



**HAL**  
open science

# Acquisition et reconstruction de données 3D denses sous-marines en eau peu profonde par des robots d'exploration

Loïca Avanthey

► **To cite this version:**

Loïca Avanthey. Acquisition et reconstruction de données 3D denses sous-marines en eau peu profonde par des robots d'exploration. Traitement des images [eess.IV]. Télécom ParisTech, 2016. Français. NNT : 2016ENST0055 . tel-01558888

**HAL Id: tel-01558888**

**<https://pastel.hal.science/tel-01558888>**

Submitted on 10 Jul 2017

**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.



EDITE - ED 130

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

**pour obtenir le grade de docteur délivré par**

**Télécom ParisTech**

**Spécialité « Signal et images »**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Loïca AVANTHEY**

le 3 octobre 2016

**Acquisition et reconstruction de données 3D denses  
sous-marines en eau peu profonde par des robots d'exploration**

Directeur de thèse : **Michel ROUX**

Co-encadrement de la thèse : **Laurent BEAUDOIN**

**Jury**

**Pierre DRAP**, Chargé de recherche / HDR, LSIS (UMR CNRS 7296), Université Aix-Marseille

**Luc JAULIN**, Professeur des Universités, Lab-STICC (UMR CNRS 6285), ENSTA-Bretagne

**Laurent BEAUDOIN**, Docteur, ATIS, ESIEA

**Vincent HUGEL**, Professeur des Universités, COSMER, Université de Toulon

**Simon LACROIX**, Directeur de recherche, LAAS (UPR CNRS 8001), CNRS Toulouse

**Marc PIERROT-DESEILLIGNY**, Directeur de recherche / HDR, LOEMI, IGN

**Michel ROUX**, Maître de conférence, LTCI (UMR CNRS 5141), Télécom ParisTech

**Lorenzo BRIGNONE**, Docteur, PRAO, IFREMER

**Lionel LAPIERRE**, Maître de conférence / HDR, LIRMM (UMR CNRS 5506), Université de Montpellier

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Invité

Invité

**Télécom ParisTech**

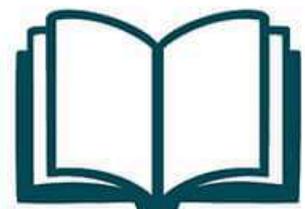
**école de l'Institut Mines Télécom - membre de ParisTech**

46 rue Barrault — 75634 Paris Cedex 13 — Tél. +33 (0)1 45 81 77 77 - www.telecom-paristech.fr



**ACQUISITION ET  
RECONSTRUCTION  
DE DONNÉES 3D  
DENSES  
SOUS-MARINES  
EN EAU PEU PROFONDE  
PAR DES ROBOTS  
D'EXPLORATION**

**Loïca  
Avanthey**



**Thèse de doctorat**



*"The universe is full of magical things  
patiently waiting for our wits to grow sharper."*

---

*A Shadow Passes – Eden Phillpotts*

*« L'univers est rempli d'éléments magiques attendant  
patiemment que nos esprits deviennent plus prompts. »*

---

*Une ombre passe – Eden Phillpotts*



# Remerciements

## Staff e3 Environnement

Je souhaite en premier lieu remercier tout particulièrement mes deux directeurs de thèse, **Michel Roux** et **Laurent Beauoin**. Merci pour votre confiance et pour ce chemin partagé ensemble pendant ces années !

Je remercie la **DGA** d'avoir financé mes travaux et permis la réalisation de cette thèse, ainsi que **Pascale Girault** et **Yannick Jeanne-Rose** qui accompagnent les doctorants. Merci au **CNRS** (délégation Normandie), mon employeur pendant la thèse et particulièrement à **Maud Cordray** pour sa patience dans la gestion de mon dossier parfois un peu compliqué. Je remercie également l'**EDITE**, l'**Institut Mines-Télécom** et le **laboratoire LTCI** de Télécom ParisTech pour m'avoir accueillie en tant que doctorante, le directeur du laboratoire, **Olivier Cappé**, le directeur du département, **Gaël Richard**, le responsable de l'école doctorale, **Bertrand Granado** et le directeur de la formation doctorale, **Alain Sibille**, ainsi que **Florence Besnard** et **Marianna Baziz**, pour leur aide et leur efficacité. Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus lors du montage du dossier.

Je tiens à remercier mes deux rapporteurs, **Pierre Drap** et **Luc Jaulin**, pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à la lecture de ce mémoire. Sans oublier ma petite équipe de relecteurs au fil de l'écriture : **Antoine**, **Benoît D.**, **Franklin**, **Laurent**, **Robert** et tout particulièrement **Benoît L.**, **Vincent G.** et **Vincent V.** Je ne saurais vous remercier assez pour le temps et l'aide que vous m'avez accordés, pour le manuscrit, mais aussi pour les "mindtests", le soutien et les coups de main aux moments importants !

Je remercie également les **membres du jury** de me faire l'honneur d'assister à ma soutenance et d'évaluer mes travaux scientifiques.

Enfin, à tous **mes collègues** et **anciens collègues** d'ici et d'ailleurs – équipes enseignantes, équipes de recherche et équipes administratives : merci. Je ne serais pas aussi passionnée dans mon travail si je n'avais pas accès à cette ouverture d'esprit d'une grande richesse humaine que vous m'offrez jour après jour au gré de nos rencontres.

We are the music makers,  
And we are the dreamers of dreams,  
Wandering by lone sea-breakers,  
And sitting by desolate streams ; –  
World-lovers and world-forsoakers,  
On whom the pale moon gleams :  
Yet we are the movers and shakers  
Of the world for ever, it seems.

With wonderful deathless ditties  
We build up the world's great cities,  
And out of a fabulous story  
We fashion an empire's glory :  
One man with a dream, at pleasure,  
Shall go forth and conquer a crown ;  
And three with a new song's measure  
Can trample an empire down.

We, in the ages lying  
In the buried past of the earth,  
Built Nineveh with our sighing,  
And Babel itself with our mirth ;  
And o'erthrew them with prophesying  
To the old of the new world's worth ;  
For each age is a dream that is dying,  
Or one that is coming to birth.

A breath of our inspiration  
Is the life of each generation ;  
A wondrous thing of our dreaming  
Unearthly, impossible seeming –  
The soldier, the king, and the peasant  
Are working together in one,  
Till our dream shall become their present,  
And their work in the world be done.

They had no vision amazing  
Of the goodly house they are raising ;  
They had no divine foreshowing  
Of the land to which they are going :  
But on one man's soul it bath broken,  
A light that doth not depart ;  
And his look, or a word he bath spoken,  
Wrought flame in another man's heart.



## Enseignement e<sup>3</sup> Pédagogie

Il m'est difficile de concevoir la recherche sans transmission des savoirs, et donc sans interaction avec l'enseignement et la pédagogie. Nous avons été forgés par les valeurs que nous a léguées Maurice Lafargue, fondateur de l'esiea : il nous a appris à mêler la technique et l'humain, la curiosité et l'audace, la passion et la créativité.

Je remercie donc **mes étudiants** à l'ESIEA, l'UPEM et l'EPF pour leur enthousiasme et leur présence stimulatrice : c'est toujours avec un plaisir renouvelé que nous nous attelons à réformer nos cours ou à en créer de nouveaux, ou encore à concevoir des projets toujours plus riches et captivants pour aiguïser vos esprits.

## Sur le terrain

Merci à la **fosse de plongée** du palais des sports Télémaco-Gouin et à la **mairie de la ville de Charenton-le-Pont** de nous permettre de réaliser nos essais.

À tous ceux qui m'ont aidé pour l'acquisition des images tests, et plus particulièrement **Matthieu L.** pour les premières images en mer Rouge, **Michel G.** pour les images d'épaves en Égypte, **Jacky e<sup>3</sup> Françoise** à Marseille et mon **groupe de randonnée** un peu partout où nous emportent nos pérégrinations.

Je souhaite également remercier **Gersende Fort, Janique Régis** et leurs équipes pour leur réactivité et leur appui lors de la préparation administrative des missions terrains, le CNRS pour le financement des déplacements, ainsi que ceux qui nous ont chaleureusement accueillis sur place et aidés sur la logistique : **Anne e<sup>3</sup> Claude, Bernadette e<sup>3</sup> Robert, Ludmilla**, et tout particulièrement **Josette**. Merci à vous tous !

## Famille e<sup>3</sup> Amis

À mes proches, **famille e<sup>3</sup> amis**, vous savez que vous comptez tous beaucoup pour moi. Merci pour votre soutien, vos encouragements, et tout simplement, pour votre présence. Une pensée spéciale pour ma **maman**. Je remercie également mes « **sport teams** » – rando, vélo, aqua, running e<sup>3</sup> roller – qui me permettent de plonger dans le vert et d'aborder d'autres challenges tout aussi passionnants !

## Équipe ATIS

Enfin, à mon équipe, car sans vous, cette aventure n'existerait pas. À **Laurent**, « O Captain ! My Captain ! », merci infiniment, pour tout. À mon binôme, **Antoine**, mais aussi à nos camarades partis vers d'autres horizons, **Vincent G., Vincent V. e<sup>3</sup> Hubert**, ainsi qu'à **Vincent Gu.** et à notre mentor, **Robert**. Même si le laboratoire a fermé ses portes, l'esprit demeure, les rêves sont toujours plus nombreux et l'envie furieuse de les réaliser est plus flamboyante que jamais. Atis Atao.

À tous ceux qui nous aident et nous soutiennent à surmonter les obstacles et à gravir les sommets – collègues, collaborateurs, amis e<sup>3</sup> famille : merci, merci du fond du cœur !

L'aventure continue ! Cap vers de nouvelles destinations pour continuer nos explorations au cœur des Sciences, des Arts et des Techniques.

Vamos Aquecer o Sol !

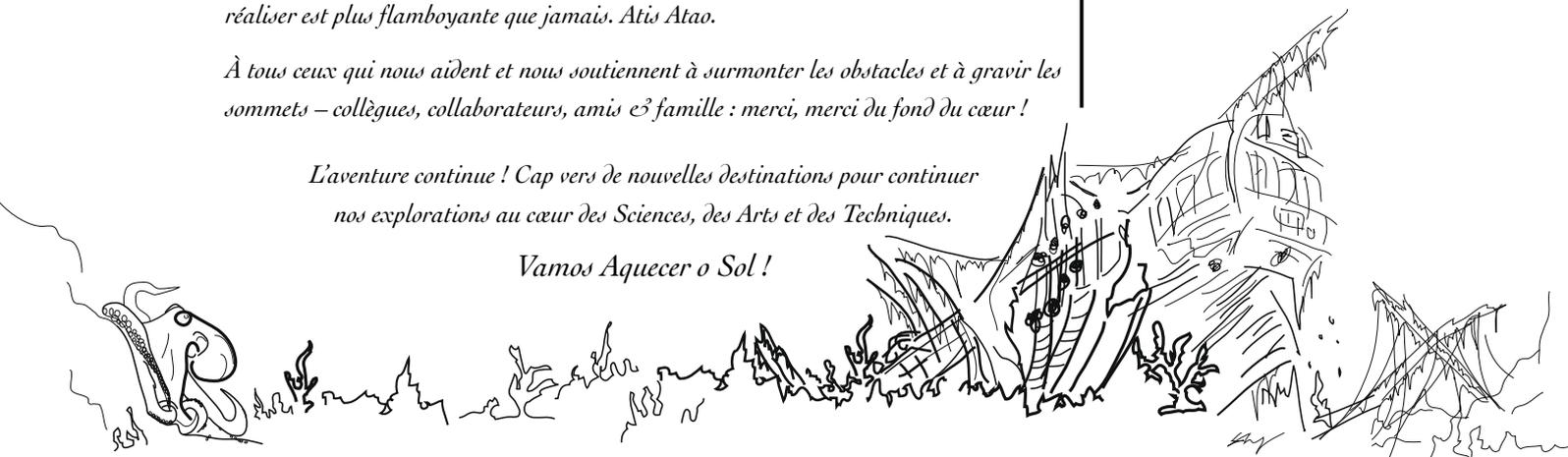
And therefore to-day is thrilling  
With a past day's late fulfilling ;  
And the multitudes are enlisted  
In the faith that their fathers resisted,  
And, scorning the dream of to-morrow,  
Are bringing to pass, as they may,  
In the world, for its joy or its sorrow,  
The dream that was scorned yesterday.

But we, with our dreaming and singing,  
Ceaseless and sorrowless we !  
The glory about us clinging  
Of the glorious futures we see,  
Our souls with high music ringing :  
O men ! it must ever be  
That we dwell, in our dreaming and singing,  
A little apart from ye.

For we are afar with the dawning  
And the suns that are not yet high,  
And out of the infinite morning  
Intrepid you bear us cry—  
How, spite of your human scorning,  
Once more God's future draws nigh,  
And already goes forth the warning  
That ye of the past must die.

Great hail ! we cry to the comers  
From the dazzling unknown shore ;  
Bring us hither your sun and your summers ;  
And renew our world as of yore ;  
You shall teach us your song's new numbers,  
And things that we dreamed not before :  
Yea, in spite of a dreamer who slumbers,  
And a singer who sings no more.

Ode, Music and Moonlight  
Arthur O'Shaughnessy



# Résumé

Notre planète est pour l'essentiel recouverte par les mers et les océans. Or, malgré des enjeux importants, tant dans les domaines scientifiques, qu'écologiques ou industriels, notre connaissance de ces espaces est bien inférieure à celle que nous possédons sur les terres émergées. Le milieu sous-marin est en effet très différent du milieu aérien : il ne laisse filtrer que peu d'information observable d'un point de vue extérieur et s'avère relativement hostile pour l'homme et ses instruments de mesure lorsqu'il s'agit d'y pénétrer.

Dans ce mémoire, nous cherchons à concevoir un système dédié à la cartographie thématique à grande échelle pour obtenir à la demande un nuage de points dense représentatif d'une scène sous-marine ou sub-aquatique par reconstruction tridimensionnelle. Le caractère complexe de ce type de système nous amène à privilégier une approche délibérément transversale. Nous nous intéresserons en particulier aux problématiques posées par l'étude à l'échelle des individus de petites zones en eau peu profonde. Les premières concernent l'acquisition *in situ* efficace de couples stéréoscopiques avec une logistique adaptée à la taille des zones observées : nous proposons pour cela un microsystème agile, peu coûteux et suffisamment automatisé pour fournir des données reproductibles et comparables. Les secondes portent, quant à elles, sur l'extraction fiable de l'information tridimensionnelle à partir des données acquises : nous exposons les algorithmes que nous avons élaborés pour prendre en compte les caractéristiques particulières du milieu aquatique (dynamisme, propagation difficile des ondes électromagnétiques, etc.).

Nous présenterons notamment comment nous utilisons un seuil adaptatif pour pallier la qualité variable des prises de vues, la synchronisation des mesures pour nous abstraire des mouvements liés au milieu, la détection automatique des parties fiables des images pour exclure les zones sans information réelle, une méthode d'étalonnage sous-marin pour faciliter les aspects opérationnels, la conception de microrobots performants pour réduire la logistique de l'acquisition tout en permettant l'automatisation, une méthode pour faciliter le relevé d'informations de vérité terrain, la réorganisation en quasi temps réel de la trajectoire par coupure du graphe de poses pour minimiser les dérives lors du recalage des nuages locaux dans un référentiel commun, ainsi qu'une estimation des zones de recouvrement entre les couples pour prévenir la création de données redondantes.

**Mots-clefs** : environnement sous-marin, microrobots d'exploration, nuage de points 3D dense, stéréoreconstruction, acquisition *in situ*

*Les médias produits pour ce mémoire par L. Avantbey, L. Beaudoin et A. Gademer [© L. Avantbey et al.] sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International. Les modifications ne sont pas autorisées pour les photographies [CC BY-NC-ND], les schémas doivent être partagés selon les mêmes conditions [CC BY-NC-ND].*



# Abstract

 ur planet is mostly covered by seas and oceans. However, despite the significance of what is at stake – in science, ecology or industry – our knowledge of these spaces is far more restricted than that of land surface. The underwater environment is indeed very different from the aerial environment: little information is accessible from the outside and within is hostile to humans and their measuring instruments.

In this thesis, we seek to develop a system dedicated to precise thematic mapping to obtain a dense point cloud of an underwater area on demand by using three-dimensional reconstruction. The complex nature of this type of system leads us to favor a multidisciplinary approach. We will examine in particular the issues raised by studying small shallow water areas on the scale of individual objects. The first problems concern the effective *in situ* acquisition of stereo pairs with logistics adapted to the sizes of the observed areas: for this, we propose an agile, affordable microsystem which is sufficiently automated to provide reproducible and comparable data. The second set of problems relates to the reliable extraction of three-dimensional information from the acquired data: we outline the algorithms we have developed to take into account the particular characteristics of the aquatic environment (such as its dynamics or its light absorption).

We will describe our contributions addressing different sections of the acquisition and processing system, namely: using an adaptive threshold to compensate for the variable quality of the acquisitions; synchronizing measurements to compensate for the dynamism of the environment; automatically detecting reliable parts in the images to exclude areas without real information; developing a method of underwater calibration to facilitate the operational process; implementing a design of a microrobot to reduce the amount of logistics involved while allowing automation; developing a method to facilitate ground truth generation; reorganizing the trajectory in near real time by cutting the poses graph to minimize the drift while registering local clouds in a common frame; and lastly, estimating the overlap areas between the stereo pairs to prevent the generation of redundant data.

**Keywords:** underwater environment, exploration microrobots, 3D dense point cloud, stereoreconstruction, *in situ* acquisition

*The media products for this thesis by L. Avantbey, L. Beaudoin et A. Gademmer [© L. Avantbey et al.] are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. Derivatives are not allowed for photographs [©(i)=], diagrams must be distributed under the same conditions [©(i)].*



# Table des matières

<b>Remerciements</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>Résumé</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>1 Introduction</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1 Problématique générale . . . . .	13
1.2 Organisation du mémoire et contributions . . . . .	16
<b>2 Contexte</b> . . . . .	<b>17</b>
2.1 Caractéristiques des milieux sous-marins et subaquatiques . . . . .	18
2.2 Robots mobiles pour la télédétection rapprochée . . . . .	33
2.3 Moyens d'acquisition d'information tridimensionnelle . . . . .	46
<b>3 Nuages de points sous-marins</b> . . . . .	<b>55</b>
3.1 Stéréoreconstruction sous-marine : problématiques . . . . .	55
3.2 État de l'art des solutions existantes et contributions . . . . .	62
3.3 Contributions et résultats . . . . .	93
<b>4 Mise en œuvre et analyse</b> . . . . .	<b>143</b>
<b>5 Conclusion et perspectives</b> . . . . .	<b>159</b>
<b>Annexes</b> . . . . .	<b>169</b>
A Publications, valorisation & pédagogie . . . . .	169
B Récits de mission . . . . .	175
C Historique des séances piscine . . . . .	221
<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>237</b>



# Introduction

*"[...] altho' I had proved there was no continent, there remained nevertheless room for very large islands in places wholly unexplored, and many of those which were formerly discovered, are but imperfectly explored and their situation as imperfectly known."*

Second voyage, 6th February 1774, *Journal of Captain Cook's voyage round the world in HMS Resolution*

*« [...] bien que j'eusse prouvé qu'il n'y avait pas de continent situé très loin au sud, il restait cependant de la place pour de très grandes îles dans ces régions entièrement inconnues. En outre, beaucoup de celles qui étaient déjà découvertes étaient imparfaitement explorées et leurs situations imparfaitement connues. »*

Deuxième voyage, 6 Février 1774, *Relations de voyages autour du monde* – James Cook

## 1.1 Problématique générale

La cartographie nous permet de mémoriser des informations spatialisées propres à un environnement et à une époque sur un support papier ou numérique et d'en proposer une représentation synthétique. Les cartes élaborées peuvent alors être analysées par des experts et même comparées entre elles afin d'extraire de nouvelles informations. L'objectif de ces cartes est de mieux comprendre et appréhender l'environnement étudié ainsi que les interactions complexes qui peuvent s'y dérouler.

Les cartes accompagnent l'humanité tout au long de son développement : déjà pratiquées avant l'Antiquité, encouragées par l'essor du commerce, les grandes explorations et les avancées scientifiques, elles ont été rendues nécessaires par les conquêtes, les guerres et la politique [Woodward *et al.*, 1987-2007]. Essentiellement cadastrales<sup>1</sup> au départ, elles ont progressivement intégré des informations de plus en plus nombreuses et variées pour devenir de véritables systèmes d'informations spatialisées, au cœur de la géomatique actuelle. Elles bénéficient aujourd'hui d'une part très importante dans la prise de décisions stratégiques dans de multiples disciplines [Jarnac, 2008] dont la défense, la sécurité, l'industrie, l'économie et les sciences naturelles, humaines et sociales.

Pour des applications comme l'étude et la préservation des écosystèmes, la surveillance de secteurs, l'analyse de zones sinistrées ou encore le contrôle d'ouvrages d'art, la quantité de données spatialisées à recueillir pour créer des cartes est considérable pour couvrir la surface voulue avec la précision requise. En particulier,

1. Qui figurent les limites géographiques des territoires.

l'aspect dynamique et changeant des zones naturelles et plus encore du milieu aquatique en eau peu profonde – environnement dans lequel s'inscrivent les travaux de cette thèse – nécessite souvent un suivi dans le temps ; autrement dit, la cartographie doit être refaite ou actualisée régulièrement.

S'il est effectué manuellement, le procédé de relevé d'information est très coûteux en temps et en ressources. Pour donner une idée au lecteur, jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, la technique du plomb de sonde était pratiquée pour effectuer des relevés ponctuels de la profondeur : un plomb attaché à une corde était lancé à l'eau depuis le navire au ralenti ; la cessation soudaine de la tension de la ligne indiquait alors que le fond avait été touché. La profondeur pouvait être lue sur la longueur de corde et la nature du fond marin déduite des sédiments collés à la sonde. Nous noterons de plus que les relevés manuels ne sont pas toujours réalisables. En effet, leur faisabilité dépend notamment de l'accessibilité des terrains d'études. Les conditions hostiles de l'environnement sous-marin que nous aborderons dans ce mémoire (pression, corrosion, respiration impossible, visibilité réduite ou nulle, communication et localisation difficiles) illustrent parfaitement la difficulté d'accès à l'homme pour effectuer les relevés terrain en plongée.

Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, en complément ou à la place de la cartographie manuelle, il est possible de recourir, lorsque c'est envisageable, à des techniques de télédétection qui permettent l'acquisition d'informations caractéristiques d'un milieu (réponse spectrale, rugosité, relief, etc.) par l'intermédiaire d'un instrument de mesure sans contact. À partir de ces informations, on reconstruit une image de la scène au moment de l'acquisition. En automatisant le processus de relevé et en observant de loin (télédétection spatiale ou aérienne, par exemple), on écarte une partie des contraintes posées par les relevés terrains manuels (temps et ressources humaines). Autre avantage, le caractère mécanique de la télédétection assure de surcroît une certaine forme d'objectivité de la mesure. La cartographie, à proprement parler, est effectuée *a posteriori* sur la base de l'image brute. En sauvegardant une copie numérique de cette image originale et en reportant l'extraction des différents paramètres (soit manuellement, soit par des algorithmes) à une phase ultérieure, on évite le caractère volatile et subjectif de la cartographie manuelle. On autorise ainsi une réanalyse ou une analyse comparée des données brutes dans le temps ou encore une automatisation de certains processus.

En revanche, l'inconvénient majeur de la télédétection est qu'elle se base intrinsèquement sur la mesure de propriétés indirectes des phénomènes observés, ce qui implique donc un processus de certification des résultats. Cette certification est généralement obtenue à travers une identification visuelle par les experts d'un échantillon de données acquis sur le terrain et qui sert de *vérité terrain*. À titre d'exemple, la signature spectrale (courbe) d'une mesure prise depuis l'espace peut nous informer sur la vraisemblance de la présence de végétation sur la zone étudiée ou d'un feu de forêt ou encore d'une éruption volcanique, mais pour pouvoir l'affirmer il est nécessaire d'attester visuellement de la présence d'arbres, de flammes, de lave ou même de cendres. Or l'obtention de cette *vérité terrain* est soumise aux mêmes contraintes que la cartographie manuelle. Cependant, les éléments que nous venons de citer en exemples et qui sont inaccessibles depuis l'espace sont en revanche suffisamment étendus pour être observés directement depuis un avion, ce qui permettrait d'automatiser leur certification. Mais qu'en est-il si nous étudions des phénomènes plus petits encore ? Le problème d'identification en télédétection est directement lié à l'échelle d'observation. Ainsi, la clef pour conserver les avantages de la télédétection (automatisation, pérennité, objectivité, etc.) et des relevés terrains (certification) est de réaliser des acquisitions de télédétection à l'échelle des individus : cette méthode s'appelle la « Réalité Terrain Étendue (RTE) » [Gademer *et al.*, 2013].

Pour ce faire, il est nécessaire de réduire grandement la distance entre la scène observée et le capteur. L'utilisation de robots d'exploration évoluant directement dans ou à proximité du milieu à étudier (télédétection rapprochée) est alors particulièrement adaptée à ce type de cartographie haute résolution. Dans le cadre des missions de cartographie évoquées, les « 3 D » ("*three Ds*" : "*Dull, Dirty and Dangerous*" – ennuyeux, sale et dangereux), caractéristiques auxquelles répondent ces robots, se retrouvent dans les vastes étendues à observer minutieusement et dans la répétition temporelle, ainsi que dans le besoin de cartographie des milieux difficiles

d'accès comme le milieu sous-marin ou le dessous de la canopée, ou dangereux comme les périmètres toxiques. Jusqu'ici, le frein à cette utilisation était d'ordre technologique et pratique : taille inadaptée à des missions opérationnelles, automatisation insuffisante, coût élevé, etc. Mais les avancées technologiques des dix dernières années permettent aujourd'hui une mise en oeuvre réaliste [Gademer, 2010 ; Jensen *et al.*, 2007] et les approches collaboratives de la cartographie par un ensemble de robots, sujet de recherche actuellement très actif, permettraient encore d'étendre les capacités de couverture de zones plus larges en un temps réduit et de manière de plus en plus automatisée [Grocholsky *et al.*, 2004 ; Bourgeois et McDowell, 2001 ; Parunak *et al.*, 2003].

Traditionnellement, la cartographie est basée sur la projection des informations métiers spatialisées sur une surface bidimensionnelle (la carte). Cependant, l'arrivée de nouvelles méthodes d'acquisition facilitant l'enregistrement de l'information en multidimensions (2,5D, 3D, etc.) a permis de dépasser cette représentation plane au profit de visualisations qui sont souvent plus naturelles, plus denses, sans pour autant être surchargées d'informations. Il est même devenu possible de fournir des vues complètement dynamiques en tirant parti des techniques de réalité virtuelle. Cela permet d'extraire des informations différentes et complémentaires de celles issues des représentations bidimensionnelles. Par exemple, le jeune auteur de la revue Nature, Neil Ibata, et l'équipe d'astrophysiciens de son père n'ont remarqué l'alignement sur un plan des galaxies naines en orbite autour de la galaxie Andromède qu'après avoir modélisé leurs données en trois dimensions [Ibata *et al.*, 2013]. On s'intéresse donc aujourd'hui de plus en plus à l'acquisition ou à l'extraction de données tridimensionnelles et surtout aux données tridimensionnelles *denses haute résolution*. Ce type de cartographie est à présent rendu possible par la multiplication de capteurs dédiés de bonne qualité, la réduction globale de leur coût, les performances améliorées de calculs et de stockage de nos unités de traitement ainsi que le développement de la *Vision par Ordinateur*.

La cartographie tridimensionnelle sous-marine et subaquatique haute résolution présente un intérêt tout particulier pour de nombreux travaux scientifiques, notamment en zone littorale. Cependant, malgré des enjeux importants (défense et sécurité [Corfield et Hillenbrand, 2003], industrie [Danson, 2003], environnement ou archéologie [Warren *et al.*, 2007]), les fonds marins demeurent aujourd'hui pour une grande partie bien moins connus que les surfaces planétaires.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons alors à la problématique suivante : *Comment obtenir une information tridimensionnelle dense, haute résolution et métrique de l'ensemble d'une scène sous-marine ?* Notre objectif à moyen terme est de concevoir un système dédié à la cartographie thématique à grande échelle de petites zones d'études sous-marines et subaquatiques peu profondes. Destiné à être employé par des thématiciens, le système conçu doit être léger, agile, peu coûteux et facilement répliquable pour répondre au mieux aux problématiques terrain de ce type de zones et être suffisamment automatisé pour pouvoir produire à la demande des données comparables et reproductibles. Nous invitons à présent le lecteur à découvrir ce sujet plus en profondeur.



## 1.2 Organisation du mémoire et contributions

**C**e présent mémoire porte sur l'acquisition, la reconstruction et le mosaïquage de données tridimensionnelles denses sous-marines acquises par des robots hétérogènes. Il s'articule autour de cinq chapitres, organisés de la manière suivante :

- Le **chapitre 1** introduit la problématique générale à ces travaux, puis présente l'organisation du mémoire et résume les contributions originales que nous proposons.
- Le **chapitre 2** expose le contexte afin de mieux appréhender les trois domaines qui entourent ces travaux : l'eau, les robots et les mesures tridimensionnelles. La première partie porte sur les caractéristiques particulières des milieux sous-marins et subaquatiques en comparaison à l'air où s'effectuent habituellement les études. La deuxième porte sur la télédétection rapprochée et sur les outils dédiés qui permettent d'acquérir de l'information très haute résolution ainsi que leurs particularités. Enfin, la troisième partie traite des méthodes d'acquisition de données tridimensionnelles et de leur capacité à être utilisées dans le milieu aquatique.
- Le **chapitre 3** nous fait entrer au cœur de notre sujet : la production de nuages de points tridimensionnels denses sous-marins. Nous y expliquons tout d'abord de manière plus approfondie le concept de reconstruction tridimensionnelle pour ensuite mettre en lumière les problématiques particulières qui y sont liées lorsque ce travail a lieu dans le milieu sous-marin. Puis nous présentons un état de l'art sur la manière dont la communauté scientifique a traité ces problématiques et nous introduisons nos propres contributions que nous détaillons dans la dernière partie. Nous avons fait le choix d'aborder les différents problèmes par une approche transverse sur toute la chaîne d'acquisition et de traitement : petits robots peu onéreux adaptés à des zones d'étude à faible fond, méthodologie opérationnelle pour faciliter l'étalonnage sous-marin des capteurs, synchronisation des mesures pour s'abstraire du dynamisme du milieu, focalisation automatique et adaptative sur les objets de la scène pour écarter les zones sans information et conserver un niveau de qualité quelques soient les conditions d'acquisition, réorganisation en quasi temps réel de la trajectoire par coupure du graphe de poses pour minimiser les dérives lors du recalage des nuages locaux dans un référentiel commun et estimation des zones de recouvrement entre les couples pour prévenir la création de données redondantes.
- Le **chapitre 4** est, quant à lui, consacré à la mise en oeuvre et expose les résultats obtenus lors des missions terrains que nous avons organisées pour mettre à l'épreuve de la réalité nos propositions.
- Enfin, le **chapitre 5** conclut sur ce mémoire et place en perspective les contributions exposées en suggérant des axes directifs pour de futurs travaux.

Quant aux annexes, elles sont au nombre de trois. La première, annexe **A**, établit la liste des valorisations scientifiques et pédagogiques du travail effectué. Les deux autres, annexes **B** et **C**, proposent à titre informatif les récits des missions terrains rédigés au fil de l'eau et un historique des séances de test en fosse de plongée afin de faire partager différemment au lecteur l'expérience acquise à travers un déroulement temporel des événements et des avancées.



## Chapitre 2

### Contexte

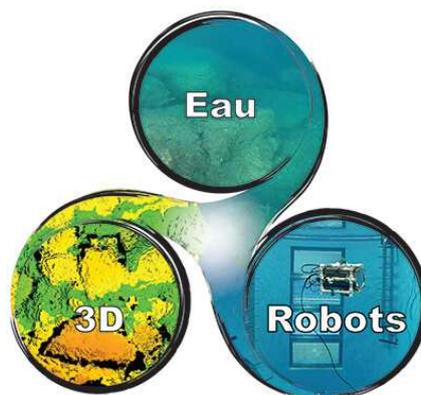
*« Océan, que vauz-tu dans l'infini du monde ?  
Toi, si large à nos yeux enchaînés sur tes bords,  
Mais étroit pour notre âme aux rebelles essors,  
Qui, du haut des soleils te mesure et te sonde ; »*

À l'océan (extraits), *Les vaines tendresses*  
René-François Sully Prudhomme

#### *À la confluence de trois mondes*

Les travaux de cette thèse se situent à la confluence de trois mondes : les milieux sous-marins et sub-aquatiques, les plateformes mobiles de télédétection rapprochée (robots) et les méthodes d'acquisition de données tridimensionnelles. Dans ce chapitre, nous proposons au lecteur un tour d'horizon lui permettant de mieux appréhender ces trois domaines et leurs enjeux avant d'aborder le cœur de notre sujet.

Nous présenterons donc tout d'abord l'environnement aquatique et nous insisterons particulièrement sur les spécificités qui le distinguent du milieu aérien ainsi que sur les implications qui en résultent. Nous discuterons ensuite des plateformes utilisées en télédétection rapprochée, de leurs différents niveaux d'automatisation et de la place de leur segment sur le marché par rapport aux autres outils disponibles aujourd'hui ou dans un avenir proche. Enfin, nous passerons en revue les méthodes d'acquisition de données tridimensionnelles en notant particulièrement celles pouvant être employées dans le milieu sous-marin.





**Figure 2.1** – Ces photographies de la faune et de la flore des paysages sous-marins et subaquatiques, prises entre 50 cm et 25 m de profondeur avec une GoPro, permettent de donner une idée des mouvements présents dans le milieu. De gauche à droite et de haut en bas : Calanques de Sormiou (janvier 2011), Cap de Nice (août 2013), Mer Rouge (décembre 2011) et Plage Bleue de Valenton (juin 2013) [CC BY-NC L. Avantbey et al.].

## 2.1 Caractéristiques des milieux sous-marins et subaquatiques

Les milieux sous-marins (mers & océans) et subaquatiques (ensemble des eaux intérieures) sont des milieux très différents du milieu aérien qui nous entoure et dans lequel nous avons l'habitude de travailler et d'effectuer des mesures. De la même manière que les relations entre la pression, le volume et la température sont importantes dans la compréhension de l'atmosphère, nous verrons que les milieux sous-marins et subaquatiques possèdent leur équivalent : pression, salinité et température. Nous abordons en détail dans cette section les différents éléments qui caractérisent ces milieux difficiles d'accès, ainsi que les conséquences majeures qui en résultent sur les domaines qui nous intéressent comme la vision ou l'immersion de matériel mécanique et électronique.

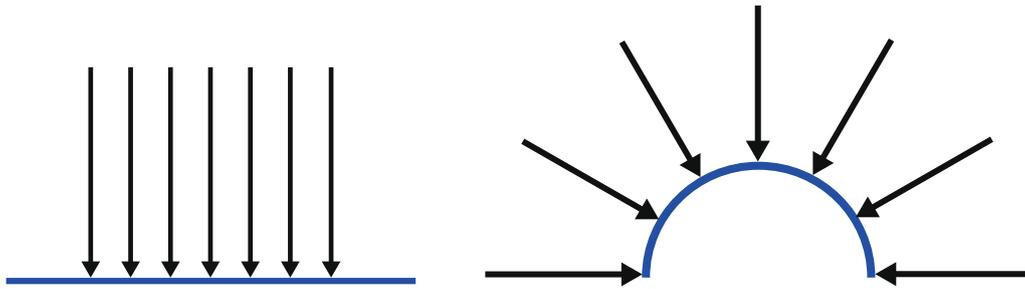
### 2.1.1 Des milieux naturels

Les champs d'études que nous abordons ici sont aussi vastes que divers. En nous restreignant aux océans et aux mers – qui représentent 90 % du réservoir d'eau sur terre –, ils recouvrent à eux seuls 70 % de la surface de la planète [Christ et Wernli, 2008]. L'étendue des zones à couvrir est donc colossale et leur exploration très parcellaire.

Par ailleurs, les milieux sous-marins et subaquatiques sont avant tout des milieux naturels. Complexes et peu structurés, ils ont la particularité d'être en permanence en mouvement : houle, vagues, courants, marées, etc. Et quand bien même ces phénomènes sont absents, la nature non rigide de ces milieux déjoue toute immobilité : « *Mobilis in Mobili*<sup>1</sup> », écrivait Jules Verne dans son roman *Vingt mille lieues sous les mers*.

Il est donc impossible d'y rester parfaitement stationnaire, à moins de se poser au fond et de s'y ancrer solidement. L'observateur sera donc constamment en mouvement, mais la scène étudiée le sera également. En

1. Maxime latine, devise du Nautilus et du Capitaine Némoto dans *Vingt mille lieues sous les mers* de Jules Vernes, corrigée par la suite en *Mobilis in Mobili* dans la nouvelle édition et dans le roman suivant, *L'Île mystérieuse*.



**Figure 2.2** – Forces orientées résultantes de la pression [© L. Avantbey et al.]. À gauche, sur une surface plane, les forces se cumulent, car elles sont toutes dans le même sens. À droite, sur une surface courbe, les forces se répartissent.

effet, la faune et la flore font partie intégrante du paysage. Poissons, crustacés, anémones, algues, etc. : toutes ces espèces viendront, elles aussi, ajouter de la dynamique à cet environnement (figure 2.1 page 18).

Or, pour des raisons de précision, de nombreuses mesures nécessitent qu'il n'y ait pas de déplacement durant l'acquisition, ou tout du moins que l'ensemble des déplacements (du sujet d'étude comme de l'observateur) soit parfaitement connu pour pouvoir rectifier les données *a posteriori*. Il est difficile d'évaluer les mouvements intrinsèques aux milieux (faune, flore, etc.), car pour cela il faudrait les mesurer avec précision, ce qui décrit alors une situation paradoxale. Quant aux mouvements de l'observateur en lui-même, nous évoquerons plus en détail dans la section 2.1.4 page 25 les difficultés inhérentes à la localisation dans le milieu aquatique.

## 2.1.2 Des milieux plus denses que l'air

La densité joue un rôle important dans la caractérisation d'un milieu, car cette grandeur va influencer, de conserve avec la température, un très grand nombre de propriétés physiques. La densité désigne le rapport entre la masse volumique d'un corps (sa masse considérant son volume) et celle d'un corps de référence. L'eau pure<sup>2</sup> constitue la référence pour les liquides. Si nous la comparons à la référence des gaz, l'air<sup>3</sup>, nous pouvons extrapoler que, de manière globale, le milieu aquatique est environ 800 fois plus dense que l'air.

Pour un milieu aqueux, la densité augmente lorsque la température diminue, jusqu'à atteindre un certain seuil. Elle varie également en fonction des éléments qui y sont dissous et de leur concentration : matière organique, matière minérale (notamment du sel) et gaz (essentiellement atmosphériques).

La densité va introduire deux propriétés fondamentales qui ne pourront pas être négligées en milieu sous-marin ou subaquatique : la pression et la poussée d'Archimède [Rives et al., 1978]. La première, formulée à partir des travaux de Pascal, stipule que « tout objet immergé subit, en chaque point de sa surface, une force orthogonale égale au poids de la colonne d'eau qui le surmonte ». La colonne d'eau grandissant avec la profondeur, plus l'objet est immergé profondément plus les forces qu'il subit sont importantes. Une colonne d'eau de dix mètres de hauteur et d'un centimètre carré de base représente un poids d'environ un kilogramme. Tous les dix mètres de profondeur, chaque centimètre carré de surface supportera donc un kilogramme supplémentaire. Ainsi sur le plancher des océans, le poids soutenu par un centimètre carré s'élève jusqu'à 300 kilogrammes et il peut atteindre une tonne au fond des fosses océaniques<sup>4</sup>. Ces forces résultent de la grandeur isotrope communément appelée *pression hydrostatique*<sup>5</sup>, qui s'exprime en bars. Nous noterons qu'un bar est approximativement équivalent à un kilogramme par centimètre carré.

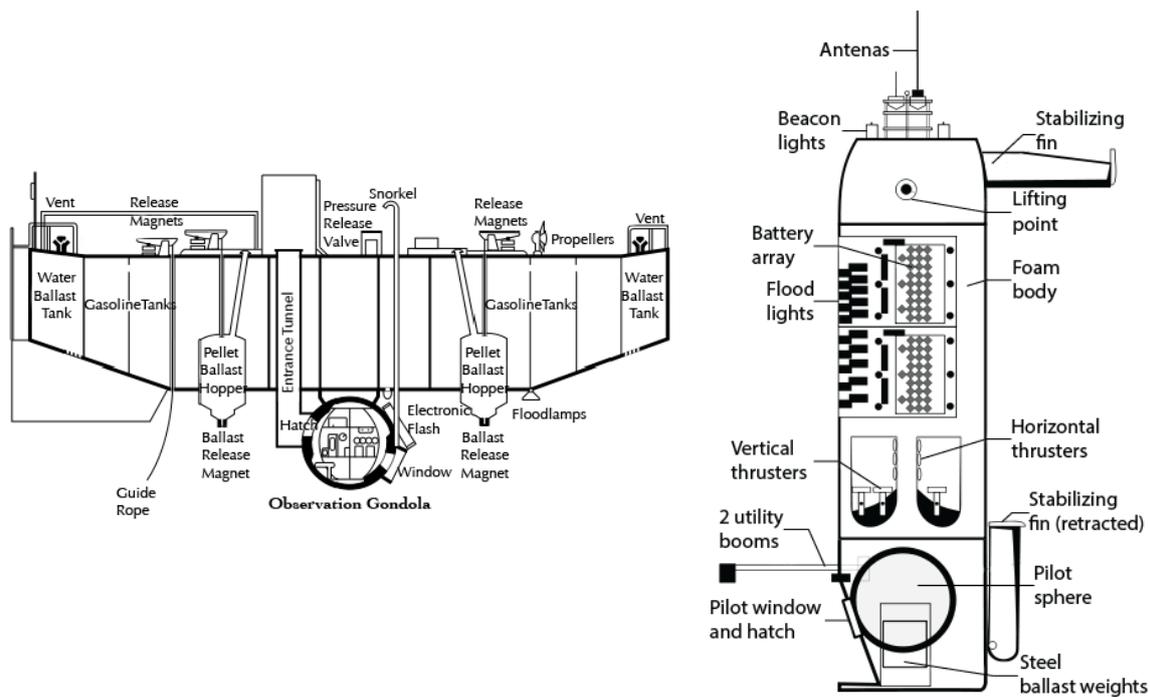
La pression est l'un des facteurs majeurs contribuant à rendre le milieu hostile. Lors d'une exploration subaquatique avec un scaphandre autonome, les plongeurs respirent de l'air à la pression ambiante à laquelle ils

2. Référence des liquides : eau pure à 3,9°C dans des conditions normales de pression (1 atmosphère).

3. Référence des gaz : air à la surface de la mer à 0°C.

4. La profondeur moyenne des océans est de 3 800 mètres, le point le plus profond mesuré se situe à 11 020 mètres dans la fosse des Mariannes. À titre de comparaison, le sommet terrestre le plus haut du monde, l'Everest, s'élève à 8 848 mètres d'altitude.

5. Pour obtenir la valeur complète de ces forces, il faut ajouter à la pression hydrostatique la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface de l'eau.

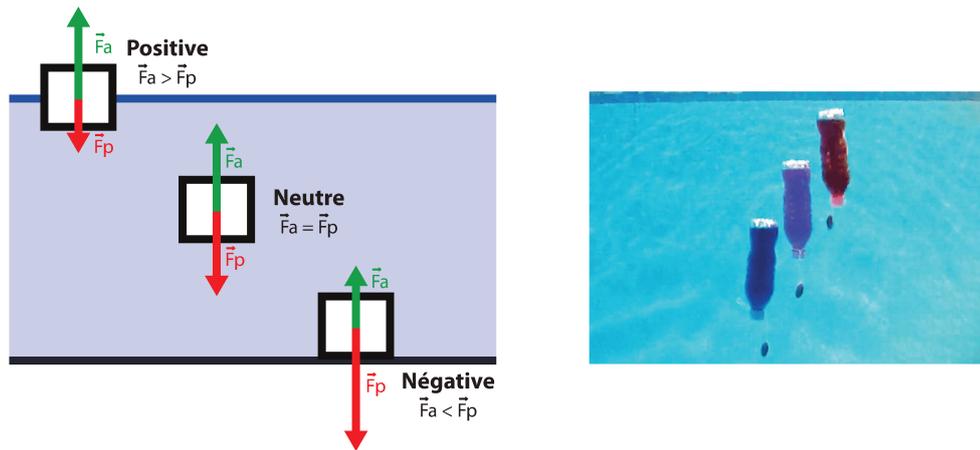


**Figure 2.3** – Croquis des deux sous-marins habités qui sont descendus au fond de la fosse des Mariannes, à proximité du point le plus profond : le Challenger Deep. À gauche le bathyscaphe Trieste (1960) [© U.S. Naval Historical Center]. À droite le Deepsea Challenger DCV1 (2012) [© Zuckerberg]. Les compartiments étanches des deux véhicules empruntent la forme d'une sphère pour résister à la pression immense régnant au fond de la fosse.

évoluent. À la remontée en surface, les plongeurs doivent alors observer des paliers pour laisser suffisamment de temps au gaz dissous ou comprimé dans le sang de s'évacuer par la respiration afin de ne pas subir de lésions irréversibles. Les paliers sont calculés en fonction des temps d'immersion et de la profondeur maximale atteinte. Nous pouvons noter qu'une plongée humaine à air comprimé est déjà considérée comme profonde à partir de 40 mètres de profondeur. Les scaphandres rigides, matériel très spécialisé dont il n'existe qu'une poignée d'exemplaires au monde, permettent aujourd'hui à des plongeurs très expérimentés d'atteindre des profondeurs jusqu'à 200-300 mètres sous la surface à pression atmosphérique. Dans tous les cas, en attendant l'avènement de stations sous-marines permanentes, les temps d'exploration sont très réduits.

Les objets immergés ne sont pas non plus épargnés par ces forces mécaniques considérables. Lorsqu'ils contiennent un volume d'air formant une enceinte étanche pour les êtres humains ou le matériel électronique, il est nécessaire d'utiliser des matériaux résistants et d'ajuster les épaisseurs des parois, car les différences de pression de part et d'autre de ces dernières peuvent provoquer des ruptures. Lorsque la pression est élevée à l'extérieur, la moindre brèche entraîne inéluctablement et presque instantanément la destruction de l'enceinte. C'est pour ces raisons que les surfaces incurvées sont préférées aux surfaces planes : comme illustré par la figure 2.2 page 19, les forces sont alors réparties plutôt que cumulées et la résistance globale du matériau est donc plus élevée. Ainsi, les quatre sous-marins (habités ou téléguidés) qui sont par exemple descendus dans la fosse des Mariannes empruntent tous la forme d'une sphère pour leurs enceintes étanches comme nous pouvons le constater sur les croquis 2.3 page 20.

Le système d'étanchéité de ces enceintes doit être robuste dans la durée. En effet, la pression va pousser l'eau à s'infiltrer dans le compartiment étanche par la moindre faille ou faiblesse. L'étanchéité est une affaire de temps (heures, semaines, années, etc.) liée à la vitesse d'usure naturelle ou sous contrainte des matériaux, ou de leur déformation sous une pression donnée. Ainsi, un objet immergé dans cinquante centimètres d'eau qui reste étanche pendant plusieurs dizaines d'heures pourrait présenter une fuite non négligeable au bout de quelques minutes à seulement quinze mètres de profondeur.



**Figure 2.4** – À gauche, schéma illustrant l'application de la poussée d'Archimède à la flottabilité des objets immergés ou partiellement immergés dans un fluide [© L. Avantbey et al.]. À droite photographie illustrant ces différents niveaux de flottabilité [© L. Avantbey et al.]. La bouteille bleue contient plus de liquide que les autres, et donc elle coule. La bouteille violette est un peu plus légère, elle est neutre et se maintient entre deux eaux. Quant à la bouteille rouge, plus légère encore, elle flotte et remonte vers la surface.

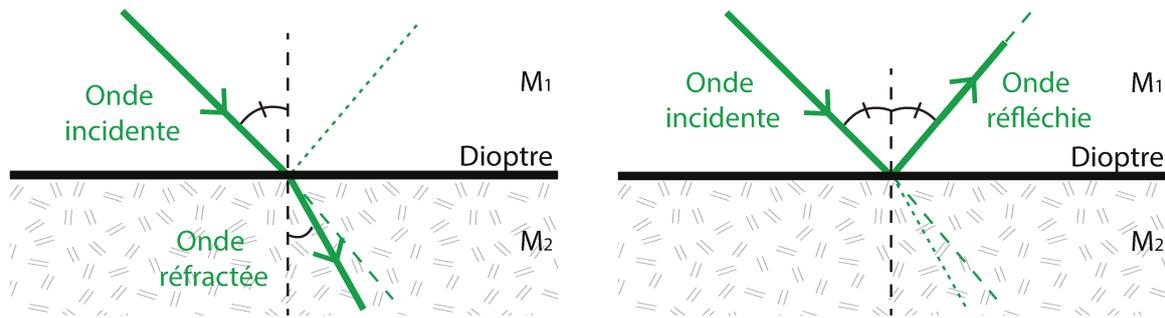
Enfin, même si les matériaux choisis ne sont pas employés à former une enceinte étanche, mais sont à l'inverse destinés à une utilisation en totale immersion (bras mécanique ou autres outils par exemple), il faut malgré tout veiller à ce que leur composition ne renferme pas de l'air (matériaux dits compressibles), sans quoi, arrivés à une certaine profondeur, ils se déformeraient et s'écraseraient sur eux-mêmes, entraînant ainsi leur destruction.

