l'inspection subaquatique

Dans le but d'inspecter des surfaces immergées, l'environnement est mesuré par des capteurs employant des technologies de type optique, sonar ou laser. Les données produites par ces appareils sont soit des images, soit des mesures spatiales.

Tout d'abord, les caméras optiques sont largement employées puisque la mise en œuvre reste simple. Les images permettent de constituer une documentation 2D des ouvrages inspectés. De plus, grâce à la photogrammétrie, les structures peuvent être modélisées en 3D, voir section 3.4.1. La littérature offre de nombreux exemples d'application de cette méthode sous l'eau (DRAP et al., 2011 ; MENNA et al., 2015 ; NEGAHDARIPOUR et FIROOZFAM, 2006). La photogrammétrie a été définie pour des travaux aériens ou terrestres. Son utilisation en milieu aquatique nécessite des adaptations. Un premier changement concerne le calibrage du dispositif de prises de vue. En effet, comme l'appareil photographique est placé dans une coque étanche, le trajet de la lumière est dévié à chaque changement de milieu, à savoir entre l'eau et l'isolant puis entre l'isolant et l'air (BRÄUER-BURCHARDT et al., 2016 ; TELEM et FILIN, 2010). Ce phénomène de réfraction doit être corrigé pour obtenir des mesures précises. De plus, les images acquises sous l'eau sont généralement ternes à cause du faible éclairage et de l'absorption notable de la lumière dans l'eau. Donc le procédé doit comprendre une étape de filtrage des images (BRYSON et al., 2016 ; SCETTINI et CORCHS, 2010).

En outre, les capteurs optiques fonctionnent aussi de manière active sous l'eau grâce à l'ajout d'un projecteur de lumière au système (JAFFE et al., 2001). Cette méthode dite à lumière structurée est basée sur la projection d'un motif défini. Lorsque le système émet une lumière blanche, le schéma projeté est généralement formé de franges blanches et noires. Lorsque le système emploie la technologie laser, le motif émis est souvent une ligne (GILLHAM, 2011 ; MCLEOD et al., 2013), mais il peut aussi s'agir de plusieurs lignes disposées en croix (BRIGNONE et al., 2011) ou parallèles (MASSOT-CAMPOS et OLIVER-CODINA, 2014). À partir de l'image de la déformation du motif projeté sur l'objet, ce dernier peut être restitué en 3D grâce au principe de la triangulation. L'article (ROMAN et al.,

2010) propose une comparaison entre cette méthode et un sonar (sondeur multifaisceaux). Cette étude accorde une meilleure restitution aux mesures basées sur la visualisation d'un faisceau laser qu'aux acquisitions sonar. Une autre comparaison de ces méthodes avec la photogrammétrie a été effectuée dans (BIANCO et al., 2013). De cette analyse, on retiendra que la reconstruction 3D avec les méthodes optiques actives est plus stable qu'avec des méthodes optiques passives, mais le nuage de points obtenu est davantage bruité.

Depuis quelques années, des scanners laser 3D dédiés à la mesure en milieu aquatique sont apparus sur le marché (MASSOT-CAMPOS et OLIVER-CODINA, 2015). Ces appareils sont encore en développement. Toutefois, les résultats déjà obtenus sont encourageants (MOREL, 2016). Le principe de fonctionnement s'appuie sur la mesure de *temps de vol*, plus précisément sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion laser entre l'appareil et l'objet visé. La lumière émise est communément le vert (532 nm) car, à cette fréquence, l'absorption est moindre et le coefficient de dispersion est optimal.

Les méthodes exposées précédemment assurent des résultats d'une précision infracentimétrique et dont la résolution est importante. Toutefois, la portée d'acquisition préconisée est de l'ordre de 3 m pour les capteurs optiques et jusqu'à 10 m pour les capteurs laser. Ces technologies sont donc déployées par des plongeurs ou installées sur des véhicules sous-marins téléguidés, ROV (*Remotely Operated underwater Vehicle*), ou autonomes, AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Enfin, la turbidité d'eau est un obstacle à l'utilisation de ces méthodes optiques et laser. Un procédé permet de contourner cette contrainte au moyen d'une chambre d'eau claire placée entre le capteur et l'objet mesuré. Toutefois, la mise en œuvre de cette méthode est contraignante.

Par conséquent, l'utilisation des technologies sonar s'impose en absence de visibilité. Les dispositifs mesurant à l'aide d'ondes acoustiques seront présentés dans la section 2.2.2.

Pour conclure, la figure 2.1 issue de (MASSOT-CAMPOS et OLIVER-CODINA, 2015) synthétise les différentes technologies appliquées pour la reconstruction 3D subaquatique. Notons enfin que l'utilisation simultanée de plusieurs capteurs subaquatiques permet de bénéficier des avantages de chacun (BRUNO et al., 2015 ; DRAP et al., 2011).

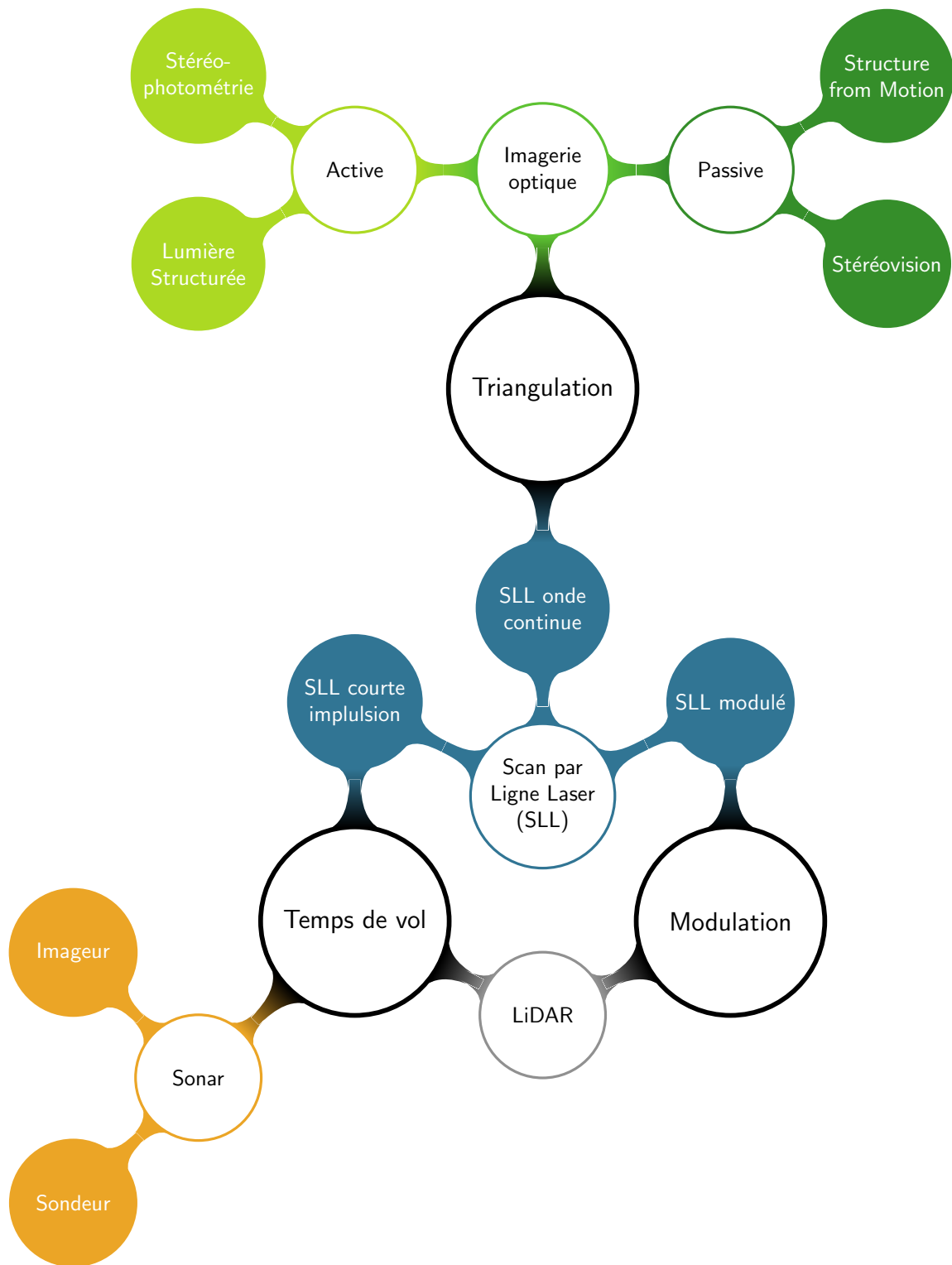


FIGURE 2.1 – Classification des capteurs subaquatiques pour la reconstruction 3D, source : (MASSOT-CAMPOS et OLIVER-CODINA, 2015).

2.1.2 Moyens pour la mise en œuvre des capteurs

La mise en œuvre *in situ* d'un capteur nécessite des moyens particuliers. Celle-ci dépend des caractéristiques des technologies employées, que ce soit les dimensions de l'appareil ou le procédé d'acquisition qui peut être statique ou dynamique. Les acquisitions de manière statique ne sont devenues possibles que récemment, grâce au développement de nouvelles technologies, comme les scanners laser subaquatiques ou le sonar à balayage mécanique, présenté section 4.1.2) (DRAP et al., 2011 ; LESNIKOWSKI et RUSH, 2012 ; THOMPSON et SEAWALL, 2013). Le principe d'utilisation de ces appareils s'inspire directement de celui mise en œuvre pour un scanner laser terrestre.

Plus communément, les levés subaquatiques sont réalisés de manière dynamique. De cette façon, l'acquisition des données peut être effectuée selon deux modes : le premier nommé *stop-and-go* requiert l'immobilisation du mobile lors de la phase d'acquisition (SOHNLEIN et al., 2011), mais à de rares cas près, les mesures sont réalisées en mode continu, c'est-à-dire simultanément à l'avancement du véhicule. Pour ces deux méthodes, il est nécessaire de connaître la trajectoire du mobile à chaque instant du levé. Les approches employées pour obtenir cette informations sont données en section 2.3.2.

La méthode historiquement employée pour l'inspection subaquatique est l'intervention de plongeurs. De cette façon, il est aisé de cibler la zone que l'on souhaite mesurer. Ce mode opératoire est principalement employé pour la réalisation de prises de vue photographiques (DRAP et al., 2011), puisque les autres types de capteurs sont difficilement manœuvrables par un plongeur et parce qu'ils nécessitent d'être branchés à une source d'énergie. De plus, la mise en œuvre de cette méthode est contraignante, principalement en raison des mesures à appliquer pour assurer la sécurité des plongeurs.

Afin de répondre aux problèmes de sécurité et aux contraintes liées à la mise en place des plongées, des véhicules sous-marins téléguidés ROV, ou autonomes AUV, sont utilisés (GALCERAN et al., 2015 ; JOHNSON-ROBERSON et al., 2010 ; McLEOD et al., 2013 ; NEGAHDARIPOUR et FIROOZFAM, 2006 ; OZOG et al., 2016 ; RIBAS et al., 2007). Ces robots peuvent embarquer un grand nombre de capteurs de différents types. La principale problématique liée à l'utilisation de ces plates-formes est leur localisation, que ce soit pour le guidage ou le géoréférencement des données acquises. De plus, les mesures sont réalisées très près de la surface inspectée, ce qui accroît le temps nécessaire pour l'examen complet d'une structure. Toutefois, certaines applications, telles que (RIDAO et al., 2010), annoncent une grande productivité. De plus, l'exécution des levés de manière autonome avec un AUV a pour but de faciliter la mise en œuvre.

Lorsqu'il s'agit d'inspecter de grandes surfaces comme les digues ou les ports, l'utilisation du bateau semble mieux adaptée. Les méthodes employées sont généralement empruntées à la bathymétrie, technique habituellement utilisée pour l'acquisition des fonds marins ou fluviaux. Par ailleurs, les capteurs subaquatiques les plus souvent utilisés sont de type sonar. L'utilisation de cette méthode, issue de la bathymétrie, pour l'inspection concerne très souvent des ouvrages partiellement immergés. Dès lors, le levé subaquatique est à compléter avec celui des parties émergées. C'est pourquoi, les bateaux embarquent des capteurs pour mesurer dans et hors de l'eau (FRALEU et al., 2006; MITCHELL et al., 2011; RONDEAU et al., 2012). La solution largement employée associée au levé subaquatique par sonar, un levé lasergrammétrique des parties émergées de l'ouvrage. La méthode employée est au carrefour de deux domaines : la bathymétrie et la cartographie mobile terrestre. La taille des bateaux est très variable et diffère suivant la mission. Par exemple, de petites embarcations téléguidées ou autonomes ont été conçues pour l'inspection (PAPADOPOULOS et al., 2014). Enfin, il existe des solutions commerciales similaires qui sont destinées à l'inspection des canalisations de grandes sections (GRIFFITHS et GRAHAM, 2011; INGRAM, 2014). Toutefois, ces dispositifs emploient des capteurs inadéquats pour la modélisation des tunnels-canaux (portée limitée et précision d'acquisition insuffisante). De plus, les moyens qu'ils emploient pour se localiser sont inadaptés dans notre cas, voir section 2.3.2.a.

Par conséquent, pour la numérisation des tunnels-navigables, le moyen le mieux adapté est celui que nous avons appliqué. En effet, en mesurant d'un bateau, il est possible de lever de grandes étendues dans un temps acceptable, et d'acquérir simultanément des mesures au-dessus et sous l'eau.

2.2 Acquisition sonar, principe et application

L'exploitation de l'onde acoustique par les technologies sonar a rencontré un grand intérêt dans le domaine de la bathymétrie. En effet, cette innovation a favorisé les travaux d'exploration et de cartographie des fonds marins qui représentent plus de 70 % de la surface du globe terrestre. Par extension, cette technologie a été déployée pour les mesures en eau peu profonde et pour l'inspection.

Les bases de la mesure sonar présentées dans cette partie sont issues d'un travail de synthèse du livre de LURTON (2010).

2.2.1 Généralités sur la mesure sonar

Le terme sonar est l'acronyme de *sound navigation and ranging* et désigne l'ensemble des systèmes exploitant l'onde acoustique pour détecter, mesurer ou transmettre sous l'eau. De ce fait, la bathymétrie a habituellement recours à la mesure sonar pour cartographier un environnement subaquatique. Pour cette application, le signal utilisé pour la mesure est émis par le système et réfléchi par la surface visée. Donc il s'agit d'un système actif.

2.2.1.a Principe de la mesure sonar

Une onde acoustique est la propagation de proche en proche d'une perturbation mécanique dans un milieu élastique. Par conséquent, il ne s'agit pas d'une propagation de matière, mais bien d'un mouvement oscillatoire matérialisé par la compression-dilatation locale des particules d'un environnement. La vitesse de déplacement de l'onde acoustique, appelée célérité (c en $m.s^{-1}$), dépend de deux caractéristiques du milieu de propagation : la densité (ρ en $kg.m^{-3}$) et l'élasticité (E en Pa) ou pour un fluide la compressibilité (χ en Pa^{-1}) (inverse de l'élasticité). Afin d'obtenir la célérité à partir de ces grandeurs physiques, la formule est la suivante :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\chi\rho}} \quad (2.1)$$

La vitesse du son sous l'eau est approximativement $1500 m.s^{-1}$ ce qui est bien supérieure que dans l'air (environ $340 m.s^{-1}$). La détermination de cette grandeur est primordiale afin d'obtenir une mesure sonar précise. Or, sur le terrain, la compressibilité de l'eau est difficile à déterminer. Ainsi plusieurs modèles ont été élaborés afin d'estimer la célérité en fonction de la température, de la salinité de l'eau et de la profondeur (par exemple les modèles de Medwin (1975), Leroy (1960), ou encore de Chen et Milero (1977)).

Dans les faits, la vibration acoustique est entretenue pour composer un son. De cette manière la perturbation mécanique est reproduite à échéances de temps régulières. Cette périodicité est caractérisée par la période (T en s) qui est la plus petite durée entre deux vibrations. L'inverse de la période est la fréquence (f en Hz). Elle donne le nombre de vibrations par seconde. Spatialement, la plus petite distance entre deux points du milieu de propagation ayant le même état vibratoire est la longueur d'onde (λ en m). Cette

grandeur est aussi la distance parcourue par l'onde le temps d'une période. Ainsi, ces notions sont liées par les relations suivantes :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

La propagation d'une onde sonore engendre une énergie acoustique. Cette énergie comprend une composante cinétique qui est le déplacement effectif des particules du milieu, et une composante potentielle qui correspond au travail transmis par la pression génératrice des mouvements de compression et dilatation.

Pour exprimer cette énergie, deux notions sont utilisées : l'intensité I qui est l'énergie sonore reçue par unité de surface et de temps, et la puissance P qui est l'énergie sonore reçue par une surface donnée par unité de temps.

Concrètement, pour une onde plane d'amplitude de pression p_0 (en Pa) et donc de pression efficace p_{rms} (moyenne quadratique), l'intensité du signal sonore est :

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad I \text{ en } W/m^2 \quad (2.3)$$

Ces relations comprennent, en plus de la pression, la densité du milieu (ρ en kg/m^3) et la célérité (c en m/s). Concernant la puissance, elle est évaluée pour une surface Σ . Lorsque la surface Σ appartient à la sphère ayant pour centre la source sonore, la puissance est définie de la sorte :

$$P = I * \Sigma = \frac{p_0^2 \Sigma}{2\rho c} = \frac{p_{rms}^2 \Sigma}{\rho c} \quad P \text{ en } W \quad (2.4)$$

Enfin, comme les grandeurs acoustiques (pressions et énergies) présentent une grande dynamique, elles sont exprimées suivant une échelle logarithmique. L'unité associée à cette échelle est le décibel (dB).

En substance, l'onde acoustique se déplace à une vitesse propre au milieu de propagation. Deux caractéristiques principales nous intéressent pour la mesure sonar : la longueur d'onde (obtenue par la fréquence) et l'intensité. Cette dernière exprime l'énergie potentielle transportée par l'onde.

2.2.1.b Mise en œuvre de la mesure sonar

La mesure sonar consiste à émettre un signal sonore dans une direction définie et d'enregistrer les ondes réfléchies par la cible, dans le but d'obtenir une information de type spatiale. En mesurant le temps de parcours (Δt en s) de l'onde et grâce à la détermination de la célérité particulière au milieu de propagation, il est possible d'estimer la distance (d en m) entre l'appareil sonar et la cible :

$$d = \frac{c * \Delta t}{2} \quad (2.5)$$

L'émission acoustique est générée grâce à la vibration d'un matériel produisant une variation de pression du milieu qui se propage de proche en proche. La réception consiste à enregistrer les variations de pression du milieu et plus particulièrement celles issues de la rétrodiffusion par la cible du signal émis.

Afin d'effectuer l'émission et la réception des ondes acoustiques un même type d'appareil est utilisé : il s'agit d'un transducteur. Celui-ci a pour principe de convertir une énergie électrique en énergie acoustique et inversement. Cette faculté de transformation est possible grâce à la propriété piézoélectrique du matériau qui compose le transducteur. En effet, ce type de matériau a pour caractéristiques de se déformer en présence d'un courant électrique et inversement, de produire une tension électrique lorsque celui-ci est soumis à une contrainte mécanique. Ces propriétés sont détenues par certains matériaux naturels comme le quartz, mais les appareils sonar sont essentiellement conçus avec des matériaux artificiels (céramiques, polymères).

Caractéristiques d'un système sonar

Les caractéristiques d'émission et de réception d'un système sonar résultent de la conception du transducteur. En effet, chaque système émet et réceptionne les signaux de manière optimale à une fréquence qui lui est propre. Cette fréquence, appelée nominale, est la fréquence à laquelle le régime de résonance du système est à l'équilibre. Cette définition est associée à celle de la bande passante qui spécifie les fréquences proches de la fréquence nominale pouvant être exploitées par le système. Un transducteur est aussi caractérisé par sa capacité de conversion électro-acoustique. À cet égard, la sensibilité permet de quantifier, en émission, la qualité du signal transmis pour une tension électrique donnée, et en réception, la qualité de la réponse électrique pour une pression acoustique donnée. De plus, la capacité d'émission est aussi spécifiée par le rendement électro-acoustique qui est le rapport entre la puissance acoustique émise et la puissance électrique fournie au transducteur.

La caractéristique première d'un transducteur est sa directivité, c'est-à-dire sa capacité à diffuser ou à recevoir un signal sonore dans une direction particulière. La fonction de directivité (ou diagramme de directivité) permet de décrire les variations d'énergies transmises en émission, ou les variations de réponse électrique en réception pour chaque direction depuis le transducteur. La figure 2.2 décrit deux représentations schématiques de la directivité de deux types d'antennes : circulaire et linéaire. On observe, sur cette figure la présence de plusieurs lobes. Le plus important d'entre eux, appelé lobe principal correspond au faisceau utile à la mesure sonar. La forme du lobe principal définit l'angle d'ouverture (θ) du faisceau d'acquisition. Les autres lobes, appelés secondaires, sont en général indésirables. Dans certains cas extrêmes, mais présents lors des acquisitions dans les canaux, la mesure enregistrée correspond à celle d'un lobe secondaire, engendrant alors une erreur.

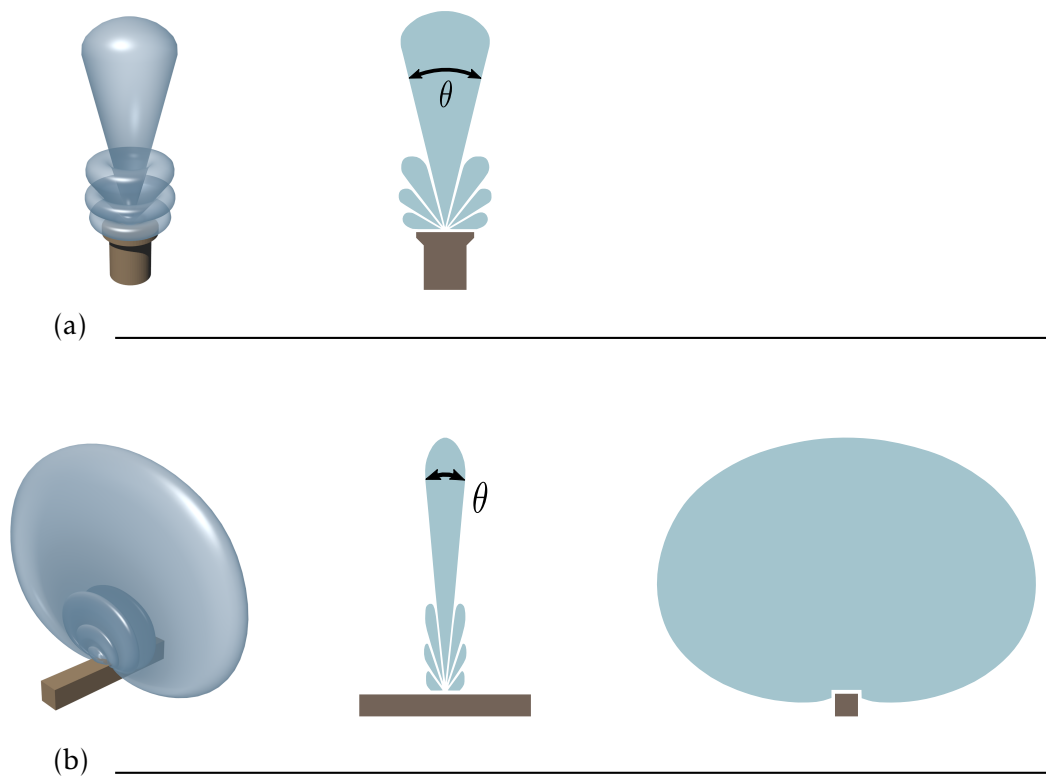


FIGURE 2.2 – Représentation de la directivité d'une antenne circulaire (a) (modèle 3D et coupe) et d'une antenne linéaire (b) (modèle 3D et coupes transversale et longitudinale).

La directivité d'un transducteur dépend en particulier de la taille du transducteur (le diamètre D pour un transducteur circulaire ou la longueur L pour un transducteur linéaire) et de la longueur d'onde du signal sonore (λ). L'angle d'ouverture d'un transducteur est approximativement égal à $60 \frac{\lambda}{D}$ (ou $60 \frac{\lambda}{L}$). Ainsi, plus la fréquence d'acquisition est élevée et plus les dimensions du système sont importantes, meilleure sera la directivité.

Dans le cas de la mesure bathymétrique, il y a plusieurs avantages à avoir un système directif. Tout d'abord, la divergence du faisceau influe sur la taille de l'empreinte acoustique sur la cible. Or cette dernière détermine la capacité du sonar à distinguer des détails. Donc plus un transducteur est directif, meilleure sera la résolution spatiale du levé. De plus, en émission, un système directif permet de concentrer l'énergie produite à une direction, générant de cette manière un signal de plus grande intensité. En réception, une plus grande directivité permet d'améliorer la détection du signal utile (voir l'équation du sonar 2.9).

Composition en antenne

Plus généralement, un système sonar combine plusieurs transducteurs afin de former une antenne, voir figure 2.3. Le but de cet assemblage est en premier lieu d'améliorer la directivité. Pour cela, les signaux émis ou reçus par chaque capteur i sont additionnés :

$$S(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t) \quad n : \text{nombre de transducteurs de l'antenne} \quad (2.6)$$

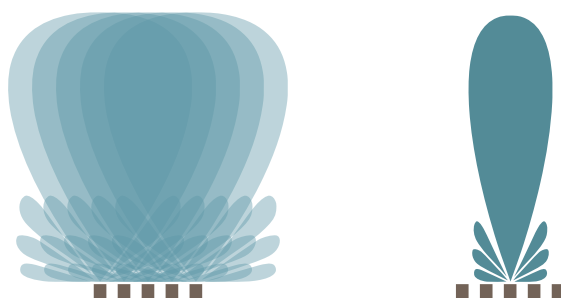


FIGURE 2.3 – Représentation schématique de la composition d'une antenne. L'addition des signaux des transducteurs la composant crée un système directif.

L'emploi combiné de plusieurs transducteurs a aussi deux autres avantages. L'idée est soit d'appliquer un retard temporel entre les transducteurs de manière à émettre ou recevoir les signaux dans une direction donnée, soit de mesurer ce retard afin de déterminer la direction de l'onde reçue. Ce principe est illustré par la figure 2.4.

Une première application est la formation des faisceaux (*beamforming*). Ce principe est notamment employé en réception, dans le cas des systèmes sonar multifaisceaux (caméra acoustique, sondeur multifaisceaux, voir Section 2.2.2). La méthode est basée sur le fait qu'un son issu d'une direction α atteindra un transducteur i avec un retard temporel par rapport au transducteur adjacent $i + 1$. Ainsi, sommer les signaux reçus par chacun des transducteurs et leur appliquer un retard temporel approprié revient à orienter l'antenne

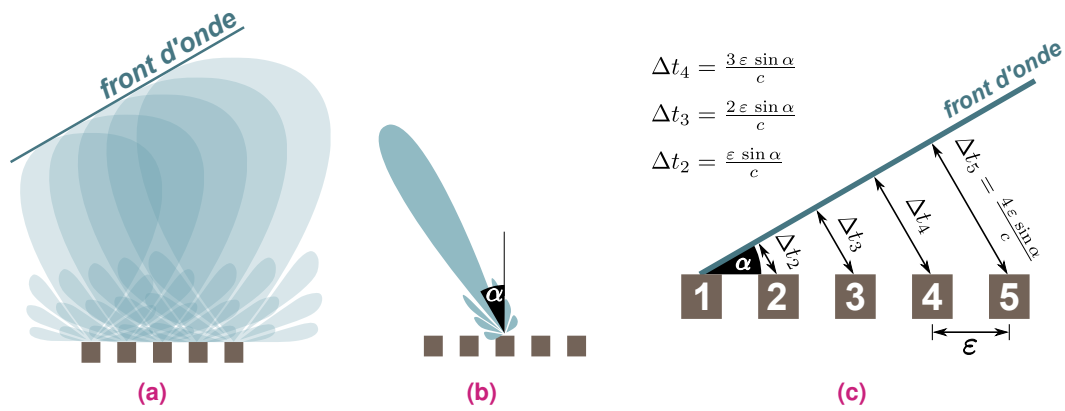


FIGURE 2.4 – Représentation schématique de la constitution d'un retard temporel entre les transducteurs représentés par les cubes gris (a). Ce principe peut être appliqué en émission ou en réception d'une onde dans le but d'orienter le faisceau dans une direction particulière (b). Ce retard peut être également mesuré par interférométrie pour estimer la direction d'arrivée de l'onde α (c).

d'un angle α sans avoir à la pivoter physiquement (voir figure 2.4b). De cette manière, les signaux obtenus ont pour valeur :

$$S_\alpha(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t + \Delta t_i) \quad (2.7)$$

Avec : $\Delta t_i = \frac{(i-1)\epsilon \sin \alpha}{c}$ ϵ : distance inter-capteur

L'autre avantage à l'emploi d'une antenne est, inversement, de mesurer le décalage de réception d'une onde acoustique entre les transducteurs d'une antenne. Il s'agit du principe bien connu de l'interférométrie. L'estimation du retard permet de déterminer la direction de l'onde acoustique. En pratique, cet écart est évalué en effectuant une différence de phase entre les différents récepteurs. Le procédé de détermination soulève des ambiguïtés appelées sauts de phases. En effet, cette méthode ne décompte pas le nombre de phases entières qui, avec la différence de phase, constitue le décalage complet. Il existe plusieurs méthodes pour lever cette ambiguïté, notamment en calculant la différence de phase entre plus de deux antennes (LURTON, 2010).

Finalement, la conception d'un système sonar définit la fréquence d'émission et de réception ainsi que sa directivité. Pour cette dernière propriété, plus la dimension du transducteur est importante, meilleure sera la directivité. Plus généralement, un système sonar est une composition de transducteurs en antenne. De cette manière, la directivité est améliorée. Mais cette disposition permet aussi de sélectionner une direction d'émission et de réception sans avoir à pivoter physiquement l'antenne et aussi d'effectuer des mesures d'interférométrie.

2.2.1.c Propagation de l'onde acoustique

Une fois émise, l'onde acoustique se propage dans le milieu aquatique. Toutefois, le déplacement de l'onde est soumis à des perturbations que sont principalement la réfraction du signal et le multi-trajet.

Tout d'abord, comme il a été énoncé précédemment (section 2.2.1.b), la détermination de la vitesse de l'onde acoustique dans le milieu de propagation a une importance capitale pour la mesure sonar. Or celle-ci est généralement non uniforme puisque les paramètres dont elle dépend (température, salinité et profondeur) varient. Le milieu est généralement décomposé en strates horizontales. Sachant cela, la vitesse du son est déterminée en fonction de la profondeur, formant de cette manière un profil de célérité. Cette façon de procéder concorde avec les mesures bathymétriques effectuées généralement à la verticale. Il existe plusieurs appareils et méthodes afin de déterminer *in situ* le profil de célérité. Il est mesuré au préalable de toute mesure sonar afin d'estimer correctement la distance entre la cible et le sonar.

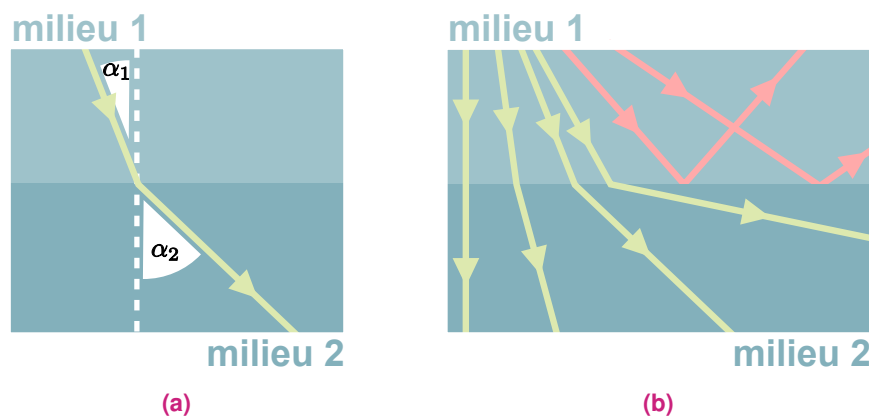


FIGURE 2.5 – (a) Illustration de la loi de Snell-Descartes. (c) Représentation schématique de la réfraction entre deux milieux. Lorsque l'incidence est normale, le faisceau reste linéaire. Mais l'accroissement de l'incidence génère une déviation de plus en plus importante (faisceaux verts) jusqu'à la réflexion du signal (faisceaux rouges).

Outre la mesure de la distance entre le sonar et la cible, l'estimation de la célérité permet d'apprécier le trajet effectué par l'onde acoustique. En effet, la différence de milieu, révélée par la variation de la vitesse du son, engendre des phénomènes de réfraction et réflexion (voir figure 2.5). La réfraction est la déviation de la direction de propagation de l'onde au changement de milieu. Cette distorsion est définie par la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1} = \frac{\sin \alpha_2}{c_2} \quad (2.8)$$

Cette relation met en évidence l'influence de la différence de célérité, mais aussi celle de l'angle d'incidence. Ainsi, à partir d'un certain angle d'incidence, l'onde n'est plus déviée mais réfléchi (réflexion). La prise en compte de ces phénomènes est primordiale pour obtenir une localisation juste de la cible.

Les recherches effectuées concernant la correction de ce phénomène sont appliquées pour l'acquisition en milieu marin (représentation stratigraphique des différences de milieu et direction des mesures proches de la verticale), voir (LURTON, 2010). Dans le cas des canaux, la différence de célérité doit certainement être plus complexe à définir. En effet, la proximité des parois et la faible profondeur ont un impact sur les variations de température. De plus, les directions des mesures effectuées sont multiples. Ainsi, la prise en compte de la réfraction semble complexe. Toutefois, lors d'une de nos expérimentations, quelques mesures de célérité du son dans un canal ont démontré que les variations semblent mineures.

L'autre perturbation notable, inhérente à la propagation de l'onde acoustique, est le multi-trajet. Dans ce cas, le parcours du signal mesuré n'est pas direct. À savoir que l'onde acoustique reçue est issue de la rétrodiffusion de celle-ci par plus d'une surface. Ces surfaces sur lesquelles le signal vient se réfléchir à nouveau sont généralement le fond et la surface de l'eau, mais dans un environnement confiné, les possibilités de multi-trajets sont bien plus abondantes.

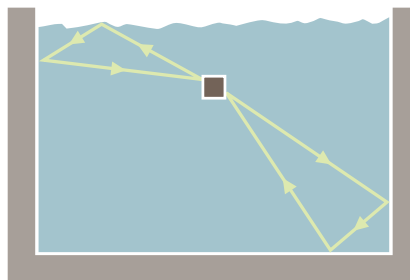


FIGURE 2.6 – Représentation schématique en coupe du phénomène de multi-trajet possible dans un canal.

2.2.1.d Condition à la détection du signal sonar

Pour que la mesure sonar puisse être effective, il est nécessaire que le signal enregistré soit suffisamment puissant pour être détecté. En effet, le signal émis est sujet à plusieurs effets qui affaiblissent l'énergie de celui-ci. Ces phénomènes sont introduits dans l'équation du sonar. Le but de cette équation est de faire le bilan énergétique, afin d'estimer la performance d'un système sonar à acquérir l'information de mesure dans des conditions spécifiques. Concrètement, le seuil S fixe l'énergie minimale que doit avoir un signal en réception pour pouvoir être détecté par le système. Chacun des termes de l'équation du sonar est exprimé en dB .

$$NE - 2PT + IR - NB + GD > S \quad (2.9)$$

Où :

NE est le Niveau d'Émission

PT est la Perte de Transmission

IR est l'Indice de Rétrodiffusion de la cible

NB est le Niveau de Bruit

GD est le Gain de Directivité de l'antenne de réception

S est le Seuil de détection

Le Niveau d'émission

Tout d'abord, le signal est émis avec un certain niveau sonore (NE). L'énergie de l'onde propagée dépend à la fois de la puissance électrique fournie au dispositif émetteur, de la capacité de ce dernier à convertir la puissance électrique en puissance acoustique ainsi que de la directivité de l'antenne. Cette dernière dépend de la fréquence du signal et des dimensions du système.

La perte d'intensité lors de la transmission

Lors de la propagation de l'onde dans le milieu aquatique, deux principes sont responsables de la perte d'intensité de celle-ci (PT). En premier lieu, comme le faisceau dans lequel se propage l'onde est divergent, la surface affectée par la perturbation acoustique augmente en fonction de la distance. Or la puissance transmise d'une surface à une autre est quant à elle constante. Donc en accord avec l'équation 2.4, l'intensité du signal diminue en fonction de la distance parcourue depuis l'antenne d'émission.

Dans un second temps, le milieu acoustique absorbe en partie l'énergie du signal acoustique. Les principales raisons expliquant ce phénomène sont : la viscosité de l'eau et des réactions chimiques. De manière à évaluer la perte d'énergie selon la distance d'acquisition, un coefficient d'absorption est estimé. Il existe plusieurs modèles permettant de calculer ce facteur, mais c'est celui de François-Garisson (FRANÇOIS et GARRISON, 1982) qui est majoritairement employé. Le coefficient d'absorption est estimé en prenant en compte les caractéristiques du milieu (profondeur, température, salinité), ainsi que la fréquence du signal émis. Ce dernier paramètre a une grande incidence sur l'absorption du signal. En effet, plus la fréquence de l'onde acoustique est élevée, plus l'atténuation de l'énergie est importante. Ainsi, le choix de la fréquence d'acquisition, détermine la distance maximale d'acquisition du système.

L'indice de rétrodiffusion de la cible

Ensuite le signal est rétrodiffusé par la surface cible. L'énergie de l'onde renvoyée dans la direction du sonar (IR) résulte à la fois de la capacité de la surface à réfléchir un signal, de la fréquence de ce dernier et enfin de l'angle de l'incidence. On retiendra qu'en moyenne, l'énergie du signal rétrodiffusé est plus grande pour des incidences d'acquisition proche de la normale à la surface que pour des visées rasantes. De plus, les surfaces rugueuses et constituées par un matériau dense, réfléchissent mieux les ondes sonores reçues. Enfin, l'aire de la zone insonifiée, c'est-à-dire atteinte par l'onde acoustique, influe aussi sur la quantité d'énergie renvoyée.

Niveau de bruit et gain de directivité en réception

Enfin, lors de la mesure par l'antenne de réception, la directivité de celle-ci permet d'effectuer un filtrage spatial et ainsi de capter principalement l'onde sonore rétrodiffusée par la cible (*GD*). Toutefois, le système enregistre aussi d'autres sons provenant du milieu ambiant (trafic, pluie, activité biologique, etc.) et du dispositif d'acquisition. Ces sons constituent un bruit de mesure (*NB*) dans lequel le signal utile devra être détecté.

Pour conclure, cet inventaire a mis en évidence les principaux éléments conditionnant la mesure sonar. Deux préceptes sont à retenir. Le premier est qu'une antenne directive, en plus d'améliorer la résolution spatiale, accroît la capacité du système à détecter le signal renvoyé par une surface. La seconde information est que, de la sélection de la fréquence du système, découle la distance maximale d'acquisition.

2.2.2 Les technologies sonar

À partir des principes de la mesure sonar énoncés précédemment, plusieurs types de capteurs ont été conçus. Nous distinguons deux catégories de systèmes : les systèmes de type *imageur* et les systèmes de type *sondeur*. Ces deux classes sont définies à partir de la donnée initialement produite par les capteurs. Pour le premier type, il s'agit d'images, et pour le second, de distances.

2.2.2.a Les appareils de types *imageur*

Le principe des appareils de type *imageur* est d'observer la réponse acoustique d'une surface suivant un profil. Concrètement, le faisceau de mesures est très large dans un sens et étroit dans l'autre, comme le montre la partie gauche de la figure 2.7. De cette manière, la zone insonifiée est une mince bande. Le système mesure au cours du temps l'intensité des ondes réfléchies le long du profil. La figure 2.7 au milieu à droite montre, au cours du temps, l'enregistrement de l'intensité du signal renvoyé par le profil représenté en dessous. Grâce à la relation 2.5, p. 31, la mesure d'intensité peut être exprimée en fonction de la distance entre la cible et l'antenne. Ensuite, les intensités mesurées sont traduites suivant une échelle de couleur, par exemple en niveau de gris, de manière à former une ligne de pixels. Sur la figure 2.7 le profil de pixels correspondant à l'acquisition est

encadré en vert sur l'image acoustique résultante (en haut à droite). Afin d'obtenir une image 2D, il est nécessaire d'avoir un ensemble de profils juxtaposés. Pour cela, deux méthodes existent.

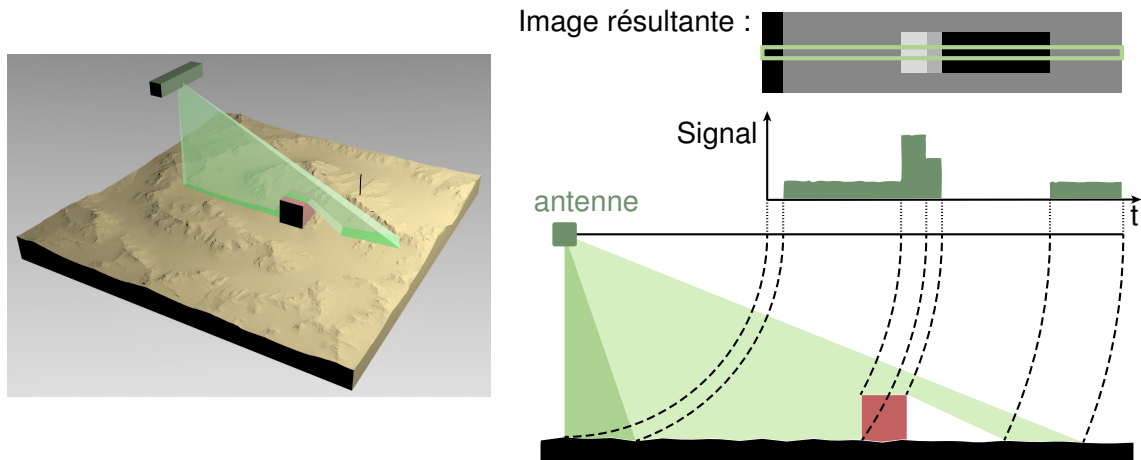


FIGURE 2.7 – Principe de fonctionnement d'un sonar imageur. Sur l'illustration du profil d'acquisition (figure en bas à droite), la zone en vert foncé correspond à une partie du signal qui n'est pas utilisé pour constituer l'image acoustique, par contre il peut être utilisé pour déterminer la profondeur à la verticale de l'antenne.

La première méthode consiste à balayer la zone d'acquisition avec un même faisceau. Le balayage est obtenu grâce au mouvement du mobile sur lequel est fixé l'appareil. Cette façon de procéder nécessite de connaître la position et l'orientation du sonar afin de composer une image. L'appareil qui adopte ce procédé, est le sonar latéral, voir figure 2.8a.

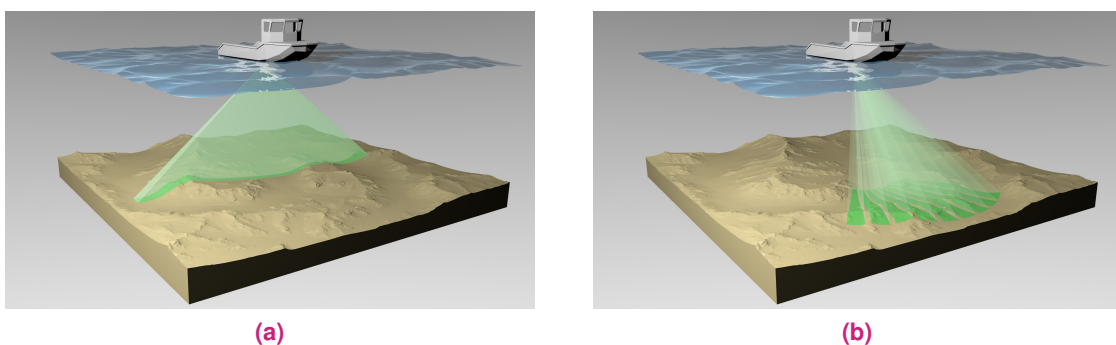


FIGURE 2.8 – Représentation du fonctionnement d'un sonar latéral (a) et d'une caméra acoustique (b).

Cette méthode a pour avantage de permettre l'observation de zones étendues. Toutefois, la génération de l'image nécessite l'apport des données de navigation. De plus, l'image est obtenue une fois le balayage terminé contrairement à un appareil photo qui produit instantanément une image de la zone visée. Cette technologie a déjà été déployée dans

des tunnels-navigables pour effectuer la cartographie du fond du canal comme cela est relaté dans (FAGON et al., 2002a).

Une évolution apportée à ce système est de synthétiser, à partir de plusieurs acquisitions, une antenne virtuelle de grandes dimensions. Or, comme énoncé précédemment (voir la section 2.2.1.b), plus grande est l'antenne, plus étroit est le faisceau d'acquisition. Ainsi, cette méthode permet d'augmenter de manière significative la résolution de l'image sonar. L'appareil fonctionnant de cette manière est appelé *sonar à synthèse d'ouverture*.

La seconde méthode, pour obtenir une image 2D, consiste à enregistrer la réponse acoustique d'une zone suivant plusieurs faisceaux, voir figure 2.8b). De cette manière, à chaque instant d'acquisition est obtenue une image acoustique. Cette technique est mise en œuvre par la *caméra acoustique*. Il est souvent fait usage de ce système pour l'inspection subaquatique, car les images sont acquises avec une grande définition et permettent une visualisation directe en eau turbide (BRAHIM et al., 2008; EVANS et al., 2013; HOLLINGER et al., 2013; OZOG et al., 2015). Toutefois le champ d'acquisition du capteur est limité; en conséquence, l'image offre une perception restreinte. Dans le but d'obtenir un résultat sur une zone plus étendue, les auteurs (HURTÓS et al., 2013; RIDAO et al., 2010) ont développé une solution pour créer une mosaïque à partir d'images obtenues avec une caméra acoustique.

Puisque les images produites par les systèmes *imageurs* ne résultent pas de projections linéaires, comme c'est le cas pour un appareil photographique, la lecture de celles-ci peut être complexe. En réalité la visualisation des détails est possible grâce aux ombres de mesures. Ainsi, ce type d'acquisition est optimale pour des surfaces présentant un relief. De plus, une caractéristique des images acoustiques est de superposer les représentations des surfaces situées à une même distance de l'antenne. Or dans le cas des canaux, ce phénomène est fréquent. Dans ces conditions, distinguer les parois du fond peut s'avérer difficile. Une expérimentation a été menée avec un sonar latéral dans le tunnel-canal de Niderviller. Dans ce cas, l'image des parois est confondue avec celle d'une partie du fond. La figure 2.9 est une portion de l'image sonar produite. Nous remarquons sur cette figure que la zone utile ne représente qu'une partie de l'image acoustique. Toutefois, certains détails observés sur ces images seront retrouvés dans les acquisitions subaquatiques effectuées pendant la thèse.

Les images acoustiques ne permettent pas *a priori* de fournir, à proprement dit, des mesures. Toutefois, il est possible d'obtenir de manière sommaire quelques dimensions, notamment en utilisant les ombres de mesures. En effet, la hauteur d'un objet peut être estimée grâce à la relation de Thalès (CLAUSNER et POPE, 1988). Partant de ce principe, il est possible d'obtenir l'information 3D (AYKIN et NEGAHDARIPOUR, 2013; ZERR et STAGE, 1996). Une autre solution disponible pour les sonars latéraux est de doubler l'antenne. De cette manière, il est possible de réaliser des mesures bathymétriques par interférométrie

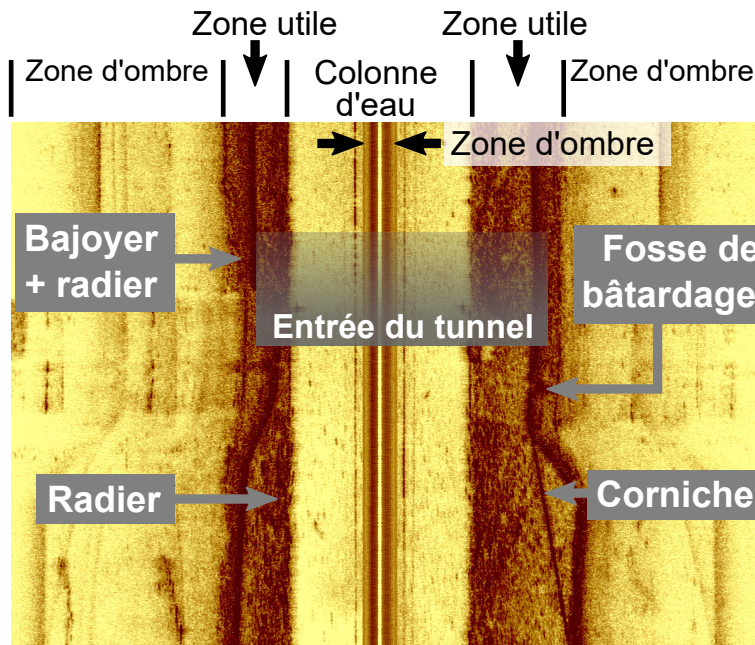


FIGURE 2.9 – Partie de l’image sonar acquise dans le tunnel test de Niderviller (entrée). Les éléments de la structure sont indiqués sur la figure. En haut de l’image sont expliquées les différentes zones de l’image.

(voir Section 2.2.1.b). Cette technique permet de déterminer l’angle de réception du sonar, et par conséquent de compléter les coordonnées polaires. Toutefois, cette méthode est complexe à appliquer dans des environnements exigus tels que des canaux, puisqu’il est difficile de distinguer les surfaces situées à une même distance du sonar. Enfin, des recherches sont menées afin d’obtenir un modèle 3D à partir des images obtenues avec la caméra acoustique en s’inspirant de la photogrammétrie (BRAHIM, 2014).

Pour conclure, modéliser en 3D les parties immergées des tunnels-canaux à l’aide de sonars de type imageur semble complexe à mettre en place. Toutefois, comme les images produites ont une bonne définition, elles sont une bonne source d’information pour l’inspection. Ainsi, une piste de réflexion serait de combiner ces images acoustiques à un modèle 3D.

2.2.2.b Les appareils de type *sondeur*

Les systèmes de type *sondeurs* sont constitués d'un ou plusieurs faisceaux étroits dont l'empreinte sur la surface mesurée tend à être ponctuelle. Les intensités enregistrées correspondent à celles renvoyées uniquement par les éléments situés dans la colonne d'eau, c'est-à-dire dans le volume formé par le faisceau. La mesure consiste à détecter dans le signal enregistré, la réponse acoustique de la surface sondée. De nouveau, l'estimation du temps de parcours de l'onde permet d'acquérir la distance entre le capteur et la cible.

Un premier système utilisant ce principe est le sondeur monofaisceau (voir figure 2.10a). Ce sondeur mesure à chaque acquisition un seul point. Afin de lever plusieurs points en une acquisition, quelques évolutions sont possibles. La première est d'associer le capteur à un système mécanique rotatif, voir figure 2.10b. La seconde est d'utiliser plusieurs de ces sondeurs placés sur une ligne orthogonale à la direction du bateau, voir figure 2.10c). Toutefois, la solution qui s'est imposée pour densifier les acquisitions est l'emploi du sondeur multifaisceaux qui mesure simultanément plusieurs points suivant un profil, voir figure 2.11. Son fonctionnement est détaillé dans la section suivante (Section 2.2.3). Pour ces différents systèmes, l'orientation et la position du dispositif doivent être connues pour construire le modèle 3D.

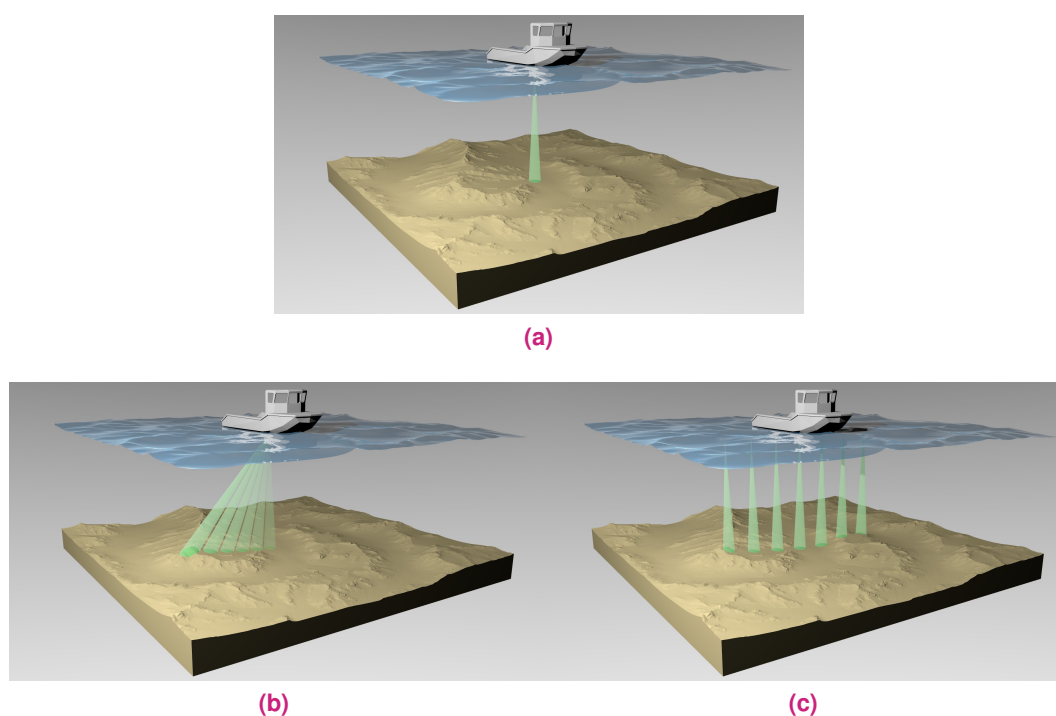


FIGURE 2.10 – Représentations d'un sondeur monofaisceau (a), de sa version rotative (b) et de son application avec plusieurs de ces capteurs disposés en forme de peigne (c).

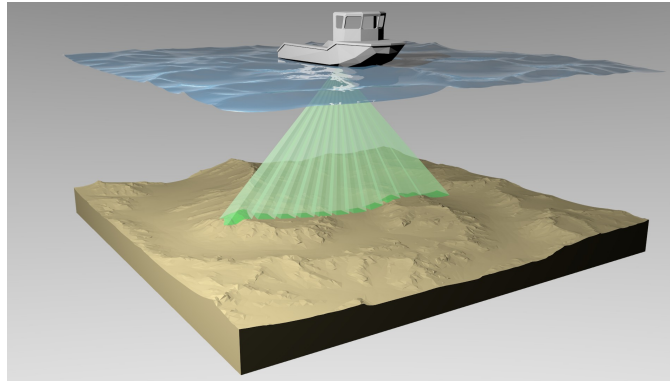


FIGURE 2.11 – *Illustration d'un sondeur multifaisceaux.*

Enfin, la caméra acoustique 3D est un système moins courant qui permet d'acquérir plusieurs milliers de points simultanément suivant une grille (HANSEN et ANDERSEN, 1998). Cependant, la taille de la zone acquise est limitée. Ce dernier appareil est aussi employé pour l'inspection subaquatique (DAVIS et LUGSDIN, 2005).

En conclusion, l'appareil qui a été choisi pour inspecter les parties immergées du tunnel est le sondeur multifaisceaux. Les nombreux exemples de son utilisation ont démontré sa capacité à fournir des données précises. Néanmoins, rares sont les cas où il est utilisé dans des eaux de très faible profondeur et dans des environnements confinés.

2.2.3 Le sondeur multifaisceaux

Le SMF est une des technologies sonar les plus appliquées actuellement. De nombreux ouvrages décrivent son fonctionnement. Parmi eux, (EHRHOLD, 2003 ; LURTON, 2010) ont servi à la rédaction de cette partie.

2.2.3.a Principe de fonctionnement

La fonction du sondeur multifaisceaux est de mesurer par acquisitions successives des profils de points. Le levé de l'ensemble de la surface est effectué grâce au balayage de celle-ci par le capteur. Habituellement, c'est le mouvement du mobile (bateau, ROV, etc.) sur lequel est fixé l'appareil qui engendre le balayage.

La capacité du système à mesurer un profil de points est obtenue grâce à l'emploi de deux antennes : une destinée à l'émission et l'autre à la réception. En effet, comme la mesure recherchée est ponctuelle, l'empreinte correspondant à la zone mesurée doit approcher un point. Pour cela, le faisceau d'acquisition est le résultat de l'intersection des faisceaux perpendiculaires d'émission et de réception (voir figure 2.12a). Afin d'obtenir cette géométrie, les antennes sont disposées en *croix de Mills*, l'antenne d'émission dans l'axe du bateau et l'antenne de réception transversalement. Le faisceau d'émission est étroit dans la direction de la proue du mobile et large transversalement (voir figure 2.12b). À la réception, plusieurs faisceaux parallèles sont formés (voir figure 2.12c). Ces faisceaux sont, quant à eux, assez larges dans la direction de la proue et étroits transversalement.

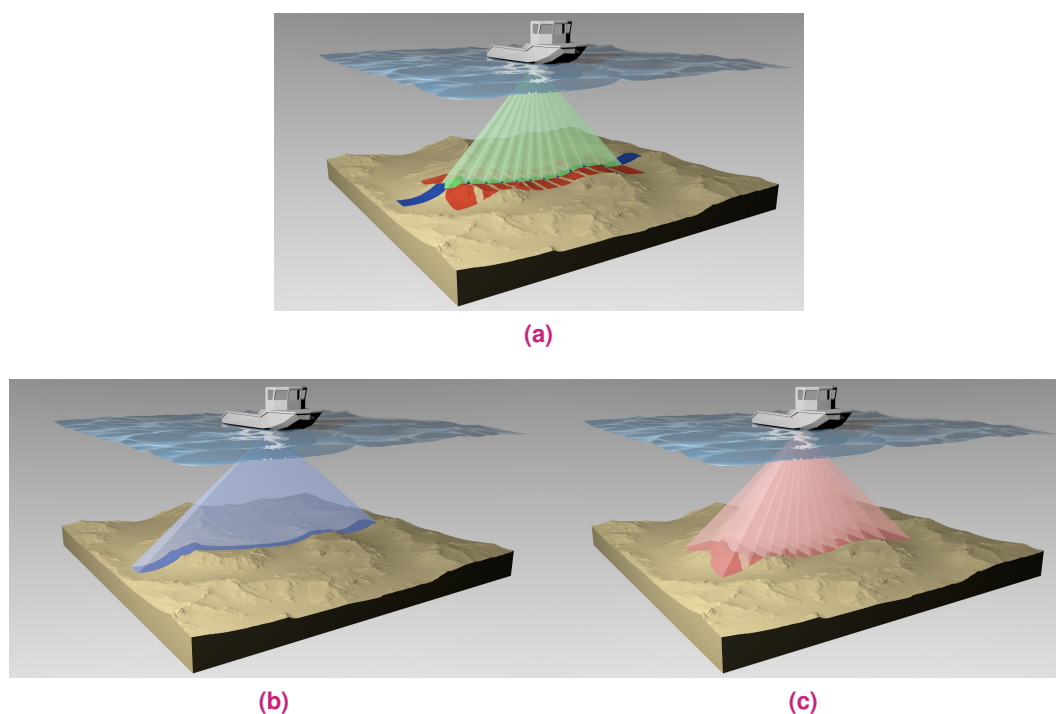


FIGURE 2.12 – Illustrations représentant le faisceau d'émission (b), les faisceaux de réception (c) et la combinaison des faisceaux d'émission et de réception (a).

Le principe de mesure du sondeur multifaisceaux (SMF) reprend celui de tout système sonar destiné à la bathymétrie. Pour chaque faisceau, la distance d_i entre le sonar et la surface mesurée est obtenue en mesurant le temps de parcours de l'onde acoustique. De

cette manière la distance d_i et l'orientation α_i sont les coordonnées polaires du point P_i dans le repère du sonar (S, y_s, z_s), voir figure 2.13.

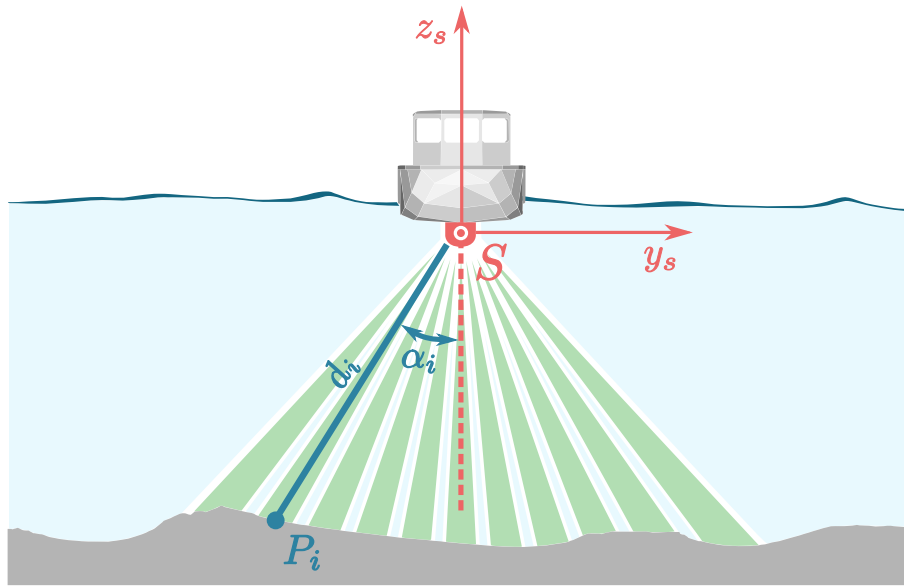


FIGURE 2.13 – Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux (SMF).

Ce repère est défini dans l'espace par le plan formé par les faisceaux d'acquisition du système que l'on nommera « plan du SMF ». Dans ce plan, l'origine est le sonar et les axes de coordonnées sont établis à partir de l'axe central du profil et de sa perpendiculaire.

Afin de générer ces données bathymétriques à partir de l'enregistrement acoustique, une suite d'opérations est effectuée en réception. Celle-ci est décrite par la figure 2.14. Dans un premier temps le niveau du signal mesuré est corrigé par amplification et filtrage. Le principal traitement consiste à corriger la variation d'amplitude de l'écho renvoyé en fonction de la portée d'acquisition. En effet, l'intensité du signal enregistré d'une cible n'aura pas le même niveau suivant la distance qui la sépare du système d'acquisition. Dans ce but, une fonction fondée sur la loi de *Time Varied Gain* (TVG) est appliquée. Dans un second temps, les signaux captés par chaque hydrophone sont convertis de l'analogique au numérique. L'étape suivante est la constitution des faisceaux de réception de manière à composer un éventail. Chaque faisceau est défini pour que sa direction forme un angle α_i avec la direction du sonar. Le principe utilisé à cet effet a été énoncé dans la section 2.2.1.b. Finalement, pour chaque faisceau est détecté l'instant auquel l'écho renvoyé par la cible atteint l'antenne de réception. Les méthodes de détection sont introduites dans la section suivante. Connaissant la célérité du son dans le milieu de mesure, la distance entre le sonar et la cible (d_i) est enfin déterminée.

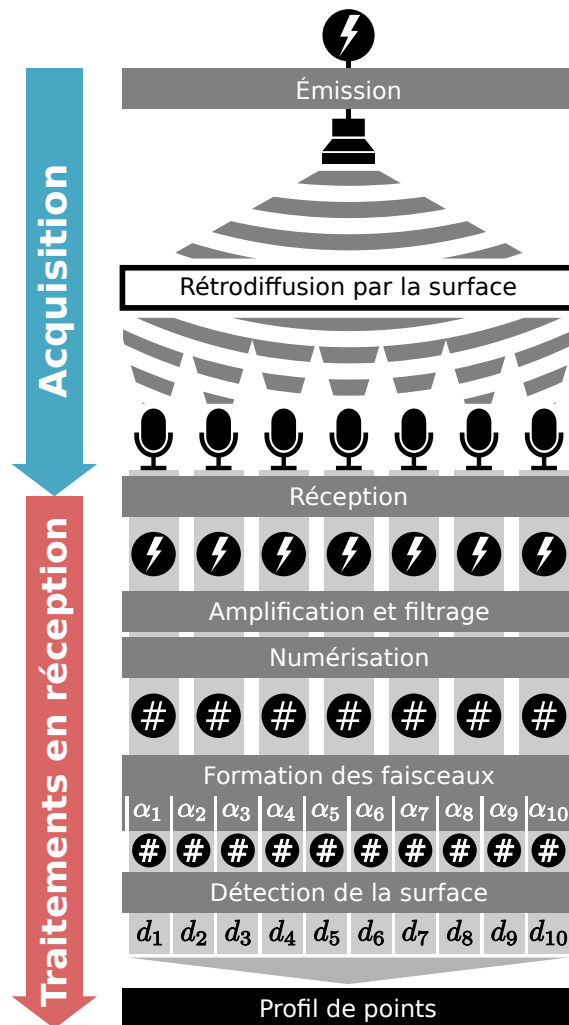


FIGURE 2.14 – Procédure d’acquisition d’un sondeur multifaisceaux.

2.2.3.b Détection de l’écho de la surface mesurée

Pour chaque faisceau, la détection de l’écho correspondant à la rétrodiffusion par la surface est usuellement obtenue grâce à deux méthodes.

La première consiste à sélectionner l’écho ayant l’intensité maximale (voir figure 2.15a). Cet instant est ponctuel lorsque l’incidence de l’onde sur la surface est normale. Dans ce cas, le moment retenu est celui correspondant à l’instant d’arrivée du signal, qui est généralement un pic. Mais plus l’angle d’incidence augmente, plus la réception du signal s’étend dans le temps. Alors, le moment enregistré est le barycentre de l’enveloppe temporelle correspondant à l’écho rétrodiffusé. Toutefois, l’estimation du temps d’arrivée devient trop imprécise pour des angles d’incidence extrême. Or, en bathymétrie traditionnelle (c’est-à-dire : le SMF orienté vers le bas et des fonds marins relativement plans),

ces conditions sont rapidement atteintes pour les faisceaux les plus éloignés du centre de la fauchée d'acquisition.

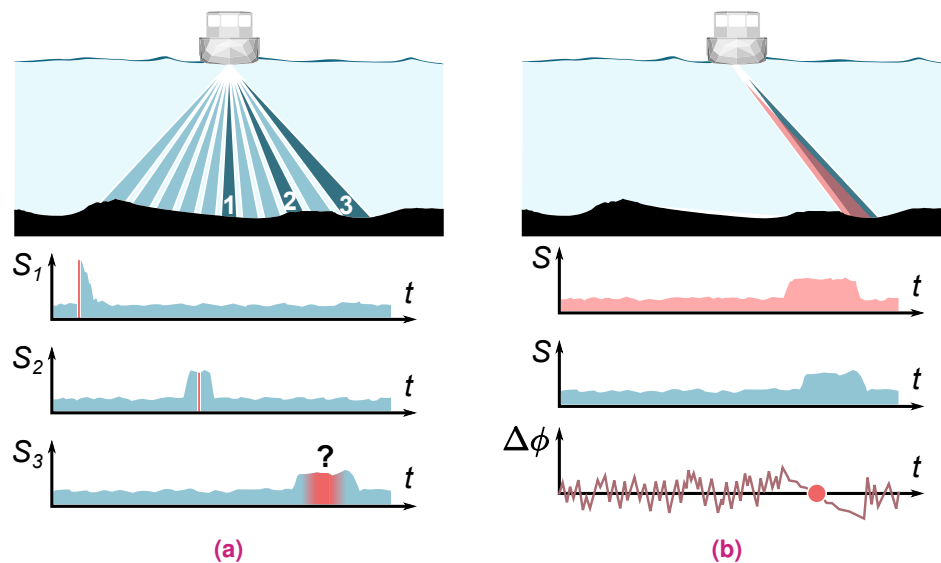


FIGURE 2.15 – Principe de détection par amplitude (a), et par mesure de l'instant de déphasage nul (b).

C'est pour cette raison qu'une seconde méthode est souvent employée pour les faisceaux les plus éloignés du centre du profil d'acquisition. Il s'agit de diviser l'antenne de réception en deux sous-antennes. Ainsi le principe de l'interférométrie peut être appliqué (voir figure 2.15b). Dans ce cas, le calcul à chaque instant de la différence de phase des signaux mesurés par les deux sous-antennes, dans une direction donnée, révèle une rampe aux instants de réception du signal rétrodiffusé. Le moment enregistré coïncide avec le passage à 0 de cette rampe. Cette méthode est d'autant plus efficace que l'incidence de mesure est rasante.

2.2.3.c Les caractéristiques du sondeur multifaisceaux

Plusieurs caractéristiques d'un sondeur multifaisceaux permettent d'évaluer les capacités de mesure du système.

Tout d'abord, un objet est mesuré s'il est dans le champ de visée du sonar et si la distance d'acquisition est inférieure à la portée. Le champ de visée du SMF est limité par l'ouverture angulaire de la fauchée, c'est-à-dire l'angle formé par les faisceaux extrêmes du profil. Ensuite, la portée maximale d'acquisition dépend de la fréquence du signal sonore utilisé

Tableau 2.1 – *Tableau des fréquences employées en fonction du type de levé, issu de (EHRHOLD, 2003)*

Sondeurs	Profondeurs	Fréquence	Type de levé
Grands fonds	100 à 12000 m	10-15 kHz	Talus, dorsales et plaines abyssales
Moyens fonds	30 à 3000 m	30-50 kHz	Plateau, talus
Petits fonds	5 à 500 m	80-120 kHz	Plateau continental
Très petits fonds	0 à 100 m	200-400 kHz	Zones littorales

(voir Section 2.2.1.d). Le tableau 2.1 donne un ordre d'idée des fréquences employées en fonction du type de levé.

De plus, la capacité du SMF à mesurer un certain niveau de détail dépend à la fois de la densité des acquisitions et de la résolution du sonar.

En premier lieu, la densité du nuage de points dépend à la fois des conditions de mesure (distance d'acquisition, incidence de la surface mesurée), des caractéristiques du sonar et de la vitesse d'avancement du bateau. Un premier élément déterminant est la résolution angulaire inter-faisceaux d'une acquisition de profils, c'est-à-dire l'angle compris entre deux faisceaux de mesure voisins. Ainsi, la résolution spatiale au niveau du profil de points est liée à la résolution angulaire, à la distance d'acquisition et aux incidences des faisceaux. Par ailleurs, la résolution spatiale inter-profils (distance séparant deux profils de points) dépend de la vitesse du mobile et de la cadence d'acquisition du sonar.

En second lieu, la résolution du sonar est la plus petite distance entre deux objets de telle manière que le sonar puisse distinguer leurs échos. Cette aptitude est déterminée par la taille de l'empreinte sonar. Cette dernière dépend à la fois de l'ouverture des faisceaux du SMF, ainsi que de la distance et de l'angle d'incidence des acquisitions. De plus, la longueur d'onde du signal définit la résolution du sonar dans la direction du faisceau d'acquisition. Concrètement, le système ne distinguera pas deux objets placés dans la direction du faisceau et séparés d'une distance inférieure à la longueur d'onde. Ainsi, le choix de la fréquence dont découle la longueur d'onde, détermine la capacité de mesure du sonar.

Toutes ces caractéristiques sont présentées plus en détail dans l'article (RONDEAU et al., 2012)

2.3 Trajectographie

Pour cartographier un espace immergé, l'utilisation d'une technologie sonar seule n'est pas suffisante. En effet, les acquisitions doivent être localisées pour obtenir une carte marine. Dès lors, ce précepte s'applique pour le levé bathymétrique au moyen d'un sondeur multifaisceaux. Pour aligner les profils de points produits par cet appareil, ceux-ci sont géoréférencés grâce aux données de navigation de la plateforme sur laquelle est attaché l'appareil. Dans cette partie, la méthode traditionnellement employée en bathymétrie sera décrite. Cette approche appliquée en bathymétrie est une technique de mesure en dynamique. Ainsi, un parallèle peut être fait avec les méthodes de cartographie mobile employées à terre. Les bases de ce domaine seront explicitées dans un second temps.

2.3.1 Méthodes traditionnelles en bathymétrie

En bathymétrie, les principes de cartographie sont liés à la navigation maritime. Ainsi, certaines notions diffèrent de celles employées à terre. Une différence essentielle est l'utilisation de la profondeur pour attribuer la position verticale d'un point et non l'altitude comme c'est le cas pour la cartographie terrestre. De plus, la référence verticale n'est pas la même. En mer, la profondeur est définie relativement au zéro hydrographique. Celui-ci correspond au niveau des plus basses mers. De cette manière, la distance qui sépare un navigateur du fond est presque toujours supérieure à la profondeur indiquée sur une carte marine. Le zéro hydrographique est aussi la référence pour évaluer l'amplitude des marées. Une autre caractéristique est l'emploi quasi généralisé des coordonnées géographiques.

Ces particularités se retrouvent dans les méthodes employées pour l'acquisition et le traitement des données bathymétriques en vue de cartographier l'espace subaquatique. Ces dernières sont détaillées dans (HARE, 2001).

Tout d'abord il convient de fournir les conventions propres au domaine et notamment les systèmes de coordonnées dans lesquels sont définies les mesures. Ces repères sont détaillés dans le tableau 2.2. Le premier système de coordonnées à définir est celui attaché au bateau. Les axes sont établis suivant la forme du bateau. L'orientation de ce repère,

Tableau 2.2 – Tableau détaillant les repères employés pour le géoréférencement des données du SMF.

	Repère lié au bateau	Repère du SMF
Origine	Centre du bateau	Centre d'acquisition du SMF
Axe des abscisses (x)	<ul style="list-style-type: none"> — Dans le plan de symétrie longitudinal du bateau — Parallèle au plan de flottaison du bateau — Dirigé vers la proue 	<ul style="list-style-type: none"> — Normal au plan de la fauchée d'acquisition du SMF — Dirigé vers la proue
Axe des ordonnées (y)	<ul style="list-style-type: none"> — Dans le plan transversal médian du bateau — Parallèle au plan de flottaison du bateau — Dirigé vers bâbord 	<ul style="list-style-type: none"> — Dans le plan de la fauchée d'acquisition du SMF — Perpendiculaire à l'axe du profil d'acquisition — Dirigé vers bâbord
Axe des côtes (z)	<ul style="list-style-type: none"> — Normal au plan de flottaison — Dirigé vers le haut 	<ul style="list-style-type: none"> — Dans le plan de la fauchée d'acquisition du SMF — Suivant l'axe du profil d'acquisition — Dirigé vers le haut

et donc du bateau, est estimée grâce aux mesures des angles d'attitude. Le système de coordonnées du bateau est aussi utilisé pour déterminer les positions et les orientations des capteurs entre eux.

À propos des angles d'attitude, les termes marins qui les définissent sont le cap (Cp), le roulis (Rl) et le tangage (Tg). La figure 2.16 présente la manière dont ces angles sont établis. Ces angles sont généralement obtenus grâce à des moyens gyroscopiques. Pour obtenir l'orientation du SMF, ces mesures sont corrigées des défauts d'alignement (ΔCp , ΔRl , ΔTg) entre le système de mesure d'attitude et le système sonar :

$$\begin{aligned}
 Cp &= Cp_{MES} + \Delta Cp \\
 Rl &= Rl_{MES} + \Delta Rl \\
 Tg &= Tg_{MES} + \Delta Tg
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

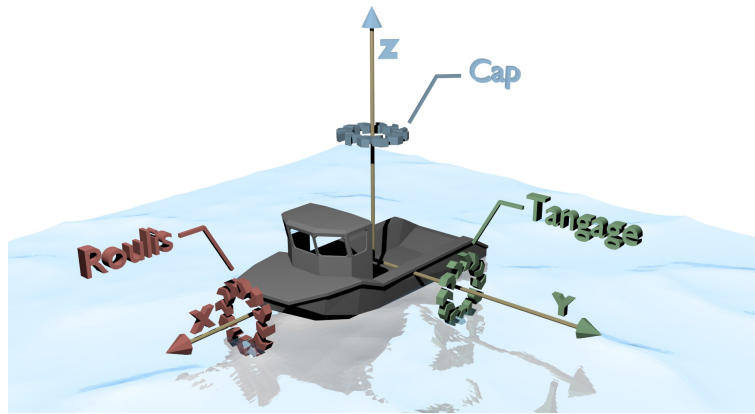


FIGURE 2.16 – Définition des angles d'attitude.

Grâce à ces angles, il est possible de fixer un nouveau système de coordonnées : le repère local orienté (LO). Celui-ci correspond au système de coordonnées du SMF (introduit dans la section 2.2.3.a), dans lequel sont obtenues les mesures du SMF, mais corrigées de l'attitude. Pour cela, la formation de la matrice de rotation doit prendre en compte les différences de notation entre les angles d'attitude tels qu'ils sont définis en bathymétrie et les angles d'Euler (ω, ϕ, κ). La transposition entre les deux notations est la suivante :

$$\begin{aligned}\omega &= Cp - \frac{\pi}{2} \\ \phi &= -Rl \\ \kappa &= Tg\end{aligned}\tag{2.11}$$

Ainsi, il est possible de construire la matrice de rotation (\mathbf{R}) pour orienter localement les mesures sonar (\mathbf{P}_s) :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) = \mathbf{R}\left(Cp - \frac{\pi}{2}, -Rl, Tg\right)\tag{2.12}$$

$$\mathbf{P}_{LO} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_s \quad \text{avec} \quad \mathbf{P}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ d_i \sin \alpha_i \\ d_i \cos \alpha_i \end{pmatrix}\tag{2.13}$$

À ce moment du processus, la détermination des coordonnées géographiques du point mesuré et l'attribut de profondeur qui lui est associé sont traités séparément.

Pour obtenir la profondeur Pr par rapport au zéro hydrographique, la profondeur par rapport au sonar pr doit être corrigée de trois grandeurs (voir figure 2.17). Il s'agit :

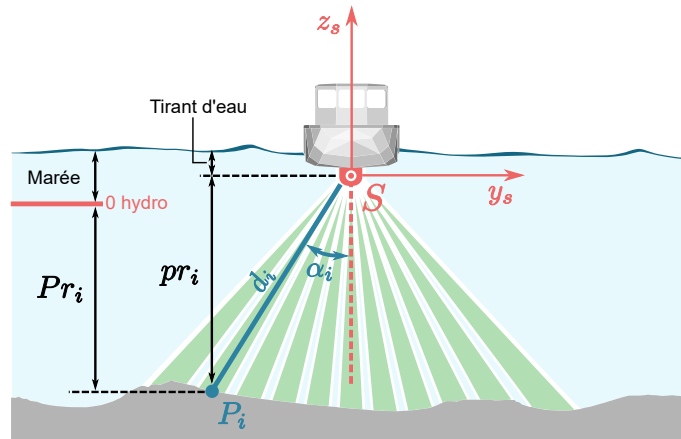


FIGURE 2.17 – Détermination de la profondeur par rapport au zéro hydrographique Pr à partir de la profondeur par rapport au sonar pr .

- du pilonnement ($\Delta z_{\text{pilonnement}}$) qui est le mouvement de translation verticale du bateau par rapport à sa position stable ;
- du tirant d'eau ($\Delta z_{\text{tirant d'eau}}$) qui est la distance verticale entre le sonar et la surface de l'eau lorsque le bateau est stable ;
- de la marée ($\Delta z_{\text{marée}}$) qui est la différence d'altitude entre la surface de l'eau et le zéro hydrographique.

Il existe plusieurs solutions pour obtenir la valeur de la marée, comme de récupérer les mesures de marégraphie situés sur la côte, mais l'emploi de la hauteur ellipsoïdale fournie par le GPS se généralise. Dès lors, la profondeur est calculée de la sorte :

$$Pr = pr - \Delta z_{\text{pilonnement}} + \Delta z_{\text{tirant d'eau}} - \Delta z_{\text{marée}} \quad \text{avec} \quad pr = -z_{P_{LO}} \quad (2.14)$$

Les coordonnées géographiques (ϕ, λ) associées à la profondeur sont obtenues grâce aux mesures du GPS ($\phi_{GPS}, \lambda_{GPS}$). Ces mesures sont complétées par deux vecteurs. Le premier relie la position du GPS à celle du sonar ($\mathbf{T}_{LO}^{GPS \rightarrow S}$). Ce vecteur est obtenu à partir de l'estimation du bras de levier (déport entre le sonar et le GPS dans le repère du bateau) ($\mathbf{T}_B^{GPS \rightarrow S}$) corrigée de l'attitude du bateau :

$$\mathbf{T}_{LO}^{GPS \rightarrow S} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}_B^{GPS \rightarrow S} \quad (2.15)$$

Le second vecteur est celui de la mesure sonar (\mathbf{P}_{LO}). Le calcul doit aussi prendre en compte le délai entre l'acquisition sonar et l'acquisition GPS (Δt). En connaissant la vitesse v du bateau, le correctif $\Delta \mathbf{L}_s$ à ajouter est estimé de la sorte :

$$\Delta \mathbf{L}_s = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} \Delta t \cdot v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Ainsi, il est possible de calculer les coordonnées du point mesuré. Puisqu'il s'agit de coordonnées géographiques, il est nécessaire de convertir les apports en fonction des caractéristiques de l'ellipsoïde de référence (M le rayon de courbure au niveau du premier méridien et N le rayon de courbure au niveau du premier vertical).

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_{GPS} + \frac{T x_{LO}^{GPS \rightarrow S} + x_{P_{LO}} + \Delta L x_s}{M} \\ \lambda &= \lambda_{GPS} + \frac{T y_{LO}^{GPS \rightarrow S} + y_{P_{LO}} + \Delta L y_s}{N \cos \phi} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Le principe de géoréférencement des données sonar détaillé ici est toujours appliqué dans les logiciels de bathymétrie. Ainsi, lorsque les données de nos acquisitions sonar ont été générées par le logiciel HYPACK, c'est avec ces conventions que les informations sont données.

2.3.2 Méthodes existantes en cartographie mobile

2.3.2.a Acquisition des données de navigation

Dans cette section, nous abordons les différents capteurs et méthodes pouvant être employés pour pouvoir estimer la trajectoire d'un mobile. Pour commencer il convient de rappeler quelques définitions.

Tout d'abord, une distinction est faite entre les capteurs proprioceptifs et extéroceptifs. La première catégorie désigne les capteurs dont la mesure est interne au système (par exemple : l'accélération du mobile). Quant aux capteurs de la seconde catégorie, leurs mesures sont réalisées par rapport à l'environnement du mobile (par exemple : la perception optique). Toutefois, dans certains cas cette distinction devient ambiguë. Par exemple,

le compas est généralement considéré comme un capteur proprioceptif, or la mesure qu'il fournit est absolue puisque la référence est le nord magnétique. Par conséquent, il convient de différencier deux façons de construire la trajectoire. La première approche consiste à déterminer la position absolue du mobile dans un système de coordonnées défini. Le second procédé est la navigation à l'estime. Pour ce second cas, la position du système est estimée à partir d'une position précédente et des mesures du mouvement effectué entre ces deux positions. Il y a deux principaux inconvénients à cette méthode. Le premier est qu'elle nécessite de connaître la position initiale dans le système de coordonnées de référence. Le second est que les erreurs de mesure des capteurs s'accumulent au fur et à mesure des estimations de position. Suivant la précision de mesure des capteurs, la dérive engendrée par la navigation à l'estime peut être importante et dans ce cas la position calculée s'éloigne progressivement de la position réelle.

En cartographie mobile, le système de positionnement et d'orientation (POS) est traditionnellement composé d'un récepteur GNSS (*Global Navigation Satellite System*) et d'une centrale inertielle (en anglais IMU (*Inertial Measurement Unit*)), comme c'est le cas pour les travaux suivant : (GOULETTE, 2009) pour la cartographie mobile terrestre et (VAAJA et al., 2013) pour la cartographie mobile sur l'eau. L'ouvrage de (GREWAL et al., 2001) apporte les bases de cette méthode. Le premier capteur exploite les signaux émis par des satellites pour obtenir des coordonnées tridimensionnelles dans le système de coordonnées de référence. Quant à la centrale inertielle, elle est composée de trois gyromètres mesurant la vitesse angulaire suivant trois axes de rotation et de trois accéléromètres qui perçoivent l'accélération dans les directions des trois mêmes axes. Puis, par intégration successive, il est possible de déduire les vitesses linéaires puis les informations de translation et de rotation. Cette méthode bien connue est déployée sur les principaux systèmes industriels de cartographie. Toutefois, une limite substantielle à ce procédé est qu'il ne peut pas être utilisé en l'absence de signaux satellites, par exemple dans un environnement intérieur. En plus de la combinaison GNSS/CI (Centrale Inertielle), on rajoute souvent un odomètre pour estimer la distance parcourue en mesurant le nombre de tours d'une roue du mobile. Qui plus est, en plaçant des odomètres sur les roues appropriées et si le modèle cinétique du mobile est connu, alors la trajectoire planaire peut être déduite. Néanmoins, celle-ci est très souvent imprécise, car elle ignore les glissements qui peuvent advenir. Dans (ELLUM et EL-SHEIMY, 2002), les auteurs introduisent plusieurs dispositifs de cartographie mobile en détaillant leurs systèmes de positionnement et orientation.

L'autre moyen, issu de la topographie, permettant de mesurer les coordonnées d'un système mobile, est la tachéométrie (KELLER et STERNBERG, 2013). Pour ce faire, une station totale est installée sur le terrain. L'acquisition consiste à viser une cible pour mesurer le vecteur reliant la station à ce point. Cette solution est rarement employée en cartographie mobile classique, car sa mise en œuvre est complexe et elle nécessite de toujours pouvoir visualiser le mobile depuis la station totale. Toutefois, elle devient efficace lorsqu'il s'agit de mesurer la trajectoire d'un mobile dans les tunnels dans lesquels

aucun signal satellite n'est disponible (MÜLLER et al., 2012). Enfin, pour que cette méthode puisse être appliquée, il est nécessaire d'avoir un topographe comme opérateur.

Dans le cas spécifique de la bathymétrie, le couple GPS/CI est aussi couramment employé (IHO, 2005). Sur ou sous l'eau, le dispositif analogue à l'odomètre est le loch. Ce système a pour but de mesurer la vitesse de l'embarcation. Les moyens sont variés pour estimer cette grandeur (laisser filer une ligne, mesurer la vitesse de rotation d'une hélice), mais celle principalement déployée actuellement est basée sur la mesure de l'effet Doppler sur un signal acoustique. L'appareil mettant en œuvre cette technique est le *Doppler Velocity Loch* (DVL) (LURTON, 2010; OZOG et al., 2015). Par ailleurs, des capteurs historiques à la navigation maritime (HARE et al., 1995; PAULL et al., 2014) peuvent être employés, en particulier le compas (ou son évolution : le gyrocompas), ou encore des gyroscopes (PAULL et al., 2014). Ces capteurs ont pour avantage d'obtenir l'orientation du système de manière absolue. En effet, ces systèmes conservent le moment cinétique (ou moment angulaire), soit au moyen d'une masse mise en rotation (effet gyroscopique) soit en utilisant des gyromètres qui mesurent les rotations et des moteurs qui appliquent les rotations inverses. De cette façon, l'orientation du mobile peut être estimée par rapport à cet objet qui restera toujours orienté dans le système de coordonnées global.

En robotique, les capteurs employés sont souvent variés. Mais une méthode particulièrement utilisée dans ce domaine est de localiser le robot en percevant l'environnement dans lequel il évolue. De façon basique, il peut s'agir de la mesure des distances séparant le robot des objets qui l'entourent. Pour cela, un ou plusieurs télémètres sont disposés de manière à viser une ou plusieurs directions adéquates. Les technologies employées sont de type acoustique, laser ou encore infrarouge.

Ensuite, la vision optique est couramment exploitée. Son application a donné lieu au développement d'une méthode particulière : l'odométrie visuelle (FRAUNDORFER et SCARAMUZZA, 2012; SCARAMUZZA et FRAUNDORFER, 2011). Elle consiste à effectuer des prises de vue à fréquences régulières à partir d'une ou plusieurs caméras dans le but de calculer le déplacement accompli par le mobile entre les différentes poses. Plus exactement, les similitudes observées entre deux images permettent d'estimer la translation et la rotation reliant les conditions de prises de vue (position et orientation). De cette façon, l'odométrie visuelle est un moyen de navigation à l'estime. Cette technique a été mise en œuvre sur l'eau par (KRIECHBAUMER et al., 2015). L'évaluation qui en découle a démontré son efficacité sur de courtes distances (de l'ordre du mètre) comme moyen de substitution au GPS en cas d'absence du signal. Toutefois, cette technique est limitée à l'estimation de déplacements 2D. La mise en œuvre de photographies pour calculer des trajectoires utilise les principes de la photogrammétrie. Dans cette science, la modélisation 3D à partir de photographies comprend une étape d'estimation des positions et des orientations des prises de vue par ajustement de faisceaux. Dans le domaine de la robotique, la méthode homologue est appelée « structure par le mouvement », en anglais *structure from motion*,

SfM (SZELISKI, 2010). Des travaux utilisent cette approche pour calculer la trajectoire d'un mobile, comme (MOURAGNON et al., 2006). C'est cette méthode qui a été employée dans notre cas, c'est pourquoi elle sera détaillée à la section 3.4.1, puisqu'elle ne nécessitait pas l'ajout de capteurs supplémentaires au système.

Par ailleurs, le principe de l'odométrie visuelle peut s'appliquer à toutes les données décrivant l'environnement d'un robot. Ainsi, une première méthode très souvent appliquée consiste à se servir des plans 2D générés par la mise en rotation d'un télémètre. Ce dernier est généralement de type laser, par exemple (GUIVANT et al., 2000), mais des expériences ont été pratiquées avec d'autres types de technologies comme la technologie radar (CHECCHIN et al., 2010; VIVET, 2011). Cette approche est aussi mise à profit pour des données 3D. En effet, les scanners laser terrestres à haute cadence d'acquisition (technologie multi-fibres), développés récemment, ou encore la photogrammétrie produisent des nuages de points localement. Dès lors, l'alignement des modèles 3D conduit à l'estimation des translations et rotations qui les relient. Dans (PAPADOPOULOS et al., 2014) les auteurs calculent la trajectoire d'un bateau pour géoréférencer les mesures d'un SMF, obtenant ainsi le modèle 3D de structures semi-immergées. Cette méthode fait régulièrement appel aux algorithmes de type ICP (*Iterative Closest Point*) (BESL et MCKAY, 1992; CHEN et MEDIONI, 1992) ou encore aux techniques d'extraction de points d'intérêt. Dans (ROMAN et SINGH, 2005), les auteurs emploient un SMF pour aider à la localisation d'un robot subaquatique. Pour cela, ils calculent l'alignement de sous-modèles 3D générés en combinant plusieurs profils de points acquis par le sonar.

Ces méthodes basées sur la perception de l'environnement sont aussi susceptibles d'estimer la position du mobile de manière absolue. En effet, si des objets (repères) connus en coordonnées sont mesurés par le système, alors le géoréférencement de ces acquisitions est possible. Ce procédé nécessite le levé préalable de ces repères. Or cette étape s'avère difficile à mettre en œuvre et coûteuse en temps.

Une branche de la robotique pour laquelle la localisation dans l'espace est une problématique majeure est la robotique subaquatique (AUV et ROV). Les travaux de recherche traitant de ce sujet sont nombreux. Une synthèse des méthodes les plus employées est proposée par (PAULL et al., 2014). Beaucoup des méthodes évoquées précédemment peuvent être appliquées sous l'eau. Toutefois, les procédés qui établissent les coordonnées d'un mobile dans le repère général de coordonnées (GPS, suivi par tachéométrie) ne sont pas disponibles. Néanmoins, il existe une approche subaquatique similaire à celle mise en œuvre pour la localisation satellitaire. Elle regroupe plusieurs manières de procéder : *Ultra-Short BaseLine* (USBL), *Short BaseLine* (SBL), *Long BaseLine* (LBL)... La démarche est la suivante : plusieurs transpondeurs, dont la position est connue, émettent ou réceptionnent un signal acoustique. Par triangulation, il est ainsi possible de déterminer la position du robot. Il existe plusieurs manières de déployer cette méthode. Les transpondeurs peuvent être placés sous un bateau, ou encore sous des bouées, sur lesquels

sont fixés des récepteurs GPS (RIDAO et al., 2010), ou encore fixés au fond de l'eau. En plus de ce procédé, comme les mesures sonar offrent une perception de l'environnement, les techniques de localisation comme l'odométrie sont potentiellement applicables. Tout d'abord, les images acoustiques peuvent être exploitées comme dans les travaux de (HUANG et KAESS, 2015; JOHANSSON et al., 2010). Ensuite, dans plusieurs autres exemples d'expérimentations, notamment celles menées par (DOBKE et al., 2013; FAIRFIELD et al., 2007; LEONARD et DURRANT-WHYTE, 2012; MALLIOS, 2014; RIBAS et al., 2007), les auteurs ont recours à l'aptitude des sonars à mesurer des distances pour cartographier la scène environnante et ainsi pouvoir se repérer.

Enfin, dans la discipline qui se rapproche le plus de la nôtre, à savoir l'inspection des conduites de grand diamètre, la localisation est souvent sommaire. En effet, seule une coordonnée curviligne est produite au moyen du système de filoguidage (GRIFFITHS et GRAHAM, 2011; INGRAM, 2014), ce qui est insuffisant pour construire un modèle 3D précis à partir des données du ICP.

2.3.2.b Calcul de la trajectoire

En pratique, les capteurs sont généralement combinés, bénéficiant ainsi des avantages des uns et des autres. L'exemple le plus courant est celui de l'association des méthodes de localisation GNSS et inertielle. Dans ce cas, comme la fréquence d'acquisition du GNSS est faible, l'ajout d'une centrale inertielle au système permet de fournir des mesures intermédiaires à une fréquence plus élevée. De plus en l'absence de signaux satellitaires sur de courtes périodes, la navigation inertielle permet de toujours produire une information de navigation. Ensuite, la centrale inertielle seule génère une dérive dans l'estimation de la trajectoire que les mesures GNSS corrigent. Enfin, la combinaison de ces deux récepteurs permet de supprimer les erreurs de mesures générées par l'un ou l'autre capteur.

De manière plus générale, la combinaison des dispositifs de localisation a pour but d'améliorer la précision de la trajectoire. La difficulté est de fusionner l'ensemble des données fournies par les capteurs pour obtenir la solution la plus optimale, c'est-à-dire, la plus précise. Sur ce sujet un grand nombre de méthodes ont été développées (filtre bayésien, filtre de Kalman et ses évolutions, filtre particulaire). Ces algorithmes ayant été principalement appliqués dans le domaine de la robotique, ils intègrent le plus souvent une contrainte de localisation en temps réel. De cette manière, le processus de navigation est récursif.

La méthode de fusion des données la plus connue est celle développée par Kalman (KALMAN, 1960). Elle est illustrée par la figure 2.18. Ce processus est récursif. Ainsi,

l'estimation est mise à jour à chaque mesure par les capteurs. Deux grandes étapes composent cette méthode :

- La première est une phase de prédiction. Il s'agit d'estimer l'état du système au moment $k+1$ à partir de son état au moment k et grâce aux valeurs des commandes de déplacement envoyées au système et/ou des mesures effectuées par des capteurs proprioceptifs. De plus, la précision de cette estimation est calculée ainsi que la mesure supposée du capteur extéroceptif.
- La seconde étape consiste à mettre à jour l'estimation de l'état du système au moment $k+1$ à partir des valeurs prédites et de la nouvelle mesure du capteur extéroceptif. Ce calcul est pondéré afin d'obtenir un résultat optimal, c'est-à-dire la solution pour laquelle la précision de l'état du système au moment $k+1$ est la meilleure. Pour cela, l'estimation du poids est basée sur la différence entre la prédiction de la mesure du capteur extéroceptif et celle mesurée. De ce calcul découle la détermination du gain de Kalman qui est le poids appliqué.

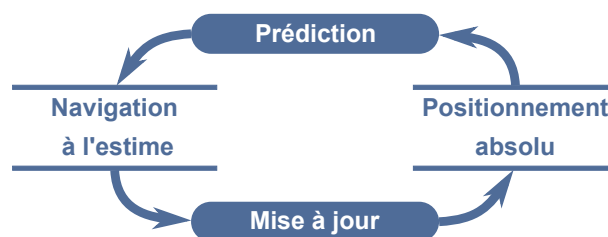


FIGURE 2.18 – Principe du filtre de Kalman appliqué au calcul de la trajectoire d'un mobile.

Le filtre de Kalman est à l'origine employé pour des déterminations employant des fonctions linéaires. Ainsi, la première évolution apportée à cet algorithme a été de l'étendre aux fonctions non linéaires (en anglais *Extended Kalman Filter*, EKF). Pour cela, les fonctions sont linéarisées localement (GREWAL, 2011).

Du reste, la fusion des données des capteurs de localisation pour déterminer la trajectoire d'un système peut aussi être effectuée *a posteriori*. Le grand avantage de cette approche est que le calcul de la trajectoire n'est plus effectué de manière récursive, mais il utilise l'ensemble des mesures de l'état du système. Pour cela, les méthodes traditionnelles d'optimisation sont employées, comme les moindres carrés. Ensuite, la trajectoire obtenue sur le terrain peut être corrigée grâce aux méthodes de lissage. Pour cela, deux approches se distinguent. La première consiste à appliquer le filtre de Kalman, mais cette fois-ci dans « les deux sens » (BRYSON et FRAZIER, 1963). La combinaison des deux déterminations permet d'améliorer la résolution (NARAYANA, 2011). Ensuite, les méthodes traditionnelles de régression peuvent être employées, notamment en ajustant des splines cubiques.

Lors du calcul de la trajectoire, un autre procédé est très souvent utilisé, il s'agit du SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) (BAILEY et DURRANT-WHYTE, 2006; DURRANT-

WHYTE et BAILEY, 2006). Le principe de cette approche est d'établir la carte de l'environnement tout en se localisant dessus (voir figure 2.19). Il existe un certain nombre de procédés développés dans ce but. Leur construction diffère suivant plusieurs critères.

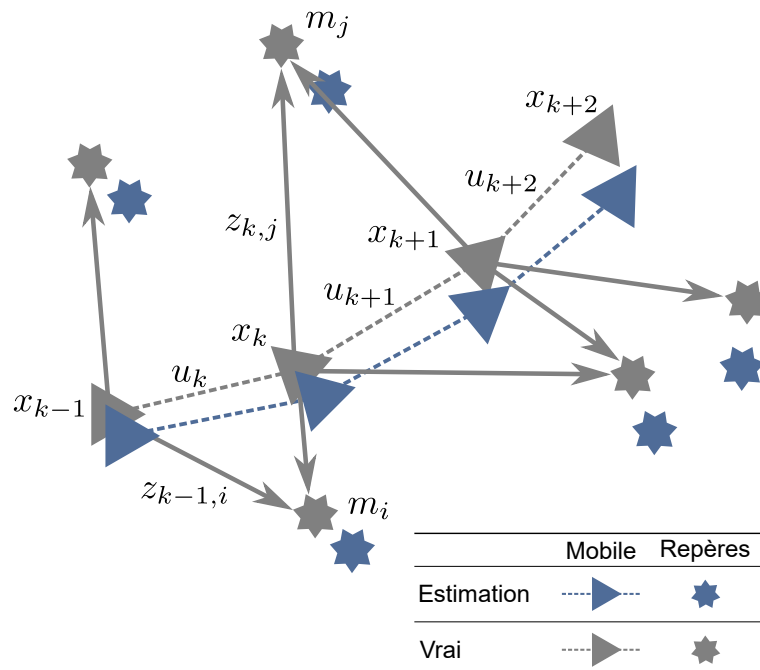


FIGURE 2.19 – Principe de la méthode SLAM. La figure est issue de (DURRANT-WHYTE et BAILEY, 2006). Dans cette illustration, x_k est la position du mobile à l'instant k ; m_i et m_j sont des repères observés par le système; $z_{k,j}$ est la mesure effectuée par le système du repère i à l'instant k ; u_k est le vecteur de déplacement du système entre les instants $k - 1$ et k .

Une première distinction entre les méthodes concerne le choix du capteur pour décrire l'environnement du système. Les technologies utilisées sont généralement de type optique ou laser, mais des expérimentations ont aussi été menées avec des appareils radar (voir (VIVET, 2011)). Sous l'eau, le procédé SLAM a largement été employé en utilisant des données sonar ou optiques. L'article de (GUTH et al., 2014) rapporte plusieurs de ces travaux.

En second lieu, la nature de la carte créée après chaque mesure des capteurs varie. Tout d'abord, elle peut être métrique ou topologique. En ce qui concerne les cartes métriques, il existe plusieurs types de représentation. Tout d'abord, la carte peut être construite en utilisant l'ensemble des données fournies par le capteur perceptif, cette méthode est très coûteuse en termes de temps de calcul et de mémoire. La seconde façon de procéder est de détecter des éléments caractéristiques dans la scène numérisée, comme des plans des lignes saillantes, etc. Cette méthode dépend de la capacité à extraire l'information des données brutes. Pour cela, la méthode RANSAC (*RANdom SAmple Consensus*) est généralement employée. Le dernier type de carte consiste à représenter l'espace suivant une grille. Lors d'une acquisition de l'environnement, à chaque cellule il est indiquée si une surface a été mesurée. Il s'agit alors de représenter l'occupation de l'espace.

En troisième lieu, la méthode SLAM doit répondre à deux problématiques. La première concerne la fusion des données en tenant compte de l'incertitude des mesures, mais aussi de la détermination des positions du mobile et de la carte générée. Ces deux dernières incertitudes procèdent par transmission des erreurs au fur à mesure des estimations. Le principal bénéfice de cette méthode apparaît lorsque le système détecte un environnement déjà « connu ». De cette manière, la trajectoire « ferme une boucle ». Cet événement a pour effet de diminuer soudainement l'incertitude sur la position du système et sur l'estimation de la carte. Dans ce cas, le processus SLAM converge. Pour la fusion des données, on retrouve de nouveau les algorithmes de type Kalman, comme EKF-SLAM (*Extended Kalman Filter - SLAM*), ainsi que la méthode de filtres à particules, par exemple dans l'algorithme Fast-SLAM. Une troisième approche consiste à représenter la trajectoire suivant un graphe. Lorsqu'une boucle est close, l'ensemble du graphique est optimisé. La seconde problématique concerne la gestion de la carte. Il s'agit de faire le lien entre les perceptions locales et la carte globale.

L'apport d'une technique SLAM, dans le cas des tunnels navigables semble *a priori* limitée. En effet, la trajectoire ne comporte pas de boucle puisqu'elle est quasi-linéaire.

Conclusion du chapitre 2

- Pour cartographier sous l'eau les capteurs employés peuvent être de type optique, laser ou sonar. Lorsque le milieu présente une très grande turbidité, seule une technologie sonar est exploitable.
- Le principe de la mesure sonar est de mesurer le temps trajet aller-retour d'une onde acoustique. En connaissant la vitesse de déplacement de l'onde dans le milieu, on obtient la distance entre l'appareil et la cible.
- Les caractéristiques de la mesure sonar dépendent à la fois de la forme de l'antenne d'émission et de réception du signal, de la fréquence de celui-ci et de sa puissance.
- On retiendra que de la longueur d'onde du signal dépendent la résolution en distance de la mesure, la directivité du faisceau d'acquisition ainsi que la portée.
- Les technologies sonar peuvent être classées selon deux types : *imageur* et *sondeur*. L'accès à la 3D étant plus direct avec la seconde catégorie de capteurs qu'avec la première, c'est un appareil de type sondeur qui a été choisi et plus exactement le sondeur multifaisceaux.
- Le sondeur multifaisceaux a pour avantage d'acquérir un grand nombre de points simultanément sous la forme de profils. Pour numériser en 3D avec cet appareil, la fauchée d'acquisition du capteur doit balayer l'objet à mesurer. La construction du modèle 3D est obtenue en alignant les profils de points. Pour cela, la trajectoire du mobile sur lequel est fixé l'appareil doit être connue.
- Pour obtenir la trajectoire du bateau en l'absence de GPS, nous devons chercher une autre méthode. De toutes les autres techniques qui s'offraient à nous, c'est la photogrammétrie qui a été choisie car elle ne nécessitait pas l'ajout de capteurs supplémentaires au système.

3

Méthode pour la modélisation 3D des tunnels navigables

L'approche mise en œuvre dans la thèse pour modéliser en 3D les tunnels navigables conjugue les domaines de la photogrammétrie et de la bathymétrie. Dans ce but, le prototype d'acquisition conçu comprend deux sous-systèmes. Le premier produit des images de la voûte et des piédroits. Le second mesure des profils de points à partir d'enregistrements sonar. Le procédé de construction 3D appliqué utilise la photogrammétrie non seulement pour obtenir le modèle des voûtes et piédroits mais aussi la trajectoire du bateau nécessaire au positionnement des données sonar. Les modèles des parties sous l'eau et au dessus de l'eau sont ainsi modélisées en 3D, dans le même système de coordonnées. Ce procédé est schématisé dans la figure 3.1.

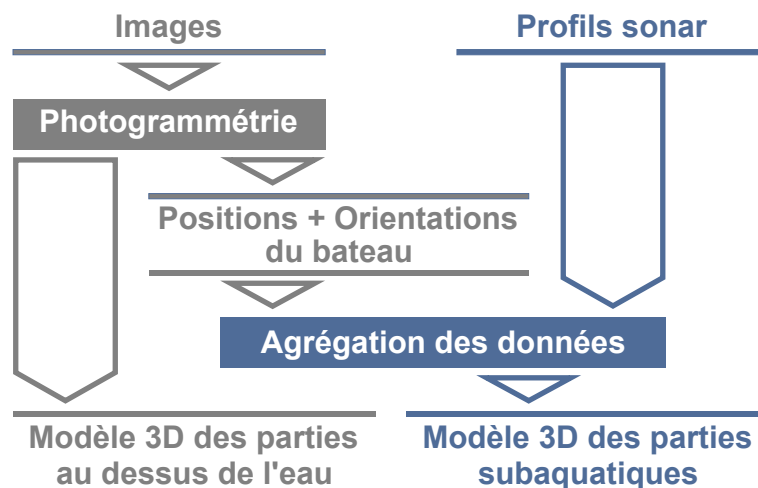


FIGURE 3.1 – Diagramme de l'approche appliquée pour la construction du modèle 3D des tunnels navigables.