Quant à la seconde propriété introduite par la densité du milieu, elle découle de la première et s'énonce ainsi : « tout objet plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé ». Elle est connue sous le nom de *Poussée d'Archimède* et résulte du différentiel de pression entre la partie haute et la partie basse de l'objet.

En conséquence, le poids d'un objet immergé est égal à son poids dans l'air, diminué du poids de son volume en eau. Ainsi, un objet présentant un volume d'un litre et pesant deux kilogrammes, ne pèsera plus qu'un kilogramme environ lorsqu'il sera placé dans l'eau. Selon la valeur de la poussée, le corps coule, se maintient en équilibre dans le liquide, ou flotte, comme illustré à la figure 2.4 page 21. Pour passer d'un état à l'autre lorsque les propriétés du milieu restent inchangées, il suffit d'ajuster la quantité ou la position des éléments qui font office de flotteurs (moins denses) et de lests (plus denses). C'est sur ce principe que repose le système de ballast des sous-marins habités. L'état d'équilibre sera souvent recherché dans cet ajustement, car c'est le plus économique. En effet, il minimise les efforts pour se maintenir à une profondeur donnée. Pour ce qui est des objets robotisés non habités, il sera généralement préféré une flottabilité légèrement positive. Ainsi, en cas de problème, ils tendront à remonter à la surface, même sans motorisation.

Enfin, bien que le milieu soit plus dense que l'air, les ondes sonores, qui sont des ondes de compression-décompression, n'en sont pas moins véloces. En effet, un autre facteur entre en jeu et son rôle sera déterminant : il s'agit de l'élasticité du milieu [Payne, 2006 ; Chen et Lee, 2012]. L'élasticité décrit l'aptitude des molécules à revenir à leur position d'équilibre très rapidement après avoir été perturbées. Plus cette vitesse est élevée, plus la propagation de proche en proche de l'énergie accélère. L'effet d'inertie introduit par la quantité d'atomes plus élevée du milieu<sup>6</sup> sera alors négligé devant ce phénomène. Ainsi, les ondes sonores verront leur vitesse multipliée par un facteur supérieur à 4 dans le milieu aquatique.

6. La nature polaire des molécules d'eau les rend propices à former des liaisons hydrogènes, ce qui explique le nombre plus élevé de molécules présentes dans un volume donné.



**Figure 2.5** – Illustrations des phénomènes de réfraction (à gauche) et de réflexion (à droite) au niveau d'un dioptré (interface entre deux milieux de natures différentes) [© L. Avantbey et al.]. La réfraction désigne le changement de direction de l'énergie traversante provoqué par la variation de vitesse de l'onde lorsque celle-ci entre dans le nouveau milieu. Quant à la réflexion, il s'agit d'une réémission d'une partie de l'énergie dans le milieu dont elle provient.

Des études ont montré que les ondes sonores à basse fréquence générées par certaines espèces de baleines pouvaient traverser des bassins océaniques lorsqu'elles empruntent le tunnel acoustique naturel situé entre 800 et 1 000 mètres de profondeur<sup>7</sup> et leur permettaient ainsi de communiquer à des distances de plusieurs milliers de kilomètres [Costa, 1993 ; Tyack et Clark, 2000]. D'autre part, de nombreux cétacés, en l'absence de visibilité, utilisent les ondes sonores pour percevoir leur environnement (échodistance) et leur position (écholocalisation).

Ces deux facultés des ondes sonores en font l'un des outils les plus utilisés dans le milieu sous-marin, que ce soit par ses espèces endémiques ou par l'homme qui s'en inspire.

« Se fermerai il tuo navilio  
e metterai la testa d'una cerbottana  
in ell'acqua e l'altra stremità ti metterai  
a l'orecchio, sentirai i navili lontani  
assai da te. »

« Si vous arrêtez votre navire  
et mettez la tête d'une sarbacane [tube]  
dans l'eau et à l'autre extrémité vous mettez  
votre oreille, vous entendrez les navires loin,  
très loin de vous. »

---

Leonard De Vinci, XV<sup>e</sup> siècle,  
*Manuscrit B*, préservé à l'Institut de France,  
recto du sixième feuillet, premier paragraphe.

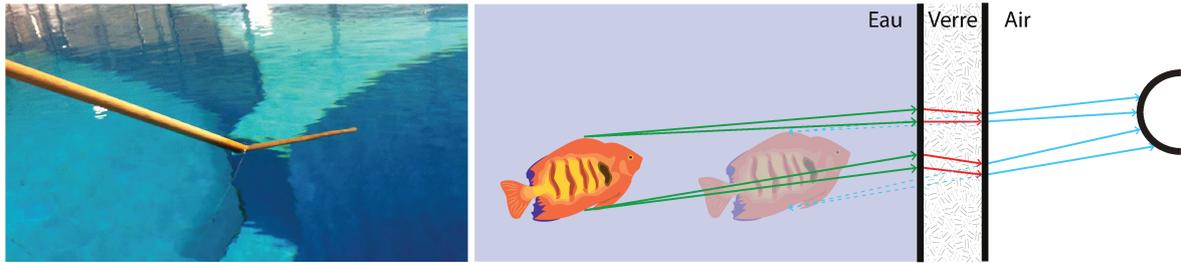
### 2.1.3 Les dioptrés air / eau

Deux milieux aux propriétés différentes vont généralement peu se mélanger. Il en résulte une interface plus ou moins tranchée qui définit la zone de transition. Tout élément qui la traverse trouvera son comportement changé, car il adoptera alors les propriétés du nouveau milieu.

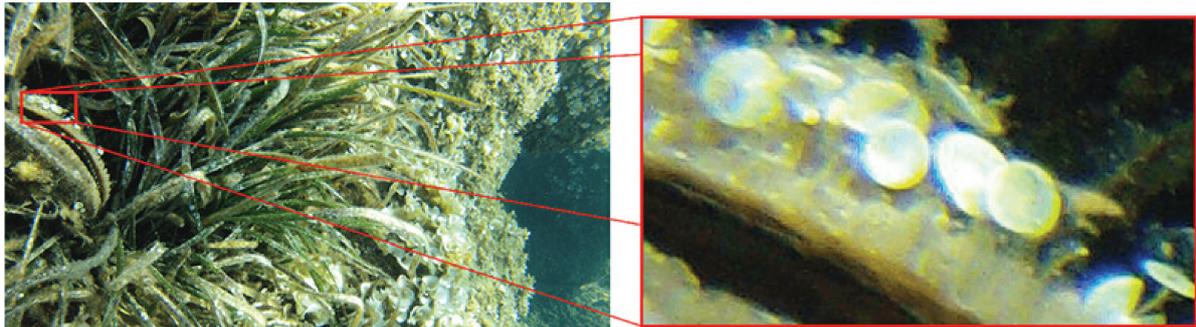
En optique, nous désignons cette interface sous le nom de dioptré. Les dioptrés qui nous intéressent sont les interfaces entre les milieux transparents air-eau, mais aussi verre-eau et verre-air. Le premier dioptré concerne principalement l'apport en lumière naturelle<sup>8</sup>. Cette dernière vient éclairer les objets et les paysages sous-marins qui nous entourent après avoir traversé la surface de l'eau. Les deux autres dioptrés, quant à eux, concernent la perception de la lumière par notre oeil derrière un masque qui nous est renvoyée par les objets et les paysages sous-marins.

7. Ce tunnel acoustique est connu sous le nom de *Canal SOFAR*. Cette zone se situe à la hauteur où le son se propage à la vitesse la plus faible et elle a pour faculté de guider les ondes sonores.

8. Essentiellement en provenance des astres, nous omettons ici le cas d'un apport de lumière artificielle dans le milieu.



**Figure 2.6** – À gauche, photographie mettant en évidence le phénomène de réfraction : la partie immergée de la perche en bois ne paraît pas dans l’alignement de la partie émergée [©️🇫🇷 L. Avantbey et al.]. À droite, illustration des effets de grossissement et de rapprochement induit par la réfraction de la lumière sur un hublot plan séparant l’air de l’eau [©️🇫🇷 L. Avantbey et al.].



**Figure 2.7** – Illustration des aberrations chromatiques provoquées par le phénomène de réfraction dans un milieu dispersif : si on agrandit une zone de l’image de gauche, on observe un liseré bleu sur les contours des objets (image de droite) [©️🇫🇷 L. Avantbey et al., Lavandou 2014]. Dans un milieu dispersif, les longueurs d’onde ne se déplacent pas tout à fait à la même vitesse et les plus courtes du spectre visible (bleu-violet) sont celles qui sont les plus réfractées lorsqu’elles passent le dioptré du hublot. Ce phénomène est plus marqué sur les bords de l’image, car on s’éloigne du centre optique.

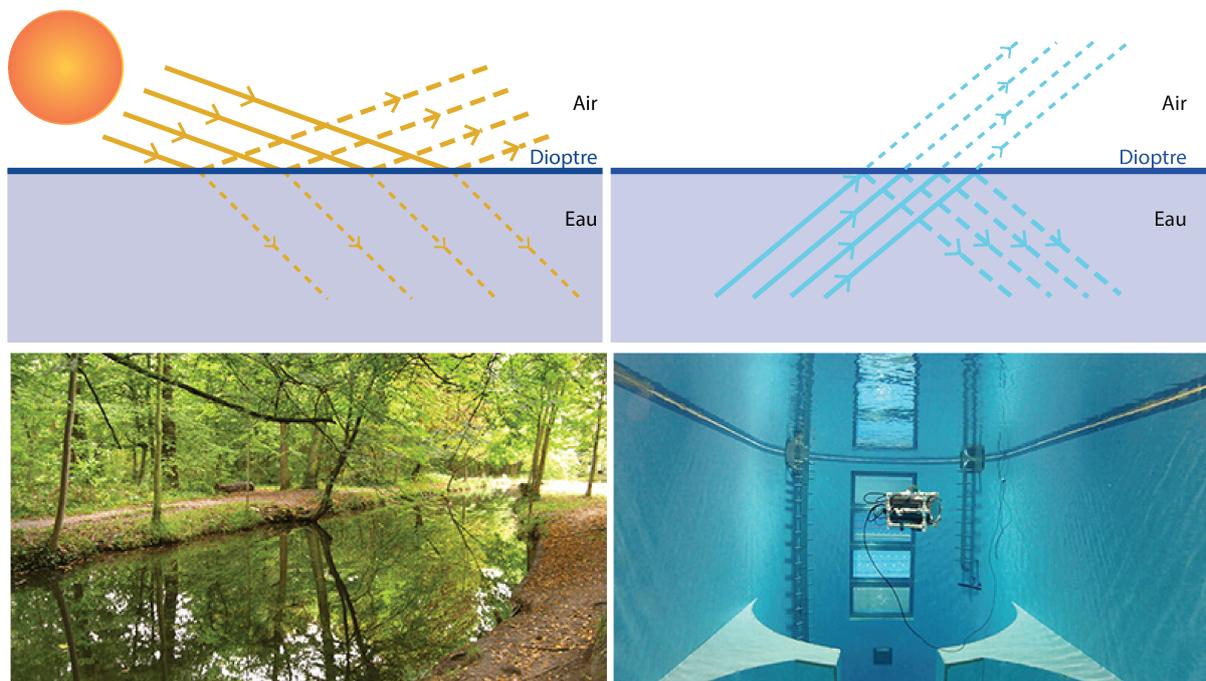
Un rayon lumineux arrivant avec une certaine incidence sur un dioptré changera de direction en le traversant du fait de son changement de vitesse de propagation dans le nouveau milieu. Plus le milieu est dense, plus la vitesse de l’onde sera faible. Dans ce cas, le milieu est dit réfringent, et plus il est réfringent, plus le rayon lumineux est rabattu. Dans le cas inverse, il est écarté. Ce phénomène de déviation des rayons, dont une illustration est donnée à la figure 2.5 page 22, est appelé réfraction.

La figure 2.6 page 23 montre qu’il est très facile d’observer le changement de direction des rayons au niveau d’un dioptré en plongeant à moitié un objet dans l’eau : depuis la surface, il semble comme brisé. Du fait que les rayons sont déviés, l’image de la partie immergée nous apparaît décalée de sa position réelle (rapprochée), légèrement déformée et plus grosse (ce qui a par ailleurs pour effet de réduire notre champ de vision).

Nous noterons que contrairement au vide, tous les milieux sont dispersifs : les différentes fréquences au sein des ondes ne se propagent donc pas à la même vitesse. Cela provoque une différence de réfringence selon les fréquences, les couleurs sont alors séparées comme c’est le cas lors de la formation d’un arc-en-ciel (voir figure 2.7 page 23). Malgré tout, ce phénomène reste faible dans les milieux qui nous intéressent.

C’est aussi à cause de la réfraction que nous ne voyons pas nettement sous l’eau : la différence de réfringence au niveau du dioptré eau-œil étant moins élevée que pour le dioptré air-œil, la déviation des rayons est plus faible. Par conséquent, les rayons convergent plus loin et l’image se forme alors derrière la rétine : la scène que nous voyons est floue !

Pour éviter cela, nous utilisons des masques pour garder le dioptré air-œil, mais nous retrouvons alors le même inconvénient que lorsque nous observons un objet sous l’eau depuis la surface et nous avons de surcroît ajouté deux nouveaux dioptrés, eau-verre et verre-air, le verre étant encore plus réfringent que l’eau. Ce phénomène est illustré sur la figure 2.6 page 23 : à nouveau, les objets observés nous semblent plus proches et plus gros



**Figure 2.8** – Réflexions quasi totales au niveau d'un dioptré. Lorsque que l'angle d'incidence des rayons avec la normale est élevé (en haut à gauche), ou que le milieu d'origine est plus réfringent que le milieu de destination (en haut à droite), l'essentiel de l'énergie ne sera pas transmis, mais réfléchi [© L. Avantbey et al.]. Les deux photographies proposées illustrent des exemples de réflexion presque totale [© L. Avantbey et al.]. En bas à gauche, nous voyons les arbres se refléter à la surface extérieure de l'eau du ruisseau de Gravelle, dans le bois de Vincennes. En bas à droite, ce sont les murs du bassin qui se reflètent sur la surface intérieure de l'eau dans la fosse de Charenton-le-Pont. Les deux surfaces se comportent presque comme des miroirs.

d'environ un tiers (et pas seulement dans les eaux marseillaises). Nous retrouverons ces mêmes conséquences avec les hublots plans que nous utilisons pour protéger de l'eau nos instruments de mesure optiques. Si nous n'en tenons pas compte, nos échelles seront faussées.

*« Quand on descend en scaphandre, on est frappé de ce fait, que la dimension des objets s'exagère. On voit plus grand que nature : une Astérie qui paraissait de très forte taille au moment où on l'a recueillie au fond de l'eau semble avoir diminué de volume lorsqu'on l'examine ensuite à l'air libre. »*

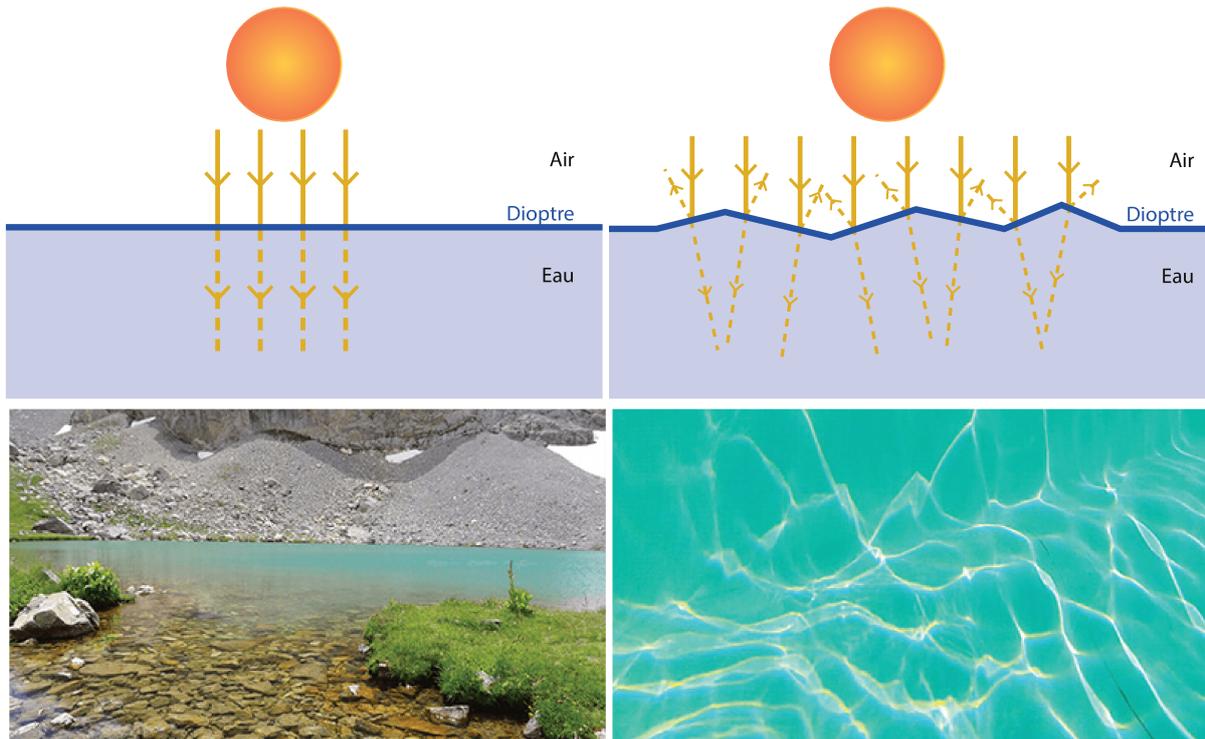
Louis Boutan, 1900, chapitre XVII, page 277

*La photographie sous-marine et les progrès de la photographie*

De plus, au passage d'un dioptré, toute l'énergie de l'onde lumineuse n'est pas entièrement transmise dans le nouveau milieu. Le front d'onde, en faisant osciller les molécules du dioptré, génère par cohérence une onde réfléchie en plus de l'onde réfractée. Le phénomène de réfraction s'accompagne donc généralement d'une réflexion partielle : une partie de l'énergie est certes transmise dans le nouveau milieu, tandis qu'un résidu est renvoyé dans le premier<sup>9</sup>.

La quantité d'énergie transmise ou réfléchie va donc dépendre essentiellement de deux critères que nous pouvons observer sur les figures 2.8 page 24 et 2.9 page 25 : la position de la source lumineuse et la forme de l'interface. L'influence du premier critère peut s'observer selon les différents moments de la journée : les rayons

9. Notons que nous ne prenons en compte dans ce modèle simplifié ni l'absorption ni la diffusion.



**Figure 2.9** – Transmissions au niveau d'un dioptre. Lorsque la lumière suit un chemin parallèle à la normale du dioptre (en haut à gauche), la majorité de l'énergie sera transmise (très peu de réflexion), mais une surface irrégulière (en haut à droite) crée autant de petits dioptres dans des orientations très différentes les uns des autres : une quantité importante de l'énergie sera alors réfléchi, et l'énergie transmise se retrouvera souvent concentrée localement [© L. Avantbey et al.]. Nous proposons deux photographies pour illustrer ces phénomènes [© L. Avantbey et al.]. En bas à droite, le soleil est à son zénith et l'essentiel de l'énergie traverse la surface de l'eau du lac de la Clarée dans les Hautes-Alpes, l'eau nous apparaît alors très transparente et nous observons très clairement le fond. En bas à gauche, le vent forme de petites vagues sur la surface d'un bassin extérieur à Montpellier, la lumière concentrée par ces dernières se projette sur le fond de la piscine et dessine des arabesques.

du soleil sont beaucoup plus transmis dans le milieu eau lorsque ce dernier est à son zénith, alors qu'à l'aube ou au crépuscule, ils sont essentiellement réfléchis par la surface. Quant à l'interface, si elle est irrégulière, les rayons se comporteront différemment selon l'angle d'incident qu'ils auront localement. En présence de vagues par exemple, l'énergie transmise sera globalement beaucoup moins élevée que quand la surface est d'huile et elle se retrouvera souvent concentrée localement, ce qui formera les arabesques de lumière (caustiques) qu'il nous arrive d'observer sur les fonds à faible profondeur.

Dans certains cas limites, l'énergie des rayons peut être totalement transmise ou totalement renvoyée (réflexion totale). Un exemple classique du second cas est le miroir qui réfléchit l'ensemble de l'énergie incidente et reflète donc parfaitement les images (voir les photographies de la figure 2.8 page 24).

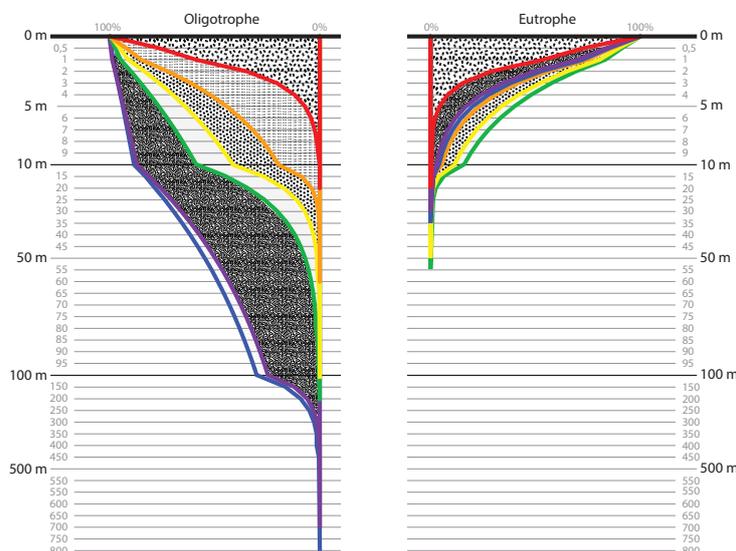
Nous noterons par ailleurs que la réflexion d'un rayon incident sur un dioptre ne se fait pas toujours selon une unique direction, mais souvent selon de multiples directions. Cela provoque une diffusion de l'énergie incidente. Nous retrouvons ce même comportement au cours de la traversée d'un même milieu lorsque le rayon rentre en contact avec les molécules de ce dernier. La diffusion est dépendante du niveau d'énergie incident et donc de la longueur d'onde. Les molécules d'eau, comme celles de l'atmosphère, vont particulièrement diffuser les longueurs d'onde courtes qui se trouvent aux alentours de la bande des bleus ( $\sim 435$  nm).

#### 2.1.4 La transparence du milieu

Lorsqu'une énergie traverse un milieu, ce dernier va en absorber une partie. La quantité d'énergie résiduelle qualifie sa transparence. L'absorption dépend essentiellement du niveau d'énergie et cette discrimination carac-

Longueur d'onde (nm)	700 (rouge)	600 (orange)	580 (jaune)	550 (vert)	435 (bleu)	390 (violet)
Milieu oligotrophe	0,529	0,163	0,088	0,053	0,012	0,014
Milieu eutrophe	0,621	0,293	0,217	0,183	0,322	0,356

**Table 2.1** – Exemple de coefficients d'absorptions associées à différentes longueurs d'onde pour des eaux océaniques fortement oligotrophes (pauvres en nutriments) et à l'inverse, fortement eutrophes (milieux riches) [Pelevin et Rostovtseva, 2001; Woźniak et Pelevin, 1991].



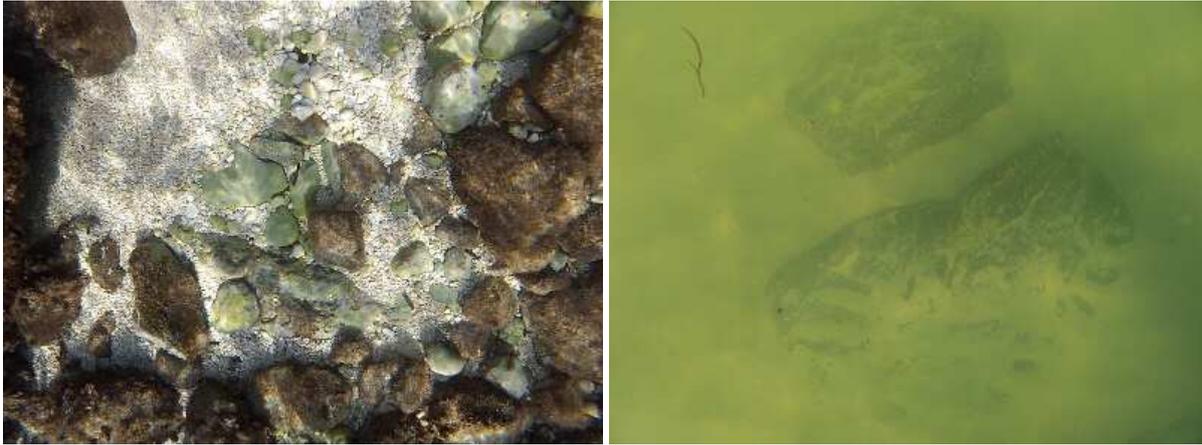
**Figure 2.10** – Énergies résiduelles des différentes longueurs d'onde en fonction de la profondeur en tenant compte uniquement de l'absorption dans deux types d'eaux océaniques : un milieu fortement oligotrophe, c'est-à-dire qui ne contient presque aucune matière organique, et un milieu à l'opposé fortement eutrophe, c'est-à-dire très riche en éléments nutritifs. Ces courbes ont été réalisées à partir des coefficients indiqués à la table 2.1 page 26 [© L. Avantbey et al.].

térise la densité optique du milieu. Ainsi certaines longueurs d'onde vont pouvoir traverser certains milieux sans problèmes alors que d'autres seront entièrement absorbées. C'est cette propriété qui nous permet de percevoir des couleurs différentes pour les objets que nous voyons : la couleur d'un objet correspond à la combinaison des longueurs d'onde renvoyées ou transmises (non absorbées) par ce dernier.

En ce qui concerne le milieu aquatique, les longueurs d'onde avoisinant les extrémités du spectre (ultraviolets < 380 nm et infrarouges > 750 nm) sont immédiatement neutralisées par les phénomènes de résonance qui se déroulent au sein des molécules [Rives et al., 1978]. Si nous ajoutons à cela la perte d'énergie lors de la traversée du dioptré, nous comprenons mieux pourquoi il est très difficile sous l'eau d'utiliser les moyens de communications et de localisation courants (Wi-Fi, GPS, etc.).

Quant au spectre visible, les basses énergies seront très vite absorbées et seules les énergies les plus hautes arriveront tant bien que mal à se propager. À peine passé dix mètres de profondeur, les couleurs rouges auront presque totalement disparu. Nos scènes sous-marines présentent donc une grande perte de couleurs et cela entraîne des difficultés de différenciation et d'identification des objets. Les couleurs bleu-indigo persistent jusqu'à de grandes profondeurs, parfois sur quelques centaines de mètres dans les eaux les plus pures. Au-delà règne une obscurité totale. Les schémas de la figure 2.10 page 26 donnent une idée de l'absorption du spectre visible dans des eaux de type océanique.

L'absorption s'ajoute au phénomène de diffusion que nous avons évoqué à la section 2.1.3 et sont ensemble responsables de l'atténuation des scènes que nous observons. Il est intéressant de remarquer que cette atténuation s'accroît selon deux directions : l'une absolue – la profondeur – et l'autre relative – la distance à la scène observée. Ainsi, même proche de la surface, plus un objet sera éloigné de nous, plus il sera atténué, jusqu'à disparaître de l'image que nous percevons.



**Figure 2.11** – Mise en évidence de la turbidité de l'eau [© L. Avantbey et al.]. À droite, prise de vue dans les eaux claires de la côte méditerranéenne, derrière le petit port de la calanque de Sormiou par une belle journée de décembre 2012. À gauche, prise de vue dans les eaux plus turbides de la côte atlantique, à la pointe du Devin sur l'île de Noirmoutier, par une belle journée d'été 2013, à l'étape de haute mer, petit coefficient de marée (39).

### 2.1.5 Des milieux souvent turbides

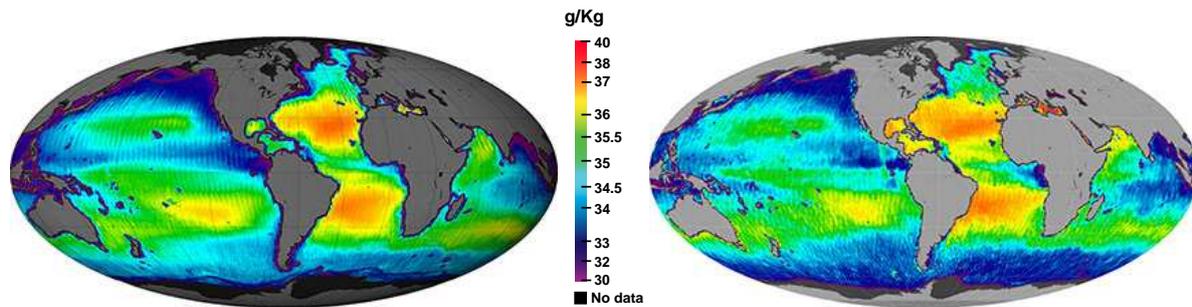
La turbidité désigne la quantité de particules solides (non dissoutes) en suspension dans le milieu, de tailles et de formes multiples. Il s'agit à nouveau essentiellement de matière organique ou minérale ou encore de noyaux gazeux. Le milieu sous-marin est naturellement turbide au niveau des zones riches en éléments nutritifs ou celles à forts courants et marées. Quant aux milieux subaquatiques, leur turbidité est souvent due à l'érosion, aux précipitations, à la dissolution des substances minérales et aux fonds non plantés (vase). Nous pouvons observer des photographies mettant en évidence la turbidité de différents milieux marins à la figure 2.11 page 27.

Les particules en suspension placées sur le chemin d'un rayon lumineux vont se comporter comme autant de microdioptrés : le rayon sera réfracté, réfléchi, diffusé et absorbé selon les caractéristiques physiques de chacune des particules avec lesquelles il rentre en contact. Ainsi, plus le milieu est turbide, plus les phénomènes optiques que nous avons abordés jusque-là se retrouvent amplifiés de manière significative. Nous noterons par ailleurs que la présence des suspensions rend alors pratiquement négligeables les effets provoqués par les particules du milieu elles-mêmes (molécules d'eau) que nous avons évoqués à la section 2.1.3.

Par exemple, la diffusion intense qui a lieu dans les bleus et l'absorption des autres longueurs d'onde par les molécules d'eau va pourvoir sa couleur bleu-indigo aux eaux où la productivité biologique est très faible. C'est le cas des eaux chaudes comme les eaux tropicales ou équatoriales. Quant aux eaux les plus riches, généralement plus froides, leurs particules en suspension et particulièrement le phytoplancton qui contient de la chlorophylle, vont fortement absorber la composante bleue et vont ainsi provoquer un glissement de la bande transmise vers le vert (jaune-vert ou vert-bleu). Cette couleur se retrouve couramment au niveau des eaux côtières des grandes latitudes, ou encore dans les régions polaires.

La présence de particules va entraîner des dégradations importantes sur la perception de l'environnement sous-marin. D'une part, en diffusant la lumière qu'elles reçoivent dans toutes les directions, les particules vont éclairer les objets et les scènes sous-marines sous tous leurs axes. Les ombres sont alors moins marquées et il en résulte une forte diminution du contraste d'éclaircissement.

D'autre part, lorsque les particules se trouvent entre la scène et l'observateur (œil ou caméra), la lumière qu'elles renvoient vers ce dernier forme un voile non homogène similaire au brouillard. Ce voile accentue l'effet d'atténuation avec la distance, altère la dynamique des couleurs (perte de contraste et de clarté) et provoque la dégradation des détails. Et dans les cas où nous utilisons une lumière artificielle pour pallier l'insuffisance de luminosité, cela ne fait qu'amplifier le phénomène, car les rayons lumineux vont traverser par deux fois la



**Figure 2.12** – Cartes représentant la salinité en surface des océans, produites à partir des données recueillies par le satellite *Aquarius* [© NASA]. À droite, moyenne obtenue sur des mesures du 25 août 2011 au 7 juillet 2012. À gauche, moyenne obtenue sur le mois d’avril 2013 (l’échelle de couleur est identique à la première carte).

couche d’eau qui sépare l’observateur de la scène d’intérêt. Il est possible de minimiser ces effets indésirables en éloignant la source lumineuse de l’observateur [Rives *et al.*, 1978]. Les techniques ont bien progressé depuis les essais de Boutan [1900] à Banyuls-sur-Mer et il est depuis très courant en cinématographie sous-marine de dissocier totalement les deux éléments : Cousteau utilisait par exemple des plongeurs dédiés à l’éclairage pour la réalisation de ses films, Cameron, quant à lui, a utilisé pour le tournage du film « Les fantômes du Titanic » (*"Ghosts of the Abyss"*) une plateforme mobile d’éclairage, appelée Médusa, pour illuminer la scène par le dessus, comme un petit soleil.

### 2.1.6 Des milieux à salinité différente

La salinité désigne la teneur en sels métalliques dissous dans l’eau pure. Les principaux sels sont les chlorures de sodium ( $NaCl$ ), que nous connaissons sous la forme du sel marin alimentaire et les chlorures de magnésium ( $MgCl_2$ ) [Rives *et al.*, 1978]. En se dissolvant dans l’eau, ils se dispersent en ions ( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Mg_2^+$ ). La salinité des eaux est très variable selon les milieux. Les eaux douces, que nous retrouvons dans la majorité des rivières et des lacs, contiennent très peu de ces sels métalliques. Les océans, quant à eux, en contiennent en moyenne 35 g/L, contre 40 g/L pour la majorité des mers intérieures ou assimilées. La concentration en sels dans ces dernières est généralement plus élevée du fait de l’évaporation. Les extrêmes se retrouvent souvent dans les mers fermées ou semi-fermées : 6 g/L dans les eaux de surface de la mer Baltique et jusqu’à 330 g/L dans la mer Morte.

La salinité influe majoritairement sur un paramètre que nous avons déjà évoqué : la densité (section 2.1.2). Plus le milieu est chargé en sels métalliques, plus il sera dense. La concentration en sels du milieu a donc pour effet de renforcer la poussée d’Archimède en modifiant la masse du volume d’eau déplacée. Ainsi des objets qui coulent dans de l’eau douce peuvent flotter dans de l’eau plus salée. Il est donc possible, à poids apparent égal, d’emporter plus de charge utile dans de l’eau plus concentrée en sels métalliques. Lors de nos différents essais, nous avons par exemple constaté des variations de plusieurs centaines de grammes sur le lestage d’un mini-robot de 9 kg entre les eaux de piscine et les eaux du Nord de la Méditerranée. De la même manière, la salinité aura une influence sur la vitesse de propagation des ondes sonores et viendra donc changer le comportement des capteurs acoustiques.

La présence de sels métalliques entraîne une autre conséquence capitale sur le milieu : ils le transforment en électrolyte. En effet, l’eau pure est un très mauvais conducteur en soi, mais les ions qui constituent les sels métalliques dissous sont, tout comme les électrons, des porteurs de charges et permettent donc la circulation d’un courant électrique. Pour se donner une idée, la conductivité d’une eau salée (environ 35 g/L) est approximativement  $10^6$  fois plus élevée que celle de l’eau pure et en moyenne  $10^4$  fois plus élevée que celle de l’eau que nous buvons. En revanche, elle reste  $10^7$  fois moins élevée que les métaux les plus conducteurs comme l’argent, le cuivre et l’or [Kaye et Laby, 1995].



**Figure 2.13** – Illustrations des effets de la corrosion. À gauche, la corrosion a rongé le métal et menace de sectionner la pièce en deux [© ⓘ Esparta Palma]. À droite, une photographie du moteur brushless immergé dans l'eau douce au bout d'une centaine d'heures [© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.] permet d'observer les dépôts engendrés par la corrosion et qui viennent gripper le système.

Cet échange de charges électriques va davantage activer le phénomène de corrosion (oxydation) qui est déjà très élevée dans le milieu aqueux. Cette dernière est plus ou moins rapide et détériore de manière non négligeable les matériaux, notamment les métaux qui tendent à retourner à leur état naturel (oxydes). Ils peuvent alors devenir cassants ou se percer, laissant ainsi l'eau s'infiltrer (voir figure 2.13 page 29). De ce fait, le choix des métaux ou alliages à immerger est délicat, car la proximité de certains couples peut provoquer la formation d'une pile électrique (corrosion galvanique ou électrolyse).

S'il s'agit de pièces mécaniques, en l'absence de protection, la corrosion peut gripper le système très rapidement. Nous avons pu observer ces effets lors d'expériences que nous avons menées pour mariner des moteurs brushless [Avanthey et al., 2011]. Sans protection, les roulements à billes métalliques de ces derniers, pièces qui permettent la rotation de l'axe de l'hélice vis-à-vis de la cage à aimants, se retrouvent inutilisables après une centaine d'heures d'immersion en eau douce (et des parties structurantes de la cage se retrouvaient totalement corrodées). Nous observons les mêmes effets après seulement dix heures en eau salée (40 g/L).

Même les simples dépôts engendrés par la corrosion peuvent devenir source de problèmes : proches des joints, ils mettent en péril l'étanchéité, et sur les parties conductrices, ils génèrent de faux contacts intermittents, comme cela nous est arrivé à maintes reprises avec le connecteur du câble de communication de notre robot. Il est à noter que la plupart des polymères ne subissent pas ces effets de corrosion, mais il faut être vigilant à ce qu'ils ne deviennent pas poreux dans le temps.

Il est également impossible de plonger des circuits électroniques directement dans l'eau (sans protection) et toute fuite, même mineure, peut avoir un effet dommageable irréversible sur le matériel électrique en provoquant des courts-circuits importants. Pour cela, profondeur et temps importent peu : par exemple en 2012, en moins de trois minutes – le temps de remonter le robot qui se trouvait à peu près à un mètre de profondeur dans le port de La Spezia lorsque nous avons aperçu les bulles d'air indiquant une fuite, puis de l'ouvrir pour faire sortir l'eau du compartiment – l'ensemble de l'électronique était hors d'usage et le fluide alcalin avait commencé à s'échapper de la batterie en court-circuit.

Nous noterons que les courts-circuits provoqués par des fuites n'endommagent pas systématiquement le système (microfuites). Ces derniers peuvent provoquer des comportements secondaires qui complexifient l'identification de la source du problème. Par exemple, les hélices de l'un de nos robots s'arrêtaient de tourner dès qu'elles touchaient l'eau sans que le robot montre un signe de redémarrage. Il s'agissait en réalité d'une petite fuite sur l'un de nos plots d'éclairage, situé à la même hauteur que les hélices. Lorsque ce dernier prenait l'eau, il se produisait une électrolyse, trop faible pour faire sauter le fusible de la carte d'alimentation, mais suffisante pour provoquer le redémarrage de la carte mère qui manquait alors de puissance.



**Figure 2.14** – À gauche, les eaux douces et boueuses de la rivière Fraser au Canada se jettent dans les eaux claires et salées de l’océan Pacifique [© [i] [i] [i] [i] Ed McNichol], à droite, dans le cenote Vaca Ha au Yucatán (Mexique) les eaux douces de surface font place aux eaux profondes qui communiquent avec l’océan par le biais de tunnels ou de failles, l’halocline donne l’impression d’une rivière sous-marine [© Alison & Charlie Nelson]. Les haloclines sont visibles grâce aux pycnoclines qui les accompagnent et qui créent une zone de frontière : les eaux qui sont alors de densités différentes se mélangent difficilement et se retrouvent superposées (les eaux douces, plus légères, restent en surface, et les eaux salées, plus denses, passent en dessous).

### 2.1.7 Des milieux non homogènes

Les caractéristiques globales des milieux sous-marins reposent fortement sur la relation température-salinité-pression [Mamayev, 2010]. Or les mouvements locaux du milieu précédemment évoqués (courants, marées, etc.), ajoutés à la présence de sources qui y débouchent (fleuve, fonte des glaces, précipitations, etc.), favorisent les modifications soudaines de ces propriétés et contribuent à rendre le milieu non homogène.

Nous pouvons par exemple être confrontés à de prompts changements de température. C’est le cas notamment au niveau de la transition entre les eaux de surface et les eaux profondes. Cette frontière est appelée thermocline. Nous retrouvons d’autres variations rapides de température dans les estuaires, ou au niveau des eaux de surface lorsqu’il pleut abondamment ou encore s’il y a beaucoup de vent.

La concentration en sels métalliques peut, elle aussi, varier brusquement, nous parlons alors d’halocline. Des eaux plus chaudes peuvent contenir beaucoup plus de sels dissous que les eaux froides, car le seuil de saturation est plus élevé. À titre d’exemple, les champs de gaz profonds, comme le gisement d’Elgin-Franklin en mer du Nord où règnent des températures extrêmes, peuvent voir leur salinité locale monter à plusieurs centaines de grammes par litre. Ce sont ces haloclines qui permettent la formation de la banquise et des icebergs. Nous les retrouvons dans les fjords, dans les estuaires ou encore dans les grottes sous-marines (voir figure 2.14 page 30).

La température et la salinité vont à leur tour considérablement affecter la densité. Le terme pycnocline désigne ainsi la séparation de deux zones aux densités très différentes. Le gradient de densité qui a lieu au niveau de la thermocline est en partie source des courants de profondeur. Parmi eux, nous pouvons citer la circulation thermohaline qui désigne la circulation permanente à grande échelle de l’eau des océans.

À l’entrée d’une zone plus ou moins dense, la flottabilité d’un objet se retrouve donc brutalement altérée. Il s’agit d’un problème extrêmement difficile à gérer. Descendus avec la soucoupe plongeante au fond du fjord du Saguenay, au pied de la montagne du Cap Éternité (Québec), Albert Falco et Jean-Michel Cousteau se retrouvèrent dans l’incapacité de repasser la limite qui sépare, à une quinzaine de mètres de profondeur, les eaux de surface, douces et très turbides, de la rivière du Saguenay, des eaux inférieures limpides et salées provenant de l’Atlantique. Équilibrée pour l’eau de mer, la soucoupe est trop dense et rebondit sur la pycnocline, malgré le largage des lests et l’ajustement du ballast. Seul le gonflage de la jupe extérieure du véhicule, conçue pour assurer sa stabilité en surface, leur permit de sortir de cette situation délicate. Même les ondes sonores peuvent se retrouver piégées dans les zones à haute densité. La pression évoluant de conserve avec la densité, elle posera tout autant de problèmes, car les changements soudains éprouvent beaucoup plus la résistance mécanique que les changements progressifs.

Enfin, toutes ces modifications des propriétés physiques vont influencer les paramètres optiques et acoustiques. En particulier, l'indice de réfraction subira de fortes fluctuations créant ainsi, à l'instar de la turbidité, une infinité de dioptries. C'est ce même phénomène qui est à l'origine de la formation des mirages dans l'atmosphère. Ces microréfractions accentuent, entre autres, la perte des détails des scènes que nous observons. Quant aux ondes sonores, leur vitesse exacte dans le milieu sera variable et cela entraînera notamment des complications pour la modélisation de leurs trajectoires.



Nous avons à présent un meilleur aperçu du domaine dans lequel nous allons travailler et des contraintes auxquelles nous serons soumis : milieu non respirable, vastes étendues, mouvements permanents, forces de pression importantes, échelles altérées, mauvaise visibilité, éclairage faible et variable, corrosion et électrolyse, variation dynamique des différents paramètres selon l'endroit ou le moment, etc. L'ensemble est résumé dans la table 2.2 page 32. Nous espérons que le lecteur perçoit mieux pourquoi nous qualifions d'hostile ce milieu magnifique. Toutes ces difficultés d'accès lui confèrent un côté mystérieux et lui fournissent le privilège de garder jalousement une grande partie de ses secrets : nous n'en connaissons qu'une infime portion et beaucoup reste à explorer.

Dans ce qui suit, nous allons aborder le domaine de la télédétection rapprochée qui ouvre l'accès aux données locales très haute résolution. Nous discuterons de son positionnement par rapport aux autres types de télédétection (spatiale, aéroportée et sous-marine) après avoir passé en revue les outils communément utilisés dans ces différents secteurs.

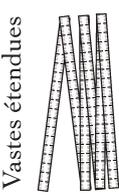
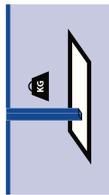
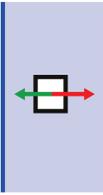
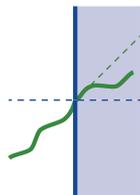
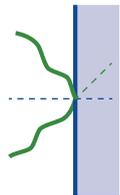
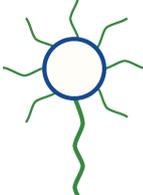
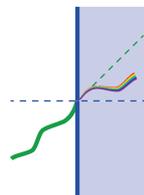
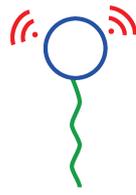
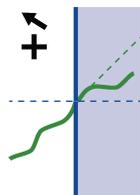
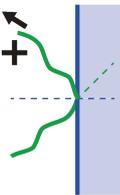
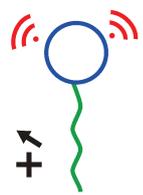
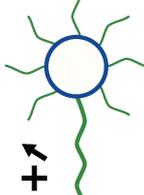
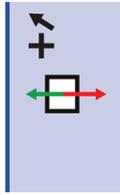
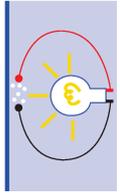
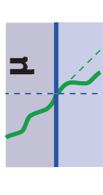
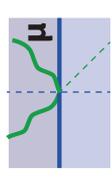
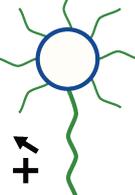
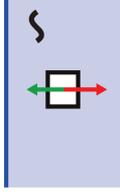
Milieu naturel	Densité	Dioptries air/eau	Transparence	Turbidité	Salinité	Inhomogénéité électromagnétique
<p>Houle et courants</p>  <p>Faune et Flore</p>  <p>Vastes étendues</p>  <p><b>Kms<sup>2</sup></b></p> <p>Accessibilité variable</p> 	<p>Pression</p>  <p>Poussée d'Archimède</p> 	<p>Réfraction électromagnétique</p>  <p>Réflexion électromagnétique</p>  <p>Diffusion électromagnétique</p>  <p>Dispersion électromagnétique</p> 	<p>Absorption électromagnétique</p> 	<p>Réfraction électromagnétique</p>  <p>Réflexion électromagnétique</p>  <p>Absorption électromagnétique</p>  <p>Diffusion électromagnétique</p> 	<p>Poussée d'Archimède</p>  <p>Corrosion</p>  <p>Conductivité</p> 	<p>Microrefraction électromagnétique</p>  <p>Microreflexion électromagnétique</p>  <p>Diffusion électromagnétique</p>  <p>Poussée d'Archimède variable</p> 
<i>Conséquences Physiques</i>						
<p>Mouvements</p>  <p>Temps</p>  <p>Moyens</p> 	<p>Risques de fuites</p>  <p>Risques de rupture</p>  <p>Capacité d'emport</p> 	<p>Éclairage</p>  <p>Précision des mesures</p>  <p>Localisation</p>  <p>Communication électromagnétique</p> 	<p>Visibilité</p>  <p>Couleurs</p>  <p>Localisation</p>  <p>Communication électromagnétique</p> 	<p>Visibilité</p>  <p>Couleurs</p>  <p>Contraste</p>  <p>Détails</p>  <p>Localisation</p>  <p>Communication électromagnétique</p> 	<p>Capacité d'emport</p>  <p>Durée de vie des matériaux</p>  <p>Électrolyse</p>  <p>Risques de courts-circuits</p> 	<p>Détails</p>  <p>Contraste</p>  <p>Couleurs</p>  <p>Localisation</p>  <p>Communication électromagnétique</p>  <p>Flotaison variable</p> 

Table 2.2 – Table résumant les caractéristiques des milieux sous-marins et subaquatiques [© L. Avantbey et al.].  
 Légende : ↗ augmentation, ↘ diminution, en vert les impacts positifs et en rouge les impacts négatifs.

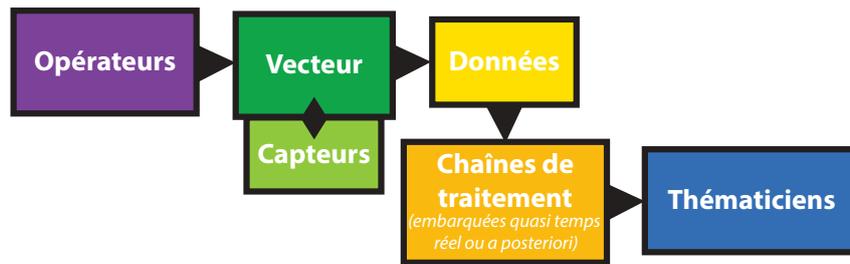


Figure 2.15 – Ce schéma présente la chaîne globale de télédétection et ses différents acteurs [© L. Avantbey et al.].