Ce chapitre est organisé comme suit. Tout d'abord, nous présentons le système d'acquisition employé et, dans un second temps la procédure appliquée pour le calibrer. Puis,

nous exposons sa mise en œuvre dans le tunnel-canal de Niderviller. Ensuite, la méthode développée pour obtenir le modèle 3D entier du tunnel est expliquée. Enfin, les premiers résultats produits avec cette approche sont donnés.

3.1 Le système d'acquisition

La conception du prototype d'acquisition a pour but de mettre en œuvre l'approche de modélisation 3D que l'on souhaite évaluer. Celui-ci est introduit par la figure 3.2. Il reprend un premier prototype d'acquisition d'images élaboré au sein de l'équipe du Cerema. La base du dispositif est une structure modulaire installée sur un bateau. Celle-ci est composée de barres en aluminium assemblées à l'aide de noix de serrage. Sur ce cadre sont fixés les capteurs de vision optique ainsi que le système d'éclairage. De prime abord, il y a deux avantages à pouvoir modifier le système *in situ* : la disposition des capteurs peut être corrigée et la structure est adaptable à différents types d'embarcations. Ainsi, lors des campagnes de mesure au tunnel Niderviller, le système a été disposé sur un brise-glace (le Val de Sarre) et au tunnel de Revin, sur un pousseur (le Bosphor). Le sonar est fixé à la proue, de manière indépendante au système de prises de vues. Nous nous sommes limités à cet ensemble de capteurs afin d'étudier s'ils suffisent pour obtenir le modèle 3D du tunnel entier. Le système d'acquisition est ainsi relativement simple et assez économique.

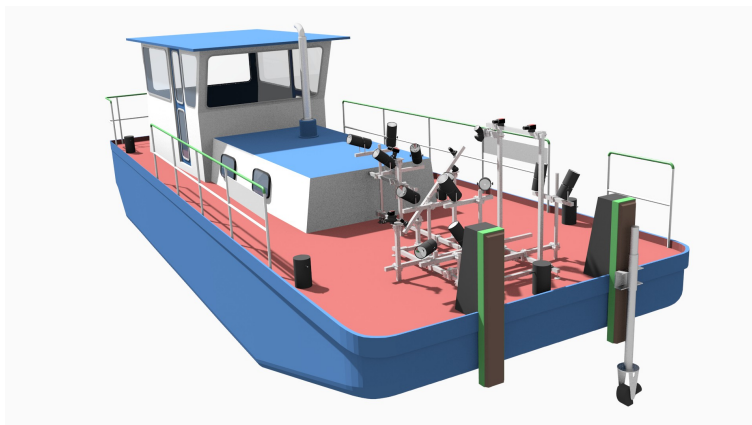


FIGURE 3.2 – Illustration du système d'acquisition monté sur un bateau (ici, le Val de Sarre). La partie imagerie est placée sur le pont et le sonar est immergé à l'avant.

Dans l'intention d'évaluer les trajectoires estimées, le déplacement du bateau a été mesuré par tachéométrie. Pour cela, deux cibles placées sur le bateau ont été suivies par une station totale.

3.1.1 Les capteurs embarqués

3.1.1.a Le système imageur

Le système imageur compte six caméras de type industriel, dont quatre constituent deux paires stéréos. Cet ensemble est illustré par la figure 3.3. Le montage stéréoscopique comprend deux caméras fixées de manière à ce que la direction de leurs prises de vues soit parallèle et aussi perpendiculaire à la base stéréoscopique (segment formé par les centres de perspective des deux caméras). Cette disposition a pour principal objectif de simplifier le calcul photogrammétrique pour mesurer en 3D, comme expliqué dans la section 3.4.1.a. La première paire stéréoscopique vise la voûte du tunnel et la direction de la base est perpendiculaire à l'axe du tunnel. L'inclinaison de cette base est modifiable afin d'acquérir des images de l'ensemble de la voûte (voir figure 3.6, p. 69). La seconde paire stéréoscopique est placée de manière à capturer les images du piédroit se trouvant du côté tribord lors des acquisitions. La base stéréoscopique est placée à l'horizontale et sa direction suit l'axe du tunnel. Lors de la reconstruction 3D du tunnel grâce aux photos produites par ces quatre caméras, une courbure a été observée dans le modèle obtenu. Plusieurs travaux font état de ce phénomène lors du calcul photogrammétrique de projets linéaires (FRASER, 1996; NOCERINO et al., 2014; TOURNADRE et al., 2015). Dans ces publications, les auteurs recommandent l'ajout de prises de vue convergentes pour limiter la déformation. Dans notre cas, les deux caméras restantes visent le piédroit tribord de manière oblique.

Les caméras employées sont les caméras Pike F210C fabriquées par Allied Vision Tech (AVT). Les principales caractéristiques de ces caméras sont résumées dans le tableau 3.1. Ces appareils intègrent un capteur CCD (*Charge Coupled Device*) progressif et l'image est donc acquise instantanément. Cette technologie permet de limiter les artefacts d'entrelacement lors des acquisitions en mouvement.

À cet ensemble de caméras a été adjoint un appareil photographique haute définition (Canon EOS Mark III) sur lequel est monté un objectif grand angulaire de type *fish-eye*.

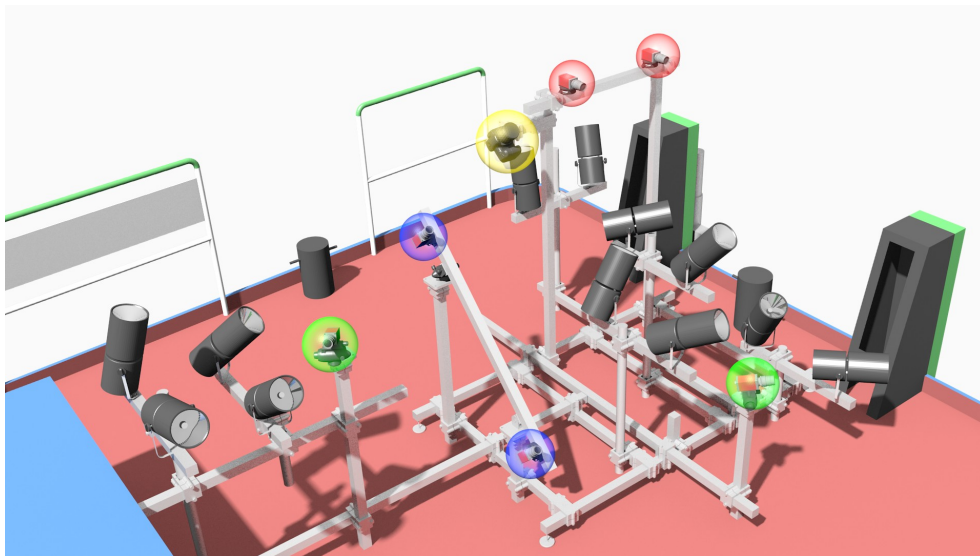


FIGURE 3.3 – Illustration du système imageur. Les caméras de la première paire stéréoscopique sont en rouge. Les caméras de la seconde paire stéréoscopique sont en bleu. Les caméras destinées aux prises de vues obliques sont en vert. Enfin, l'appareil photographique sur lequel est monté un objectif fish-eye est en jaune.

Tableau 3.1 – Caractéristiques des appareils de prise de vue photographiques employés.

		Pike F210C (AVT)	Canon EOS5D Mark III
Taille du capteur	pixel	1920 × 1080	3480 × 2560
	physique (mm)	14,3 × 8,0	36 × 24
Focale	(mm)	12,5	14

Toutefois les images issues de cet appareil ne sont, jusqu'à présent, pas prises en compte dans le traitement photogrammétrique.

Le système imageur comprend aussi 12 projecteurs de 150 Watts chacun (également représentés sur la figure 3.3). Ils sont répartis de manière à obtenir un éclairage aussi uniforme que possible de la zone photographiée.

Tableau 3.2 – *Tableau des caractéristiques du SMF le MB1350*

Fréquence acoustique	1,35 MHz
Taille du faisceau	1°/1°
Espacement des faisceaux	0,18°
Nombre des faisceaux	256
Ouverture de la fauchée	45°
Fréquence d'acquisition	40 Hz
Portée maximale	30 m

3.1.1.b Le sondeur multifaisceaux

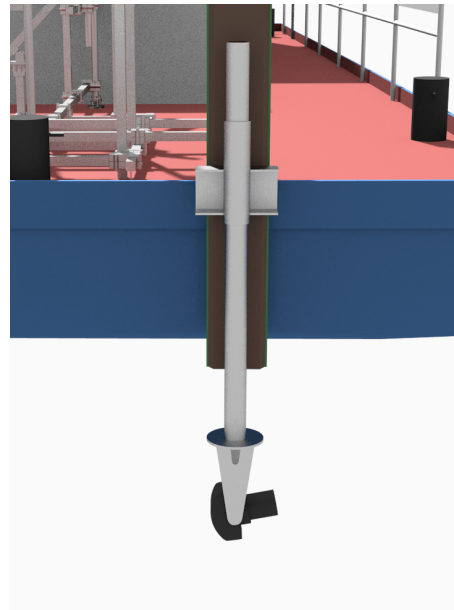
Après l'étude des différentes technologies sonar existantes et de leur potentialité d'application dans les tunnels navigables, le dispositif choisi pour la numérisation des parties subaquatiques est le sondeur multifaisceaux (voir la section 2.2.3). Dans le cadre de la thèse, il s'agit du MB1350 conçu par la société Blueview (Teledyne), dont les principales caractéristiques sont fournies dans le tableau 3.2.

La très haute fréquence de l'onde acoustique émise (1,35 MHz) est une propriété originale de ce système. Cette particularité permet d'atteindre une haute résolution dans l'estimation de la distance puisque la longueur d'onde associée est de l'ordre de 1 mm. Mais dans un même temps, la portée du système est réduite à 30 m, ce qui est notablement court pour un SMF (voir le tableau 2.1, p. 49), puisque de tels capteurs sont généralement destinés au levé des fonds marins. Ainsi, au vu de cette caractéristique, le MB1350 est adapté à l'inspection et non à l'exploration des profondeurs. L'autre propriété à considérer est l'ouverture du faisceau d'acquisition. En effet, la divergence des faisceaux est importante (1°), comparée à un système d'acquisition laser : elle est, par exemple, de 0,01° pour le scanner laser terrestre Focus (Faro). L'évaluation quantitative des capacités de ce système pour l'imagerie 3D en canal a fait l'objet de travaux au cours de la thèse dont les résultats sont donnés dans la section 4.2. Enfin, une dernière caractéristique de ce sonar à prendre en compte est l'ouverture de la fauchée qui est limitée à 45°. Dès lors, un seul passage avec le SMF ne permet pas d'obtenir le levé complet du canal.

Pour être intégré au prototype d'acquisition, le SMF est immergé à l'aide d'un tube amovible (voir figure 3.4). Pour que le sonar acquiert des profils du canal, il est orienté perpendiculairement à l'axe du tunnel et de manière à avoir un plan de fauchée vertical. La fixation de l'appareil au tube comprend un système de rotation à crans de manière à modifier l'inclinaison du sonar au besoin.



(a)



(b)

FIGURE 3.4 – (a) Photographie du SMF MB1350 de Blueview (image tirée du site du constructeur). (b) Illustration du SMF attaché à l'avant du bateau grâce au système de mise à l'eau.

3.1.2 Les configurations d'acquisition

Le mode opératoire appliqué a été défini suivant la capacité d'acquisition du système. En effet, les ouvertures limitées des différents capteurs et les dimensions du tunnel ne permettent pas de lever les structures en un seul passage. Les champs de vision des caméras projetés approximativement sur la paroi du tunnel sont représentés sur la figure 3.5. Pour obtenir la couverture photographique complète du demi-tunnel (partie émergée), deux inclinaisons de la barre stéréo dirigée vers la voûte sont nécessaires (0 et 40°). En ce qui concerne l'acquisition de la moitié du canal par le sonar, trois orientations de ce dernier sont requises (voir figure 3.6). L'angle entre l'axe du profil d'acquisition et l'horizontale a été successivement fixé à 11,25°, 45° et 90°. De cette façon, il est nécessaire d'effectuer trois passages dans un sens pour lever la moitié du tube. Ainsi, en procédant par allers-retours, l'intégralité du tunnel-canal est mesurée.

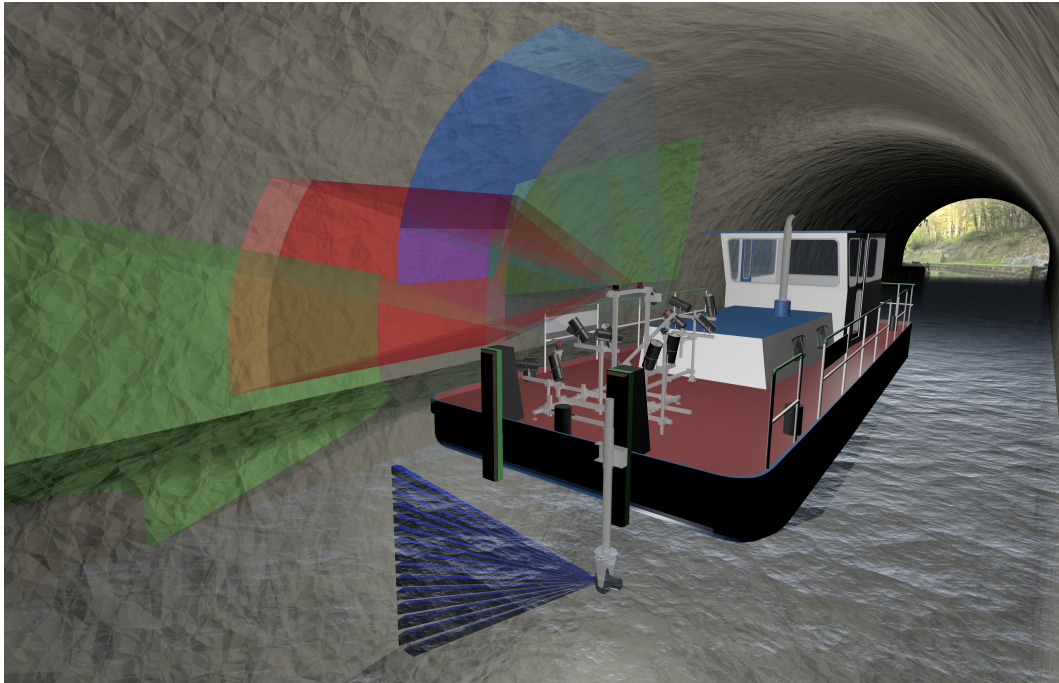


FIGURE 3.5 – Illustration des surfaces acquises lors du déclenchement de la mesure des caméras et du sonar.

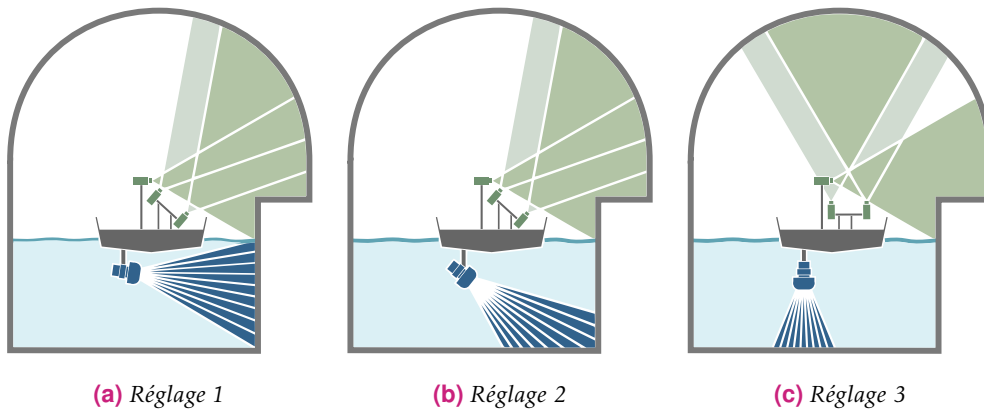


FIGURE 3.6 – Vue schématique des trois configurations (3 angles de sonar et 2 angles du capteur stéréo) utilisées pour numériser un demi-tunnel.

3.1.3 La synchronisation

En cartographie mobile, la synchronisation des données est cruciale. En effet, comme le système d'acquisition est mobile, le référentiel dans lequel sont effectuées les mesures est différent à chaque instant. Par conséquent, la agrégation des données issues des différents capteurs est aussi basée sur les temps auxquels elles ont été acquises.

La problématique de l'horodatage des acquisitions s'est particulièrement posée dans ce travail puisque, pour des raisons pratiques, aucun dispositif dédié à cette tâche n'a été employé. En effet, chaque sous-système du prototype d'acquisition était géré par un intervenant différent et nous n'avions pas à notre disposition de système de pilotage centralisé. Malgré cela, pour la bonne marche de notre dispositif, il a été nécessaire de respecter les deux conditions suivantes :

- Le déclenchement de l'ensemble des caméras doit être synchrone.
- Les données enregistrées par les deux sous-systèmes doivent être datées dans la même échelle de temps.

Déclenchement synchrone des caméras

Dans notre approche nous considérons l'ensemble des caméras comme un réseau de points, ce que l'on appellera le bloc caméra, dont on cherche à déterminer la position au cours du temps. Par conséquent, déclencher simultanément l'ensemble des prises de vues permet de s'affranchir d'une étape supplémentaire de synchronisation *a posteriori* des caméras entre elles, ce qui est susceptible d'entraîner de nouvelles imprécisions.

Dans ce but, un signal en créneau est produit par un Générateur de Basses Fréquences (GBF) externe (Tektronik AFG 3022C) à une fréquence de 5 Hz et envoyé directement à l'ensemble des caméras, au moyen de câbles coaxiaux, pour déclencher les prises de vue. Plusieurs expérimentations ont été menées en amont afin de vérifier la bonne synchronisation des caméras (FOUCHER et al., 2016b).

Un premier test permit de mesurer le signal reçu par les caméras. De cette manière, la synchronisation des signaux envoyés pour le déclenchement a été vérifiée. Pour aller plus loin, une seconde expérimentation a été de photographier avec l'ensemble des caméras un disque en rotation sur lequel des repères avaient été disposés. Cette expérience permit de confirmer que les acquisitions des caméras étaient bien synchrones. De plus, la cadence de déclenchement fut aussi contrôlée à l'aide d'un oscilloscope et la fréquence effective des acquisitions correspondait bien à 5 Hz, voir (GUITTET, 2012).

Synchronisation des prises d'images et des acquisitions sonar

Pour synchroniser les prises de vue des caméras avec les acquisitions du SMF, il est nécessaire que l'horodatage des données soit exprimé dans la même échelle de temps, dans notre cas le temps UTC (*Coordinated Universal Time*).

En effet, de son côté, l'horodatage des données sonar est contrôlé par le logiciel de bathymétrie HYPACK. Un dispositif est associé à cet outil pour transmettre le temps généré par un récepteur GPS à la fois à l'ordinateur sur lequel sont enregistrées les données subaquatiques et au sonar lui-même (*HYPACK®User Manual 2015*). De cette manière à chaque profil de points est joint le temps UTC auquel il a été mesuré.

Concernant les images, les temps correspondants à chaque déclenchement du système de caméras sont déterminés suivant l'horloge de l'ordinateur. Pour obtenir ces heures dans l'échelle de temps UTC, il a suffit de déterminer le biais entre les deux horloges. Dans ce but, un récepteur GPS est branché à l'ordinateur qui enregistre les images. Un outil logiciel (NMEA Recorder, <http://www.bytefusion.com>) permet de réceptionner le message NMEA envoyé par l'antenne à une fréquence d'1 Hz et de l'horodater à l'heure à laquelle il est réceptionné. Il est vrai qu'aucun signal satellitaire n'est reçu dans le tunnel. Toutefois, la dérive de l'antenne GPS est suffisamment faible (oscillateur interne de type TCXO) pour que la précision du temps donné par ce capteur reste inférieure au millième de seconde.

Moyennant ces précautions, on peut considérer que les données sont horodatées dans un même référentiel de temps, permettant ainsi leur agrégation.

3.2 Le calibrage du système d'acquisition

3.2.1 Le calibrage des capteurs

Préalablement à l'expérimentation, un calibrage du dispositif est réalisé. En premier lieu, chaque sous-système, imageur et bathymétrique, est calibré.



FIGURE 3.7 – (a) Photographie de la mire Zhang, acquise durant la procédure de calibrage. La mire est adaptée pour qu'elle soit manipulée par une personne. (b) Image du processus de calibrage suivant la méthode de Tsai. Les dimensions de la mire ($3,05 \times 2,44\text{m}$) font que la distance entre les caméras et la cible est sensiblement la même que lors des acquisitions dans le tunnel.

Au-dessus de l'eau, les paramètres intrinsèques de chaque caméra sont estimés. Il s'agit principalement de la focale, du point principal et des coefficients pour la correction de l'effet de distorsion de l'objectif photographique. Ces grandeurs sont essentielles au calcul photogrammétrique puisqu'elles estiment les paramètres mathématiques de projection des caméras, ce que nous présenterons dans la section 3.4.1.a. Pour ce faire, la procédure appliquée est celle développée dans (ZHANG, 1999). Les données nécessaires au calibrage sont un ensemble d'images d'une mire plane, montrée figure 3.7a, selon neuf orientations.

L'autre calibrage appliqué au système imageur concerne les caméras en stéréovision. Celles-ci sont utilisées pour estimer le déplacement du bateau afin de positionner grossièrement les images le long du tunnel, comme nous l'expliquerons à la section 3.4.2.a. La méthode de calibrage employée est basée sur celle exposée dans (TSAI, 1987). Sa mise en œuvre nécessite l'acquisition d'une mire en damier, montrée figure 3.7b, par chacune des paires en stéréovision.

Sous l'eau, le seul paramètre de calibrage qui a été relevé pour la mesure bathymétrique, est la célérité du son dans le canal. L'estimation de cette donnée a été effectuée grâce aux mesures de température et de salinité de l'eau ainsi que de pression. Le capteur employé à cet effet est le CastAway-CTD conçu par la société SonTek.

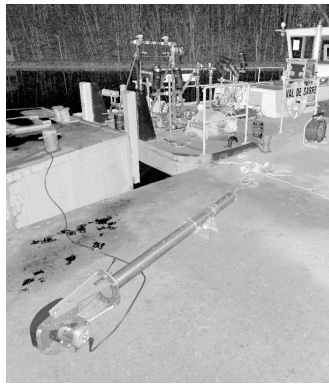
3.2.2 Calibrage géométrique global du système

La détermination de la géométrie du système d'acquisition est un protocole quasi indispensable au traitement des données acquises en cartographie mobile, car elle permet de prendre en compte les décalages physiques entre les capteurs, ou bras de levier, lors de la agrégation de leurs mesures.

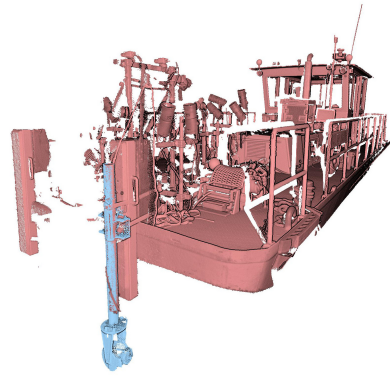
En pratique, deux méthodes sont employées pour estimer la géométrie du système. La première est la mesure physique des capteurs entre eux. Celle-ci peut être réalisée sommairement avec un simple mètre ou avec des méthodes topographiques. Un des principaux défauts de cette méthode est qu'elle ne permet pas d'avoir accès au centre d'acquisition des capteurs. Seul le boîtier de ces derniers est mesuré. Pour obtenir l'information souhaitée, les données de fabrication du constructeur doivent être disponibles et exactes. Ensuite, la précision des mesures de position peut être insuffisante pour estimer certains paramètres, par exemple, l'orientation d'un appareil de visée. Pour illustrer ce propos, prenons deux points, mesurés sur un appareil, inter-distants d'une dizaine de centimètres. Une erreur de 1 mm sur la position d'un des points, transversalement à la visée, aura pour conséquence à 10 m, un écart de 10 cm entre le point réellement visé et celui estimé.

L'autre façon de procéder consiste à effectuer l'étalonnage du système à partir des mesures des capteurs. Une première solution consiste à effectuer des acquisitions dans un environnement déterminé avec précision. En cartographie mobile, cet environnement peut être un ensemble de cibles disposées judicieusement et dont la position est connue. L'autre méthode aussi appliquée pour déterminer le bras de levier est d'appliquer des procédures afin de révéler les différents non-alignements. La bathymétrie a souvent recours à cette seconde solution (IHO, 2005). Le processus appelé *patch test* a été défini dans les années 1970 afin de calibrer les systèmes intégrant un sondeur multifaisceaux (HERLIHY et al., 1989). Un grand nombre de logiciels de ce domaine le préconisent toujours. Toutefois, le procédé est qualitatif. De plus, certains paramètres à calibrer ne sont pas indépendants (CLARKE, 2003).

Dans le cadre de la thèse, le calibrage géométrique du système est effectué en mesurant directement les positions des capteurs. En effet, l'intégralité du dispositif d'acquisition a été modélisée en 3D grâce à un Scanner Laser Terrestre (SLT). Cependant, la partie immergée du système ne pouvant pas être relevée directement, le sonar et la structure d'immersion sur lequel il est fixé ont été mesurés à terre. Pour obtenir un modèle du système entier, les deux numérisations, à bord et à terre, sont alignées à partir de la partie émergée de la structure d'immersion du sonar, à savoir l'axe, le sommet du tube et les poignées.



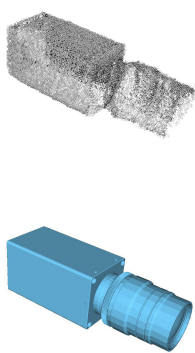
(a)



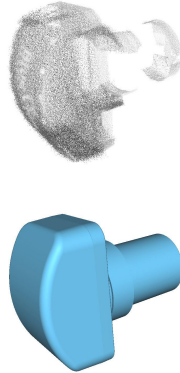
(b)

FIGURE 3.8 – (a) Image d'intensité générée à partir de la numérisation laser à terre du sonar et de son système d'immersion. (b) Nuage de points du système entier obtenu après alignement des deux modèles laser des deux sous-systèmes représentés en bleu et rouge.

Les centres d'acquisition de chaque capteur dans le nuage de points sont estimés ensuite dans ce modèle 3D. Cette opération a été possible car les modèles CAO (Conception Assistée par Ordinateur), montrés figure 3.9 sont rendus disponibles par les constructeurs. Or, dans ces modèles 3D sont définis les centres d'acquisition. Par conséquent, la position relative de ces derniers est obtenue en positionnant les modèles CAO dans le nuage de points du système.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.9 – Illustration des nuages de points (ligne du haut) et des maillages CAO (ligne du bas) d'une caméra PIKE (a), du SMF (b) et d'un prisme actif (c) utilisé pour le suivi tachéométrique.

Concrètement, les parties du nuage global correspondant aux capteurs sont extraites. Les nuages de points segmentés sont montrés figure 3.9. De cette manière, pour chaque capteur est calculé l'alignement entre le nuage de points et le modèle CAO correspondant. Un algorithme de type ICP a été implanté dans ce but.

L'algorithme ICP (BESL et MCKAY, 1992; CHEN et MEDIONI, 1992) est un procédé itératif dont l'objectif est de minimiser la distance entre deux nuages de points 3D en appliquant une transformation isométrique à l'un des nuages. Chaque itération comprend principalement trois étapes :

1. Pour chaque point du nuage à aligner est repéré le point le plus proche du nuage de référence.
2. À partir des appariements, les paramètres de rotation et de translation sont estimés en minimisant les distances entre les points de chaque couple.
3. La transformation est appliquée au nuage à déplacer.

Cette méthode a deux principaux inconvénients : elle est inopérante en l'absence de détails saillants et elle nécessite une première approximation proche de la solution souhaitée. Par ailleurs, le résultat final dépend de la densité du nuage de points.

Dans notre cas, le modèle de référence est le nuage de points laser et le modèle à aligner est le modèle CAO. L'alignement recherché est donc celui d'un maillage construit à partir d'un ensemble de triangles formant une surface continue et d'un nuage de points. Par conséquent, l'algorithme originel a été modifié pour prendre en compte cette caractéristique. En effet, l'estimation de la transformation 3D est effectuée, non plus à partir des plus proches points entre les deux nuages, mais grâce au calcul des points du maillage les plus proches des points du nuage de référence. Pour cela, il s'agit d'estimer pour chaque point P_i du nuage le point le plus proche P'_i appartenant au maillage M .

L'approche employée est celle proposée par (BÆRENTZEN et AANÆS, 2002) et qui a été développée par (SCHLAGER, 2016) dans le langage R. Elle revient à exprimer l'équation de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 d(P_i, M) &= \inf_{P'_i \in M} \|P_i - P'_i\| \\
 &= \inf_{j \in [1, N]} \left(\inf_{P'_{i,j} \in T_j} \|P_i - P'_{i,j}\| \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Il s'agit de calculer, pour chaque triangle T_j du maillage M qui comprend N triangles, le point $P'_{i,j}$ le plus proche du point P_i . Ainsi, le point P'_i du maillage le plus proche de P_i est le point pour lequel la distance $P'_{i,j}P_i$ est minimale. La détermination du point $P'_{i,j}$ pour chaque face nécessite de savoir si P'_i est situé dans le triangle, ou sur un de ses côtés ou sommets. La solution est de calculer la projection orthogonale $P''_{i,j}$ du point P_i dans le plan du triangle T_j . Afin de savoir si le point $P''_{i,j}$ appartient au triangle ou aux éléments qui le constituent, le plan du triangle est subdivisé en régions tel que décrit par la figure 3.10. Pour construire ces régions, à chaque sommet sont déterminées les droites orthogonales aux deux côtés adjacents. En fonction de la région à laquelle appartient le point $P''_{i,j}$, il est possible de déterminer de quel élément le point P_i est le plus proche :

- si $P''_{i,j}$ appartient au triangle alors $P'_{i,j} = P''_{i,j}$ (figure 3.10b);
- si $P''_{i,j}$ appartient à une région en gris-bleu, alors $P'_{i,j}$ est le projeté orthogonal de P_i , sur l'arête dont la région est issue (figure 3.10c);
- si $P''_{i,j}$ appartient à une région verte, alors $P'_{i,j}$ est le sommet dont la région est issue (figure 3.10d).

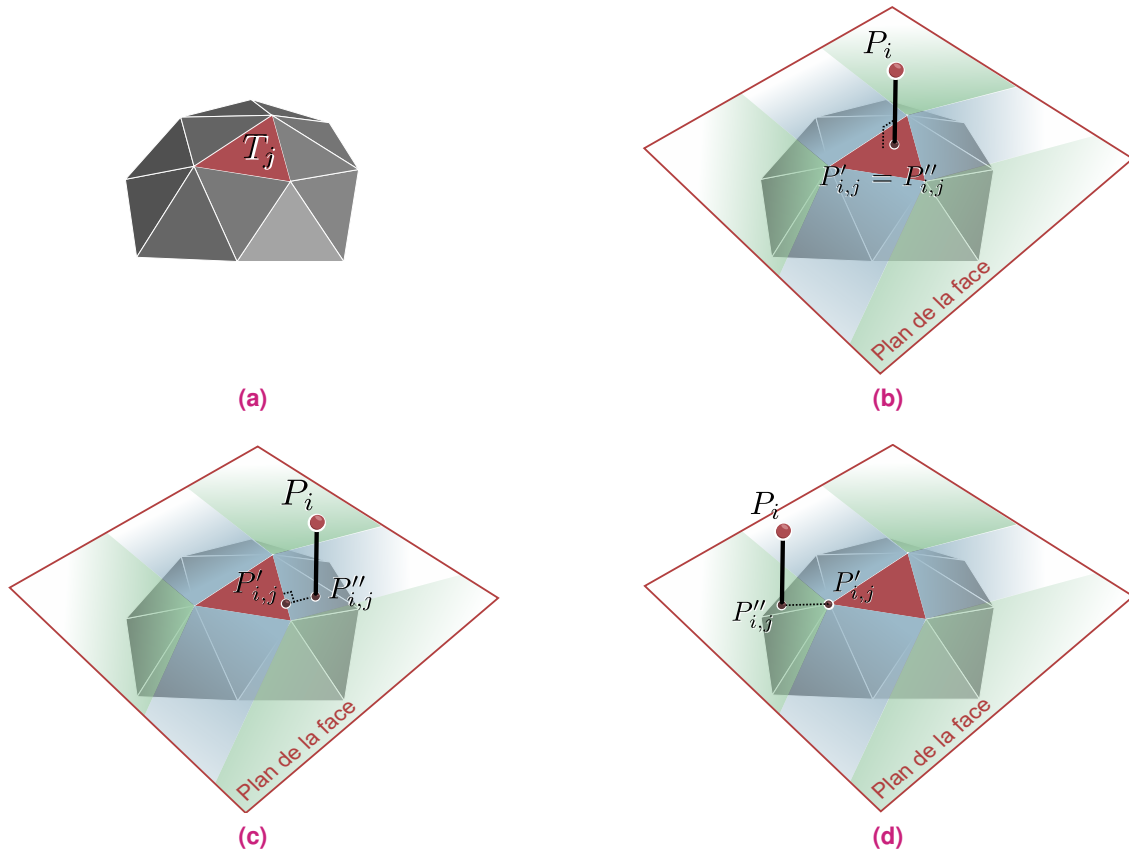


FIGURE 3.10 – Procédure d'estimation du point $P'_{i,j}$ de la face T_j d'un maillage, le plus proche d'un point P_i (voir texte).

Concernant le calcul de la transformation 3D, effectué à chaque itération de l'algorithme ICP, la technique sélectionnée est issue de la méthode dite de Procruste (GOLUB ET VAN LOAN, 2012) expliquée dans la section 3.4.3.a.

Au moyen de cette méthode nous avons déterminé à nouveau les distances entre les caméras formant les couples stéréos (bases stéréos). En effet, ces grandeurs avaient aussi été estimées lors du calibrage suivant la méthode de Tsai, voir section 3.2.1. En comparant les valeurs des deux bases stéréos obtenues grâce aux deux méthodes (laser et Tsai), nous observons des écarts de 3 mm pour l'une et de 8 mm pour l'autre. Bien que ces différences incluent les erreurs des deux méthodes, elles restent acceptables.

Au terme de cette opération de calibrage géométrique du système, les coordonnées des centres optiques des caméras, c'est-à-dire le bloc caméra calibré et le centre d'acquisition

Tableau 3.3 – Tableau des distances inter-capteurs exprimées en mètre.

	cam1	cam2	cam3	cam4	cam5	cam6	sonar	prisme1
cam2	0.499							
cam3	1.556	2.027						
cam4	1.472	1.589	1.617					
cam5	1.591	1.904	0.986	0.984				
cam6	0.930	1.390	0.739	1.472	0.999			
sonar	3.059	2.910	3.598	2.865	2.797	3.102		
prisme1	5.493	5.979	4.311	5.862	5.200	4.822	7.595	
prisme2	9.513	10.006	8.128	9.504	8.860	8.769	11.321	4.295

et l'orientation du sonar sont obtenus dans le repère attaché au bateau. L'ensemble des distances inter capteurs sont données dans le tableau 4.3. Comme cela a été mentionné au début de cette section, la détermination de l'orientation des capteurs à partir de l'estimation de la position de leurs boîtiers dans l'espace peut être insuffisamment précise. Pour cette raison, nous n'utilisons pas l'estimation de l'orientation des caméras pour orienter le système mais les positions des centres de perspectives qui forment un réseau de points rigide (bloc caméra). Toutefois, l'orientation du sonar dans le référentiel du système est nécessaire pour pouvoir orienter les acquisitions subaquatiques. Cet aspect aura une incidence sur les résultats obtenus. Par conséquent, la méthode pour calibrer le système nécessitera dans le futur d'être améliorée en utilisant les mesures du sonar, les prises de vue des caméras et une procédure adaptée.

Enfin, ce procédé a aussi été appliqué pour déterminer la position des centres des prismes actifs par rapport aux autres capteurs du système.

3.3 Mise en œuvre du système d'acquisition

3.3.1 Équipement du tunnel test

En vue de rattacher nos travaux au système de coordonnées national, comme la législation le demande (Décret n° 2006-272 du 3 mars 2006 modifiant le décret n° 2000-1276), il a été nécessaire d'établir, au préalable des campagnes de mesure, un réseau de points topographiques dans le tunnel test de Niderviller (décrit dans la section 1.1.3).

Tout d'abord un relevé topographique précis a été réalisé par l'équipe de l'INSA préalablement à la thèse. Pour cela, la position de deux ensembles de points situés à chaque entrée du tunnel a été déterminée en premier grâce à des acquisitions GNSS (points rouges figure 3.11). Des mesures de nivellement ont aussi été effectuées sur ces points, car la précision de l'altitude déterminée par moyen GNSS reste moindre. Les coordonnées planaires de ces points ont été calculées dans l'ancien système de référence français Lambert I (croix bleues figure 3.11). À l'avenir ces données devront être converties dans le système de coordonnées en vigueur, à savoir le RGF98 CC49. Quant à l'altitude, elle est donnée suivant le système NGF-IGN 69. Ensuite, un cheminement polygonal a été opéré avec une station totale afin d'implanter de nouveaux points à proximité et dans le tunnel.

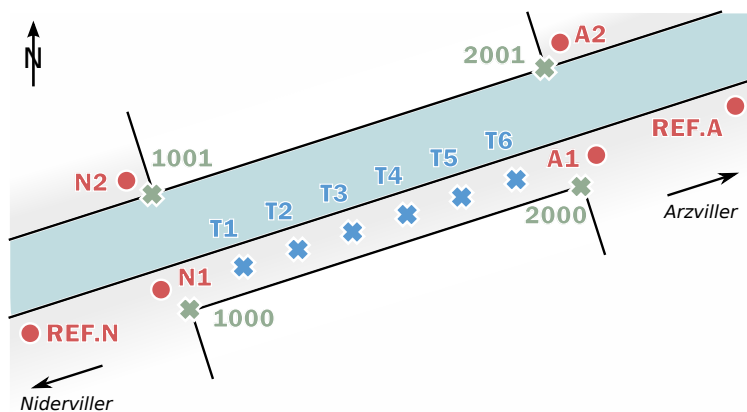


FIGURE 3.11 – Croquis des points de références implantés dans le tunnel. Les 6 points rouges ont été déterminés par des acquisitions GNSS, les 6 croix bleues sont les points calculés par polygonation et les points 1000-1001-2000-2001 sont des points de détails mesurés pour obtenir l'axe du tunnel de manière précise.

L'approche adoptée pour se localiser en abscisse curviligne dans le tunnel se base sur des points de repères déterminés en coordonnées. Un réseau de plaquettes indiquant l'abscisse, apposées sur le piédroit de la banquette en respectant une interdistance d'environ 10 mètres, existait avant le début du projet. Certaines plaquettes étaient dégradées, voire absentes. Plutôt que de les utiliser directement, nous avons préféré remettre à jour ce système en doublant chaque plaquette par un catadioptré, car ces éléments sont faciles à détecter dans les images, voir figure 3.12a. Un outil avait été développé au sein de l'équipe pour déterminer la position des catadioptrés de manière automatique dans les images. Toutefois, l'estimation de la position de points caractéristiques au niveau de ces objets est plus difficile que s'il s'agissait de trouver le centre d'un disque. Ainsi, il serait plus avantageux d'installer des catadioptrés circulaires. D'autres cibles ont été également placées dans le tunnel (cibles lasergrammétriques et photogrammétriques), voir figures 3.12b et 3.12c. Tous ces objets (catadioptrés, cibles), ont été levés par tachéométrie.

En vue d'expérimentations dans le tunnel-canal de Revin, nous y avons installé ce dispositif préparatoire. Pour équiper ce souterrain de 224 m, deux jours nous ont été nécessaires.

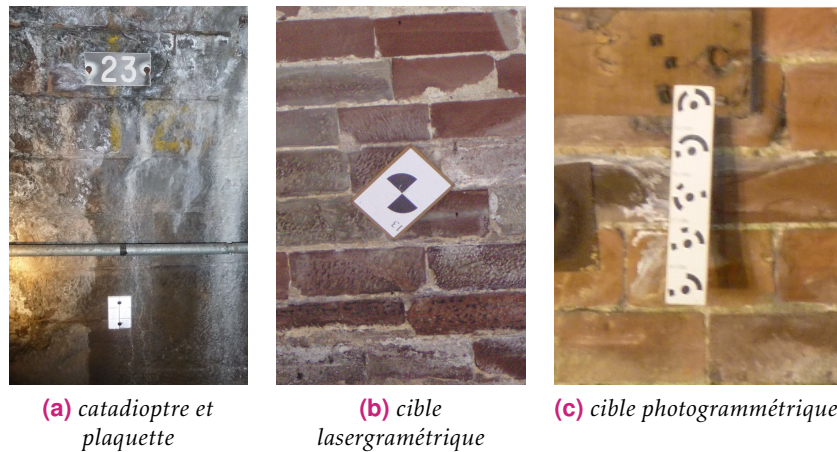


FIGURE 3.12 – Points de repères visibles sur les prises de vue photographiques. Les cibles photogrammétriques (c) ne sont plus utilisées car elles sont trop dégradées.

Comme dans le tunnel de Niderviller, cet ouvrage possède une banquette, ce qui facilite les travaux de topographie. Dans le cas des tunnels sans voie de service, cette opération est possible. Toutefois, sa mise en application est compliquée puisqu'elle nécessite d'installer des consoles sur les piédroits pour supporter une station totale. Enfin, dans les plus grands tunnels, le nombre de catadioptrés à installer et à mesurer est important. Par exemple dans le tunnel-canal de Riqueval (5670 m), environ 570 catadioptrés devraient être placés pour équiper un côté du souterrain. Dans ce cas, l'opération d'équipement est coûteuse en termes de temps et d'argent.

3.3.2 Expérimentation dans le tunnel-canal test

La campagne d'acquisition des données utilisées dans cette thèse a eu lieu le 3 décembre 2015. Elle a nécessité le concours de plusieurs intervenants. Tout d'abord, VNF a permis l'accès au tunnel en fournissant un bateau (le Val de Sarre) et son pilote. Le Cerema s'est employé à la mise en place du dispositif et a réalisé l'acquisition des images. L'entreprise Sub-C Marine est intervenue pour la production des données sonar. Enfin, les opérations de suivi tachéométrique du bateau ont été effectuées par l'INSA de Strasbourg ainsi qu'une personne de la société Trimble. Au total, une dizaine de personnes étaient impliquées.

Lors de l'expérimentation dans le tunnel, la vitesse du bateau était approximativement de 1m/s. Ainsi, la traversée du tunnel dure environ 8 minutes. Le déclenchement des caméras est effectué à une fréquence de 5 Hz. La distance parcourue par le système entre deux acquisitions d'images est d'environ 20 cm. Cette valeur donne une idée du décalage



FIGURE 3.13 – Image du système lors de l'expérimentation dans le tunnel de Niderviller.

observé entre les images d'une même caméra puisque le déplacement du bateau est quasi linéaire. La vitesse de déplacement du bateau a aussi été prise en compte pour fixer les temps d'exposition des caméras de manière à ne pas avoir de flou de bougé. Ce dernier était de 4 ms Pour ce qui est du sonar, la fréquence d'acquisition des profils est de 40 Hz. De cette façon, la distance séparant deux profils de points est approximativement 2,5 cm. Au total, lors d'un passage, environ 15000 images et 20000 profils sonar sont acquis. Par conséquent, le volume de données produit est important, et cela doit être pris en compte dans le développement des méthodes de traitement. Le tableau 3.4 définit les réglages appliqués pour chacun des passages.

Tableau 3.4 – Sens de traversée du tunnel et orientations des capteurs pour les différents passages dans le tunnel. Le sens aller correspond à un passage de Niderviller vers Arzviller (avec la banquette à droite du bateau dans le sens d'avancement). La paire de caméras stéréovision dont l'orientation est modifiée est celle dirigée vers la voûte. Les orientations des capteurs sont schématisées dans la figure 3.6, p. 69.

N° de passage	Sens	orientations		Figure
		sonar	caméras stéréovision	
1	Aller	11,25°	oblique (40,36°)	3.6a
2	Retour	11,25°	oblique (40,36°)	3.6a
3	Aller	45°	oblique (40,36°)	3.6b
4	Retour	45°	oblique (40,36°)	3.6b
5	Aller	90°	vertical (0°)	3.6c
6	Retour	90°	vertical (0°)	3.6c

Un dispositif complémentaire a été mis en place lors de l'expérimentation dans le but d'évaluer la trajectoire obtenue par photogrammétrie. Il s'agit du suivi tachéométrique du bateau, voir figure 3.14a. Pour cela, deux stations totales ont été placées à l'intérieur du tunnel, sur la banquette, à 100 mètres de chaque extrémité. Chacun de ces appareils



(a)



(b)

FIGURE 3.14 – Photographies du suivi d'un prisme à l'aide d'une station totale (a) et du prisme actif (b).

a mesuré la position d'un prisme placé sur le bateau avec une fréquence de 10 Hz, voir figure 3.14b. Les prismes utilisés sont actifs, c'est-à-dire qu'ils émettent un signal lumineux codé de manière à ce que la visée de la station totale soit toujours fixée sur eux. Les mesures effectuées ont été horodatées par les stations totales. Toutefois, nous avons été confrontés au fait que les temps fournis sont imprécis. Nous pourrions corriger ces valeurs avec la méthode décrite dans la section suivante (section 3.3.3) et qui a été appliquée pour les images. Mais pour être employée, il faut que la fréquence d'acquisition effective soit constante. Or, comme pour (CHAMPIER, 2014), nous avons observé un systématisme de prise de retard et rattrapage dans les acquisitions. Dans notre cas, nous avons aussi des coupures dans les mesures dues à une mauvaise visibilité des prismes. Par conséquent, la méthode développée pour les images n'a pas pu être appliquée à la tachéométrie. Les horodatages n'étant pas corrigés, ils ne pourront pas être pris en compte pour l'évaluation de la trajectoire.

3.3.3 Pré-traitement des images

Plusieurs traitements sont nécessaires afin d'exploiter les images acquises par les caméras dans notre méthode.

La première opération est la colorisation des images puisque les données brutes fournies par les caméras ne forment pas une image au sens de la vision par ordinateur. En informatique, les pixels d'une image comprennent trois canaux (RVB : rouge vert bleu), alors que l'image produite par les caméras utilisées n'en contient qu'un seul. En effet, pour

faciliter la fabrication et pour des raisons de coût, le capteur CCD de ces caméras n'est composé que d'une seule matrice de photodétecteurs, contrairement à d'autres appareils qui en possèdent trois. L'acquisition des trois couleurs RVB est obtenue en appliquant un filtre fréquentiel en mosaïque, ou filtre Bayer, qui sélectionne la couleur à laquelle il est sensible pour chacun des pixels suivant un schéma particulier. Dans le but d'obtenir une image RVB de même résolution que l'image brute, les informations RVB sont interpolées pour chacun des pixels de l'image. La difficulté de cette opération est de correctement restituer les contours des objets photographiés.

Dans un second temps, la luminosité des images est uniformisée, car l'éclairage de la scène n'est pas parfaitement homogène. Ce traitement a été effectué grâce à la technique du « *flat field* » (CHARBONNIER et al., 2014). Il s'agit de diviser chaque image pixel à pixel par un masque en niveau de gris issu de la moyenne globale de toutes les images de la séquence d'acquisition à laquelle elle appartient. À cette étape, la moyenne de l'image ajustée est aussi ajustée pour obtenir un rendu visuel homogène tout au long de la séquence.

Ensuite, les images stéréoscopiques ont été rectifiées à partir des paramètres obtenus suite au calibrage suivant la méthode de (TSAI, 1987), voir section 3.2.1. À l'issue de cette opération, ces images sont reconstruites de manière à ce que la configuration stéréoscopique normale, décrite section 3.4.1.a, soit parfaitement respectée. Ces images rectifiées seront seulement utilisées pour le calcul de OVS définie dans la section 3.4.2.a.

Enfin, il est nécessaire de corriger l'horodatage des images qui a été effectué par l'ordinateur auquel les caméras sont reliées. En effet, en observant le marquage des temps pour chaque image d'une même acquisition, nous avons remarqué que contrairement à la réalité, les instants indiqués sont différents. De plus, la fréquence des acquisitions des images enregistrée ne correspond pas à celle effective de 5 Hz et elle est irrégulière. Afin d'obtenir un horodatage cohérent avec le réel, un processus en trois étapes a été appliqué.

1. En premier lieu, nous avons considéré pour chaque acquisition l'heure de la première image enregistrée comme étant l'heure de déclenchement du système des caméras. De cette manière, nous avons un temps par acquisition.
2. En observant les périodes inter acquisitions, un schéma apparaît. Ce schéma dure une seconde et est composé de 3 périodes plus longues que celle effective et une plus courte. Ainsi, nous supposons qu'une correction de l'horodatage est effectuée toutes les secondes. Par conséquent, nous ne conservons que les temps issus de la correction.
3. À partir de ces temps, les horodatages intermédiaires sont interpolés de manière à obtenir des temps d'acquisition qui ont une fréquence de 5 Hz.

De cette façon, nous obtenons un horodatage conforme à la réalité dans l'échelle de temps de l'ordinateur auquel sont reliées les caméras.

3.4 Construction du modèle 3D

Pour construire le modèle 3D du « tube entier », la méthode employée utilise la photogrammétrie à la fois pour obtenir le modèle 3D des parties émergées et pour fournir la trajectoire du bateau nécessaire au traitement des données sonar. Ainsi, dans cette section, nous rappelons d’abord les principes de la photogrammétrie, puis nous expliquons sa mise en œuvre dans le cadre de la thèse et enfin nous présentons la méthode appliquée pour positionner les données sonar à partir du calcul photogrammétrique.

3.4.1 Principes de la photogrammétrie

La photogrammétrie désigne l’ensemble des méthodes qui permettent « de définir la forme et la position d’objets à partir de photographies » (KRAUS et WALDHÄUSL, 1998). Les premiers travaux de photogrammétrie sont apparus 20 années après l’invention de la photographie. Pendant des siècles, la cartographie a tiré profit de cette technique grâce à la photographie aérienne. L’avènement du numérique a considérablement fait évoluer la photogrammétrie, en particulier par l’invention des caméras numériques, mais aussi grâce au décuplement des possibilités de calcul au moyen des ordinateurs, ou encore par le partage des outils de traitement entre les communautés photogrammétrie et vision par ordinateur.

3.4.1.a Modèle de formation des images

Le matériau de base de la photogrammétrie est l’image. Dès lors, les fondements de la méthode découlent de la façon dont est générée une photographie.

Pour former une image d’un objet, la lumière renvoyée par celui-ci est captée par l’appareil photographique. Les rayons lumineux sont focalisés au moyen d’une ou plusieurs lentilles pour ensuite être projetés sur une surface photosensible : la pellicule autrefois, le capteur photographiques de type CCD ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) aujourd’hui. Généralement, ce fonctionnement est exprimé mathématiquement par la projection centrale d’un point sur un plan (modèle sténopé). Le procédé est illustré par la

figure 3.15. Le centre de projection est le centre optique de l'appareil photographique (O) et le plan sur lequel est projeté le point est le plan où se forme l'image que l'on appellera plan image. De cette façon, un point de l'espace tridimensionnel est défini dans le plan de l'image de manière bidimensionnelle. Cette transformation géométrique est établie par la relation de colinéarité 3.2, voir (LUHMANN et al., 2014, p. 261). Elle permet de calculer les coordonnées images (x', y') d'un point P_i à partir :

- de ses coordonnées dans l'espace tridimensionnel (X, Y, Z),
- des paramètres extrinsèques que sont :
 - les coordonnées (X_0, Y_0, Z_0) du centre optique (O) dans l'espace tridimensionnel;
 - l'orientation de la prise de vue (ω, ϕ, κ), qui correspond à l'orientation de la normale du plan image. Dans l'équation de colinéarité, ces angles sont introduits par les indices (r_{11}, \dots, r_{33}) de la matrices de rotation $\mathbf{R}_{\omega\phi\kappa}$;
- des paramètres intrinsèques de la caméra que sont :
 - les coordonnées image (x'_0, y'_0) du point principal (O') qui est la projection du centre optique (O) sur le plan image;
 - la distance principale (c) qui est la distance entre le centre optique (O) et le point principal (O'). Elle correspond à la focale lorsque la mise au point est à l'infini.

En réalité, le faisceau de projection n'est pas exactement linéaire, le système optique dévie le rayon, ce qui déforme l'image. Ainsi, l'équation de colinéarité contient aussi les corrections ($\Delta x'$ et $\Delta y'$) à apporter pour rectifier cette distorsion.