## 2.2 Robots mobiles pour la télédétection rapprochée

La télédétection réunit l'ensemble des techniques permettant de réaliser à distance la mesure de paramètres de surface ou l'acquisition d'informations sur des objets ou des phénomènes [Ministère des Universités, 1980]. La télédétection rapprochée vient compléter le spectre des méthodes traditionnelles de télédétection qui englobe la télédétection spatiale et la télédétection aéroportée ainsi que son équivalent pour les terres immergées, la télédétection sous-marine.

Dans cette section, nous présenterons brièvement ces méthodes de télédétection et nous discuterons des outils spécifiques à la télédétection rapprochée ainsi que de son positionnement dans le contexte général. Un tableau de synthèse (2.4, page 45) sur les plateformes mobiles d'acquisition de la télédétection rapprochée sera proposé en conclusion.

### 2.2.1 Les méthodes de télédétection

La chaîne globale de télédétection, présentée sur le schéma 2.15 page 33, est composée de plusieurs acteurs. Des opérateurs mettent en œuvre dans un milieu donné des plateformes mobiles (vecteurs ou porteurs) équipées d'un ou plusieurs capteurs (charge utile). Les données acquises sont traitées et transmises à des thématiciens qui pourront les utiliser pour leurs applications spécifiques.

Les méthodes de télédétection sont distinguées par leur distance de travail vis-à-vis de leurs sujets d'étude : depuis l'espace (télédétection spatiale), depuis les airs ou l'eau (télédétection aéroportée ou sous-marine) et enfin, au sein même du milieu étudié (télédétection rapprochée).

Nous relèverons trois conséquences importantes relatives à ces distances de travail. Premièrement, plus nous sommes près du sujet d'étude, plus notre champ d'observation (fauchée) diminue. Ce phénomène est illustré par les photographies présentées à la figure 2.16 page 33. Deuxièmement et en répercussion, plus la fauchée est petite, plus le temps nécessaire pour couvrir une zone d'une taille donnée est important.

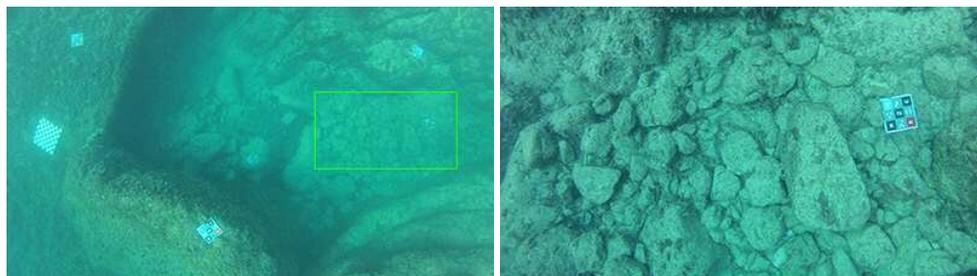
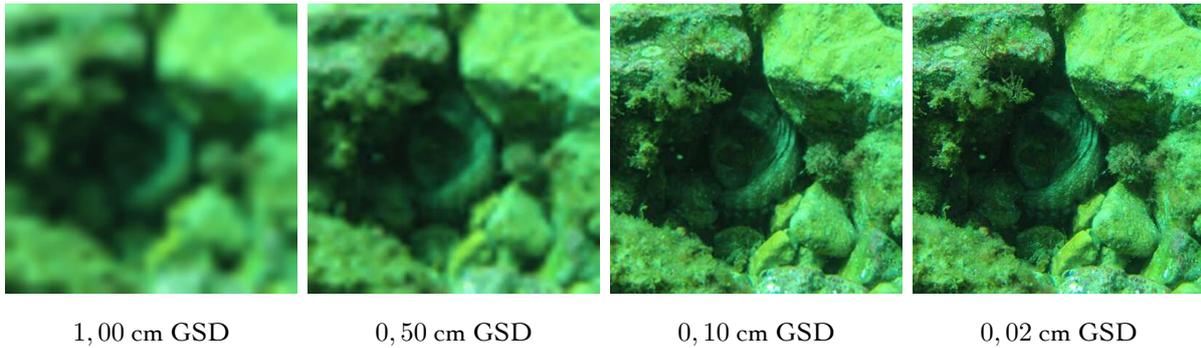
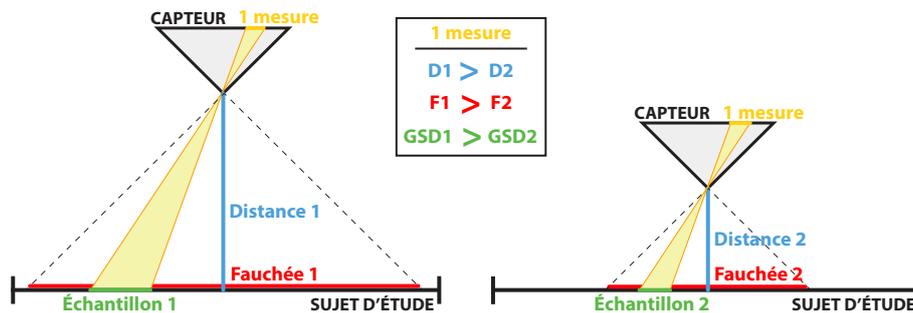


Figure 2.16 – Ces photographies illustrent la notion de fauchée [© L. Avantbey et al., Cap de Nice, octobre 2015] : à gauche nous disposons d'une vision globale de la scène (distance d'environ 3 mètres à la cible), et la vue plus rapprochée de droite (distance à la cible inférieure à 1 mètre, correspondant à la zone marquée par l'encadré vert sur la photographie de gauche) nous offre plus d'information sur la nature exacte du sol au détriment de l'environnement alentour.



**Figure 2.17** – Cette série de photographies met en évidence le niveau de détail accessible pour une même scène en fonction de la taille de l'échantillon au sol (GSD) [© L. Avantbey et al., Cap de Nice, août 2015]. Nous pouvons observer qu'à partir d'un GSD millimétrique, la finesse des informations permet d'identifier la présence d'un poulpe parmi les rochers.



**Figure 2.18** – Ce schéma illustre la relation entre les trois grandeurs : distance à la cible, fauchée et taille réelle de l'échantillon au sol (GSD) [© L. Avantbey et al.]. Si nous réduisons la distance par rapport au sujet d'étude, la fauchée (surface observée) se resserre : nous ne voyons plus qu'une petite portion du sujet. Mais en échange, la mesure est plus précise, car le GSD diminue : nous avons accès à plus de détails.

Troisièmement et en contrepartie, plus nous sommes près du sujet d'étude, plus le niveau de détail (résolution) auquel nous avons accès est élevé pour une taille de capteur donnée. Nous pouvons caractériser la résolution d'une mesure par la taille de l'échantillon réel (GSD – *Ground Sample Distance*) : si la taille de l'échantillon à partir duquel est inférée la mesure est petite, alors la résolution sera fine et inversement. Les photographies de la figure 2.17 page 34 permettent d'appréhender ce paramètre.

Pour résumer, la relation entre les trois grandeurs que nous venons d'introduire – distance à la cible, fauchée et taille de l'échantillon au sol (GSD) – est schématisée sur la figure 2.18 page 34.

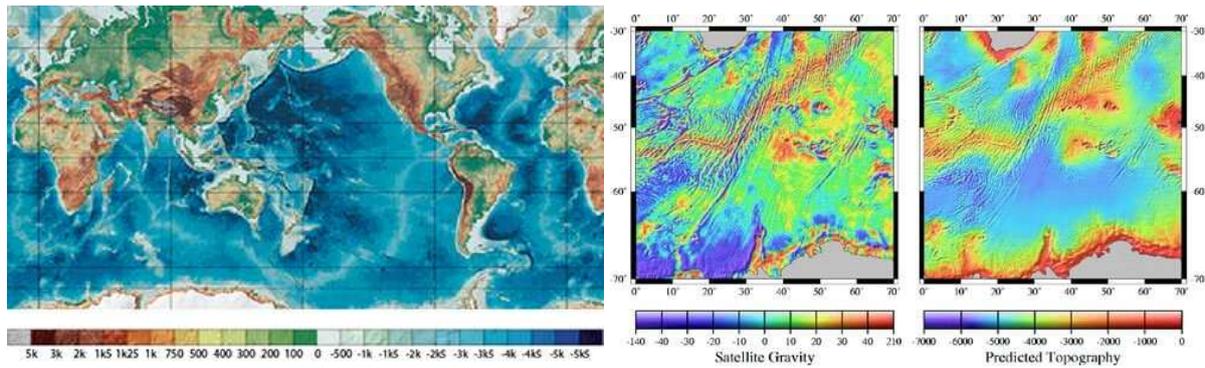
### Téledétection spatiale : la plus éloignée

Si nous disposons aujourd'hui de cartographies aussi détaillées pour les terres émergées et les limites côtières, c'est en grande partie grâce à la téledétection spatiale. C'est en effet la méthode qui offre naturellement la plus grande fauchée : elle est potentiellement en capacité de couvrir l'ensemble de la planète en quelques dizaines de jours, plutôt qu'en plusieurs centaines d'années comme cela serait nécessaire en travaillant depuis la surface [Carron et al., 2001].

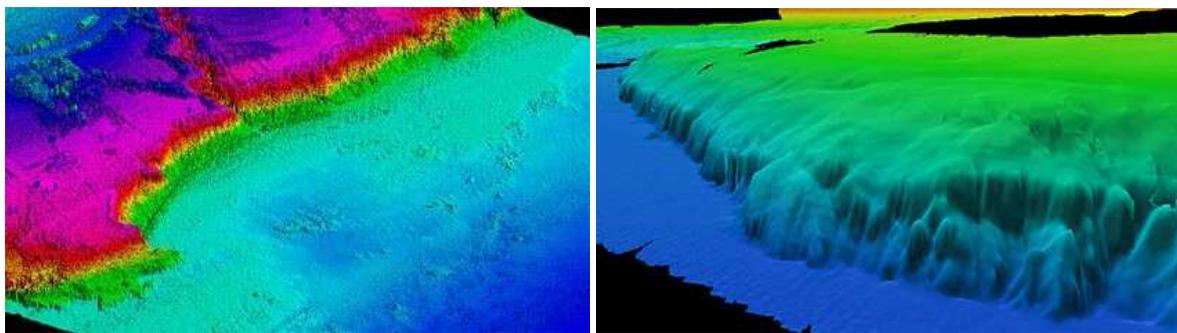
Pendant, les problèmes liés à la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu aquatique (sections 2.1.3 page 22 à 2.1.5 page 27) empêchent l'accès direct aux informations des terres immergées depuis l'espace. Les progrès de l'altimétrie satellitaire<sup>10</sup> de ces vingt dernières années ont tout de même permis d'obtenir des cartes globales des fonds marins avec une résolution d'une dizaine de kilomètres. Ces méthodes infèrent les données bathymétriques<sup>11</sup> à partir des anomalies gravitaires (déformations de la surface de l'eau) [Smith et Sandwell, 2003]. Nous pouvons voir des exemples de cartes résultantes à la figure 2.19 page 35.

10. Altimétrie satellitaire : étude de la hauteur de la surface de l'eau.

11. Bathymétrie : étude de la profondeur des surfaces sous-marines.



**Figure 2.19** – À gauche : carte des fonds océaniques par altimétrie spatiale [Calmant et al., 2002, 2006] [© IRD & CNES]. À droite : prédiction des données bathymétriques à partir des anomalies gravitaires calculées avec des données d'altimétrie spatiale (vue du sud de l'Amérique et du nord-ouest de l'Antarctique) [© NOAA].



**Figure 2.20** – À gauche, exemple de carte bathymétrique de la côte Corse, réalisée par télédétection aéroportée [© BRGM & OEC]. À droite, exemple de carte bathymétrique de l'escarpement situé à l'ouest de la Floride, réalisée par télédétection sous-marine [© NOAA, programme Okeanos Explorer].

Les vecteurs de télédétection spatiale [Polidori, 1995-2001] sont essentiellement des satellites envoyés en orbite autour de la Terre. Il est d'usage de les classer en deux catégories : les satellites géostationnaires qui restent toujours à la verticale d'un même point (leur période de rotation est égale à la durée du jour sidéral terrestre) et les satellites polaires ou quasi polaires dont la trajectoire passe par les pôles et qui peuvent ainsi survoler toutes les régions du globe en se servant de la rotation de la Terre. Les premiers se trouvent à une altitude d'environ 36000 km au-dessus de l'équateur, l'altitude des seconds varie globalement entre 500 à 1500 km. Les fauchées sont kilométriques (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de kilomètres) et les tailles des échantillons au sol (GSD) d'ordre décimétrique à kilométrique.

### Télédétection aéroportée et sous-marine : les distances intermédiaires

La télédétection aéroportée propose une fauchée beaucoup moins large (d'ordre hectométrique à kilométrique) en comparaison à la télédétection spatiale, mais elle permet malgré tout de couvrir de larges surfaces d'étude dans un temps raisonnable (plusieurs dizaines de kilomètres carrés par heure). En échange, elle offre l'accès à des résolutions de travail centimétrique à décimétrique, très utilisées pour réaliser des fonds de cartes. Les conditions d'acquisition sont plus souples qu'avec les satellites et permettent de mieux s'adapter à la météorologie (couverture nuageuse).

Pour ce qui est des terres immergées observées depuis les airs, l'utilisation d'énergies à haute puissance (lasers) permet de pénétrer à travers la surface sur quelques dizaines de mètres et donne ainsi accès à la bathymétrie des hauts fonds. Les données produites, dont un exemple est présenté à la figure 2.20 page 35, sont exploitables pour la navigation et pour l'aménagement du territoire sur les côtes littorales.



**Figure 2.21** – Cette échelle représente les différents niveaux d'automatisation des plateformes mobiles de télédétection du pilotage manuel assisté à une complète autonomie de réalisation de mission [© 2015 L. Avantbey et al.].

Historiquement, les premiers vecteurs employés ont été les ballons et les montgolfières. L'offre s'est ensuite diversifiée avec tout le panel que nous connaissons aujourd'hui : dirigeables, hélicoptères et avions, ces derniers étant de loin les plus employés.

L'altitude minimale réglementaire est fixée à 150 m et les vecteurs travaillent en moyenne jusqu'à environ 10 km d'altitude. Au-delà, des ballons-sondes non habités peuvent être envoyés dans les couches stratosphériques de l'atmosphère (jusqu'à 50 km d'altitude) et combler ainsi une partie de l'espace séparant les couloirs aériens des orbites des premiers satellites.

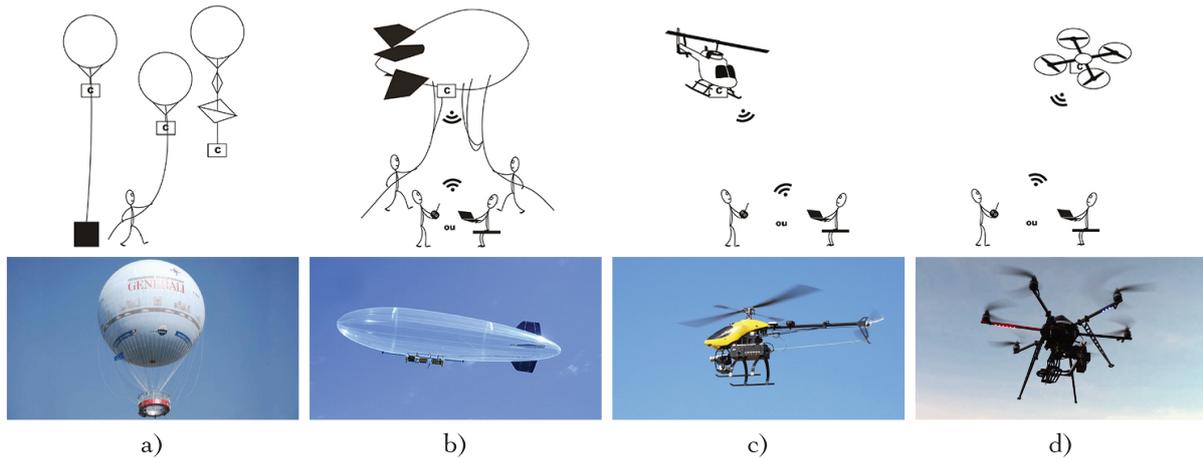
La télédétection sous-marine concerne spécifiquement les terres immergées. C'est le pendant de la télédétection aérienne et des terres émergées, les difficultés inhérentes au milieu aquatique en plus. Elle est principalement portée par deux industries : l'industrie pétrolière et gazière (prospection pipelines et plateformes) et celle des télécommunications (câbles de données). La couverture des zones d'intérêt s'effectue généralement depuis la surface par des bateaux, le vecteur le plus utilisé dans le domaine. Lorsque les profondeurs sont très grandes (nous rappelons que la profondeur moyenne des océans est d'environ 3,8 km) les instruments de mesure sont déportés et tractés au bout d'un câble sous le navire. Une autre solution pour obtenir des informations sur les bas-fonds consiste à embarquer les instruments à bord de sous-marins, ces derniers pouvant alors les emmener à la profondeur désirée.

Les fauchées sont similaires à celles de la télédétection aéroportée et les tailles des échantillons au sol sont de l'ordre décimétrique à décamétrique, voire centimétrique dans certaines conditions. Un exemple de carte bathymétrique réalisée par un bateau en surface est disponible à la figure 2.20 page 35.

### Télédétection rapprochée : au plus près du sujet d'étude

La télédétection rapprochée, quant à elle, offre l'accès aux résolutions les plus élevées (subcentimétriques à centimétriques) au détriment significatif de la fauchée. C'est pourquoi elle est réservée aux études de zones très locales nécessitant un grand niveau de détail. À cette distance d'observation, le relief est plus complexe et les images de télédétection rapprochée présentent donc de fortes distorsions géométriques. Dans l'air, nous la connaissons sous le nom de télédétection basse altitude. Sa zone d'action se situe sous la limite minimale réglementaire des 150 m d'altitude de la télédétection aéroportée et s'étend jusqu'au sol. Pour sa partie sous-marine, nous la désignerons par le terme « télédétection *in situ* ». De manière analogue à la télédétection basse altitude, elle occupe l'espace entre le fond marin et les distances de travail courantes des instruments de la télédétection sous-marine. Les études sous-marines ne se restreignant pas aux objets proches du fond, mais pouvant également traiter des objets flottants ou situés dans la colonne d'eau ; la zone d'action sera donc définie par rapport à une distance à la cible inférieure à 100 m.

Les vecteurs de la télédétection rapprochée sont majoritairement des plateformes non habitées : aéronefs, véhicules terrestres, véhicules de surface ou sous-marins. Le cerf-volant a été parmi les premiers vecteurs à être utilisés [Picavet, 1912].



**Figure 2.22** – Principes d'utilisation [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.] et exemples des plateformes de télédétection rapprochée. **Vecteurs aériens plus légers que l'air (aérostats).** a) Ballons captifs ou dérivants : illustration du ballon captif à Helium de l'Observatoire Atmosphérique Generali à Paris [© Ballon de Paris]. b) Dirigeables : illustration du dirigeable souple automatisé Karma réalisé par le LAAS. **Vecteurs aériens plus lourds que l'air (aérodynes)** à voilure tournante. c) Hélicoptères : illustration de l'AutoCopter Express E automatisé [© AutoCopter]. d) Multirotors : illustration de l'Hexakopter XL conçu par Mikrokopter [© ⓘ ⓘ Stefan Kellner].

## 2.2.2 Les outils de télédétection rapprochée

Pour pouvoir travailler au sein même du milieu d'étude et évoluer sans encombre au plus près des objets observés, les plateformes mobiles de télédétection rapprochées privilégient une taille réduite et une grande maniabilité aux dépens de la capacité d'emport et de l'endurance. Souvent issus du monde du modélisme, ces vecteurs ont pleinement profité de la révolution technologique observée ces quinze dernières années (miniaturisation, amélioration des performances et chute des prix des composants électroniques, électromécaniques et électrotechniques). L'une des plus-values les plus significatives concerne l'ajout de niveaux d'automatisation. Non seulement, ils permettent de faciliter le pilotage de ces appareils, mais qui plus est, ils vont leur apporter un critère très important pour les études de télédétection : la systématisation et donc la répétabilité des acquisitions.

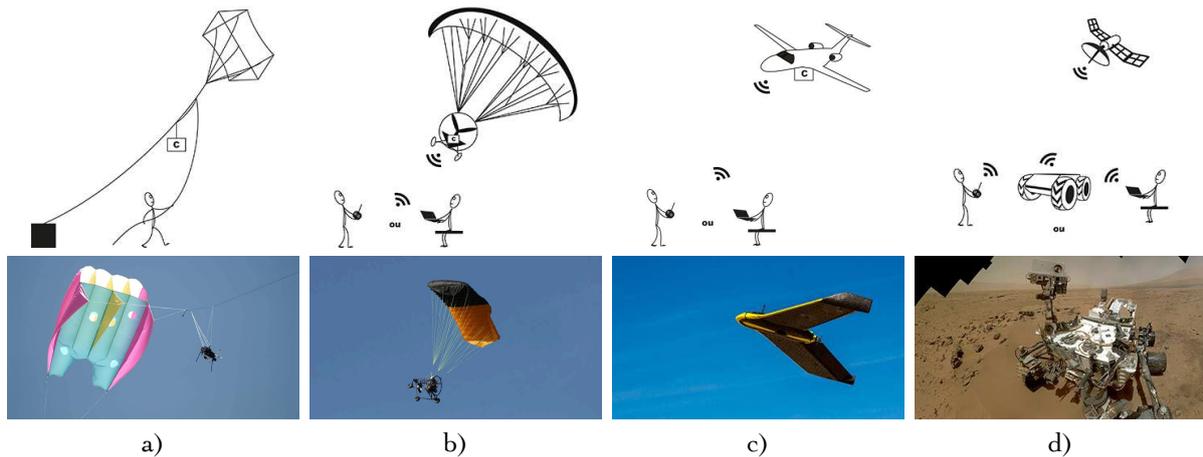
Nous proposons à la figure 2.21 page 36 une échelle classant cinq niveaux d'automatisation, allant du simple modèle réduit au drone capable de réaliser une mission donnée en totale autonomie. De nos jours, l'essentiel des vecteurs disponibles sur le marché se situent entre les niveaux II et III d'automatisation, seuls certains prototypes de laboratoire ou encore certains robots liés à l'exploration spatiale atteignent les niveaux supérieurs.

### Plateformes aériennes et terrestres

Les vecteurs aériens sont généralement désignés dans la littérature par le sigle anglais AV (*Aerial Vehicle*). Et lorsqu'ils sont automatisés, nous employons alors le sigle UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Nous regrouperons dans une première catégorie les vecteurs aériens plus légers que l'air, dénommés *aérostats*. Les ballons captifs ou dérivants [Miyamoto et al., 2001 ; Altan et al., 2004 ; Shaw et al., 2012] se maintiennent en l'air grâce à leurs enveloppes remplies d'un gaz léger (généralement de l'hélium ou de l'air chaud), leur altitude peut être contrôlée et les charges utiles sont embarquées dans des nacelles suspendues sous les enveloppes. Les dirigeables [Hygounenc et al., 2004 ; Zhang, 2008], quant à eux, utilisent le même principe de sustentation, mais sont de surcroît équipés de moteurs pour contrôler leur position sur le plan horizontal. Caractérisés par une grande capacité d'emport, une bonne endurance et un déplacement silencieux, ces deux types de vecteurs sont idéaux pour le travail en agglomérations, mais sont en revanche très sensibles à la météorologie et peu précis en contrôle de trajectoire et positionnement.

Une seconde catégorie rassemble les vecteurs aériens plus lourds que l'air, les *aérodynes*, qui se sustentent



**Figure 2.23** – Principes d'utilisation [©️️️ L. Avanthey et al.] et exemples des plateformes de télédétection rapprochée (suite). **Vecteurs aériens plus lourds que l'air (aérodynes) à voile fixe.** a) Cerf-volants : illustration d'un cerf-volant souple de type flowform [©️️️ Richard Smith]. b) Paramoteurs : illustration du Pixy, un aéromodèle piloté de l'IRD [©️ M. Šulc Michalková et al.]. c) Avions, ailes delta, planeurs : illustration de l'eBee, une aile delta autonome commercialisée par SenseFly [©️ Zachary A. Balge]. **Vecteurs terrestres.** d) À roues ou à chenilles : illustration de Curiosity, astromobile actuellement en exploration sur Mars, pris en photo par lui-même [©️ NASA].

grâce à la force provenant de la vitesse : « La portance est une fleur qui naît de la vitesse <sup>12</sup> ». Nous y distinguons les plateformes à voilures tournantes des plateformes à voilures fixes. Les premières comprennent les hélicoptères et les multiroteurs [Eisenbeiss, 2006 ; Rinaudo et al., 2012 ; Jannoura et al., 2015], dont la sustentation est assurée par la vitesse de rotation des rotors. Les charges utiles sont directement fixées au châssis et doivent être protégées des fortes vibrations générées par ces appareils. Très bruyants, difficiles à piloter manuellement et énergétiquement gourmands, ce sont cependant les vecteurs qui offrent le plus de maniabilité (réactivité, vol stationnaire, précision, décollage sans piste, etc.). Ils sont particulièrement utiles dans les zones encombrées à faible superficie.

Quant aux plateformes à voilures fixes, elles utilisent la vitesse relative de l'air autour de leur voile (différence de pression) pour assurer leur sustentation. Parmi eux, nous trouvons les cerfs-volants [Aber et al., 2008 ; Salle et Meier, 2010 ; Bogacki et al., 2010], les paramoteurs [Dunford et al., 2009 ; Antić et al., 2009 ; Pudelko et al., 2012] et les planeurs [Hassan et al., 2011 ; Udin et Ahmad, 2012] qui utilisent le vent ou l'énergie potentielle de pesanteur liée à leur poids (chute).

Les cerfs-volants, équipés d'une voile souple ou rigide, sont généralement arrimés au sol et leurs charges utiles sont suspendues en équilibre à leurs lignes. Les types de cerfs-volants préférés sont ceux qui offrent une grande stabilité. Nous pouvons citer en exemple les rokkakus, les flowforms et les deltas. Économiques, plus faciles à transporter et à opérer que les ballons, ces vecteurs sont très pratiques pour acquérir des données au-dessus d'un point fixe, mais ils dépendent fortement de la météorologie.

Les paramoteurs sont à voile souple et comme les dirigeables, ils utilisent un moteur pour contrôler leur position sur le plan horizontal. Leur capacité d'emport est très bonne, mais leur contrôle n'est pas évident. Les planeurs, à voile rigide, emportent leur charge utile sous le fuselage. Ils sont faits pour couvrir de la distance et possèdent l'avantage d'être silencieux, mais ils présentent une capacité d'emport assez limitée et il en va de même pour leur contrôle.

Les avions et les ailes delta [Jensen et al., 2008 ; Hugenholz et al., 2013 ; Anders et al., 2013] utilisent de leur côté des moteurs pour générer la vitesse qui leur permettra de se maintenir en l'air. La charge utile est fixée au fuselage. Offrant une bonne capacité d'emport, stables, faciles à automatiser, ces vecteurs incapables de rester immobiles sont adaptés aux zones larges et dégagées.

12. Citation attribuée au capitaine Ferber, l'un des pionniers de l'aviation.



**Figure 2.24** – Exemples de capteurs aériens pouvant être emportés par des plateformes de télédétection rapprochée.

Quant aux vecteurs terrestres [Thrun *et al.*, 2004 ; Di *et al.*, 2008 ; Olson *et al.*, 2013], ils sont regroupés sous le sigle anglophone GV (*Ground Vehicle*) et UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) lorsqu'ils sont automatisés. Ces vecteurs sont très employés dans les missions d'exploration planétaire. Il s'agit généralement de plateformes à roues ou à chenilles, conçues pour pouvoir se déplacer sur des terrains naturels complexes. Ils disposent d'une grande capacité d'emport, mais ne sont pas adaptés pour effectuer des prises de vues au nadir.

Des schémas d'utilisation de ces différents vecteurs aériens et terrestres ainsi que des exemples sont proposés sur les figures 2.22 page 37 et 2.23 page 38. Une comparaison des vecteurs de télédétection rapprochée est donnée en conclusion de la section, table 2.4 page 45.

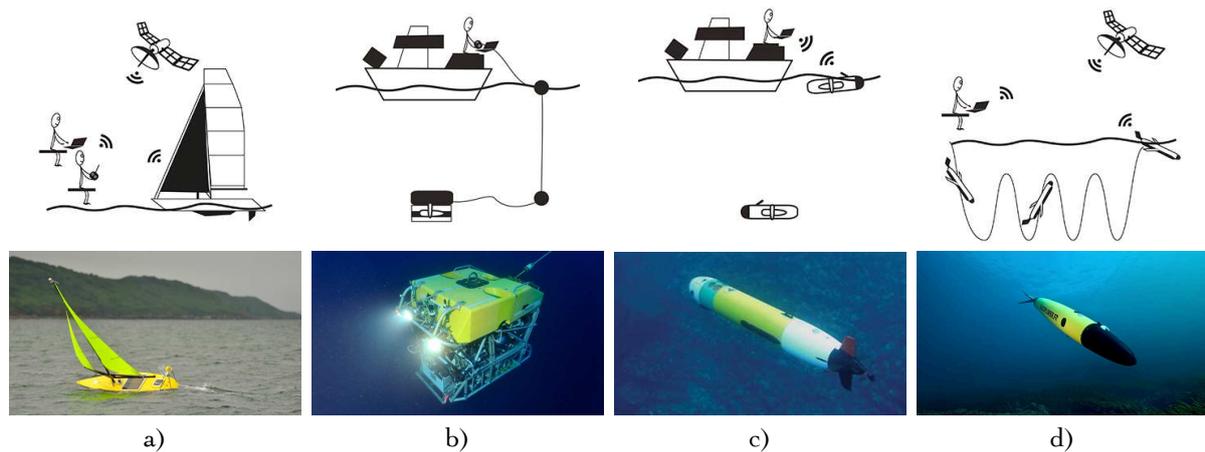
### Capteurs aériens

De manière générale, les charges utiles de télédétection aérienne sont pleinement opérationnelles. Le principal problème est qu'elles ne sont pas du tout adaptées en poids et en taille aux vecteurs de la télédétection rapprochée. Nous commençons à voir arriver sur le marché des charges utiles plus appropriées, mais le secteur est encore loin d'être parvenu à maturité. Des appareils photographiques numériques du commerce sont utilisés en guise de capteurs RGB et proche infrarouge (filtre retiré). Ils offrent une bonne résolution d'image, mais ne sont pas conçus pour être contrôlés à distance ni par un circuit électronique. Ils sont lourds et manquent d'options de réglage. Les capteurs thermiques commencent à être miniaturisés et allégés et il en va de même pour les capteurs multispectraux, ultraviolets et à balayage laser (LIDAR). Mais pour les faire fonctionner, il faut généralement concevoir toute une électronique de contrôle embarquable. Quant aux charges utiles stéréoscopiques, elles sont rares et il est souvent nécessaire de les monter soi-même. Les Flash LIDAR – autrement appelées caméras temps-de-vol – sont en pleine expansion, mais sont encore trop faiblement résolus pour nombres d'applications. D'autres types de capteurs sont souvent emportés par les plateformes aériennes, comme les capteurs de mesures physiques ou chimiques. La figure 2.24 page 39 propose un panel d'exemples de capteurs aériens embarqués sur des robots mobiles.

L'explosion actuelle du marché des drones aériens et le développement des interlogiciels libres (*middleware*) de robotique comme ROS (*Robot Operating System*) ou ROCK (*Robot Construction Kit*) devraient doper le marché des charges utiles de télédétection basse altitude dans les années à venir.

### Plateformes de surface et sous-marines

Les vecteurs de surface [Ferreira *et al.*, 2012 ; Leedekerken *et al.*, 2014] sont désignés par le sigle anglais SV (*Surface Vehicle*) et USV (*Unmanned Surface Vehicle*) lorsqu'ils sont automatisés. Ils reprennent les formes



**Figure 2.25** – Principes d'utilisation [©️📍📍 L. Avanthey et al.] et exemples des plateformes de télédétection rapprochée (suite).  
**Vecteurs de surface.** a) Monocoques ou multicoques, à voile ou à moteur : illustration du robot voilier autonome *Vaimos* réalisé par l'ENSTA Bretagne et l'IFREMER [©️ Captiven].  
**Vecteurs sous-marins.** b) ROV : illustration du sous-marin filoguidé *Victor 6000* de l'IFREMER [©️ Olivier Dugornay]. c) AUV : le sous-marin autonome *Remus 100* [©️📍📍 Hydroïd].  
 d) Planeurs sous-marins : le *SeaExplorer* d'ALCEN (ACSA) [©️📍📍 Yannlepage].

classiques des modèles réduits : monocoques ou multicoques, rigides ou souples. Ils sont propulsés soit par une hélice entraînée par un moteur, soit par une voile qui utilise la force du vent et parfois par une association des deux systèmes. Les modèles les plus courants sont des voiliers monocoques et des catamarans motorisés. Ces vecteurs sont très utiles pour des missions longues dans des zones à faibles fonds.

Sous l'eau, la sustentation est assurée en équilibrant la poussée d'Archimède, principe que nous avons décrit à la section 2.1.2 page 19. Par ailleurs, nous avons relevé dans cette même section et dans la section 2.1.6 page 28 les deux principales difficultés liées à l'immersion de matériel : la résistance à la pression et à la corrosion. Ces deux facteurs contraignants expliquent, entre autres, le fait que les plateformes sous-marines soient beaucoup moins développées et répandues que leurs homologues aériennes. Le sigle anglophone désignant les vecteurs sous-marins est UV (*Undersea Vehicle*), et nous employons UUV (*Unmanned Undersea Vehicle*) lorsqu'ils sont automatisés. Nous pouvons classer ces vecteurs selon trois catégories : ROV, AUV et planeurs.

Le terme ROV (*Remotely Operated Vehicle*) désigne les robots sous-marins filoguidés [Yamamuro et al., 2002 ; Stipanov et al., 2008 ; Sedlazeck et al., 2009]. Profilés pour la stabilité et très maniables, ils sont pilotés et alimentés par le biais de leur câble depuis une plateforme de surface. Les ROV sont généralement dédiés à l'inspection de petites zones d'intérêt (chantiers archéologiques, infrastructures, etc.).

Les robots sous-marins autonomes [Georgiades et al., 2004 ; Williams et al., 2009 ; Gracias et al., 2013] sont, quant à eux, appelés AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), par opposition aux ROV. Équipés de batteries, motorisés et généralement profilés pour la vitesse (forme tubulaire), ils peuvent couvrir des zones beaucoup plus étendues et sont souvent employés pour la cartographie. La plupart utilisent des hélices pour se propulser, mais certains modèles envisagent des techniques bio-inspirées (nageoires, ailes, etc.) avec pour objectif une minimisation de la consommation énergétique et des nuisances sonores. Pour transmettre leur information ou recevoir de nouveaux ordres, ils doivent remonter à la surface.

Enfin, le troisième type de vecteurs sous-marins regroupe les planeurs sous-marins [Eriksen et al., 2001 ; Rudnick et al., 2004 ; Sagala et Bambang, 2011] (*glider* en anglais). Comme les planeurs aériens, ils n'utilisent pas de moteur pour se sustenter et avancer, mais exploitent les propriétés du milieu. En effet, leur principe de déplacement est basé sur la variation de flottabilité à poids constant (ballasts) pour descendre (couler) et monter (flotter) et sur le déplacement d'un poids mobile qui permet d'orienter le planeur et de contrôler sa direction (finesse de vol). En contrôlant les angles de tangages, il est alors possible de générer une trajectoire en dents de scie. De temps à autre, les planeurs sous-marins font surface lors de leurs remontées pour transmettre



**Figure 2.26** – Exemples de capteurs sous-marins pouvant être emportés par des plateformes de télédétection rapprochée.

par satellite les données recueillies et vérifier leur position pour corriger leur direction. Ce sont des vecteurs extrêmement endurants, utilisés pour de très larges zones d'étude, mais leur mode de déplacement n'est pas forcément en adéquation avec tous les instruments de mesure et ils sont sensibles aux forts courants.

La figure 2.25 page 40 présente des schémas d'utilisation pour ces différents vecteurs de surface et sous-marins ainsi que des exemples. Une comparaison des vecteurs de télédétection rapprochée est donnée en conclusion de la section, table 2.4 page 45.

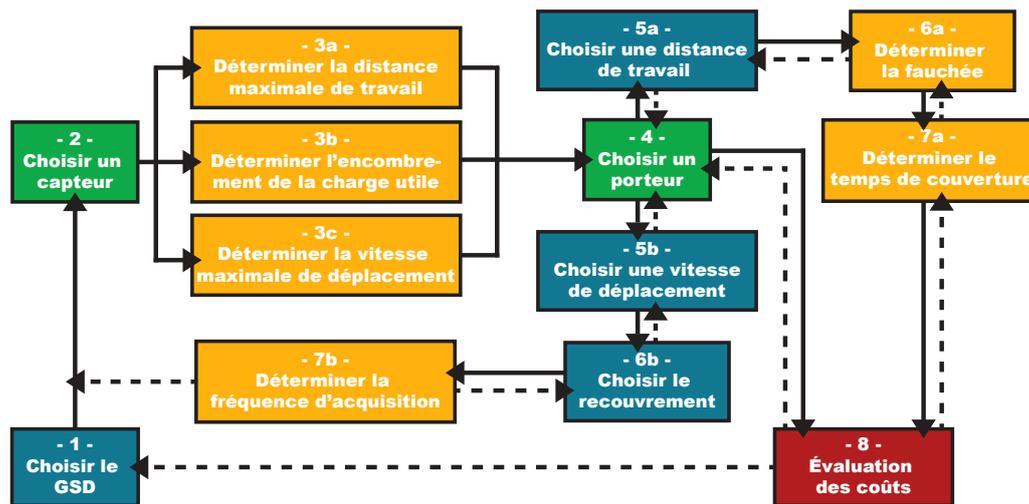
### Capteurs sous-marins

Le constat pour les charges utiles sous-marines est similaire à celui établi pour les charges utiles aériennes, avec les difficultés supplémentaires liées au milieu de travail. Les capteurs sous-marins sont essentiellement dimensionnés pour les bateaux et les robots de taille moyenne et sont quasi inexistantes pour les vecteurs les plus petits. Parmi les capteurs les plus employés (voir figure 2.26 page 41), nous pouvons citer les capteurs acoustiques (échosondeur multifaisceaux, à balayage latéral, etc.) qui profitent de la propagation favorisée des ondes sonores dans le milieu (cf. section 2.1.2 page 19). Ensuite, nous avons à disposition des capteurs RGB et quelques rares capteurs stéréoscopiques. Pour ces deux catégories, les boîtiers étanches sont généralement conçus pour être utilisés par des plongeurs et comme en aérien, les caméras adaptées à ces boîtiers ne sont pas destinées à être contrôlées électroniquement. Nous retrouvons également les capteurs laser de type temps-de-voilà (LIDAR) qui restent assez complexes dans leur utilisation, car il a fallu les adapter au milieu aquatique. Et, nous pouvons noter l'existence de deux ou trois modèles de capteurs à lumière structurée (scanner laser). Ces deux types de capteurs fournissent des données très précises, comme leurs homologues aériens, mais ils ne sont pas encore très adaptés à la mobilité et sont donc pour le moment majoritairement utilisés sur des trépieds fixés sur le fond pour des études d'objets structurés et inertes (infrastructures, épaves, etc.).

### Choisir un capteur et un vecteur

Il existe autant de combinaisons de vecteurs et de capteurs qu'il y a de types de missions. En effet, ce sont les contraintes opérationnelles qui vont permettre de déterminer le choix du couple vecteur-capteur qui convient le mieux à l'étude à mener. Les contraintes de coûts ou de types de mission (zone très locale ou étendue, difficulté d'accès, types de données recherchées, etc.) vont déjà naturellement éliminer une partie des choix envisageables.

Le premier critère à déterminer est la taille de l'échantillon au sol (GSD) : sa valeur dépend de la taille des objets que nous cherchons à observer. Par exemple, d'après Comer *et al.* [1998] nous pouvons considérer qu'il est possible de repérer visuellement un objet sur une image si ce dernier est représenté par 4 à 9 pixels. Et si nous cherchons à l'identifier, 12 à 15 pixels seront alors nécessaires [Johnson, 1958 ; Cai, 2003 ; Torralba, 2009]. Si nous étudions une formation rocheuse dont les blocs mesurent entre 1 et 3 m, un GSD de 7 cm sera en moyenne suffisant. En revanche, si notre intérêt se porte sur les espèces d'algues recouvrant ces rochers (soit des objets d'une dizaine de centimètres) alors nous nécessitons un GSD beaucoup plus fin, soit 8 à 10 mm en moyenne.



**Figure 2.27** – Pour une mission donnée sur une zone d'étude de taille donnée, le choix de la taille de l'échantillon au sol (GSD) va contraindre le choix du couple vecteur-capteur sur la faisabilité en fonction des critères de distance à la cible, de vitesse de déplacement, de temps de couverture et de fréquence d'acquisition [L. Avantbey et al.].

La taille de l'échantillon au sol, associée à un capteur donné, nous permet de calculer la distance maximale à la cible. D'un autre côté, le temps d'exposition du capteur contraint, lui, la vitesse maximale de déplacement. Parmi les vecteurs adaptés au type de la mission, nous sélectionnons pour chacun des capteurs ceux compatibles avec ces deux bornes et dont les capacités d'emport sont suffisantes.

Enfin, il faut fixer une distance de travail effective et choisir une vitesse de déplacement. Le premier paramètre permet de calculer la fauchée puis le temps nécessaire pour couvrir la zone d'étude : si ce temps est trop important, il faut revoir la distance de travail, changer de vecteur ou de capteur, ou revenir sur la taille d'échantillon au sol. Le choix de la vitesse de déplacement, quant à lui, permet de calculer la fréquence d'acquisition minimale pour obtenir le taux de recouvrement voulu entre deux mesures, si cette fréquence est trop haute pour le capteur, il faut revoir la vitesse de travail ou changer de capteur, de vecteur ou de taille d'échantillon au sol.

Nous avons schématisé cette démarche à la figure 2.27 page 42 et nous invitons le lecteur intéressé à consulter [Gademer et al. \[2013\]](#) pour plus de détails.

### 2.2.3 Positionnement de la télédétection rapprochée

Nous avons brièvement dépeint les trois types de télédétections existantes (spatiale, aérienne / sous-marin, rapprochée) et nous avons particulièrement détaillé les outils spécifiques du domaine en plein essor qu'est la télédétection rapprochée. Nous allons maintenant nous interroger sur le positionnement de cette dernière.

Son utilité spécifique ressort dans quatre configurations :

- le besoin d'accéder à une information très haute résolution qu'elle seule peut apporter,
- le besoin d'information sur des zones non accessibles par les autres moyens (sous le couvert des arbres par exemple),
- le besoin d'acquisitions régulières et à la demande sur une zone locale (missions difficiles et coûteuses à réaliser par les autres moyens)
- et enfin, le besoin de dresser rapidement un état des lieux sur une zone locale (après une catastrophe par exemple), possible grâce à la grande réactivité qu'elle offre.

Un tableau de comparaison des méthodes de télédétection est donné à la figure 2.3 page 43. Nous noterons qu'au sein de la télédétection rapprochée, la télédétection *in situ* est plus coûteuse que la télédétection basse altitude. En effet, elle nécessite plus de moyens du fait de la dépendance à des infrastructures spécifiques pour accéder aux zones d'étude (bateaux, etc.) et à des opérateurs qualifiés (équipages, plongeurs, etc.).

<i>Télédétection</i>	<b>Spatiale</b>	<b>Aéroportée / Sous-marine</b>	<b>Rapprochée</b>
<b>Couverture spatiale</b> (Fauchée)	***	**	*
<b>Résolution</b> (GSD)	*	**	***
<b>Temps de revisite</b>	**	*	***
<b>Flexibilité des dates</b>	*	**	***
<b>Sensibilité à la météorologie</b>	**	***	**
<b>Coût</b>	***	**	*

**Table 2.3** – *Tableau de comparaison des méthodes de télédétection* [©️📄 L. Avanthey et al.].

D'un point de vue plus large, la télédétection rapprochée va pouvoir profiter pleinement du développement exponentiel du domaine des mégadonnées (*big data*). Des outils efficaces seront en effet nécessaires pour traiter et stocker la masse des données haute résolution acquises lors des missions, à ce jour encore sous-exploitée.

Il ne faut pas non plus oublier le domaine en émergence des réseaux de capteurs connectés, qui pourront être combinés dans un futur proche avec l'utilisation d'outils collaboratifs. Dans certaines applications spécifiques, ils viendront remplacer l'utilisation des vecteurs de télédétection rapprochée, mais ces derniers pourront toujours avoir une place, notamment pour les prises de vue au nadir, pour la collecte rapide des données acquises (plateformes « butineuses » : survols des réseaux de capteurs pour éviter les équipements de transmissions satellites) ou la mise en place même de ces réseaux (plateformes « cigognes » : déploiement rapide des réseaux de capteurs sur zone), et enfin l'acquisition ponctuelle à la demande de données dans toutes les zones difficiles d'accès ou dangereuses.

### À propos de la réglementation

En France, l'utilisation de plateformes mobiles aériennes de télédétection rapprochée est réglementée par l'arrêté du 11 avril 2012 [Ministère de l'écologie et al., 2012], vols expérimentaux compris. Il est à noter que la photographie aérienne est une activité particulière et ne peut être réalisée sans autorisation.

La réglementation concerne tous les vecteurs de la télédétection rapprochée, sauf les ballons dérivants et les cerfs-volants, ainsi que tous les lieux extérieurs (que le terrain soit privé ou non, de 0 à 150 m d'altitude). Les vecteurs sont classés en sept catégories (de A à G) selon leurs caractéristiques et doivent répondre à certains critères. Les missions doivent s'inscrire dans l'un des quatre scénarios existants (un en agglomération, trois hors agglomérations dont deux en hors-vue). Chaque mission fait l'objet d'une demande spécifique (autorisations, dépôt du manuel d'activité particulière (MAP), etc.).

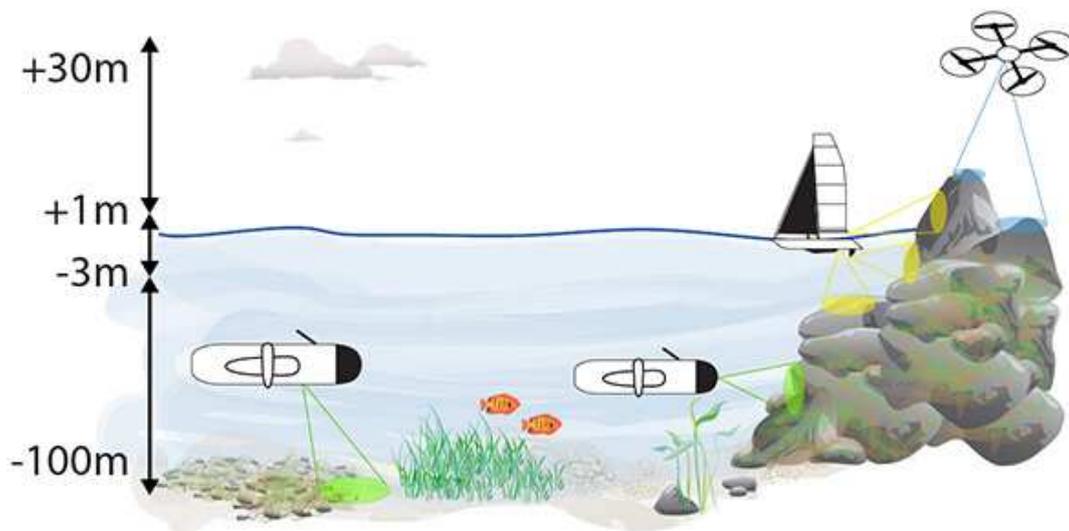
À ce jour, il n'y a pas de réglementation en vigueur dans les espaces intérieurs, au sol, en surface ou dans le milieu sous-marin, hormis les règles concernant les voies navigables (routières, fluviales et maritimes, applicables à toute entité les empruntant).



Notre intérêt dans le cadre de cette thèse porte sur les fonds sous-marins et subaquatiques à faible profondeur (< 100 m). Les contraintes opérationnelles sont très différentes en fonction de la profondeur d'étude, nous avons donc décidé de partager l'espace de travail comme suit :

- un robot sous-marin se chargera de la zone au-delà de trois mètres de profondeur,
- entre la surface et jusqu'à trois mètres de profondeur, le sous-marin manquera de recul, nous utiliserons donc un robot de surface,
- enfin, un robot aérien sera apte à compléter les relevés en apportant des informations sur les parties émergées de la scène (rochers, tombants traversants, etc.).

Dans la section précédente nous avons noté les particularités des milieux sous-marins et subaquatiques et nous avons détaillé dans cette section les outils nous permettant de recueillir sur zone des données haute résolution. Pour terminer notre tour d'horizon, nous aborderons dans la section suivante les différentes méthodes qui permettent d'acquérir des informations tridimensionnelles sur des objets ou un environnement avec une attention particulière pour celles pouvant être employées dans le milieu aquatique, indépendamment des contraintes liées à l'immersion du matériel.



Plateformes de télédétection rapprochée													
<b>Couverture</b>													
Zone locale	***	**	***	**	*	**	***	***	***	**	***	**	*
Zone étendue	-	**	-	***	***	***	*	*	*	**	*	**	***
Sensibilité météorologique	***	***	***	***	***	**	**	*	*	**	**	**	**
<b>Déplacement</b>													
Automatisation	-	**	-	**	**	***	**	**	**	***	**	**	***
Maintien stationnaire	**	*	**	-	-	-	***	***	***	**	**	**	-
Manœuvrabilité	-	*	-	*	*	**	***	***	**	**	**	**	-
Endurance	***	***	**	***	***	**	*	*	**	**	*	*	***
Faible vitesse	***	***	***	**	**	**	***	***	***	***	***	***	**
Proximité	***	***	***	**	**	**	***	***	***	**	***	***	**
Silencieux	***	***	***	**	***	**	*	*	*	**	*	*	***
<b>Charge utile</b>													
Capacité d'emport	**	***	***	***	*	**	*	**	***	***	**	**	*
Stabilité	***	***	**	*	**	**	***	***	***	**	***	**	*
Vibrations	*	*	*	**	*	**	***	***	***	*	*	*	*
<b>Utilisation</b>													
Disponibilité	**	*	***	*	*	***	**	**	**	**	*	*	*
Coût d'achat	*	**	*	**	**	**	***	***	*	**	***	***	***
Coût d'utilisation	***	***	*	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**
Rapidité de déploiement	**	**	**	**	**	**	***	***	***	***	**	**	**
Facilité de déploiement	***	***	***	*	**	*	**	**	***	**	*	*	*
Facilité de pilotage	***	**	***	**	*	**	*	*	**	***	**	**	-
Facilité de réparation	**	**	***	**	**	**	*	**	**	**	*	*	*
Transportabilité	*	**	***	**	**	**	**	***	***	**	**	**	**
Sécurité	***	*	**	*	*	*	*	*	***	***	**	**	**

Table 2.4 – Tableau résumant les caractéristiques des plateformes mobiles d'acquisition pour la télédétection rapprochée



**Figure 2.28** – Exemples de mesures tridimensionnelles par contact. Sur la colonne de gauche, le palpeur d'une machine à commande numérique en cours de numérisation (en haut) et le modèle 3D résultant (en bas) [© Centroid]. Sur la colonne centrale, relevé d'un profil de terrain par des scientifiques à l'aide d'un rugosimètre mécanique à aiguilles (en haut), le profil est ensuite photographié pour le mémoriser et le traiter numériquement (en bas) [© WERU - Wind Erosion Research Unit]. Sur la colonne de droite, photographies de tranches fines (épaisseur de 20 microns) découpées à partir d'un cerveau humain (en haut) pour la reconstruction 3D haute résolution de ce dernier (en bas) par des chercheurs dans le cadre du projet Big Brain [© Institut et hôpital neurologiques de Montréal et Centre de recherche de Jülich].

## 2.3 Moyens d'acquisition d'information tridimensionnelle

La métrologie<sup>13</sup> tridimensionnelle est utilisée dans de très nombreuses disciplines, de l'industrie à la médecine, sans oublier les études environnementales. Dans cette section, nous proposons au lecteur un tour d'horizon des différentes méthodes existantes pour relever des mesures tridimensionnelles sur un objet ou une zone d'étude. Une taxonomie sommaire est donnée en synthèse à la figure 2.35 page 53. Nous aborderons les méthodes de mesures en suivant la distinction selon deux classes fondamentalement différentes : les mesures avec contact et les mesures sans contact.

### 2.3.1 Mesures tridimensionnelles avec contact

Les méthodes de mesure avec contact sont souvent considérées comme invasives. En effet, le procédé de relevé peut venir altérer l'objet ou le milieu étudié selon leur nature. C'est pour cette raison qu'elles ne sont employées que dans des domaines bien particuliers.

L'élément le plus simple et le plus représentatif de cette classe est de loin le contacteur. Il s'agit d'un instrument mécanique que l'on approche de la surface à mesurer jusqu'à entrer en contact en un point, dont on relève alors la position (de manière globale par positionnement GPS par exemple ou bien de manière relative par rapport à la position initiale du contacteur). Pour obtenir la mesure de tous les points voulus, il faut déplacer le contacteur et recommencer la procédure autant de fois que nécessaire. Les relevés sont ensuite placés dans un repère commun pour obtenir une reconstruction tridimensionnelle cohérente de l'objet ou de la scène d'étude. Pour gagner du temps, il est possible d'utiliser dans certaines applications des profilomètres mécaniques. Ces outils contiennent plusieurs contacteurs individuels et permettent ainsi de relever un ensemble de points simultanément (profil ou surface).

Beaucoup moins transportables que ces deux premiers instruments, mais autrement plus perfectionnés, les

13. La métrologie est la science des mesures.



**Figure 2.29** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes transmissives. Sur la colonne de gauche, un télescope (en haut) permet de réaliser une tomographie par muons du volcan de la Soufrière (Guadeloupe) pour en déterminer la densité volumétrique (en bas, coupe obtenue depuis la Roche Fendue) [Lesparre et al., 2012]. Sur la colonne centrale, un scanner à rayons X (en haut) de l'Université de Gand (Ghent University) et un exemple de reconstruction tridimensionnelle volumétrique d'une araignée (en bas) prisonnière de l'ambre depuis environ 55 millions d'années à partir de 800 balayages [Penney et al., 2007]. Sur la colonne de droite, une station sismique portable du réseau EarthScope (en haut). Un peu plus de 1 000 stations de ce genre ont permis d'établir la tomographie du manteau terrestre (en bas) au niveau de la partie Nord-Ouest du continent américain grâce à l'enregistrement d'environ 600 séismes [Sigloch et al., 2008].

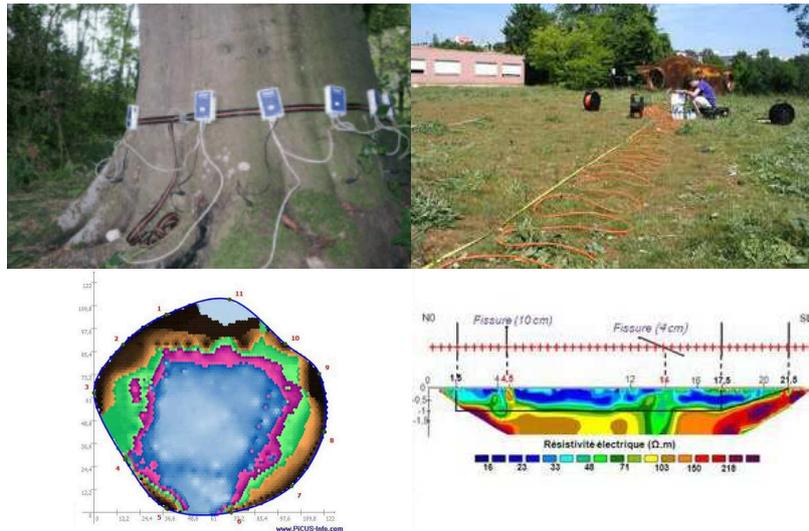
palpeurs sont abondamment utilisés dans l'industrie pour la reproduction, le contrôle ou l'analyse d'objets manufacturés. Ces contacteurs montés sur un bras mécanique à 2 ou 3 axes de libertés sont contrôlés manuellement ou numériquement et palpent les surfaces des objets à mesurer. Ils permettent de fournir des cotes relatives extrêmement précises (la précision peut être inférieure au micron) mais tendent de plus en plus à être remplacés par des méthodes sans contact.

Une dernière méthode de mesure par contact, particulière de par son caractère destructif, consiste à découper en tranches extrêmement fines l'élément à mesurer et à enregistrer le profil ou la surface de chacune des tranches, puis à les recaler dans un repère commun. L'intérêt d'acquérir les informations de surface est de pouvoir accéder non seulement à l'information surfacique de l'élément, comme avec les autres méthodes, mais aussi à l'information volumétrique de ce dernier (la structure de ce qui se trouve à l'intérieur de l'élément). Cette technique de découpage est essentiellement utilisée en biologie et en médecine.

La figure 2.28 page 46 illustre quelques exemples des différentes méthodes de mesures tridimensionnelles par contact que nous venons de présenter.

### 2.3.2 Mesures tridimensionnelles sans contact

La seconde classe de méthodes concerne les mesures sans contact. La littérature propose plusieurs manières de les cataloguer. Certains auteurs, comme Herbort et Wöhler [2011], adoptent une première distinction des méthodes passives et actives, d'autres comme Beraldin et al. [2003], répartissent les méthodes selon le type d'onde utilisé. Pour notre part, nous avons préféré suivre la séparation des méthodes transmissives et réfléchives, proposée par Bouguet et al. [2000], car les données issues de ces deux catégories sont utilisées dans des contextes très différents.



**Figure 2.30** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes transmissives (suite). Sur la colonne de gauche, un arbre équipé avec des capteurs à ultrasons (en haut) pour réaliser une tomographie de son tronc (en bas, coupe du tronc) et établir un diagnostic sur sa santé [ONE, 2015]. Sur la colonne de droite, installation de capteurs (en haut) par des chercheurs du Laboratoire I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Bordeaux) pour établir une tomographie d'un terrain par résistivité électrique (en bas, coupe du terrain) [Genelle, 2012].

### Méthodes de mesures transmissives

Nous regroupons ainsi dans la catégorie des méthodes transmissives toutes les techniques permettant d'avoir accès aux informations volumétriques. Elles reposent sur l'analyse d'énergies (ondes ou particules) après qu'elles aient traversé le milieu à cartographier. Ainsi, à partir des connaissances sur le comportement de propagation de ces énergies, il nous est possible de déduire la structure interne du milieu, autrement inaccessible. En tomographie passive, les énergies utilisées proviennent de sources naturelles (rayonnement solaire ou cosmique, activité tectonique, etc.) alors qu'elles sont générées par des instruments dans le cadre d'une tomographie active. Des exemples de tomographies passives et actives sont proposés sur les figures 2.29 page 47 et 2.30 page 48.

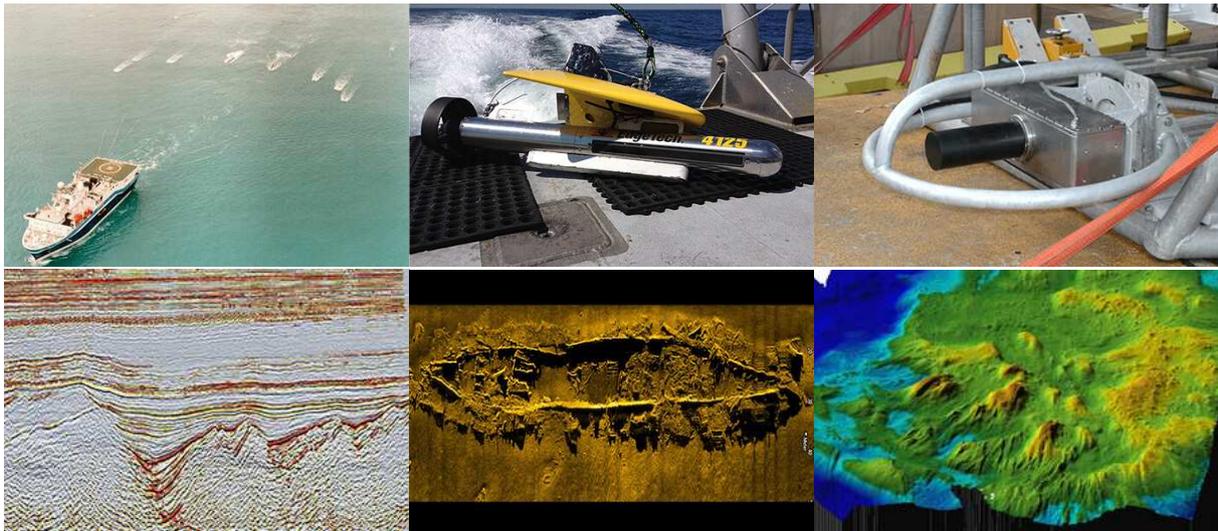
### Méthodes de mesures réfléchives

La catégorie des méthodes de mesures réfléchives relève plus, quant à elle, de la télédétection classique. Ce sont des techniques basées sur l'analyse de l'énergie (naturelle ou générée) renvoyée par les surfaces observées. Nous choisissons ici de les présenter selon le type d'onde utilisé, car les applications qui en découlent sont assez différentes. Nous noterons toutefois que certaines techniques sont transverses et nous les retrouverons donc à plusieurs endroits. Les ondes les plus couramment utilisées sont de natures sismiques, acoustiques et électromagnétiques.

#### a) Ondes sismiques

La prospection sismique par réflexion consiste à provoquer un impact (onde de pression) avec une source (vibreurs mécaniques ou acoustiques, dynamite, canons à air comprimé ou à eau, etc.) et à écouter les échos grâce à un réseau de capteurs (géophones ou hydrophones) pour analyser les structures géologiques. L'onde mécanique va traverser le milieu puis pénétrer le sous-sol et sera alors partiellement réfléchi à chaque changement de couches géologiques. Nous accédons ainsi à des informations à différentes profondeurs : les données obtenues sont volumétriques, similaires en cela à celles relevées par les techniques de tomographie.

La sismique de réflexion est très utilisée dans l'industrie pour localiser les poches d'hydrocarbures dans le sous-sol terrestre ou sous-marin. Un exemple est donné à la figure 2.31 page 49. La fréquence des ondes employées déterminera la capacité de pénétration. Ainsi des ondes à fréquence plus élevée pénétreront moins



**Figure 2.31** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes reflectives, ondes sismiques et sonores. Sur la colonne de gauche, le CGG Alizé (en haut), un bateau de prospection sismique par réflexion pour l'exploration des sous-sols traîne son réseau de capteurs réceptifs (dit « flûtes sismiques ») en surface pour recueillir les échos des ondes provoquées par les dispositifs à air comprimé tractés en profondeur [© CGG]. Image du sous-sol (en bas) extraite des données tridimensionnelles recueillies dans la zone du graben Witch Ground (Mer du Nord) [© CGG, étude CNS-Cornerstone 5D]. Au centre, un sondeur à balayage latéral (en haut) et l'image acoustique reconstruite d'une épave (en bas) [© EdgeTech]. Sur la colonne de droite, le sondeur multifaisceaux Reson SeaBat 8125 (en haut) qui équipe le ROV Victor 6000 et la reconstruction tridimensionnelle (en bas) d'un volcan de boue lors d'une mission en Méditerranée orientale [© Ifremer, campagne Medeco 2007].

profondément dans le sous-sol, mais offriront en contrepartie une meilleure résolution, utile pour la caractérisation des sols ou la sédimentologie.

### b) Ondes acoustiques

Les méthodes basées sur les ondes sonores par réflexion s'appuient fondamentalement sur le principe dit du « temps de vol » : connaissant la nature de l'onde et du milieu de propagation, il est possible de déduire proportionnellement la distance relative séparant le capteur de l'élément observé à partir de la mesure du temps écoulé entre l'émission de l'onde et le retour de l'écho. Dans un souci de clarté, nous pouvons séparer les méthodes acoustiques selon deux genres [CIDCO, 2006] : celles à incidence verticale et celles à incidence oblique.

En incidence verticale, nous trouvons les équivalents des contacteurs qui permettent d'effectuer des mesures ponctuelles. Appelés télémètres dans l'air, ces capteurs sont très utilisés pour détecter la présence et la position d'obstacles en robotique mobile. Dans le milieu aquatique, nous parlons d'échosondeurs monofaisceaux. Ces capteurs ont rapidement remplacé les lignes de sondage manuel à plomb utilisées jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle [Theberge, 1989]. Comme avec les profileurs mécaniques, il est possible d'agrandir la fauchée de la mesure et de relever un profil en une fois en plaçant plusieurs capteurs de ce type les uns à côté des autres (système multitransducteurs).

En incidence oblique, deux outils de mesures représentatifs sont les échosondeurs multifaisceaux et les échosondeurs à balayage latéral. Ces systèmes, équipés de plusieurs transducteurs et jouant sur les directions et la cohérence des ondes, acquièrent directement un profil de mesures. En les déplaçant et en recalant entre eux les profils successifs recueillis, nous pouvons reconstituer un nuage de points (surface). Le lecteur trouvera des illustrations de ces techniques à la figure 2.31 page 49.

De manière générale, nous discernons deux grandes méthodes de mesure [Lurton, 2001 ; Ladroit, 2012] : soit nous estimons les temps d'arrivée des échos selon des angles d'écoute fixes, soit nous estimons les directions d'arrivée de ces échos à des instants donnés de mesure. Ces méthodes peuvent être chacune déclinées sur deux critères : l'amplitude ou la phase (interférométrie).



**Figure 2.32** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes réfléchives – utilisation des ondes électromagnétiques et des techniques de temps de vol. Sur la colonne de gauche, le radar K2Pi embarqué sur un canot (en haut) pour cartographier les berges de l’Allier (en bas) [© IRSTEA, octobre 2012]. Au centre, la scientifique Amy Draut scanne à l’aide d’un LIDAR terrestre (en haut) les berges du fleuve Elwha dans l’état de Washington [© Justin T. Minear] pour produire une carte tridimensionnelle (en bas) de référence avant le retrait de deux barrages en amont [© U.S. Geological Survey (USGS)]. Sur la colonne de droite, le Flash LIDAR TigerEye (en haut) et l’acquisition tridimensionnelle d’un oiseau en vol (en bas) [© Advanced Scientific Concepts (ASC)].

En adaptant les fréquences des échosondeurs, il est possible d’obtenir des résultats différents [Garlan, 2004]. Les fréquences plus hautes offrent une meilleure résolution spatiale, mais disposent d’une mauvaise portée. Elles permettent entre autres d’accéder aux informations concernant les algues et les herbiers. *A contrario*, les fréquences plus basses possèdent une plus grande pénétration au détriment de la résolution spatiale et apportent ainsi des informations sur les couches sédimentaires. Notons que les fréquences les plus basses utilisées, très pénétrantes, nous font alors revenir dans le domaine des ondes sismiques.

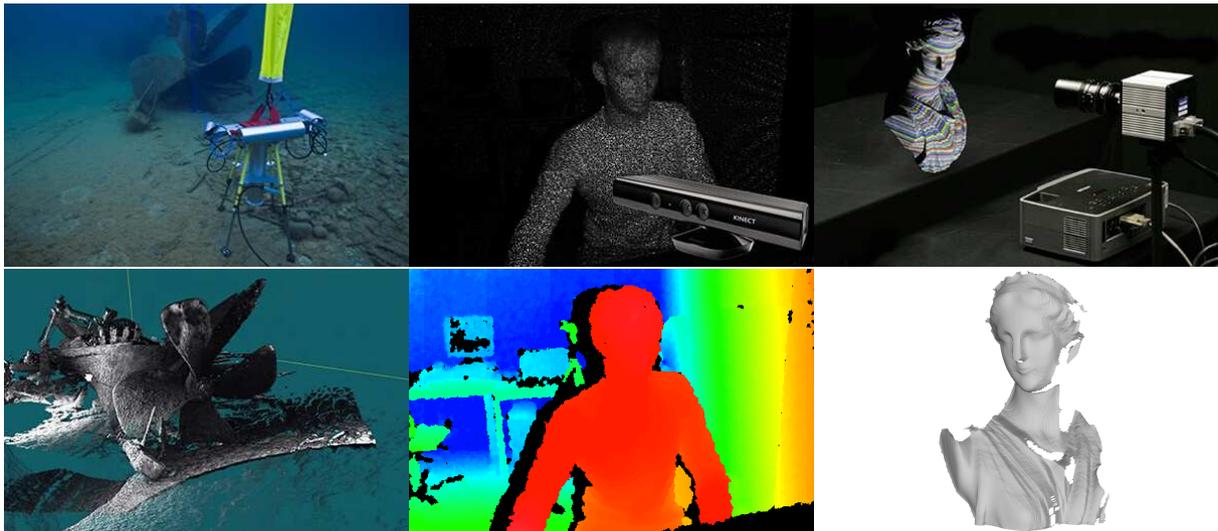
Par ailleurs, certains échosondeurs sont appelés sonars, ce qui signifie qu’en plus des données bathymétriques, ils fournissent une image sonore (sonogramme) de ce qu’ils observent en utilisant l’intensité des échos reçus. Ces images très détaillées vont servir, entre autres, à l’identification des structures.

### c) Ondes électromagnétiques

Il nous reste enfin à discuter du dernier domaine de la catégorie des méthodes de mesures réfléchives : celui des ondes électromagnétiques. Nous discernons deux types majeurs de techniques : temps de vol et triangulation. Avant cela, nous pouvons noter deux autres types de techniques plus marginales : celles qui travaillent avec la cohérence des ondes et celles qui s’appuient sur le contenu d’images optiques (information photométrique, géométrique, etc.). Les premières sont basées sur le principe d’interférométrie, les secondes sont essentiellement regroupées sous le nom anglais de *Shape from X*<sup>14</sup> (« structure à partir de X »).

Le principe de temps de vol pour les ondes électromagnétiques est le même que celui que nous avons présenté pour les ondes acoustiques. Parmi les technologies d’écholocation dans ce domaine, nous pouvons citer les radars qui emploient les ondes radioélectriques, mais aussi tous les outils qui utilisent des lasers (visible ou infrarouge). Ces derniers vont du simple télémètre laser (mesure en un point), au LIDAR (balayage d’un télémètre sur une dimension), et au LIDAR 2D (balayage d’un télémètre sur deux dimensions). Quant au Flash LIDAR (ou caméra temps-de-vol), en utilisant une impulsion lumineuse plutôt qu’un faisceau ponctuel, il est capable de capturer instantanément (sans balayage) la scène observée. Bien que la densité et la résolution du nuage de points obtenu soient inférieures à celle des systèmes à balayage, les Flash LIDAR sont très utiles pour recueillir

14. Nous trouvons également dans la littérature le nom *Depth from X* (« profondeur à partir de X »).



**Figure 2.33** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes réfléchives – utilisation des ondes électromagnétiques et des techniques de triangulation par lumière structurée. Sur la colonne de gauche, le scanner laser sous-marin ULS-500 de la société 2G Robotics (en haut) utilisé pour cartographier l'épave du Monobansett dans la Thunder Bay (Michigan, États-Unis) et le nuage de points résultant (en bas) [© NOAA]. Au centre, le motif de points infrarouges projeté sur la scène par la Kinect de Microsoft (en haut) et la carte de profondeur créée (en bas) à partir de laquelle il est possible d'extraire un nuage de points [© Kinect RGB Demo]. Sur la colonne de droite, un buste de statue illuminé avec des couleurs par un projecteur Infocus DLP et numérisé par une caméra Photron (en haut) ainsi que le nuage de points reconstitué (en bas) [Narasimhan et al., 2008].

l'information d'une scène en mouvement. Des exemples sont illustrés à la figure 2.32 page 50.

Quant aux techniques de triangulation, elles reposent essentiellement sur deux principes : la reconstruction par lumière structurée (principe actif) et la reconstruction stéréoscopique (principe passif). Le premier principe fonctionne avec un système émetteur-récepteur. L'émetteur, souvent un laser visible ou infrarouge, projette une structure (un point, une ligne ou encore un motif) sur une scène observée par le récepteur (caméra). Les équations trigonométriques et la connaissance de l'angle qui sépare le récepteur de l'émetteur permettent alors de déduire la position tridimensionnelle des points illuminés. Nous trouvons dans cette catégorie les scanners laser qui remplacent peu à peu les palpeurs dans l'industrie et sont très utilisés pour faire des mesures sur les ouvrages d'art. Leur portée et leur précision sont corrélées à l'angle et à la distance qui séparent le récepteur de l'émetteur. Des exemples de triangulation par lumière structurée sont proposés à la figure 2.33 page 51.

Le second principe de triangulation, la reconstruction stéréoscopique, s'appuie sur l'observation d'une même scène selon différents points de vue. La connaissance de l'écart qui sépare deux points de vue distincts permet de retrouver la profondeur d'un même objet observé. Lorsque nous appliquons ce procédé pour quelques points au sein de l'image, nous obtenons un nuage de points épars, mais lorsque nous traitons de cette manière tous les pixels de l'image, nous parlons alors d'un nuage de points dense. La technique la plus minimaliste consiste à s'appuyer sur deux points de vue différents : c'est la reconstruction stéréoscopique binoculaire. Mais certaines parties de la scène observée peuvent être occultées sur au moins l'un des deux points de vue (parties d'objets cachées par d'autres objets placés devant). Pour remédier à cela, il est possible d'utiliser un grand nombre de points de vue différents. Cette technique est appelée reconstruction stéréoscopique multivues (MVS - *multiview stereo*) et permet d'obtenir des reconstructions très complètes. Une troisième technique utilise elle aussi de nombreuses vues, mais se base sur une approche différente : les vues sont séquentielles (trajectoire) et nous suivons à travers les couples d'images consécutifs un certain nombre d'objets qui nous permettent de produire au fur et à mesure un nuage de points épars. Ce procédé est connu sous son nom anglais : *Structure From Motion* (SFM - « Structure à partir du mouvement »). Le lecteur trouvera des illustrations de triangulation par stéréoreconstruction à la figure 2.34 page 52.



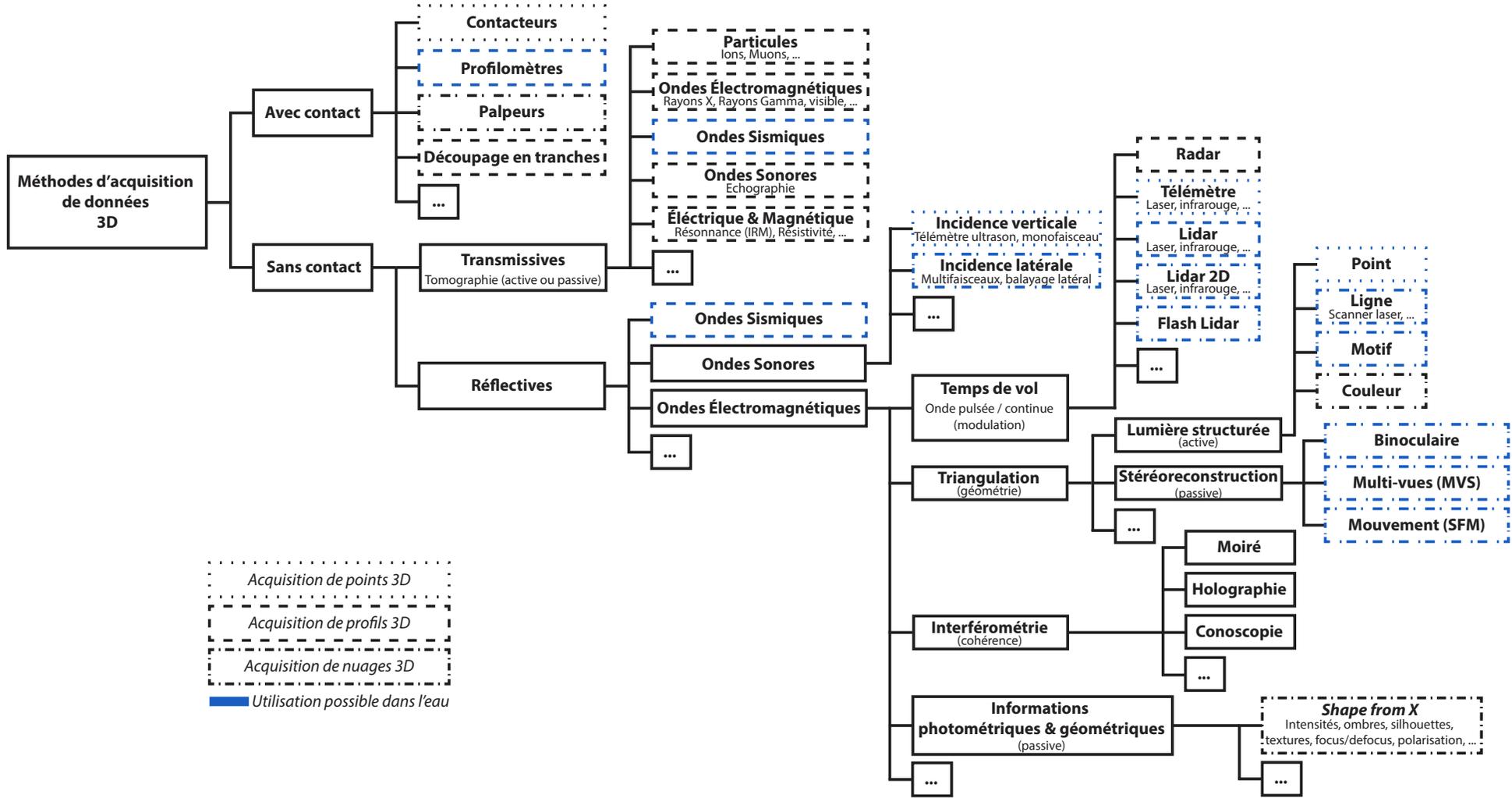
**Figure 2.34** – Exemples de mesures tridimensionnelles sans contact par des méthodes réfléchives – utilisation des ondes électromagnétiques et des techniques de triangulation par stéréoscopie. À gauche, une reconstruction dense binoculaire (en bas) à partir d'une paire stéréoscopique (en haut) [© BoofCV, bibliothèque de vision par ordinateur en temps réel]. Au centre, illustration de la technique de stéréovision multivues (MVS) (en haut) pour reconstituer un nuage de points dense et complet (en bas) d'un fragment de la frise du Trésor des Marseillais avec les outils photogrammétriques Pastis-Apero-MicMac de l'IGN [© Laboratoire MAP-GAMSAU]. À droite, illustration de la technique de structure par le mouvement (SfM) (en haut) et reconstruction obtenue (en bas) de la Chapelle Notre dame de Buisante au nord de Lyon avec le logiciel visualSfM, projet présenté lors du concours "T5 - The Model" (Trust Time Trial) organisé par 3DRobotics [© mydrone].



Parmi les méthodes que nous avons abordées tout au long de cette section, seule une fraction d'entre elles sont envisageables pour une utilisation sous-marine. En effet, les techniques de la classe des mesures par contact sont généralement écartées à cause de la difficulté d'accès au milieu (se référer à la section 2.1.1 page 18), de leur caractère intrusif et de leur capacité de couverture trop faible (relevés très ponctuels). Dans la classe des mesures sans contact, les méthodes basées sur les ondes sonores réfléchives sont de loin les plus employées du fait que leur propagation soit favorisée par le milieu (cf. section 2.1.2 page 19). Elles offrent une capacité de couverture intéressante devant la taille des zones à étudier en cartographie sous-marine. Efficaces pour obtenir la bathymétrie et les macro-caractéristiques des habitats, elles renseignent néanmoins peu sur les caractéristiques fines, comme l'occupation des sols, et ne permettent pas l'identification des espèces.

Les techniques basées sur les ondes électromagnétiques, quant à elles, offrent l'accès à une reconstruction très dense des fonds marins, mais sont en contrepartie réservées à des observations très locales, la propagation de ces ondes étant cette fois-ci desservie par le milieu (voir section 2.1.4 page 25). Les méthodes fonctionnant sur le principe de temps de vol sont complexes dans leur utilisation. Parmi les autres techniques, basées sur la triangulation, qui comportent les échosondeurs, la triangulation par lumière visible structurée et la triangulation par stéréoreconstruction passive, nous nous intéresserons plus particulièrement dans le cadre de cette thèse à la dernière.

En effet, nous cherchons à obtenir une forte densité pour nos mesures, ce pour quoi les capteurs optiques employés pour la reconstruction stéréoscopique sont plus adéquats et bien que les scanners laser (lumière structurée) soient plus efficaces que les caméras par faible illumination ou forte turbidité [Gillham, 2011], ils ne sont pas adaptés pour l'instant à une utilisation sur un vecteur d'acquisition mobile (voir section 2.2.2 page 41). L'utilisation de caméra nous permettra également d'accéder à l'information colorimétrique, ignorée par les autres systèmes d'acquisition de données tridimensionnelles et cependant très utile pour la distinction et l'identification.



## *Pour conclure*

Nous bornerons là cet exposé sommaire sur le contexte de nos recherches. Nous avons vu dans ce chapitre que pour acquérir des données très haute résolution, il faut travailler au sein même du milieu d'étude, ce qui relève du domaine de la télédétection rapprochée (section 2.2 page 33). L'utilisation de plateformes mobiles automatisées pour réaliser la couverture des zones d'intérêt permet d'apporter une systématisation des mesures et de garantir le caractère fronto-parallèle des données, deux critères difficiles à obtenir par des relevés manuels.

Les robots d'exploration hétérogènes (sous-marin, de surface, aérien) présentent de nombreux atouts opérationnels pour la cartographie littorale en faible profondeur en fonction de la zone d'action concernée qui peut se situer en profondeur, proche de la surface ou être émergée.

Dans cette thèse, nous nous consacrerons plus particulièrement à la partie concernant l'étude des terres immergées. Le lecteur pourra consulter les travaux déjà réalisés par notre équipe sur la partie terrestre (études de biodiversité sur des zones naturelles [Gademer, 2010; Beaudoin *et al.*, 2014; Gademer *et al.*, 2014, ...] ou études géophysiques [Petitpas, 2011, ...]). Nous noterons qu'un travail futur sera nécessaire pour fusionner les deux modèles, aérien et sous-marin, ainsi obtenus : en effet, l'interface qui les sépare est une zone très dynamique, ce qui fait du problème de recalage des modèles un problème non trivial.

La densité des mesures tridimensionnelles que nous cherchons à obtenir peut nous être apportée par l'emploi d'une charge utile optique stéréoscopique (section 2.3 page 46). Cette dernière nous offrira en outre l'accès à la couleur de la scène, information non négligeable pour aider à la distinction et à l'identification des objets qui la composent.

Les problématiques que nous allons devoir traiter proviennent essentiellement des difficultés liées au milieu aquatique en faible profondeur que nous avons détaillées à la section 2.1 page 18 : dynamisme de l'environnement, localisation des mesures, pression, étanchéité, corrosion, couleurs, netteté, contraste, détails, portée, etc.

Nous noterons que les travaux que nous allons présenter dans ce mémoire se placent dans le cadre d'un éclairage naturel. L'ajout de lumières artificielles est tout à fait envisageable, mais dans un premier temps, nous avons voulu restreindre le nombre de contraintes à traiter. En effet, un bloc d'éclairage implique, entre autres, des questions d'étanchéité, d'alimentation, de puissance, d'angle et de distance d'observation [Boutan, 1900; Rives *et al.*, 1978].

Dans le chapitre suivant, nous abordons le cœur de nos travaux sur l'acquisition, la reconstruction et la fusion de données tridimensionnelles sous-marines.



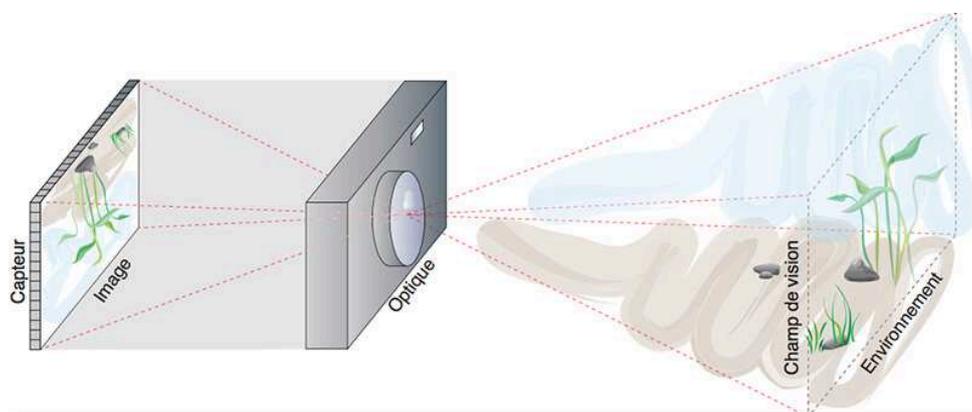
## Nuages de points sous-marins

*« Le savant doit ordonner ;  
on fait la science avec des faits, comme une maison avec des pierres ;  
mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. »*

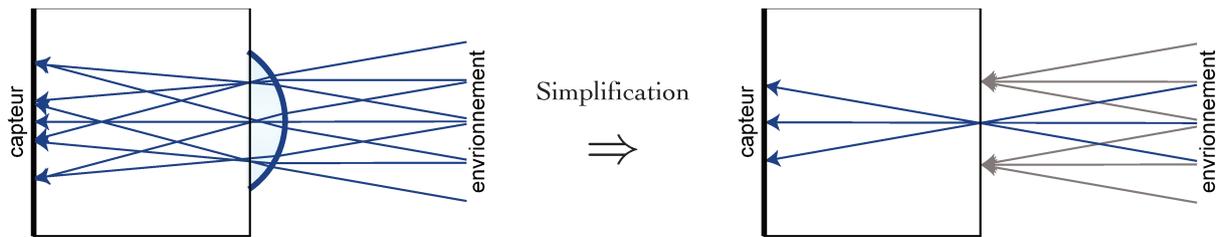
Partie IV La Nature, chapitre IX Les Hypothèses en Physique  
*La Science et l'Hypothèse* – Henri Poincaré

### 3.1 Stéréoreconstruction sous-marine : problématiques

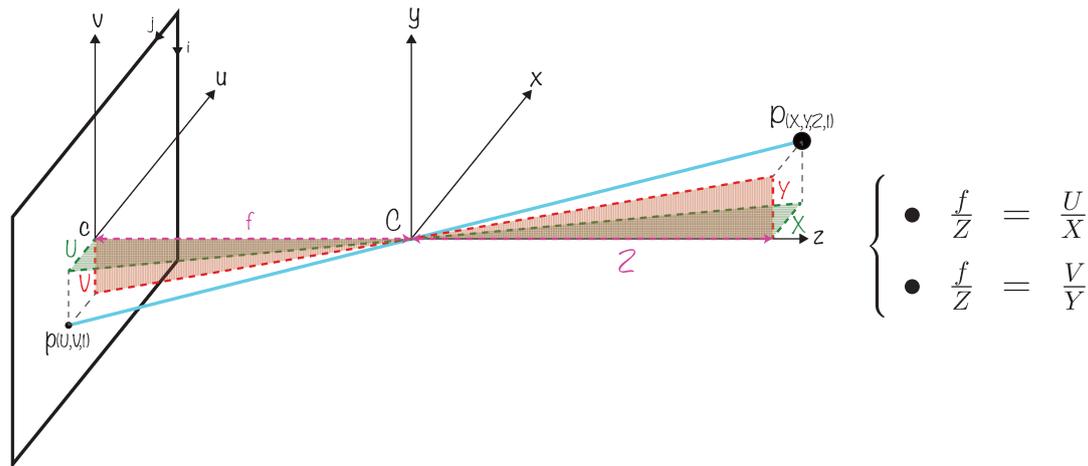
Le cœur des travaux présentés dans ce mémoire porte sur la reconstruction tridimensionnelle dense de scènes sous-marines ou subaquatiques peu profondes, éclairées sous une lumière naturelle. Au cours du chapitre 2, nous avons expliqué que pour obtenir des mesures denses dans cet environnement, nous pouvons recourir à l'utilisation des capteurs optiques (bande du visible) et aux méthodes de stéréoreconstruction (section 2.3 page 46). Ces dernières permettent d'extraire un nuage de points tridimensionnels à partir d'au moins deux photographies offrant des angles de vue différents sur une même scène (triangulation ou trilatération passive en fonction de l'utilisation des angles ou des distances pour déterminer la profondeur). Avant d'exposer les problématiques propres à l'utilisation de ces outils dans le milieu sous-marin et la manière dont nous les appréhenderons, nous allons aborder plus en profondeur les principes fondateurs de la stéréoreconstruction.



**Figure 3.1** – *Le système caméra* [© L. Avantbey et al.] : les cellules du capteur reçoivent des quantités de lumière en provenance de l'environnement qui sont transformées en valeurs numériques (pixels) pour constituer une image.



**Figure 3.2** – Le système basé sur les lentilles (à gauche) est complexe, c’est pourquoi pour pouvoir étudier la relation entre le repère image et le repère réel, il est courant de le simplifier par le modèle du sténopé (à droite) : tous les rayons passent en un unique point, autrement dit, chaque pixel de l’image possède une source unique dans le repère réel [©️📷 L. Avantbey et al.].



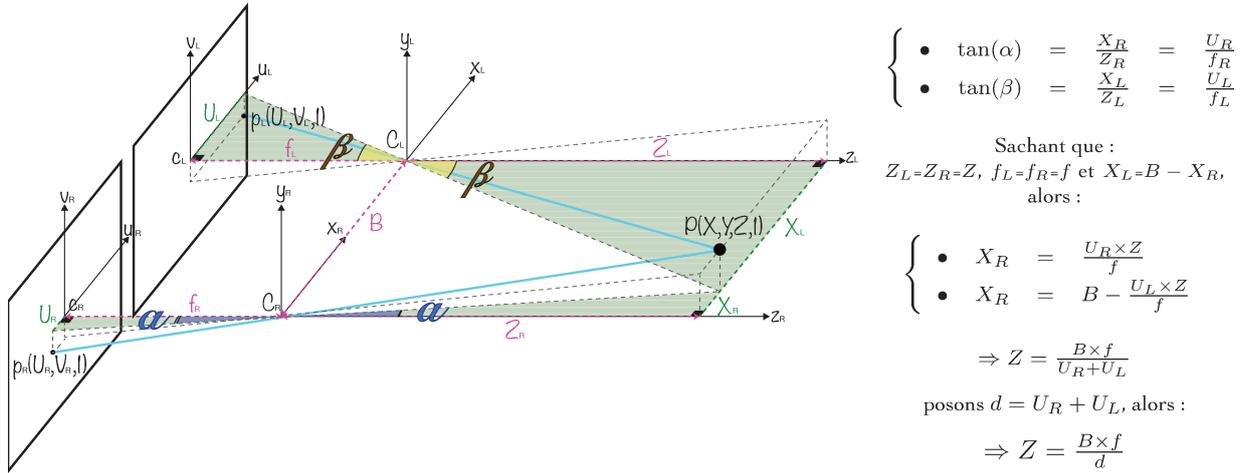
**Figure 3.3** – Relations entre les coordonnées tridimensionnelles d’un point réel et les coordonnées bidimensionnelles de son projeté dans le modèle du sténopé [©️📷 L. Avantbey et al.]. Soient le repère réel  $C(x, y, z)$  relatif à la caméra (dont  $C$  est le centre optique) et le repère image associé  $c(u, v, 1)$  ( $c$  correspondant à la projection du centre optique), soient  $P(X, Y, Z, 1)$  un point réel et  $p(U, V, 1)$  sa projection en coordonnées homogènes ; les segments  $U$  et  $X$  dans le plan  $xCz$  (ou  $ucz$ ) et respectivement les segments  $V$  et  $Y$  dans le plan  $yCz$  (ou  $vcz$ ) sont parallèles. Le théorème de Thalès (intercept theorem, en anglais) nous permet alors d’affirmer que les triangles formés à partir de ces segments et du sommet commun  $C$  sont semblables, ce qui implique que leurs côtés sont proportionnels.

### 3.1.1 De la 2D à la 3D : principe de la stéréoreconstruction

Pour comprendre comment retrouver l’information tridimensionnelle à partir d’images bidimensionnelles, il faut d’abord comprendre comment se forment ces dernières. Les rayons lumineux en provenance de l’environnement sont concentrés par la lentille<sup>1</sup> de la caméra et projetés sur le capteur. Composé d’un grand nombre de cellules photoréceptrices, ce dernier traduit les intensités de lumière reçues en valeurs numériques (pixels) pour restituer l’image acquise (figure 3.1 page 55). Retrouver la position tridimensionnelle d’un objet représenté sur un pixel, c’est connaître la relation entre le repère réel et le repère image : il faut en effet pouvoir retracer jusqu’à leurs origines (objets réels) les chemins des rayons lumineux ayant pénétrés dans l’appareil de mesure. Et pour ce faire, il est nécessaire de modéliser la lentille. Or il s’agit là d’un élément complexe. C’est pourquoi, de la même manière que nous approximations un objet par un point (masse) en physique pour comprendre son comportement lors de l’application de forces (*point-mass discretization*), nous pouvons simplifier en optique notre lentille par un modèle sténopé (*pinhole* – trou d’épingle – en anglais) en posant l’hypothèse que tous les rayons de lumière perçus par le capteur forment des lignes droites et passent par un point unique : le centre optique (figure 3.2 page 56).

Le schéma de la figure 3.3 page 56 nous montre comment la théorie des triangles semblables (*similar triangle theory*) nous permet de décrire le modèle sténopé par un système linéaire [Faugeras, 1993]. Si nous connaissons

1. Dans un souci de précision, nous devrions parler ici de *lentilles*, au pluriel, car les objectifs en possèdent généralement une dizaine.

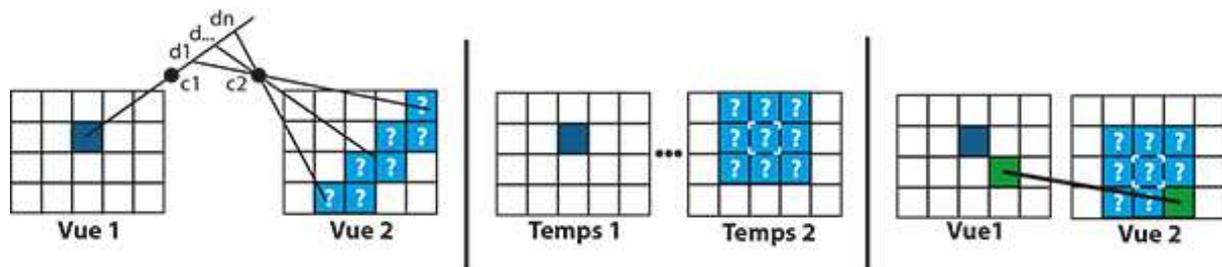


**Figure 3.4** – Dans le cas particulier où les plans des caméras sont alignés, alors la géométrie est simplifiée [© L. Avanthey et al.]. En utilisant les formules trigonométriques des triangles rectangles (en vert sur le schéma) nous pouvons relier l'information de profondeur  $Z$  à la base  $B$  (écart entre les caméras) et à la disparité  $d$  (écart entre les projetés).

la longueur focale de la caméra (distance qui sépare le centre optique du capteur – paramètre dit *intrinsèque*, c'est-à-dire propre au capteur) et que nous partons des coordonnées tridimensionnelles pour trouver les coordonnées bidimensionnelles, le système se résout facilement (2 inconnues, 2 équations indépendantes). En revanche, retracer le chemin inverse (c'est-à-dire retrouver les coordonnées réelles à partir des coordonnées images) n'est pas possible avec les données dont nous disposons : la projection nous a fait perdre l'information de profondeur, le système est sous-déterminé (3 inconnues, 2 équations indépendantes). Le modèle sténopé nous permet seulement d'affirmer que le point réel se trouve sur la droite unique qui passe par le pixel de son projeté et le centre optique et dont l'équation nous est donnée par le système linéaire.

C'est pour cela que nous avons besoin au moins d'une deuxième image. En effet, un nouvel angle de vue sur notre objet nous donne accès à une nouvelle droite. Le point d'intersection des deux droites obtenues correspond alors à la position tridimensionnelle réelle de l'objet. Mais les équations de ces droites sont indépendamment exprimées dans le repère de leur caméra respective. Pour pouvoir calculer l'intersection, il nous faut connaître la position et l'orientation des caméras dans un repère global ou la position et l'orientation de l'une des caméras par rapport à l'autre (paramètres dits *extrinsèques*) : il s'agit du problème d'estimation de pose (*pose estimation problem*). Cette information peut être mesurée physiquement, mais dans le cas où elle n'est pas accessible il est alors possible d'estimer la géométrie qui relie les différentes images entre elles – appelée *géométrie épipolaire* [Hartley et Zisserman, 2003] – directement à partir de ces dernières. Cependant, la connaissance de la géométrie épipolaire ne nous permet de reconstruire la scène tridimensionnelle qu'à un facteur d'échelle près. Pour fixer cette incertitude, nous devons connaître la taille réelle d'un objet présent sur la zone d'étude. C'est une pratique courante en photogrammétrie où la zone est alors équipée avec des objets étalons [Matthews, 2008].