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + c \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (3.2)$$

L'expression des coordonnées 3D d'un point à partir de la relation de colinéarité révèle qu'une infinité de solutions est possible. Géométriquement, ces solutions sont représentées par une droite qui correspond au faisceau de projection (OP_i) sur la figure 3.15. Dans le but de lever cette ambiguïté, deux méthodes sont possibles : soit en ayant connaissance d'informations complémentaires sur l'objet observé comme l'altitude, soit en utilisant au moins une autre image de l'objet qui est prise d'un autre angle de vue. En photogrammétrie, c'est la deuxième manière qui est privilégiée. Dans ce cas, un point est déterminé dans l'espace tridimensionnel grâce à l'intersection spatiale d'un minimum de deux faisceaux issus d'un même point et formés grâce aux deux prises de vue distinctes.

La photogrammétrie a souvent recours un outil mathématique spécifique, à savoir la géométrie épipolaire. Ce modèle établit la géométrie de projection de tout point visible

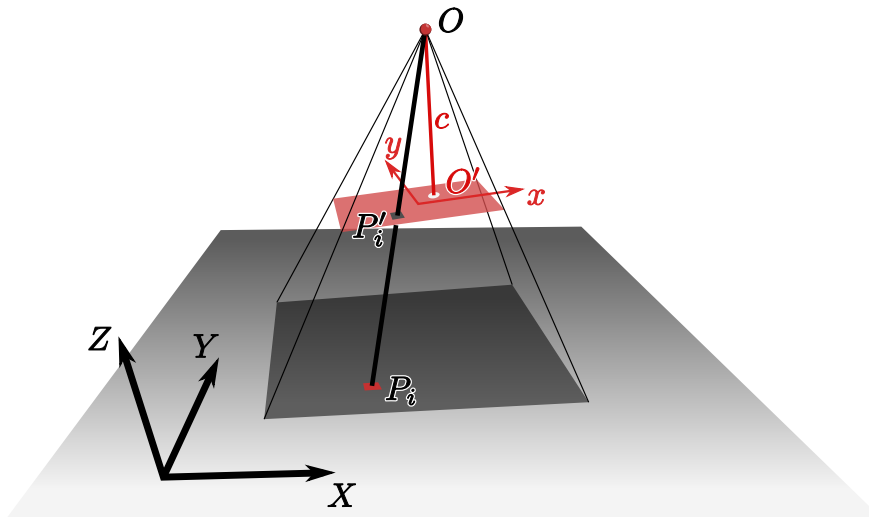


FIGURE 3.15 – Illustration du modèle sténopé

sur un couple d'images, comme cela est illustré par la figure 3.16. Dans ces conditions, un plan dénommé épipolaire est formé par un point P de la scène photographiée et par les centres de perspectives (O_1 et O_2) des deux caméras. L'intersection du plan avec les plans images (les plans dans lesquels sont constituées les images) forme des lignes appelées lignes épipolaires. Cette géométrie révèle qu'un point projeté sur une image apparaîtra *ipso facto* sur la ligne épipolaire de la seconde image. Ainsi, la recherche d'un point homologue d'un point d'une image sera limitée à cette ligne sur l'autre image.

Il existe un cas de figure particulièrement intéressant en stéréovision, appelé cas normal (LUHMANN et al., 2014) ou géométrie épipolaire rectifiée (voir la figure 3.16 à droite). Dans ce cas, les lignes épipolaires sont toutes parallèles à la base stéréo (segment constitué par les centres de perspectives des deux prises de vue). De cette manière, les recherches de points homologues entre les deux photographies et les calculs nécessaires à l'obtention de la 3D sont simplifiés. De nombreuses applications tirent bénéfices de cette propriété. Dans le cadre du projet, cette géométrie particulière de stéréovision est utilisée par OVS présentée dans la section 3.4.2.a. Toutefois, les conditions de prise de vue requises pour l'application de cette méthode sont difficilement atteignables physiquement. C'est pourquoi nous avons appliqué une procédure de calibrage afin de rectifier les images dans un second temps pour qu'elles correspondent au cas normal et aussi pour les corriger des effets de distorsion optique, voir section 3.2.1.

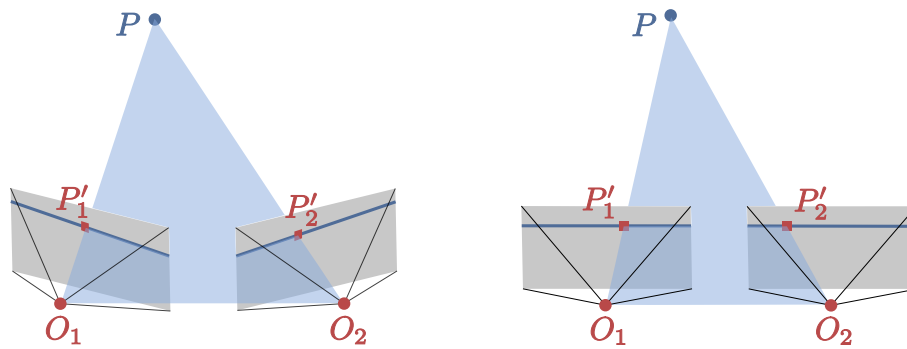


FIGURE 3.16 – Illustration du principe de la géométrie épipolaire, dans le cas général (à gauche) et dans le cas normal ou géométrie épipolaire rectifiée (à droite). Schéma inspiré de (LUHMANN et al., 2014).

3.4.1.b Ajustement de faisceau et reconstruction 3D

Dans le cas général, des données nous sont nécessaires afin d'effectuer une mesure à partir de deux ou plusieurs images. En effet, à de rares exceptions près, les paramètres internes, soit la focale, le point principal et les paramètres de distorsion de la lentille, et les paramètres externes, à savoir la position et l'orientation des prises de vue, ne nous sont pas connus. Un moyen pour déterminer les paramètres internes est d'exécuter une procédure de calibrage comme celle effectuée lors de l'expérimentation de la thèse.

Quant aux paramètres externes, la méthode d'estimation globalement déployée est l'alignement des faisceaux, en anglais *bundle adjustment*, voir (LUHMANN et al., 2014). Le principe de cette approche est d'utiliser des points, appelés points homologues (en anglais : *tie points*), visibles sur un minimum de deux images (voire trois pour avoir une information de précision) afin de calculer par triangulation la position de l'appareil (ou des appareils) lors des prises de vue. Pour cela, le modèle mathématique utilisé est basé sur les équations de colinéarités 3.2. La complexité de l'estimation réside dans la linéarisation des expressions mathématiques et dans la prise en compte d'un grand nombre d'observations pour déterminer beaucoup d'inconnues. Pour cette opération, plusieurs méthodes d'optimisation peuvent être employées (Gauss-Newton, Levenberg–Marquardt, etc.) (BÖRLIN et GRUSSENMEYER, 2013). En plus des paramètres externes, cette technique permet d'estimer simultanément les paramètres internes. Pour obtenir cette autocalibration, les paramètres internes sont considérés comme de nouvelles inconnues à déterminer. Les principaux défauts de cette pratique sont d'augmenter le temps de calcul et d'accroître le nombre de degrés de liberté du problème d'optimisation. Enfin, en utilisant comme données de départ uniquement des photos, l'ajustement des faisceaux fournit seulement une orientation des prises de vue relative. De plus, le modèle généré n'est pas à l'échelle. Afin d'obtenir une modélisation à l'échelle et, d'autant plus, déterminée dans

un système de coordonnées connu, d'autres informations sont nécessaires. Celles-ci sont généralement des coordonnées 3D de points aisément détectables dans les images. De cette manière, de nouvelles contraintes sont prises en compte dans le calcul d'ajustement des faisceaux.

Cette méthode connaît un grand essor depuis les années 1980, notamment grâce au développement de la puissance de calcul informatique. Une autre évolution importante concerne la détermination des points homologues. Cette opération effectuée, à l'origine de manière manuelle, a été automatisée grâce à la définition de descripteurs d'images performants (HARRIS, SIFT, SURF etc.), pour la plupart invariants aux principales transformations photométriques et géométriques rencontrées en pratique (KRIG, 2014). Ceux-ci sont des vecteurs de caractéristiques qui permettent de localiser dans l'image des points particuliers, appelés points d'intérêt. Ensuite, la mise en correspondance des points est opérée. Cette tâche a largement bénéficié des progrès de l'estimation robuste au cours des trois dernières décennies. L'algorithme RANSAC (FISCHLER et BOLLES, 1981) est souvent employé à cet égard.

Une fois l'orientation des images estimée, un dernier processus consiste à générer un nuage de points 3D à partir du modèle photogrammétrique. Pour ce faire, la méthode consiste à chercher pour chaque pixel des images son homologue dans les autres images. Dans ce but, plusieurs algorithmes ont été développés, voir (REMONDINO et al., 2014). Le modèle peut, enfin, être maillé et texturé à partir des informations image disponibles.

L'emploi de la photogrammétrie pour la numérisation 3D des tunnels-canaux, semble judicieux pour plusieurs raisons. La première est que le matériel à déployer est simple d'utilisation. De plus, les surfaces du tunnel présentent de nombreux détails qui contribuent à augmenter la faculté de numérisation de cette méthode. Enfin, en plus de procurer les données spatiales de l'objet mesuré, la photogrammétrie permet aussi d'accéder aux informations de radiométrie. Les deux principales difficultés d'application dans les tunnels sont liées à l'éclairage de la scène et au traitement des données qui s'avère être long pour de grands projets comprenant un très grand nombre d'images.

3.4.2 Mise en œuvre de la photogrammétrie

L'emploi de la photogrammétrie pour la modélisation 3D des parties émergées des tunnels navigables a amené au développement de méthodes particulières que nous allons maintenant présenter.

Tout d'abord, dans le but de faciliter la construction du modèle 3D par photogrammétrie des parties émergées, un outil d'odométrie visuelle simplifiée (OVS) a été développé au sein de l'équipe de recherche du Cerema pour déterminer de manière approximative la position des images dans le tunnel.

Enfin, deux méthodes ont été employées pour reconstruire le modèle 3D des parties émergées du tunnel et pour fournir les données nécessaires au calcul de la trajectoire du bateau. La première utilise l'outil Micmac et la seconde, le logiciel Photoscan.

3.4.2.a L'Odométrie Visuelle Simplifiée (OVS)

Le principe de cette méthode est d'exploiter la paire stéréo orientée dans le sens de déplacement du bateau pour estimer son mouvement apparent. Comme les images stéréoscopiques sont rectifiées, voir section 3.3.3, de sorte que les vues soient parfaitement parallèles, la disparité (déplacement apparent, en pixels) entre les deux images d_s est inversement proportionnelle à la profondeur, Z :

$$Z = \beta \frac{b_s}{d_s} \quad (3.3)$$

où β est la focale exprimée en pixels et b_s est la distance entre les deux centres de perspective des images, voir (SZELISKI, 2010, p. 473). Ces deux paramètres sont estimés préalablement par calibrage. Dans notre cas, la disparité entre les deux images est obtenue par corrélation de phase (transformée de Fourier). Cette technique est facile à implanter et rapide d'exécution.

L'approche employée consiste à considérer une deuxième paire stéréo définie par deux acquisitions successives d'une des caméras de la paire stéréo. Cette proposition est admise, car le mouvement du bateau est, dans le sens du système stéréoscopique, supposé

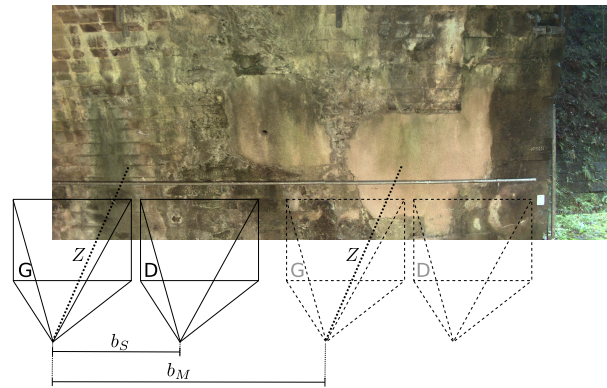


FIGURE 3.17 – Illustration du principe de l'odométrie visuelle simplifiée : la paire stéréo acquiert un couple d'images à chaque acquisition. Une première base est la base stéréo physique (b_S) et l'autre base, qui correspond au déplacement à estimer, est formée par deux acquisitions d'une même caméra (b_M).

parallèle au piédroit observé. Ainsi, la formule précédente s'applique à cette « virtuelle » seconde paire stéréo :

$$Z = \beta \frac{b_M}{d_M} \quad (3.4)$$

où d_M est la disparité générée par le mouvement du bateau et b_M est la distance parcourue entre les deux acquisitions que l'on cherche à estimer. En faisant l'hypothèse que Z est constant, b_M est obtenu à partir des équations 3.4 et 3.5 :

$$b_M = \frac{d_M}{d_S} b_S \quad (3.5)$$

L'OVS estime le déplacement b_M effectué par le bateau entre deux acquisitions d'images. Pour obtenir la position suivant l'axe du tunnel, ces valeurs sont intégrées et la position initiale du système doit être connue. Ce dernier paramètre est déterminé en détectant l'entrée du tunnel dans les images. Comme il s'agit d'une méthode de navigation à l'estime, voir section 2.3.2, les erreurs issues de la détermination du déplacement s'accumulent, diminuant ainsi la précision de la position au cours du temps. Dans le but de corriger cette dérive, nous détectons aussi la sortie du tunnel. De cette manière, les positions estimées sont compensées. À terme, nous souhaitons utiliser l'ensemble des catadioptrés placés à l'intérieur du tunnel pour obtenir une correction plus fine des positions. Toutefois, les coordonnées curvilignes déterminées avec cette méthode sont précises au décimètre, voir (ALBERT et al., 2013).

Cette méthode, qui était destinée en premier lieu au logiciel de visualisation des images du tunnel, a aussi trouvé son utilité pour la photogrammétrie comme nous le verrons dans les paragraphes suivants. En effet, à partir de cette méthode, une approche a été développée pour sélectionner et ordonner les images de manière à obtenir une représentation de la

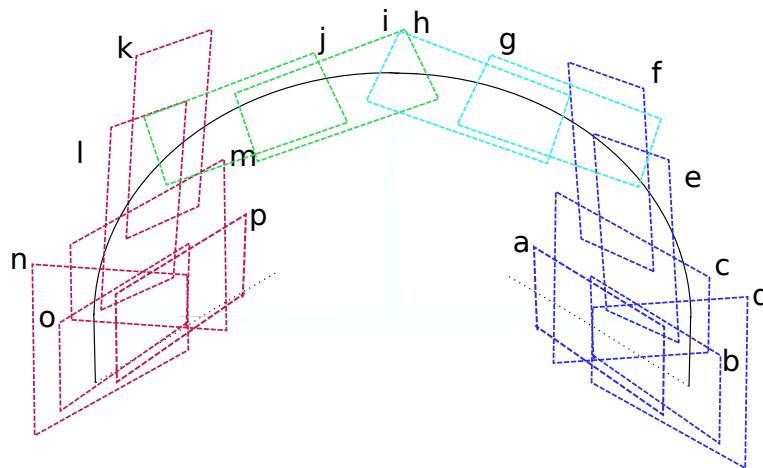


FIGURE 3.18 – Représentation schématique d'une « tuile ». Les images utilisées sont différenciées par des lettres. Les images provenant des passages aller sont représentées en bleu clair et foncé, celles provenant des passages retours sont représentées en rouge et vert.

totalité du profil de la voûte sur une portion de longueur élémentaire du tunnel comme cela est illustré dans la figure 3.18 (HEINKELE et al., 2017). Ces groupes d'images forment ce que nous avons appelé des « tuiles ».

3.4.2.b Reconstruction 3D par photogrammétrie avec l'outil Micmac

Dans un premier temps, le logiciel Micmac (PIERROT-DESEILLIGNY et CLERY, 2011 ; RUPNIK et al., 2017) de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) a été sélectionné pour effectuer les calculs photogrammétriques. Plusieurs raisons ont motivé ce choix, notamment le fait que cet outil soit *open source*. De plus, les fonctionnalités de MicMac sont accessibles par ligne de commande ce qui permet ainsi d'accéder à un grand nombre d'options. De plus, l'ensemble des opérations sont consignées dans des fichiers XML sur lesquels il est possible d'agir. Ces atouts en font aussi un de ses principaux inconvénients, puisqu'il est complexe à utiliser. En outre, la documentation est parfois sommaire pour expliquer certaines options.

La mise en œuvre de Micmac a été développée au sein de l'équipe du Cerema. La grande marge de manœuvre que permet ce logiciel a été exploitée afin de diminuer le temps de traitement. En effet, l'une des étapes du calcul photogrammétrique particulièrement coûteuse en temps et en ressources informatiques est la mise en correspondance des points d'intérêt détectés dans chacune des images. Comme une première estimation de la position des images a été obtenue grâce à l'OVS, il nous est possible de savoir quelles

paires d'images sont susceptibles de partager des points homologues, ou du moins quelles images sont sûres de n'en partager aucun. Par conséquent, nous avons déterminé les paires d'images pour lesquelles le calcul de mise en correspondance sera effectué. De cette façon, le logiciel n'exécute pas cette opération sur l'ensemble des couples d'images. De plus, cette méthode permet de prévenir d'éventuelles fausses mises en correspondance.

Une option de MicMac a particulièrement retenu notre attention. Celle-ci permet de fixer certaines distances entre des prises de vue. Cette solution correspond à nos conditions d'acquisitions, étant donné que les six caméras sont déclenchées simultanément. Ainsi, pour chaque instant d'acquisition, les positions inter caméras sont fixes. L'approche appliquée part d'une première estimation des orientations pour ensuite affiner le calcul en tenant compte des conditions de rigidité. Cette fonction nécessite encore d'être maîtrisée. Toutefois, les premiers résultats obtenus sont encourageants.

Le calcul du modèle 3D photogrammétrique avec Micmac a été effectué comme suit.

1. Les images acquises lors de tous les passages et dans les 10 premiers mètres du tunnel sont orientées.
2. Ce modèle de 10 m de long est géoréférencé grâce aux 4 cibles visibles dans cette zone du tunnel. De cette façon, nous avons une partie des images de chaque passage qui sont orientées dans le système de coordonnées national.
3. Le modèle de 10 m de long est décomposé en fonction des 6 passages pour pouvoir les traiter séparément.
4. Pour chaque passage, toutes les images acquises sont orientées en gardant fixes les images déjà orientées.
5. Le calcul d'orientation de chaque passage est affiné en prenant en compte les contraintes de rigidité entre les prises de vue acquises au même instant. Cette opération est effectuée grâce à l'outil *blinis* de Micmac.

Avec cette méthode, la construction de 30 m de tunnel a nécessité un peu plus de 4 jours de calcul.

3.4.2.c Reconstruction 3D par photogrammétrie avec le logiciel Photoscan

Photoscan est un logiciel commercial de photogrammétrie développé par Agisoft. L'utilisation de ce programme est très automatisée, de façon à être accessible à un large public. En contrepartie, il est ce que l'on appelle « une boîte noire », au sens où les moyens employés par le logiciel pour effectuer les opérations sont peu développés dans le manuel d'utilisation. Toutefois, Photoscan présente plusieurs avantages, comme d'avoir une grande productivité, ce qui nous sera utile pour le traitement de plusieurs milliers d'images. De plus, le temps nécessaire au calcul est moindre par rapport à d'autres solutions. Du reste, la densité des nuages de points générés est importante, ce qui permet d'accéder à un grand nombre de détails. Enfin, plusieurs études (MURTIYOSO et al., 2016; REMONDINO et al., 2014) ont démontré que la capacité à restituer en 3D de Photoscan est quantitativement semblable à d'autres solutions de calcul photogrammétrique plus conventionnelles (Photomodeler, Micmac, Pix4D).

Dans le cadre de la thèse, nous avons utilisé les fonctions de base de Photoscan. À l'avenir, d'autres fonctionnalités plus avancées permettront d'optimiser cette étape de photogrammétrie, par exemple la désignation de paires de caméras homologues pour faciliter la mise en correspondance, ou l'utilisation de *scale bars* pour incorporer des contraintes de distance entre caméras. Comme avec l'outil Micmac, il est impossible de traiter en une seule fois l'ensemble des images. Avec Photoscan, le procédé employé est défini comme suit.

- À partir du classement des images par « tuile », les images sont orientées par tronçons de 2 m suivant l'axe du tunnel. De cette manière, nous obtenons des sous-modèles correspondant à des profils de la voûte de 2 m de large, voir figure 3.19.
- Pour aligner l'ensemble des sous-modèles, nous avons utilisé le fait que chaque sous-modèle a une trentaine d'images en commun avec les deux sous-modèles qui le jouxte. De cette façon, le calcul d'alignement est effectué, non pas avec les points homologues, mais à partir des orientations des images communes aux sous-modèles.
- Le modèle entier est ensuite géoréférencé à l'aide des repères visibles dans les images (catadioptrés et cibles lasergrammétriques). Au terme de ce calcul, l'erreur d'alignement de ces points spécifiques, déterminés par photogrammétrie, sur ceux obtenus par les moyens topographiques, est de 5 mm (résultat fourni par Photoscan).

Avec cette méthode, la construction de 30 m de tunnel a nécessité environ 4 jours de calcul.



FIGURE 3.19 – Illustration d'un sous-modèle calculé sous Photoscan correspondant à un profil de tunnel de 2 m.

3.4.3 Construction du modèle subaquatique

Pour la partie subaquatique, la modélisation 3D revient à aligner les profils de points acquis par le SMF. Ces profils sont définis par les distances (d_f) mesurées par l'ensemble des faisceaux (f) à chaque instant d'acquisition (ts) et les angles d'ouverture (α_f) des faisceaux par rapport à l'axe du profil, voir figure 3.20.

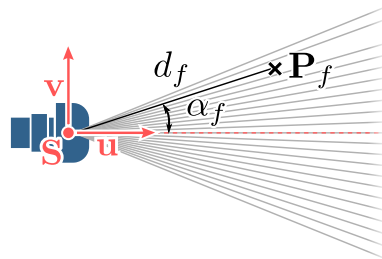


FIGURE 3.20 – Définition du système de coordonnées et de la mesure du SMF.

La transformation des profils de points dans le système national de coordonnées est obtenue grâce à l'estimation de la position et de l'orientation du sonar à chaque instant d'acquisition (ts) définies par les paramètres suivants :

1. le centre d'acquisition (**S**),
2. la direction de l'axe central du profil (**u**),
3. la perpendiculaire à (**u**) située dans le plan de la fauchée (**v**).

De cette manière il est possible de calculer la position dans le repère national de chaque point grâce à la relation suivante :

$$\mathbf{P}_{f,ts}^n = \mathbf{S}_{ts}^n + \mathbf{u}_{ts}^n \cdot d_{f,ts} \times \cos \alpha_f + \mathbf{v}_{ts}^n \cdot d_{f,ts} \times \sin \alpha_f \quad (3.6)$$

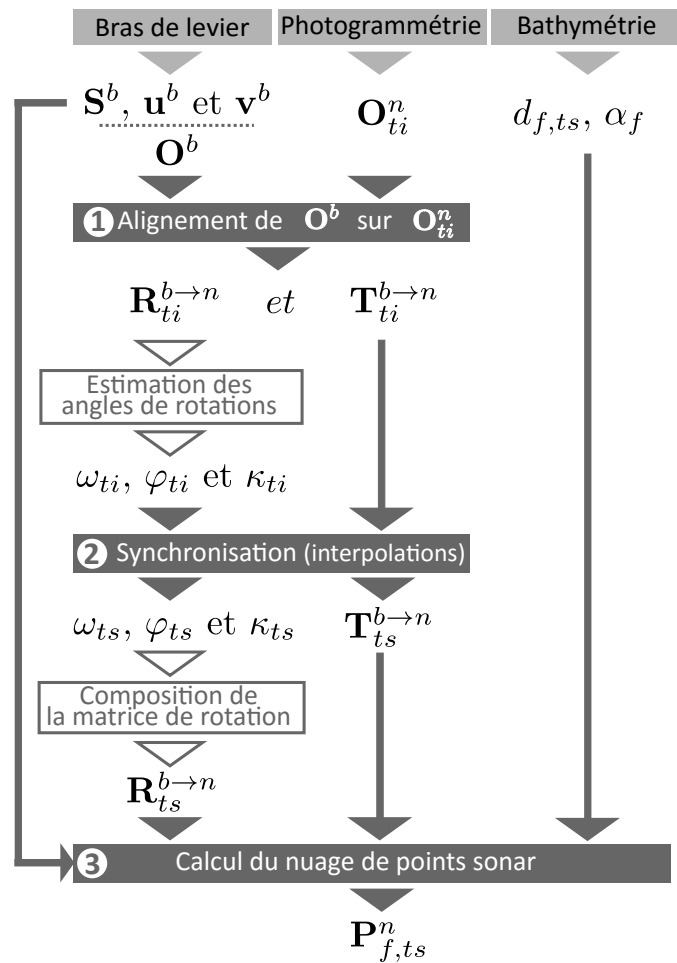


FIGURE 3.21 – Diagramme du processus de génération du nuage de points sonar. Les notations sont introduites par le tableau 3.5.

Comme annoncé, la photogrammétrie intervient dans le but d'estimer les paramètres (S_{ts}^n, u_{ts}^n et v_{ts}^n). Le calcul d'alignement des faisceaux, décrit dans la section 3.4.1.b fournit les positions des M centres de perspectives (dans notre cas $M = 6$), c'est-à-dire le bloc de caméra estimé, à chaque instant ti de déclenchement des prises de vue. L'ensemble des positions sont données sous la forme de matrices des centres O_{ti}^n de manière à ce que les vecteurs de coordonnées des centres soient les colonnes des matrices. Le passage des positions des caméras définies pour les instants ti aux positions et orientations du sonar pour chaque instant ts nécessite deux transformations : une spatiale et l'autre temporelle. L'ensemble du procédé de géo-référencement des données sonar est illustré par le diagramme de la figure 3.21 et les notations introduites sont données dans le tableau 3.5.

P	3×1	Point acquis par le sonar
S	3×1	Centre d'acquisition sonar
u	3×1	Vecteur directeur de la fauchée d'acquisition sonar
v	3×1	Vecteur situé dans le plan de la fauchée et orthogonal à u
d	scalaire	Distance de P à S
α	scalaire	Angle du faisceau
O	$3 \times M$	Matrice des M centres optiques des caméras (les vecteurs de coordonnées sont disposés en colonnes)
R	3×3	Matrice de rotation
T	3×1	Vecteur de translation
\dots^b		Élément défini dans le système de coordonnées du bateau
\dots^n		Élément défini dans le système de coordonnées national
\dots_{ti}		Élément défini au moment ti d'acquisition des images
\dots_{ts}		Élément défini au moment ts d'acquisition sonar
\dots_b		Élément défini pour un faisceau de la fauchée

Tableau 3.5 – Définition des notations pour la description du processus de géoréférencement des données sonar. Nous donnons aussi dans ce tableau les dimensions de ces notations.

3.4.3.a Alignement spatial par la méthode de Procruste

L'objectif de cette opération est d'obtenir les paramètres de position et d'orientation du sonar à chaque instant d'acquisition du système imageur (ti) à partir des positions des centres de perspectives déterminés par photogrammétrie. En pratique, nous estimons les paramètres de transformations ($\mathbf{R}_{ti}^{b \rightarrow n}$ et $\mathbf{T}_{ti}^{b \rightarrow n}$) pour passer du système de coordonnées local du bateau dans lequel l'orientation du sonar (\mathbf{S}^b , \mathbf{u}^b et \mathbf{v}^b) est connue grâce au calibrage géométrique du système (voir section 3.2.2) au repère national. Pour cela, nous calculons l'alignement du bloc caméra calibré (correspondant à la matrice \mathbf{O}^b) sur les blocs caméra estimés par photogrammétrie à chaque instant (ti) (\mathbf{O}_{ti}^n). Cette opération revient à minimiser l'expression suivante :

$$\|\mathbf{R}_{ti}^{b \rightarrow n} \cdot \mathbf{O}^b + \mathbf{T}_{ti}^{b \rightarrow n} \cdot \mathbf{1}_M^t - \mathbf{O}_{ti}^n\|_F^2 \quad (3.7)$$

où $\mathbf{1}_M$ est un vecteur de 1 de taille M et $\|A\|_F$ représente la norme de Frobenius : $\|A\|_F^2 = \text{trace}(A^t A)$. Les paramètres à estimer sont la translation $\mathbf{T}_{ti}^{b \rightarrow n}$ et la rotation $\mathbf{R}_{ti}^{b \rightarrow n}$. Concernant la matrice de translation, elle est obtenue en calculant le vecteur défini par les barycentres des blocs caméra calibré et estimé (\mathbf{O}^b et \mathbf{O}_{ti}^n). Pour ce qui est de la matrice de rotation, elle possède la particularité d'être orthogonale ($\mathbf{R}_{ti}^{b \rightarrow n t} \cdot \mathbf{R}_{ti}^{b \rightarrow n} = I$). Ainsi, cette problématique correspond à celle du problème de Procruste orthogonal qui s'exprime de la sorte :

$$\inf \|\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}\|_F^2 \quad \text{avec} \quad \mathbf{R}^t \cdot \mathbf{R} = I \quad (3.8)$$

La solution apportée par (SCHÖNEMANN, 1966) et qui est reportée dans l'ouvrage de (GOLUB et VAN LOAN, 2012) consiste à calculer la décomposition en valeurs singulières (SVD) du produit matriciel $(\mathbf{B}^t \cdot \mathbf{A})$. Cette opération permet d'obtenir la relation $\mathbf{U}^t \cdot (\mathbf{B}^t \cdot \mathbf{A}) \cdot \mathbf{V} = \Sigma$, de laquelle est obtenue la matrice de rotation :

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^t \quad (3.9)$$

Cette méthode a été plusieurs fois employée dans le cadre de la thèse dans le but d'aligner deux jeux de données (nuage de points ou vecteurs).

3.4.3.b Interpolation temporelle de la trajectoire

L'étape précédente fournit la position et l'orientation du système bateau à chaque instant d'acquisition des images (ti). Pour le géoréférencement des acquisitions sonar, ces informations doivent être déterminées pour chaque instant d'acquisition du sonar (ts). Ainsi, la seconde étape consiste à synchroniser les données par interpolation.

La trajectoire du système est quasi-linéaire. De plus, la position du système, déterminée grâce aux prises de vue photographiques, est obtenue approximativement tous les 20 cm. À cette échelle, une interpolation linéaire par morceaux (spline linéaire) suffit. Concernant l'orientation, la matrice de rotation est décomposée de manière à obtenir les angles d'Euler (ω_{ts} , ϕ_{ts} et κ_{ts}). Ensuite, ces angles d'orientation sont déterminés aux instants d'acquisition du système sonar par interpolation spline cubique suivant la méthode introduite dans (FORSYTHE et al., 1977) et implantée dans R. Après quoi la matrice de rotation est recomposée.

Au terme de ce procédé d'interpolation, les matrices de translation $\mathbf{T}_{ts}^{b \rightarrow n}$ et de rotation $\mathbf{R}_{ts}^{b \rightarrow n}$ sont déterminées pour chaque instant d'acquisition du sonar. Par conséquent, les paramètres nécessaires au géoréférencement des points sonar grâce à la relation 3.6, sont obtenus de la sorte :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{ts}^n &= \mathbf{R}_{ts}^{b \rightarrow n} \mathbf{S}^b + \mathbf{T}_{ts}^{b \rightarrow n} \\ \mathbf{u}_{ts}^n &= \mathbf{R}_{ts}^{b \rightarrow n} \mathbf{u}^b \\ \mathbf{v}_{ts}^n &= \mathbf{R}_{ts}^{b \rightarrow n} \mathbf{v}^b \end{aligned} \quad (3.10)$$

Cette chaîne de traitement constitue la base du traitement des données sonar. Des améliorations pourront y être apportées, notamment pour filtrer les erreurs d'orientation et de positionnement liées au calcul photogrammétrique.

3.5 Récapitulatif de l'approche

La figure 3.22 récapitule l'ensemble de la chaîne de traitement proposée dans la thèse. Dans un premier temps, les images sont classées grâce à l'OVS (section 3.4.2.a) pour ensuite faciliter la réalisation du calcul photogrammétrique, avec MicMac (section 3.4.2.b) ou Photoscan (section 3.4.2.c). Ainsi, nous obtenons le modèle 3D des parties émergées, mais aussi les positions et orientations du bloc caméra à chaque instant d'acquisition des images. Grâce au calibrage géométrique issu de la numérisation complète du système d'acquisition, nous connaissons la position et l'orientation du sonar par rapport à celles du bloc caméra (section 3.2.2). La position et l'orientation du sonar sont alors estimées à chaque instant d'acquisition des images (section 3.4.3.a). Grâce à l'horodatage des données, les positions et orientations du sonar à chaque instant d'acquisition du sonar sont, enfin, obtenues par interpolation (section 3.4.3.b). De cette manière, les profils sonar sont géoréférencés pour former le modèle 3D subaquatique.

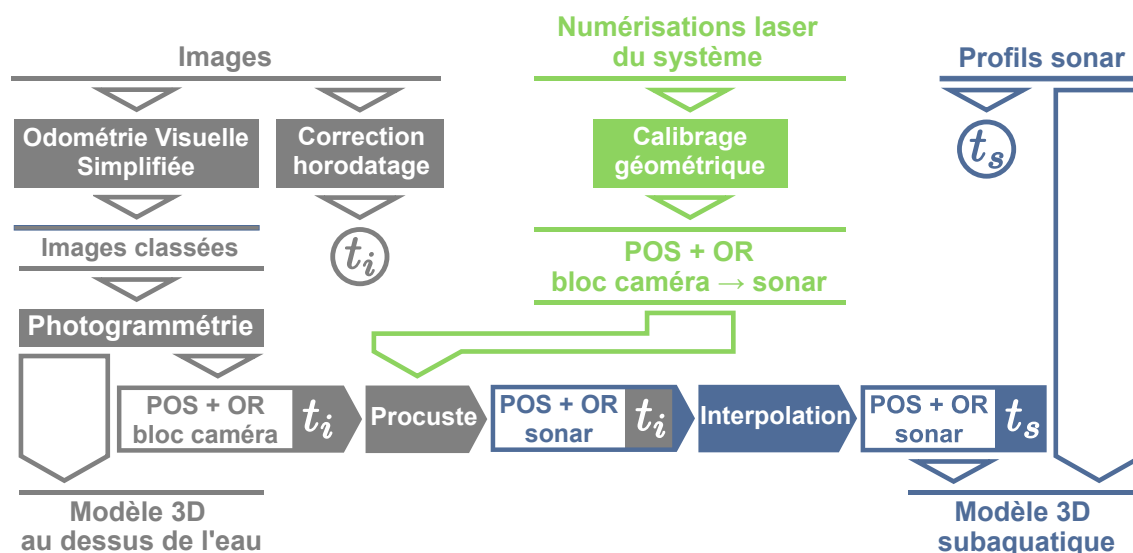


FIGURE 3.22 – Schéma récapitulatif de l'approche développée. Les temps t_i et t_s correspondent respectivement aux instants d'acquisition des images et des profils sonar. Sur ce schéma POS signifie position et OR, orientation.

3.6 Résultats obtenus

Grâce à la méthode décrite jusqu'à présent, un premier modèle 3D « tube entier » des trente premiers mètres du tunnel a pu être construit. Il est composé du nuage de points des parties hors de l'eau obtenues par photogrammétrie et des nuages de points des parties subaquatiques générés à partir des 6 passages effectués avec le sonar. Dans cette section, les résultats présentés sont principalement ceux obtenus à partir de la solution Photoscan.

Suite à ce premier calcul, il a été nécessaire de corriger la valeur d'inclinaison du sonar pour les acquisitions employant le second réglage du SMF. En effet, cette configuration n'avait pas été numérisée à terre avec le SLT. Pour déterminer la position du sonar, nous avons utilisé les deux autres acquisitions du système au sol (réglages 1 et 3) pour déterminer l'axe de rotation autour duquel l'inclinaison du SMF est réglée. Quant à l'angle d'inclinaison, nous avons une valeur théorique de celui-ci, mais il a été nécessaire de l'affiner de manière empirique. Grâce à cette opération, nous obtenons le modèle visible sur la figure 3.23.

À première vue, le modèle semble cohérent. Les différentes acquisitions se complètent plutôt bien, même si on observe parfois des vides provenant de l'absence de mesures. Dans le premier cas (voir figure 3.23 indication **a**), le balayage de la zone par le sonar n'a pas été effectué à certains endroits du centre du canal. Il y a trois raisons à cela. La position du sonar sur le bateau ne permettait pas au capteur de se situer dans l'axe du canal. De plus, la trajectoire du bateau n'est jamais parfaitement rectiligne. Enfin la largeur de la fauchée d'acquisition était moins grande que celle obtenue avec les autres réglages puisque la distance entre le capteur et la surface à mesurer était plus petite. Dans le second cas (voir figure 3.23 indication **b**), le SMF a interrompu momentanément les mesures sans explication.

Nous voyons que la densité des nuages de points est importante, notamment pour celui obtenu par photogrammétrie. À ce propos, nous remarquons que la densité est homogène, car la surface du tunnel a une texture très détaillée. Toutefois, il y a quelques incohérences aux endroits où la surface présente une grande réflectance, ce qui correspond aux zones proches de la surface de l'eau et celles recouvertes de calcite (voir figure 3.23 indication **c**). Cela s'explique car ces surfaces ont une texture plus uniforme. En outre, cet effet est accentué par le traitement de correction radiométrique appliqué aux images. Concernant les nuages de points sonar, nous constatons qu'ils sont très bruités. Ainsi, les nuages de points ont été maillés pour une meilleure visualisation du résultat. Le modèle 3D obtenu est présenté dans la figure 3.24.

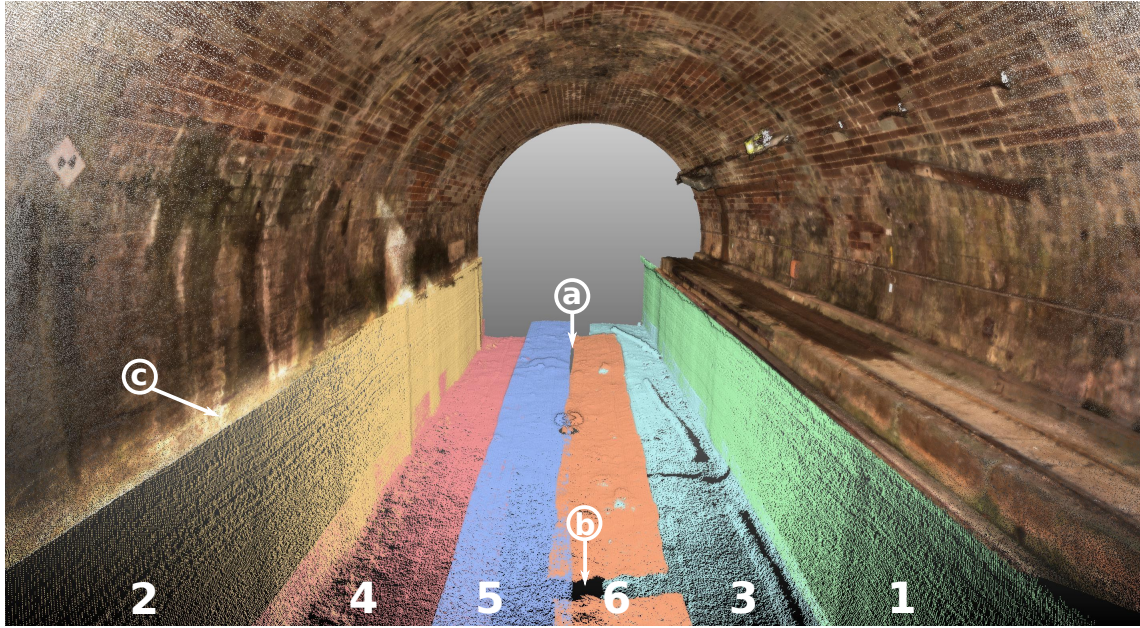


FIGURE 3.23 – Illustration des nuages de points 3D de l'entrée du tunnel côté Niderviller générés grâce au calcul effectué avec Photoscan. Les différents passages sont représentés dans des couleurs différentes et sont numérotés selon leur ordre chronologique, voir tableau 3.4. Les lettres désignent des défauts, commentés dans le texte.

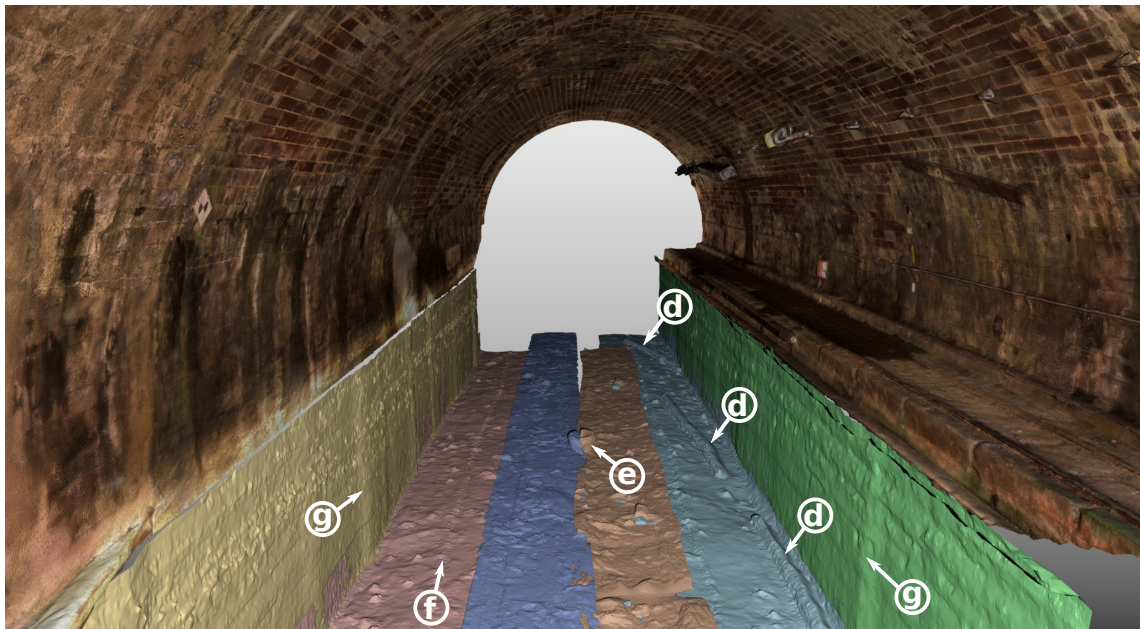


FIGURE 3.24 – Illustration des maillages de l'entrée du tunnel côté Niderviller générés grâce au calcul effectué avec Photoscan. Les points désignés par des lettres font l'objet de commentaires dans le texte.



FIGURE 3.25 – Illustration des maillages subaquatique de l'entrée du tunnel côté Niderviller générés grâce au calcul effectué avec Micmac. Seuls les passages 2 et 4 sont référencés à ce jour. Les suivants seront disponibles très prochainement. La visualisation de la partie aérienne est celle produite à l'aide de Photoscan.

Le maillage des nuages de points sonar laisse apparaître plusieurs objets au fond de l'eau, notamment deux lisses à l'origine fixées sur la partie émergée du bajoyer et qui se sont détachées de celui-ci. Étant faites en bois tropical, elles ont coulé (voir figure 3.24 et figure 3.26, indication **d**). Nous observons aussi un certain nombre de roches de plus ou moins grande importance, ainsi qu'un objet cylindrique (voir figure 3.24 indication **e** et figure 3.26 détail 2) que nous avons interprété comme étant un pneu de véhicule. Nous remarquons aussi des phénomènes qui ne semblent pas correspondre à la réalité du terrain. Tout d'abord, nous observons des traces systématiques qui suivent la progression du sonar (voir figure 3.24 et figure 3.26, indication **f**). Celles-ci sont certainement dues à un défaut d'étalonnage de certains faisceaux d'acquisition du SMF. De plus, des défauts sont certainement liés à des phénomènes acoustiques. La forme de ces aberrations est aussi systématique, ce qui pourrait justifier leur suppression automatique.

Ensuite, nous observons que les murs ne sont pas parfaitement droits. Ces discontinuités forment comme des marches d'escalier (voir figure 3.24, indication **g**). L'origine la plus plausible de ces défauts est liée au processus de calcul du modèle 3D photogrammétrique par tronçons de deux mètres. En effet, de cette façon, la continuité des trajectoires n'est pas prise en compte. En outre, comme le calcul photogrammétrique effectuée avec Micmac prend en compte cette continuité, ce phénomène n'est pas observé sur le morceau de modèle produit avec cette méthode (voir figure 3.25). De plus, les modèles des différents passages ne se raccordent en réalité pas parfaitement (voir figure 3.26, détails 1 et 4). L'imprécision de la trajectoire en général est en cause dans ces défauts.

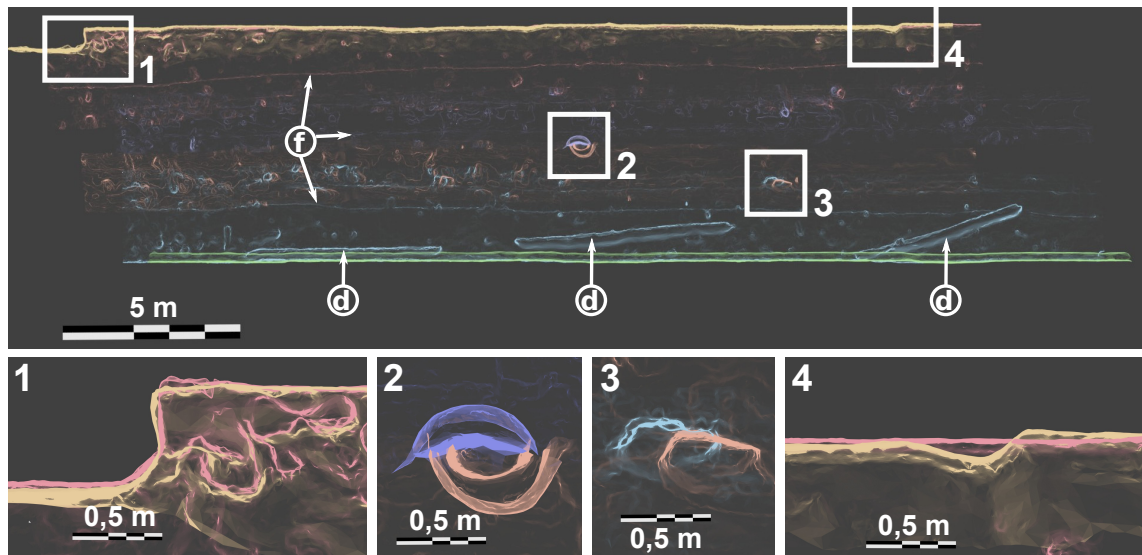


FIGURE 3.26 – Visualisation vue du dessus et par transparence du modèle subaquatique construit à partir du résultat de Photoscan. Cet effet a été obtenu dans le logiciel Blender en faisant varier la transparence suivant la direction de la normale par rapport à la vue. Plusieurs détails montrant les décalages entre les modèles des différents passages sont illustrés à plus grande échelle.

Afin de mieux mettre en évidence les décalages transversaux à l'axe du tunnel, nous avons procédé à plusieurs coupes du modèle 3D, dont certaines sont données dans la figure 3.27. De cette manière, nous observons des écarts entre les modèles des bajoyers issus des passages configurés suivant les réglages 1 et 2, mais aussi avec le nuage de points photogrammétrique. De plus, des décalages en altitude sont visibles entre les nuages de points. Ceux-ci sont aléatoires entre les acquisitions effectuées avec les réglages 1 et 2 du sonar, mais ils semblent être systématiques entre les modèles pour lesquels le sonar était fixé suivant les réglages 2 et 3. Dans ce cas, les données du calibrage géométrique du système semblent être en cause. Par conséquent, soit l'estimation de celui-ci est erronée, soit le dispositif a bougé lors de l'expérimentation.

Enfin, en observant les objets mesurés sur le fond suivant deux passages, nous observons des écarts longitudinaux de l'ordre d'une dizaine de centimètres (voir figure 3.26, détails 2 et 3). Ces différences peuvent être principalement la conséquence d'un mauvais horodatage, d'informations erronées sur le bras de levier, ou encore d'une mauvaise estimation de la trajectoire.

Cette étude offre une première évaluation qualitative qu'il convient de compléter par une analyse quantitative de la méthode. Ce sera l'objet du chapitre suivant.

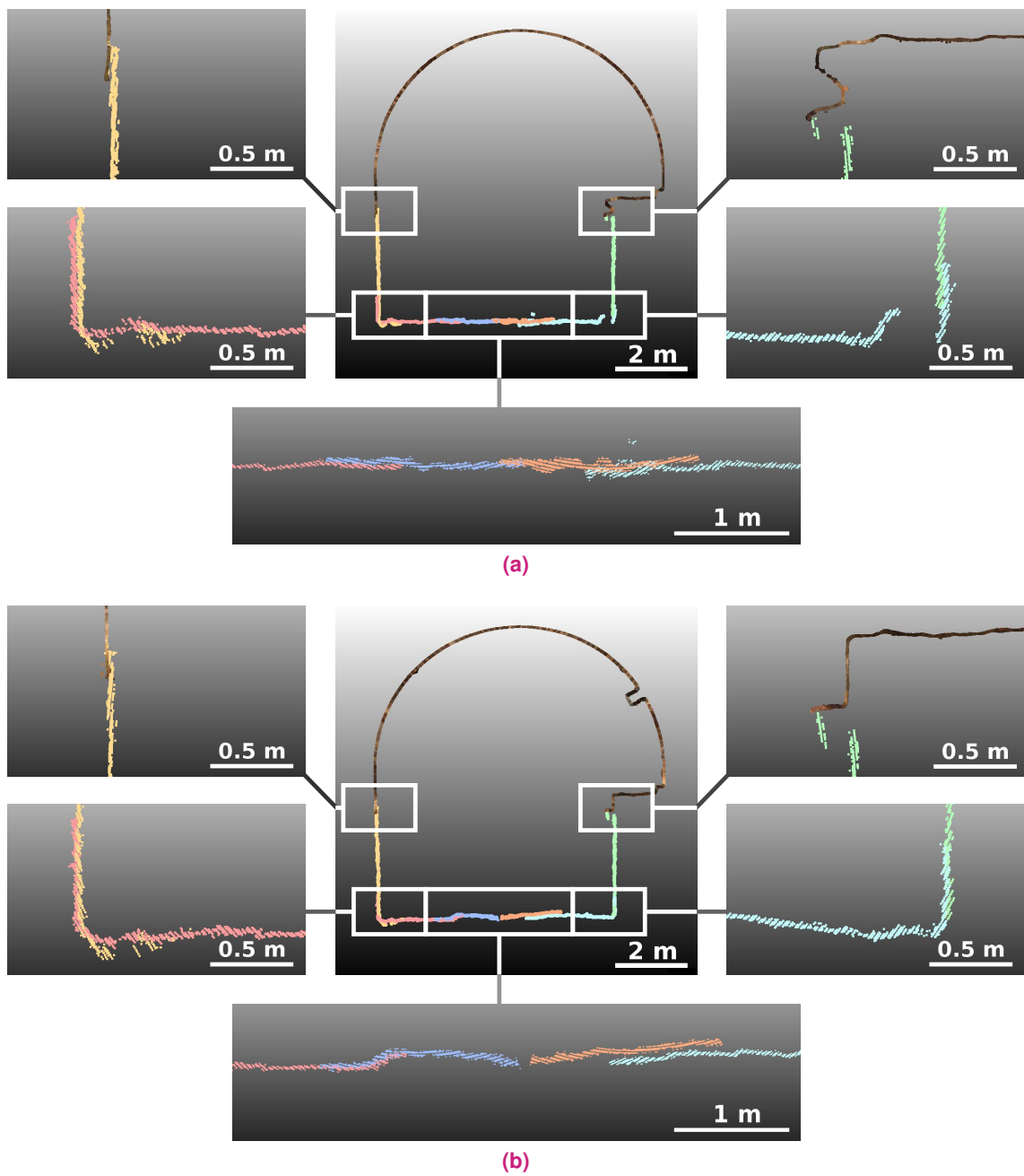


FIGURE 3.27 – Coupes des nuages de points générés à partir du calcul de Photoscan. Des agrandissements des jonctions sont annexés.