Une configuration particulière est utilisée depuis les origines de la photogrammétrie pour simplifier la géométrie du système stéréoscopique [Kalantari et Kasser, 2008] : les caméras sont placées dans le même plan et leurs axes optiques sont parallèles. La figure 3.4 page 57 nous montre alors qu'en utilisant les fonctions trigonométriques des triangles rectangles et en connaissant la distance qui sépare les caméras (facteur d'échelle), nous pouvons directement relier l'information de profondeur d'un objet à l'écart entre ses projetés sur les différents points de vue. Cet écart, appelé *disparité*, se traduit selon un seul axe lorsque les caméras sont alignées [Corke, 2011]. Plus l'objet est proche, plus la disparité sera grande et inversement. Nous noterons qu'au-delà d'une certaine distance, la disparité associée tombe à zéro : elle n'est plus mesurable. Dans le cas où le système stéréoscopique employé ne correspond pas au cas standard que nous venons de décrire, il est possible de s'y replacer artificiellement en appliquant une transformation sur les images. Ce procédé s'appelle « *rectification épipolaire* ».



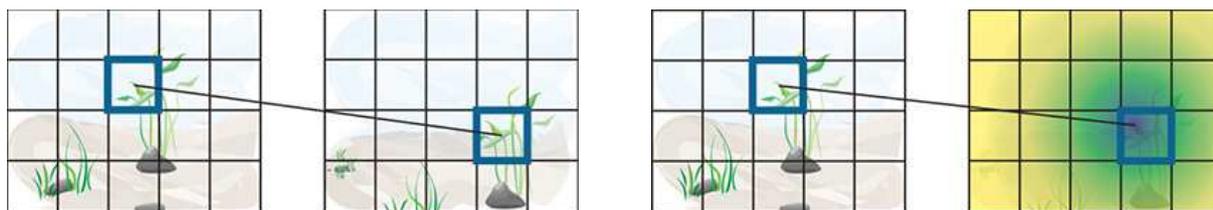
**Figure 3.5** – Schématisation de trois stratégies permettant de réduire la complexité du problème d'appariement dense [©13 L. Avanthey et al.]. On recherche le correspondant du pixel bleu marine, les pixels bleu clair représentent l'espace réduit des candidats, et les pixels verts sont déjà appariés. Critère géométrique (à gauche) : les candidats sont cantonnés autour de la ligne épipolaire (reprojection des différentes profondeurs possibles). Critère spatio-temporel (au centre) : les candidats se trouvent à proximité de la position reportée du pixel à appairier. Critère de voisinage spatial (à droite) : les candidats sont regroupés dans le voisinage du correspondant du pixel qui se trouve à proximité de celui à appairier.

### 3.1.2 Reconstruction dense

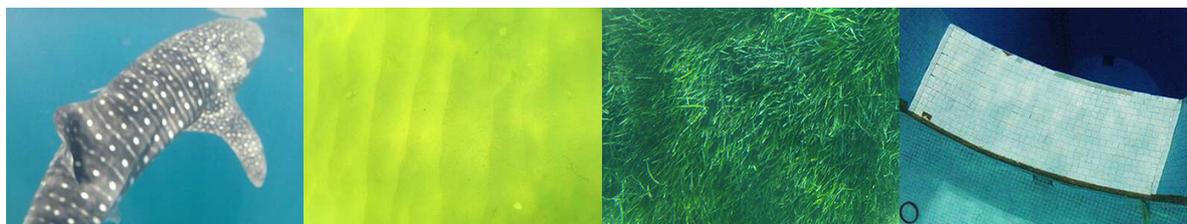
Le problème clef de ce que nous avons précédemment expliqué sur la reconstruction tridimensionnelle réside dans la capacité à identifier un même objet sur les différents points de vue où il est représenté afin de pouvoir mesurer sa disparité. Nous pouvons distinguer deux approches très différentes pour obtenir une reconstruction dense : la première cherche à créer un modèle tridimensionnel dense à partir d'un nuage épars de points et la seconde cherche à créer d'un nuage dense de points par l'appariement du plus grand nombre de pixels possible. La première méthode propose une interpolation de la densité. Seuls quelques pixels sont appariés de manière fiable pour produire un nuage de points épars. Ce dernier est alors maillé afin de former un modèle, sur lequel on plaque une texture générée à partir des images pour le compléter. La précision du modèle dense ainsi obtenue dépend du nombre de points contenus dans le nuage épars. La seconde méthode, quant à elle, offre une granularité de la densité beaucoup plus fine en créant directement des nuages denses sans interpolation.

Rappelons que plus une reconstruction tridimensionnelle est dense, plus il est possible de visualiser, distinguer, identifier et dénombrer les structures au sein de l'environnement étudié. Or, d'un point de vue algorithmique, plus le nombre de pixels à appairier est grand, plus le problème devient complexe. En effet, chaque objet représenté par un pixel sur une image peut potentiellement correspondre à n'importe quel pixel sur une autre image, si toutefois il s'y trouve. L'utilisation d'algorithmes *brute-force* (test systématique de toutes les combinaisons possibles) pour effectuer un tel appariement excède de loin les capacités de calculs des unités standards (complexité quadratique uniquement pour le parcours). Afin de rendre ce problème solvable, de nombreuses stratégies ont été proposées pour réduire l'espace des candidats avant d'effectuer les mesures de similarité. Nous avons illustré les trois principales sur la figure 3.5 page 58.

La stratégie la plus utilisée en stéréoreconstruction binoculaire ou multivues se base sur un critère géométrique [Faugeras, 1993; Hartley et Zisserman, 2003]. La géométrie épipolaire (qui relie les images entre-elles) permet d'affirmer que le correspondant d'un pixel, s'il existe, doit se trouver sur la droite épipolaire, c'est-à-dire parmi les pixels correspondants à l'intersection avec le plan image de toutes les droites de reprojection passant par le centre optique et coupant la droite réelle définie par le pixel source (profondeurs potentielles  $d_i$  du schéma à gauche de la figure 3.5 page 58). Une autre stratégie s'appuie sur un critère spatio-temporel [Forsyth et Ponce, 2003; Szeliski, 2010] : entre deux vues prises à deux instants différents et séparées par un petit déplacement spatial, le correspondant d'un pixel se trouvera dans la seconde image à proximité de sa position initiale dans la première image. Basée sur le principe de suivi de cible (*tracking*), cette stratégie est essentiellement utilisée par les algorithmes SFM (*Structure From Motion*). Une dernière stratégie repose sur un critère de voisinage spatial. Si un pixel se trouve à proximité d'un autre, leurs correspondants respectifs le seront probablement. Introduite par Lhuillier et Quan [2000], cette approche, basée sur les techniques de croissance de régions à partir d'un



**Figure 3.6** – L'appariement pixellique (à gauche) est source d'erreurs sur la mesure de profondeur, car les images sont une discrétisation de l'espace, on lui préfère généralement un appariement subpixellique (à droite) [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.7** – Ces photographies illustrent des exemples de motifs répétitifs pouvant mettre en échec le processus d'appariement [© L. Avantbey et al.]. De gauche à droite : tâches de la robe du requin-baleine (Mer Rouge, 2012), sable sculpté par le ressac des vagues (Noirmoutier, 2015), feuillage d'herbiers de posidonies dans le courant (Lavandou, 2014), carreaux des infrastructures humaines (Charenton, 2015).

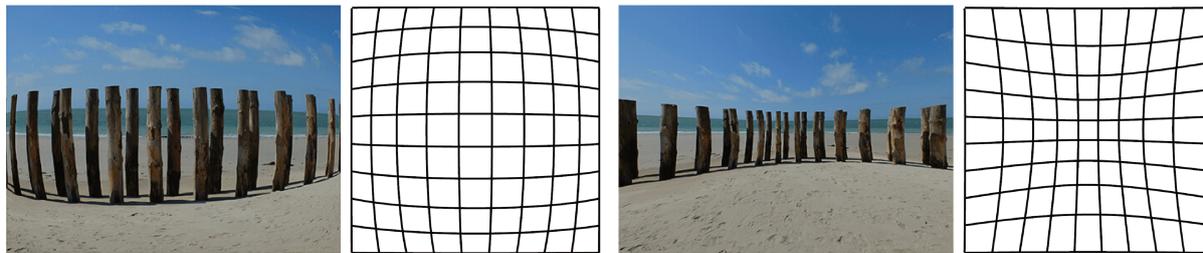
sous-ensemble de points appariés, a notamment été employée pour des images à forte disparité [Tang et al., 2002 ; Strecha et al., 2003 ; Kannala et Brandt, 2007].

Lorsque les méthodes choisies nécessitent la sélection d'un sous-ensemble de points (création d'un nuage épars, stratégie de voisinage spatial, estimation de la géométrie épipolaire pour la stratégie géométrique, etc.), les points possédant de grandes caractéristiques distinctives sont privilégiés. En effet, ces derniers présentent très probablement ces mêmes caractéristiques distinctives sur les autres images où ils se trouvent, ce qui permet de faciliter leur mise en correspondance. C'est le rôle des détecteurs de sélectionner ces points singuliers. Les descripteurs permettent ensuite de caractériser ces points par différents critères, dont leur voisinage, ce qui permet leur comparaison par similitude. Les meilleurs candidats sont appariés. Il existe un très grand nombre de détecteurs-descripteurs, chacun possédant leurs spécificités en terme de précision, de répartition spatiale et de répétabilité (invariance aux différentes transformations ou à la qualité des images) [Gauglitz et al., 2011].

### 3.1.3 De la théorie à la pratique

Nous avons abordé jusqu'ici les principes théoriques, nous allons à présent discuter des contraintes réelles que nous devons prendre en compte dans notre système. Tout d'abord, une image correspond à une discrétisation de l'espace réel (échantillonnage). Ainsi, il est peu probable que le point réel que nous observons tombe exactement sur le centre du pixel identifié comme son projeté. Il est alors d'usage de procéder à un affinement subpixellique de l'appariement [Corke, 2011] afin d'améliorer la précision de la mesure de profondeur (granularité du système). Il s'agit de trouver les coordonnées de l'extremum du paraboloïde de similitude en s'aidant du voisinage du pixel identifié comme correspondant : la disparité est alors décimale (figure 3.6 page 59).

Pendant, le processus d'appariement en lui-même n'est pas exempt d'erreurs. Le correspondant peut par exemple être situé hors de la zone de recherche et le pixel peut donc se retrouver apparié avec un proche voisin. Autre situation problématique : la présence de motifs répétitifs ou très ressemblants (voir figure 3.7 page 59), les courbes de similitude présentent dans ce cas de nombreux maximums et l'appariement peut s'en retrouver faussé. Le problème de ces appariements erronés peut être abordé de deux manières : soit on évite de les former, soit on les identifie *a posteriori* et on les supprime. Éviter leur formation consiste à écarter systématiquement tous les cas où la certitude est moyenne (existence de plusieurs maximums, éloignement de la zone définie par



**Figure 3.8** – Illustrations de deux effets possibles de la distorsion radiale (distorsion la plus prononcée) : la déformation en barillet (à gauche) et la déformation en coussinet (à droite) [© L. Avantbey et al., Noirmoutier 2014].

les critères, etc.), mais cette méthode est généralement délaissée dans le cas d'un appariement dense, car elle rejette un très grand nombre de points qui auraient pu être de bons candidats. La deuxième approche consiste à réaliser le processus d'appariement normalement puis à filtrer les résultats pour retirer les éventuelles erreurs commises. La stratégie la plus courante se base sur l'utilisation d'un modèle (basé le plus souvent sur un critère géométrique) : tous les appariements qui ne s'y conforment pas sont alors considérés comme erronés et sont supprimés.

Malgré ces précautions, les petites erreurs de position restantes peuvent néanmoins avoir d'importantes conséquences. Par exemple, les droites réelles peuvent ne pas se croiser et l'on cherche dans ce cas un compromis. Ou encore, l'erreur sur l'estimation de la profondeur relative (granularité) peut être grande si les caméras sont trop rapprochées ou si l'objet réel est très éloigné, car l'angle formé par le croisement des deux rayons au niveau de l'objet est très faible. Trois solutions permettent de minimiser ce problème :

- se rapprocher de la scène,
- agrandir la base (écarter les caméras l'une de l'autre),
- ou faire pivoter les caméras (faire converger leurs axes optiques).

Mais elles ne viennent pas sans contreparties. Les trois solutions vont accroître les effets de la déformation perspective. De plus, la première contribue à diminuer la fauchée et les deux dernières ont pour effet de réduire le recouvrement. Les déformations perspectives importantes provoquées par la différence entre les angles de vues engendrent notamment des difficultés lors de l'appariement. Il sera en effet difficile de reconnaître les amers (car le voisinage, les couleurs et l'éclairage ne seront plus les mêmes) et les zones occultées (cachées par d'autres objets placés devant) seront plus nombreuses. Quant à la fauchée, plus elle est réduite, plus il sera difficile de se repérer dans le modèle créé, de l'analyser et de le replacer dans la scène globale. Enfin, le recouvrement désigne la proportion de la scène observée qui est représentée en commun sur tous les points de vue. Pour des acquisitions stéréoscopiques, il est d'usage en photogrammétrie de considérer un recouvrement d'au moins 60 % entre chaque vue [McGlone *et al.*, 1980 ; Linder, 2009]. Il sera donc nécessaire de trouver un compromis entre la précision en profondeur, le recouvrement, la différence des points de vue et la fauchée.

Une autre source d'erreur provient des lentilles utilisées par nos caméras. Elles ne sont pas parfaites et notre système réel n'est donc pas exempt de distorsions : le chemin emprunté par la lumière n'est plus rectiligne, il est courbe [Morat, 2008] (plus exactement, il s'agit d'une ligne brisée). Au vu de ce que nous avons décrit sur l'utilisation du modèle sténopé pour estimer les coordonnées des points réels à partir des images, ces déviations sont non négligeables. Il est possible de les décrire par un modèle paramétrique qui vient compléter le modèle sténopé. Il existe plusieurs types de distorsions : radiale, tangentielle et prismatique. La première, qui est la plus courante et la plus prononcée, provient des défauts de la courbure des lentilles constituant l'objectif (deux effets courants sont illustrés à la figure 3.8 page 60). Quant à la deuxième, elle correspond à des défauts sur l'alignement des lentilles (les centres optiques ne sont pas sur le même axe) et la troisième à des défauts sur leurs inclinaisons (les plans optiques ne sont pas parallèles).

De la même manière et pour les mêmes raisons (le procédé de fabrication n'est pas parfait), les paramètres intrinsèques réels du capteur (longueur focale, position du projeté du centre optique, facteur d'échelle, etc.) dif-

férenteront des paramètres théoriques fournis par le constructeur. Pour réduire les erreurs liées à ces imprécisions, il est possible de modéliser les distorsions et d'estimer les paramètres intrinsèques du capteur utilisé. Ce procédé s'appelle *l'étalonnage* [Devernay, 1997; Zhang, 2000]. Une méthode courante consiste à utiliser un objet étalon composé d'un certain nombre de points identifiables avec précision et dont les métriques sont connues, les *mires*, puis à analyser les déformations subies par leurs projetés sur les images acquises.

### 3.1.4 Problématiques spécifiques de l'acquisition et du traitement d'images sous-marines

Les outils de stéréoreconstruction ont été essentiellement développés pour la télédétection aérienne et la télédétection basse altitude. Les différences entre le milieu aquatique et le milieu aérien, que nous avons détaillées dans le chapitre 2 (section 2.1 page 18), entraînent trois conséquences directes pour une utilisation sous-marine :

- 1) les techniques et les algorithmes habituellement utilisés pour extraire l'information tridimensionnelle des images fonctionnent moins bien sur des prises de vues sous-marines en eau peu profonde (contraste, éclairage, couleurs, bruit, variabilité, etc.),
- 2) le matériel d'acquisition (voir la section 2.2 du chapitre 2 page 33) doit résister aux conditions du milieu (étanchéité, corrosion, etc.) et doit être facile à déployer et à opérer sur les zones d'études,
- 3) les distances d'acquisition doivent être fortement réduites pour être capable de « voir » la scène (absorption) ; les données obtenues présentent donc une faible fauchée (absence de vision globale).

Ces conséquences vont engendrer la nécessité d'adapter les outils habituels aux particularités de notre milieu de travail. Nous identifions à partir de ces dernières cinq problèmes principaux à traiter pour obtenir une chaîne complète de stéréoreconstruction sous-marine :

- |              |   |
|--------------|---|
| 1) ⇒         | a) <i>Problème d'appariement dense des vues (dense correspondance problem)</i> : comment reconnaître les mêmes éléments représentés sur différentes vues qui se recouvrent alors que la qualité des prises de vue est très variable, que certaines zones ne contiennent pas d'information utile (absorption) et que la scène et l'observateur sont tous deux en mouvement ?   |
| 1) & ⇒<br>2) | b) <i>Problème d'étalonnage (calibration problem)</i> : comment estimer les paramètres propres au capteur utilisé (longueur focale, coordonnées image du centre optique, base, distorsions) en tenant compte de la présence des dioptries additionnels apportés par le milieu aquatique (réfractions) pour être en capacité de reprojeter les données bidimensionnelles dans un repère tridimensionnel et compenser les distorsions ?   |
| 2) ⇒         | c) <i>Problème d'acquisition in situ (acquisition problem)</i> : comment choisir les vecteurs et les capteurs pour réaliser l'acquisition de données optiques sous-marines et subaquatiques sur des zones de petite taille (< 2000 m <sup>2</sup> ) à faibles fonds (< 100 m) ?   |
| 3) ⇒         | d) <i>Problème de recalage des données (registration problem)</i> : comment agréger un grand nombre d'ensembles locaux de données bruitées (erreurs d'étalonnage – focale, distorsions, base, etc. – et erreurs de reconstruction – appariement, précision de reprojexion, etc.) pour obtenir une représentation globale cohérente de l'environnement étudié alors que l'information concernant la pose (position et orientation) du capteur n'est pas connue <i>a priori</i> ? Ce problème englobe le <i>problème d'estimation de pose (pose estimation problem)</i> . |
|              | e) <i>Problème de redondance des données (redundance problem)</i> : comment limiter le nombre important de doublons lors de la fusion de nombreux nuages denses, bruités et à fort recouvrement ?   |



Taille de la zone d'étude						
<i>mm</i>	<i>cm</i>	<i>dm</i>	<i>m</i>	<i>dam</i>	<i>hm</i>	<i>km</i>

Taille des objets						
<i>mm</i>	<i>cm</i>	<i>dm</i>	<i>m</i>	<i>dam</i>	<i>hm</i>	<i>km</i>

- Chantiers archéologiques
- Récifs coralliens & herbiers
- Domaines benthiques
- Ouvrages d'art

**Table 3.1** – Résumé des critères photogrammétriques concernant les quatre thématiques les plus couramment étudiées en télédétection sous-marine et modélisation tridimensionnelle [© L. Avanthey et al.].

## 3.2 État de l'art des solutions existantes et contributions

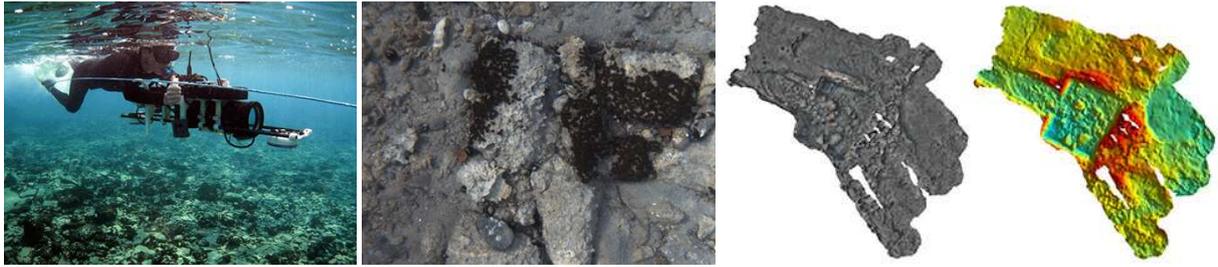
Nous proposons maintenant au lecteur un tour d'horizon sur les méthodes utilisées dans la littérature pour répondre aux différents problèmes que nous venons d'exposer. Les applications de ces travaux portent essentiellement sur quatre thématiques :

- 1) *l'archéologie* : suivi de fouilles sur des épaves ou sur des constructions submergées, documentation des objets immergés, etc. [Ballard et al., 2000 ; Hogue et al., 2007 ; Bingham et al., 2010 ; Mahon et al., 2011 ; Drap, 2012 ; Skarlatos et al., 2012 ; Gracias et al., 2013 ; Balletti et al., 2015 ; Diamanti et Vlachaki, 2015, ...]
- 2) *la répartition et la diversité des espèces* : analyse de la santé des récifs coralliens ou des herbiers, suivi de l'expansion des espèces invasives, etc. [Ludvigsen et al., 2007 ; Beall et al., 2010 ; Johnson-Roberson et al., 2010 ; Williams et al., 2010 ; Burns et al., 2015 ; Rende et al., 2015, ...]
- 3) *les écosystèmes du domaine benthique* : modélisation de la microbathymétrie, étude du transfert des sédiments, etc. [Negahdaripour et Madjidi, 2003 ; Brandou et al., 2007 ; Nicosevici et Garcia, 2008 ; Kunz et Singh, 2010 ; Williams et al., 2012 ; Fillinger et Funke, 2013, ...]
- 4) *les ouvrages d'art* : inspection et mesure de l'usure ou de dégâts sur des équipements immergés – barrages, digues, ports, conduites, coques de bateaux, etc. [Prabhakar et Kumar, 2012 ; Nelson et al., 2014 ; O'Byrne et al., 2015, ...]

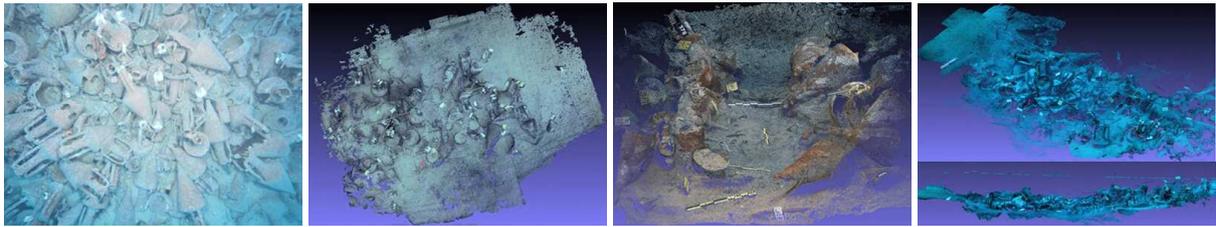
Le tableau 3.1 page 62 résume les critères photogrammétriques liés à ces thématiques. Il nous permet de remarquer qu'il est intéressant de positionner notre étude sur des tailles de zone métriques à décimétriques et sur des tailles d'objet décimétriques à centimétriques, grandeurs communes aux quatre thématiques. Nous nous fixerons donc comme objectif l'obtention d'un échantillon au sol centimétrique à subcentimétrique.

Pour l'état de l'art, nous porterons un intérêt particulier aux travaux des équipes de recherche de l'Université de Sydney (Australie), de l'Université de Gérone (Espagne), de l'Université York (Canada), de l'Institut Océanographique de Woods Hole (États-Unis) et de l'Institut Universitaire Technologique de Chypre (Chypre), qui font référence dans notre domaine d'étude. Comme ces équipes, notre problématique générale porte sur toute la chaîne d'acquisition et de traitement : « comment obtenir une information tridimensionnelle dense, haute résolution et cohérente de l'ensemble d'une scène d'étude sous-marine ? ».

Nous abordons dans cette section les solutions proposées dans la littérature, dont un panel est illustré sur les figures 3.9 page 63, 3.13 page 68, 3.19 page 75, 3.26 page 83 et 3.31 page 89. Nous avons organisé cet état de l'art à travers les cinq problématiques que nous avons établies à la section précédente (3.1 page 55) et nous y introduisons nos contributions.



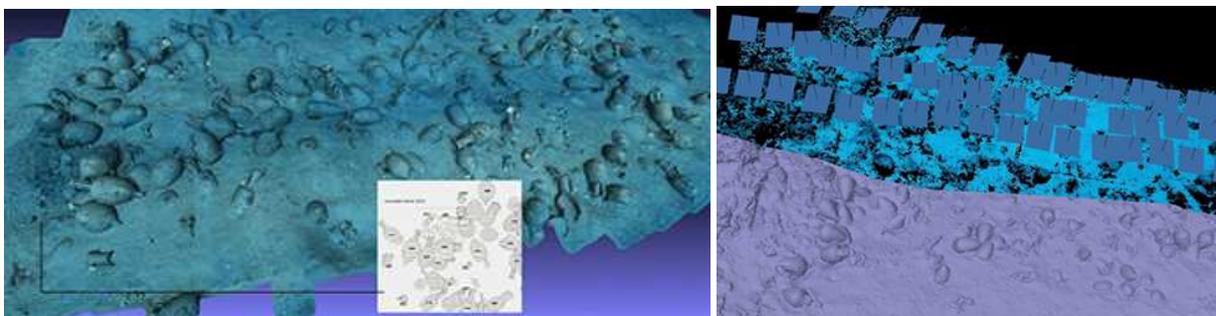
(a) À gauche, *Mahon et al. [2011]* ont développé un système stéréoscopique utilisable par un plongeur de surface, pour cartographier la ville submergée de Pavlopetri (Grèce, 1 à 4 mètres de profondeur). Au centre, exemple d'une image acquise et prétraitée, à droite un modèle texturé généré sur la zone d'une chambre funéraire (25 m<sup>2</sup>).



(b) *Skarlatos et al. [2012]* ont étudié différents outils open source afin de former une chaîne automatique pour documenter en trois dimensions la fouille de l'épave du Mazotos à 45 mètres de profondeur (Chypre). À gauche, une image prise avec flash par un plongeur, au centre, deux nuages tridimensionnels d'environ 1 million de points réalisés à partir de 61 photos prises au nadir pour le premier et de 49 photos obliques pour le second, à droite deux vues sur un nuage de 2,5 millions de points créé à partir de 150 photos verticales et obliques.

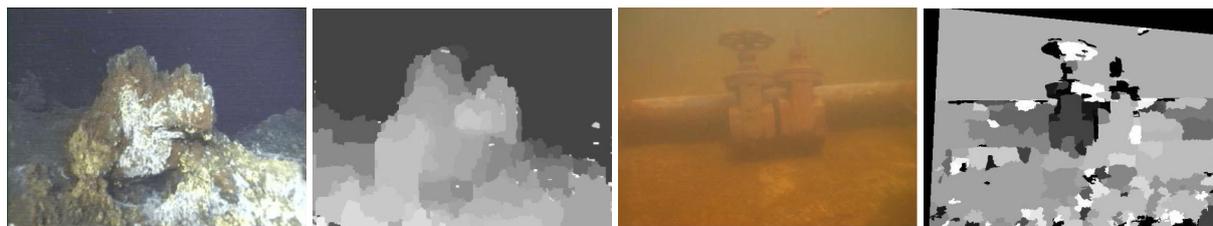


(c) L'AUV Girona 500 (à gauche) déployé par *Gracias et al. [2015]* pour cartographier le vaisseau *La Lune* (trois mâts de Louis XIV) échoué par 90 mètres de profondeur au large de Toulon, un exemple d'une image où l'on peut voir l'un des canons (au centre) et le modèle texturé reconstruit d'une petite zone de l'épave (à droite).



(d) À gauche, un modèle tridimensionnel texturé de l'épave #24 généré par *Photoscan* à partir des photos acquises avec un appareil *Sony DSLR A700* lors d'une campagne archéologique réalisée par *Diamanti et Vlachaki [2015]* autour de l'île de *Macronèse* (Grèce). À droite, détail du modèle tridimensionnel de l'épave #18 et positionnement des images dans le repère global. Les deux épaves reposent par environ 40 mètres de fond.

Figure 3.9 – Illustration de résultats obtenus dans la littérature (nuages de points ou modèles).



**Figure 3.10** – Exemples d’images sources et des cartes de disparité associées obtenues à partir d’appariements denses s’appuyant sur le critère géométrique : une source hydrothermale à gauche [Brandou *et al.*, 2007] et une infrastructure (vanne d’un conduit) à droite [Prabhakar *et Kumar*, 2012].

### 3.2.1 Autour du problème d’appariement dense

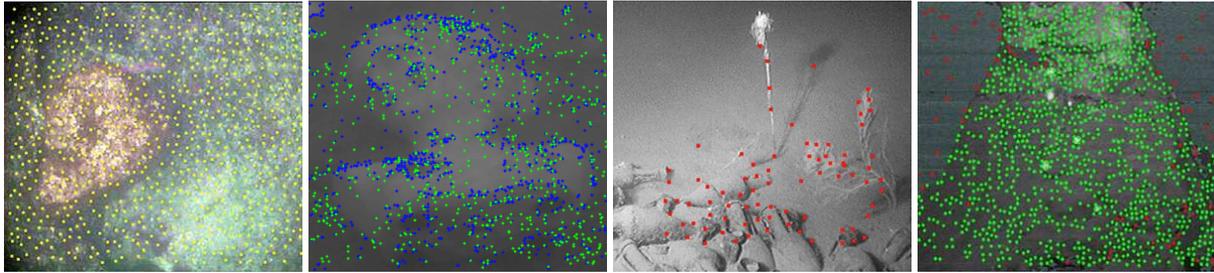
À l’instar des travaux se déroulant dans le milieu aérien, les images que nous cherchons à mettre en correspondance pour obtenir les disparités peuvent être des vues temporellement proches (prises simultanées par plusieurs capteurs ou successives par un capteur qui se déplace) ou très éloignées (revisite du site). Il peut s’agir d’images extraites d’un flux vidéo ou bien d’images statiques qui offrent une meilleure résolution que les premières.

Le milieu sous-marin impose de nouvelles conditions environnementales au moment de l’acquisition qui viennent mettre en difficulté les algorithmes d’appariement classiques. Nous rappellerons les trois handicaps principaux : la qualité dégradée et très variable des images (faible contraste, faible luminosité, perte des couleurs, éclairage non uniforme, flou, bruit, etc.), l’absence d’information (texture) sur les portions de l’image où les objets sont trop éloignés du capteur (absorption) et la non-rigidité de la scène observée (dynamisme des milieux naturels) qui est particulièrement prononcée dans notre milieu d’étude.

Nous avons introduit au chapitre 3 deux approches différentes pour obtenir une reconstruction tridimensionnelle dense : modèle dense ou nuage dense, que nous retrouvons toutes deux dans les contributions sous-marines (section 3.1.2 page 58). La création de modèles denses (nuages épars maillés et texturés), plus économe en temps de calcul et en mémoire, est privilégiée lorsque l’étude porte sur des zones sous-marines à grande échelle (plusieurs milliers d’images) ou lorsque les résultats ont vocation à être utilisés pour la navigation et doivent donc être disponibles en quasi temps réel [Pizarro *et al.*, 2004 ; Jasiobedzki *et al.*, 2008 ; Petillot *et al.*, 2008 ; Williams *et al.*, 2008 ; Botelho *et al.*, 2009 ; Beall *et al.*, 2010 ; Johnson-Roberson *et al.*, 2010 ; Shkurti *et al.*, 2011 ; Mahon *et al.*, 2011 ; Méline *et al.*, 2012 ; Fillinger *et Funke*, 2013, ...]. Quant à la reconstruction directe de nuages de points denses, elle est en plein essor [Brandou *et al.*, 2007 ; Sedlazeck *et al.*, 2009 ; Jenkin *et al.*, 2010 ; Kunz *et Singh*, 2010 ; Prabhakar *et Kumar*, 2012 ; Schmidt *et Rzhano*, 2012 ; Servos *et al.*, 2013 ; Nelson *et al.*, 2014, ...] et ce, en grande partie grâce aux avancées technologiques récentes sur les capteurs et les unités de calcul, car, nous l’avons vu, la réalisation d’un appariement dense est beaucoup plus complexe qu’un appariement épars.

#### Appariement dense sous-marin dans la littérature

Nous avons soulevé à la section 3.1 du chapitre 3 (page 58) l’importance de réduire la complexité algorithmique du problème d’appariement dense et nous rappelons au lecteur les trois critères principaux utilisés : géométrique, spatio-temporel et voisinage spatial. L’ensemble des chaînes de reconstruction dense sous-marines que nous avons recensées s’appuient sur le critère géométrique (voir deux exemples à la figure 3.10 page 64). D’autre part, certaines équipes ont testé l’utilisation sous l’eau de logiciels de reconstruction développés spécifiquement pour le milieu aérien. Parmi ces dernières, Gawlik [2014], Balletti *et al.* [2015], Diamanti *et Vlachaki* [2015] et Van Damme [2015] ont employé le logiciel propriétaire PhotoScan (Agisoft) qui est, lui aussi, basé sur un critère géométrique. Toujours sur le même critère, le logiciel libre (*open source*) MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2014] a été utilisé par Drap [2012]. Enfin Bianco *et al.* [2011], Drap [2012], Skarlatos *et al.* [2012], O’Byrne



**Figure 3.11** – Exemples de résultats obtenus avec différents détecteurs de points, de gauche à droite : points SURF détectés sur un fond rocheux [Aulinas *et al.*, 2011], points de Harris (en bleu) et points SIFT (en vert) détectés sur un buste déposé au fond d'un fleuve [Méline *et al.*, 2012], points de Harris modifiés utilisés pour du suivi de cibles sur des amphores reposant sur fond de sable [Pessel *et al.*, 2005], d'autres points de Harris modifiés pour le suivi de cibles sur des sources hydrothermales (en rouge les points des zones sans information rejetés par segmentation) [Sedlazeck *et al.*, 2009].

*et al.* [2014] et Rende *et al.* [2015] ont essayé le logiciel libre PMVS [Furukawa et Ponce, 2007] qui, lui, s'appuie sur une association de deux critères : géométrie et voisinage spatial.

Cependant, sous l'eau, il est nécessaire de modifier le modèle utilisé par le critère géométrique pour les raisons que nous détaillerons à la section 3.2.2 page 69. Au demeurant, nous remarquerons que peu d'auteurs, exceptés Servos *et al.* [2013] ou Drap *et al.* [2015]), précisent s'ils ont procédé à cette adaptation.

En ce qui concerne la sélection d'un sous-ensemble de points singuliers, soit pour estimer la géométrie ou pour former un appariement épars initial, nous constatons principalement au sein des travaux sous-marins l'emploi de trois détecteurs de points caractéristiques : SIFT [Lowe, 1999], SURF [Bay *et al.*, 2006] et Harris [Harris et Stephens, 1988]. Des exemples sont disponibles à la figure 3.11 page 65.

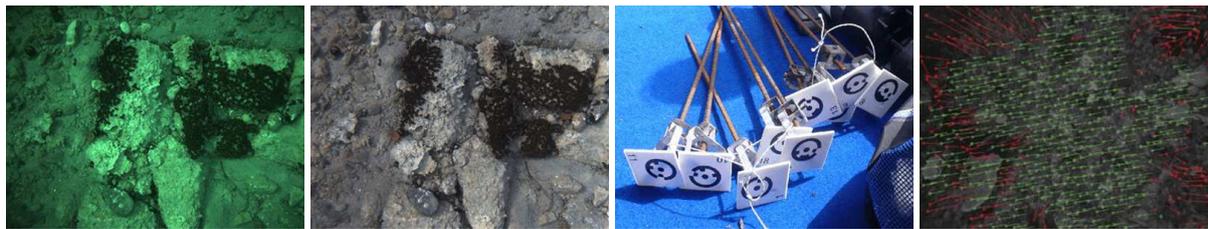
Le détecteur SIFT présente la particularité de fournir de nombreux points, répartis sur l'ensemble de l'image. Son descripteur lui permet, de plus, d'être robuste aux transformations (rotations, translations, homographies, etc.). Pour ces raisons, il est très populaire au sein de la communauté aérienne, notamment lorsque la géométrie doit être estimée, et nous le retrouvons *de facto* très présent dans les chaînes sous-marines [Brandou *et al.*, 2007 ; Jasiobedzki *et al.*, 2008 ; Petillot *et al.*, 2008 ; Botelho *et al.*, 2009 ; Mahon *et al.*, 2011 ; Schmidt et Rzhhanov, 2012 ; O'Byrne *et al.*, 2014, MicMac, ...]. Cependant, Méline *et al.* [2012] et Skarlatos *et al.* [2012] ont montré que ce détecteur était particulièrement sensible au bruit de chatoiement (*speckle*) et à l'effet de vignettage (assombrissement sur les bords) ce qui a pour conséquence d'abaisser ses performances sur des images sous-marines.

Partant des mêmes fondements que SIFT, le détecteur SURF favorise la vitesse d'exécution au nombre de points extraits. Néanmoins, bien que cet aspect soit très attractif pour les travaux où le temps de calcul est critique, il reste peu exploité pour le moment dans les chaînes sous-marines [Beall *et al.*, 2010 ; Aulinas *et al.*, 2011, ...].

Quant au détecteur de Harris (que nous retrouvons souvent sous la version Shi-Tomasi [Shi et Tomasi, 1994]), il s'attache aux zones texturées et en marque les ruptures. Très économe en temps et en mémoire par rapport aux deux précédents, nous le retrouvons au cœur des algorithmes denses basés sur le critère spatio-temporel (suivi de cible). Il est cependant très sensible aux changements d'échelle et son descripteur de base (corrélation) est sensible aux transformations géométriques, c'est pourquoi il est couramment utilisé à travers des versions modifiées pour compenser ces défauts [Pizarro *et al.*, 2004 ; Kunz et Singh, 2010 ; Méline *et al.*, 2010, PMVS, ...].

### Méthodes pour améliorer l'appariement sous-marin dans la littérature

Les stratégies d'appariement citées ci-dessus sont moins performantes dans l'eau que dans l'air, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Par conséquent, de nombreuses méthodes ont été développées pour essayer



**Figure 3.12** – Exemples de méthodes pour améliorer l'appariement, de gauche à droite : une image originale et sa version prétraitée avec une correction des couleurs et du vignettage [Mabon *et al.*, 2011], des marqueurs cibles à installer sur le terrain d'étude pour fournir des points fiables [Skarlatos et Rova, 2010] et un filtrage de l'appariement épars permet d'écarter les correspondances erronées (en rouge), ici grâce à un critère géométrique [Johnson-Roberson *et al.*, 2010].

d'améliorer les résultats obtenus. Nous en recensons ici les principales et le lecteur trouvera quelques exemples présentés à la figure 3.12 page 66.

Le nombre de points caractéristiques sélectionnés par les détecteurs est généralement faible dans le milieu sous-marin et dépend fortement de la qualité des prises de vues. Pour les mêmes raisons, les mises en correspondances sont difficiles à effectuer. Ces problèmes sont abordés dans la littérature essentiellement par le biais de prétraitements [Singh *et al.*, 2007 ; Petillot *et al.*, 2008 ; Foley *et al.*, 2009 ; Beall *et al.*, 2010 ; Jenkin *et al.*, 2010 ; Johnson-Roberson *et al.*, 2010 ; Prabhakar et Kumar, 2012 ; Rende *et al.*, 2015] : rehaussement du contraste, correction du vignettage et de l'éclairage, correction des couleurs, débruitage, renforcement de la netteté, etc. L'idée est de se rapprocher le plus possible de la qualité des images aériennes pour maximiser le nombre de points appariés. Une autre approche consiste à recadrer les images [Fillinger et Funke, 2013] pour s'abstraire des dégradations les plus prononcées qui ont souvent lieu sur les bords, mais cela implique en échange un taux de recouvrement plus faible et donc une reconstruction finale moins complète. Certains travaux proposent de combiner l'usage de plusieurs détecteurs pour augmenter le nombre de points caractéristiques en jouant sur la différence des critères de sélection [Singh *et al.*, 2007 ; Méline *et al.*, 2012 ; Hu *et al.*, 2014, PMVS] et maximiser ainsi les possibilités d'appariement. D'autres travaux équipent le terrain avec des marqueurs pour fournir plus de points fiables [Skarlatos et Rova, 2010 ; Burns *et al.*, 2015 ; Diamanti et Vlachaki, 2015], mais étant essentiellement réalisé par des plongeurs, ce procédé est coûteux en temps et limite les champs d'application.

Il est également indispensable de garantir la fiabilité de l'appariement épars pour ne pas dégrader la qualité de l'appariement dense et donc de la reconstruction finale. Les mouvements qui ont lieu au sein du milieu comptent parmi les sources majeures d'erreurs de mise en correspondance. En effet, si les objets appariés se sont déplacés entre les acquisitions des deux points de vue stéréoscopiques, leur géométrie locale n'est plus conforme à la géométrie globale et il sera alors impossible de retrouver correctement leur position. Les motifs répétitifs ou ressemblants sont aussi source d'erreurs en provoquant de faux appariements (distinction difficile). Or renforcer l'exigence du critère de similitude comporte le risque d'écarter de bons appariements (par définition, les deux points de vue ne peuvent être parfaitement identiques). La contre-mesure la plus courante dans la littérature consiste à identifier et retirer les couples erronés. Dans les travaux actuels, ce filtrage s'effectue principalement par le biais du critère géométrique. Il a lieu généralement en même temps que l'estimation de la géométrie elle-même : un grand nombre d'échantillons de points appariés sont étudiés et celui qui permet de rassembler le plus de couples autour de son modèle géométrique est considéré comme le plus fiable, les couples divergents sont alors marqués comme erronés et rejetés.

Les mouvements ne sont pas toujours considérés comme une contrainte. Par exemple, Swirski *et al.* [2010] proposent une approche originale où ils utilisent les déplacements aléatoires des caustiques pour procéder à un appariement dense sur un critère temporel : les signatures lumineuses de chaque point sont uniques. Mais de manière générale, les équipes cherchent à éviter ces facteurs perturbateurs, comme Mahon *et al.* [2011] qui privilégient les acquisitions avant le lever du soleil et après son coucher. C'est d'ailleurs une pratique courante

en eau peu profonde d'adapter la période d'acquisition pour minimiser les conditions amenant à l'échec des appariements (courants, houle, vent, turbidité, luminosité, etc.). Nous noterons entre autre que la qualité des capteurs employés et une utilisation appropriée d'un éclairage artificiel peuvent permettre l'obtention d'images de qualité égale à celles prises dans l'air (effacement des caustiques, couleurs réelles et contrastées, etc.).

Quant aux portions de l'image qui contiennent très peu de texture réelle, elles ne sont pas exemptes de bruit ni d'artefacts qui peuvent être appariés par erreur, ce qui dégrade la qualité de la reconstruction. En général, ces portions sont retirées manuellement des nuages créés, mais certains travaux comme Sedlazeck *et al.* [2009] les suppriment automatiquement (ici grâce à une segmentation qui permet de délimiter le fond des objets étudiés, voir la dernière image de la figure 3.11 page 65).

### Approche proposée

En terme de stratégie, nous avons choisi la production de nuages de points denses pour préserver l'information brute afin de ne pas perdre de détails (distinction entre le végétal et le minéral par exemple).

Les critères géométrique et spatio-temporel supposent intrinsèquement que des pixels possédant un score de similarité élevé sont correspondants, ce qui est généralement vrai dans l'air avec des images nadirales. Sous l'eau, cette approche systématique (fonction de transformation mathématique) se retrouve souvent en échec dans les zones faiblement texturées en raison de l'absorption électromagnétique. Du fait de sa capacité d'adaptation locale à détecter ces cas et au vu de la qualité de nos images (capteurs légers peu onéreux et éclairage naturel), nous avons choisi de nous appuyer uniquement sur le critère de voisinage spatial. Nous avons donc conçu un algorithme de reconstruction tridimensionnelle dense qui propage l'appariement depuis les zones les plus fiables (les plus texturées) vers les moins déterminantes. En limitant la propagation dans un rayon autour des germes originaux, nous n'inférons pas sur les zones sans information qui sont de cette manière automatiquement exclues de la reconstruction.

Pour identifier les zones les plus texturées de nos images sous-marines, le détecteur de Harris nous semble le plus approprié et le plus fiable. De manière à garantir la densité et la qualité de la reconstruction finale, il faut pouvoir initialiser le processus de propagation avec un nombre suffisant de germes valides (points appariés). Pour l'aspect quantitatif, plutôt que de procéder à un prétraitement des images qui a tendance à introduire du bruit et à renforcer certaines différences entre les vues, nous proposons de modifier le comportement du détecteur : un seuil adaptatif de sélection nous permet d'obtenir un nombre de points constant, quelle que soit la qualité des images étudiées. Et pour assurer la fiabilité de l'appariement épars obtenu par corrélation, nous appliquons un filtrage que nous avons conçu sur un critère statistique plutôt que géométrique.

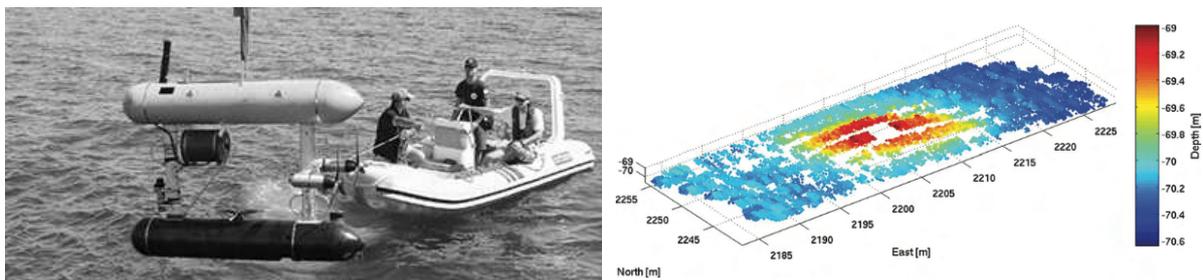
Quant aux objets en mouvement, alors qu'ils sont automatiquement écartés par les reconstructions de la littérature, nous cherchons précisément de notre côté à les reconstruire, car ils concernent majoritairement la flore et la faune qui sont pour nous des éléments d'intérêt. Nous proposons donc une solution qui passe par l'acquisition synchronisée des prises de vue du couple stéréoscopique (et non l'acquisition simultanée comme c'est souvent le cas) afin de garantir l'intégrité de la scène. Nous noterons que l'écart temporel entre les points de vue stéréoscopiques est un problème qui a déjà été soulevé par Hogue *et al.* [2006] dans un autre contexte : les petits mouvements résiduels n'étaient pas filtrés et provoquaient ainsi des erreurs lors de l'agrégation des mesures (contribution à la courbure de la reconstruction).

En résumé	<i>Problème</i>	<i>Choix de résolution</i>
	<b>Qualité variable :</b>	points de Harris + seuil adaptatif + critère de voisinage spatial
	<b>Zones sans information :</b>	points de Harris + voisinage spatial + rayon limite de propagation
	<b>Mouvements :</b>	synchronisation

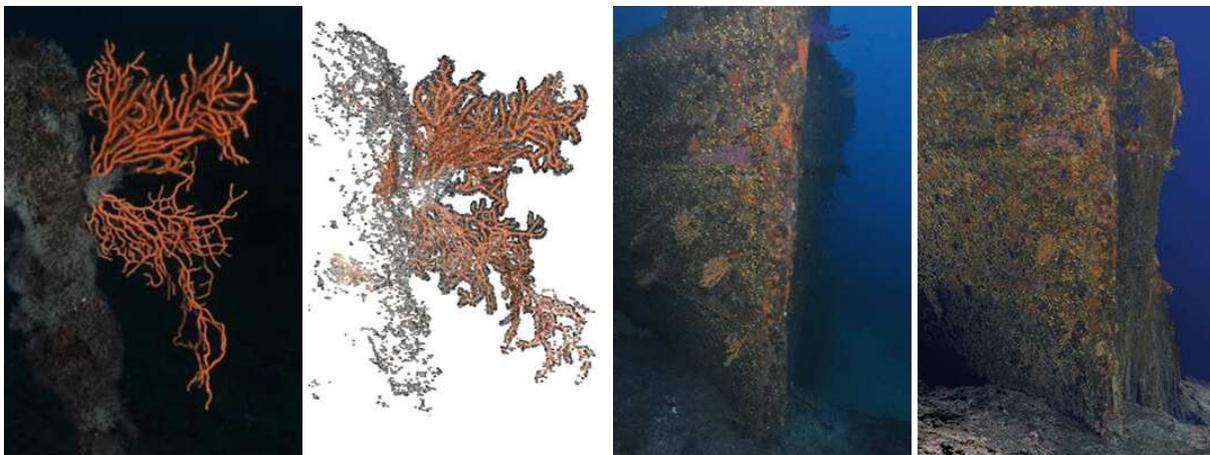
*Nous invitons le lecteur à consulter la section 3.3.1 page 95 pour plus de détails sur ces contributions.*



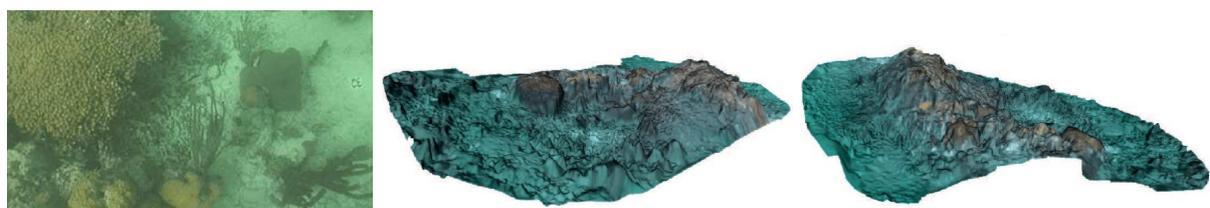
(a) Le capteur AQUA (à gauche), développé par *Hogue et al. [2007]*, permet d'acquérir des images stéréoscopiques (exemple au centre), et de reconstruire des nuages de points tridimensionnels (à droite) en utilisant les données provenant d'un capteur inertielle (IMU – Inertial Measure Unit) pour réduire la dérive lors du recalage, utilisé ici sur l'épave d'une barge dans la réserve marine de Folkestone (Barbade, mer des Caraïbes).



(b) L'AUV SeaBed (à gauche) utilisé par *Foley et al. [2009]* pour l'étude de deux épaves autour de l'île de Chios (Grèce), les données récoltées par la caméra installée sur le robot ont permis de réaliser une reconstruction tridimensionnelle (à droite) de l'épave #A située à 70 mètres de profondeur.

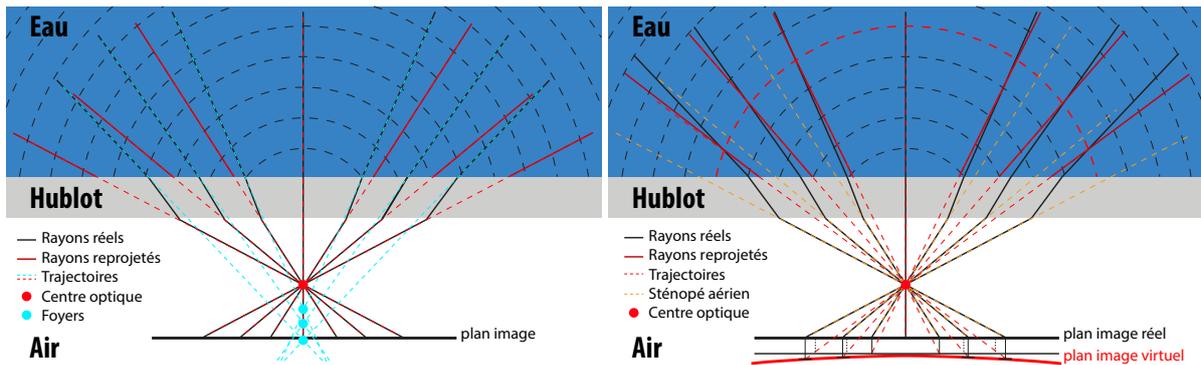


(c) À gauche, l'une des 64 photographies qui ont permis de reconstruire le nuage de points dense d'une gorgone présenté à côté, à droite 1828 photos acquises par 50 mètres de fond sur l'épave du Liban au large de Marseille ont été utilisées pour créer le nuage de points présenté [*Drap, 2012*].



(d) À gauche, exemple d'une image prise par un plongeur sur une barrière de corail aux Bahamas, à droite, deux vues du modèle tridimensionnel texturé créé [*Nicosevici et Garcia, 2008*].

Figure 3.13 – Illustration de résultats obtenus dans la littérature (nuages de points ou modèles) – suite.



**Figure 3.14** – Le modèle sténopé en présence de dioptres plans [© 2013 L. Avantbey et al.]. À gauche, les trajectoires initiales des rayons incidents perçus par le capteur ne se croisent pas en un point unique, mais en une multitude de foyers. Le modèle du sténopé qui reprojette tous les rayons en les faisant passer par un point unique (le centre optique) n'est donc plus valable et entraîne des erreurs non négligeables dans la reconstruction (écart entre les rayons initiaux noirs et les rayons reprojétés rouges). À droite, il est possible d'obtenir une approximation plus juste des trajectoires initiales en modifiant artificiellement les paramètres du sténopé (plan image virtuel), optimale uniquement pour une distance donnée (cercle rouge).

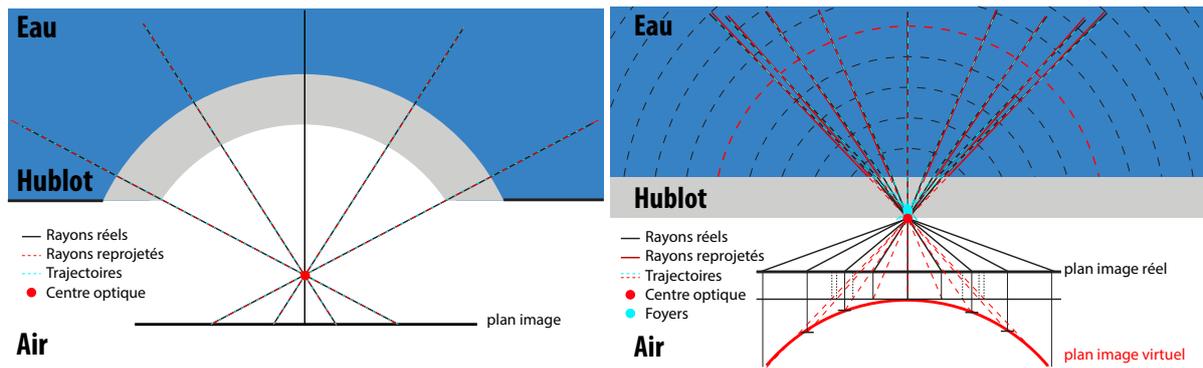
### 3.2.2 Autour du problème d'étalonnage

À la différence de son homologue aérien, l'étalonnage sous-marin va devoir prendre en compte les déformations géométriques (distorsions et aberrations sphériques) provoquées par le phénomène de réfraction que nous avons décrit au chapitre 2 (voir section 2.1.3 page 22). En effet, en présence des deux dioptres plans eau-verre et verre-air du hublot, les rayons incidents perçus par le capteur à l'intérieur de son enceinte étanche ne sont plus des lignes droites, mais des lignes brisées. Les trajectoires initiales de ces rayons incidents ne se croisent donc pas en un seul point (centre optique) comme c'est le cas dans l'air, mais en une multitude de points selon les angles d'incidence. De ce fait, le modèle du sténopé qui reprojette tous les rayons en passant systématiquement par le centre optique (projection perspective) ne peut trouver une solution exacte à ce problème (voir figure 3.14 page 69, schéma de gauche) [Treibitz et al., 2012]. Si la réfraction est négligée lors de l'étalonnage, l'échelle de la reconstruction sous-marine sera erronée et les nuages résultants présenteront une courbure très marquée [Jasiobedzki et al., 2008] ce qui posera notamment problème lors du recalage de plusieurs nuages locaux dans un repère commun [Hogue et al., 2007].

Nous remarquerons que la réfraction dépend de nombreux facteurs qui peuvent fortement varier d'une campagne d'acquisition à l'autre, comme les paramètres relatifs au système (matière, forme et épaisseur du hublot, position de la caméra vis-à-vis de ce dernier, etc.) ou les paramètres relatifs au milieu d'étude (type d'eau – rappelons que l'indice de réfraction varie selon la pression, la température et la salinité –, longueurs d'onde incidentes, etc.). Une estimation de ces paramètres à chaque nouvelle campagne via un étalonnage (en supposant une faible variation pendant la mission [Capra et al., 2015]) augmente *de facto* la qualité de la reconstruction.

#### Modélisation de la réfraction dans la littérature

Bien qu'inexact, le modèle du sténopé peut néanmoins fournir une reprojektion approximative satisfaisante en milieu sous-marin à condition de modifier artificiellement ses paramètres [Gracias et Santos-Victor, 2001; Brandou et al., 2007; Drap et al., 2007; Beall et al., 2010; Drap, 2012; Skarlatos et al., 2012, ...]. Implicitement considéré comme une lentille supplémentaire, le dioptre est alors englobé dans le système lors de l'étalonnage. Dans cette approximation, illustrée à droite de la figure 3.14 page 69, la réfraction s'exprime essentiellement à travers deux paramètres : la longueur focale et la distorsion radiale. La longueur focale, que l'on agrandit artificiellement, offre la possibilité de reculer virtuellement l'ensemble du plan image et donc de redresser les rayons reprojétés. Quant aux coefficients de distorsion radiale, ils permettent de gérer la différence de réfraction en fonction de l'angle d'incidence en ajustant localement la longueur focale et provoquent ainsi une courbure du



**Figure 3.15** – Minimisation des erreurs liées à la réfraction [© L. Avanthey et al.]. À gauche, un dioptre hémisphérique parfait annule les effets de la réfraction, car les rayons arrivent tous parallèlement à la normale locale de l'interface, un modèle de sténopé classique est donc suffisant. À droite, avec un hublot plan, il est possible de minimiser les erreurs liées aux angles d'incidence et à la distance des objets observés en collant la caméra au hublot. En effet, les foyers multiples des rayons incidents se forment alors au-dessus du centre optique et sont beaucoup plus rapprochés de ce dernier.

plan image. Ces approximations sont valables pour une distance d'observation donnée : l'erreur de reprojektion augmentera si les objets se trouvent plus loin ou plus proche de la caméra, et ce d'autant plus rapidement que les angles d'incidence sont forts [Sedlazeck et Koch, 2012; Treibitz et al., 2012].

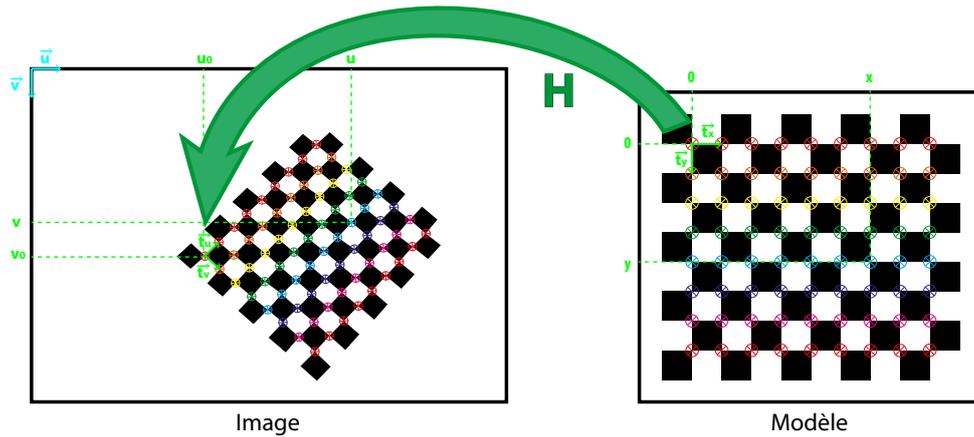
D'autres travaux proposent l'utilisation de modèles de caméra plus génériques que celui du sténopé et qui ne partent pas de l'hypothèse d'un unique point de convergence. Habituellement employés avec les caméras non perspectives (systèmes dioptriques – *fisheyes* –, systèmes catadioptriques – miroirs –, *cluster* de caméras, etc.) ces modèles associent une trajectoire de rayon indépendante pour chacun des pixels du capteur [Grossberg et Nayar, 2005; Ramalingam, 2006; Lhuillier, 2008]. Nous pouvons distinguer deux approches différentes :

- celles qui intègrent implicitement le dioptre au système global qui est alors traité comme une boîte noire [Kawahara et al., 2013, ...],
- et celles qui cherchent à modéliser explicitement le dioptre [Sedlazeck et Koch, 2011; Agrawal et al., 2012; Jordt-Sedlazeck et Koch, 2012; Treibitz et al., 2012; Servos et al., 2013, ...].

Les méthodes implicites, comme le modèle du sténopé compensé, reprojettent les rayons de manière à ce qu'ils correspondent aux rayons initiaux indépendamment des trajectoires qu'ils ont suivies effectivement en passant à travers le dioptre. Cependant, la relation n'est plus paramétrique : chaque pixel est indépendamment associé à un rayon. Quant aux méthodes explicites, elles prennent en compte les indices de réfraction des différents milieux traversés (hublot, eau) et des métriques associées (distance de la caméra au hublot, épaisseur du hublot, etc.) afin de reprojeter exactement les trajectoires réelles des rayons.

Indépendamment de ces différentes modélisations de la réfraction, deux stratégies permettent de minimiser les déformations géométriques et sont souvent utilisées en complément : un recadrage de l'image permet de retirer les bords où les effets de la réfraction sont les plus prononcés [Schmidt et Rzhanov, 2012] et l'utilisation d'un hublot hémisphérique force les rayons incidents à pénétrer l'interface selon un angle très proche de la normale ce qui annule presque le phénomène de réfraction [Gracias et Santos-Victor, 2001]. À titre d'exemple, en partant d'un modèle sténopé compensé, Bianco et al. [2011] ont mesuré sur leur système équipé d'un hublot plan une longueur focale sous-marine 25 % plus élevée que la longueur focale aérienne, alors qu'avec un hublot hémisphérique, elle n'était que 13 % plus grande. En théorie, un hublot hémisphérique parfait pourrait compenser entièrement les effets de la réfraction (figure 3.15 page 70, illustration de gauche) et un simple étalonnage aérien serait alors suffisant [Sedlazeck et Koch, 2012].

Enfin, nous ajouterons une remarque sur l'importance du positionnement du capteur par rapport au dioptre. L'utilisation d'un hublot plan impose un parallélisme du plan image du capteur pour éviter des déformations asymétriques qui ne pourront pas être compensées par la distorsion radiale (ni entièrement par la distorsion



**Figure 3.16** – Si nous positionnons le repère tridimensionnel du modèle ( $\vec{t}_x, \vec{t}_y, \vec{t}_z$ ) sur un des points de la mire, l'ensemble des autres points se retrouvent sur un même plan ( $\vec{t}_x, \vec{t}_y$ ) et leur transformation perspective par le capteur image ( $\vec{t}_w, \vec{t}_v$ ) peut alors être exprimée par une homographie planaire ( $H$ ) [©️️️ L. Avantbey et al.].

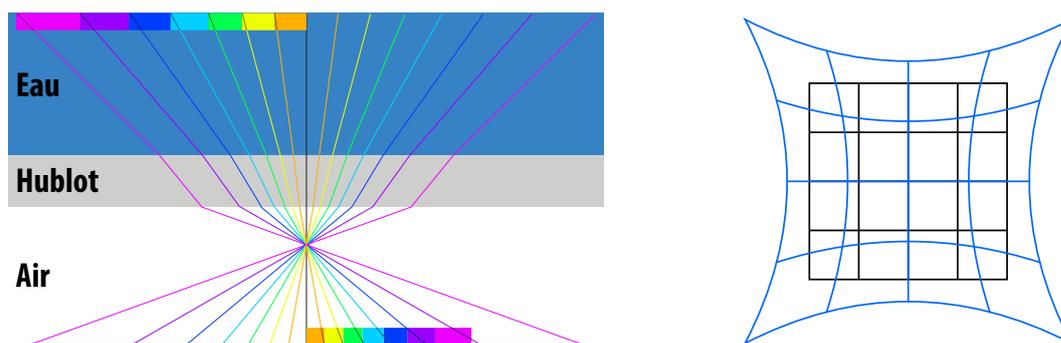
tangentielle). Dans le cadre spécifique du modèle de sténopé compensé, le rapprochement du capteur du hublot permet de minimiser les erreurs d'estimation non seulement liées à l'angle d'incidence des rayons, mais aussi celles liées à la distance des objets observés [Treibitz et al., 2012; Sedlazeck et Koch, 2012; Servos et al., 2013]. Nous proposons au lecteur une illustration de ce cas particulier à droite de la figure 3.15 page 70 et nous l'invitons à la comparer avec celle du cas général que nous avons présenté à droite de la figure 3.14 page 69. Quant à l'utilisation d'un hublot hémisphérique, elle nécessite un alignement très précis du centre optique du capteur [Drap et al., 2007; Servos et al., 2013], autrement les aberrations résultantes peuvent être encore plus complexes que celles provoquées par un hublot plan [Sedlazeck et Koch, 2012].

### Méthodologie d'étalonnage sous-marin dans la littérature

Lors d'une modélisation explicite du dioptré, les paramètres intrinsèques de la caméra sont calibrés dans l'air avec une mire puis les indices de réfraction et les différentes métriques sont mesurés, ce qui d'un point de vue opérationnel n'est pas toujours facile à réaliser. Pour contourner ce problème, Agrawal et al. [2012] ont montré que si l'on assimilait le système et son dioptré à un modèle de caméra axiale, il était aussi possible d'estimer ces informations additionnelles à l'aide de la mire. Cependant, le calcul reste complexe lorsque l'on est en présence des deux dioptrés qui nous intéressent (équation de degré 12). De plus, dès lors que l'on procède à des estimations sur le dioptré, l'étalonnage doit obligatoirement se dérouler *in situ*, c'est-à-dire sous l'eau, et ce directement dans la zone d'étude, afin d'être en présence de tous les paramètres.

Ces contraintes *in situ* s'appliquent également pour l'étalonnage des modèles qui considèrent le dioptré de manière implicite. Parmi ceux-ci, les modèles génériques sont également difficiles à étalonner, car ils présentent beaucoup de degrés de liberté, les rayons de chaque pixel devant être estimé un à un (évaluation de la surface caustique). De son côté, le modèle du sténopé compensé transpose à l'identique les procédures d'étalonnage aériennes par mires dans le milieu aquatique. La plus employée [Skarlatos et Rova, 2010; Abdo, 2007; Treibitz et al., 2012, ...] couple la méthodologie de Zhang [2000] pour l'estimation des paramètres intrinsèques avec celle de Brown [1971] pour l'estimation des paramètres de distorsions.

Flexible et robuste, cette procédure consiste à déplacer librement dans l'espace une mire sans qu'il soit nécessaire de connaître les positions exactes successives de cette dernière. La clef de cette stratégie réside dans l'utilisation d'une mire plane dont l'un des points est fixé comme origine du repère tridimensionnel (l'écart entre les points correspond à l'unité du repère). De cette manière, tous les autres points de la mire se retrouvent dans le même plan et ne sont plus représentés que par deux dimensions (pas de profondeur). Le problème peut alors



**Figure 3.17** – Les distorsions causées par la présence des dioptries plans [©️️️ L. Avantbey et al.]. À gauche, l'échelle est notée par les carrés de couleurs, elle a été proportionnellement reportée sur le plan image pour mettre en évidence l'augmentation du décalage avec l'angle d'incidence. À droite, visualisation de la distorsion en barillet (en bleu) d'un carré (en noir).

être simplifié à la recherche d'une homographie planaire qui décrit pour une prise de vue la relation entre les points du modèle de la mire et les points de la mire détectée sur l'image (voir figure 3.16 page 71).

La matrice d'homographie s'estime à partir de quatre correspondances minimum (8 paramètres indépendants, 2 équations indépendantes par correspondance). Si la mire est un damier, ce dernier doit donc posséder au moins  $3 \times 4$  cases (la rangée supplémentaire permet de distinguer l'orientation par asymétrie). Cependant, la matrice d'homographie mélange les paramètres propres au capteur avec la position de la mire dans l'espace. Il est possible d'extraire les paramètres intrinsèques, qui sont invariants pour un capteur donné, en utilisant deux ou trois homographies minimum (4 ou 5 paramètres indépendants, 2 équations indépendantes par homographie) présentant des paramètres extrinsèques distincts (la matrice de rotation des paramètres extrinsèques est supposée orthonormale). Les paramètres de distorsion quant à eux ne nécessitent que trois correspondances (5-6 paramètres indépendants, 2 équations par correspondance).

Les estimations de ces paramètres dépendent l'une de l'autre. Une méthode courante consiste à estimer les paramètres intrinsèques en négligeant la distorsion. Les paramètres de distorsions sont estimés à leur tour en s'appuyant sur les paramètres intrinsèques trouvés pour définir les positions idéales des points de la mire. Puis les coefficients de distorsions sont appliqués aux points images de la mire pour les redresser et les coefficients intrinsèques sont ensuite affinés avec cette nouvelle information. Une optimisation non linéaire (généralement un algorithme de type Levenberg-Marquardt) permet de faire converger ces résultats de manière itérative.

En pratique, on considère une mire contenant au moins 56 points d'ancrage (damier  $7 \times 8$ ) pour une meilleure robustesse au bruit engendré par les erreurs de mesure et un minimum de dix à vingt images différentes pour assurer des informations plus complètes et plus discriminantes [Bradski et Kaehler, 2008]. Cependant, plus il y a de points d'ancrage et de mires à traiter, plus le calcul sera long. En effet, la détection de la mire sur les images est une opération complexe d'un point de vue algorithmique et la convergence de la phase d'optimisation est difficile à obtenir quand la quantité d'information est élevée.

En alternative à ce procédé qui n'est pas facile à exécuter sous l'eau, certains travaux proposent de se passer de la mire et de s'appuyer plutôt sur la géométrie épipolaire reliant les images de la mission [Pessel et al., 2003; Prabhakar et Kumar, 2012; Rende et al., 2015; O'Byrne et al., 2015, ...]. C'est le principe de l'autoétalonnage : les correspondances sont réalisées avec des points caractéristiques du milieu, supposés fixes, et le déplacement de la caméra permet d'extraire les paramètres intrinsèques par invariance. Cependant, le milieu sous-marin n'est pas rigide, mais dynamique, comme nous l'avons remarqué à la section 2.1.1 du chapitre 2 page 18. Si les points sur lesquels nous nous appuyons se déplacent, même très légèrement, l'étalonnage sera beaucoup moins précis. Il est de surcroît très difficile d'estimer avec précision les coefficients de distorsion radiale à travers ce procédé.

Dans les deux cas, les variations des positions tridimensionnelles ne doivent pas impliquer uniquement des translations et des rotations pures, car elles formeraient des cas dégénérés pour l'évaluation du modèle [Zhang,



**Figure 3.18** – Exemples de méthodologie d'étalonnage : à gauche, une mire plane déposée sur le fond est prise en photo par un plongeur pour estimer les paramètres du sténopé compensé [Skarlatos et Rova, 2010], au centre, le modèle est le même, mais il s'agit cette fois-ci d'une mire tridimensionnelle ce qui lève la nécessité des mouvements de roulis et tangage lors de l'acquisition, acquisition et manipulation réalisée par des plongeurs [Abdo, 2007], à droite, prise de vue d'une mire plane à une distance fixe par un plongeur pour estimer les paramètres explicites du dioptré [Treibitz et al., 2012].

2000; Kunz et Singh, 2010]. Il est donc nécessaire d'introduire du tangage ( $R_x$ ) et du roulis ( $R_y$ ) en plus des mouvements dans le plan (avance  $T_x$ , dérive  $T_y$  et lacet  $R_z$ ). Or, les robots sont généralement stabilisés sur ces degrés de liberté et ils ne possèdent pas toujours un bras manipulateur sur lequel il est possible de monter les caméras comme c'est le cas dans les travaux de Brandou et al. [2007]. Néanmoins, il est possible de provoquer un léger roulis par des petits à coups différenciés sur les moteurs de poussée verticale. Pessel et al. [2003] ont montré que ces faibles amplitudes ( $\simeq 2^\circ$ ) étaient suffisantes pour améliorer la précision des estimations.

D'autres travaux tentent une approche différente et cherchent à établir une relation analytique afin de pouvoir prédire les paramètres sous-marins du sténopé compensé directement à partir des paramètres aériens du sténopé classique [Fryer et Fraser, 1986; Lavest et al., 2000, 2003; Bianco et al., 2011, ...]. Selon ces études, la longueur focale aérienne se retrouve multipliée par un facteur qui varie autour de 1,33 en fonction de l'indice de réfraction [Lavest et al., 2000; Méline et al., 2010] et la position du projeté du centre optique est quasiment identique [Méline et al., 2010; Bianco et al., 2011]. Lavest et al. [2000] proposent une formule pour estimer les coefficients de distorsion radiale sous-marine à partir de ceux estimés dans l'air. Ils sont exprimés en fonction des longueurs focales aérienne et sous-marine et le changement le plus significatif qu'ils présentent est une inversion de signe (passage d'une distorsion en coussinet à barillet, illustration à la figure 3.17 page 72) [Rives et al., 1978; Méline, 2013]. Cependant, pour obtenir une précision satisfaisante avec ces estimations, il est nécessaire de connaître l'indice de réfraction de l'eau de la zone d'étude. Or nous avons déjà pointé la difficulté à effectuer cette mesure d'un point de vue opérationnel. De plus, ces méthodes ne prennent pas en paramètres l'indice de réfraction du hublot, qui peut-être très différent en fonction de la matière utilisée [Sedlazeck et Koch, 2012], ni la distance d'observation.

Quelques exemples de protocoles opérationnels de prise de vues d'étalonnage sont illustrés à la figure 3.18 page 73.

### Approche proposée

Pour notre chaîne de reconstruction sous-marine, nous avons choisi d'utiliser le modèle du sténopé compensé avec un étalonnage *in situ* par mire, car il s'agit de la méthode la plus compatible avec les contraintes opérationnelles de terrain. Outre le fait de rassembler au sein d'un même système les éléments décrits dans la littérature permettant d'obtenir une estimation la plus précise possible du système (étalonnage *in situ*, positionnement du capteur, etc.), notre apport principal sur le problème de l'étalonnage sous-marin porte sur la méthodologie d'acquisition des prises de vues.

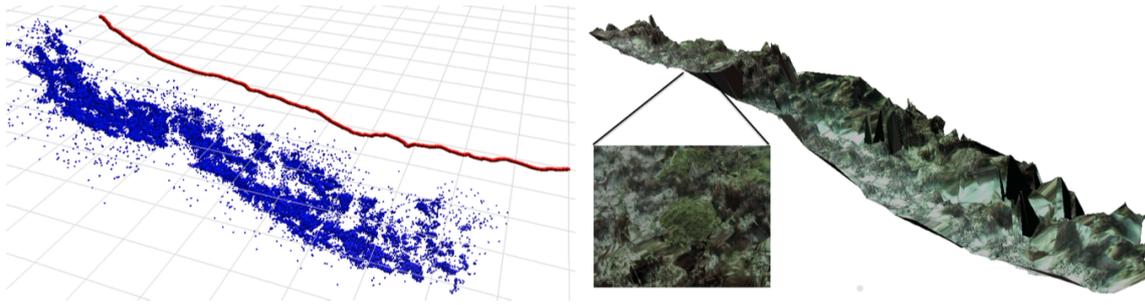
Avec l'acquisition de plus d'une centaine d'images par minute, l'estimation du modèle va prendre beaucoup de temps. Or il n'est pas assuré que l'information apportée par ces images soit suffisante et de qualité : les

mires sont-elles reconnaissables ? leurs positions et leurs orientations apportent-elles des informations utiles ? l'information apportée est-elle redondante avec celle d'une autre image ? manque-t-il de l'information à certains endroits qui contribuerait à améliorer la précision du modèle ? etc. Pour un étalonnage aérien, les conséquences sont moindres, car il est possible de recommencer le procédé autant de fois que nécessaire, et ce, de manière totalement décorrélée du déroulement de la mission (à condition que le système caméra ne change pas). Dans l'eau en revanche, cela implique la nécessité de renvoyer le robot sur zone : la complexité est alors d'une tout autre dimension.

Nous proposons donc une méthode qui permet d'acquérir les images d'étalonnage avec un ou deux robots, puis de les trier à la volée selon les critères d'intérêt pour l'estimation du modèle afin de fournir une sélection minimaliste qui pourra être utilisée pour l'étalonnage *a posteriori*.

	<i>Problème</i>	<i>Choix de résolution</i>
<i>En résumé</i>	<b>Dioptré :</b>	sténopé compensé + proche du hublot plan + étalonnage à distance fixe
	<b>Étalonnage sous-marin :</b>	méthodologie d'étalonnage au nadir ou en latéral
	<b>Quantité d'images :</b>	sélection des images à la volée

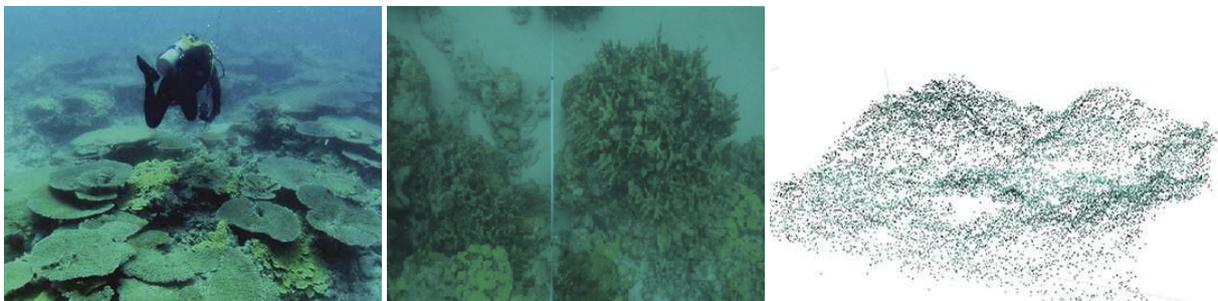
*Plus de détails sur ces contributions sont disponibles à la section 3.3.2 page 104.*



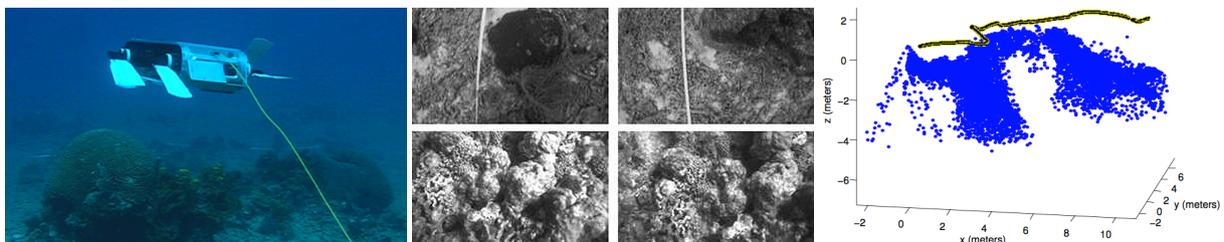
(a) À gauche, nuage épars de points tridimensionnels et trajectoire suivie, tous deux extraits des images tirées d'une vidéo acquise par *Beall et al.* [2010] autour de l'archipel d'Andros (Bahamas) et à droite, le modèle obtenu, triangulé et texturé.



(b) *Rende et al.* [2015] ont utilisé le Tower Sled (à gauche) équipé d'une GoPro Hero5+ et d'un GPS pour étudier les herbiers de *Posidonia* lors d'une campagne en 2014 sur l'aire marine protégée de Capo Rizzuto (Italie). Les images sont prétraitées (au centre), puis utilisées par les logiciels Bundler et PMVS2 pour créer des nuages de points denses (à droite).



(c) Un plongeur acquière (à gauche) les photos des coraux (exemple au centre), puis un algorithme de type SFM permet d'extraire les points d'intérêt des images, de les projeter et de les recaler dans un repère commun pour former un nuage de points épars (à droite) [*Burns et al.*, 2015].



(d) *Sbkurti et al.* [2011] ont utilisé le robot AQUA (à gauche) pour recueillir des images (exemples au centre) afin de tester plusieurs détecteurs-descripteurs. À droite, le résultat d'une reconstruction tridimensionnelle basée sur des points SURF et la trajectoire issue d'une fusion des données d'une centrale inertielle (IMU – Inertial Measure Unit) et de l'algorithme SFM utilisé.

Figure 3.19 – Illustration de résultats obtenus dans la littérature (nuages de points ou modèles) – suite.



**Figure 3.20** – Les AUV utilisés par la communauté scientifique pour la cartographie optique en eau peu profonde et leurs spécificités (année de développement, poids, dimensions et profondeur maximale de travail) [© L. Avantbey et al.] : le SeaBED [© WHOI], le Girona 500 [© Université de Girona] et le DAGON [© DFKI].

### 3.2.3 Autour du problème d'acquisition *in situ*

Les dimensions des mesures que nous souhaitons effectuer (taille d'échantillon au sol centimétrique à millimétrique) relèvent de la télédétection rapprochée. Nous avons expliqué au chapitre 2 (section 2.2 page 33) que ce choix implique de réaliser nos acquisitions au sein même de l'environnement étudié (télédétection *in situ*). Alors que dans l'air, les contraintes opérationnelles les plus critiques sont posées par la sustentation, dans l'eau c'est l'immersion qui concentre toutes les attentions (pression, étanchéité et corrosion, voir la section 2.1 du chapitre 2 page 18). Les charges utiles et les vecteurs qui les déplacent sur zone doivent donc prendre en compte ces fortes exigences tout en répondant aux critères photogrammétriques imposés par les sujets d'étude.

#### Les vecteurs utilisés pour la collecte de données optiques en eau profonde dans la littérature

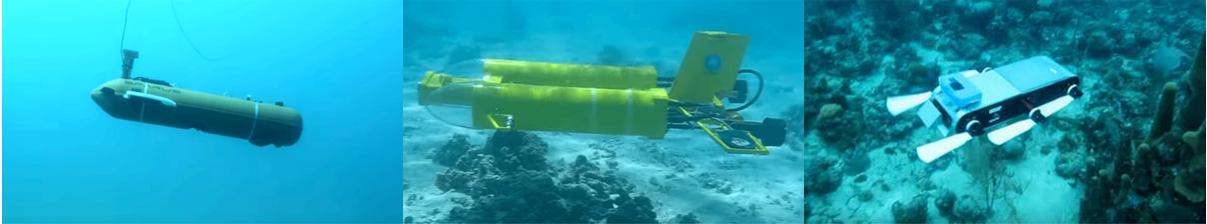
Pour effectuer les acquisitions sur une zone, les capteurs sont soit transportés par une plateforme pilotée ou autonome [Pizarro *et al.*, 2004 ; Williams et Mahon, 2004 ; Dunbabin *et al.*, 2005 ; Ballard, 2007 ; Brandou *et al.*, 2007 ; Lirman *et al.*, 2007 ; Ludvigsen *et al.*, 2007 ; Botelho *et al.*, 2009 ; Foley *et al.*, 2009 ; Sedlazeck *et al.*, 2009 ; Johnson-Roberson *et al.*, 2010 ; Aulinas *et al.*, 2011 ; Shkurti *et al.*, 2011 ; Fillinger et Funke, 2013 ; Gracias *et al.*, 2013 ; Hildebrandt, 2014 ; Nelson *et al.*, 2014, ...], soit manipulés par des plongeurs [Nicosevici et Garcia, 2008 ; Méline *et al.*, 2010 ; Mahon *et al.*, 2011 ; Drap, 2012 ; Skarlatos *et al.*, 2012 ; Balletti *et al.*, 2015 ; Diamanti et Vlachaki, 2015 ; Van Damme, 2015, ...]. Nous noterons quelques cas particuliers : certains capteurs sont fixés sur des plateformes stabilisées en profondeur et remorquées par un bateau de surface [Ballard *et al.*, 2000 ; Rende *et al.*, 2015], d'autres, comme celui conçu par Jenkin *et al.* [2010], sont utilisés par des plongeurs pendant leur développement en attendant d'être ajoutés à des robots, d'autres encore sont montés sur pied [Swirski *et al.*, 2010] ou sur perche [O'Byrne *et al.*, 2015], mais ces configurations sont généralement employées à titre expérimental plutôt qu'à des fins opérationnelles.

Concernant les plateformes robotisées, nous nous intéressons plus particulièrement dans le cadre de notre étude à celles employées par la communauté pour collecter des images optiques à des fins cartographiques dans la gamme des 100 mètres de profondeur. Parmi les AUV, nous recensons le SeaBED et ses dérivés (comme le Sirius de l'ACFR<sup>2</sup>) créés par le WHOI<sup>3</sup>, le Girona 500 développé par l'Université de Gironne ou encore le DAGON conçu par le DFKI<sup>4</sup> (voir figure 3.20 page 76). Nous noterons également l'Oberon, créé par l'ACFR et l'URIS conçu à l'Université de Gironne. À cette liste, nous pouvons ajouter les unités plus légères qui présentent

2. ACFR – Australian Centre for Field Robotics

3. WHOI – Woods Hole Oceanographic Institute

4. DFKI – Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz



SPARUS	StarBug	AQUA
2010	2004	2003
52 kg	26 kg	18 kg
160 cm × 23 cm × 23 cm	120 cm × 15 cm × 15 cm	64 cm × 13 cm × 45 cm
200 m	100 m	35 m

**Figure 3.21** – Les unités plus légères utilisées par la communauté scientifique pour effectuer de la cartographie optique en eau peu profonde et leurs spécificités (année de développement, poids, dimensions et profondeur maximale de travail) [© L. Avantbey et al.] : le Sparus [© Universitat de Girona], le Starbug [© CSIRO] et le robot AQUA [© Dalhousie, McGill and York Universities].



Phantom 500	VideoRay Pro	OpenROV
1984	2000	2012
86 kg	6,1 kg	2,6 kg
109 cm × 65 cm × 65 cm	37 cm × 22 cm × 30 cm	30 cm × 15 cm × 20 cm
150 m	150 m	75 m

**Figure 3.22** – Les petits ROV utilisés par la communauté scientifique pour effectuer de la cartographie optique en eau peu profonde et leurs spécificités (année de développement, poids, dimensions et profondeur maximale de travail) [© L. Avantbey et al.] : le Phantom [© Deep Ocean Engineering] ainsi que le VideoRay Pro [© VideoRay] et l'OpenROV [© OpenROV], deux mini-robots qui commencent à être testés pour des travaux scientifiques, mais qui manquent encore de modularité pour cela.

l'avantage de pouvoir être manipulées et mises à l'eau à la main comme le Sparus de l'Université de Gironne, le Starbug de CSIRO<sup>5</sup> ou le robot AQUA des universités Dalhousie, McGill et York (figure 3.21 page 77).

Du côté des ROV, la plupart correspondent à de grosses unités de plusieurs tonnes envoyées en grande profondeur (jusqu'à plus de 3000 mètres sous l'eau) : JASON, KIEL, Hercules, VICTOR 6000, Cherokee, Super Achilles, SubFighter, etc. Nous nous intéresserons donc aux quelques unités beaucoup plus légères qui sont employées en eau peu profonde (figure 3.22 page 77), comme les ROV de la gamme Phantom (le 500 ou le S2 par exemple) ou de la gamme V8 (le V8 Sii par exemple). Nous noterons que la communauté scientifique commence à s'intéresser aux mini-plateformes comme le VideoRay ou l'OpenROV, mais ces dernières, assimilables pour le moment à des caméras sous-marines téléguidées, sont peu adaptées à l'acquisition systématique et ne disposent ni de la modularité ni des équipements permettant de conduire des travaux scientifiques avancés.

Au regard de la taille des zones d'études dont les profondeurs n'excèdent pas 100 mètres, la très grande majorité de ces vecteurs sont conçus pour des profondeurs d'opération plus élevées. Ils sont donc coûteux (achat, maintenance et utilisation) et très souvent surdimensionnés (que ce soit les robots eux-mêmes ou les équipements nécessaires pour les déployer). C'est essentiellement pour ces deux raisons opérationnelles que les équipes de recherche recourent très souvent à des plongeurs pour couvrir ces zones en déplaçant les capteurs à la main.

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2 (section 2.2 page 33), l'inconvénient majeur de cette méthode

5. CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation



Allied Vision			Point Grey	
<i>Prosilica GC 1580</i>	<i>Prosilica GE 1900</i>	<i>Prosilica GT 1920</i>	<i>BumbleBee 2</i>	<i>DragonFly</i>
2005 (CCD)	2007 (CCD)	2011 (CCD)	2006 (CCD)	2001 (CCD)
1360×1024 px   20 fps	1920×1080 px   30 fps	1936×1456 px   40 fps	648×488 px   48 fps	1024×768 px   15 fps
6,45 μm/px	7,40 μm/px	4,54 μm/px	7,40 μm/px	4,65 μm/px
Optique interchangeable	Optique interchangeable	Optique interchangeable	2,5 mm	Optique interchangeable
59×33×46 mm (104 g)	80×39×51 mm (169 g)	92×33×54 mm (224 g)	157×36×48 mm (342 g)	63×51×14 mm (38 g)


TriTech	Kongsberg	PCO	DeepSea P&L	Sony
<i>Typhoon</i>	<i>OE14-502</i>	<i>PixelFly</i>	<i>Multi SeaCam 2060</i>	<i>FCBH 11</i>
≤ 2007 (CCD)	2008 (CMOS)	2001 (CCD)	≤ 1998 (CMOS)	2008 (CMOS)
720×576   20 fps	1920×1024 px   30 fps	1360×1024 px   9,5 fps	768×494 px   30 fps	1920×1080 px   30 fps
4,50 μm/px	2,50 μm/px	4,65 μm/px	6,25 μm/px	2,50 μm/px
3,6-82,8 mm	5,1-51 mm	3,5-108 mm	3 mm	5,1-51 mm
206×92×92 mm (1900 g)	223×95×95 mm (3200 g)	72×39×47 mm (250 g)	159×61×48 mm (650 g)	43×47×72 mm (120 g)

**Table 3.2** – Capteurs professionnels [© L. Avantbey et al.]. Résumé des caractéristiques principales des caméras professionnelles utilisées dans la littérature pour des travaux de reconstruction tridimensionnelle sous-marine : année de mise en vente, type de capteur, résolution et fréquence associée, taille d'un pixel, longueur(s) focale(s), dimensions et poids.

« manuelle » concerne la perte du caractère systématique de l'acquisition : il est en effet difficile pour un plongeur de maintenir de manière constante un cap, une vitesse ou une profondeur comme le ferait un robot, afin de garantir la complétude des données en terme de couverture, de recouvrement et de GSD. Certains travaux mettent en place des systèmes relativement complexes sur le terrain pour servir de guides aux plongeurs et contraindre au maximum la couverture [Mahon et al., 2011 ; Diamanti et Vlachaki, 2015]. De plus, le travail de couverture n'est pas facilité par les temps et les fréquences de plongées limités par la profondeur [Skarlatos et Rova, 2010]. Dans les travaux recensés où le recueil d'information est réalisé par des plongeurs, les zones d'études s'étendent alors sur quelques dizaines, voire quelques centaines de mètres carrés tout au plus.

### Les capteurs utilisés pour la reconstruction tridimensionnelle sous-marine dans la littérature

Les critères de choix des capteurs sont une affaire de compromis. En terme de qualité, les intérêts portent sur la résolution (nombre de pixels par unité de longueur ou densité), la sensibilité et le bruit, mais aussi sur le rapport entre la focale et la taille physique d'un pixel : plus ce facteur est grand pour une taille de capteur donné, plus il sera possible d'observer la scène de loin pour une taille d'échantillon au sol donnée. Cependant, une focale trop élevée aura pour conséquence de produire un champ de vision plus étroit. En terme de contrôle, les fonctionnalités importantes pour les travaux de cartographie sont la capacité à désactiver tous les réglages automatiques, la possibilité d'acquérir des images à intervalles réguliers avec une fréquence élevée, l'aptitude à la synchronisation avec d'autres appareils, la faculté à être contrôlé par un ordinateur et la possibilité de récupérer les images « à la volée » pour pouvoir les traiter en temps réel si nécessaire. Enfin, en terme de contraintes physiques, l'encombrement (taille et poids) et la possibilité de choisir et changer l'optique sont des critères importants. Quant à la capture, elle se décline en deux types : vidéo ou photographie. Le premier mode offre une fréquence d'acquisition beaucoup plus élevée en contrepartie d'une résolution plus faible et son format d'enregistrement nécessite un découpage en images (*frame* en anglais) pour pouvoir être traité.

Canon		Pentax	Sony	
<i>EOS 5D Mark II</i>		<i>K5</i>	<i>A700</i>	
<i>EOS 600D</i>				
2008 (CMOS) 5616×3744 px (4 ips) HDV [1920×1080 px (30 fps)] 4,26 μm/px [12,45 μm/px] 152×114×75 mm (810 g)	2011 (CMOS) 5184×3456 px HDV [1920×1080 px (30 fps)] 4,31 μm/px [11,62 μm/px] 134×100×80 mm (570 g)	2010 (CMOS) 4928×3264   1 ips HDV [1920×1080 px (25 fps)] 4,81 μm/px [12,35 μm/px] 131×97×73 mm (750 g)	2007 (CMOS) 4288×2856   1 ips HDV ∅ 5,49 μm/px 142×105×80 mm (690 g)	

Nikon				
<i>D70</i>	<i>D200</i>	<i>D300</i>	<i>D700</i>	<i>D7000</i>
2004 (CCD) 3008×2000 px HDV ∅ 7,88 μm/px 140×111×78 mm (595 g)	2005 (CCD) 3872×2592 px (1 ips) HDV ∅ 6,10 μm/px 147×74×133 mm (910 g)	2007 (CMOS) 4288×2848 px (1 ips) HDV ∅ 5,51 μm/px 147×114×74 mm (825 g)	2008 (CMOS) 4256×2832 px (1-5 ips) HDV ∅ 8,46 μm/px 147×123×77 mm (995 g)	2010 (CMOS) 4928×3264 px (1-6 ips) HDV [1920×1080 px (24 fps)] 4,79 μm/px [12,50 μm/px] 132×105×77 mm (780 g)

**Figure 3.23** – Capteurs grand public haut de gamme [© L. Avantbey et al.]. Résumé des caractéristiques principales des reflex numériques utilisés dans la littérature pour des travaux de reconstruction tridimensionnelle sous-marine : année de mise en vente, type de capteur, résolutions (image, vidéo) et fréquences associées, taille d'un pixel, dimensions et poids.

Les capteurs utilisés dans des travaux relatifs à notre sujet dans la littérature peuvent être regroupés selon trois catégories (nous noterons l'utilisation à la marge de caméscopes numériques comme le HV30 de Canon [Beall et al., 2010; Swirski et al., 2010] ou le DCR-TRV900 de Sony [Lirman et al., 2007]) :

- **Les caméras professionnelles** (figure 3.2 page 78) : Prosilica GC 1380, GE 1900 et GT 1920 de Allied Vision [Johnson-Roberson et al., 2010; Kunz et Singh, 2010; Beall et al., 2011; Mahon et al., 2011; Hildebrandt et al., 2012; Henderson et al., 2013; Drap et al., 2015], DragonFly et BumbleBee 2 de Point Grey [Jenkin et al., 2010; Shkurti et al., 2011; Servos et al., 2013], Typhoon de Tritech [Botelho et al., 2009; Fillinger et Funke, 2013], OE14 502 ou 500 de Kongsberg [Sedlazeck et al., 2009; Fillinger et Funke, 2013], PixelFly de PCO [Pizarro et al., 2004; Foley et al., 2009], Multi SeaCam de DeepSea Power & Light [Fillinger et Funke, 2013] et FCBH 11 de Sony [Fillinger et Funke, 2013].

Contrôlés par un ordinateur, ce sont les capteurs qui offrent le spectre le plus large de réglages : paramètres d'acquisition, durées et délais, déclencheurs électroniques, etc. Les données acquises peuvent être transmises à un ordinateur pour un traitement temps réel. Cependant, la qualité des images issues de ces capteurs dédiés à la vidéo reste souvent inférieure à celles des appareils photographiques, bien que les modèles récents proposent maintenant une résolution haute définition (1280×720 px). Lorsqu'elles sont dédiées à une utilisation sous-marine, les caméras sont étanches et possèdent des filtres et des hublots spécifiques.

- **Les appareils photographiques réflex** (figure 3.23 page 79) : EOS 5D Mark II et 600D de Canon [Nicosevici et Garcia, 2008; O'Byrne et al., 2015], K5 de Pentax [Burns et al., 2015], A700 de Sony [Diamanti et Vlachaki, 2015] et D70, D200, D300, D700 et D7000 de Nikon [Bianco et al., 2011; Drap, 2012; Gintert et al., 2012].