Conclusion du chapitre 3

- Le système d'acquisition employé est composé d'un bloc de 6 caméras pour lever les voûtes et piédroits, et d'un SMF pour mesurer la partie subaquatique du tunnel. Trois allers-retours du système, embarqué sur un bateau, sont nécessaires pour lever la totalité de la structure.
- Le déclenchement synchrone des caméras est obtenu en leur envoyant un signal depuis un dispositif externe. La synchronisation des deux sous-systèmes imageur et sonar est effectué en horodatant les mesures dans le référentiel de temps UTC donné par l'horloge de récepteurs GPS.
- Pour être complètement opérationnel, le système d'acquisition a été calibré. Cette étape s'applique d'abord à chacun des capteurs séparément. Puis, la géométrie globale du dispositif a été déterminée à partir de numérisations laser de celui-ci. Les centres d'acquisition des différents capteurs sont estimés grâce à une méthode ICP adaptée à cette tâche.
- Une expérimentation a été réalisée dans le tunnel-canal de Niderviller. Au préalable, celui-ci a été équipé de catadioptrés et d'autres cibles levées par topographie classique, dans le but de géoréférencer le modèle 3D final.
- Pour construire le modèle 3D des voûtes et piédroits par photogrammétrie, le procédé appliqué prend en compte le grand nombre d'images à traiter. Ainsi, les images sont classées suivant leur position dans le tunnel grâce à l'odométrie visuelle simplifiée (OVS). Ensuite, Micmac et Photoscan ont été expérimentés pour le calcul photogrammétrique afin d'exploiter les nombreux outils du premier et la grande productivité du second.
- Pour construire le modèle subaquatique, les données sonar sont géoréférencées. Tout d'abord, les transformations 3D pour passer du référentiel du système propre aux mesures sonar au système national sont calculées en alignant le bloc caméra calibré sur les blocs successivement estimés par photogrammétrie (Procuste). Ensuite, ces paramètres de transformation sont interpolés pour les obtenir à chaque instant d'acquisition du sonar.
- Un premier modèle 3D des trente premiers mètres de tunnel a été construit grâce à cette chaîne de traitement.

4

Évaluation de la méthode développée

Une contribution importante de la thèse concerne l'évaluation de l'approche mise en œuvre pour la numérisation des tunnels navigables à partir des acquisitions dynamiques. Plusieurs études ont été mises en œuvre, comme le montre la figure 4.1.

En premier lieu, nous avons étudié les capacités du sonar à mesurer dans l'environnement spécifique d'un canal, dans le but de valider l'emploi du SMF pour le levé des parties immergées du tunnel. Pour cela, une expérimentation a été mise en œuvre dans une écluse, car celle-ci a pu être levée avec un scanner laser terrestre lorsqu'elle était vidée de son eau. Le modèle laser obtenu a ensuite été comparé à des numérisations sonar.

En second lieu, les trajectoires estimées par photogrammétrie ont été évaluées. Comme ces données sont à la base de la reconstruction 3D subaquatique en dynamique, il est important de connaître leur exactitude.

En troisième lieu, un modèle de référence a été produit à partir d'acquisitions laser et sonar effectuées de manière statique. Ce modèle a ensuite été comparé au modèle expérimental construit grâce à la méthode exposée dans le chapitre 3.

La première et la troisième étude ont nécessité l'utilisation d'un Sonar à Balayage Mécanique (SBM), qui est une technologie récente. Son utilisation a requis le développement de méthodes spécifiques de traitement.

Ce chapitre commence par une présentation des méthodes de comparaison de modèle 3D et le SBM, puis nous détaillons chacune des études réalisées, suivant l'ordre dans lesquelles elles ont été énoncées ci-dessus.

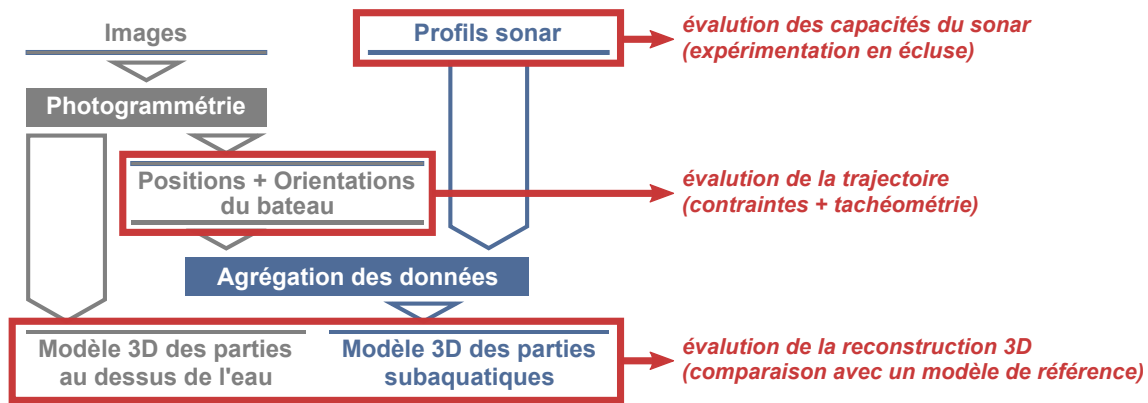


FIGURE 4.1 – Processus d'évaluation du système d'inspection développé.

4.1 Introduction à la procédure d'évaluation

4.1.1 Les méthodes de comparaison des modèles 3D

L'évaluation *a posteriori* d'un modèle 3D a pour but de calculer son exactitude. Cette étude effective peut être réalisée par comparaison entre le modèle obtenu et une référence. Ainsi, les erreurs de numérisation correspondent à la distance entre les deux modèles. Les différentes méthodes existantes pour la comparaison de données tridimensionnelles peuvent être classées suivant quatre familles : « MNT à MNT », « nuage à nuage », « nuage à maillage », « profil à profil ».

La méthode « MNT à MNT » est basée sur la comparaison de Modèle Numérique de Terrains (MNTs). Comme des données sont en 2,5D, la comparaison consiste à calculer la différence entre les attributs d'altitude. Ainsi, les écarts correspondent à des distances verticales. La principale difficulté de cette méthode est d'établir une grille support aux données attributaires des deux modèles. Dans notre cas, cette technique ne peut pas être appliquée puisque nos données sont en 3D.

La comparaison de deux nuages de points consiste à calculer pour chaque point de l'un d'eux, la distance au point le plus proche appartenant au second nuage. Cette solution est rapide et simple à mettre en œuvre. Cependant, le résultat est conditionné par la densité du nuage de points. Une évolution de cette méthode consiste à ajouter une étape de modélisation locale. Il s'agit d'estimer une surface locale pour chaque point du nuage de référence. Celle-ci peut être un plan ou une surface paramétrée ou encore un maillage.

Ainsi, les distances sont calculées entre la surface locale mesurée et le point le plus proche appartenant au nuage comparé. Le résultat reste sensible à la rugosité du nuage et aux données aberrantes. Enfin, les distances issues de cette méthode ne sont pas signées. Pour qu'elles le soient, il est nécessaire de calculer les normales à la surface en chaque point, mais ce calcul est complexe à obtenir. L'algorithme introduit dans (LAGUE et al., 2013) mérite d'être cité ici. L'outil développé prend notamment en compte la rugosité de la surface levée pour comparer les nuages.

La méthode « nuage à maillage » adopte une approche fondée sur le calcul de la distance entre un nuage de points et sa référence qui est un maillage. Cette solution est largement reprise dans les logiciels commerciaux. L'outil *METRO* introduit dans (CIGNONI et al., 1998) est un exemple d'algorithme utilisant cette approche. Le principal obstacle est la construction du maillage. En effet, supprimer du bruit tout en préservant les détails est une opération délicate. De plus, les occultations entravent la construction d'une surface continue. Parfois, les zones non mesurées sont *bouchées* de manière empirique, mais il s'agit d'une déduction. Enfin, la construction du maillage est une opération coûteuse en temps.

Enfin, un dernier procédé qui a été développé à l'origine pour évaluer la déformation des tunnels est la comparaison de profils (GIKAS, 2012; HAN et al., 2013). Pour ce faire, un nouveau référentiel est défini de telle manière que l'axe des abscisses soit l'axe du tunnel. Les profils sont formés régulièrement suivant des plans orthogonaux à l'axe des abscisses. Les points constituant les profils sont sélectionnés selon une distance maximale au plan. Le choix de ce critère de distance fait l'objet d'un compromis entre la finesse de définition du profil et une trop grande extrapolation. Ensuite, les principes utilisés dans les trois précédentes méthodes peuvent être adaptés en 2D afin de déterminer les distances. L'inconvénient de cette méthode est qu'il n'y a plus de réelle estimation des écarts suivant l'axe des abscisses.

Dans le cadre du projet de numérisation des tunnels-canaux, des recherches ont été effectuées pour l'évaluation des nuages de points issus de la photogrammétrie en les comparant à un nuage de référence obtenu avec un scanner laser terrestre (CHARBONNIER et al., 2013; CHAVANT, 2013). La comparaison d'ensembles de données volumineuses et non homogènes en taille est un procédé complexe qui nécessite des outils de structuration de l'espace et des métriques adaptées. Deux notions ont été mises en application afin de répondre à cette problématique :

- La division en *octree* consiste à sub-diviser, de manière analogue, les deux nuages de points en cellules (*octants*). La recherche des points les plus proches entre deux nuages se limite ainsi aux octants homologues.
- La distance de Hausdorff est une mesure mathématique entre deux ensembles, qui peuvent être de tailles différentes.

En combinant ces deux outils, la distance entre les nuages est calculée localement. Dans le cadre du projet VNF-Cerema-CETU cette approche a été employée afin d'obtenir rapidement une approximation des distances entre nuages de points, de manière à ensuite filtrer les distances aberrantes obtenues par les différentes méthodes décrites précédemment.

Dans le cadre de la thèse, l'approche privilégiée a été celle « nuage à maillage », car les distances calculées sont signées en fonction des directions des normales de la surface et le résultat obtenu ne dépend pas de la densité du nuage de points.

4.1.2 Le sondeur à balayage mécanique

4.1.2.a Description de l'appareil

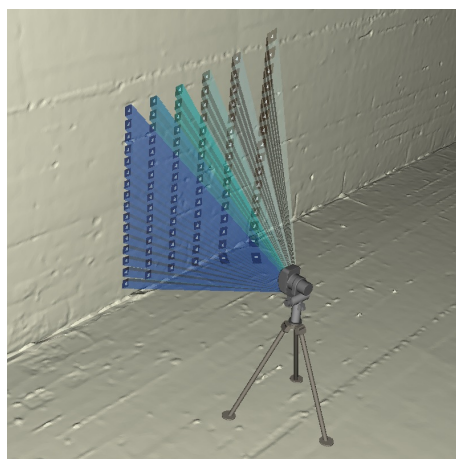
L'appareil utilisé pour les acquisitions subaquatiques en vue de la construction d'un modèle de référence est un SBM, voir figure 4.2. Cette technologie récente a été conçue par la société Blueview pour numériser un environnement à la manière d'un Scanner Laser Terrestre. Le dispositif est composé d'un sondeur multifaisceaux, montré figure 4.3a, qui est fixé à un mécanisme rotatif, voir figure 4.3b. Le SBM déployé est le BV5000. Il utilise le SMF MB1350 également employé pour l'acquisition en dynamique (voir section 3.1.1.b). La fauchée du SMF est orientée verticalement et le mouvement de rotation est horizontal. De cette manière, le capteur sonar balaye à 360° l'environnement dans lequel il a été placé. Comme l'angle d'ouverture de la fauchée est limité à 45°, l'angle d'inclinaison du sonar peut être modifié. Donc potentiellement, le champ d'acquisition de ce MSS est de 360° horizontalement et de 320° verticalement. Les principales spécificités de cet appareil sont reportées dans le tableau 4.1. Plusieurs de ces caractéristiques sont celles du MB1350. La résolution en distance indiquée est déduite de la cadence d'échantillonnage du sonar.

Tableau 4.1 – Caractéristiques du SBM BV5000.

Taille des faisceaux	$1^\circ \times 1^\circ$
Résolution en distance	15 mm
Portée maximale	30 m
Résolution angulaire horizontale	-0.09° (16 mm@10 m)
Résolution angulaire verticale	0.18° (30 mm@10 m)
Champ de vision (sans variation de l'inclinaison)	$45^\circ / 360^\circ$
Champ de vision (avec variation de l'inclinaison)	$320^\circ / 360^\circ$

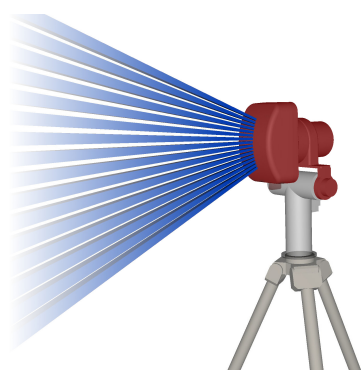


(a)

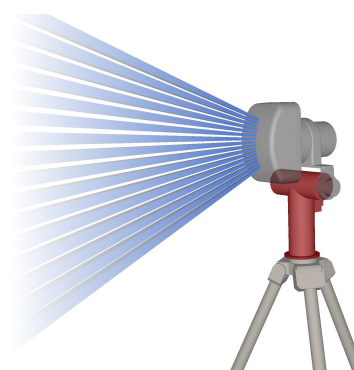


(b)

FIGURE 4.2 – Le SBM BV5000, (a) photographie issue du site du constructeur Blueview, (b) illustration du principe de fonctionnement.



(a)



(b)

FIGURE 4.3 – Illustration des deux parties (en rouge) composant le SBM : (a) le sondeur multifaisceaux, (b) le mécanisme de rotation.

4.1.2.b Mise en œuvre expérimentale

La mise en œuvre du SBM est effectuée soit en plaçant l'appareil sur un trépied et en déposant l'ensemble au fond de l'eau, soit, en suspendant le dispositif depuis la surface de l'eau à l'aide d'un système d'accrochage. Pour cette dernière configuration, l'appareil est alors tête en bas.

L'un des principaux atouts du SBM est que les mesures sont exécutées depuis une station. De cette manière, il n'est pas nécessaire d'avoir des données de navigation pour obtenir un modèle 3D d'une zone. Toutefois, l'espace acquis est limité à 30 m. Donc pour accroître l'étendue de la numérisation, plusieurs stations doivent être réalisées. Ce procédé est aussi appliqué pour lever l'ensemble des surfaces d'un objet lorsque celles-ci ne sont pas toutes visibles depuis une seule station. Dans le but d'obtenir un modèle complet, l'ensemble des numérisations sont consolidées, c'est-à-dire alignées les unes par rapport aux autres. Cette opération est très souvent effectuée grâce à l'algorithme ICP (voir section 3.2.2). Dans notre cas, la forme tubulaire de l'environnement des canaux et le peu de détails sur les murs font que cette méthode ne semble pas pertinente, car le recalage suivant l'axe du canal ne paraît pas favorable.

Une autre méthode appliquée pour la consolidation des nuages de points consiste à placer des cibles aisément détectables dans les mesures. Cette pratique est courante pour l'acquisition avec un SLT. Les cibles utilisées sont généralement des sphères, car il est facile de les détecter dans un nuage de points et parce que quelque soit le point de vue duquel elles sont numérisées, il est possible de déduire le centre de celles-ci. De plus, si la position de ces cibles est connue en coordonnées, le géoréférencement du modèle 3D est possible. Cette méthode a aussi été développée sous l'eau par la société Blueview. Dans ce cas, les sphères utilisées sont formées par une armature ouverte, voir figure 4.4. Malheureusement, nous ne possédions pas ce matériel lors de nos expérimentations avec le BV5000.

Un des inconvénients de l'utilisation du SBM, déjà évoqué pour le SMF, est la faible directivité du système comparé aux technologies laser. S'agissant du SBM, cet aspect est accentué, puisque toutes les mesures sont effectuées depuis une station fixe. De ce fait, la résolution des mesures sera variable pour une même acquisition entre les points les plus proches et ceux les plus éloignés de la station. Dans le cas des acquisitions dans un environnement étroit, tel qu'un canal, l'angle d'incidence du faisceau d'acquisition augmente avec la distance d'acquisition. Ainsi, les dimensions de l'empreinte de mesure sont augmentées. L'estimation théorique de la taille horizontale de l'empreinte de mesure sur un plan est présentée par la figure 4.5. Cette approximation met en évidence que cette longueur peut atteindre facilement plus de 0,5 m à 10 m. La figure 4.6 présente deux images acoustiques résultant de deux incidences d'acquisition, l'une est plutôt favorable

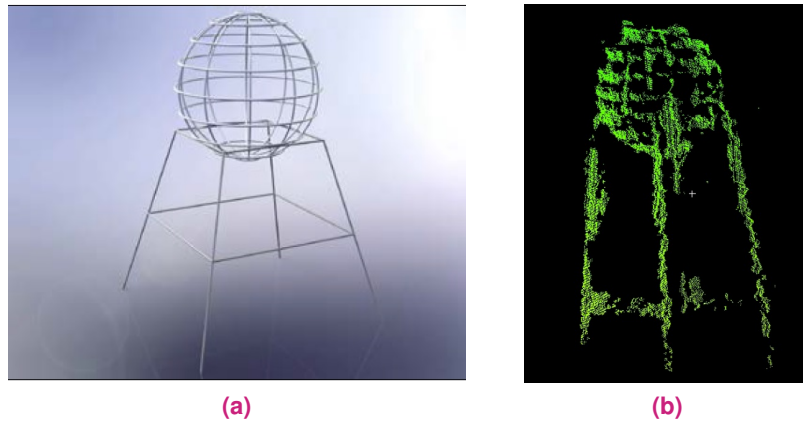


FIGURE 4.4 – (a) Modélisation 3D de la sphère conçue pour aligner les nuages de points du SBM. (b) Visualisation du nuage de points de la sphère produit par le SBM. Illustrations issues de (LESNIKOWSKI et RUSH, 2012).

et l'autre ne l'est pas. Nous pouvons observer que la surface mesurée y est représentée de manière beaucoup plus fine pour la première configuration que pour la seconde. Notons également que les signaux sonar émis dans un milieu confiné sont sujets à de nombreuses réflexions, que ce soit par la surface de l'eau ou par l'objet mesuré, comme nous l'avons fait remarquer au chapitre 2, figure 2.6, p.36.

L'évaluation du SBM effectuée à partir d'acquisitions dans une écluse permet de mettre en évidence et d'analyser ces artefacts, voir section 4.2.

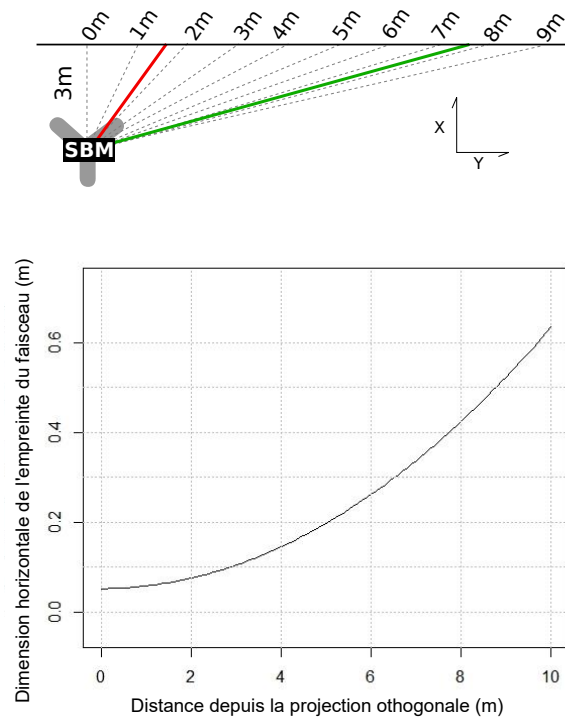


FIGURE 4.5 – En haut : illustration du dispositif théorique d’acquisition vu du dessus; en bas : estimation de la dimension horizontale de l’empreinte d’acquisition en fonction de la distance depuis le projeté orthogonal de la station sur le mur.

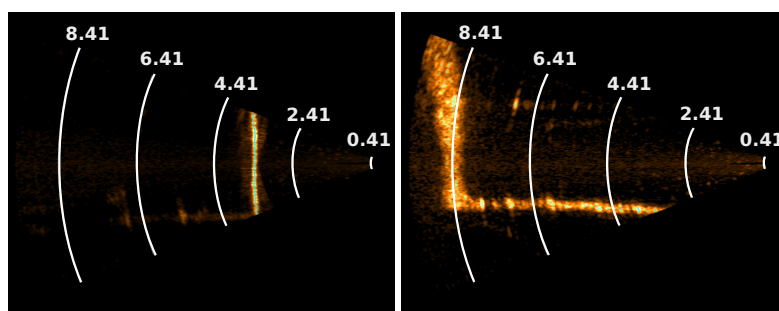


FIGURE 4.6 – Images acoustiques du sondeur multifaisceaux suivant deux directions différentes de la fauchée. (à gauche) La direction est telle que l’incidence d’acquisition est proche de la normale (cf. la ligne rouge sur la figure 4.5), alors que pour l’image (à droite) l’angle d’incidence est rasant (cf. la ligne verte sur la figure 4.5). La représentation du mur est plus large dans le second cas. Les distances sont en mètre.

4.2 Évaluation des capacités du sonar

Dans le but d'évaluer les capacités du sonar, une expérimentation a été effectuée dans une écluse. Pour cela, la chambre de l'écluse a été levée avec un SLT après avoir été vidée, puis avec le SBM quand elle fut de nouveau remplie. Ensuite les deux modèles ont été comparés afin d'analyser qualitativement et quantitativement le modèle 3D sonar.

Ce travail a été présenté lors du congrès de l'ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) qui a eu lieu à Prague en juillet 2016.

4.2.1 Approche employée pour l'évaluation des mesures sonar

4.2.1.a Expérimentation en écluse

Le site expérimental est l'écluse n° 50 du canal de la Marne au Rhin, voir figure 4.7. La chambre de l'écluse obéit au gabarit Freycinet qui était en vigueur pendant sa construction, puisqu'elle mesure : 43,2 m de long pour 5,2 m de large et plus de 2,6 m de tirant d'eau. La différence de niveau d'eau entre les phases de remplissage et de vidage est approximativement de 1,6 m. Au total, les parois ont une hauteur de 5,1 m. En décembre 2015, l'écluse a été close avec des batardeaux pour être vidée afin d'effectuer des travaux de maintenance, voir figure 4.7c. À ce moment était aussi prévu par VNF la numérisation 3D de la chambre afin d'effectuer le contrôle géométrique du gabarit de celle-ci. Ainsi, à partir du levé laser de l'écluse, nous avons à la fois réalisé cette étude (MOISAN, 2015) et construit un modèle de référence pour évaluer le sonar.

Le levé au SLT a été accompli avec l'INSA de Strasbourg le 1^{er} décembre 2015 (plusieurs acquisitions complémentaires ont été réalisées ultérieurement, après le démontage d'un échafaudage). Six acquisitions au scanner ont été effectuées depuis le fond de l'écluse vide et huit depuis le haut. Le SLT employé est le Faro Focus 3D X330. Des cibles sphériques telles que le montre l'image de la figure 4.8a ont été réparties tout autour de la scène afin de faciliter la consolidation des numérisations. Le recalage des acquisitions a été effectué avec le logiciel Faro Scene et la précision de celui-ci est sub-centimétrique. Le modèle

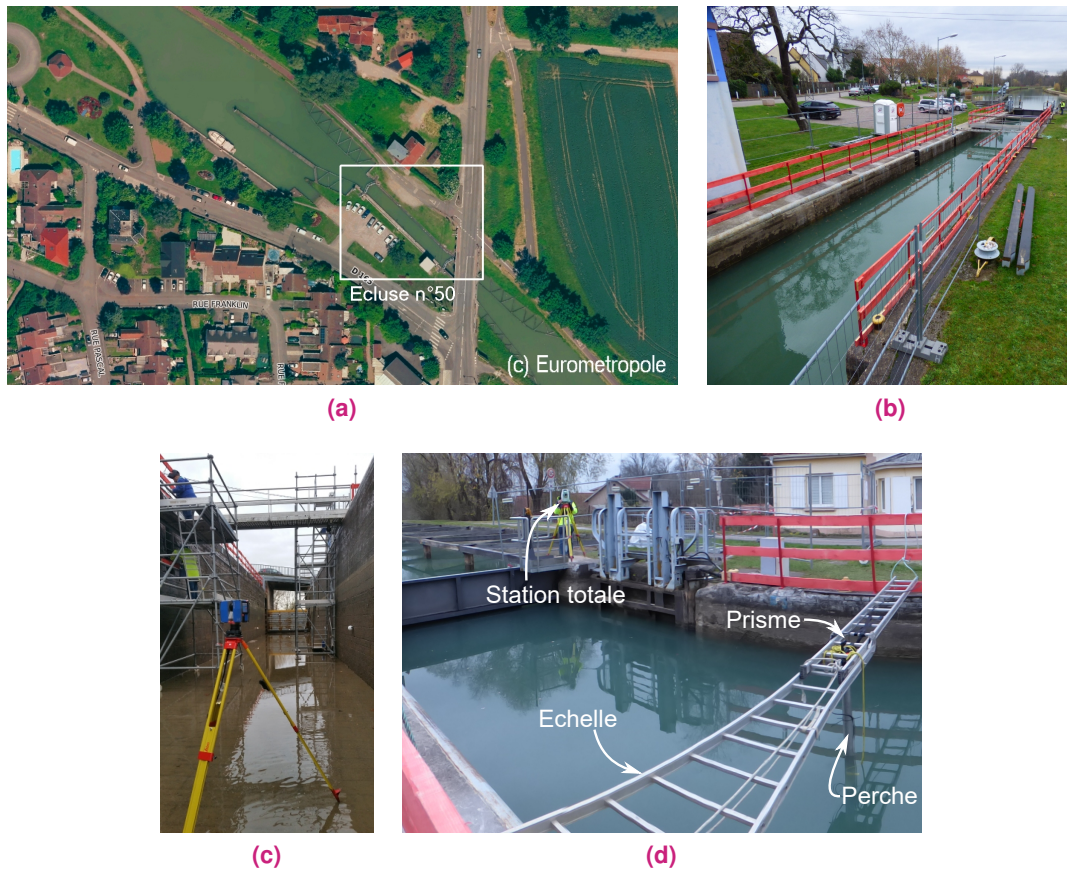


FIGURE 4.7 – (a) Vue aérienne de l'écluse, (b) vue de l'écluse durant les opérations de maintenance, (c) levé 3D avec le SLT, (d) vue de l'expérimentation avec le SBM après remplissage.

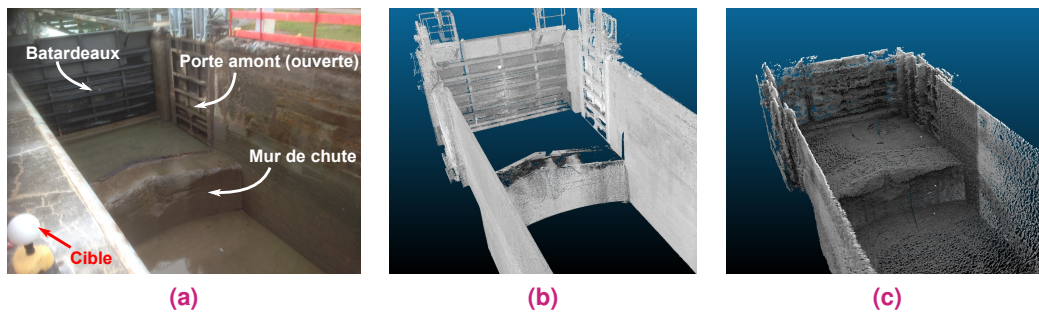


FIGURE 4.8 – (a) vue d'une partie de l'écluse vide, à savoir la porte amont, (b) : modèle laser correspondant, (c) modèle sonar correspondant

obtenu est considéré comme la référence pour la suite de l'étude. Un échantillon de ce modèle correspondant au haut de l'écluse est visible sur la figure 4.8b.

Le levé avec le SBM a été exécuté par la société Sub-C marine le 4 décembre 2015, immédiatement après le remplissage de l'écluse, de manière à ce que l'état de l'ouvrage soit le même que lors du levé au SLT. Toutefois, la porte aval a été fermée entre les deux

acquisitions. Une première visualisation de ces mesures est donnée par la figure 4.8c. L'eau du canal est plutôt turbide, comme le montrent les images, et la vitesse du son dans ce milieu était d'environ 1434 m.s^{-1} (valeur mesurée avec le capteur CastAway-CTD de la société SonTek).

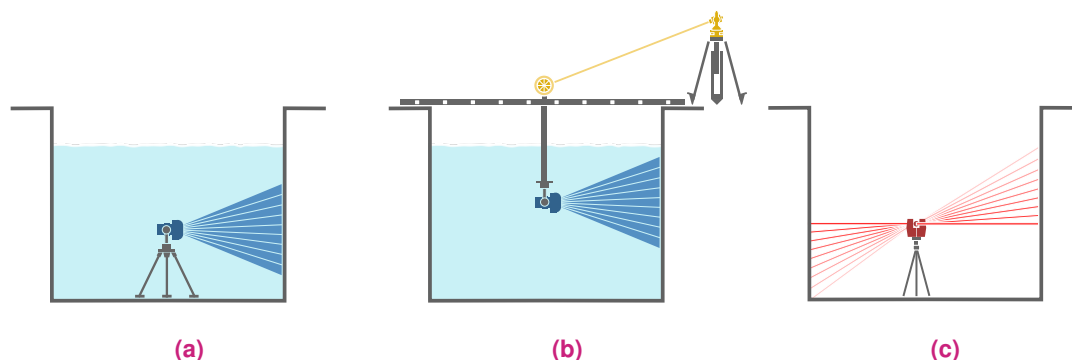
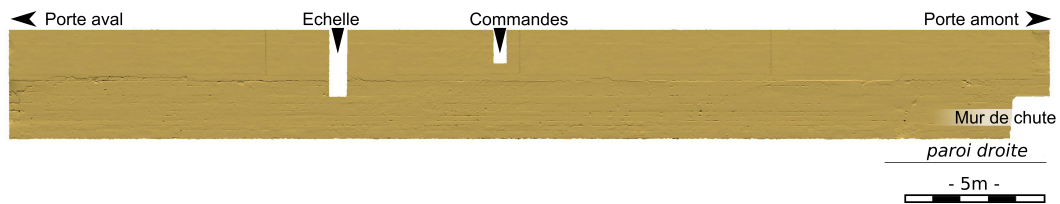


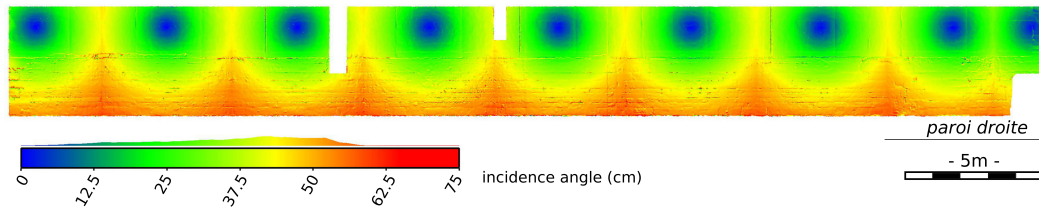
FIGURE 4.9 – Illustration des levés effectués : avec le SBM placé sur un trépied et déposé au fond du canal (a), avec le SBM suspendu depuis la surface à l'aide d'une échelle traversant l'écluse et sur laquelle est fixé une perche (b), avec un SLT lorsque l'écluse était vide (c)

Le SBM a été déployé de deux façons. La première fois, il était placé sur un trépied et déposé au fond de l'écluse, voir figure 4.9a. La seconde fois, l'appareil était immergé la tête en bas depuis la surface, voir figure 4.7d et figure 4.9b. Pour ce faire, une échelle a été placée de part en part de l'écluse. Au milieu de celle-ci, un mât métallique au bout duquel a été fixé le SBM, plonge dans l'eau. De cette manière, le SBM est situé 80 cm sous la surface. Une cible topographique (prisme) a été attachée à la fixation du mât sur l'échelle. Lors de l'expérimentation, pour chaque station d'acquisition du SBM, le prisme et deux points en direction de l'axe du mât ont été mesurés avec soin avec une station totale. Grâce à ces informations, il est possible de connaître la position du sonar et les angles pour mettre à niveau les numérisations. Dans le but de compléter la consolidation des acquisitions, une méthode a été développée pour estimer le dernier paramètre d'orientation à savoir la direction horizontale. Celle-ci est exposée dans la section 4.2.1.b.

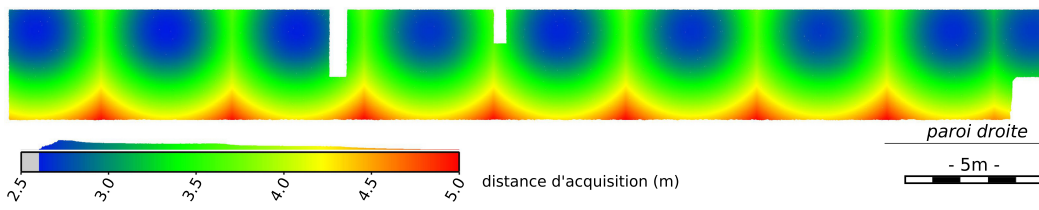
Avec cette mise en œuvre suspendue, des acquisitions ont été opérées tous les 5 m le long de l'écluse, fournissant ainsi 9 nuages de points au total. Pour chaque station, la tête du sonar a effectué trois rotations de 360° autour de son axe vertical, avec une inclinaison successive de 15° , -15° et -45° . Avec cette configuration, l'angle d'incidence maximum des mesures est de 75° et la visée maximale est de 5 m. Les figures 4.10b et 4.10c illustrent les variations des distances d'acquisition et des angles d'incidence sur une paroi de l'écluse. Nous pouvons remarquer qu'en plaçant plus profondément le sonar, les distances d'acquisition et les angles d'incidences diminueraient, offrant ainsi de meilleures conditions d'acquisition.



(a) Maillage issu des acquisitions laser du côté droit de l'écluse. Les deux indentations correspondent à une échelle et à l'espace dans lequel se trouvent les commandes de l'écluse.



(b) Estimation des distances d'acquisition du SBM



(c) Estimation des incidences d'acquisition du SBM

FIGURE 4.10 – Estimation des conditions d'acquisition du SBM.

4.2.1.b Construction du modèle subaquatique

Dans le but de construire le modèle 3D entier de l'écluse à partir des acquisitions subaquatiques, une méthode originale a été déployée. L'objectif de celle-ci est d'aligner les numérisations obtenues avec le SBM suspendu depuis la surface. Le procédé de consolidation avancé comprend deux étapes :

1. Chaque nuage de points est translaté et mis à niveau grâce aux mesures topographiques ;
2. Les nuages de points sont orientés horizontalement.

La mise à niveau et la translation des numérisations sonar.

Pour cette première étape, l'objectif est de déterminer, pour chaque numérisation, la translation et les rotations à appliquer pour que l'axe de rotation de sonar soit orienté dans le système de coordonnées national, ce que nous appelons la mise à niveau. Pour ce faire, les deux informations recherchées sont le centre d'acquisition du sonar, O , et l'axe de rotation horizontal du SBM, \mathbf{v}_T . Afin de déterminer ces grandeurs, trois points ont été mesurés sur le système grâce aux techniques traditionnelles de topographie (station totale). Les éléments visés sont deux points (A et B) en direction de l'axe du tube qui relie le SBM à l'échelle et un prisme placé au dessus du tube (C). Ces trois points sont illustrés sur la figure 4.11.

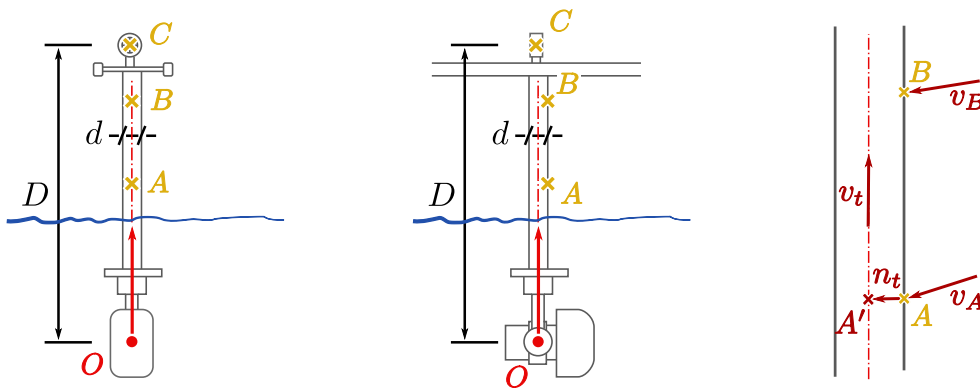


FIGURE 4.11 – Vue du système pour l'acquisition avec le SBM suspendu, (gauche) dans la direction des visées effectuées par la station totale et (centre) perpendiculairement à cette direction ; (droite) agrandissement au niveau du tube.

Tout d'abord, les points A et B permettent d'obtenir la direction de l'axe du tube ($\mathbf{v}_T = \hat{\mathbf{v}}_{AB}$). Dans le but de calculer la position de cet axe, nous déterminons le vecteur unitaire \mathbf{n}_T , normal à \mathbf{v}_T , qui, depuis tout point de la droite (AB), est dans la direction de l'axe du tube. De cette manière, il est possible de calculer le point A' appartenant à l'axe du tube :

$$\mathbf{n}_T = \mathbf{v}_T \wedge (\mathbf{v}_A \wedge \mathbf{v}_B) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \frac{d}{2} \mathbf{n}_T \quad (4.2)$$

Dans l'équation 4.1, les vecteurs \mathbf{v}_A et \mathbf{v}_B sont les vecteurs unitaires définissant la direction de la visée des points A et B depuis la station totale et d est le diamètre du tube. À partir

des points A' et C et de la distance $D = OC$ mesurée sur le terrain, les coordonnées du point O sont définies de la sorte :

$$\mathbf{O} = \mathbf{A}' + (D - \mathbf{v}_{A'C} \cdot \mathbf{v}_T) \mathbf{v}_T \quad (4.3)$$

Connaissant les coordonnées du centre d'acquisition du sonar O et de son axe de rotation horizontal (\mathbf{v}_t), la détermination des translations et rotations associées à chaque numérisation est simple. Ainsi, les numérisations sont mises à niveau et translattées.

L'orientation horizontale

Il reste maintenant à déterminer la rotation horizontale des numérisations. Concrètement, il s'agit d'estimer, pour chaque numérisation sonar, la rotation autour de l'axe vertical passant par le centre d'acquisition associé O_i . Pour déterminer ces angles, nous avons cherché à déterminer l'orientation globale de l'axe du canal. Pour cela, le procédé mis en œuvre compte trois étapes qui sont illustrées dans la figure 4.12.

La première opération consiste à déterminer l'axe du canal dans chaque nuage de points, voir figure 4.12a. Dans notre approche, nous supposons que l'écluse est symétrique suivant un plan vertical. Ce plan définit l'axe longitudinal de l'écluse. Il est estimé pour chaque nuage de points en appliquant une Analyse en Composantes Principales (ACP), décrite en section 4.4.2.b. Dans la suite du procédé, nous cherchons à aligner ces axes de symétrie en appliquant à chacun d'eux une rotation suivant l'axe vertical passant par le centre d'acquisition du sonar (O_i) qui lui est propre. De cette manière, ces axes de l'écluse déterminés localement seront confondus avec l'axe global de l'écluse qui est orienté suivant un azimut β et qui se trouve à une distance P de l'origine du repère, comme le montre la figure 4.12d. Lors de la résolution de ce problème, les centres d'acquisitions du sonar (O_i) et les distances entre ces points et les axes de symétrie qui leur sont associés (Δ_i) doivent rester fixes.

En réalité, la rotation définie pour passer de la configuration initiale au modèle orienté est décomposée en deux rotations. Tout d'abord, chaque axe est pivoté d'un angle α_i , pour que sa direction soit orientée suivant l'axe des ordonnées, voir figure 4.12b. À ce stade, les distances entre l'origine et chacun des axes sont obtenues de la manière suivante :

$$p_i(0) = \mathbf{u}_0^T \mathbf{O}_i + \Delta_i \quad \text{où} \quad \mathbf{u}_0 = \vec{i} \quad (4.4)$$

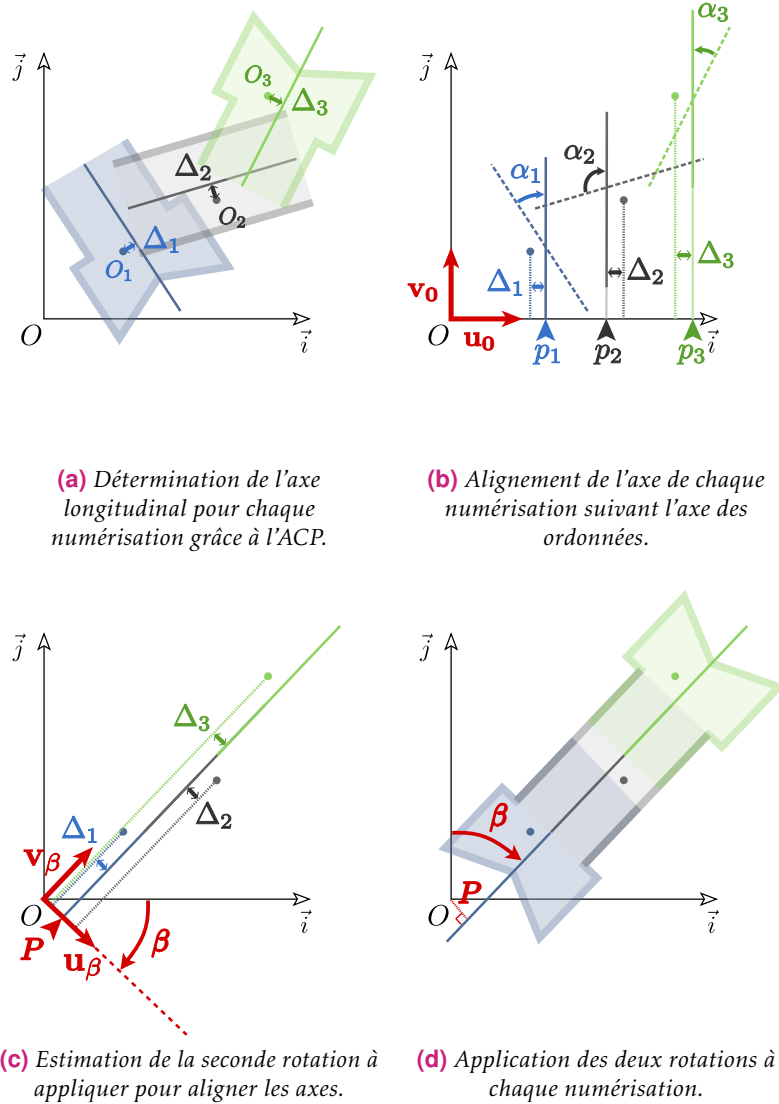


FIGURE 4.12 – Illustration de la procédure d'alignement horizontal des numérisations sonar.

De plus, à partir de cette configuration, l'application d'une rotation d'angle β' à tous les axes revient à les orienter suivant un azimuth β' . Nous pouvons calculer les distances à l'origine p_i en fonction de β' grâce à l'expression suivante :

$$p_i(\beta') = \mathbf{u}_{\beta'}^\top \mathbf{O}_i + \Delta_i \quad \text{où} \quad \mathbf{u}_{\beta'} = \mathbf{R}_{\beta'}^\top \mathbf{u}_0 \quad \text{avec} \quad \mathbf{R}_{\beta'} = \begin{pmatrix} \cos \beta' & -\sin \beta' \\ \sin \beta' & \cos \beta' \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Si tous les axes sont alignés, alors ils sont confondus avec l'axe global de l'écluse, comme le montre la figure 4.12c. Dans ce cas, $\beta' = \beta$ et toutes les valeurs p_i sont égales à P . En

réalité, il existe toujours des imperfections. Donc nous estimons β' et P' au sens des moindres carrés en minimisant :

$$J(P', B') = \sum_i (p_i(\beta') - P')^2 \quad (4.6)$$

En développant cette expression nous obtenons la formule suivante :

$$J(P', B') = \sum_i (x_{O_i} \cos \beta' - y_{O_i} \sin \beta' + \Delta_i - P')^2 \quad \text{avec} \quad \mathbf{O}_i = \begin{pmatrix} x_{O_i} \\ y_{O_i} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Comme l'estimation de β n'est pas linéaire, nous avons utilisé la méthode d'optimisation de Gauss-Newton. La solution approchée nécessaire à son initialisation a été obtenue en alignant les axes des numérisations réalisées aux extrémités de l'écluse.

De cette manière, nous avons pu aligner les axes et donc consolider le modèle 3D. La figure 4.13 présente le modèle 3D entier de l'écluse obtenu qui peut être comparé au modèle 3D généré avec les acquisitions du SLT. La méthode proposée produit des résultats satisfaisants. Cependant, des améliorations sont envisagées. En effet, la solution trouvée peut être affinée en utilisant des techniques globales, comme l'algorithme ICP que nous avons présenté dans la section 3.2.2. De cette manière, nous n'avons plus recours à des hypothèses sur la géométrie de l'écluse. Par contre, cette méthode nécessite du recouvrement entre les numérisations et donc de prendre en compte le bruit et la perte de résolution en fonction de l'incidence et de la distance. Ainsi, l'estimation doit être pondérée en fonction de ces deux critères.

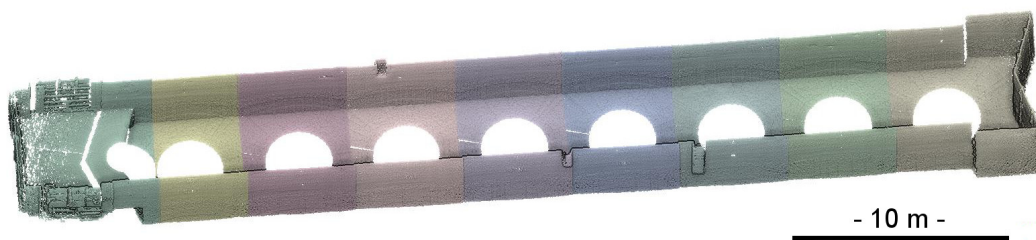


FIGURE 4.13 – Modèle sonar complet de l'écluse. Les 9 numérisations sont représentés avec des couleurs différentes.

4.2.2 Résultats de l'évaluation

Cette section présente l'évaluation des capacités du BV5000 à numériser. Cette étude renseigne aussi sur les propriétés des mesures du SMF MB1350 puisque c'est ce capteur qui est attaché au SBM. Trois analyses ont été effectuées dans ce but. La première présente un inventaire des perturbations qui altèrent les données sonar. Puis, le modèle 3D subaquatique est comparé au modèle laser afin de fournir une étude quantitative. Enfin, l'aptitude du sonar à modéliser des détails a été examinée.

4.2.2.a Bilan des artefacts observés

Comme cela est observable sur la figure 4.8, l'information fournie par le SLT et celle donnée par le SBM sont sensiblement différentes. Par exemple, le sol, non parfaitement asséché, n'a pas pu être numérisé par le laser tandis qu'il est visible dans le nuage de points sonar. À l'inverse, aucune information des parties émergées de l'écluse ne peut être extraite du modèle sonar. La différence visuelle la plus notable est l'aspect granuleux du modèle sonar. Ce caractère est aussi visible sur la figure 4.14 qui présente la donnée brute produite par le SBM sans aucun post-traitement. Au delà de l'aspect bruité de la numérisation, cinq types d'artefacts peuvent être mis en évidence à partir de cette figure. Dans la suite de cette partie, nous proposons de les interpréter en considérant 3 origines possibles, à savoir : la technologie employée, la configuration de l'expérimentation, les propriétés de l'objet mesuré.

Tout d'abord, plusieurs artefacts sont dus aux réflexions du signal sur la surface de l'eau. Ces points (n°1) sont coloriés en saumon sur la figure 4.14. Ils sont aisément supprimés si le niveau de l'eau est connu, ce qui nécessite des moyens externes. Dans la section 4.4.2, ce sont des échelles qui sont utilisés à cet effet. Dans le cas présent, le niveau de l'eau a été mesuré à l'aide d'un tachéomètre. Le phénomène de réflexion est aussi observé pour d'autres surfaces (typiquement, les murs). Les points correspondant sont enlevés manuellement, car la forme de l'écluse est approximativement connue et ils sont donc des aberrations visibles. D'autres artefacts sont attribués à des phénomènes acoustiques se produisant dans l'eau. Il en résulte des objets « fantômes » (voir n°2 sur la figure 4.14) ou des formes systématiques se produisant lors de la rétrodiffusion du signal par la surface (voir n°3 sur la figure 4.14). Dans notre cas, tous ces points aberrants ont été manuellement traités avant la consolidation des nuages de points.

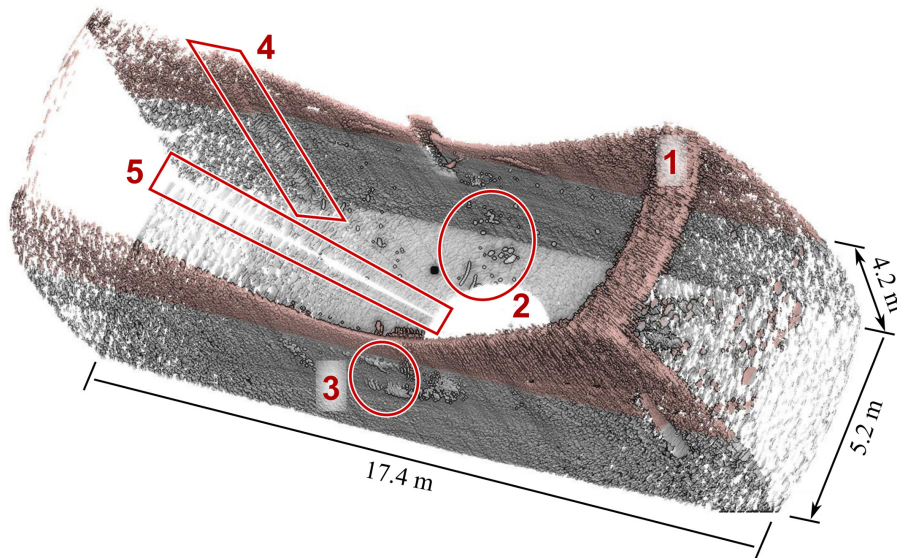


FIGURE 4.14 – Rendu d'un nuage de point sonar (à partir d'une seule position d'acquisition). 1 : artefacts dûs à la réflexion du signal sur la surface de l'eau. 2 : anomalies acoustiques dans l'eau. 3 : phénomènes acoustiques se produisant à la rétrodiffusion du signal. 4 : anomalie d'acquisition probablement causé par un arrêt temporaire de la rotation horizontale du système. 5 : absence de mesures.

Ensuite, l'aspect granulaire des données SBM devient de plus en plus visible à mesure que la distance depuis la station d'acquisition augmente. Les coupes transversales et longitudinales, introduites par la figure 4.15, le met aussi en évidence. Ces imprécisions croissantes peuvent être expliquées par le bruit inhérent à la mesure sonar. Ce fait s'explique aussi par l'augmentation de la taille de l'empreinte du signal avec la distance et l'incidence d'acquisition. Or, ce type de condition de mesure défavorable est fortement présent dans les environnements étroits, comme un canal (voir section 4.1.2.a). Pour amoindrir ce bruit, des algorithmes spécifiques de filtrage sont à employer. Une méthode, que nous avons utilisée à plusieurs reprises, est basée sur la construction d'un maillage. Le procédé est détaillé dans la section 4.4.1.b.

D'autres artefacts semblent être liés au mécanisme de balayage du système. Par exemple, nous avons remarqué que certains profils, qui correspondent à des angles d'acquisition successifs, sont très similaires (voir n°4 sur la figure 4.14). Une explication possible est que le mécanisme rotatif s'est temporairement bloqué alors que le système continuait d'incrémenter des profils à des angles d'acquisition. Cette erreur a pour conséquence d'altérer la géométrie du nuage de points. Par exemple, sur la figure 4.14, le nuage de points de la paroi présente des courbures anormales. La figure 4.15b fournit aussi une justification *a posteriori* du choix d'effectuer les stations d'acquisition tous les 5 m. En effet, de cette manière le modèle est tronqué avant que cette altération géométrique devienne prééminente.

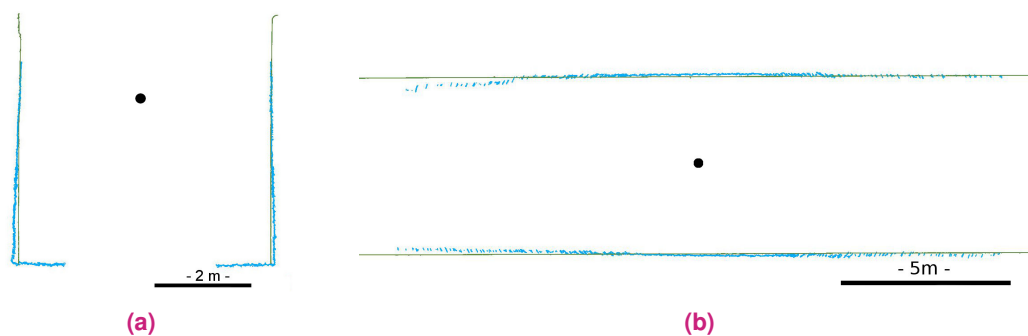


FIGURE 4.15 – Coupes (a) verticale et (b) horizontales des nuages de points acquis par le SBM (bleu) et par le SLT (vert). Les points noirs désignent la position de la tête du sonar pendant les acquisitions.