Ces capteurs proposent un large choix d'optiques et sont très utilisés en photogrammétrie pour la qualité des photographies qu'ils produisent. Destinés aux utilisateurs avancés du grand public, ils permettent quelques réglages, mais sont rarement conçus pour être contrôlés au niveau électronique. Les images sont enregistrées



Canon			Nikon
PowerShot G9	PowerShot D10	PowerShot G12	Coolpix 995
2007 (CCD)	2009 (CCD)	2010 (CCD)	2011 (CCD)
4000×3000 px (1,5 ips)	4000×3000 px (1,2 ips)	3648×2736 px (2 ips)	2048×1536 px (1 ips)
HDV [1024×768 px (15 fps)]	HDV [640×480 px (30 fps)]	HDV [1280×720 px (24 fps)]	HDV [520×240 px (30 fps)]
1,86 μm/px [7,27 μm/px]	1,55 μm/px [9,65 μm/px]	2,04 μm/px [5,82 μm/px]	3,52 μm/px [22,5 μm/px]
7,4-44,4 mm (35-210 mm)	6,8-18,6 mm (38-105 mm)	6,1-30,5 mm (28-140 mm)	8-32 mm (38-152 mm)
107×73×43 mm (376 g)	104×67×49 mm (212 g)	12×76×48 mm (401 g)	138×82×63 mm (454 g)


GoPro			Intova	RaspberryPi
HD Hero	HD Hero2	Hero3+ Black	HD Sport Pro	PiCam
2010 (CMOS)	2011 (CMOS)	2013 (CMOS)	2012 (CMOS)	2013 (CMOS)
2592×1944 px (1 ips)	3840×2880 px (2 ips)	4000×3000 px (2 ips)	2592×1944 px (1 ips)	2592×1944 (0.6 ips)
HDV [1920×1080 px (30 fps)]	HDV [1920×1080 px (30 fps)]	HDV [4096×2160 px (15 fps)]	HDV [1920×1080 px (30 fps)]	HDV [1920×1080 px (30 fps)]
2,22 μm/px [5 μm/px]	1,60 μm/px [5,22 μm/px]	1,57 μm/px [1,65 μm/px]	2,45 μm/px [5,31 μm/px]	1,46 μm/px [1,98 μm/px]
2,5 mm (15,8 mm)	2,5 mm (14,6 mm)	2,5 mm (14,4 mm)	3,35 mm (19 mm)	3,6 mm (34,5 mm)
60×42×30 mm (150 g)	60×42×30 mm (100 g)	59×41×21 mm (74 g)	84×60×70 mm (170 g)	25×20×9 mm (3 g)

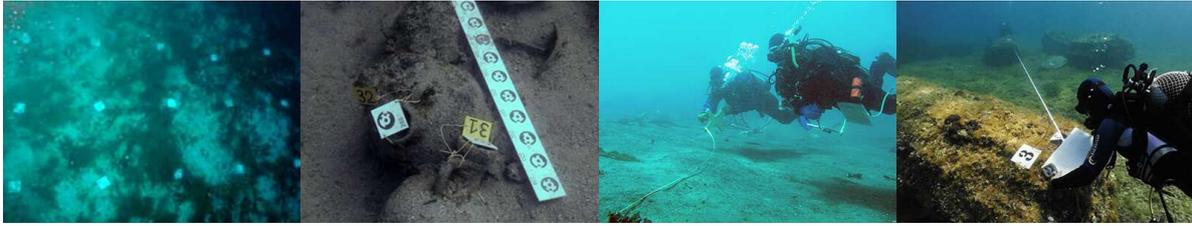
**Figure 3.24** – Capteurs grand public peu onéreux [© L. Avantbey et al.]. Résumé des caractéristiques principales des appareils photographiques et caméras (action camera) compacts et des modules caméras à bas coût utilisés dans la littérature pour des travaux de reconstruction tridimensionnelle sous-marine : année de mise en vente, type de capteur, résolutions (image, vidéo) et fréquences associées, taille d'un pixel, longueur (s) focale (s) et équivalents en 35 mm, dimensions et poids.

sur une carte mémoire et il n'est pas facile d'y accéder pour un traitement temps réel. La fonctionnalité intervalomètre est indispensable (prises de vue à intervalles réguliers sans nécessité d'appuyer sur le déclencheur) bien qu'elle présente souvent une certaine dérive dans le temps (écart non constant entre deux prises de vues) et que sa fréquence est souvent limitée à une image par seconde. Des entreprises spécialisées fournissent des caissons étanches professionnels pour la majorité des modèles de cette gamme pour un surcoût non négligeable.

- **Les appareils photographiques compacts, les caméras compacts et les modules à bas coût** (figure 3.24 page 80) : PowerShot G9, D10 et G12 de Canon [Fillinger et Funke, 2013; Capra et al., 2015], Coolpix 995 de Nikon [Fillinger et Funke, 2013], HD Hero, HD Hero 2 et Hero3+ Black Edition de GoPro [Gintert et al., 2012; Schmidt et Rzhannov, 2012; Nelson et al., 2014; Capra et al., 2015; Rende et al., 2015], HD Sport Pro de Intova [Capra et al., 2015] et PiCam de RaspberryPi [Mazzei et al., 2015].

La gamme des compacts propose des capteurs à optique fixe présentant un bon rapport qualité, prix et encombrement. Destinés au grand public, la marge de manœuvre sur leurs réglages est faible, surtout pour les caméras compactes, bien que les derniers modèles commencent à étoffer leurs options. On retrouve l'indispensable fonction d'intervalomètre, avec le même problème sur la régularité, mais offrant des fréquences qui, cette fois-ci, descendent sous la seconde. Certains constructeurs proposent des boîtiers étanches pour leur gamme. Toujours dans cette catégorie de capteurs à bas coût, nous voyons récemment apparaître sur le marché des petits modules caméras haute définition, entièrement contrôlables par voie électronique (comme la PiCam).

Le lecteur cherchant à approfondir trouvera les comparaisons d'une partie de ces capteurs en imagerie sous-marine dans les travaux de Gintert et al. [2012] et Capra et al. [2015].



**Figure 3.25** – Relevés métriques sur le terrain : à gauche, exemples de marqueurs équipant une zone [Drap *et al.*, 2003] ou des objets [Diamanti *et al.*, 2015], à droite, mesures avec des mètres rubans [Rubin *et al.*, 2011] entre les points de contrôle [Balletti *et al.*, 2015].

### Les considérations photogrammétriques sous-marines de la littérature

Des montages à capteur unique, pour former des couples stéréoscopiques temporels, sont proposés par Sedlazeck *et al.* [2009], Aulinas *et al.* [2011], Shkurti *et al.* [2011], Drap [2012], Skarlatos *et al.* [2012], Fillingner et Funke [2013], Burns *et al.* [2015], Diamanti *et al.* [2013] ou encore Rende *et al.* [2015]. Quant aux configurations à deux capteurs qui permettent d'obtenir des couples stéréoscopiques simultanés ou synchronisés, elles sont utilisées par Brandou *et al.* [2007], Beall *et al.* [2010], Jenkin *et al.* [2010], Johnson-Roberson *et al.* [2010], Williams *et al.* [2010], Swirski *et al.* [2010], Mahon *et al.* [2011], Méline *et al.* [2012], Prabhakar et Kumar [2012], Schmidt et Rzhhanov [2012], Gracias *et al.* [2013], Nelson *et al.* [2014], Mazzei *et al.* [2015] ou encore O'Byrne *et al.* [2015].

Dans la littérature, les contributions privilégient essentiellement une base permettant d'obtenir le taux de recouvrement recommandé pour la reconstruction stéréoscopique aérienne (soit 60 %, se référer au chapitre 3, section 3.1.3 page 59) voire au-delà (les taux peuvent monter jusqu'à 80 % dans certains travaux).

Dans le cas d'acquisitions temporelles, nous relevons donc des vitesses moyennes entre 0,15 et 0,5 m/s pour des fréquences d'acquisition entre 0,2 à 2 photographies par seconde [Drap *et al.*, 2007 ; Foley *et al.*, 2009 ; Shkurti *et al.*, 2011 ; Skarlatos *et al.*, 2012 ; Burns *et al.*, 2015 ; Rende *et al.*, 2015, ...] (30 images par seconde pour les flux vidéos, mais le jeu n'est que rarement traité dans son intégralité). Ludvigsen *et al.* [2007] constatent par ailleurs qu'une vitesse inférieure à la vitesse théorique est souvent nécessaire pour assurer le taux de recouvrement à cause des dérives du vecteur dans l'environnement. Quant aux acquisitions simultanées, nous retrouvons le plus souvent un écart de 6 à 7 cm pour des distances à la scène de 1 à 4 mètres [Kunz et Singh, 2010 ; Johnson-Roberson *et al.*, 2010, ...]. En revanche, certains travaux s'appuient sur des bases beaucoup plus larges et donc des taux de recouvrement très inférieurs [Beall *et al.*, 2010 ; Swirski *et al.*, 2010 ; O'Byrne *et al.*, 2015, ...]. Parmi eux, nous retrouvons les acquisitions initialement prévues pour des applications de mosaïquage [Ludvigsen *et al.*, 2007 ; Gracias *et al.*, 2013, ...]. Enfin, les trajectoires de couverture de zones sont, quant à elles, conçues pour fournir un taux de recouvrement entre deux couples stéréoscopiques d'au moins 20 %.

Dans les travaux recensés sur la reconstruction tridimensionnelle, la taille de l'échantillon au sol (GSD) des images acquises est souvent subcentimétrique (pour la mosaïque, elle est plutôt de l'ordre du centimètre) : 3 à 5 mm [Lirman *et al.*, 2007 ; Skarlatos *et al.*, 2012], 1 à 2 mm [Lirman *et al.*, 2007 ; Ludvigsen *et al.*, 2007 ; Henderson *et al.*, 2013 ; Burns *et al.*, 2015] ou encore inférieure à 1 mm [Schmidt et Rzhhanov, 2012 ; Gracias *et al.*, 2013]. Les précisions spatiales des reconstructions obtenues avec ces tailles d'échantillons au sol oscillent entre 0,5 et 5 cm avec une précision altimétrique entre 2 et 5 cm [Johnson-Roberson *et al.*, 2010 ; Skarlatos *et al.*, 2012 ; Lirman *et al.*, 2007 ; Burns *et al.*, 2015]. Or, pour des raisons de temps de calcul, les résolutions de travail sont rarement celles de l'acquisition, et cette réduction a pour effet d'augmenter la taille de l'échantillon au sol. Les quelques travaux qui le précisent utilisent généralement au maximum des résolutions de la haute définition (HD – 1 Mpx) [Méline *et al.*, 2012] et souvent des résolutions moitiés moins grandes (0,5 Mpx) [Shkurti *et al.*, 2011 ; Nicosevici et Garcia, 2008].

Enfin, du fait que la reconstruction globale de la scène doit s'appuyer sur des points de vue locaux, il est nécessaire de contrôler l'exactitude du résultat. Or, en milieu aquatique, il est difficile d'obtenir une vérité terrain très précise et complète. La méthode la plus répandue, issue des pratiques photogrammétriques, consiste à répartir sur la zone d'étude des marqueurs spécifiques (cibles lestées, vissées ou encore enfoncées sur le terrain) dont les plus courants sont les règles étalons (bandes colorées alternées représentant des distances connues) et les étiquettes archéologiques (colorées et numérotées) [Bowens, 2011] et à procéder à des relevés de mesures (voir figure 3.25 page 81) [Drap *et al.*, 2003; Henderson *et al.*, 2013; Rubin *et al.*, 2011; Balletti *et al.*, 2015; Diamanti *et al.*, 2013]. Des mètres déroulants permettent de mesurer les distances relatives entre les marqueurs, leur profondeur peut être mesurée de manière absolue avec un capteur ou de manière relative avec des barres verticales graduées et des lignes de niveau, etc. Lorsque la surface est proche, il est possible de référencer toutes ces mesures dans un repère absolu, en utilisant des barres verticales équipées d'un capteur GPS par exemple ou encore par une trilatération extérieure depuis un point fixe. Le réseau de points de contrôle ainsi obtenu permet de vérifier la cohérence de la scène globale reconstruite.

### Approche proposée

Nous venons de voir que les plateformes sous-marines mobiles dédiées à l'acquisition d'images optiques sont globalement surdimensionnées au regard de la taille des zones d'études qui nous intéressent et que c'est pour ces raisons que les acquisitions continuent à être menées par des plongeurs. Or, ce faisant, nous perdons l'aspect systématique de l'acquisition, qui est un facteur clef pour la complétude des données. Par ailleurs, les charges utiles stéréoscopiques natives sont rares et n'offrent pas toujours un boîtier étanche. De plus, leur taille est souvent relative à celles des gros vecteurs pour lesquels elles ont été conçues et elles ne permettent guère de réunir l'ensemble des critères importants pour une étude scientifique (base, optique, paramètres internes, etc.).

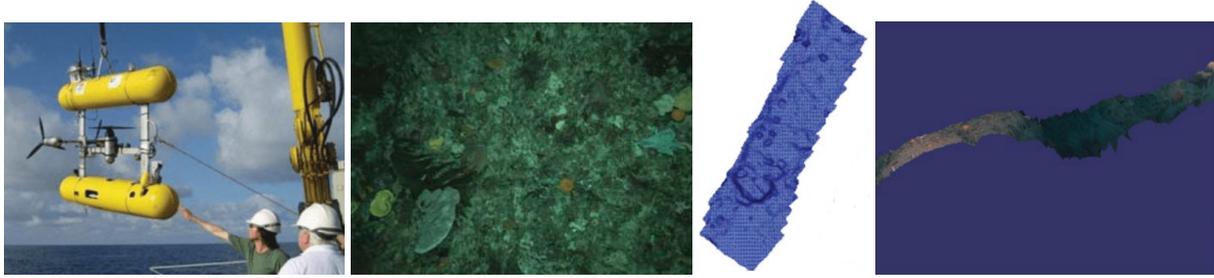
Nous proposons donc la conception d'une plateforme d'acquisition légère pour offrir une plus grande souplesse opérationnelle et relaxer la limite du nombre de plongées (coût des équipements opératoires pour les plateformes traditionnelles, sécurité pour les plongeurs) afin de procurer des possibilités en terme de fréquence et de régularité jusque-là difficiles à atteindre. Notre système s'appuie sur une électronique performante, mais peu onéreuse et à encombrement réduit, une mécanique simple et robuste pour faciliter la répétabilité, ainsi que sur un ensemble de paramètres permettant l'acquisition à l'échelle des individus. Il est composé de trois éléments :

- des bancs stéréoscopiques étanches modulables et synchronisés (pour répondre à l'hypothèse que nous avons posée à la section 3.2.1 page 64) basés sur des caméras professionnelles ou des caméras compactes grand public pour la partie charge utile,
- un micro robot sous-marin hybride (filoguidage asservi ou autonomie complète) de moins de 10 kg et mesurant 20 × 20 × 30 cm pour la partie vecteur, baptisé *Ryujin* (« *Dragon des Mers* »),
- ainsi qu'un petit véhicule de surface de type catamaran, *Kraken*, qui sert de plateforme relais entre les opérateurs et le vecteur immergé.

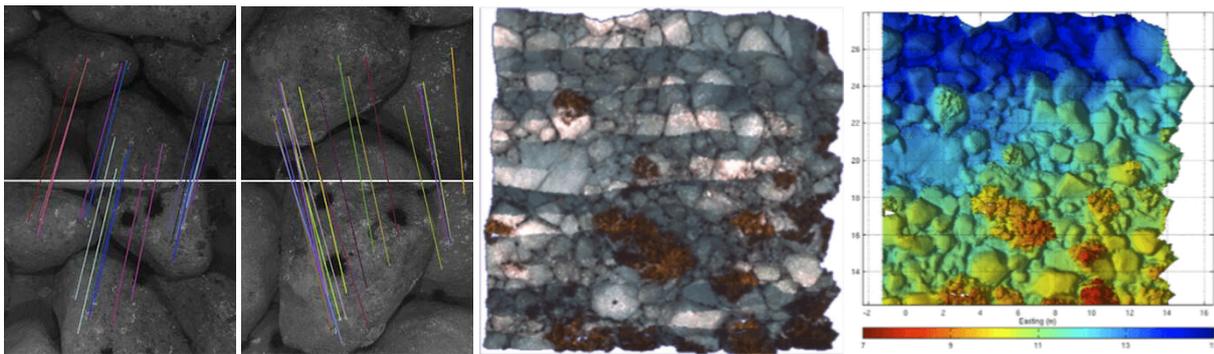
Enfin, pour pouvoir valider les mesures réalisées sur les nuages de points extraits des images, nous proposons une simplification de la méthode de relevés de métriques sur le terrain pour qu'elle puisse s'effectuer plus rapidement : nous enregistrons l'information analogique de manière à ce que la phase de mesure puisse être reportée en dehors du temps de plongée. Comme points de contrôle, nous avons mis au point des mires de marquage numérotées et orientées qui sont adaptées à la prise de vue en milieu sous-marin.

En résumé	Problème	Choix de résolution
	<b>Études locales &amp; faible fond :</b>	micro plateformes agiles à faible coût
	<b>Vérité terrain sous-marine :</b>	mires de vision et méthode simplifiée des relevés métriques

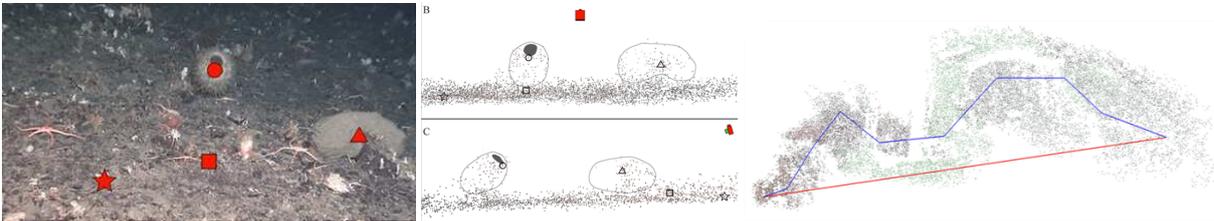
Pour de plus amples détails sur ces contributions, le lecteur pourra se rendre à la section 3.5.5 page 115.



(a) *Johnson-Roberson et al. [2010]* utilisent l'AUV Sirius (à gauche) pour acquérir des images sur la grande barrière de corail au large de l'Australie (un exemple est présenté au centre), à droite le maillage tridimensionnel d'un transect et une coupe en coupe du modèle texturé.



(b) *Williams et al. [2010]* ont acquis des photographies (exemples à gauche) et créé des modèles tridimensionnels (exemple d'un modèle texturé au centre, et à droite, le même modèle avec l'ajout d'une coloration relative à la profondeur) afin d'étudier la population trop abondante d'oursins qui menacent les forêts de macros-algues au large de la Tasmanie.

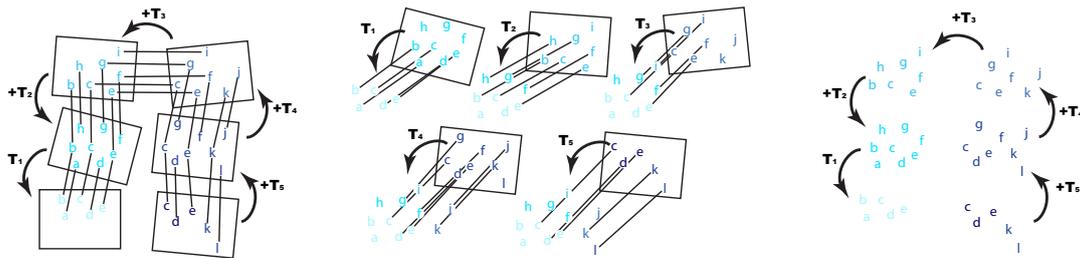


(c) À gauche, exemple d'une image tirée d'une séquence vidéo prise par le ROV Sperre SubFighter lors d'une mission dans la péninsule Antarctique; au centre, deux vues du nuage tridimensionnel épars créé avec le logiciel Photomodeler; à droite, une vue du dessus d'un nuage de point d'un transect réalisé à partir des vidéos acquises par le ROV V8 Sii au Chili [*Fillinger et Funke, 2013*].



(d) Utilisant les données (exemple au centre) collectées par les deux paires de caméras du SeaBED AUV (à gauche) dans la mer de Béring, *Kunz et Singh [2010]* cherchent à effectuer une reconstruction tridimensionnelle des fonds parcourus (à droite, vue globale du modèle réalisé et vue détaillée sur la zone entourée).

Figure 3.26 – Illustration de résultats obtenus dans la littérature (nuages de points ou modèles) – suite.



**Figure 3.27** – Illustration des trois principales stratégies de recalage des données [© L. Avanthey et al.] : recalage d'image à image (F2F) en estimant les transformations successives à partir des points bidimensionnels, recalage d'image à modèle global (F2M) en estimant directement la transformation entre les points bidimensionnels de la nouvelle image et les points tridimensionnels du modèle en cours de construction et enfin recalage de modèle à modèle (M2M) en estimant les transformations successives à partir des points tridimensionnels des modèles locaux.

### 3.2.4 Autour du problème de recalage des données

Les nuages de points créés à partir de couples stéréoscopiques, qu'ils soient temporels ou simultanés, sont chacun exprimés dans le repère relatif à l'une des deux caméras du couple au moment de l'acquisition. Afin d'obtenir une reconstruction globale cohérente de la scène observée, il faut donc rassembler ces nuages locaux, c'est-à-dire les recaler un à un dans un repère commun. Pour cela, il est nécessaire de connaître les transformations qui les relient. Dans l'eau comme dans l'air, les mouvements générant ces transformations ont lieu selon six degrés de liberté [Christ et Wernli, 2008] : trois en rotation (roulis, tangage, lacet) qui correspondent à l'orientation et trois en translation (avance, dérive, ascension) qui représentent la position.

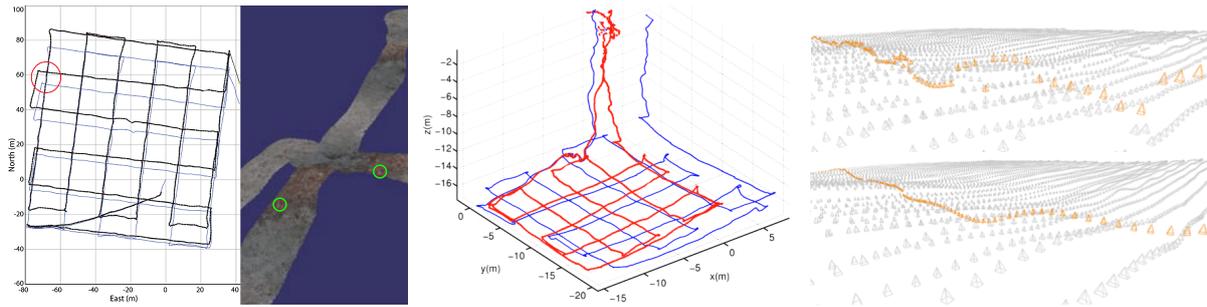
De nombreux capteurs permettent de fournir des informations relatives à la pose en milieu sous-marin [Chen et al., 2013; Paull et al., 2014] : les systèmes inertiels qui sont basés sur les accélérations et les angles d'orientation (IMU, AHRS, INS), les systèmes utilisant les mesures de la vitesse (DVL) et ceux s'appuyant sur la triangulation de signaux (balises acoustiques pour du positionnement absolu, sonar pour de l'odométrie acoustique, caméra pour de l'odométrie visuelle, etc.). Comme nous disposons déjà d'images pour effectuer la reconstruction, nous nous intéresserons particulièrement aux techniques d'odométrie visuelle d'autant plus que les autres capteurs cités sont souvent onéreux, volumineux ou complexes à mettre en œuvre.

#### Stratégies de recalage et méthodes d'estimation de pose en vision sous-marine dans la littérature

Pour estimer les mouvements relatifs de la caméra, nous distinguerons majoritairement trois stratégies : d'image(s) à image(s), d'image à nuage ou modèle global, de nuage ou modèle à nuage ou modèle. Ces trois approches sont schématisées à la figure 3.27 page 84.

La stratégie d'image à image (*frame to frame* – F2F) est la plus fréquente et ont notamment été employées dans les travaux de Pizarro et al. [2004], Hogue et al. [2007], Botelho et al. [2009], Johnson-Roberson et al. [2010], Kunz et Singh [2010], Beall et al. [2011], Mahon et al. [2011], Shkurti et al. [2011] ou Gracias et al. [2013]. Elles consistent à estimer les transformations qui relient chaque couple d'images successif au sein d'une série d'images, ce qui revient à estimer la trajectoire du système d'acquisition. Le repère relatif à la première image de la séquence sert alors de référentiel commun à toutes les autres. Au cœur des techniques « *Structure From Motion* » (SFM), ce procédé est de nos jours également utilisé de manière presque systématique en amont des techniques multivues (MVS) [Skarlatos et al., 2012; Diamanti et Vlachaki, 2015; Rendé et al., 2015, ...]. En effet, lorsque le nombre de vues est élevé, il permet de trier grossièrement les images (création de *clusters*) pour optimiser les étapes d'appariements multiples. Cela n'est évidemment possible que si les images ont été acquises de manière séquentielle (ensemble ordonné) et présentent un minimum de recouvrement entre elles.

La deuxième stratégie cherche à estimer la transformation entre une image et le nuage ou modèle global qui est en cours de construction (*frame to model* – F2M). L'image n'est plus mise en relation uniquement avec



**Figure 3.28** – Illustrations du phénomène de dérive et des stratégies mises en place pour le minimiser. À gauche, la trajectoire dérivante en bleu et la trajectoire corrigée avec les fermetures de boucles en noir; le détail du modèle tridimensionnel dérivant correspondant à la zone cerclée de rouge montre deux cercles verts qui correspondent au même et unique point [Johnson-Roberston et al., 2010]. Au centre, la trajectoire bleue est dérivante, la trajectoire rouge est corrigée grâce aux fermetures de boucles [Aulinas et al., 2011]. À droite, une trajectoire corrigée par filtrage en haut, nous pouvons y remarquer les discontinuités qui correspondent à des réévaluations de la pose courante à partir de la détection de fermetures de boucles, en dessous la même trajectoire, corrigée cette fois-ci par lissage, c'est-à-dire où l'ensemble des poses, passées et courante, ont été réévaluées avec les informations fournies par les fermetures de boucles [Beall et al., 2011].

les informations qui la précèdent temporellement, mais avec l'ensemble des informations qui correspond à son voisinage spatial supposé. Parmi les travaux s'appuyant sur ces techniques, nous pouvons citer : Negahdaripour et Madjidi [2003], Jasiobedzki et al. [2008], Nicosevici et Garcia [2008] ou encore Sedlazeck et al. [2009].

Enfin, la dernière stratégie s'abstrait totalement des images et ne s'occupent que des nuages locaux pour estimer les transformations successives qui les séparent (*model to model* – M2M). Nous trouvons dans cette catégorie les travaux de Pizarro et al. [2004], Castellani et al. [2005], Singh et al. [2007] ou encore Servos et al. [2013]. L'approche est identique à celle de la stratégie d'image à image, mais dans un repère tridimensionnel cette fois-ci. L'approche modèle à modèle global est, elle aussi, envisageable.

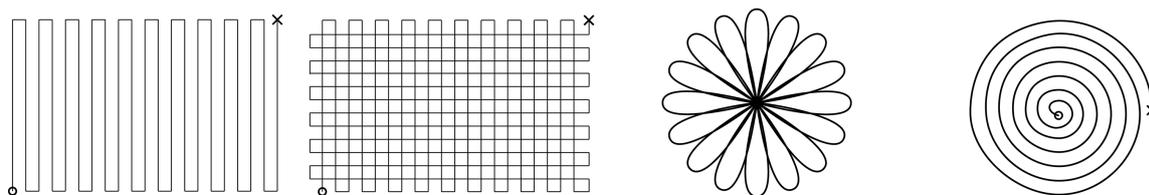
Indépendamment des stratégies globales employées, nous noterons deux grandes catégories de méthodes d'estimation des transformations à partir de points : avec ou sans connaissance de correspondances. Dans les cas où nous disposons d'un échantillon de correspondances, nous distinguerons plusieurs familles d'algorithmes :

- les méthodes 2D-2D qui extraient la pose à partir de la matrice fondamentale ou bien de la matrice essentielle si l'étalonnage a été effectué [Faugeras, 1993; Hartley et Zisserman, 2003, ...],
- les méthodes 2D-3D regroupées sous le nom de problème « Perspective-n-Points » (PnP) qui utilisent le principe de résection spatiale [Fischler et Bolles, 1981; Horaud et al., 1989; Haralick et al., 1991; Quan et Lan, 1999, ...],
- les méthodes 3D-3D connues sous le nom de problème d'Orientation Absolue (AO – *Absolute Orientation Problem*) qui proposent une solution analytique (solution de forme fermée) [Horn, 1987; Arun et al., 1987; Umeyama, 1991, ...].

Si les correspondances sont inconnues, il s'agit alors d'un problème d'estimation simultanée de pose et de correspondances (SPC – *Simultaneous Pose and Correspondence Problem*) dont la famille d'algorithmes la plus couramment utilisée est de type ICP (*Iterative Closest Point*) [Chen et Medioni, 1991; Besl et McKay, 1992, ...].

### Techniques de minimisation de la dérive induite par les méthodes incrémentales dans la littérature

Les méthodes incrémentales (F2F et M2M) sont les plus employées, mais sont aussi les plus sensibles à l'accumulation d'erreurs. Ces dernières proviennent de sources multiples : discrétisation lors de l'acquisition, erreurs d'appariement, erreurs de reprojection, erreurs d'étalonnage, etc. Le bruit généré fausse les estimations de pose pour chaque image, et comme chacune dépend de l'estimation qui la précède, les erreurs se propagent et se cumulent, provoquant ainsi une déviation de la trajectoire réellement suivie. De nombreuses stratégies ont été mises en place dans la littérature pour tenter de minimiser cette dérive illustrée par la figure 3.28 page 85.



**Figure 3.29** – Illustrations de différents types de trajectoires possibles pour la couverture de zone [© L. Avantbey et al.] : de gauche à droite, tondeuse ou radiateur, quadrillage, étoile, spirale.

Une première stratégie repose sur la fusion de données en provenance de différents capteurs de navigation : l'attitude, le cap, la profondeur, la vitesse, les accélérations, etc. [Jenkin *et al.*, 2010 ; Johnson-Roberson *et al.*, 2010 ; Kunz et Singh, 2010 ; Williams *et al.*, 2010 ; Beall *et al.*, 2011 ; Mahon *et al.*, 2011 ; Shkurti *et al.*, 2011]. Améliorer les résultats en multipliant les types de capteurs est une pratique très courante lorsque les capteurs utilisés sont de qualité moyenne ou lorsqu'ils sont employés dans un milieu qui ne leur permet pas d'atteindre une précision optimale.

Une autre stratégie consiste à réimpliquer le critère spatial afin de renforcer les estimations réalisées uniquement à partir du critère temporel. Lors d'une couverture de zone, la trajectoire repasse régulièrement à proximité d'un endroit déjà observé un peu plus tôt et le recouvrement entre ces passages permet d'obtenir des points communs entre deux vues temporellement éloignées, mais spatialement proches. Cette information fournit une nouvelle estimation de pose qui permet de corriger la pose courante et de rectifier ainsi la dérive de la trajectoire : c'est ce qu'on appelle une fermeture de boucle (*loop closure*). Nous remarquerons que nous nous servons alors de la carte en cours de réalisation pour corriger la trajectoire qui nous permet de continuer à construire cette même carte : cette technique est référencée dans la littérature sous le nom de SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*). Nous recensons principalement deux manières d'aborder le problème de correction de trajectoire à partir des fermetures de boucles : le filtrage et le lissage.

La première, créée pour la navigation, utilise les poses passées, les points tridimensionnels déjà cartographiés ainsi que les nouveaux points tridimensionnels acquis pour prédire la pose courante. L'incertitude grandit à chaque itération, jusqu'à ce qu'une fermeture de boucle soit rencontrée, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'un des nouveaux points tridimensionnels corresponde à un point déjà connu : la pose courante est alors corrigée et les nouveaux points tridimensionnels ajoutés en conséquence. Les itérations recommencent jusqu'à rencontrer une nouvelle fermeture de boucle qui permettra à nouveau de réduire l'incertitude qui a recommencé à croître. Nous retrouvons l'utilisation de cette méthode dans les travaux de Singh *et al.* [2007], Petillot *et al.* [2008], Johnson-Roberson *et al.* [2010] ou encore Mahon *et al.* [2011] par exemple.

La seconde approche, le lissage, diffère du filtrage du fait qu'elle va non seulement corriger la pose courante, mais aussi toutes les poses passées [VanMiddlesworth *et al.*, 2015], ce qui la rend plus attrayante pour la communauté de cartographie. Connue sous le nom d'ajustement de faisceaux (*Bundle Adjustment*), elle étudie toutes les fermetures de boucles simultanément. Chaque image dispose ainsi de plusieurs estimations de pose et la pose finale est estimée par une minimisation globale. [Pizarro *et al.*, 2004], [Beall *et al.*, 2011], [Drap, 2012], [Skarlatos *et al.*, 2012], Diamanti *et al.* [2013], [Gracias *et al.*, 2013] ou encore Rende *et al.* [2015] utilisent par exemple cette méthode. Certains travaux, comme ceux de Pizarro *et al.* [2004], ont adapté l'algorithme pour pouvoir, comme avec le filtrage, corriger la trajectoire à la volée, en contrepartie d'une perte de précision sur l'estimation de pose : l'ajustement de faisceaux est alors réalisé localement sur une fenêtre glissante temporelle ou le plus souvent spatiale autour d'images clefs.

Enfin, une dernière stratégie, utilisée en combinaison avec la précédente, joue sur la trajectoire de couverture elle-même. Tant qu'il n'y a pas de fermetures de boucle, l'incertitude grandit. Plus la dérive s'aggrave, plus il sera coûteux de la corriger et difficile de détecter les fermetures de boucle. Le schéma de couverture le plus utilisé



**Figure 3.30** – Ces deux couples d’images ([Kunz et Singh, 2010] à gauche et [Singh et al., 2007] à droite) prises à des instants différents illustrent la problématique d’appariement spatial pour réaliser les fermetures de boucles. Plus le relief est important pour une distance d’observation donnée, plus le problème est complexe, car les déformations occasionnées sont alors beaucoup plus prononcées.

est le modèle de tondeuse à gazon (ou radiateur) [Negahdaripour et Madjidi, 2003; Ludvigsen et al., 2007; Nicosevici et Garcia, 2008; Williams et al., 2010; Beall et al., 2011; Mahon et al., 2011; Drap, 2012; Skarlatos et al., 2012; Burns et al., 2015; Diamanti et Vlachaki, 2015]. Hérité des couvertures utilisées par les avions, il est le plus facile à opérer et souvent le plus rapide si tant est que le terrain soit dégagé. Il s’agit de réaliser des grands transects parallèles sur toute la largeur de la zone. La partie la plus critique est le premier transect qui se fait entièrement à l’estime, ce qui, si la zone couverte est grande, peut poser des problèmes.

Certains travaux proposent de croiser la trajectoire (quadrillage) pour offrir le plus de points de vue possible et minimiser de cette manière l’occlusion [Foley et al., 2009; Johnson-Roberson et al., 2010; Aulinas et al., 2011]. D’autres trajectoires ont également été proposées pour offrir plus rapidement des d’opportunités de fermetures de boucles, comme le modèle en étoile dans Negahdaripour et Madjidi [2003] ou encore le modèle en spirale dans Gracias et Santos-Victor [2001] ou Gintert et al. [2012]. Le lecteur trouvera des illustrations de ces différents schémas de couverture de zone à la figure 3.29 page 86.

### Problématique de l’appariement spatial pour les fermetures de boucle

La complexité de détection des fermetures de boucles est double. Il faut en effet, d’une part pouvoir distinguer rapidement les images présentant du recouvrement spatial dans la quantité d’images traitées pour ne pas avoir à effectuer tous les tests. Il est alors courant d’exploiter la connaissance de la trajectoire en cours de construction, parfois par une projection planaire simplifiée, pour réduire le nombre de candidats à un périmètre donné [Mahon et al., 2011; Johnson-Roberson et al., 2010] ou de garder en mémoire un certain nombre de points caractéristiques clés avec lesquels seront effectués les tests (c’est le cas des algorithmes SLAM de type filtrage) [Williams et al., 2010; Beall et al., 2011]. Certains travaux échantillonnent le nombre de points (création de sous-cartes contenant une quantité donnée de points et au sein desquelles les fermetures de boucles ne sont pas testées) [Singh et al., 2007] ou le temps (recherche d’une fermeture de boucle qu’à certains intervalles temporels) [Mahon et al., 2011].

Une fois le nombre de candidats réduit, il faut d’autre part réussir à identifier les éléments communs aux deux vues pour permettre le recalage. Les images sont prises dans des orientations différentes (parfois en sens opposés lors d’allers-retours dans la trajectoire) à des moments différents (et donc sous un éclairage différent) avec plus ou moins de recouvrement, ce qui rend le problème beaucoup plus complexe que lorsqu’il s’agit de vues successives. Deux cas d’exemples sont illustrés à la figure 3.30 page 87. Les travaux font alors appel à des descripteurs insensibles aux rotations et aux changements d’échelle et qui sont, de plus, tolérants aux larges bases [Singh et al., 2007; Johnson-Roberson et al., 2010]. Certains proposent de réduire l’espace de recherche à un sous-ensemble de pixels en reprojétant les informations issues de la trajectoire (estimation approximative de la pose entre les deux vues, raffinée ensuite par l’appariement) [Pizarro et al., 2004].

### Approche proposée

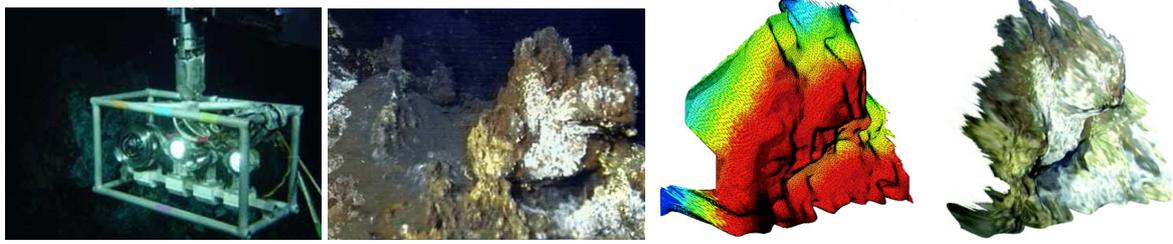
Nous avons choisi d'aborder le problème du recalage des nuages locaux par une méthode de la famille *Structure From Motion* (SFM). Nous mélangeons deux types de stratégie, image à image (pour les correspondances) et modèle à modèle (pour l'estimation de la transformation), afin de réutiliser au maximum les informations que nous avons déjà calculées pour les reconstructions locales. Les points bidimensionnels appariés sur les images au sein des couples stéréoscopiques seront donc mis en correspondance entre les couples successifs. Leurs coordonnées tridimensionnelles respectives permettront d'estimer la transformation relative de manière robuste.

Afin de minimiser la dérive inhérente à ces techniques incrémentales, nous proposons de réduire le nombre maximum de transformations successives nécessaires pour recaler les points dans un repère commun. Pour cela, nous réorganisons en quasi temps réel le graphe de la trajectoire (poses et transformations) pour la transformer en arbre grâce à des coupures réalisées à partir des fermetures de boucle (débouclage). Nous rattachons donc le couple courant, ainsi que ceux qui suivent, au couple plus ancien trouvé par la fermeture de boucle : nous court-circuitons de cette manière la dérive temporelle qui a eu lieu entre les deux (réduction du nombre maximum de transformations successives nécessaires pour recaler les points dans un repère commun).

Nous avons vu que la détection des fermetures de boucle est une tâche complexe. Pour faciliter cette étape, nous proposons l'utilisation d'une carte spatiale. Cette dernière permet de subdiviser la zone d'étude en unités spatiales et d'y enregistrer les images référentes de chaque unité. À chaque fois que la trajectoire estimée revient sur une zone déjà visitée (case renseignée), une fermeture de boucle sera étudiée avec le couple référent. Si le couple spatial sélectionné ne permet pas une mise en correspondance à cause des déformations perspectives, alors un alignement structurel sera tenté à la place.

	<i>Problème</i>	<i>Choix de résolution</i>
<i>En résumé</i>	<b>Recalage des données :</b>	D'image à image, estimation à partir des points 3D temporels
	<b>Fermeture de boucles :</b>	Détection grâce à une spatiocarte
	<b>Dérive :</b>	Réorganisation en quasi temps réel de la trajectoire par coupure du graphe des poses

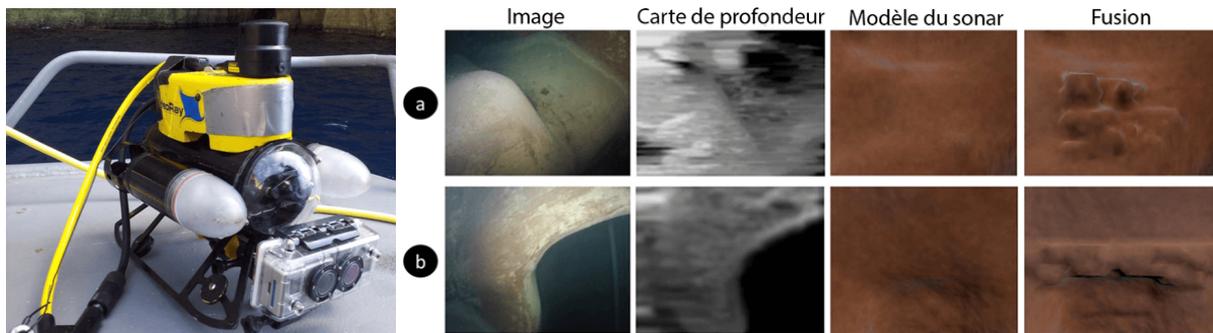
*Nous invitons le lecteur à se rendre à la section 3.3.4 page 127 s'il est intéressé par plus de détails à propos de ces contributions.*



(a) *Brandou et al. [2007]* ont utilisé leur système stéréoscopique IRIS (à gauche) monté sur le bras manipulateur du ROV Victor 6000 pour prendre des photos stéréoscopiques des sources hydrothermales (image d'exemple au centre), Menez Gwen (850 m) et Lucky Strike (1650 m), au sud des Açores afin d'étudier les écosystèmes et procéder à des reconstructions tridimensionnelles binoculaires (modèle généré et texturé à droite).



(b) Le ROV Kiel 6000 (à gauche) a été envoyé à 5059 mètres de profondeur pour étudier les cheminées hydrothermales et particulièrement les fumeurs noirs. [*Sedlazeck et al., 2009*] ont utilisé les images acquises (exemple au centre) pour en extraire des modèles tridimensionnels (exemple à droite).

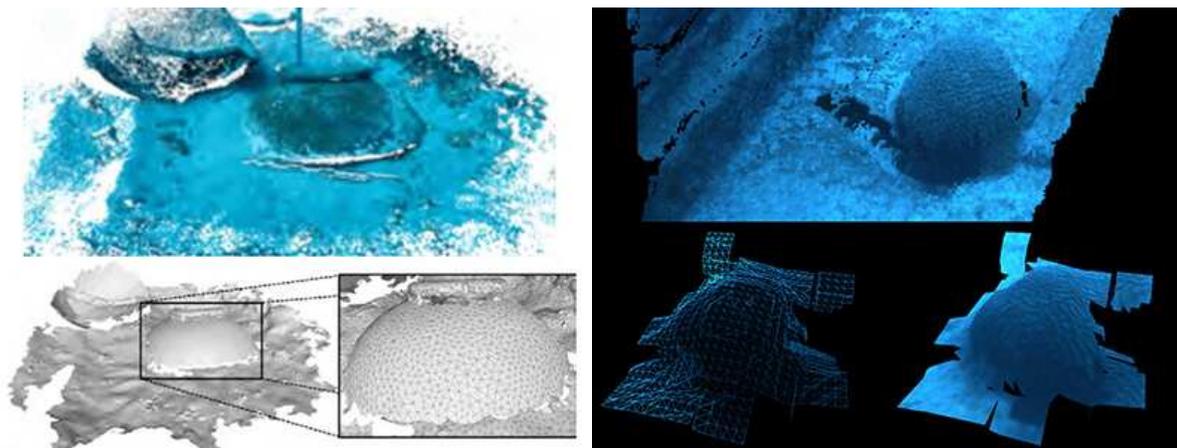


(c) *Nelson et al. [2014]* ont utilisé le microROV VideoRay Pro III GTO (à gauche) équipé d'un sonar Tritech Micron et de deux GoPro Hero2 dans leur boîtier 3D étanche, pour cartographier d'anciens ouvrages d'art destinés à conserver et à acheminer l'eau sur les îles de Malte et de Gozo. La reconstruction tridimensionnelle réalisée à partir des images stéréoscopiques est manuellement recalée puis projetée sur la surface modélisée par le sonar pour améliorer le niveau de détail (deux exemples à droite).



(d) *O'Byrne et al. [2015]* ont réalisé des acquisitions avec deux appareils Canon 600D DSLR placés dans des caissons étanches (à gauche) depuis une estacade du port de Cork (Irlande) pour évaluer l'accumulation d'organismes marins sur les parties immergées de l'infrastructure. Au centre, un exemple d'image d'une pile, à droite la reconstruction tridimensionnelle associée.

Figure 3.31 – Illustration de résultats obtenus dans la littérature (nuages de points ou modèles) – suite.



**Figure 3.32** – Le maillage est la méthode la plus couramment utilisée pour traiter le problème de redondance lors de la fusion de nuages, denses ou épars. À gauche, l'illustration montre que le maillage permet de réduire la complexité géométrique et le bruit du nuage de points [Campos et al., 2015]. Mais ce lissage a également pour conséquence de faire perdre une partie des détails : à droite, le corail que l'on reconnaît bien sur le nuage peut être pris pour un rocher sur le modèle maillé, et ce même lorsque la texture est plaquée par-dessus [Jenkin et al., 2007]

### 3.2.5 Autour du problème de redondance des données

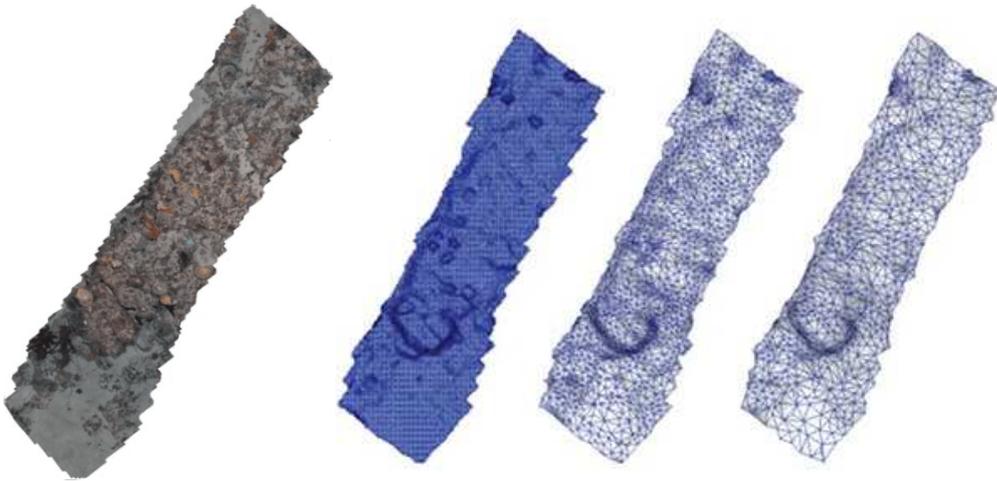
Nous venons de discuter du recalage de nuages de points locaux dans un référentiel commun, mais nous ne pouvons clore le sujet sans aborder la problématique de fusion et plus particulièrement le problème de redondance. En effet, chacun de ces nuages partage un certain nombre de points en commun avec au moins un autre nuage : c'est le recouvrement, qui nous permet par ailleurs d'estimer leurs positions relatives. Les différentes erreurs lors du processus de reconstruction vont entraîner des coordonnées tridimensionnelles légèrement différentes au sein des nuages locaux pour un point réel unique : difficile alors d'identifier les doublons. Si nous fusionnons les nuages tels quels, nous allons nous retrouver avec une représentation globale inutilement lourde et bruitée.

Dans le cas d'une reconstruction éparse, l'impact du phénomène de redondance lors de la fusion est moindre : les quelques centaines voire milliers de points considérés par nuage sont tous appariés entre eux et il suffit alors de ne garder que le point le plus représentatif de chaque doublon (fiabilité géométrique, colorimétrique, etc.).

En revanche, la complexité augmente considérablement lorsque l'on travaille sur des données denses. Chaque nouvelle paire d'images contribue à l'ajout de plusieurs dizaines de milliers de points pour les petites résolutions de travail et jusqu'à plusieurs millions de points ne serait-ce que pour les résolutions haute définition [Jenkin et al., 2010]. Au regard d'un taux de recouvrement oscillant entre 60 et 80 %, et des fréquences d'acquisition assez élevées (en moyenne entre 120 et 18 000 images par tranche de 10 minutes), la redondance ne peut être ignorée [Alcantarilla et al., 2013; Rothermel et al., 2014].

#### Les méthodes de fusion pour gérer la redondance lors de la reconstruction dense dans la littérature

La plupart des travaux pour obtenir des représentations sous-marines globales s'appuient sur une reconstruction éparse [Pizarro et al., 2004; Jasiobedzki et al., 2008; Nicosevici et Garcia, 2008; Johnson-Roberson et al., 2010; Williams et al., 2010; Beall et al., 2011; Mahon et al., 2011; Shkurti et al., 2011, ...], à l'exception de quelques travaux, majoritairement basés sur les techniques multivues (MVS) [Drap, 2012; Skarlatos et al., 2012; Diamanti et Vlachaki, 2015; Rende et al., 2015, ...]. Nous présentons ici les quatre méthodes les plus employées pour traiter le problème de redondance lors de la fusion des nuages locaux et qui sont souvent utilisées de manière complémentaire : l'appariement multiple, le filtrage, le maillage ainsi que l'échantillonnage fréquentiel ou spatial.



**Figure 3.33** – Même si le maillage lisse les détails, il est possible de le simplifier plus ou moins en fonction du niveau de détails requis par l'étude [Johnson-Roberson et al., 2010].

L'appariement multiple est au cœur des techniques multivues (MVS) et s'appuie sur le même principe de fusion que celui de l'appariement épars : tous les points tridimensionnels correspondants à un unique point réel sont identifiés et un seul représentant est conservé. Il est très coûteux d'apparier de manière dense plusieurs images, c'est pourquoi cette méthode est généralement utilisée partiellement et en combinaison avec d'autres, comme le filtrage.

Le filtrage permet de décimer *a posteriori* les points du nuage fusionné (final ou en cours de construction) selon des critères variés : les points isolés, par exemple, sont considérés comme erronés, ceux trop proches comme redondants, une continuité spatiale ou colorimétrique est parfois recherchée, etc. Nous noterons cependant que le filtrage reste plus efficace sur les scènes structurées aériennes où l'on peut s'appuyer de manière fiable sur la majorité des critères.