De plus, la géométrie du nuage de points peut aussi être déformée si l'angle d'inclinaison du sonar assigné aux données, est erroné (LESNIKOWSKI ET RUSH, 2012). Cette erreur est observée en comparant les coupes transversales des modèles laser et sonar, voir figure 4.15a. En effet, pour le modèle sonar, les parois s'écartent en allant en direction du fond de l'écluse. Or ce phénomène n'est pas présent pour la coupe du modèle laser. Une étude a été menée au cours de la thèse dans le but de corriger cette erreur. Celle-ci a été réalisée par Simon Vaoclare, alors étudiant en 5^e année à l'INSA de Strasbourg (VAUCLARE, 2017). L'approche utilisée pour rectifier l'inclinaison consiste à transformer les coordonnées cartésiennes des points en coordonnées sphériques. Sachant que le système de coordonnées dans lequel sont définis les points avant la consolidation a pour origine le centre d'acquisition du sonar et pour axes des côtes, l'axe de rotation horizontal du système, l'angle zénithal qui est la troisième coordonnée sphérique, est la donnée à rectifier. La correction apportée a été estimée de deux manières. La première consiste à la déterminer de manière empirique. Pour cela, plusieurs corrections ont été testées pour ne garder en définitive que celle qui produit le modèle le plus proche du modèle lasergrammétrique. La seconde méthode a été d'estimer les plans des parois dans les numérisations sonar acquises depuis le fond du canal. Ensuite, il s'agit de calculer l'angle à apporter pour que ces plans soient parallèles. Les deux méthodes ayant fourni des résultats similaires, elles peuvent être validées. Comme la seconde méthode n'utilise aucune des données destinées à la comparaison des modèles laser et sonar, la correction reste indépendante de cette étude quantitative.

Une dernière remarque concernant les données du SBM est que tous les nuages de points présentent une zone non levée (voir n°5 sur la figure 4.14). Cet espace est variable en taille, mais apparaît sensiblement dans la même direction de numérisation. Son origine est difficile à expliquer. Ce phénomène est aussi visible sur la figure 4.9 dans (THOMAS, 2011, p. 76).

Pour conclure, le système rotatif a été modifié pour les nouveaux modèles de BV5000. Il est possible qu'avec ce système certains défauts observés soient corrigés.

4.2.2.b Comparaison des modèles lasergrammétrique et bathymétrique

Le principal objectif de cette expérimentation est d'évaluer quantitativement les acquisitions du BV5000 en les comparant à celles obtenues avec un SLT. À l'aide de l'outil d'inspection de CloudCompare, nous avons calculé les distances entre les points du nuage sonar et du modèle laser. Ce module de CloudCompare est inspiré de l'algorithme METRO (CIGNONI et al., 1998).

Pour accomplir cette étude, plusieurs modalités ont été prises en compte. Tout d'abord les deux modèles doivent être définis dans un même repère. Cette condition a été remplie grâce au levé topographique de cibles (sphères) utilisées pour le géoréférencement du modèle laser et grâce à la mesure de points sur le dispositif d'acquisition subaquatique, voir section 4.2.1.a. Ensuite, les points entre lesquels les distances sont calculées, sont censés être homologues. Les topologies des surfaces comparées doivent être simples, c'est-à-dire relativement lisses et presque sans occultation. Afin de satisfaire complètement ce pré-requis, les modèles ont été segmentés afin de ne garder que les parois (voir figure 4.16). En pratique, la comparaison a été effectuée pour chaque paroi séparément. Enfin, le résultat d'une comparaison nuage/nuage dépend fortement de la densité des nuages de points. Pour limiter ce problème, une solution consiste à mailler le nuage de référence. Par conséquent, le maillage du nuage de points laser a été effectué avec le logiciel 3DReshaper de la société Technodigit.

Les résultats de ce calcul de distance, effectué pour le nuage de points total et de chaque paroi, sont résumés dans le tableau 4.2. Cette étude a été réalisée avant et après correction de l'inclinaison du sonar. Nous pouvons voir que cette opération de correction a diminué les écarts entre la modélisation sonar et laser. Les histogrammes de la figure 4.17 montrent que les distributions des distances, calculées pour le nuage global et pour les nuages de chaque paroi, s'approchent de courbes gaussiennes.

Les écarts entre les modèles sonar et laser sont compris entre $-9,8$ et $10,7$ cm. La moyenne (en considérant les deux parois simultanément) des distances est $0,1$ cm et l'écart type $3,1$ cm. Toutefois, lorsque l'on observe les moyennes des écarts pour chaque paroi dans le tableau et sur les histogrammes, nous observons un biais d'environ 2 cm. Ce biais représente une légère translation entre le modèle sonar transversalement à l'axe de

Tableau 4.2 – Analyse des distributions des distances entre le maillage laser et le nuage de points sonar avant et après correction de l'inclinaison du SMF. Par convention les distances sont positives lorsque les points sonar se trouvent l'intérieur de l'écluse dans le modèle laser (c'est-à-dire que les points issus du SBM sont plus proches du centre de l'écluse que leur homologues issus du TLS). Les distances sont données en centimètre.

	paroi droite		paroi gauche		total	
	brut	corrigé	brut	corrigé	brut	corrigé
moyenne	-1,6	2,0	-3,3	-1,8	-2,4	0,1
écart-type	3,0	2,4	3,7	2,4	3,5	3,1
max	6,5	10,7	7,7	10,3	-14,4	10,7
min	-10,6	-6,5	-14,4	-9,8	7,7	-9,8

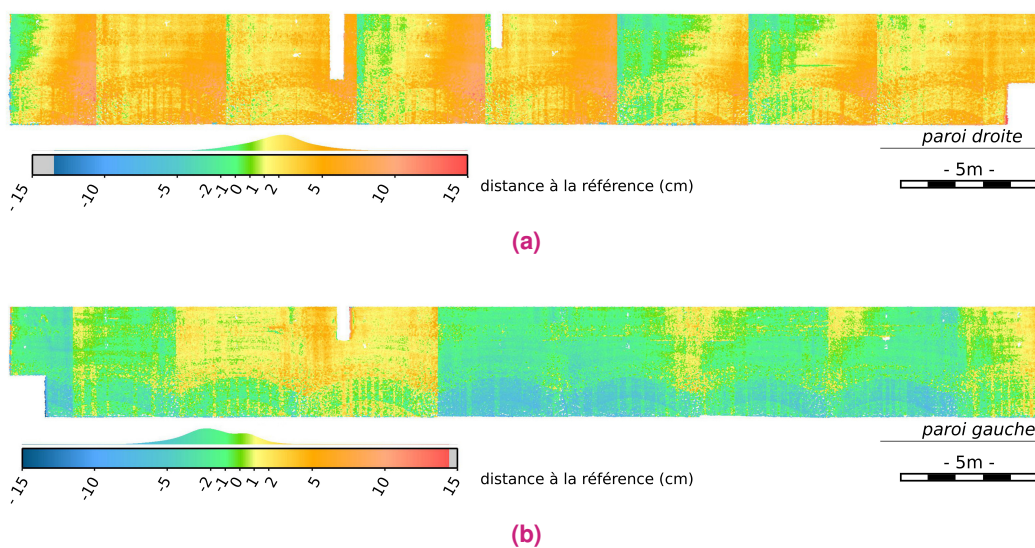


FIGURE 4.16 – Répartition des distances entre le nuage de points complet sonar et le maillage construit à partir des données du SLT pour la paroi droite (a) et la paroi gauche (b).

l'écluse. Cette explication semble se confirmer lorsque nous observons la figure 4.16. Pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait améliorer la procédure de géoréférencement.

Enfin, nous remarquons sur la figure 4.16a que la répartition des écarts n'est pas uniforme, mais que les distances augmentent au niveau d'une des extrémités de chaque numérisation. Dans ce cas, l'erreur due à un blocage du système rotatif est sans doute en cause.

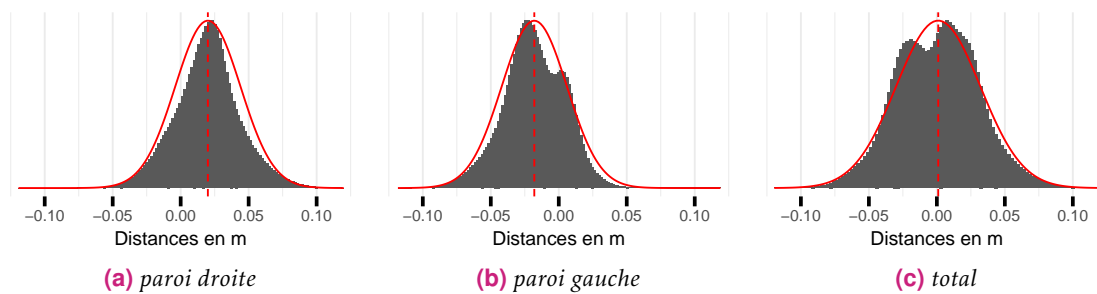


FIGURE 4.17 – Distributions statistiques des distances entre le maillage laser et le nuage de points sonar pour la paroi droite (a) et gauche (b) de l'écluse, ainsi que pour le total des deux parois (c). Les modèles gaussiens associés à ces distributions sont représentés par les courbes rouges.

4.2.2.c Examen des détails observables

La troisième étude se concentre sur la capacité du SBM à distinguer des détails sur la structure de l'écluse et à les modéliser. Dans ce but, deux parties de l'écluse ont été choisies. La première est localisée sur la paroi gauche. Dans cette zone, un moellon (dimensions approximatives : 60 x 20 x 10 cm) est manquant et des joints de maçonnerie sont endommagés (ces anfractuosités sont larges d'environ 4 cm et profondes de 4 cm). Afin de faciliter la visualisation, le modèle sonar est un maillage construit à partir d'une partie de nuage de points extraite d'une acquisition effectuée avec le SBM suspendu (voir figure 4.18). L'aspect du modèle sonar (figure 4.18c) plus rugueux sur sa partie droite que sur sa partie gauche est lié à la variation des dimensions de l'empreinte du faisceau sonar et donc au changement de résolution spatiale qui en découle.

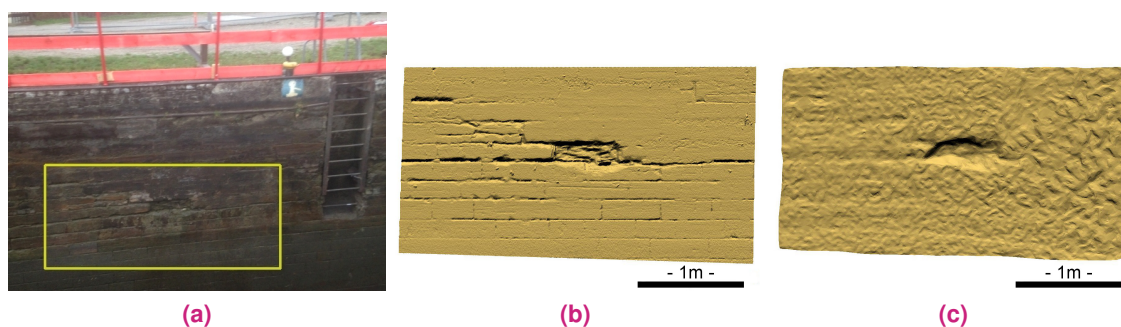


FIGURE 4.18 – Vue frontale d'une partie de la paroi de l'écluse (a), ainsi que les modèles laser (b) et sonar (c) correspondant à cette zone.

La seconde zone est le mur de chute de l'écluse. Il a cette fois été acquis avec le SBM placé sur un trépied et déposé sur le fond de l'écluse, à environ 5 m de la cible. La disposition du sonar était semblable à celle du SLT lors du levé dans l'écluse vide. Le mur de chute présente une épaufrure. Les dimensions de cette cavité sont approximativement

50 x 100 x 15 cm. Cette zone présente aussi des joints de maçonnerie endommagés. Le maillage de cette portion de nuage de points sonar a aussi été effectué, voir figure 4.19.

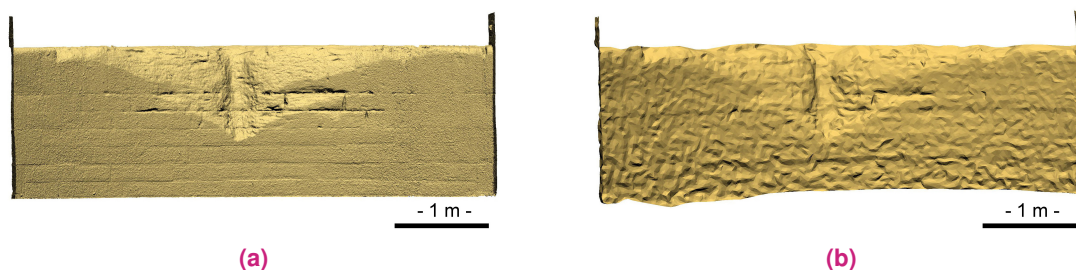


FIGURE 4.19 – Vue frontale des modèles laser (a) et sonar (b) du mur de chute.

Ces exemples visuels démontrent que les défauts de taille importante présents dans la maçonnerie, comme des moellons manquants ou des cavités, sont détectés dans le nuage de points acquis par le SBM. Néanmoins, les détails inférieurs à 4 cm, comme des joints de maçonnerie endommagés, sont plus difficilement décelables. Cette évaluation permet de valider la pertinence d'utiliser un SMF pour ce type relevé, et de mieux connaître la plus petite taille des défauts accessibles. Enfin, nous avons remarqué que la qualité de restitution des détails du SMF utilisé de manière statique est variable suivant la distance et l'angle d'incidence des acquisitions. Or, lorsque le SMF est employé de façon dynamique, ces configurations défavorables de mesure sont beaucoup moins présentes qu'avec le SBM. Ainsi, la modélisation 3D des détails est globalement meilleure avec le SMF employé de manière dynamique que statique.

4.3 Évaluation du calcul de trajectoire

L'estimation de la trajectoire du bateau a une grande influence sur la reconstruction 3D des parties subaquatiques car c'est à partir de celle-ci que sont alignés les profils de points produits par le sonar. Par conséquent, son évaluation offre une première appréciation du calcul photogrammétrique et de la méthode appliquée pour la modélisation des parties immergées. Dans cette partie, nous traiterons des résultats obtenus avec la solution Micmac et ceux déterminés avec le logiciel Photoscan.

4.3.1 Analyse des distances inter caméra pour chaque acquisition

La première étude consiste à examiner les distances entre les centres de perspective des caméras estimés pour chaque acquisition, dont le tableau 3.3 donne un ordre de grandeur. Celles-ci devraient rester constantes pour chaque réglage, puisque toutes les caméras sont déclenchées en même temps. L'observation des écarts-types associés à l'estimation des distances inter-caméras, présentés dans le tableau 4.3, atteste que cette contrainte de rigidité a bien été prise en compte lors du calcul avec le logiciel Micmac, puisque ceux-ci sont nuls à la précision machine près. Par contre, nous remarquons que cet écart-type est en moyenne de 8 mm et varie de 1 mm à 13 mm pour les résultats de Photoscan.

Tableau 4.3 – Tableau synthétisant l'étude des distances inter-caméras déterminées à chaque acquisition pour chaque passage. Cette analyse a été effectuée avec les résultats de Photoscan et de Micmac (MM). La partie gauche du tableau présente la précision des distances inter-caméras. La partie droite donne les Erreur Moyenne Quadratiques (EMQs) calculées par comparaison des distances à celles estimées au moment du calibrage (décrit section 3.2.2).

		Écart-type			EMQ		
		moy.	min	max	moy.	min	max
Photoscan	passage 1	0,008	0,002	0,012	0,020	0,002	0,044
	passage 2	0,008	0,001	0,013	0,024	0,002	0,051
	passage 3	0,008	0,001	0,012	0,018	0,002	0,027
	passage 4	0,007	0,001	0,011	0,019	0,001	0,033
	passage 5	0,008	0,001	0,012	0,025	0,005	0,044
	passage 6	0,008	0,002	0,013	0,029	0,002	0,048
MM	passage 2	0,000	0,000	0,000	0,019	0,001	0,045
	passage 4	0,000	0,000	0,000	0,020	0,001	0,037

Ensuite, nous avons comparé ces distances à celles déterminées dans le modèle lasergrammétrique au moment du calibrage (3.3). La finalité de cette étude est double. Tout d'abord, elle nous informe sur la qualité du calcul photogrammétrique et plus particulièrement sur la restitution des blocs de caméras estimés. En effet, les distances inter-caméras des blocs devraient se rapprocher de celles issues de la lasergrammétrie, aux incertitudes de la calibrage près. Deuxièmement, cette analyse donne une idée de l'erreur que l'on va introduire lors de l'alignement du bloc de caméras calibré sur les blocs estimés pour géoréférencer notre système d'acquisition, voir section 3.4.3.

Les résultats de cette évaluation sont aussi reportés dans le tableau 4.3. Nous observons que les EMQ issues des calculs de Photoscan sont en moyenne de l'ordre de 2-3 cm et varient de 1 mm à 51 mm. Concernant, les résultats obtenus avec Micmac, les exactitudes sont en moyenne de 2 cm et varient de 1 mm à 45 mm.

La différence entre la précision donnée par l'écart-type et l'exactitude représentée par l'EMQ laisse à penser à la présence d'un biais. Les erreurs introduites par le calibrage et la photogrammétrie sont à l'origine de résultat. De plus, nous avons comparé les distances inter caméras entre deux passages utilisant une même configuration de caméras (passages 1 et 2). La moyenne des différences des distances est de 6 mm (max. 18 mm) avec Photoscan. Ainsi, la détermination des blocs des caméras varie suivant les passages, ce qui confirme que le calcul photogrammétrique est en partie à l'origine du biais observé.

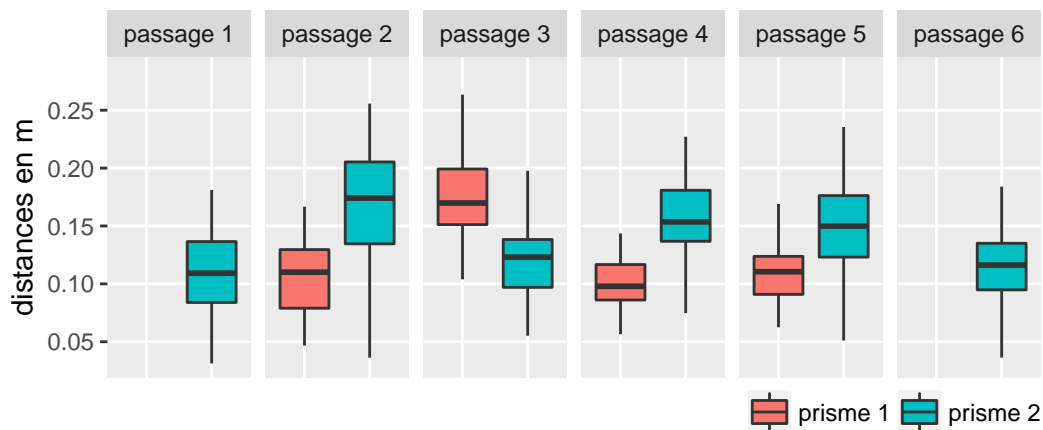
4.3.2 Comparaison des trajectoires

La seconde étude consiste à comparer les trajectoires des deux prismes installés sur le bateau calculées à partir de la photogrammétrie à celles obtenues par le suivi tachéométrique (voir section 3.3.2). Pour obtenir les trajectoires des prismes à partir des positions des caméras, nous avons appliqué le bras de levier estimé. L'horodatage des mesures des stations totales étant trop imprécis, les positions des prismes n'ont pas pu être interpolées de manière à synchroniser les acquisitions d'images aux mesures tachéométriques. Ainsi, la comparaison des trajectoires se limite à déterminer la distance orthogonale entre les positions des prismes déterminées par photogrammétrie et leur trajectoire associée, produite par topographie.

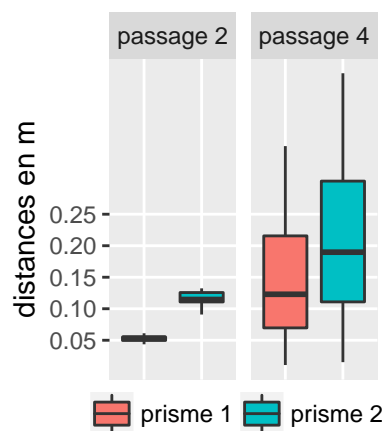
L'exactitude des trajectoires estimées par photogrammétrie dépend de la qualité des calculs photogrammétriques et de l'estimation du calibrage, mais aussi de la qualité de l'application du bras de levier. Ainsi, les résultats de cette analyse nous informent sur la faculté de notre procédé employé pour géoréférencer les données sonar.

Les comparaisons des trajectoires sont synthétisées dans la figure 4.20. On note que les écarts observés entre les trajectoires des prismes sont situés entre 10 et 20 cm. Toutefois, nous remarquons que cette analyse offre de bien meilleurs résultats pour la trajectoire prisme 1 du passage 2 obtenue à partir du calcul de Micmac. En effet, dans ce cas, la moyenne des écarts est 5,4 cm et l'écart-type est de 4 mm.

En outre, excepté pour le passage 3, l'estimation du prisme 1 est plus exacte que celle du prisme 2. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le second prisme est plus éloigné des caméras sur le bateau que le premier (voir tableau 3.3). Un défaut d'alignement du bloc caméra calibrés sur ceux estimés par photogrammétrie a une plus grande incidence sur la détermination de la position du prisme 2 que pour le prisme 1. Le sonar étant encore plus proche des caméras, nous pouvons espérer une meilleure exactitude sur l'estimation de sa position. De plus, la différence entre les écarts des trajectoires des



(a)



(b)

FIGURE 4.20 – Représentations statistiques des distances entre les trajectoires des deux prismes obtenues par tachéométrie et les positions de ces cibles estimées grâce au calculs photogramétriques effectués avec le logiciel Photoscan (a) et la solution Micmac (b). Lors des expérimentations, le prisme 1 n'a pas été mesuré par la station totale pour les passages 1 et 6. La représentation statistique en boîte à moustache indique la médiane dans la boîte, les 25 et 75 percentiles (Q1 et Q3) au niveau des côtés bas et haut de la boîte et les valeurs maximale et minimale par les extrémités du segment vertical.

deux prismes donne aussi un aperçu de l'erreur d'orientation du système et donc de l'orientation du sonar. Sans prendre en compte le passage 3, cette différence est de l'ordre de 5 cm.

4.4 Évaluation de la reconstruction 3D

L'objectif de cette étude est d'analyser la capacité de l'approche développée pour la numérisation 3D des tunnels navigables à partir d'acquisitions en dynamique. La démarche entreprise est de comparer le modèle obtenu par la méthode décrite dans la section 4.1.1 à un modèle de référence.

Dans cette section, nous aborderons la mise en œuvre de l'expérimentation et la méthode développée pour construire le modèle de référence. En dernier lieu, les résultats de la comparaison des modèles dynamique et de référence seront reportés.

La méthode employée pour la construction du modèle de référence a été présentée lors du premier workshop international du CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) consacré à l'imagerie subaquatique (MOISAN et al., 2015). L'article ayant été primé dans la catégorie "capteurs subaquatiques", un article a été publié dans le journal *Sensors* dans lequel ce travail est exposé de façon plus approfondie. Cette section en reprend les grandes lignes

4.4.1 Acquisition des données pour la construction du modèle de références

4.4.1.a Mise en œuvre de l'expérimentation au tunnel-canal de Niderviller

Le modèle de référence a été construit à partir d'acquisitions statiques. Un SLT a été employé pour lever les parties émergées du tunnel, voir figure 4.21a, et un SBM a permis de numériser les parties immergées, voir figure 4.21b. Concernant la construction du modèle subaquatique, nous avons été confrontés aux problématiques recensées dans la section 4.2.2.a. De plus, l'alignement des modèles sonar et laser est une autre problématique à laquelle nous devons apporter une solution.



(a)



(b)

FIGURE 4.21 – Acquisition des données au tunnel de Niderviller avec le SLT (a) et le SBM (b). Pour l'illustration (b), le fond du canal et l'appareil sonar ont été reconstitués. Le SBM est mis à l'eau depuis un bateau. Des échelles ont été aussi placés dans la zone levée en vue du géoréférencement des données sonar.

Les acquisitions expérimentales ont eu lieu le 30 octobre 2014 au tunnel-canal de Niderviller. Pour cette première campagne nous nous sommes focalisés sur le levé des entrées.

À chaque entrée, deux stations d'acquisitions ont été effectuées de part et d'autre du canal (voir figure 4.22), en parallèle des acquisitions subaquatiques. Ce modèle des parties émergées peut être complété avec celui précédemment acquis et recouvrant l'ensemble du tunnel. Afin de consolider ces numérisations, des sphères faisant office de cibles, ont été placées de manière adéquate dans la zone de levé, voir figure 4.21a. Dans le but de géo-référencer le modèle, les coordonnées des centres d'une partie des sphères installées ont été mesurées grâce aux méthodes traditionnelles de topographie (station totale). Comme le site est pourvu d'un réseau de points topographiques définis dans le système national français (RGF93 pour les coordonnées planaires et NGF-IGN 69 pour les altitudes), nous nous sommes basés sur ces points pour définir le modèle final, voir section 3.3.1.

Concernant les acquisitions subaquatiques, deux stations d'acquisitions séparées de 10 m ont été effectuées avec le SBM, l'une à l'intérieur du tunnel et l'autre à l'extérieur. Le SBM était placé sur un tripode et immergé dans le canal depuis un bateau, comme l'image de la figure 4.21b le montre. Le sol du canal étant composé d'un mélange de boue et de pierres, il constitue un support suffisamment rigide pour assurer la stabilité du SBM durant les acquisitions. Trois valeurs d'inclinaison du SMF attaché au SBM ont été appliqués afin de lever quasiment toutes les surfaces visibles depuis la station (limitées à une distance de 30 m). Seule manque la partie située sous le tripode, laissant un trou circulaire dans le nuage de points. La qualité des acquisitions est contrôlée sur site. La durée nécessaire

au SBM pour effectuer une station d'acquisition était de 30 min (ce temps dépend des paramètres d'acquisitions sélectionnés. Nous avons limité le nombre de stations afin de ne pas bloquer le trafic trop longtemps.

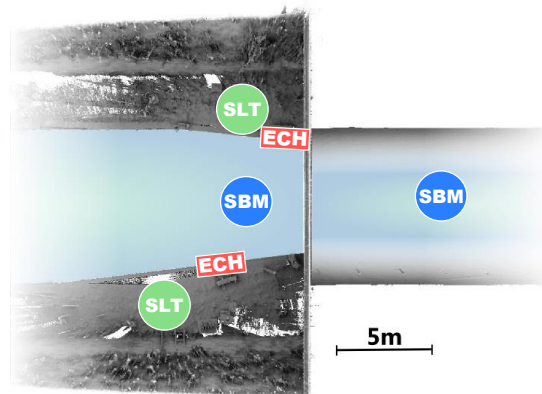


FIGURE 4.22 – Illustration vue du dessus du dispositif d'acquisitions. Les positions des stations d'acquisition y sont figurés du SBM et du SLT, ainsi que l'emplacement des échelles (ECH).

Enfin, deux échelles en bois (3,60 m de haut et 0,32 m de large) ont été partiellement immergées dans l'eau, dans le but d'être numérisées à la fois par le SLT et le SBM. Les échelles sont des objets aisément disponible et facile à disposer sur le site, c'est pourquoi elles sont adaptées à notre expérimentation. Les dimensions des échelles et leurs caractéristiques géométriques (parallélisme, orthogonalité et les distances inter-barreaux) sont mises à profit pour la consolidation des modèles laser et sonar. Le bois a été préféré au métal comme matériau des échelles, de façon à avoir un écho sonar plus net. Les échelles ont été alourdies et attachées au quai au moyen de structures lestées.

4.4.1.b Premiers traitements appliqués aux numérisations

Le premier traitement effectué sur les numérisations consiste à retrancher les points aberrants, notamment pour le SBM, et certains des artefacts présentés dans la section 4.2.2.a. Ensuite, nous avons cherché à supprimer le bruit de mesure, particulièrement présent dans les acquisitions sonar. Pour cela, le procédé de reconstruction 3D par maillage a été exploité. En effet, dans la plupart des projets de modélisation 3D à partir de nuages de points, la reconstruction de la surface de l'objet est généralement la dernière étape du processus. Cependant, nous avons choisi de l'effectuer plus tôt afin de fournir un contrôle visuel du résultat et ainsi révéler les erreurs de mesures et guider le débruitage.

En ce qui concerne les acquisitions au SLT, comme le nuage de points a un faible niveau de bruit, l'objectif de cette opération est principalement de détecter les erreurs de mesures omises jusqu'à ce stade et reconstruire la surface par maillage.

Pour ce qui est du nuage de points sonar, l'objectif est de diminuer le bruit et supprimer les artefacts restants en construisant un maillage. Ces défauts apparaissent clairement lors de cette opération, puisque la surface obtenue dans ces conditions est irrégulière et présente des discontinuités, visibles sur l'exemple de la figure 4.23a. À ce titre deux méthodes peuvent être appliquées.

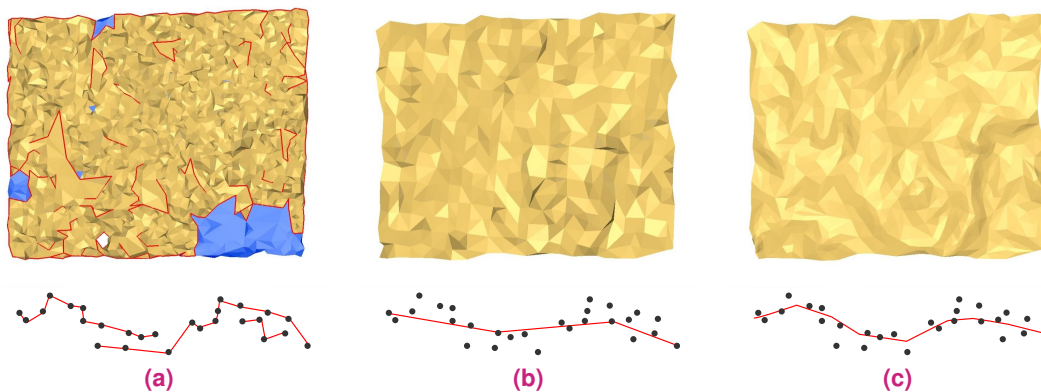


FIGURE 4.23 – Méthodes pour le maillage du nuage de points : en utilisant l'ensemble des points (a), en utilisant que des points sélectionnés selon un critère de distance minimale entre les points (b), en interpolant de nouveaux points (c).

La première consiste à ré-échantillonner le nuage de points, c'est-à-dire à sélectionner des points du nuage de manière à ce qu'ils soient uniformément espacés suivant un critère de distance minimum. Ces points sont ensuite utilisés comme sommets du maillage, voir figure 4.23b. Une des conséquences de cette méthode est que certains détails peuvent être perdus.

Une autre façon de procéder est d'estimer la surface la plus proche des points en utilisant des estimateurs robustes, voir figure 4.23c. Dans ce but, de nouveaux points peuvent être interpolés. Cependant, le risque est d'obtenir un modèle trop lissé.

Le maillage de nuage de points peut être effectué en utilisant des logiciels spécifiques. Certains sont présentés dans (REMONDINO, 2003). Dans notre cas, nous avons utilisé 3DReshaper qui permet d'une part d'effectuer les deux méthodes de maillage citées précédemment et d'autre part de les combiner afin d'affiner successivement le modèle en ré-employant le nuage de points. De cette manière, le modèle subaquatique résulte d'une technique *coarse-to-fine*. Le procédé commence avec un modèle utilisant une faible densité de points. La sélection de ces points est effectuée en spécifiant la distance minimale souhaitée entre les points. Puis, les points sont de nouveau employés afin d'interpoler

progressivement de nouveaux sommets au maillage et ainsi augmenter sa résolution. Le choix des points employés pour ces affinages dépend soit d'un critère de distance au maillage, soit d'une valeur maximale de l'erreur de corde 3D (déviations locale de la surface) (PIERRE, 2014, p. 94). Ces paramètres sont définis de manière empirique par un opérateur. Enfin, le procédé nécessite de faire un compromis entre les détails et le bruit.

Cette étape requiert beaucoup d'opérations manuelles, comme la suppression des anomalies ou la correction des erreurs dans les maillages. L'apport de photographies ou de mesures physiques autres sont des aides non négligeables dans les choix à accomplir lors de ces interventions sur les données. Généralement ces informations manquent pour la reconstruction 3D des parties immergées. Dans ce cas, le procédé implique une grande part d'interprétation, comme cela a été cas pour le maillage des données du SBM.

Cependant, l'exemple de la figure 4.24 montre que les résultats obtenus avec cette méthode sont visuellement corrects. Notons que, pour la reconstruction 3D effectuée à partir des données SBM, aucune information n'était en notre possession, l'image du tunnel vide ayant été retrouvée dans les archives de VNF après l'expérimentation.



FIGURE 4.24 – Photographie (source : archive VNF) de l'entrée nord du tunnel après la vidange de celui-ci pour maintenance en 2009 (a) et la représentation 3D maillée de cette zone à partir des données sonar (b). Le modèle 3D est aligné approximativement sur la photographie.

4.4.2 Géo-référencement des numérisations sonar

Pour obtenir le modèle de référence, les numérisations doivent être géo-référencées. Une approche possible est d'aligner les modèles sonar et laser. Cependant, cette méthode s'applique lorsque les numérisations ont une zone acquise commune. De cette manière, les nuages de points ont un recouvrement qui permet de les aligner à la manière d'un puzzle. Par exemple, la consolidation des nuages de points laser a été effectuée grâce aux sphères mesurées par au moins deux stations d'acquisition.

Puisque le SBM ne mesure pas hors de l'eau et inversement, le SLT n'acquiert pas de points sous l'eau, les numérisations des deux appareils n'ont aucune zone de recouvrement. Ainsi, l'alignement des modèles laser et sonar soulève une problématique à laquelle nous devons répondre.

Le développement de la solution est basé sur le fait que, malgré l'absence de recouvrement, les modèles laser et sonar partagent certaines informations. Tout d'abord, des éléments de l'environnement peuvent être modélisés par des entités géométriques et certains de ceux-ci ont été mesurés à la fois par le SLT et par SBM. Ensuite, le seul élément de contact entre les deux modèles est la projection de la ligne d'eau sur la structure de l'ouvrage. De plus, cette silhouette présente des éléments saillants qui peuvent être employés pour déterminer la translation horizontale. Enfin, des cibles peuvent faire le lien entre les deux environnements. Cette approche a été appliquée dans (MENNA et al., 2015), pour consolider des acquisitions photogrammétriques effectuées hors et sous l'eau. Dans ces travaux, des dispositifs, composés de deux jeux de cibles reliés entre eux par une perche, ont été placés dans la scène levée, de telle manière que l'un des jeux soit mesuré hors de l'eau et l'autre sous l'eau. Dans notre cas, ce sont des échelles qui ont été semi-immergées.

À partir de ces observations, un procédé a été implémenté. Celui-ci est représenté dans la figure 4.25. Il décompose la consolidation en trois étapes que nous allons maintenant décrire .

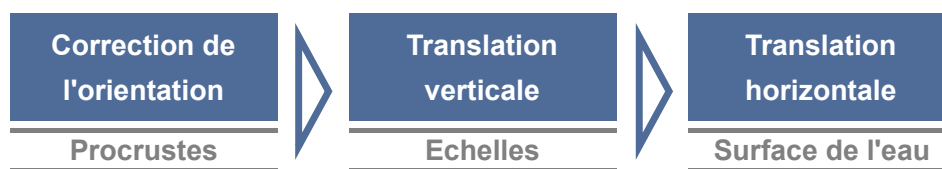


FIGURE 4.25 – Organigramme du processus d'alignement du modèle 3D sonar sur le modèle 3D laser.

4.4.2.a Correction de l'orientation

Premièrement, l'orientation du modèle 3D subaquatique est corrigée. Dans ce but, des entités géométriques communes aux deux environnements (eau/air) sont modélisées manuellement. Par exemple, les bords du canal forment un plan qui est acquis à la fois par le SBM et SLT. Les éléments estimés dans le modèle sonar et laser sont des plans ou des droites (par exemple les bords de la fosse de batardage). Ainsi, la correction de l'orientation du modèle sonar revient à aligner les normales des plans et les vecteurs directeurs des droites homologues (voir figure 4.26). Pour déterminer la matrice de rotation à partir des deux ensembles de vecteurs, la méthode de Procruste, détaillée dans la section 3.4.3.a, a été employée. Dans notre cas, 4 primitives géométriques ont été employées (2 lignes et 2 plans) pour orienter le modèle subaquatique.

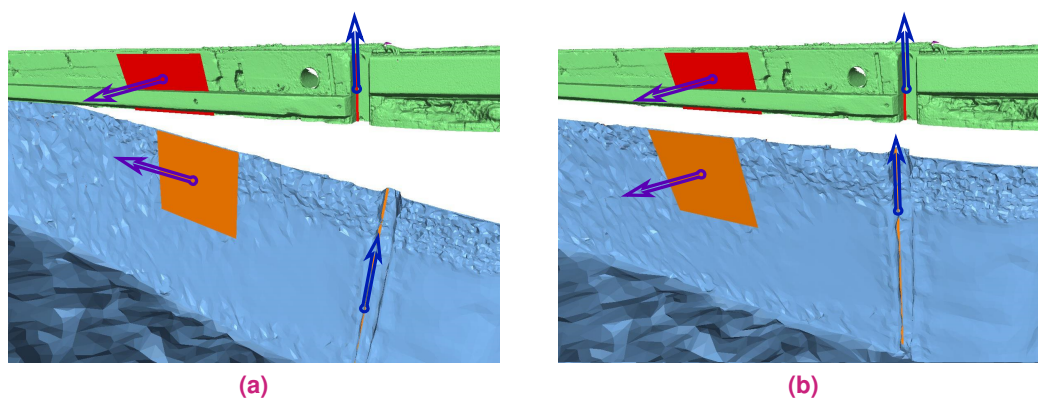


FIGURE 4.26 – Illustration de l'orientation du modèle 3D laser (vert) et du modèle 3D sonar (bleu) avant (a) et après (b) la correction de l'orientation par la méthode de Procruste.

4.4.2.b Correction de la translation verticale

La seconde étape consiste à déterminer la translation verticale à appliquer de manière à placer le modèle sonar à la bonne altitude (voir figure 4.27). Pour cela, les échelles permettent de déterminer l'écart vertical entre les modèles. En effet, les distances inter-barreaux ont été déterminées avec précision grâce à un levé au SLT. Pour calculer la correction verticale à apporter aux données subaquatiques, les positions des échelles dans les deux modèles sont déterminées. Cependant, le nuage de points sonar étant fortement bruité, l'estimation de la position de l'échelle dans celui-ci est complexe. Dans ce but, un algorithme a été développé afin de modéliser l'échelle de manière automatique et robuste.

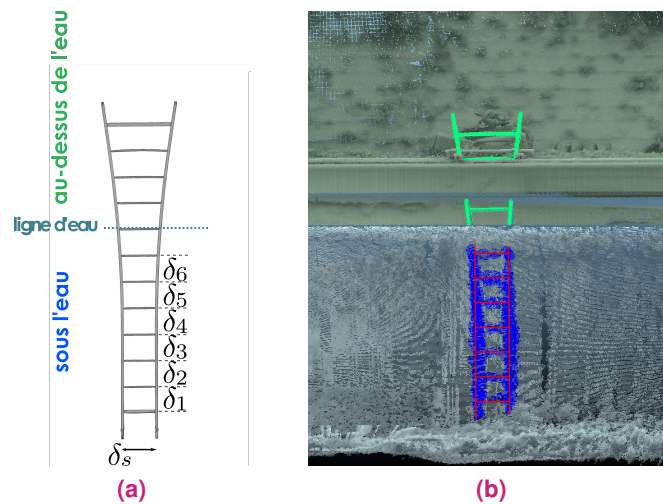


FIGURE 4.27 – (a) : modèle 3D de l'échelle construit à partir d'un levé d'un SLT; (b) : numérisation in situ de l'échelle grâce au SBM (partie bleue de l'échelle) et au SLT (partie verte de l'échelle). Le modèle filaire en rouge positionné sur le nuage subaquatique de l'échelle est le résultat de l'estimation robuste. Sur site, deux barreaux n'ont pas été mesurés, puisque l'un était caché par une lisse et l'autre se trouvait au niveau de la ligne d'eau.

La donnée de départ est le nuage de points de l'échelle. Celui-ci est segmenté manuellement dans le nuage global. Ensuite, le processus d'estimation de l'échelle suit trois étapes décrites dans le diagramme de la figure 4.28 et qui seront détaillées dans les paragraphes suivants. Mais avant cela, la méthode d'estimation robuste employée doit être expliquée, puisqu'elle est mise en œuvre à deux reprises.

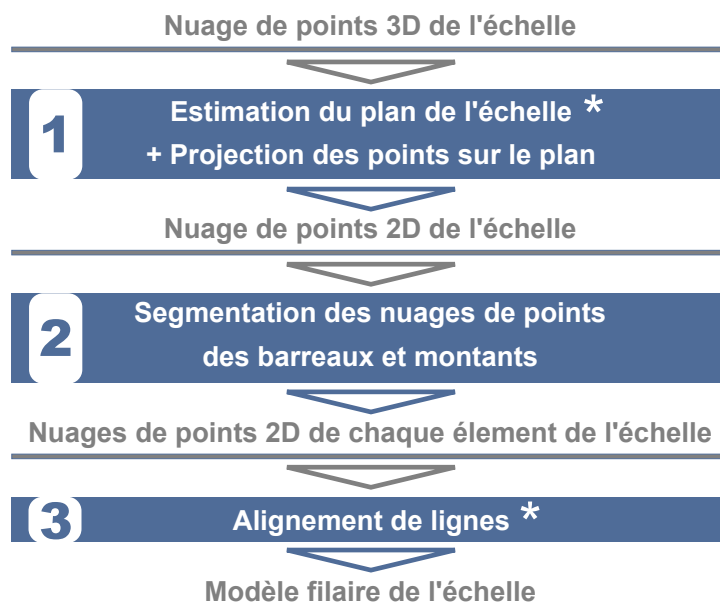


FIGURE 4.28 – Diagramme du processus d'estimation des échelles. Les étapes notées d'une astérisque sont effectuées de manière robuste.

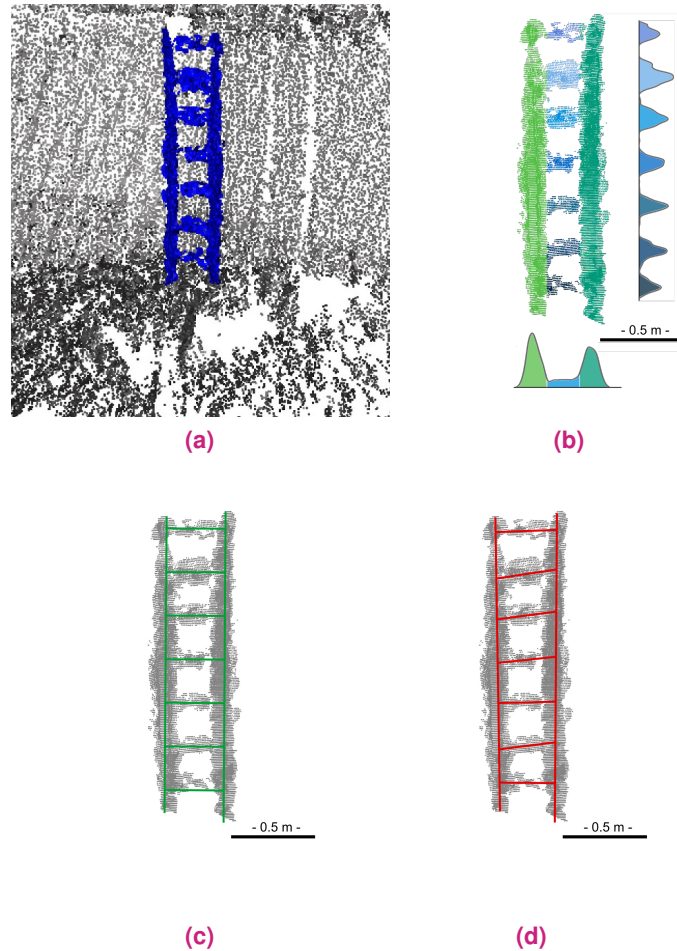


FIGURE 4.29 – Illustration du processus d’estimation d’échelle : extraction des points correspondant à l’échelle dans le nuage brut (a), segmentation du nuage après la projection des points sur le plan de l’échelle (b), estimation robuste avec les contraintes de structure de l’échelle (c), estimation non-robuste et non contrainte obtenue avec un logiciel commercial (d).

La méthode d’estimation robuste appliquée : les M-Estimeurs

Une estimation est dite robuste si le résultat de celle-ci, en plus de prendre en compte les erreurs aléatoires, est insensible aux données aberrantes. Il existe plusieurs techniques pour rendre une estimation robuste (MEER, 2004) : transformée de Hough, seuillage des erreurs grossières, moindres carrés médians, RANSAC, etc.

Les techniques d’estimation robuste appliquées dans le processus sont les M-estimateurs (HUBER, 1981). Leur principe est de minimiser, non plus la somme quadratique des résidus (méthode des moindres carrés), mais une énergie de la forme :

$$J(\theta) = \sum_i \rho(r_i) \quad (4.8)$$

où θ est le vecteur du modèle de paramètre, ρ est une fonction de potentiel (ou fonction de coût) non quadratique, comme celles présentées figure 4.30b, et les r_i sont les résidus, c'est-à-dire les différences entre les observations et leurs prédictions par le modèle. Dans le formalisme semi-quadratique, voir par exemple (CHARBONNIER et al., 1997), il a été démontré que minimiser J est équivalent à minimiser :

$$J^*(\theta, b) = \sum_i b_i r_i^2 + \Psi(b_i) \quad (4.9)$$

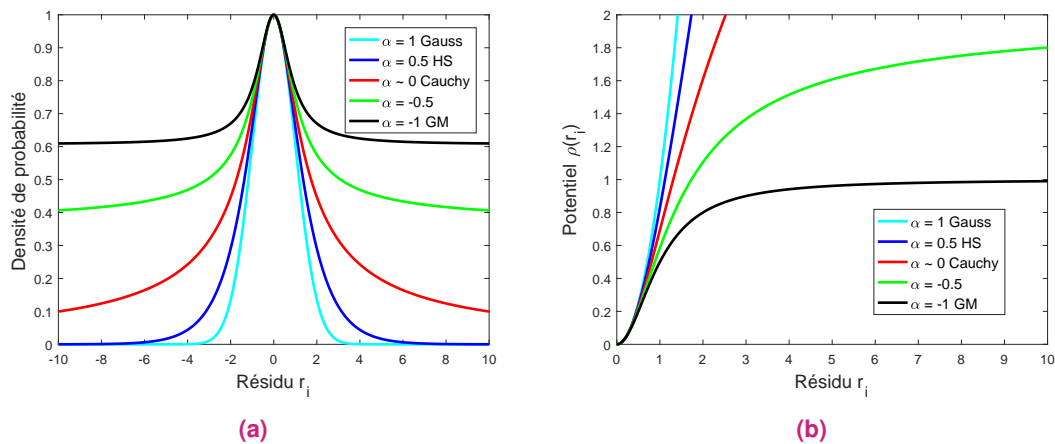


FIGURE 4.30 – Représentation des fonctions de densité de probabilité (a), et des fonctions de potentiel correspondantes (b), pour la famille des exponentielles lissées (IENG, 2004) : $\rho(r_i) = \frac{1}{\alpha} \left((1 + r_i^2)^\alpha - 1 \right)$.

où Ψ est un potentiel convexe, dont l'expression découle de celle de ρ et b_i est une variable auxiliaire. Son rôle est à la fois de diminuer le poids des observations aberrantes et de linéariser le problème d'estimation. En effet, J^* est quadratique par rapport à r (donc, par rapport à θ dans une régression linéaire) quand b est fixe. Il est convexe par rapport à b quand r est fixé, et le minimum est obtenu pour $b = \rho'(r)/2r$. De telles propriétés suggèrent une stratégie déterministe de minimisations alternées, autrement dit, répéter des minimisations successives par rapport à chaque variable en gardant l'autre fixée. L'algorithme résultant est itératif et effectue des séries d'estimations des moindres carrés pondérés (voir Equation 4.9). Les poids b sont ajustés à chaque itération en fonction de la valeur des résidus. De plus, $\rho'(r)/2r$ est une fonction décroissante, telle que $b \simeq 1$ pour les petits résidus et $b \rightarrow 0$ pour les larges résidus. De cette façon, les erreurs aléatoires (qui correspondent à de faibles résidus) sont traitées selon la manière ordinaire des moindres carrés, alors que de faibles poids sont associés aux grosses erreurs, réduisant ainsi leur influence lors de l'estimation.

Estimation du plan de l'échelle

Le première étape du processus est l'estimation de l'échelle. Ce plan est défini par une origine $\boldsymbol{\mu}$ et par deux vecteurs unitaires et orthogonaux \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 ($\|\mathbf{e}_1^\top \mathbf{e}_2\|^2 = 0$, $\|\mathbf{e}_1\| = \|\mathbf{e}_2\| = 1$) :

$$\mathbf{x}_i \simeq \boldsymbol{\mu} + \mathbf{E}\mathbf{a}_i \quad (4.10)$$

où $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ et \mathbf{a}_i sont les coordonnées orthogonales de \mathbf{x}_i sur le plan, qui sont obtenues par la relation $\mathbf{a}_i = \mathbf{E}^\top (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})$. Suivant le formalisme des moindres carrés, le i -ième résidu est donné par $r_i = \|\boldsymbol{\mu} + \mathbf{E}\mathbf{a}_i - \mathbf{x}_i\|$, et les paramètres du modèle, à savoir l'origine et les vecteurs de base, sont estimés en minimisant :

$$J_{LS}(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2) = \sum_{i=1}^N \|\boldsymbol{\mu} + \mathbf{E}\mathbf{a}_i - \mathbf{x}_i\|^2. \quad (4.11)$$

De cette manière, ce problème de régression orthogonale est analogue à l'analyse en composantes principales, ou ACP (BISHOP, 2006). La solution est, pour l'origine :

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i \quad (4.12)$$

qui est la moyenne du nuage de points, et pour les vecteurs de base :

$$\mathbf{C}\mathbf{E} = \lambda\mathbf{E} \quad \text{avec} \quad \mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^\top. \quad (4.13)$$

En d'autres termes, les vecteurs de base sont donnés par les deux vecteurs propres de la matrice de covariance \mathbf{C} correspondant aux deux plus grandes valeurs propres λ_1 et λ_2 . Selon le formalisme robuste semi-quadratique, le critère augmenté est donné par :

$$J^*(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, b) = \sum_i b_i \|\boldsymbol{\mu} + \mathbf{E}\mathbf{a}_i - \mathbf{x}_i\|^2 + \Psi(b_i). \quad (4.14)$$

L'optimisation de J^* est effectuée par un algorithme ACP repondéré et itéré. Chaque itération alterne entre : le calcul des variables auxiliaires $b_i = \rho'(r_i)/2r_i$ (avec $r_i = \|\boldsymbol{\mu} + \mathbf{E}\mathbf{a}_i - \mathbf{x}_i\|$, pour $i = 1 \dots N$), le calcul de la moyenne pondérée :

$$\boldsymbol{\mu} = \sum_{i=1}^N b_i \mathbf{x}_i / \sum_{i=1}^N b_i \quad (4.15)$$

et la diagonalisation de la matrice de covariance pondérée qui fournit les vecteurs de base :

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^N b_i (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu})^\top / \sum_{i=1}^N b_i. \quad (4.16)$$

L'algorithme complet est donné en annexe A. Une fois que l'origine et les vecteurs de base sont estimés, tous les points de l'échelle sont projetés sur le plan, et la suite du processus est exécutée en deux dimensions. Afin d'éviter l'introduction d'une nouvelle notation, les points restent désignés par \mathbf{x}_i , mais ils désignent, à partir de maintenant, les projections 2D de ces points sur le plan de l'échelle.

Segmentation du nuage de points

Lors de l'estimation robuste du plan, les directions des axes générés correspondent à celles des barreaux et montants. Par conséquent, la distribution des coordonnées le long des deux axes révèle des pics qui coïncident avec les éléments de l'échelle. Ces distributions, visibles sur la figure 4.29b, sont approchées grâce à la méthode de Parzen dont le principe est d'estimer la densité de probabilité d'un noyau par une gaussienne : voir, par exemple (BISHOP, 2006).

Le processus mis en œuvre consiste, en premier lieu, à déterminer les points correspondants à chacun des montants en utilisant la projection sur l'axe \mathbf{e}_2 . De cette façon, les points de l'ensemble des barreaux sont aussi trouvés. L'analyse des points projetés sur l'axe \mathbf{e}_1 , permet de définir chacun des barreaux.

L'analyse des distributions sur chacun des axes consiste à déterminer l'enveloppe des pics, voir figure 4.31a. L'approche utilise deux résolutions de lissage différentes pour l'application de la méthode Parzen. La première, de résolution plus grossière (largeur de la fenêtre de lissage de 1 cm), permet de déterminer approximativement la position des pics, voir figure 4.31b. La seconde étape consiste à analyser la distribution des points entre les sommets des pics. Les valeurs recherchées sont celles correspondant à la borne supérieure du premier pic et à la borne inférieure du second. Pour cela, une plus fine

résolution de l'approximation de l'histogramme (largeur de la fenêtre de lissage de 1 mm) est employée. À partir de cette courbe, nous cherchons les deux premiers minima qui, en partant de chaque extrémité, sont inférieurs à un seuil, voir figure 4.31d.

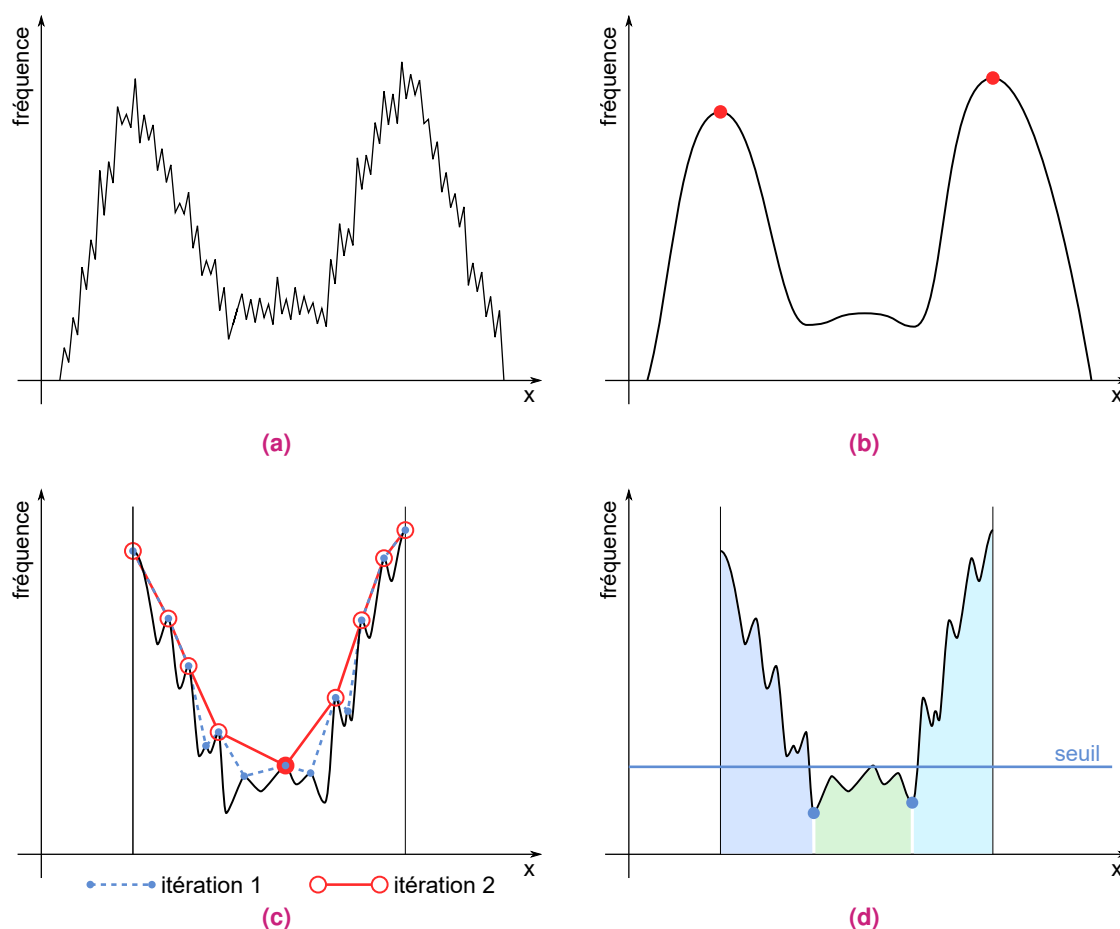


FIGURE 4.31 – Illustration du procédé employé pour définir la segmentation des éléments de l'échelle (ici, la segmentation des montants et de l'ensemble des barreaux) : distribution brute des points sur l'axe transversal de l'échelle (a), premier lissage grossier de la distribution de manière à détecter la position des pics (b), procédé itératif par filtrage des non-maxima dans le but de déterminer le seuil de fréquence (c), détermination, pour la segmentation, des abscisses correspondant aux premiers minima locaux inférieurs au seuil en partant des extrémités de la courbe (d). Chaque région de couleur correspond à l'un des éléments de l'échelle (barreaux ou montants).

Pour déterminer ce seuil, la méthode employée consiste à filtrer successivement la liste des maxima locaux, par suppression des non-maxima, jusqu'à ce que la liste ne contienne plus qu'un ou plus aucun minimum local, voir figure 4.31c. Cette analyse d'affinage successif d'histogramme se rapproche de celle proposée dans (DELON et al., 2007). Si, au terme des itérations, aucun minimum n'est trouvé, alors le seuil est une valeur arbitrairement petite. Sinon, le seuil fixé correspond au dernier minimum local trouvé, voir figure 4.31d. Une fois ce seuil déterminé, nous obtenons les minima recherchés. Ensuite, ce sont les abscisses des minima qui serviront à segmenter le nuage de point. La découpe est définie

suivant des droites orientées comme l'axe sur lequel la distribution des points a été réalisée et passant par ces abscisses estimés du second axe, normal au premier.

Plusieurs autres méthodes de segmentation auraient pu être mises en œuvre, mais celle-ci est plutôt simple et les résultats qu'elle fournit sont satisfaisants. De plus, ce stade de segmentation n'est pas une étape sensible, puisque l'estimation du modèle de l'échelle est effectuée de manière robuste.

La modélisation des échelles

Cette dernière étape consiste à modéliser l'échelle par un ensemble de lignes, qui prend en compte les caractéristiques géométriques d'une échelle. La structure d'une échelle peut être définie d'après les caractéristiques suivantes :

- les barreaux sont parallèles ;
- les montants sont parallèles ;
- les montants et barreaux sont orthogonaux ;

et avec les *a priori* suivants :

- les distances inter-barreaux, δ_j ;
- La distance inter-montant, δ_m ;

qui ont été déterminés à partir d'un levé de l'échelle avec un SLT, voir figure 4.27a.

L'orthogonalité peut être exploitée en appliquant une rotation de 90° aux nuages des barreaux. De cette manière, une direction seulement doit être estimée. Pour le haut de l'échelle, les montants ne respectent pas la seconde condition. Ils ne sont donc pas considérés dans l'estimation.

La régression linéaire peut être effectuée en utilisant soit la manière affine, soit l'orthogonale. La régression affine suppose des modèles de la forme $y_i = \alpha x_i + \beta$. Cette formulation peut être facilement adaptée à l'ajustement simultané et robuste de plusieurs lignes (TAREL et al., 2007, 2008). Dans notre cas, la pente α est la même pour tous les éléments à cause de la contrainte de parallélisme. Il serait possible d'intégrer les contraintes d'inter-distance en modifiant le modèle de la sorte (pour le j -ième barreau) :

$$y_i = \alpha x_i + \beta + \sqrt{1 + \alpha^2} \sum_{k=1}^j \delta_k \quad (4.17)$$

voir figure 4.32a. Cependant, cela amène à résoudre une relation non linéaire par rapport à α . Si les axes fournis par l'estimation robuste du plan de l'échelle sont exactement les directions des montants et barreaux, alors $\alpha = 0$, et le problème est réduit à l'estimation de l'ordonnée à l'origine, β . Cependant, nous préférons écarter cette hypothèse pour choisir d'estimer ces lignes en appliquant la régression orthogonale, voir figure 4.32b.

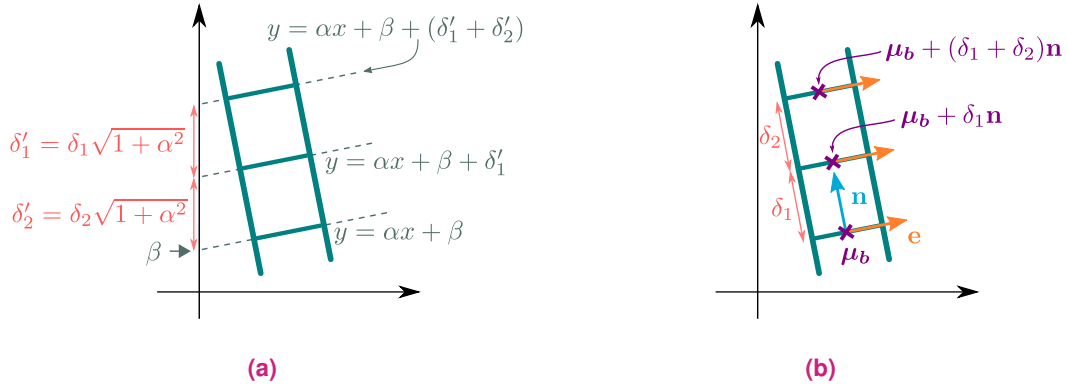


FIGURE 4.32 – Représentation du principe de régression simultanée suivant la façon affine (a), et la façon orthogonale (b).

Le modèle sous-jacent à la régression orthogonale est similaire à celui de l'équation 4.10, excepté qu'un seul vecteur est considéré, celui qui donne la direction de la droite : $\mathbf{x}_i \simeq \mu + \mathbf{e}.a_i$, et qu' a_i est un scalaire. L'algorithme robuste de régression orthogonale d'une droite est alors adapté à partir de celui résumé dans l'annexe A.

Désignons $P_j = \{\mathbf{x}_{ji}\}_{i=1\dots N_j}$ chacun des B nuages de points correspondant aux barreaux et des $M = 2$ nuages de points correspondant aux montants, avec $\sum_{j=1}^{B+M} N_j = N$. En raison des conditions de parallélisme et d'orthogonalité, l'algorithme d'ajustement orthogonal et simultané est réduit à l'estimation d'une seule direction, \mathbf{e} et des $B + M$ centroïdes, μ_j . En d'autres termes, le modèle est :

$$\mathbf{x}_{ji} \simeq \mu_j + \mathbf{e}.a_{ji}. \quad (4.18)$$

La solution au problème des moindres carrés associés est donnée par la moyenne, pour les centroïdes :

$$\mu_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{x}_{ji} \quad (4.19)$$

Et pour la direction \mathbf{e} , par le premier vecteur propre de la matrice globale de covariance :

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{B+M} \sum_{i=1}^{N_j} (\mathbf{x}_{ji} - \mu_j)(\mathbf{x}_{ji} - \mu_j)^T. \quad (4.20)$$

La version robuste de cet algorithme est établie en alternant les calculs des poids, b_{ji} , et des estimations des moindres carrés pondérés de μ_j et de \mathbf{e} ; voir annexe B.

Le tableau 4.4 présente les distances entre barreaux qui ont été estimées à partir des données SLT et SBM avec la méthode proposée et avec un logiciel commercial (3DReshaper). Notons que notre méthode permet une estimation simultanée des barreaux et montants, alors que l'ajustement des lignes pour chaque élément doit être réalisé séparément dans le logiciel commercial. De plus, l'algorithme proposé exploite les contraintes de parallélisme et d'orthogonalité. Le modèle laser a été obtenu dans des conditions de laboratoire et peut alors être considéré comme presque sans bruit. Dans de telles circonstances favorables, les deux méthodes fonctionnent bien, et la différence de distance est au maximum de 1 mm. Contrairement aux données du SLT, les données du SBM sont très bruitées et contiennent des points aberrants. Comme le montre la figure 4.29d, les performances du logiciel commercial s'effondrent, et puisque les barreaux ne sont pas parallèles dans le modèle résultant, les inter-distances ne peuvent pas être évaluées. En revanche, notre méthode est robuste avec ce jeu de données. La quatrième colonne du tableau montre que la différence maximale avec la référence est 28 mm et que la plupart des erreurs sont inférieures à 10 mm (ce qui correspond aussi à la moyenne absolue des différences, et la médiane absolue étant 5 mm).

Tableau 4.4 – Comparaison des distances inter-barreaux (δ_i) estimées grâce à notre algorithme de régression orthogonale et simultanée (sans a priori des distances) et une solution commerciale (3DReshaper) à partir des nuages de points laser et sonar de l'échelle. Les distances sont en millimètre.

	laser		sonar	
	Solution proposée (Référence)	Logiciel commercial	Solution proposée	Logiciel commercial
δ_1	279	279 (0)	276 (-3)	n/a
δ_2	282	281 (-1)	266 (-16)	n/a
δ_3	283	284 (1)	287 (3)	n/a
δ_4	278	279 (1)	275 (-3)	n/a
δ_5	280	279 (-1)	287 (7)	n/a
δ_6	262	261 (-1)	234 (-28)	n/a

La version complète de cet algorithme prend en compte les inter-distances (δ_j et δ_m) préalablement estimées (voir la troisième colonne du tableau 4.4). De cette façon, les centroïdes des barreaux sont reliés, comme cela est illustré dans la figure 4.32b, donc seulement les paramètres, μ_b et \mathbf{e} , sont à estimer. En fait, un troisième paramètre, μ_m , doit être pris en compte parce que les montants sont indépendants des barreaux en termes de translation, bien qu'ils partagent la même orientation, à 90° près. Afin d'initialiser le procédé, une droite est ajustée sur les centroïdes des barreaux. De cette manière, elle modélise l'axe de symétrie longitudinale de l'échelle. Le projeté orthogonal du centroïde du premier barreau, μ_1 sur cet axe définit μ_b . Pour les montants, μ_m est défini par le projeté

orthogonal du centroïde du premier montant sur la droite de direction \mathbf{e} passant par la moyenne des centroïdes des montants. Ensuite, l'algorithme met à jour alternativement \mathbf{e} , μ_b et μ_m . L'algorithme complet est donné dans l'annexe C.

La figure 4.27b montre un exemple de l'estimation robuste de l'échelle par la méthode d'ajustement orthogonal, simultané et prenant en compte les inter-distances. Notons que, malgré l'important niveau de bruit, l'échelle est correctement modélisée.

Afin de corriger l'altitude du modèle subaquatique, les altitudes des barreaux situés sous l'eau sont déterminées à partir des numérisations du SLT des parties émergées des échelles lors de l'expérimentation et des distances inter-barreaux mesurées préalablement. Le vecteur de translation est obtenu par la différence entre ces altitudes vraies et celles des barreaux du modèle filaire de l'échelle estimé dans le nuage de points sonar grâce à la méthode décrite précédemment.

4.4.2.c Correction de la translation horizontale

Enfin, pour déterminer la translation horizontale, nous avons eu recours aux silhouettes de la ligne d'eau sur les structures déterminées dans les deux modèles sonar et laser. Cette opération ne pouvait être effectuée avant, car l'estimation de la position de la ligne d'eau dans la numérisation sonar était trop imprécise. Mais, comme à cette étape, le modèle sonar est à la bonne hauteur et que l'altitude de la ligne d'eau est connue, la silhouette de cette dernière peut être déterminée sans difficulté. Pour calculer le vecteur de translation, l'algorithme ICP présenté en section 3.2.2 a été adapté afin d'estimer uniquement une translation en 2D, voir figure 4.33.

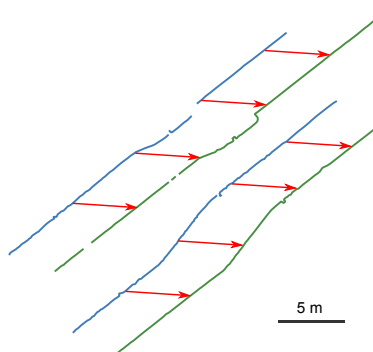


FIGURE 4.33 – Représentation des silhouettes de la ligne d'eau sur la structure, déterminées à partir du modèle 3D laser (vert) et du modèle 3D sonar (bleu); les vecteurs de translation à estimer sont en rouge.

4.4.2.d Modèle de référence obtenu

Au terme de ces trois étapes, le modèle sonar est aligné sur le modèle laser. Ainsi, nous obtenons un modèle complet et géo-référencé. Celui-ci est présenté dans la figure 4.34. Deux types de rendus complémentaires du modèle sont proposés : pour l'un, il s'agit du maillage et pour l'autre, du nuage de points. Cette dernière forme de représentation a été gardée, car elle permet de visualiser certains détails grâce aux ombres de mesures. Le résultat obtenu est visuellement très satisfaisant. Toutefois, nous observons que l'ensemble du modèle n'est pas homogène en raison des natures différentes des acquisitions.

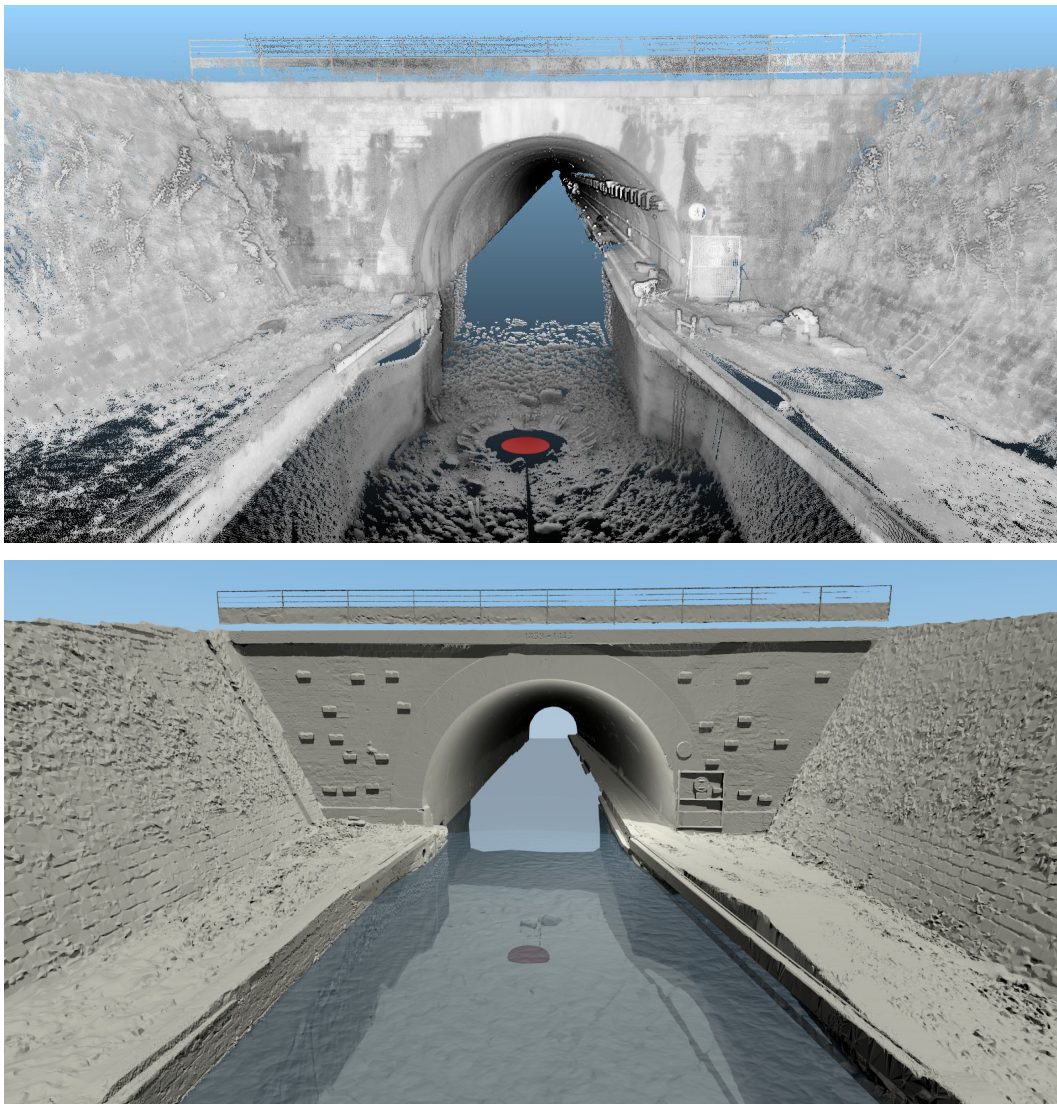


FIGURE 4.34 – Illustrations du modèle 3D de référence de l'entrée sud du tunnel de Niderviller sous la forme d'un nuage de points (au-dessus) et d'un maillage (au-dessous). Le disque foncé au milieu du canal indique la position de la station d'acquisition du SBM.

4.4.3 Comparaison du modèle expérimental avec le modèle de référence

La comparaison du modèle expérimental avec le modèle de référence a pour but d'évaluer quantitativement la méthode développée pour la numérisation 3D des tunnels navigables. Cette étude a porté sur les premiers mètres de l'entrée côté Niderviller du tunnel-canal. Les distances de chacun des points du nuage expérimental au modèle maillé de référence ont été calculées à l'aide du logiciel Cloudcompare. Les résultats obtenus de la comparaison sont présentés dans le tableau 4.5 et la figure 4.35. Une première constatation que nous pouvons faire est qu'il y a une nette différence entre les exactitudes des modèles photogrammétrique et sonar.

Tableau 4.5 – Résultats de la comparaison du modèle expérimental avec le modèle de référence. Pour chacun des passages sont indiqués la moyenne et l'écart-type des distances entre les deux modèles, ainsi que l'exactitude de la modélisation calculée à partir des distances. Le signe des distances est positif lorsque les points du modèle expérimental sont à l'intérieur du tunnel dans le modèle de référence et négatif quand les points sont à l'extérieur.

logiciel	passage	section	moyenne	écart-type	emq
Photoscan	1	total	-0,069	0,021	0,072
	2	mur	0,043	0,045	0,109
		sol	-0,238	0,078	
	3	total	-0,111	0,042	0,119
	4	mur	0,048	0,019	0,177
		sol	-0,171	0,060	
	5	total	-0,080	0,042	0,090
6	total	-0,044	0,036	0,057	
	photog.	total	-0,002	0,011	0,011
Micmac	2	mur	0,078	0,043	0,103
		sol	-0,153	0,077	
	4	mur	0,054	0,026	0,147
		sol	-0,141	0,060	

Pour le modèle photogrammétrique obtenu avec Photoscan l'exactitude est de 1,1 cm. Ce bon résultat permet de valider la méthode employée pour numériser les voûtes et piédroits du tunnel. En observant la figure 4.36, nous remarquons que la répartition des écarts avec le modèle de référence forme à certains endroits des bandes transversales à l'axe du tunnel. Une des raisons expliquant cet aspect est que, lors de la première étape du procédé appliqué sous Photoscan (voir section 3.4.2.c), le calcul photogrammétrique de certains des sous-modèles n'est pas tout à fait exact. De plus, une autre cause peut être l'alignement imparfait de certains sous-modèles. Enfin, les écarts minimaux se trouvent dans les zones proches des points de repères employés pour le géoréférencement.

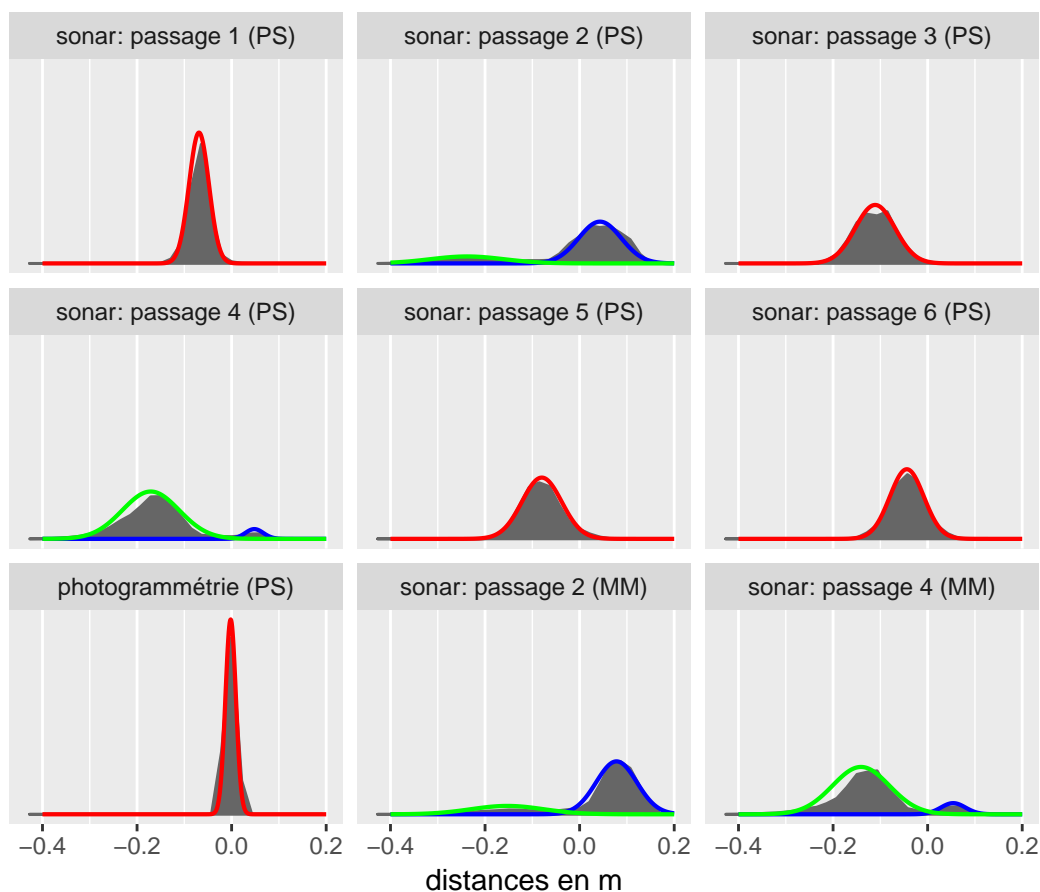


FIGURE 4.35 – Histogrammes des distances entre le modèle de référence et les nuages de points sonar calculés à partir de trajectoires obtenues avec Micmac (MM) et Photoscan (PS), ainsi que le nuage de points photogrammétrique (Photoscan). Les ajustements du modèle de Gauss sont représentés par les courbes en rouge lorsque toutes les distances ont été prises en compte, en vert lorsque l'estimation ne concerne que les distances des points des murs au modèle de référence et en bleu lorsque l'estimation ne concerne que les distances des points du fond du canal au modèle de référence.

En ce qui concerne le modèle subaquatique, nous avons traité chaque passage séparément, puisque nous avons déjà observé des différences entre ceux-ci, voir section 3.6. De manière générale, les exactitudes estimées pour ces modèles sont de l'ordre du décimètre. Ce résultat confirme les observations faites dans les sections 3.6 et 4.3. En examinant les distances nous pouvons identifier plusieurs classifications des écarts en fonction de l'appartenance des points :

- aux murs ou au fond du canal : les distances entre le modèle de référence et les points des murs sont inférieures à celles déterminées pour les points du fond du canal ;
- aux acquisitions effectuées sur un trajet aller ou retour : cette différence se voit au niveau de la position des murs estimés qui sont situés à l'extérieur du tunnel dans le modèle de référence pour les acquisitions aller et à l'intérieur pour les acquisitions retour ;

— aux acquisitions réalisées dans telle ou telle configuration : *nous observons notamment une amélioration dans la modélisation du fond du canal lorsque le sonar était orienté à la verticale (réglage 3).*

Concernant les deux dernières observations, nous pouvons reconnaître les effets de certaines imperfections de la méthode. Tout d'abord la position des murs estimés semble indiquer une translation de l'ensemble des modèles subaquatiques. Cet écart peut provenir d'une erreur dans le calcul photogrammétrique ou dans l'alignement du bloc de caméras calibré sur ceux estimés. Quant à la troisième observation, elle illustre bien un défaut dans l'estimation des bras de levier lors du calibrage géométrique du système.

Le fait que la distance soit plus importante entre les modèles subaquatiques expérimentaux et de référence pour le fond du canal est aussi sans certainement lié à l'imprécision des numérisations effectuées avec le SBM. En effet, la configuration de levé avec le sonar en statique est très défavorable pour les points les plus éloignés de la station d'acquisition et situés au fond du canal, car l'incidence de la mesure y est la plus préjudiciable.

Enfin, la figure 4.37 offre une visualisation de l'écart entre le modèle estimé et celui de référence. Sur la partie de gauche de la figure, des détails des modélisations d'un piédroit du canal sont présentés vue du dessus. Plus précisément, il s'agit d'une section horizontale du piédroit qui était hors de l'eau lors des acquisitions pour le modèle de référence et donc mesurée avec le SLT, et sous l'eau lors des expérimentations avec notre système. La différence de bief était d'une dizaine de centimètres. Ainsi, nous comparons la modélisation sonar en dynamique avec le levé laser de référence. Nous constatons que les détails du canal sont représentés et qu'ils apparaissent à une position proche de la réalité. Les écarts sont en effet de l'ordre de quelque centimètres. L'allure des différences laisse à penser à une erreur dans l'estimation du bras de levier ou dans l'alignement du bloc caméra calibré sur le bloc estimés par photogrammétrie.

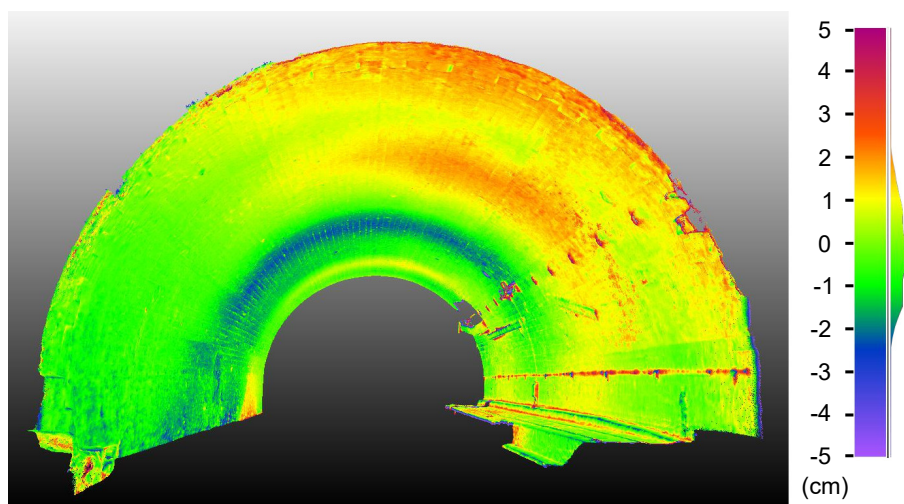


FIGURE 4.36 – Visualisation des distances entre le modèle photogrammétrique (Photoscan) et le modèle de référence.

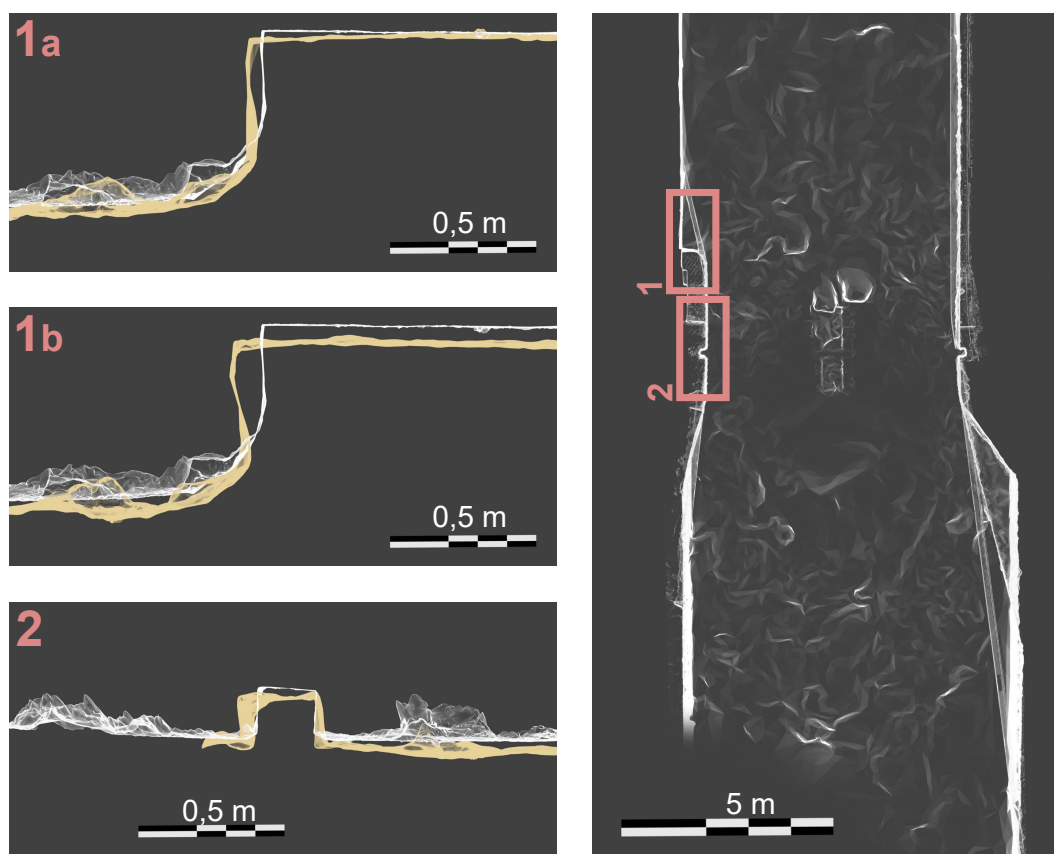


FIGURE 4.37 – Vue du dessus et par transparence des modèles sonar (modèle orangé) et laser (modèle blanc). Pour l'encart 1a il s'agit du modèle 3D sonar du passage 2 construit avec la trajectoire calculée avec Photoscan. Pour les encarts 1b et 2 il s'agit du modèle 3D sonar du passage 2 construit avec la trajectoire calculée avec Micmac.

Conclusion du chapitre 4

- Pour évaluer une méthode de modélisation 3D, l'approche choisie est de calculer les distances entre chaque point du nuage à évaluer et une référence maillée. De cette manière, les écarts obtenus sont signés et les résultats ne dépendent pas de la densité du nuage de points.
- Deux études utilisent le sonar à balayage mécanique qui est une technologie innovante employant le SMF en statique de manière à produire un nuage de points en s'affranchissant des données de navigation. Toutefois, dans ces conditions, la configuration d'acquisition du sonar est souvent défavorable (distance et angle d'incidence d'acquisition).
- La première étude a permis d'évaluer des capacités du sonar à partir d'acquisitions dans une écluse. Pour ce faire, un procédé d'acquisition et une chaîne de traitement des numérisations du SBM ont été développés. Ainsi, la comparaison du modèle sonar obtenu avec un modèle laser a montré que la précision de modélisation sonar en statique est d'environ 3 cm et la dimension minimale d'un détail pour qu'il soit observable est de 4 cm.
- La seconde étude a porté sur l'évaluation de la trajectoire, dont dépend la qualité du géoréférencement des données sonar. Tout d'abord, nous avons vu que la contrainte de rigidité entre les caméras est estimée par photogrammétrie avec une exactitude de 2-3 cm. Ensuite, les trajectoires des deux prismes obtenues en appliquant le bras de levier aux calculs photogrammétriques présentent des écarts décimétriques avec celles mesurées par tachéométrie.
- La troisième étude a consisté à comparer le modèle expérimental à un modèle de référence construit en alignant des acquisitions du SBM avec celles du SLT, grâce à un algorithme original et robuste.. Cette analyse a démontré que, avec notre approche, un objet hors de l'eau sera localisé avec une précision centimétrique et sous l'eau avec une précision décimétrique.

Conclusion générale et perspectives

Synthèse des contributions

L'objectif premier de cette thèse a été de proposer une méthode pour la reconstruction 3D du « tube entier » des tunnels navigables. Les problématiques en jeu pour obtenir un tel modèle sont principalement liées à l'environnement spécifique de ces souterrains. Pour y répondre, un procédé nouveau a été proposé, expérimenté et évalué, cette étape ayant elle-même nécessité plusieurs développements originaux.

La principale singularité de notre approche est d'utiliser la photogrammétrie pour remplacer la solution GNSS/Centrale Inertielle, généralement employée pour estimer la trajectoire du bateau, mais inopérante dans les tunnels. À notre connaissance, cette façon de procéder n'avait encore jamais été mise en œuvre.

Pour y parvenir, plusieurs verrous techniques ont dû être levés. Tout d'abord, la conception du système d'acquisition a nécessité de s'approprier des technologies différentes pour pouvoir ensuite les combiner. À ce propos, le calibrage du dispositif est indispensable pour pouvoir ensuite associer les données des capteurs. Par conséquent, nous proposons dans cette thèse une procédure afin de pouvoir situer les acquisitions dans un même référentiel temporel et spatial. Pour ce qui est de la détermination de la configuration d'acquisition, l'ensemble du système a été numérisé avec un SLT, puis les positions des caméras et du sonar ainsi que l'orientation de ce dernier ont été estimées dans le modèle produit. Concernant la synchronisation des acquisitions, la méthode présentée s'appuie sur un référentiel de temps GPS.

La mise en œuvre du système d'acquisition dans le tunnel de Niderviller a permis de collecter un très grand nombre de données. Outre cette expérimentation, une autre campagne de mesures sans le sonar a été effectuée durant la thèse dans le tunnel-canal de Revin. À la suite de ces opérations, les données acquises dans le tunnel de Niderviller ont été traitées suivant un procédé que nous avons développé. Celui-ci fait appel à plusieurs algorithmes comme la méthode de Procuste ou encore l'interpolation Spline, ainsi qu'à des outils déjà développés au sein de l'équipe comme l'odométrie visuelle simplifiée (OVS). Nous avons aussi eu recours à des solutions informatiques pour les calculs photogrammétriques, soit Micmac et Photoscan, pour lesquels des procédures d'utilisation appropriées à nos besoins ont été proposées. Au terme de ces recherches, un premier modèle 3D du « tube entier » d'un tunnel navigable a été obtenu, conformément aux objectifs initiaux, et une chaîne de traitement est disponible.

Une importante contribution de la thèse a été l'évaluation du modèle expérimental. Au-delà des résultats de cette étude, ces travaux nous ont amenés à développer de nouvelles méthodes de modélisation. Celles-ci se basent sur le déploiement d'une technologie récente, à savoir le Sonar à Balayage Mécanique (SBM). Comme très peu d'informations concernant cet appareil nous étaient connues, nous en avons réalisé une évaluation à partir d'acquisitions dans une écluse qui ont ensuite été comparées à un modèle 3D lasergrammétrique du même site. Pour cette étude, nous avons proposé une première méthode pour géoréférencer les numérisations du SBM dans le but d'obtenir un modèle complet de l'écluse. Elle consiste à positionner et à mettre à niveau chaque nuage de points à partir de mesures tachéométriques effectuées simultanément aux acquisitions sur le système immergé depuis la surface. Puis l'orientation horizontale des numérisations a été estimée en déterminant l'axe de l'écluse grâce à une méthode originale exploitant le principe des moindres carrés.

Ensuite, dans le but d'évaluer le modèle expérimental, nous avons construit un modèle de référence à partir de levés effectués avec un SLT et un SBM. De nouveau, nous avons développé une méthode originale pour géoréférencer les acquisitions sonar. Cette fois-ci, nous avons cherché à aligner un nuage de points acquis par le SBM sur un nuage de points mesurés avec un SLT. Étant donné qu'il n'y a aucun recouvrement entre les deux types de données, la méthode s'appuie sur des éléments communs pour déterminer la transformation 3D à appliquer, à savoir : des primitives géométriques homologues pour estimer l'attitude du modèle, des échelles semi-immersées pour calculer la translation verticale et les mesures sous et hors de l'eau de la projection de la ligne d'eau sur les parois du canal pour déterminer la translation horizontale. Dans ce processus, nous avons particulièrement traité de la détermination des positions des échelles dans le nuage de points bruités du sonar et proposé une méthode originale d'estimation robuste. Une fois le modèle de référence obtenu, nous l'avons comparé au modèle expérimental en calculant les distances qui les séparent.

Pour conclure, cette thèse a soulevé de nombreuses problématiques auxquelles nous nous sommes efforcés d'apporter des solutions. Ce travail a nécessité des contributions dans des domaines variés, allant de la photogrammétrie à la bathymétrie en passant par la reconstruction 3D, le géoréférencement de données ou encore l'estimation robuste.

Bilan de la méthode et améliorations

Au terme de cette thèse, nous obtenons un premier modèle 3D « tube entier » d'une partie du tunnel-canal de Niderviller. Ce modèle est assez fidèle à la réalité, de sorte que les informations qu'il produit sont exploitables pour la documentation et l'inspection du souterrain. Au-dessus de l'eau, la reconstruction 3D par photogrammétrie des voûtes et piédroits permet d'accéder à des détails de l'ordre de quelques millimètres, et qui sont localisés dans le système de coordonnées national avec la précision du centimètre. Sous l'eau, le modèle est plus grossier. Un objet doit avoir des dimensions supérieures à 4 cm pour être observé et il sera localisé avec une précision de l'ordre du décimètre. Ce modèle résulte de l'application d'un ensemble de méthodes de traitement, dont il convient à présent de faire l'examen afin de soumettre quelques pistes d'amélioration.

La mise en œuvre de notre système d'acquisition dans un tunnel navigable nécessite au préalable d'installer des catadioptrés et de les repérer dans le système national de coordonnées géographiques. Ces points de repère s'avèrent indispensables aux calculs photogrammétriques et nos expérimentations ont permis de préciser leurs spécifications (forme, implantation). Cette opération nécessite l'intervention d'un topographe. Dans les tunnels possédant une voie de service, comme ce fut le cas à Niderviller et Arzviller, ce travail est assez simple à réaliser. Toutefois, lorsque cette voie est absente, le levé topographique nous obligera à fixer des consoles aux piédroits de manière à pouvoir placer la station totale, ce qui complique la procédure. De plus, nous avons choisi d'installer les catadioptrés tous les 10 m, mais appliquer cette consigne pourrait s'avérer coûteux en temps et en argent. Par conséquent, il serait intéressant d'augmenter la distance entre les catadioptrés. Pour cela, une étude de l'influence des distances inter-catadioptrés sur l'exactitude du modèle final permettrait d'optimiser ce travail d'équipement des tunnels.

Concernant le système d'acquisition, et plus précisément la partie imageur, l'emploi de plusieurs caméras est intéressant, car la multiplication des points de vues permet une meilleure restitution par photogrammétrie de la surface acquise et aussi parce que l'estimation de la trajectoire repose sur un plus grand nombre d'informations, puisque 6 points sont utilisés à cet effet. Toutefois le temps nécessaire aux calculs photogrammétriques devient très contraignant lorsque le nombre d'images à traiter est important. Donc il

faut trouver un compromis dans le nombre de prises de vue, à la fois pour permettre la restitution complète de la voûte et des piédroits, pour limiter le temps de calcul et pour produire une trajectoire suffisamment précise en vue du traitement des données sonar.

Nos expérimentations ont mis en évidence plusieurs voies d'amélioration concernant la réalisation des prises de vue (éclairage, orientation des caméras, gestion de la mise au point), qui pourront être mises en œuvre lors de prochaines acquisitions. De plus, une évolution possible est d'utiliser des appareils ayant un plus grand champ de vision, par exemple des appareils photographiques avec des objectifs grand angulaire de type fish-eye. Des images ont été acquises à Niderviller avec un de ces dispositifs. Ainsi, les premières études employant ces données devraient être réalisées très prochainement.

Pour ce qui est du sonar, le MB1350 est certainement le capteur du marché le mieux adapté à notre utilisation. En effet, la fréquence du dispositif permet à la fois de déterminer les distances de façon assez précise et d'avoir une portée d'acquisition suffisante. Néanmoins, un désavantage du système est l'ouverture de la fauchée qui est limitée à 45°, nous obligeant ainsi à réaliser 3 allers-retours dans le tunnel. Pour augmenter le champ d'acquisition et ainsi diminuer le nombre de passages, il serait possible d'utiliser plusieurs SMF simultanément. L'utilisation d'autres capteurs peut également être envisagée. Par exemple, la société Blueview a lancé l'année dernière sur le marché un nouveau sonar, le BlueView T2250, qui acquiert des profils de points à 360° (TELEDYNE, 2016). Cet appareil, à l'origine destiné au levé de conduites immergées, pourrait s'avérer efficace dans notre cas.

Les évaluations qualitatives et quantitatives des résultats expérimentaux ont révélé des décalages entre les modèles 3D subaquatiques des différents passages ainsi qu'avec le modèle de référence. Outre les erreurs liées au calcul photogrammétrique, deux autres origines à ces défauts ont été proposées. La première serait un défaut de synchronisation des acquisitions sonar et d'images. En effet, nous ne possédons pas de dispositif centralisé dédié à cette tâche. Une nouvelle méthode de synchronisation pourra être développée à l'avenir dans le but d'assurer une synchronisation à la milliseconde, des méthodes appropriées pourront être employées. Le second élément influant sur la qualité de modélisation est l'estimation du calibrage géométrique global du système. Or, la méthode mise en œuvre, qui consiste à mesurer directement l'orientation physique des capteurs, peut s'avérer rapidement imprécise. Donc il nous paraît à présent indispensable de compléter ce procédé par un calibrage du système sur le terrain en utilisant une mire semi-immersée qui serait mesurée par les deux sous-systèmes simultanément. Les algorithmes développés dans la section 4.4.2.b pourraient être employés pour détecter les éléments de la mire dans les acquisitions sonar.

En ce qui concerne le traitement des données, nous avons constaté que la définition des blocs caméras estimés par photogrammétrie varie de quelques centimètres en fonction

des acquisitions. Nous retrouvons cette même imprécision lorsque l'on compare ces blocs avec le bloc caméra calibré. Comme nous avons pu l'observer lors de l'évaluation des trajectoires et du modèle expérimental, ces défauts ont une grande influence sur la détermination de la trajectoire du bateau et donc sur le géoréférencement des données sonar. Pour améliorer ce résultat, nous pouvons à la fois travailler sur le calcul photogrammétrique, mais aussi sur la manière de prendre en compte ces erreurs lors de l'alignement des blocs caméras en appliquant une pondération.

L'objectif des prochaines années est que cette méthode soit déployée dans les tunnels navigables. Des démarches en ce sens ont déjà été lancées. Ainsi, une première prise de contact a eu lieu avec une entreprise privée. Dans ce but, plusieurs améliorations sont à prévoir pour que la méthode proposée soit une solution « clé en main ». Tout d'abord, trop d'opérations manuelles sont encore nécessaires pour atteindre le résultat final. Cela concerne particulièrement le traitement photogrammétrique, le calibrage du système et la restitution maillée du modèle. Ainsi, l'automatisation du processus est à développer. Ensuite, le temps de traitement est actuellement beaucoup trop long. En effet, le traitement photogrammétrique nécessite plusieurs jours de calcul. Toutefois, nous espérons très prochainement diminuer considérablement cette durée en pré-sélectionnant les paires d'images à aligner. Une fois le modèle complet obtenu, la visualisation de celui-ci en entier sera certainement impossible compte tenu de la quantité de données produites. Par conséquent, une méthode sera à imaginer pour pouvoir exploiter le modèle 3D. Enfin, il est probable que les progrès de prochaines années dans le domaine de l'informatique puissent répondre à plusieurs de ces problématiques.

Pour conclure, notre approche pourrait être appliquée à certains environnements présentant des contraintes similaires aux tunnels navigables, comme les conduites de grand diamètre, ou encore les zones où la réception GPS est perturbée telles que les zones urbaines, encaissées ou arborées. Pour cela, des adaptations de la méthode seront nécessaires, notamment au niveau de la configuration des caméras.

Perspectives

À l'issue de ce travail de thèse, de nouvelles thématiques de recherche peuvent être ouvertes.

Tout d'abord, l'application de la photogrammétrie dans ce projet peut encore être optimisée, notamment en prenant en compte explicitement la contrainte de rigidité entre les caméras dans le calcul d'ajustement des faisceaux. De cette manière, beaucoup d'ambiguïtés pourront déjà être résolues et donc le nombre de degrés de liberté du problème pourrait être diminué. En définitive, nous estimerions l'orientation et la position globale du bloc caméra pré-calibré à chaque instant. Ainsi, nous pouvons espérer améliorer la précision du calcul et donc aussi de l'estimation de la trajectoire du bateau. Cette étude pourra s'inspirer du travail décrit dans (KURZ, 2014), dans lequel l'orientation des images issues d'une paire de caméras en stéréovision a été fixée lors du calcul d'ajustement des faisceaux.

Ensuite, nous avons observé que les données sonar ont un important niveau de bruit. Ainsi, le filtrage des données subaquatiques est un sujet sur lequel il serait intéressant de s'attarder. Pour cela, plusieurs axes de recherche sont à approfondir. Une piste possible est d'utiliser la forme du tunnel, qui est *a priori* connue grossièrement, afin de limiter la détection de la surface mesurée dans le signal sonar brut du sonar à certaines zones. Dans un second temps, l'application de filtres employés notamment en vision par ordinateur pourrait être expérimentée sur les modèles 3D sonar. Certains de ces algorithmes, à l'origine développés pour l'image 2D ont été adaptés pour être appliqués sur des modèles 3D, comme le filtrage bilatéral (JONES et al., 2003) ou trilatéral (CHOUDHURY et TUMBLIN, 2005), les moindres carrés mobiles (FLEISHMAN et al., 2005), ou encore le filtrage non-local (BUADES et al., 2005; DESCHAUD et GOULETTE, 2010). Enfin, à ce niveau, la prise en compte des configurations d'acquisition pour traiter les nuages de points sonar est à envisager.

Dans cette thèse, nous avons traité de l'agrégation des mesures de deux types de capteurs : optiques et sonar. Il s'agit d'une thématique de recherche qui pourrait encore plus être développée dans le but d'améliorer la reconstruction 3D des tunnels navigables. Une première piste s'inspire d'une méthode appliquée à terre qui réunit la photogrammétrie et la lasergrammétrie pour obtenir un modèle photoréaliste (LERMA et al., 2010). Concrètement, les images sont projetées sur un modèle 3D laser grâce aux paramètres d'orientation calculés par photogrammétrie. De cette manière, la précision de modélisation 3D du laser scanner et l'information radiométrique donnée par les images sont combinées. Une transposition de cette méthode sous l'eau consisterait à projeter des images acoustiques sur un modèle 3D construit à partir des acquisitions d'un SMF. De cette façon, nous

exploiterions la plus grande résolution des images acoustiques dont les travaux introduits dans (RIDAO et al., 2010) ont montré la performance. En outre, cette approche est analogue à celle décrite dans (OZOG et al., 2015) où cette opération de projection est effectuée sur le modèle CAO d'une coque de bateau. Au-delà de l'application d'une texture, les images acoustiques pourraient être exploitées pour la reconstruction 3D, par exemple en guidant le filtrage des données 3D (CARAFFA et al., 2015).

Enfin, nous pourrions aller plus loin dans l'agrégation des données en utilisant l'ensemble des mesures pour optimiser la reconstruction 3D. En effet, lors de la construction du modèle 3D, nous ne prenons pas en compte le recouvrement entre les levés subaquatiques des différents passages et la continuité de la structure du tunnel modélisée par photogrammétrie et bathymétrie. Ainsi, nous pourrions concevoir l'alignement des données de manière globale sous la forme d'un problème d'optimisation qui formaliserait les contraintes liées au système d'acquisition et à l'environnement observé. Cela permettrait de bénéficier de toutes les informations disponibles pour résoudre ce problème.

Publications de l'auteur

Article de journal

MOISAN, E., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S. et KOEHL, M. « Adjustment of Sonar and Laser Acquisition Data for Building the 3D Reference Model of a Canal Tunnel ». Dans : *Sensors* 15.12 (déc. 2015). Special Issue Sensors and Techniques for 3D Object Modeling in Underwater Environments, pp. 31180–31204.

Actes de colloques avec comité de lecture

MOISAN, E., HEINKELE, C., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S. et KOEHL, M. « Dynamic 3d modeling of a canal-tunnel using photogrammetric and bathymetric data ». Dans : *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W3. Nafplio, Grèce, mars 2017, pp. 495–501.

MOISAN, E., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S., SAMAT, O., et PAGÈS, C. « Assessment of a static multibeam sonar scanner for 3D surveying in confined subaquatic environments ». Dans : *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B5, Prague, République Tchèque, juil. 2016, pp. 541–548.

MOISAN, E., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S. et KOEHL, M. « Building a 3D reference model for canal tunnel surveying using sonar and laser scanning ». Dans : *ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W5. Piano di Sorrento, Italie : ISPRS/ CIPA Workshop “Underwater 3D recording and Modeling”, avr. 2015, pp. 153–159. *Best Paper Award*.

Colloques nationaux sans comité de lecture

MOISAN, E., HEINKELE, C., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S. et KOEHL, M. « Modélisation 3D en dynamique d'un canal tunnel à partir de données photogrammétriques et bathymétriques ». Colloque de la SFPT : « Photogrammétrie et télédétection : vers la convergence? ». ENSG, Marne-la-vallée. 8-9 mars 2017.

HEINKELE, C. , FOUCHER, P., MOISAN, E., MUZET, V., CHARBONNIER, P. « Pré-localisation des données pour la reconstruction photogrammétrique de voûtes de tunnels ». Colloque de la SFPT : « Photogrammétrie et télédétection : vers la convergence? ». ENSG, Marne-la-vallée. 8-9 mars 2017.

HEINKELE, C. , FOUCHER, P., MOISAN, E., MUZET, V., CHARBONNIER, P. « Calcul d'orientations sur une acquisition linéaire ». Colloque de la SFPT : « Photogrammétrie numérique et perception 3D : les nouvelles conquêtes ». ENSG, Marne-la-vallée. 16-17 mars 2016.

MOISAN, E., CHARBONNIER, P., FOUCHER, P., GRUSSENMEYER, P., GUILLEMIN, S. et KOEHL, M. « Réalisation d'un modèle 3D de référence pour l'évaluation des levés des tunnels canaux ». Journées scientifiques du Cerema : « Photogrammétrie et imagerie 3D », Rouen, 3-4 Juin 2015. (Actes à comité restreint).

HEINKELE, C. , FOUCHER, P., MOISAN, E. et CHARBONNIER, P. « Photogrammétrie dans un tunnel-canal : prototype, images et traitements sur le cluster du centre de calcul de l'Université de Strasbourg ». Journées scientifiques du Cerema : « Photogrammétrie et imagerie 3D », Rouen, 3-4 Juin 2015. (Actes à comité restreint).

Rapport de contrat

MOISAN, E. « Mesure Scanner – Laser de l'écluse 50 du Canal de la Marne au Rhin, Contrôle géométrique du gabarit de l'écluse ». Rapport technique, affaire Cerema 2015-77-921 (déc.2015).

Table des figures

1	Inspection dans les tunnels-canaux, méthodes actuelles et solution apportée	2
1.1	Graphique de l'extension des voies de navigation artificielles au cours des années.	7
1.2	Carte de la navigation fluviale en France	8
1.3	Années de mise en service des tunnels navigables.	9
1.4	Vocabulaire du génie civil et de la batellerie relatif aux tunnels-canaux	10
1.5	Photographies et coupes de trois tunnels-canaux	11
1.6	Repartition des tunnels-canaux suivant leur typologie	12
1.7	Présentation du tunnel-canal de Niderviller	13
1.8	Illustration de désordres observés dans le tunnel-canal de Niderviller	17
1.9	Prototype d'acquisition d'images dans le tunnel-canal de Niderviller.	19
1.10	Photographies des deux expérimentations (Revin et Petite France)	20
1.11	Modèle 3D simplifié d'une zone de la Petite France	21
2.1	Classification des capteurs subaquatiques pour la reconstruction 3D	26
2.2	Représentation de la directivité d'une antenne circulaire et linéaire	32
2.3	Représentation schématique de la composition d'une antenne	33
2.4	Représentation schématique de la façon d'orienter le faisceau de l'antenne	34
2.5	Illustrations du principe de réfraction et de réflexion	35
2.6	Représentation schématique en coupe du phénomène de multi-trajet possible dans un canal.	36
2.7	Principe de fonctionnement d'un sonar imageur	40
2.8	Représentation du fonctionnement d'un sonar latéral et d'une caméra acoustique	40
2.9	Partie de l'image sonar acquise dans le tunnel test de Niderviller	42
2.10	Représentations d'un sondeur monofaisceau et deux de ses applications	43
2.11	Illustration d'un sondeur multifaisceaux.	44
2.12	Illustrations de la constitution de l'antenne du sondeur multifaisceaux	45
2.13	Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux (SMF).	46
2.14	Procédure d'acquisition d'un sondeur multifaisceaux.	47
2.15	Principes de détection du signal rétrodiffusé par la surface	48
2.16	Définition des angles d'attitude.	52
2.17	Détermination de la profondeur par rapport au zéro hydrographique	53
2.18	Principe du filtre de Kalman appliqué au calcul de la trajectoire d'un mobile.	59
2.19	Principe de la méthode SLAM	60

3.1	Diagramme de l'approche appliquée pour la construction du modèle 3D des tunnels navigables.	.63
3.2	Illustration du système d'acquisition monté sur un bateau	.64
3.3	Illustration du système imageur	.66
3.4	Illustrations du système d'acquisition subaquatique	.68
3.5	Illustration des surfaces acquises lors du déclenchement de la mesure des caméras et du sonar.	.69
3.6	Vue schématique des trois configurations d'acquisition	.69
3.7	Photographies des procédures de calibrage des caméras	.72
3.8	Illustrations de la numérisation du système d'acquisition	.74
3.9	Illustration des nuages de points et des maillages des capteurs	.74
3.10	Procédure d'estimation du point d'une face d'un maillage le plus proche d'un point de l'espace	.76
3.11	Croquis des points de références implantés dans le tunnel	.78
3.12	Points de repères visibles sur les prises de vue photographiques	.79
3.13	Image du système lors de l'expérimentation dans le tunnel de Niderviller.	.80
3.14	Photographies du dispositif pour le suivi tachéométrique	.81
3.15	Illustration du modèle sténopé	.85
3.16	Illustration du principe de la géométrie épipolaire, dans le cas général et dans le cas normal	.86
3.17	Illustration du principe de l'odométrie visuelle simplifiée	.89
3.18	Représentation schématique d'une « tuile »	.90
3.19	Illustration d'un sous-modèle calculé sous Photoscan correspondant à un profil de tunnel de 2 m.	.93
3.20	Définition du système de coordonnées et de la mesure du SMF.	.93
3.21	Diagramme du processus de génération du nuage de points sonar	.94
3.22	Schéma récapitulatif de l'approche développée	.97
3.23	Nuages de points 3D de l'entrée du tunnel générés à partir des calculs de Photoscan	.99
3.24	Maillages de l'entrée du tunnel générés à partir des calculs de Photoscan	.99
3.25	Maillages de l'entrée du tunnel générés à partir des calculs de Micmac	100
3.26	Vue du dessus et par transparence du modèle subaquatique obtenu des calculs de Photoscan	101
3.27	Coupes des nuages de points générés à partir du calcul de Photoscan	102
4.1	Processus d'évaluation du système d'inspection développé.	106
4.2	Présentation du SBM BV5000	109
4.3	Illustration des deux parties composant le SBM	109
4.4	Présentation de la sphère conçue pour le SBM	111
4.5	Estimation de la dimension horizontale de l'empreinte d'acquisition	112
4.6	Images acoustiques du sondeur multifaisceaux	112
4.7	Présentation du site expérimental de l'écluse	114
4.8	Illustrations d'une zone mesurée par le SLT et le SBM	114
4.9	Illustrations des différentes configurations d'acquisition	115
4.10	Estimation des conditions d'acquisition du SBM.	116
4.11	Définition des points acquis par topographie sur le système	117
4.12	Illustration de la procédure d'alignement horizontal des numérisations sonar.	119
4.13	Modèle sonar complet de l'écluse	120
4.14	Rendu d'un nuage de point sonar	122
4.15	Coupes verticale et horizontales des nuages de points acquis par le SBM	123
4.16	Répartition des distances entre le nuage de points sonar et le maillage laser	125
4.17	Distributions statistiques des distances entre le nuage de points sonar et le maillage laser	126
4.18	Vue frontale des modèles 3D d'une partie de la paroi de l'écluse	126
4.19	Vue frontale des modèles 3D du mur de chute	127
4.20	Représentations statistiques des distances entre les trajectoires	130
4.21	Acquisition des données laser et sonar au tunnel de Niderviller	132
4.22	Illustration vue du dessus du dispositif d'acquisition	133

4.23	Méthodes pour le maillage du nuage de points	134
4.24	Photographie et modèle 3D de l'entrée nord du tunnel après la vidange	135
4.25	Organigramme du processus d'alignement du modèle 3D sonar sur le modèle 3D laser.	136
4.26	Illustration de la correction de l'orientation du modèle 3D sonar	137
4.27	Échelle utilisée pour lier les acquisitions	138
4.28	Diagramme du processus d'estimation des échelles	138
4.29	Illustration du processus d'estimation de l'échelle	139
4.30	fonctions de densité de probabilité et fonctions de potentiel	140
4.31	Procédé employé pour définir la segmentation des éléments de l'échelle	143
4.32	Principe de régression simultanée suivant la façon affine et orthogonale	145
4.33	Estimation de la translation horizontale	147
4.34	Illustrations du modèle 3D de référence	148
4.35	Histogrammes des distances entre le modèle de référence et sonar	150
4.36	Visualisation des distances entre le modèle photogrammétrique et le modèle de référence	152
4.37	Vue du dessus et par transparence des modèles sonar et laser	152

Liste des tableaux

2.1	Tableau des fréquences employées en fonction du type de levé49
2.2	Tableau détaillant les repères employés pour le géoréférencement des données du SMF.51
3.1	Caractéristiques des appareils de prise de vue photographiques employés.66
3.2	Tableau des caractéristiques du SMF le MB135067
3.3	Tableau des distances inter-capteurs exprimées en mètre.77
3.4	Résumé des acquisitions effectuées durant l'expérimentation80
3.5	Notations pour la description du processus de géoréférencement des données sonar95
4.1	Caractéristiques du SBM BV5000.	109
4.2	Distributions des distances entre le maillage laser et le nuage de points sonar	125
4.3	Distances inter-caméras déterminées par photogrammétrie à chaque acquisition	128
4.4	Comparaison des distances inter-barreaux	146
4.5	Résultats de la comparaison du modèle expérimental avec le modèle de référence	149

Références bibliographiques

- ALBERT, J.-L., P. CHARBONNIER, P. CHAVANT et al. (2013). “Devising a visual inspection system for canal tunnels : preliminary studies”. In : *24e Symposium du CIPA*. T. XL-5. W2. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, p. 13–18 (cité à la page 89).
- AYKIN, M. et S. NEGAHDARIPOUR (2013). “Forward-look 2-D sonar image formation and 3-D reconstruction”. In : *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS conference (OCEANS’13)*. San Diego, Etats-Unis, p. 1–10 (cité à la page 41).
- BÆRENTZEN, J. A. et H. AANÆS (2002). “Generating signed distance fields from triangle meshes”. In : *Informatics and Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, DTU 20* (cité à la page 75).
- BAILEY, T. et H. DURRANT-WHYTE (2006). “Simultaneous localization and mapping (SLAM) : part II”. In : *Robotics Automation Magazine, IEEE* 13.3, p. 108–117 (cité à la page 59).
- BENAÏSSA, B., J. V. HYFTE, J. GOUIFFES et al. (1999). *Catalogue des souterrains fluviaux*. Rapport technique. Compiègne : CETMEF (cités aux pages 11, 13, 15).
- BESL, P. et N. D. MCKAY (1992). “A method for registration of 3-D shapes”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2, p. 239–256 (cités aux pages 57, 75).
- BIANCO, G., A. GALLO, F. BRUNO et M. MUZZUPAPPA (2013). “A Comparative Analysis between Active and Passive Techniques for Underwater 3D Reconstruction of Close-Range Objects”. In : *Sensors* 13.8, p. 11007–11031 (cité à la page 25).
- BISHOP, C. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. 1^{re} éd. Information science and Statistics. New-York, USA : Springer (cités aux pages 141, 142).
- BÖRLIN, N. et P. GRUSSENMEYER (2013). “Bundle Adjustment With and Without Damping”. In : *The Photogrammetric Record* 28.144, p. 396–415 (cité à la page 86).
- BRAHIM, N. (2014). “Reconstruction tridimensionnelle de scènes sous-marines à partir de séquences d’images acquises par des caméras acoustiques”. Thèse de doctorat. Université Rennes 1 – TELECOM Bretagne Brest (cité à la page 42).

- BRAHIM, N., S. DANIEL et D. GUERLOT (2008). "Potential of underwater sonar systems for port infrastructure inspection". In : *Proceedings of IEEE OCEANS conference*. Québec city, Canada, p. 1–7 (cité à la page 41).
- BRIGNONE, L., M. MUNARO, A. G. ALLAIS et J. OPDERBECKE (2011). "First sea trials of a laser aided three dimensional underwater image mosaicing technique". In : *Proceedings of IEEE OCEANS conference*. Santander, Espagne, p. 1–7 (cité à la page 24).
- BRÄUER-BURCHARDT, C., M. HEINZE, I. SCHMIDT, P. KÜHMSTEDT et G. NOTNI (2016). "Underwater 3D Surface Measurement Using Fringe Projection Based Scanning Devices". In : *Sensors* 16.13 (cité à la page 24).
- BRUNO, F., A. LAGUDI, G. RITACCO, M. MUZZUPAPPA et R. GUIDA (2015). "Opto-acoustic data fusion for supporting the guidance of remotely operated underwater vehicles (ROVs)". In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. XL-5/W5. Piano di Sorrento, Italy : ISPRS/ CIPA Workshop "Underwater 3D recording et Modeling", p. 47–53 (cité à la page 25).
- BRYSON, A. et M. FRAZIER (1963). "Smoothing for linear and nonlinear dynamic systems". In : *Proceedings of the optimum system synthesis conference*, p. 353–364 (cité à la page 59).
- BRYSON, M., M. JOHNSON-ROBERSON, O. PIZARRO et S. B. WILLIAMS (2016). "True Color Correction of Autonomous Underwater Vehicle Imagery". In : *Journal of Field Robotics* 33.6, p. 853–874 (cité à la page 24).
- BUADES, A., B. COLL et J.-M. MOREL (2005). "A Non-Local Algorithm for Image Denoising". In : *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. T. 2. San Diego, Etats-Unis : IEEE, p. 60–65 (cité à la page 160).
- CARAFFA, L., J. P. TAREL et P. CHARBONNIER (2015). "The Guided Bilateral Filter : When the Joint/Cross Bilateral Filter Becomes Robust". In : *IEEE Transactions on Image Processing* 24.4, p. 1199 –1208 (cité à la page 161).
- CETU (2012). *Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 40 : Tunnels, Génie civil et équipements*. Fascicule Technique de l'ITSEOA. Bron : Centre d'études techniques des tunnels (CETU) (cité à la page 16).
- CETU (2015a). *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers – Livre 1 : Du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotation*. Guide technique. Bron : CETU (cité à la page 16).
- (2015b). *Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - Livre 1 : Livre 2 : Catalogue des désordres*. Guide technique. Bron : CETU (cités aux pages 16, 17).
- CHAMPIER, B. (2014). "Bathymétrie en l'absence de signal GPS : application aux canaux urbains et aux tunnels canaux". Rapport de projet de fin d'études. INSA de Strasbourg (cités aux pages 20, 21, 81).
- CHARBONNIER, P., L. BLANC-FÉRAUD, G. AUBERT et M. BARLAUD (1997). "Deterministic Edge-Preserving Regularization in Computed Imaging". In : *IEEE Transactions on Image Processing* 6.2, p. 298–311 (cité à la page 140).
- CHARBONNIER, P., P. CHAVANT, P. FOUCHER et al. (2013). "Accuracy Assessment of a Canal-Tunnel 3D Model by Comparing Photogrammetry and Laserscanning Recording Techniques". In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensin and spatial information sciences, XXIV International CIPA Symposium*. Strasbourg, France, p. 171–176 (cités aux pages 20, 107).

- CHARBONNIER, P., P. FOUCHER, P. CHAVANT et al. (2014). "An image-based inspection system for canal-tunnel heritage". In : *International Journal of Heritage in the Digital Era* 3.1, p. 197–214 (cités aux pages 19, 82).
- CHAVANT, P. (2013). "Évaluation absolue de méthodes de localisation et de reconstruction panoramique et photogrammétrique d'un tunnel à partir d'un nuage de points de référence". Rapport de projet de fin d'études. INSA de Strasbourg (cité à la page 107).
- CHECCHIN, P., F. GÉROSSIER, C. BLANC, R. CHAPUIS et L. TRASSOUDAIN (2010). "Radar Scan Matching SLAM Using the Fourier-Mellin Transform". In : *Field and Service Robotics : Results of the 7th International Conference*. Sous la dir. d'A. HOWARD, K. IAGNEMMA et A. KELLY. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 151–161 (cité à la page 57).
- CHEN, Y. et G. MEDIONI (1992). "Object modeling by registration of multiple range images". In : *Image and Vision Computing* 10.3, 145–155 (cités aux pages 57, 75).
- CHOUDHURY, P. et J. TUMBLIN (2005). "The Trilateral Filter for High Contrast Images and Meshes". In : *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. SIGGRAPH '05. Los Angeles, California : ACM (cité à la page 160).
- CIGNONI, P., C. ROCCHINI et R. SCOPIGNO (1998). "Metro : Measuring Error on Simplified Surfaces". In : *Computer Graphics Forum* 17.2, p. 167–174 (cités aux pages 107, 124).
- CLARKE, J. E. H. (2003). "A reassessment of vessel coordinate systems : what is it that we are really aligning?" In : *US Hydrographic Conference*. Biloxi, USA (cité à la page 73).
- CLAUSNER, J. E. et J. POPE (1988). *Side-scan sonar applications for evaluating coastal structures*. Rapp. tech. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS (cité à la page 41).
- DAVIS, A. et A. LUGSDIN (2005). "High speed underwater inspection for port and harbour security using Coda Echoscope 3D sonar". In : *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS conference (OCEANS'05)*. T. 3, p. 2006–2011 (cité à la page 44).
- DELON, J., A. DESOLNEUX, J.-L. LISANI et A. PETRO (2007). "A Nonparametric Approach for Histogram Segmentation". In : *Transactions on Image Processing* 1. Sous la dir. d'IEEE, p. 253–261 (cité à la page 143).
- DESCHAUD, J.-E. et F. GOULETTE (2010). "Point cloud non local denoising using local surface descriptor similarity". In : *Symposium PCV 2010 (Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis)*. T. XXXVIII. Saint-Mandé, France : ISPRS archives, part 3A, p. 109–114 (cité à la page 160).
- DOBKE, A., J. VASQUEZ, L. LIEU et al. (2013). "Towards three-dimensional underwater mapping without odometry". In : *Unmanned Untethered Submersible Technology Conference 2013 Proceedings*. Portsmouth, NH (cité à la page 58).
- DRAP, P., D. MERAD, J.-M. BOÏ et al. (2011). "ROV-3D : 3D Underwater Survey Combining Optical and Acoustic Sensor". In : *Proceedings of the 12th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*. VAST'11. Aire-la-Ville, Suisse : Eurographics Association, p. 177–184 (cités aux pages 24, 25, 27).
- DURRANT-WHYTE, H. et T. BAILEY (2006). "Simultaneous localization and mapping : part I". In : *IEEE Robotics Automation Magazine* 13.2, p. 99–110 (cités aux pages 59, 60).

- DUVERGIER, J. (1879). "Tome Soixante-Dix-Neuvième". In : *Collection complète des lois, décrets, ordonnances, règlements, et avis du Conseil d'Etat*. Source gallica.bnf.fr - Consultée le 3 juillet 2017. Bibliothèque Nationale de France : L. Larose, Ch. Noblet. Chap. 5-6 août 1879 – Loi relative au classement et à l'amélioration des voies navigables, p. 338–339 (cité à la page 6).
- EHRHOLD, A. (2003). *L'application des Sondeurs Multi-Faisceaux (SMF) très petits fonds pour la cartographie des habitats marins*. REBENT, Cartographie des peuplements macrobenthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidale, Fiche outil : l'application des SMF. IFREMER, France (cités aux pages 44, 49).
- ELLUM, C. et N. EL-SHEIMY (2002). "Land-based mobile mapping systems". In : *Photogrammetric engineering and remote sensing* 68.1, p. 13–17 (cité à la page 55).
- EVANS, J. A., T. W. WARREN et R. W. HASKINS (2013). *Underwater Inspection of Navigation Structures with an Acoustic Camera*. Rapp. tech. The US Army Engineer Research et Development Center (ERDC) (cité à la page 41).
- FAGON, Y., V. FLAQUET-LACOUX, J. BRIOIST, D. DUBOIS et C. CHOQUET (2002a). *Tunnels canaux – Fascicule 1 : Surveillance, entretien et réparation*. Guide Technique. Compiègne : CETMEF (cités aux pages 2, 10, 16, 41).
- (2002b). *Tunnels canaux – Fascicule 2 : Pathologie*. Guide Technique. Compiègne : CETMEF (cité à la page 16).
- FAIRFIELD, N., G. KANTOR et D. WETTERGREEN (2007). "Real-Time SLAM with Octree Evidence Grids for Exploration in Underwater Tunnels". In : *Journal of Field Robotics* 24.1-2, p. 03–21 (cité à la page 58).
- FISCHLER, M. et R. BOLLES (1981). "Random Sample Consensus : A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". In : *Communications of the ACM* 24.6, p. 381–395 (cité à la page 87).
- FLEISHMAN, S., D. COHEN-OR et C. T. SILVA (2005). "Robust Moving Least-squares Fitting with Sharp Features". In : *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. SIGGRAPH '05. Los Angeles, California : ACM, p. 544–552 (cité à la page 160).
- FORSYTHE, G. E., M. A. MALCOLM et C. B. MOLER (1977). *Computer methods for mathematical computations*. Prentice-Hall series in automatic computation. Englewood Cliffs, USA : Prentice-Hall (cité à la page 96).
- FOUCHER, P., M.D.BAH, P. CHARBONNIER, C. BOULOGNE et C. LARIVE (2016a). "Classification automatique de défauts sur des images de tunnels par forêts d'arbres aléatoires". In : *Congrès national sur la Reconnaissance de Formes et l'Intelligence Artificielle (RFIA)*. Format électronique, <http://rfia2016.iut-auvergne.com/media/articles/P21.pdf> accédé le 4 août 2017. Clermont-Ferrand (cité à la page 20).
- FOUCHER, P., P. CHARBONNIER, J. ALBERT et al. (2016b). *Diagnostic automatisé de l'état des tunnels – Rapport de faisabilité*. Rapport technique C15IO0114. Strasbourg : Cerema (cités aux pages 19, 70).
- FRALEU, B., Y. VINCENOT et F. DENIVET (2006). "Modélisation 3D au service de l'inspection d'ouvrages portuaires immergés". In : *XYZ* 109, p. 53–56 (cité à la page 28).
- FRANÇOIS, R. E. et G. R. GARRISON (1982). "Sound absorption based on ocean measurements. Part II : Boric acid contribution and equation for total absorption". In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 72.6, p. 1879–1890 (cité à la page 38).

- FRASER, C. S. (1996). "Close range photogrammetry and machine vision". In : sous la dir. de K. B. ATKINSON. Whittles Publishing. Chap. Network design, chapter 9, p. 256–281 (cité à la page 65).
- FRAUNDORFER, F. et D. SCARAMUZZA (2012). "Visual Odometry : Part II : Matching, Robustness, Optimization, and Applications". In : *Robotics Automation Magazine, IEEE* 19.2, p. 78–90 (cité à la page 56).
- GALCERAN, E., R. CAMPOS, N. PALOMERAS et al. (2015). "Coverage Path Planning with Real-time Replanning and Surface Reconstruction for Inspection of Three-dimensional Underwater Structures using Autonomous Underwater Vehicles". In : *Journal of Field Robotics* 32.7, p. 952–983 (cité à la page 27).
- GIKAS, V. (2012). "Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation". In : *Sensors* 12.8, p. 11249–11270 (cité à la page 107).
- GILLHAM, J. (2011). *Underwater Sonar and Laser Measuring An Experimental Comparison*. Rapport d'essai. Waterloo, Canada : 2G Robotics Inc. (cité à la page 24).
- GOLUB, G. H. et C. F. VAN LOAN (2012). *Matrix computations*. 4^e éd. T. 3. Johns Hopkins Studies in the Mathematical Sciences. Johns Hopkins University Press, p. 784 (cités aux pages 76, 96).
- GOULETTE, F. (2009). "Relevés laser urbains par Systèmes Mobiles de Cartographie". In : *Revue XYZ* 119, p. 15–19 (cité à la page 55).
- GREWAL, M. S. (2011). "Kalman Filtering". In : *International Encyclopedia of Statistical Science*. Sous la dir. de M. LOVRIC. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 705–708 (cité à la page 59).
- GREWAL, M. S., L. R. WEILL et A. P. ANDREWS (2001). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons (cité à la page 55).
- GRIFFITHS, J. et J. GRAHAM (2011). "Processing combined LASER, SONAR and HD imaging for better evaluation decisions". In : *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No-Dig Show 2011*. T. F-3-05. Washington, DC, Etats-Unis (cités aux pages 28, 58).
- GUITTET, A. (2012). "Repérage d'un système d'inspection dans un tunnel-canal". Rapport de projet de fin d'études. INSA de Strasbourg (cité à la page 70).
- GUIVANT, J., E. NEBOT et S. BAIKER (2000). "Localization and map building using laser range sensors in outdoor applications". In : *Journal of Robotic Systems* 17.10, p. 565–583 (cité à la page 57).
- GUTH, F., L. SILVEIRA, S. BOTELHO, P. DREWS et P. BALLESTER (2014). "Underwater SLAM : Challenges, state of the art, algorithms and a new biologically-inspired approach". In : *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS EMBS International Conference on*. Sao Paulo, Brésil, p. 981–986 (cité à la page 60).
- HAN, J.-Y., J. GUO et Y.-S. JIANG (2013). "Monitoring tunnel profile by means of multi-epoch dispersed 3-D LiDAR point clouds". In : *Tunnelling and Underground Space Technology* 33, p. 186–192 (cité à la page 107).
- HANSEN, R. K. et P. A. ANDERSEN (1998). "The application of real time 3D acoustical imaging". In : *Proceedings of IEEE OCEANS Conference (OCEANS'98)*. T. 2. Nice, France, p. 738–741 (cité à la page 44).
- HARE, R. (2001). *Error budget analysis for US Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO) hydrographic survey systems*. Rapp. tech. Naval Oceanographic Office (cité à la page 50).

- HARE, R., A. GODIN et L. MAYER (1995). "Accuracy estimation of Canadian swath (multibeam) and sweep (multitransducer) sounding systems". In : *Canadian Hydrographic Service and University of New Brunswick Publication, Fredericton* (cité à la page 56).
- HEINKELE, C., P. FOUCHER, E. MOISAN, V. MUZET et P. CHARBONNIER (2017). "Pré-localisation des données pour la reconstruction photogrammétrique de voûtes de tunnels". Colloque de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (Sfpt), présentation orale (cité à la page 90).
- HERLIHY, D. R., B. F. HILLARD et T. D. RULON (1989). "National Oceanic and Atmospheric Administration Sea Beam System'Patch Test". In : *The International Hydrographic Review* 66.2, p. 119–139 (cité à la page 73).
- HOLLINGER, G. A., B. ENGLLOT, F. S. HOVER, U. MITRA et G. S. SUKHATME (2013). "Active planning for underwater inspection and the benefit of adaptivity". In : *The International Journal of Robotics Research* 32.1, p. 3–18 (cité à la page 41).
- HUANG, T. A. et M. KAESS (2015). "Towards acoustic structure from motion for imaging sonar". In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 758–765 (cité à la page 58).
- HUBER, P. (1981). *Robust statistics*. John Wiley et Sons, New York (cité à la page 139).
- HURTÓS, N., X. CUFI et J. SALVI (2013). "A novel blending technique for two-dimensional forward-looking sonar mosaicing". In : *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS conference (OCEANS'13)*. San Diego, Etats-Unis, p. 1–7 (cité à la page 41).
- HYPACK®*User Manual* (2015). HYPACK, Inc. Middeltown, USA (cité à la page 71).
- IENG, S. S. (2004). "Méthodes robustes pour la détection et le suivi des marquages." Thèse de doct. Université Paris VI, France (cité à la page 140).
- IHO (2005). *Manuel d'Hydrographie*. 1.0.0. Source : https://www.iho.int/iho_pubs/CB/C13_Index.htm, accédé le 4 août 2017. Bureau Hydrographique International. Monaco (cités aux pages 56, 73).
- INGRAM, E. (2014). "Hot products preview". In : *Hydro Review* 33.5, p. 22–31 (cités aux pages 28, 58).
- JAFFE, J. S., K. D. MOORE, J. MCLEAN et M. P. STRAND (2001). "Underwater optical imaging : status and prospects". In : *Oceanography* 14.3, p. 66–76 (cité à la page 24).
- JOHANSSON, H., M. KAESS, B. ENGLLOT, F. HOVER et J. LEONARD (2010). "Imaging sonar-aided navigation for autonomous underwater harbor surveillance". In : *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, p. 4396–4403 (cité à la page 58).
- JOHNSON-ROBERSON, M., O. PIZARRO, S. B. WILLIAMS et I. MAHON (2010). "Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys". In : *Journal of Field Robotics* 27.1, p. 21–51 (cité à la page 27).
- JONES, T. R., F. DURAND et M. DESBRUN (2003). "Non-iterative, Feature-preserving Mesh Smoothing". In : *ACM Trans. Graph.* 22.3, p. 943–949 (cité à la page 160).
- KALMAN, R. E. et al. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems". In : *Journal of basic Engineering* 82.1, p. 35–45 (cité à la page 58).

- KELLER, F. et H. STERNBERG (2013). "Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping : System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications". In : *Remote Sensing* 5.11, p. 5805–5824 (cité à la page 55).
- KITTEL, P. (2002). *George Jean – Par la grâce de Dieu, comte Palatin du Rhin, duc de Bavière, comte de Veldenz et de la Petite-Pierre, fondateur de Phalsbourg*. Sous la dir. d'E. du musée de PHALSBOURG (cité à la page 12).
- KRAUS, K. et P. WALDHÄUSL (1998). *Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux*. Hermès (cité à la page 83).
- KRIECHBAUMER, T., K. BLACKBURN, T. P. BRECKON, O. HAMILTON et M. RIVAS CASADO (2015). "Quantitative Evaluation of Stereo Visual Odometry for Autonomous Vessel Localisation in Inland Waterway Sensing Applications". In : *Sensors* 15.12, p. 31869–31887 (cité à la page 56).
- KRIG, S. (2014). "Interest Point Detector and Feature Descriptor Survey". In : *Computer Vision Metrics : Survey, Taxonomy, and Analysis*. Berkeley, USA : Apress, p. 217–282 (cité à la page 87).
- KURZ, C. (2014). "Constrained Camera Motion Estimation and 3D Reconstruction". Thèse de doctorat. Sarrebruck, Allemagne : Université de la Sarre (cité à la page 160).
- LAGUE, D., N. BRODU et J. LEROUX (2013). "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the Rangitikei canyon (N-Z)". In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, p. 10–26 (cité à la page 107).
- LEONARD, J. J. et H. F. DURRANT-WHYTE (2012). *Directed sonar sensing for mobile robot navigation*. T. 175. Springer Science & Business Media (cité à la page 58).
- LERMA, J. L., S. NAVARRO, M. CABRELLES et V. VILLAVARDE (2010). "Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation : the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study". In : *Journal of Archaeological Science* 37.3, p. 499–507 (cité à la page 160).
- LESNIKOWSKI, N. et B. RUSH (2012). *Spool Piece Metrology Applications Utilizing BV5000 3D Scanning Sonar : High Resolution Acoustic Technology for Underwater Measurement*. Rapp. tech. Seattle, USA : BlueView Technologies (cités aux pages 27, 111, 123).
- LUHMANN, T., S. ROBSON, S. KYLE et J. BOEHM (2014). *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. 2^e éd. Walter de Gruyter (cités aux pages 84–86).
- LURTON, X. (2010). *An introduction to underwater acoustics : principles and applications*. 2^e éd. Springer Science & Business Media (cités aux pages 28, 34, 36, 44, 56).
- MALLIOS, A. (2014). "Sonar scan matching for simultaneous localization and mapping in confined underwater environments". Thèse de doct. Universtat de Girona (cité à la page 58).
- MASSOT-CAMPOS, M. et G. OLIVER-CODINA (2014). "Underwater Laser-based Structured Light System for one-shot 3D reconstruction". In : *Proceedings of IEEE SENSORS conference*. Valence, Espagne, p. 1138–1141 (cité à la page 24).
- MASSOT-CAMPOS, M. et G. OLIVER-CODINA (2015). "Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction". In : *Sensors* 15.12, p. 31525–31557 (cités aux pages 25, 26).
- MCLEOD, D., J. JACOBSON, M. HARDY et C. EMBRY (2013). "Autonomous inspection using an underwater 3D LiDAR". In : *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS conference (OCEANS'13)*. San Diego, Etats-Unis, p. 1–8 (cités aux pages 24, 27).

- MEER, P. (2004). "Robust techniques for computer vision". In : *Emerging topics in computer vision*. Sous la dir. de G. MEDIONI et S. KANG. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall PTR. Chap. 4, p. 107–190 (cité à la page 139).
- MENNA, F., E. NOCERINO, S. TROISI et F. REMONDINO (2015). "Joint alignment of underwater and above-the-water photogrammetric 3D models by independent models adjustment". In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. XL-5/W5. Piano di Sorrento, Italy : ISPRS/ CIPA Workshop "Underwater 3D recording et Modeling", p. 143–151 (cités aux pages 24, 136).
- MIQUEL, P. (1994). *Histoire des canaux, fleuves et rivières de France*. Paris : Edition°1 (cité à la page 6).
- MITCHELL, T., C. MILLER et T. LEE (2011). "Multibeam surveys extended above the waterline". In : *Proceedings of WEDA Technical Conference and Texas A&M Dredging Seminar*. Nashville, Etats-Unis (cité à la page 28).
- MOISAN, E., P. CHARBONNIER, P. FOUCHER et al. (2015). "Building a 3D reference model for canal tunnel surveying using sonar and laser scanning". In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. XL-5/W5. Piano di Sorrento, Italie : ISPRS/ CIPA Workshop "Underwater 3D recording et Modeling", p. 153–159. *Best Paper Award* (cité à la page 131).
- MOISAN, E. (2015). *Mesure Scanner – Laser de l'écluse 50 du Canal de la Marne au Rhin, Contrôle géométrique du gabarit de l'écluse*. Rapport technique 2015-77-921. Cerema (cité à la page 113).
- MOREL, Y. (2016). "Lasergammétrie sous-marine : Quel apport pour les métrologies et l'Exploration Production?" In : *XYZ* 146, p. 40–44 (cité à la page 25).
- MOURAGNON, E., M. LHUILLIER, M. DHOME, F. DEKEYSER et P. SAYD (2006). "3D reconstruction of complex structures with bundle adjustment : an incremental approach". In : *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. P. 3055–3061 (cité à la page 57).
- MÜLLER, U., P. KUHN et G. KADNER (2012). "Crack detection – Potential savings in motion". In : *World tunnelling*, p. 25–27 (cité à la page 56).
- MURTIYOSO, A., P. GRUSSENMEYER, M. KOEHL et T. FREVILLE (2016). "Acquisition and Processing Experiences of Close Range UAV Images for the 3D Modeling of Heritage Buildings". In : *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage : Documentation, Preservation, and Protection*. Sous la dir. de M. IOANNIDES, E. FINK, A. MOROPOULOU et al. Lecture Notes in Computer Science (LCNS, volume 10058). Springer, p. 420–431 (cité à la page 92).
- NARAYANA, K. (2011). "Solutions for the localization of mobile mapping systems in structured environments". Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris (cité à la page 59).
- NEGAHDARIPOUR, S. et P. FIROOZFAM (2006). "An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection". In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 31.3, p. 551–564 (cités aux pages 24, 27).
- NOCERINO, E., F. MENNA et F. REMONDINO (2014). "Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects". In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5*, p. 465–472 (cité à la page 65).

- OZOG, P., G. TRONI, M. KAESS, R. M. EUSTICE et M. JOHNSON-ROBERSON (2015). "Building 3D mosaics from an Autonomous Underwater Vehicle, Doppler velocity log, and 2D imaging sonar". In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, Etats-Unis, p. 1137–1143 (cités aux pages 41, 56, 161).
- OZOG, P., N. CARLEVARIS-BIANCO, A. KIM et R. M. EUSTICE (2016). "Long-term Mapping Techniques for Ship Hull Inspection and Surveillance using an Autonomous Underwater Vehicle". In : *Journal of Field Robotics* 33.3, p. 265–289 (cité à la page 27).
- PAPADOPOULOS, G., H. KURNIAWATI, A. S.B. M. SHARIFF, L. J. WONG et N. M. PATRIKALAKIS (2014). "Experiments on Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures". In : *Journal of Field Robotics* 31.2, p. 225–244 (cités aux pages 28, 57).
- PAULL, L., S. SAEEDI, M. SETO et H. LI (2014). "AUV Navigation and Localization : A Review". In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 39.1, p. 131–149 (cités aux pages 56, 57).
- PIERRE, A. (2014). "Modélisation géostructurale 3D de parois rocheuses en milieu ferroviaire, application aux ouvrages en terre". Thèse de doct. Université de Strasbourg (cité à la page 135).
- PIERROT-DESEILLIGNY, M. et I. CLERY (2011). "Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images". In : *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. 38. 5, p. 269–276 (cité à la page 90).
- REMONDINO, F. (2003). "From point cloud to surface : the modeling and visualization problem". In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. XXXIV-5/W10. Tarasp-Vulpera, Switzerland : International Workshop on Visualization et Animation of Reality-based 3D Models (cité à la page 134).
- REMONDINO, F., M. G. SPERA, E. NOCERINO, F. MENNA et F. NEX (2014). "State of the art in high density image matching". In : *The Photogrammetric Record* 29.146, p. 144–166 (cités aux pages 87, 92).
- RIBAS, D., P. RIDAO, J. D. TARDÓS et J. NEIRA (2007). "Underwater SLAM in a marina environment". In : *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*. San Diego, États-Unis, p. 1455–1460 (cités aux pages 27, 58).
- RIDAO, P., M. CARRERAS, D. RIBAS et R. GARCIA (2010). "Visual inspection of hydroelectric dams using an autonomous underwater vehicle". In : *Journal of Field Robotics* 27.6, p. 759–778 (cités aux pages 27, 41, 58, 161).
- ROMAN, C., G. INGLIS et J. RUTTER (2010). "Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites". In : *Proceedings of IEEE OCEANS Conference (OCEANS'10)*. Sydney, Australie, p. 1–9 (cité à la page 24).
- ROMAN, C. et H. SINGH (2005). "Improved vehicle based multibeam bathymetry using sub-maps and SLAM". In : *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, p. 3662–3669 (cité à la page 57).
- RONDEAU, M., E. LEBLANC et L. GARANT (2012). "Dam infrastructure first inspection supported by an integrated multibeam echosounder (MBES)/ LiDAR system". In : *Proceedings of the Canadian Dam Association annual conference*. Saskatoon, Canada (cités aux pages 28, 49).
- RUPNIK, E., M. DAAKIR et M. PIERROT DESEILLIGNY (2017). "MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry". In : *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2.1, p. 14 (cité à la page 90).

- SCARAMUZZA, D. et F. FRAUNDORFER (2011). “Visual Odometry [Tutorial]”. In : *Robotics Automation Magazine, IEEE* 18.4, p. 80–92 (cité à la page 56).
- SCHETTINI, R. et S. CORCHS (2010). “Underwater Image Processing : State of the Art of Restoration and Image Enhancement Methods”. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010, p. 746052 (cité à la page 24).
- SCHLAGER, S. (2016). *Morpho : Calculations and Visualisations Related to Geometric Morphometrics*. R package version 2.4.1.1, source : <https://CRAN.R-project.org/package=Morpho> accédé le 4 août 2017 (cité à la page 75).
- SCHÖNEMANN, P. H. (1966). “A generalized solution of the orthogonal procrustes problem”. In : *Psychometrika* 31.1, p. 1–10 (cité à la page 96).
- SETRA (2013). *Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Fascicule 10 - Fondations en site aquatique*. Fascicule Technique de l'ITSEOA. Sourdun : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) (cité à la page 16).
- SOHNLEIN, G., S. RUSH et L. THOMPSON (2011). “Using manned submersibles to create 3D sonar scans of shipwrecks”. In : *Proceedings of IEEE OCEANS conference*. Santander, Espagne, p. 1–10 (cité à la page 27).
- SZELISKI, R. (2010). *Computer Vision : Algorithms and Applications*. 1^{re} éd. New York, NY, USA : Springer-Verlag New York, Inc. (cités aux pages 57, 88).
- TAREL, J. P., P. CHARBONNIER et S. S. IENG (2007). “Simultaneous robust fitting of multiple curves”. In : *Proceedings of International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP)*. Barcelone, Spain : INSTICC, p. 175–182 (cité à la page 144).
- TAREL, J. P., S. S. IENG et P. CHARBONNIER (2008). “A constrained-optimization based half-quadratic algorithm for robustly fitting sets of linearly parametrized curves”. In : *Advances in Data Analysis and Classification* 2.3, p. 227–239 (cité à la page 144).
- TELEDYNE (2016). *High resolution structural inspection of flooded tunnel using BlueView T2250 360° Multibeam Profiling Sonar and Teledyne PDS*. Rapport technique (étude de cas). Pääjärvi, Finlande : Teledyne Marine (cité à la page 158).
- TELEM, G. et S. FILIN (2010). “Photogrammetric modeling of underwater environments”. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65.5, p. 433–444 (cité à la page 24).
- THOMAS, L. H. (2011). “The A.J. Goddard : Reconstruction and material culture of a Klondike Gold Rush sternwheeler”. *Mém.de mast*. USA : Texas A&M University (cité à la page 123).
- THOMPSON, L. et J. SEAWALL (2013). *Sensors and Processing for Pipe, Riser, Structure, and Equipment Inspection to Provide Detailed Measurements, Corrosion Detection, Leak Detection, and/or Detection of Heat Plumes from Degraded Pipeline Insulation*. Rapp. tech. 09121.3300.08.Final. Teledyne Blueview for Research Partnership to Secure Energy for America (RPSEA) (cité à la page 27).
- TOURNADRE, V., M. PIERROT-DESEILLIGNY et P. H. FAURE (2015). “UAV Linear Photogrammetry”. In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W3*, p. 327–333 (cité à la page 65).
- TSAI, R. (1987). “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”. In : *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3.4, p. 323–344 (cités aux pages 72, 82).

- VAAJA, M., A. KUKKO, H. KAARTINEN et al. (2013). "Data Processing and Quality Evaluation of a Boat-Based Mobile Laser Scanning System". In : *Sensors* 13.9, p. 12497–12515 (cité à la page 55).
- VAUCLARE, S. (2017). "Développement d'outils d'inspection automatisée des tunnels canaux". Projet de Recherche Technologique (Rapport interne) (cité à la page 123).
- VELLA, C., P. LEVEAU, M. PROVANSAL et al. (1999). "Le canal de Marius et les dynamiques littorales du golfe de Fos". In : *Gallia* 56, p. 131–139 (cité à la page 6).
- VIVET, D. (2011). "Perception of the environment with a hyper-frequency radar. Application to simultaneous localization and mapping, to detection and tracking of moving objects in outdoor environment." Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II (cités aux pages 57, 60).
- VNF (2014). *Petit lexique des termes techniques de la voie d'eau*. Brochure documentaire. Source : <http://vnf.fr>. Béthune (cité à la page 10).
- ZERR, B. et B. STAGE (1996). "Three-dimensional reconstruction of underwater objects from a sequence of sonar images". In : *Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP)*. T. 3. Lausanne, Suisse : IEEE, p. 927–930 (cité à la page 41).
- ZHANG, Z. (1999). "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations". In : *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. T. 1. IEEE. Kerkyra, Corfou, Grèce, p. 666–673 (cité à la page 72).

Annexes

A Régression robuste de plans ou de lignes

1. Initialiser le centroïde $\boldsymbol{\mu}^0$ et les vecteurs \mathbf{E}^0 définissant le plan par leurs estimées au sens des moindres carrés (MC), positionner le numéro d'itération à $t = 1$.

$$\text{— } \boldsymbol{\mu}^0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i$$

- \mathbf{E}^0 sont les vecteurs propres de \mathbf{C}^0 associés à ses deux plus grandes valeurs propres, où :

$$\mathbf{C}^0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^0)(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^0)^\top$$

2. Calculer les résidus : $r_i^t = \|(\boldsymbol{\mu}^{t-1} + \mathbf{E}^{t-1} \mathbf{a}_i^t) - \mathbf{x}_i\|$ avec $\mathbf{a}_i^t = \mathbf{E}^{t-1 \top} (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^{t-1})$.

3. Calculer les variables auxiliaires $b_i^t = \frac{\rho'(r_i^t)}{2r_i^t}$ et leur somme $S^t = \sum_{i=1}^N b_i^t$.

4. Réaliser une estimation au sens des moindres carrés pondérés (MCP) de $\boldsymbol{\mu}^t$ et \mathbf{e}^t

$$\text{— } \boldsymbol{\mu}^t = \frac{1}{S^t} \sum_{i=1}^N b_i^t \mathbf{x}_i$$

- \mathbf{E}^t sont les vecteurs propres de \mathbf{C}^t associés à ses deux plus grandes valeurs propres,

$$\text{avec } \mathbf{C}^t = \frac{1}{S^t} \sum_{i=1}^N b_i^t (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^t)(\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^t)^\top$$

5. Si $\frac{\|\boldsymbol{\mu}^t - \boldsymbol{\mu}^{t-1}\|^2}{\|\boldsymbol{\mu}^{t-1}\|} > \epsilon$ incrémenter t et aller à l'étape 2, sinon $\boldsymbol{\mu}^{MCPI} = \boldsymbol{\mu}^t$ et $\mathbf{e}^{MCPI} = \mathbf{e}^t$.

Cet algorithme peut être adapté très facilement au cas de l'estimation de ligne. Dans ce cas, seul le vecteur directeur de la ligne, \mathbf{e} , est recherché. L'expression du résidu devient : $r_i^t = \|(\boldsymbol{\mu}^{t-1} + a_i^t \mathbf{e}^{t-1}) - \mathbf{x}_i\|$, avec $a_i^t = \mathbf{e}^{t-1 \top} (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}^{t-1})$. L'estimation de la moyenne ne change pas et \mathbf{e} est donné par le vecteur de \mathbf{C} correspondant à sa plus grande valeur propre.

B Ajustement robuste simultané de lignes parallèles

1. Initialiser les centroïdes μ_j^0 et le vecteur directeur e^0 au sens des MC, positionner le numéro d'itération $t = 1$.

$$\text{— } \mu_j^0 = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \mathbf{x}_{ji}$$

- e^0 est le vecteur propre de C^0 correspondant à sa plus grande valeur propre, où :

$$C^0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{B+M} \sum_{i=1}^{N_j} (\mathbf{x}_{ji} - \mu_j)(\mathbf{x}_{ji} - \mu_j)^\top$$

2. Calculer les résidus : $r_{ji}^t = \|(\mu_j^{t-1} + a_{ji}^t e^{t-1}) - \mathbf{x}_{ji}\|$ avec $a_{ji}^t = e^{t-1 \top} (\mathbf{x}_{ji} - \mu_j^{t-1})$.

3. Calculer les variables auxiliaires $b_{ji}^t = \frac{\rho'(r_{ji}^t)}{2r_{ji}^t}$ et leurs sommes $S_j^t = \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t$ et $S^t = \sum_{j=1}^{B+M} S_j^t$.

4. Réaliser une estimation au sens des MCP de μ_j^t et de e^t

$$\text{— } \mu_j^t = \frac{1}{S_j} \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t \mathbf{x}_{ji}$$

- e^t est le vecteur propre de C^t associé à sa plus grande valeur propre, où

$$C^t = \frac{1}{S^t} \sum_{j=1}^{B+M} \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t (\mathbf{x}_{ji} - \mu_j^t)(\mathbf{x}_{ji} - \mu_j^t)^\top$$

5. Si $\frac{\|\mu_j^t - \mu_j^{t-1}\|^2}{\|\mu_j^{t-1}\|} > \epsilon$ incrémenter t et aller à l'étape 2, sinon $\mu_j^{MCPI} = \mu_j^t$ et $e^{MCPI} = e^t$.

C Ajustement robuste simultané de lignes avec *a priori* de distance

1. Initialiser les centroïdes μ_b^0 et μ_m^0 et le vecteur directeur e^0 , positionner le numéro d'itération à $t = 1$.

(a) Estimer les centroïdes $\mu_j^{0'}$ et le vecteur directeur e^0 grâce à l'algorithme d'ajustement robuste simultané de courbes parallèles (cf. Annexe B).

(b) Estimer le centroïdes $\mu_b^{0'}$ de la ligne $\mu_j^{0'}$ où $j=\{1,\dots,B\}$ (cf. Annexe A). Donc, $\mu_b^0 = \mu_b^{0'} + (n^{0\top}(\mu_1^{0'} - \mu_b^{0'}))n^0$ où n^0 est la normale à e^0 .

(c) Calculer $\mu_m^0 = \frac{\mu_{B+1}^{0'} + \mu_{B+2}^{0'}}{2}$. Donc, $\mu_m^0 = \mu_m^{0'} + (n^{0\top}(\mu_1^{0'} - \mu_m^{0'}))n^0$.

(d) Calculer les centroïdes μ_j^0 :

$$- \mu_j^0 = \mu_m^0 + n^0 \sum_{k=1}^j \delta_k \text{ pour } j = \{1, \dots, B\}$$

$$- \mu_{B+1}^0 = \mu_m^0 \text{ et } \mu_{B+2}^0 = \mu_m^0 + n^0 \delta_m$$

2. Calculer les résidus : $r_{ji}^t = \|(\mu_j^{t-1} + a_{ji}^t e^{t-1}) - x_{ji}\|$ avec $a_{ji}^t = e^{t-1\top} (x_{ji} - \mu_j^{t-1})$.

3. Calculer les variables auxiliaires $b_{ji}^t = \frac{\rho'(r_{ji}^t)}{2r_{ji}^t}$ et les sommes $S_b^t = \sum_{j=1}^B \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t$, $S_m^t =$

$$\sum_{j=B+1}^{B+2} \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t \text{ et } S^t = S_b^t + S_m^t.$$

4. Estimer μ_b^t , μ_m^t et e^t au sens des MCP :

— e^t est le vecteur propre de C^0 correspondant à sa plus grande valeur propre, où :

$$C^t = \frac{1}{S^t} \sum_{j=1}^{B+M} \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t (x_{ji} - \mu_j^{t-1})(x_{ji} - \mu_j^{t-1})^\top$$

$$- \mu_b^t = \frac{1}{S_b} \sum_{j=1}^B \sum_{i=1}^{N_j} b_{ji}^t (x_{ji} - n^t \sum_{k=1}^j \delta_k) \text{ pour } j = \{1, \dots, B\}$$

$$- \mu_m^t = \frac{1}{S_m} \left(\sum_{i=1}^{N_{B+1}} b_{(B+1)i}^t x_{(B+1)i} + \left(\sum_{i=1}^{N_{B+2}} b_{(B+2)i}^t (x_{(B+2)i} - n^t \delta_m) \right) \right)$$

5. Déduire les centroïdes μ_j^t de :

$$- \mu_j^t = \mu_m^t + n^t \sum_{k=1}^j \delta_k \text{ pour } j = \{1, \dots, B\}$$

$$- \mu_{B+1}^t = \mu_m^t \text{ et } \mu_{B+2}^t = \mu_m^t + n^t \delta_m$$

6. Si $\frac{\|\mu_j^t - \mu_j^{t-1}\|^2}{\|\mu_j^{t-1}\|} > \epsilon$ incrémenter t et aller à l'étape 2, sinon $\mu_j^{MCPI} = \mu_j^t$ et $e^{MCPI} = e^t$.

Imagerie 3D du « tube entier » des tunnels navigables

Résumé

L'objectif de la thèse est de développer une méthode de modélisation 3D des tunnels canaux en service, afin de les documenter de manière précise. Le levé des structures est effectué en dynamique depuis un bateau, avec un ensemble de caméras au-dessus de l'eau et un sonar pour la partie immergée. La construction du modèle 3D doit combiner des données acquises dans deux milieux différents, en l'absence de signal GPS pour la localisation du système de mesure. L'approche proposée exploite pleinement les capacités du calcul photogrammétrique, à la fois pour construire le modèle 3D de la voûte et pour estimer la trajectoire du bateau, laquelle permet de géoréférencer les profils de points sonar. L'application du procédé en vraie grandeur dans le tunnel de Niderviller a permis d'obtenir un premier modèle 3D. L'analyse de la méthode a mis en jeu une technologie innovante de mesure sonar statique, nécessitant le développement de traitements appropriés. Elle a permis de jauger les capacités du sonar à numériser les canaux, d'évaluer les trajectoires estimées par photogrammétrie et de comparer quantitativement le modèle obtenu à un modèle de référence préalablement construit.

Mots clés : *Numérisation 3D, bathymétrie, sondeur multifaisceaux, photogrammétrie, évaluation, tunnel-canal.*

Abstract

The aim of this thesis is to develop a 3D modeling method for canal-tunnels in service, in order to document them accurately. The survey of the structures is carried out dynamically from a boat, with a set of cameras above the water and a sonar for the submerged part. The construction of the 3D model must combine data acquired in two different environments, in the absence of a GPS signal to locate the measurement system. The proposed approach makes full use of the capabilities of photogrammetric computation, both to build the 3D model of the vault and to estimate the trajectory of the boat, which allows georeferencing of sonar point profiles. The application of the process to field test data acquired in the Niderviller tunnel allowed a first 3D model to be obtained. The analysis of the method involved an innovative static sonar measurement technology, requiring the development of appropriate treatments. It enabled to assess the capacity of the sonar for canal surveying, to evaluate the trajectories estimated using photogrammetry and to compare quantitatively the obtained model with a previously constructed reference model.

Keywords : *3D modeling, bathymetry, multibeam echosounder, photogrammetry, assessment, canal-tunnel.*