La méthode de maillage, quant à elle, est très employée et consiste à modéliser une surface à partir des points du nuage pour simplifier la complexité géométrique (voir figure 3.32 page 90). Ainsi un ensemble de points constituant un plan peut être représenté par seulement trois ou quatre sommets et arcs. Une texture est ensuite réalisée à partir des images et plaquée sur le modèle pour aider à l'interprétation visuelle. Comme avec le filtrage, cette méthode est moins efficace pour les environnements déstructurés que sont les zones naturelles : il faut donc chercher un compromis entre niveau de détail et simplification, comme nous pouvons l'observer sur l'illustration de la figure 3.33 page 91. Certains travaux maillent les nuages locaux et fusionnent les modèles grâce à des techniques d'intersection de surfaces par exemple [Johnson-Roberson et al., 2010; Mahon et al., 2011, ...], d'autres maillent le nuage global final [Beall et al., 2010; Jenkin et al., 2010; Campos et al., 2015; Rende et al., 2015, ...].

Enfin, la dernière méthode consiste à ne pas reconstruire un nuage local pour chaque couple d'images acquis, surtout lorsque ces derniers proviennent d'un flux vidéo. Toutes les images sont utilisées pour estimer la pose pour plus de précision, mais seuls quelques couples d'images clefs serviront à produire les nuages locaux [Fillinger et Funke, 2013, ...]. Ils sont choisis de manière à minimiser le recouvrement entre les nuages, soit selon un critère de fréquence temporelle (un couple sur cinq, par exemple), soit selon un critère spatial au regard de l'estimation de la trajectoire.

### Approche proposée

Nous avons déjà expliqué que nous écartons pour le moment les méthodes de maillage et les méthodes de filtrage pour des raisons de précision et de distinction des éléments. Nous cherchons en effet à produire et

enregistrer un nuage brut, auquel pourront être appliqués par la suite différents algorithmes de maillage ou de filtrage adaptés aux thématiques étudiées. L'appariement dense multiple serait, quant à lui, beaucoup trop coûteux (nos nuages locaux contiennent plusieurs centaines de milliers, voire plusieurs millions de points) et nous souhaitons éviter un échantillonnage trop fort des vues afin de pouvoir compléter au mieux les zones d'occlusions.

Nous avons opté pour une stratégie qui consiste à s'appuyer sur l'étape d'appariement épars réalisée entre les couples successifs pour estimer les poses relatives des nuages locaux lors du recalage global. Les germes temporels ou spatiaux identifiés sont en effet de bons représentants de la zone de recouvrement et les points situés dans leurs voisinages y appartiendront probablement. C'est pourquoi nous retirons ces germes potentiellement générateurs de redondance de la liste des germes stéréoscopiques : de cette manière, nous limitons la génération du nouveau nuage aux nouveaux germes.

En ce qui concerne les zones d'occlusion, celles qui se dévoilent sur un nouveau couple fourniront des germes nouveaux qui pourront se propager et celles qui n'avaient pas pu se propager précédemment pourront être identifiées grâce à la carte de disparité pour que leurs germes ne soient pas retirés du nouveau couple et leur laisser une deuxième chance.

<i>En résumé</i>	<i>Problème</i>	<i>Choix de résolution</i>
	<b>Redondance des données :</b>	Propagation uniquement autour des germes nouveaux ou des germes anciens dont le voisinage n'est pas ou peu renseigné dans la carte de disparité précédente

*Le lecteur pourra trouver plus de détails sur ces contributions en consultant la section 3.3.5 page 138.*



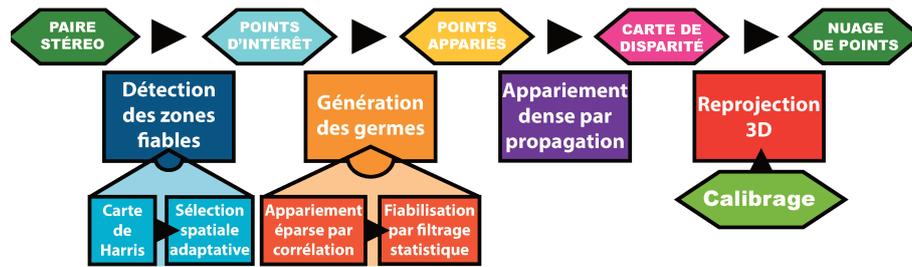


Figure 3.34 – Diagramme représentant notre algorithme sous-marin de reconstruction dense locale [©️🇫🇷🇩🇪 L. Avantsbey et al.].

### 3.3 Contributions et résultats

Nous invitons maintenant le lecteur à découvrir en détail nos contributions autour de la problématique d’obtention d’une information tridimensionnelle dense, haute résolution et cohérente de l’ensemble d’une scène d’étude sous-marine. Rappelons que l’objectif à moyen terme est de concevoir un système dédié à la cartographie thématique à grande échelle de zones sous-marines ou subaquatiques peu profondes. Pour répondre au mieux aux problématiques impliquées, le système conçu doit être agile et facilement répliquable et doit pouvoir fonctionner avec une logistique légère. Destiné à être employé par des thématiciens, il doit disposer d’un haut niveau d’automatisation afin de produire à la demande des données tridimensionnelles comparables et reproductibles. Pour atteindre cet objectif, nous employons une approche transverse sur toute la chaîne d’acquisition et de traitement des données en nous concentrant sur des solutions compatibles avec les contraintes susnommées.

Dans la section précédente (3.2 page 62) nous avons positionné nos travaux vis-à-vis de la littérature à travers les cinq problèmes principaux posés par le milieu aquatique (voir la section 3.1 du chapitre 3, page 61) : appariement dense, étalonnage, acquisition *in situ*, recalage et redondance des données. Nous les décrivons à présent plus en profondeur en suivant le même schéma. Les résultats relatifs à ces cinq problèmes sont présentés indépendamment à partir d’échantillons d’une base de données de plus d’une centaine d’images que nous avons acquises dans des lacs, des rivières ou encore en mer. Dans le chapitre suivant (chapitre 4, page 143), nous aborderons la mise en œuvre de la chaîne d’acquisition et de traitement dans sa globalité et nous présenterons les résultats obtenus à travers la réalisation de missions terrain en mer Méditerranée.

#### 3.3.1 Problème d’appariement dense

*L’état de l’art correspondant à ce problème a été détaillé à la section 3.2.1 du chapitre 3 page 64.*

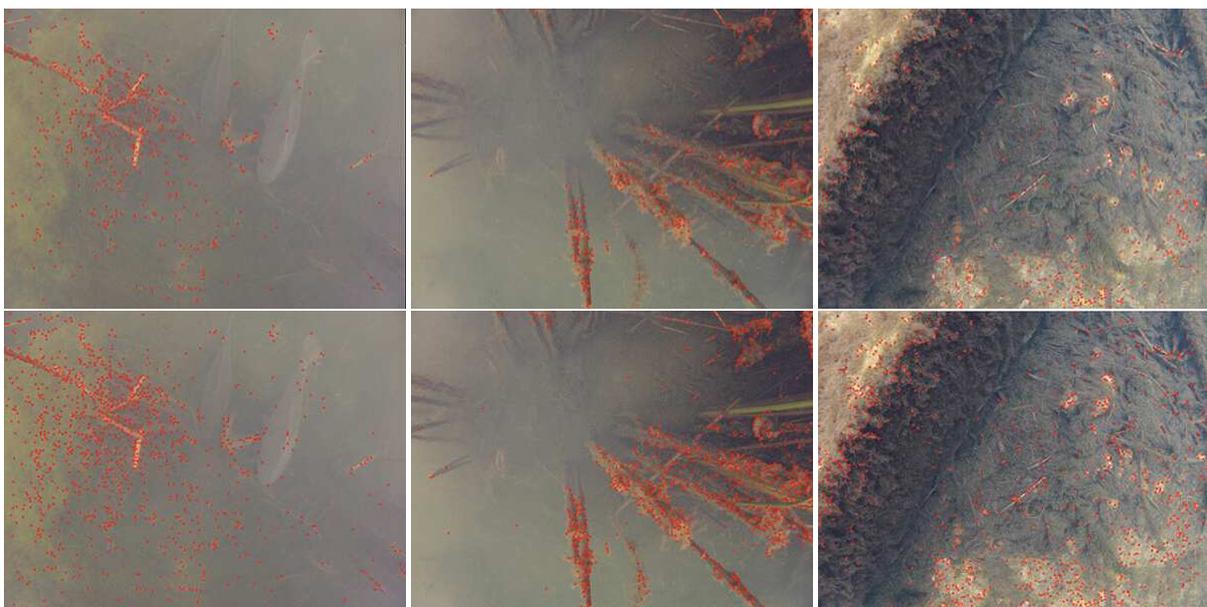
Nous avons vu dans l’état de l’art que les spécificités du milieu aquatique mettent en difficulté les algorithmes de reconstruction dense et altèrent leurs performances. Nous proposons de traiter particulièrement trois problématiques liées à nos images : la variabilité de leur qualité, la présence de zones sans information réelle et la présence de mouvements dans la scène observée. Pour ce faire, notre chaîne de reconstruction dense sous-marine crée un nuage de points local à partir d’un couple d’images stéréoscopiques synchronisées en employant une stratégie de propagation de l’appariement depuis les zones les plus fiables (c’est-à-dire les plus texturées) de l’image jusqu’aux frontières des zones les moins décisives. Le lecteur pourra se référer au diagramme global de notre algorithme qui est proposé à la figure 3.34 page 93.

#### Identification robuste des zones les plus texturées face à la qualité variable des images sous-marines

La première partie de notre chaîne de reconstruction consiste à identifier les zones les plus texturées des images sous-marines afin de pouvoir en extraire des couples de points appariés représentatifs : les germes. Ces derniers nous permettent de faire croître l’appariement de manière fiable dans le contexte sous-marin en réduisant la zone de recherche pour les pixels situés à proximité.



*Seuillage arbitraire fixe (détecteur de Harris classique)*



*Seuillage adaptatif (notre contribution)*

**Figure 3.35** – Détecteur de Harris et qualité variable des images : seuillage arbitraire de la version originale et seuillage adaptatif de notre version modifiée [© L. Avantbey et al.]. Ces trois images ont toutes été prises dans le lac de la Plage Bleue (Valenton, juin 2013) par une caméra unique, à proximité les unes des autres (< 5 m) et à quelques minutes d'intervalle. Leur résolution a été réduite de  $3840 \times 2880$  à  $700 \times 525$  pixels et les points de Harris sont représentés par des cercles rouges. Le seuil statique pour la série arbitraire est fixé à 189 : nous obtenons seulement 20 points sur la première image, 200 sur la deuxième et 2078 sur la troisième. Pour la première des deux séries au seuillage adaptatif, l'intervalle cible est fixé à [500 – 600] et nous obtenons 500 points sur les trois images pour des seuils qui ont convergé respectivement à 108, 167 et 251. Pour la seconde série, l'intervalle est fixé à [1000 – 1100] et nous obtenons respectivement sur les trois images 1023, 1000 et 1004 points pour des seuils finaux de 95, 144 et 213.

Le détecteur de Harris, dont la spécificité est de distinguer les fortes variations de texture, nous semble le plus approprié pour sélectionner les pixels candidats pour former des germes robustes en milieu sous-marin. Nous avons vu en effet que contrairement à SIFT ou à SURF, il ne présente pas de faiblesse prononcée au bruit de chatoiement et au vignettage, mais il reste sensible à la qualité des images et cela impacte la quantité de candidats extraits. Or, en eau peu profonde, la qualité est un facteur versatile : variation de la luminosité liée à la course du soleil, variation de la concentration lumineuse en fonction de l'état de la surface (lisse ou agitée), passage d'un nuage, changement de réflectance en fonction du type de fonds (passage d'un herbier à un fond rocheux ou à un fond sablonneux par exemple), nombre de plans de profondeur, etc. Les images en haut de la figure 3.35 page 94 démontrent le comportement inégal du détecteur de Harris classique sur nos images.

Un nombre insuffisant de germes pose un problème sur la qualité de la reconstruction. Nous avons noté que la contre-mesure la plus couramment employée dans la littérature consiste à prétraiter les images (rehaussement de contraste et de couleur, débruitages, filtrages, etc.) pour se rapprocher le plus possible de la qualité d'images

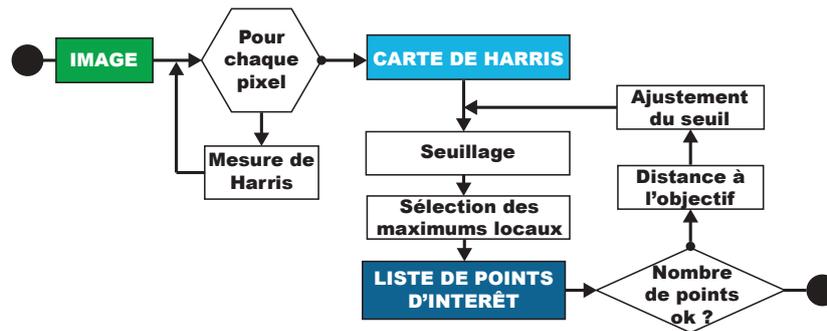


Figure 3.36 – Diagramme de notre version modifiée de l'algorithme du détecteur de Harris [© L. Avanthey et al.].

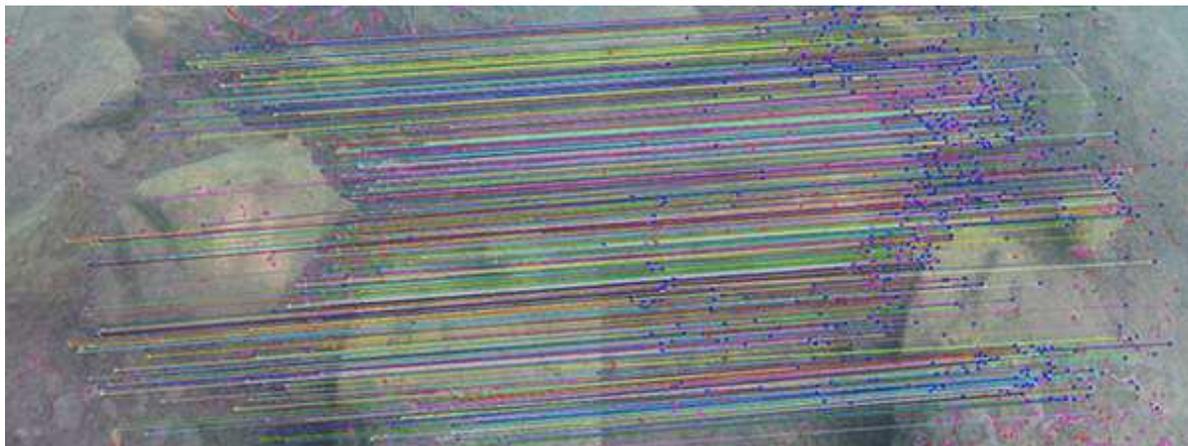
prises dans l'air. Ces méthodes contribuent à renforcer la présence d'artefacts et de bruit. Nous proposons donc de modifier cet algorithme pour contrôler de manière optimale la quantité de points caractéristiques extraits : une boucle fermée permet l'abstraction relative de la qualité des images.

Commençons par rappeler le fonctionnement classique du détecteur de Harris. La première étape consiste à fournir une mesure d'intérêt pour chacun des pixels de l'image créant ainsi une carte de Harris. La seconde étape s'occupe de la sélection des points caractéristiques. Un seuil arbitraire, fixe et universel, permet tout d'abord de séparer les pixels d'intérêt (ceux qui présentent une forte variabilité de texture, soit une valeur élevée sur la carte de Harris) des autres pixels. Enfin, parmi eux, seuls les maximums locaux sont conservés pour former la liste finale de points de Harris. Cette seconde étape détient la clef du contrôle du nombre de points extraits. Cependant, seuiller simplement l'histogramme de la carte de Harris à la quantité voulue ne fournit pas une solution satisfaisante, car la répartition spatiale des points sélectionnés est ignorée. Nous proposons donc de rendre le seuillage adaptatif pour atteindre notre objectif.

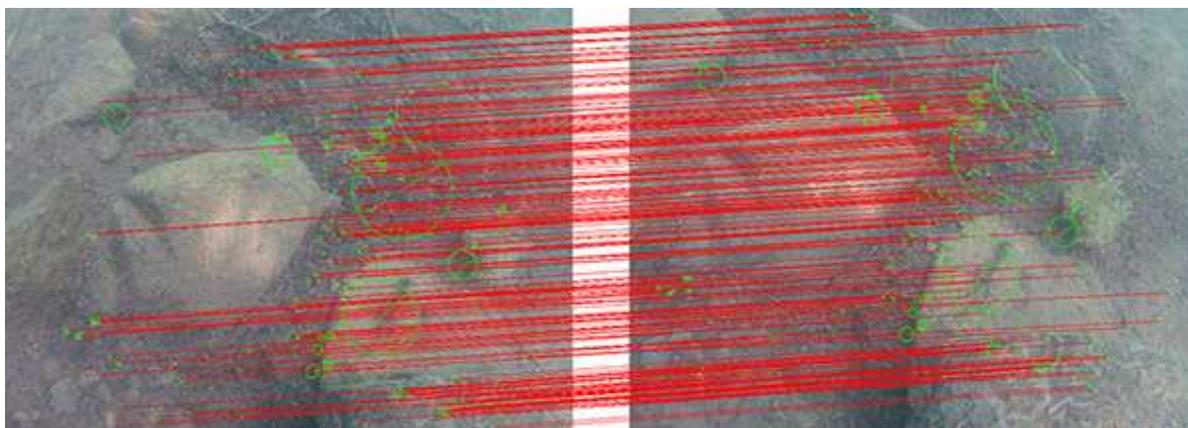
Lors de la première exécution de l'algorithme, un seuil initial est fixé selon un pourcentage de la plus grande valeur de la carte (généralement à 75 %) afin de prendre en compte les mesures réelles. Un premier ensemble de points d'intérêt spatialement répartis est ensuite extrait. Si le nombre de points le composant n'est pas inclus dans l'intervalle voulu, un nouveau seuil de sélection est calculé et l'algorithme boucle. Les deux étapes de la phase d'extraction des points caractéristiques qui permettent de passer de la carte de Harris à la liste des points d'intérêt (seuillage et sélection des maximums locaux) sont alors répétées jusqu'à ce que le nombre final de points de Harris obtenus soit conforme à la demande.

Pour converger le plus rapidement possible vers l'objectif, nous calculons la distance entre le nombre de points obtenus et le milieu de l'intervalle cible pour ajuster la nouvelle valeur du seuil : si nous sommes loin de l'objectif, une forte modification permettra de s'en rapprocher efficacement, sinon une petite modification évitera une oscillation autour de la cible. Ce type d'algorithme en boucle fermée est inspiré des correcteurs proportionnels issus de la communauté du contrôle et de l'automatique [Minorsky, 1922]. Deux exemples de résultats de notre seuillage adaptatif sont présentés à la figure 3.35 page 94 et le lecteur trouvera le diagramme de notre version sous-marine de l'algorithme de Harris à la figure 3.36 page 95. À la fin de cette étape, nous obtenons un échantillon de points représentatifs des zones les plus texturées pour chaque image stéréoscopique.

Notre version adaptative du détecteur de Harris appartient à la même classe algorithmique que la version originale. L'étape de sélection possède une complexité linéaire. Afin de minimiser le nombre d'itérations pour faire converger le seuil, nous exploitons le fait que les images prises à proximité auront une bonne probabilité d'avoir une qualité similaire. Nous utilisons donc le seuil précédemment calculé comme valeur initiale pour le traitement de l'image suivante. Sur un échantillon représentatif d'images sous-marines, nous observons qu'en pratique, la convergence s'obtient en moins de cinq itérations. La différence en temps de calcul (nombre de cycles processeurs) entre la version originale du détecteur de Harris et notre version adaptative est donc inférieure à 5 %. Enfin, pour exclure automatiquement les images qui ne présentent pas ou trop peu d'information



**Figure 3.37** – Résultat de l'étape de génération de germes de notre algorithme sur une image sous-marine prise dans le Lac Pavin en Auvergne (images sous-échantillonnées de  $3840 \times 2880$  à  $700 \times 525$  pixels) [© L. Avanthey et al.] : au final, 517 points sur les 969 détectés ont été appariés avec succès (soit 53 % des points).

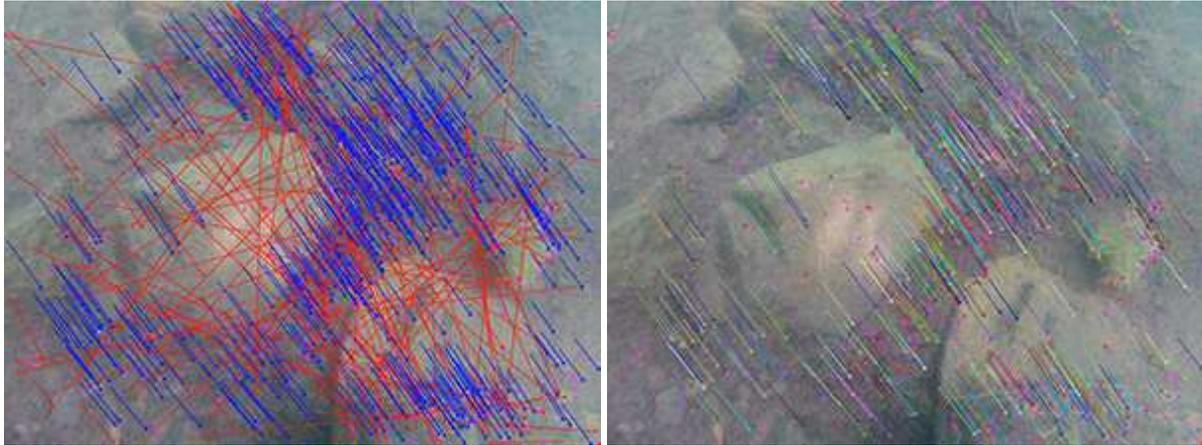


**Figure 3.38** – Résultat de l'étape de génération de germes sur le même couple que l'image 3.37 page 96 avec une implémentation de l'algorithme SIFT [Rey Otero et Delbracio, 2014] : au final, 260 points sur les 954 détectés ont été appariés avec succès (soit 27 % des points).

(absorption quasi totale ne laissant visible que la masse d'eau ou absence presque totale de luminosité), une limite à la capacité d'adaptation doit être fixée. En effet, si le seuil n'a pas convergé sur l'intervalle cible alors qu'un grand nombre de pixels ont été sélectionnés (généralement lorsque plus de 10 % des pixels de l'image sont sélectionnés), l'image est rejetée.

### Création d'un ensemble de germes fiables pour initialiser la propagation dans les zones texturées

Afin de finaliser la liste de germes, il faut mettre en correspondance les points de Harris détectés sur les deux images d'un couple. Pour cet appariement épars, le voisinage du point est utilisé comme descripteur et la similitude de deux voisinages est mesurée par corrélation. Si le score de ressemblance entre deux voisinages est trop faible, l'appariement du couple potentiel est rejeté. Si la mesure de corrélation propose plusieurs candidats, seule la combinaison offrant le meilleur score est retenue, car un point ne peut être apparié qu'une seule et unique fois. Nous avons noté dans l'état de l'art que l'évaluation de la similitude par corrélation était sensible aux transformations géométriques. Pour qu'elle puisse fonctionner correctement, les rotations entre nos vues à appairer doivent donc être quasi inexistantes et les translations relativement petites. Ces conditions sont compatibles avec le type d'images acquises lors d'une couverture de zone en environnement aquatique et seront à prendre en compte dans les critères de choix concernant la partie matérielle (voir section 3.3.3 page 115).



**Figure 3.39** – Illustration de notre étape de filtrage par un critère statistique sur le flot de vecteurs local [©ⓉⓁ L. Avantbey et al.]. Sur les 969 points d'intérêt détectés, 660 paires initiales ont été formées. Tous les vecteurs qui ne sont pas conformes à leur flot local sont rejetés (143, soit 22 % des paires initiales, marqués en rouge sur l'image de gauche) pour obtenir la liste des germes fiables (517, en bleu sur l'image de gauche et en couleur sur l'image de droite).

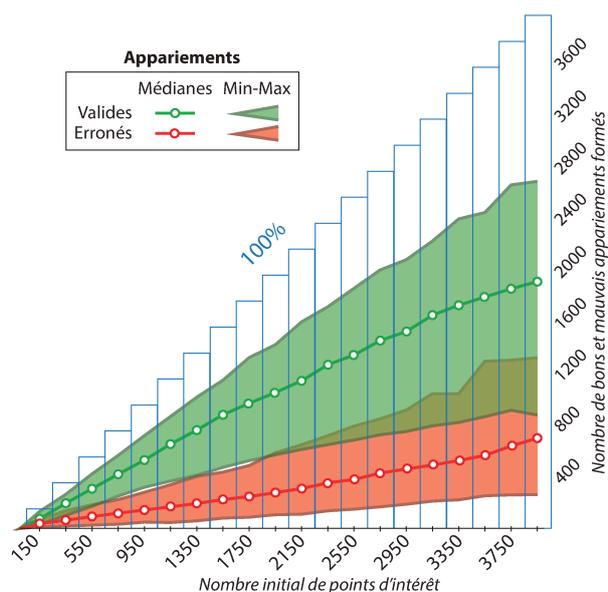
Notre mesure de corrélation calcule par défaut la somme des carrés des différences (SSD – *Sum of Squared Differences*). Ce critère rapide donne de bons résultats sur des images sous-marines à condition que les vues ne présentent pas de fortes différences colorimétriques. Dans le cas où le nombre de couples appariés est trop faible, l'algorithme change pour un critère plus stable, mais plus complexe : la corrélation croisée normalisée centrée (ZNCC – *Zero-mean Normalized Cross-Correlation*). Quel que soit le critère, le choix de la taille de la fenêtre de corrélation est important : trop petite, elle ne contiendrait pas assez d'information pour permettre une discrimination fiable, trop grande en revanche, elle serait beaucoup trop coûteuse en temps de calcul. Dans notre cas (types d'image et résolutions), une fenêtre de  $13 \times 13$  offre en moyenne le meilleur compromis.

La figure 3.37 page 96 présente le résultat de notre algorithme de génération de germes sur un couple d'images sous-marines : 53 % des points d'intérêt détectés sont appariés. La figure 3.38 page 96, quant à elle, propose le résultat d'une implémentation d'un algorithme basé sur le détecteur-descripteur SIFT appliqué au même couple d'images. Pour aider à la comparaison, nous avons adapté l'intervalle cible de notre algorithme pour correspondre au nombre de points d'intérêt trouvés par SIFT. Ce dernier apparie presque 30 % des points soit presque 50 % moins de points que notre algorithme.

L'état de l'art nous a montré que, quel que soit le descripteur utilisé, les mesures de ressemblances n'étaient pas infaillibles et pouvaient mener à des erreurs d'appariement. Or, pour obtenir une reconstruction de bonne qualité, il est nécessaire d'assurer la fiabilité des germes et donc de l'appariement épars. La littérature traite ce problème par un filtrage *a posteriori* qui permet de distinguer et retirer les appariements erronés. Pour réaliser cette étape sans nous appuyer sur la géométrie, nous proposons un nouvel algorithme de filtrage, efficace et rapide, basé sur un critère statistique appliqué au flot de vecteurs local.

Un vecteur d'appariement constitue un moyen pratique de représenter spatialement la relation entre deux points appariés (disparité) en replaçant leurs coordonnées dans le même plan image. Notre algorithme de filtrage extrait pour chaque vecteur d'appariement  $v_i$  son flot local de vecteurs, c'est-à-dire le sous-ensemble de vecteurs situés à proximité de  $v_i$ . Il calcule ensuite combien parmi eux sont cohérents avec  $v_i$  (norme et direction) et utilise un seuil. S'ils sont peu nombreux, le vecteur d'appariement  $v_i$ , considéré alors comme erroné, est retiré de la liste des candidats. À l'inverse, si le vote est satisfaisant,  $v_i$  est ajouté à la liste des germes. Cette manière de procéder élimine systématiquement les vecteurs isolés, mais ce comportement est souhaitable, car les zones qu'ils représentent ne sont probablement pas suffisamment texturées pour permettre une propagation fiable.

La figure 3.39 page 97 nous montre un exemple du résultat de notre algorithme de filtrage. Nous remarquons que plus de 75 % des vecteurs candidats sont valides. Tous les appariements erronés ont été correctement filtrés



**Figure 3.40** – Statistiques générales obtenues sur un échantillon de 200 images prises en six lieux différents [© L. Avantbey et al.]. À gauche, le diagramme présente les résultats statistiques de notre algorithme de génération de germes et à droite, les résultats statistiques sont comparés avec ceux obtenus par SURF et SIFT sur le même échantillon.

### Nombre de germes

#### Notre algorithme

Intervalle	Médiane	Min	Max
Tous	53 %	28 %	73 %
[500 - 600]	55 % (305)	31 % (170)	76 % (419)
[900 - 1000]	55 % (526)	33 % (317)	75 % (714)

#### SURF

Intervalle	Médiane	Min	Max
593 (médiane)	46 %	24 %	83 %
[107 - 2256]	(279)	(37)	(1200)

#### SIFT

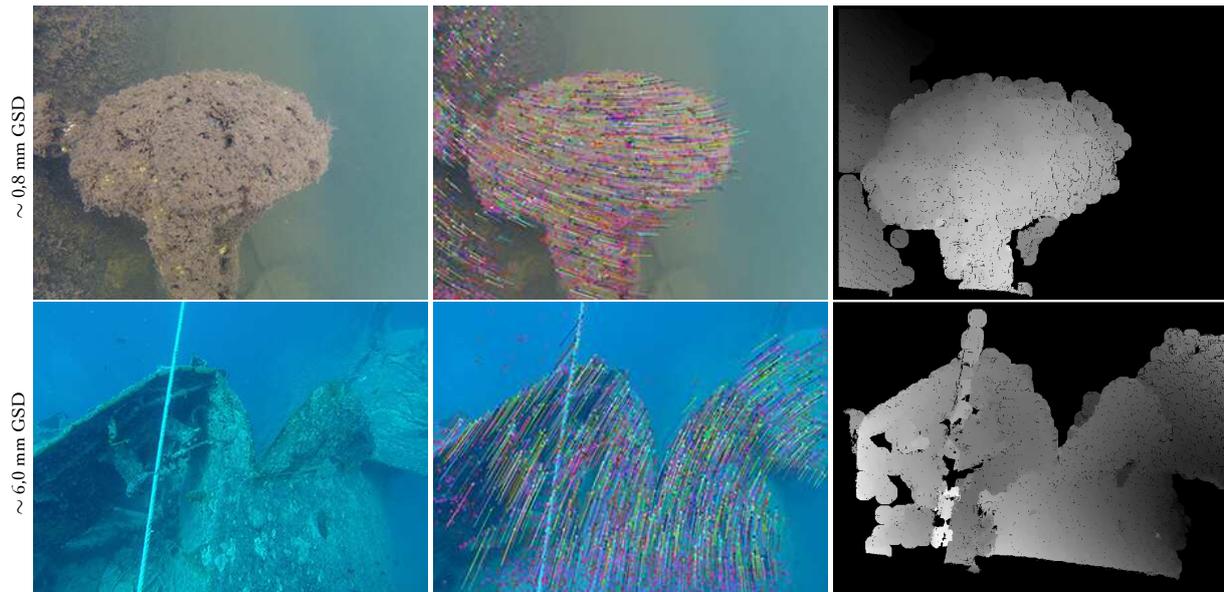
Intervalle	Médiane	Min	Max
950 (médiane)	35 %	6 %	72 %
[251 - 1521]	(307)	(54)	(610)

et quelques bons appariements isolés ont été exclus par le critère statistique (environ une dizaine, soit moins de 2 % des appariements rejetés pour ce couple).

Pour évaluer notre algorithme de génération de germes et produire des statistiques générales, nous avons constitué une base de données à partir d'un échantillon représentatif d'images sous-marines. Elle contient une centaine de couples stéréoscopiques pris sur les lieux suivants : lac de la Plage Bleue (Valenton) et lac Pavin (Besse-en-Chandesse), fleuve de la Sèvre niortaise (Saint-Maxire), mer Méditerranée (calanques de La Ciotat et rade de La Seyne-sur-Mer) et mer Rouge (site de l'épave du Thistlegorm, Ras Mohamed). Les conditions environnementales représentées par ces images sont très variées, que ce soit sur le type d'eau (salinité, turbidité, courant, etc.), les conditions météorologiques (nuages, soleil, vent, etc.) et les horaires des prises (moment de la journée et saison). Pour pouvoir effectuer des calculs statistiques systématiques sur l'ensemble de la base en des temps de calcul raisonnables, les images ont été sous-échantillonnées (de  $3840 \times 2880$  à  $700 \times 525$  pixels).

Pour chaque couple d'images de cette base, nous avons calculé le nombre de germes générés par notre algorithme en fonction du nombre de points d'intérêt initial ainsi que le nombre de vecteurs candidats rejetés (appariements erronés). Les statistiques ont été produites pour vingt intervalles cibles de points d'intérêt de même largeur entre [100 – 200] et [3900 – 4000]. Les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 3.40 page 98. Le ratio bons appariements sur mauvais appariements est stable sur l'ensemble des intervalles (variation maximale de  $\pm 4$  %) même lorsque le nombre de points d'intérêt initial est très bas ou très élevé. De manière générale (médiane), notre algorithme permet d'extraire 53 % de germes à partir de nos points de Harris (73 % dans les meilleurs cas, 28 % dans les pires). De plus, seulement 23 % des vecteurs candidats sont rejetés (7 % dans les meilleurs cas, 46 % pour les moins bons) et aucun faux positif n'a été trouvé. Ces résultats nous permettent de considérer que notre algorithme est robuste, quel que soit le nombre de points d'intérêt demandé.

Nous avons testé sur notre base de données les algorithmes d'appariements épars basés sur les détecteurs-descripteurs SIFT et SURF implémentés dans la bibliothèque [OpenCV](#). Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux de la figure 3.40 page 98. De manière générale, SURF présente une meilleure qualité d'appariement que SIFT sur ces images (46 % de germes extraits contre 35 %). Mais en revanche, il est beaucoup plus irrégulier pour la détection des points d'intérêt et donc sur le nombre de germes qu'il fournit. De plus, son taux d'appariement médian baisse en dessous de 40 % lorsque le nombre initial de points d'intérêt augmente



**Figure 3.41** – Densification de l'appariement par propagation et exclusion automatique des zones sans information réelle [© L. Avanthey et al.]. À gauche : une image originale du couple stéréoscopique. Au centre : génération des germes (flots de vecteurs) sur les zones les plus texturées. À droite : densification de l'appariement par propagation jusqu'à la limite des zones sans intérêt (cartes de disparité). Sur les cartes de disparité, les zones exclues sont en noir et la disparité est représentée par des niveaux de gris (plus la valeur est claire plus la disparité est grande, et donc plus l'objet est proche de la caméra). La série du haut a été prise dans le lac de la Plage Bleue à Valenton, celle du dessous dans la mer Rouge en Égypte, sur le site de l'épave *Thistlegorm* (« Chardon Bleu »). La résolution des images a été réduite de  $3840 \times 2880$  à  $700 \times 525$  pixels et la taille de l'échantillon au sol (GSD) est donnée en conséquence.

sensiblement ( $> 1000$  points) et son filtrage laisse passer quelques mauvais appariements (environ 1 % des points détectés). En comparaison, le détecteur SIFT présente un comportement plus stable et produit beaucoup moins de faux positifs (environ 0.2 % des points détectés). Cependant, le ratio de bons appariements sur le nombre initial de points d'intérêt est faible et diminue d'autant que le nombre initial de points d'intérêt augmente.

La capacité de notre algorithme à fournir un nombre de points d'intérêt conforme à une consigne le distingue des autres algorithmes d'appariement épars. Afin de pouvoir comparer les résultats, nous avons utilisé ceux produits par notre algorithme sur les intervalles de points contenant les nombres médians de points d'intérêt détectés par SIFT et par SURF. Dans les deux cas, nous obtenons un pourcentage de germes extraits plus élevé : 55 % contre 46 % pour SURF ([900 – 1000]) et 55 % contre 35 % pour SIFT ([500 – 600]). Nous pouvons donc conclure qu'en plus de présenter une très bonne stabilité, notre algorithme fournit en moyenne de meilleurs résultats dans le contexte sous-marin.

### Densification de l'appariement en excluant automatiquement les zones sans information

Une fois les germes créés au cœur des zones les plus texturées, la seconde phase de notre algorithme de reconstruction tridimensionnelle consiste à propager l'information d'appariement dans leur voisinage afin de produire une carte dense de disparité. Comme nous l'avons vu précédemment, un germe désigne un couple de pixels appariés :  $G_g$  sur la vue gauche et  $G_d$  sur la vue droite. Chaque germe est étudié indépendamment les uns des autres et sert de point de départ local à la croissance de la région qu'il représente.

Appelons  $F_g$  la fenêtre carrée de  $5 \times 5$  centrée sur  $G_g$  qui définit son voisinage et  $F_d$  la fenêtre correspondante centrée sur  $G_d$ . Chaque pixel  $P_{F_g}$  de  $F_g$  est évalué individuellement pour chercher son pixel correspondant. Pour un pixel  $P_{F_g}$  donné qui n'a pas encore été apparié, un correspondant potentiel est recherché dans une fenêtre  $3 \times 3$  centré sur le pixel équivalent  $P_{F_d}$  dans  $F_d$ . Cela donne neuf candidats dont la similarité avec  $P_{F_g}$  est évaluée par une mesure de corrélation. Si le meilleur score obtenu est suffisamment élevé, le candidat

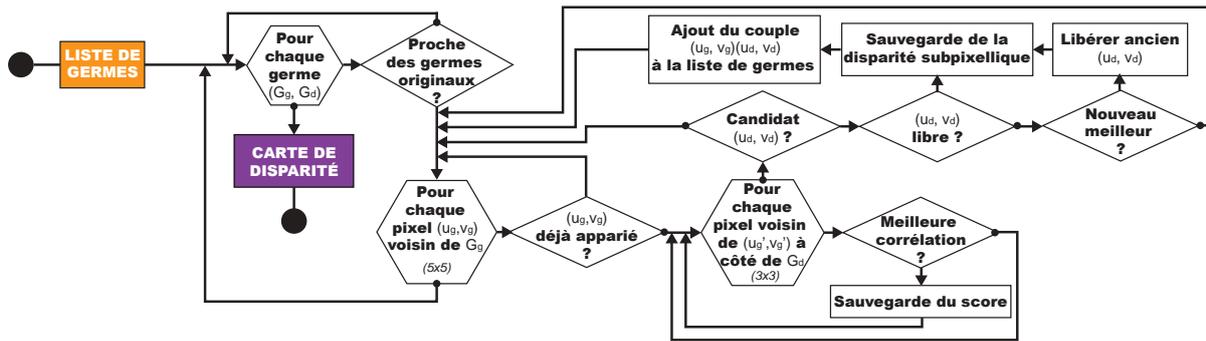


Figure 3.42 – Diagramme de notre algorithme d'appariement dense par propagation [© L. Avantbey et al.].

correspondant est apparié avec  $P_{F_g}$  et l'information colorimétrique est sauvegardée. Leur disparité est calculée puis affinée au niveau subpixelique pour améliorer la granularité du système. Cette interpolation est réalisée par la recherche de la position exacte de l'extremum du paraboloïde de corrélation et sauvegardée pour compléter la carte de disparité. Un nouvel appariement peut s'avérer meilleur qu'un ancien déjà enregistré, car les fenêtres de recherche se chevauchent (les pixels étudiés dans le voisinage du germe sont côte à côte). Dans ce cas, le nouveau  $P_{F_g}$  est sauvegardé et l'ancien pixel  $P_{F_g}$  qui est remis en liberté pourra être évalué à nouveau s'il se retrouve dans une nouvelle fenêtre d'étude  $F_g$ .

Chaque pixel apparié dans le voisinage d'un germe se transforme à son tour en un nouveau germe pour propager l'appariement dans son propre voisinage. Tant qu'il y a des germes à étudier, les régions vont continuer à croître de cette manière. Nous noterons alors deux configurations possibles : la collision ou l'expansion.

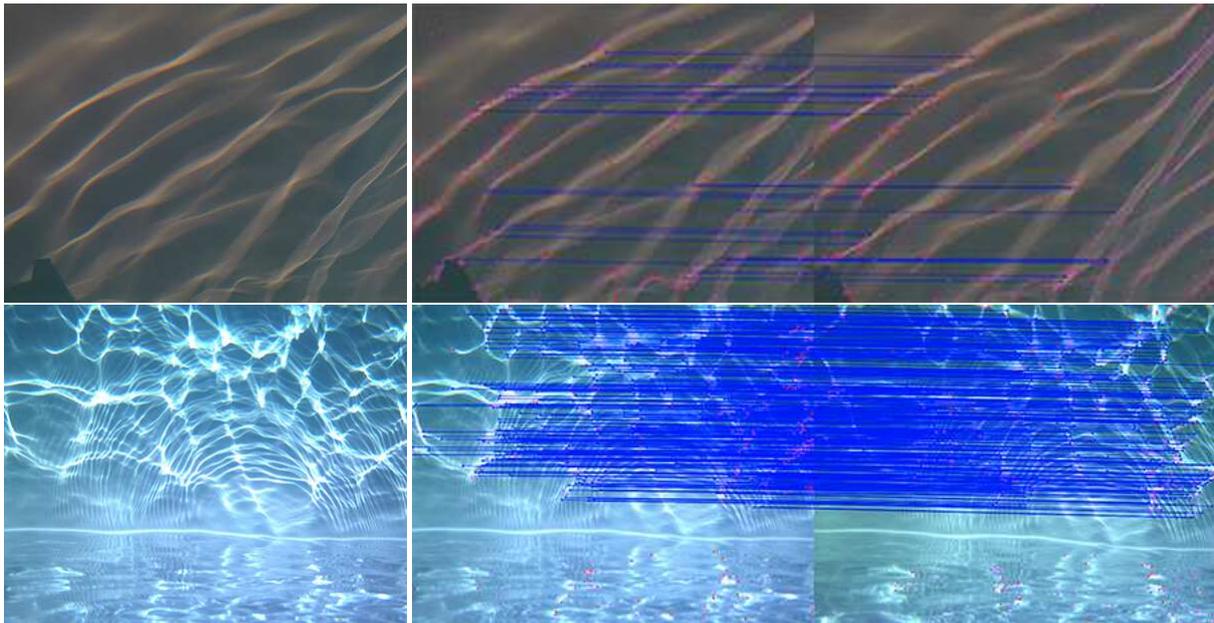
En effet, les régions proches les unes des autres vont se rencontrer rapidement et se stabiliser autour d'une frontière. Cette dernière fluctuera un peu dans un premier temps, car les pixels  $P_{F_g}$  non appariés des fenêtres  $F_g$  en cours d'étude peuvent remplacer d'anciens appariements s'ils donnent un meilleur résultat, mais elle se fixera définitivement, car les pixels  $P_{F_g}$  déjà appariés ne sont pas réétudiés. La propagation de ces régions dans cette direction sera donc bloquée.

En revanche, si le champ est libre, les régions peuvent s'étendre tant que des appariements sont trouvés. Mais plus nous nous éloignons des germes originaux, plus nous nous écartons des zones texturées. Or rien ne s'apparie plus facilement que deux pixels dans une zone au caractère « uniforme » (pleine eau, par exemple). Nous limitons donc la propagation dans un rayon autour des germes originaux et les parties de l'image sans informations réelles sont de cette manière automatiquement exclues de la reconstruction. Une situation optimale est obtenue avec un nombre suffisant de germes pour permettre de fixer un petit rayon d'expansion et ne pas trop déborder des zones d'intérêt.

Le lecteur trouvera sur la figure 3.41 page 99 deux exemples présentant les cartes de disparité denses obtenues par propagation et démontrant l'exclusion automatique des zones sans information réelle. Le diagramme de notre algorithme de densification de l'appariement est donné à la figure 3.42 page 100.

### Abstraction du dynamisme des zones naturelles par la synchronisation pour améliorer l'appariement

Les objets qui se sont déplacés entre les prises des différents points de vue sont normalement écartés de la reconstruction lors du filtrage de l'appariement épars et ne font généralement pas partie non plus de l'espace de recherche réduit de l'appariement dense. Or, les zones naturelles sous-marines et subaquatiques sont dynamiques. Les objets en mouvement, comme la faune et la flore, sont des objets d'intérêt pour nous et nous cherchons donc précisément à les reconstruire. Pour résoudre cette problématique, nous proposons une collaboration dynamique entre le capteur et le vecteur pour obtenir un temps de synchronisation entre les deux prises de vue adapté à la scène observée.



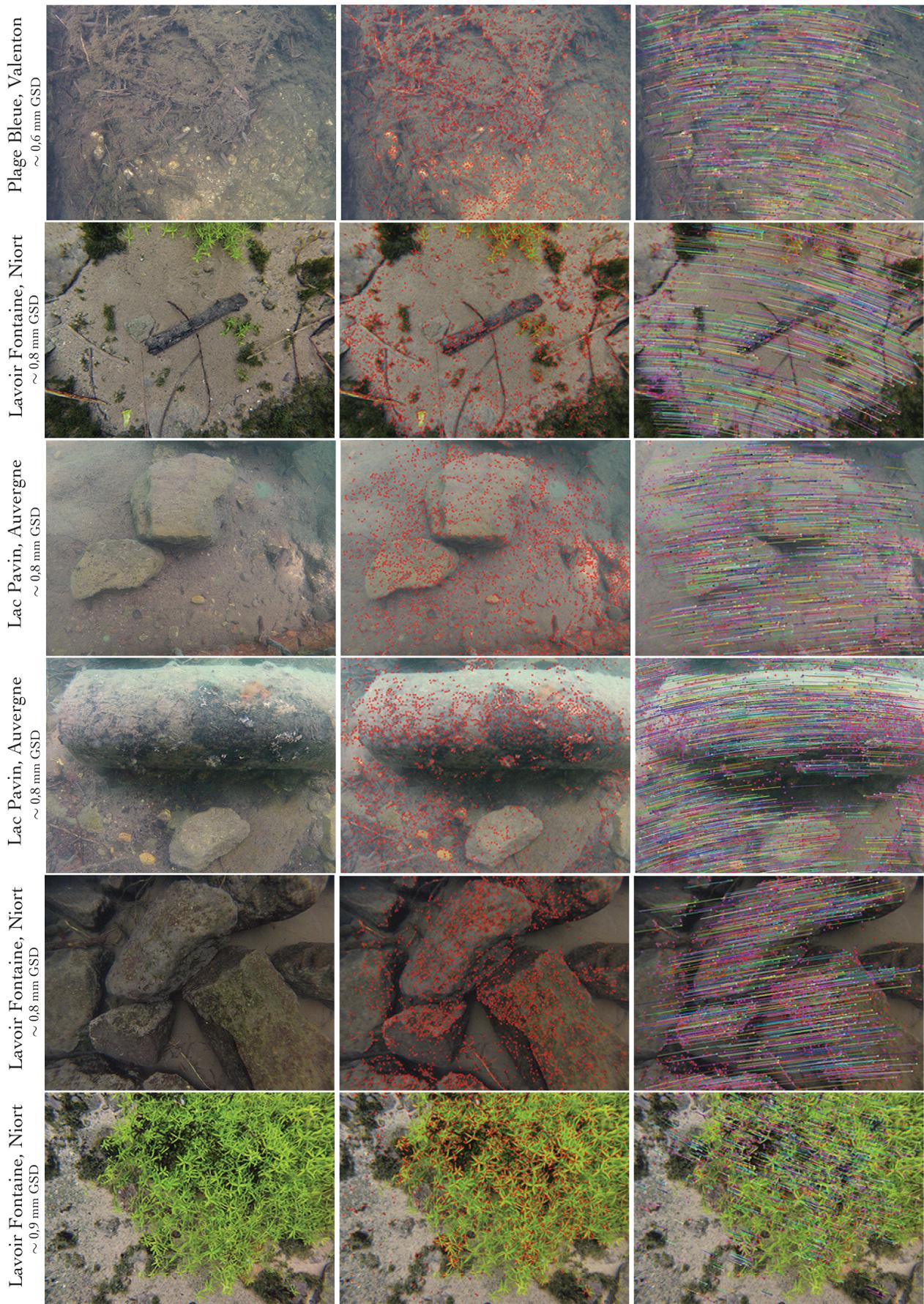
**Figure 3.43** – Démonstration de l’impact de la synchronisation sur l’appariement en présence de mouvements hautement dynamiques : les caustiques, dont on peut voir des exemples sur la colonne de gauche [©ⓃⓁ. Avantbey et al.]. Les images ont été prises dans un bassin extérieur (Montpellier, 2015) et leur résolution ont été réduite de  $3840 \times 2880$  à  $700 \times 525$  pixels. Le détecteur de points et l’algorithme d’appariement utilisés sont ceux que nous avons développés et que nous venons de décrire. En haut, le couple est synchronisé au minimum à la demi-seconde et 375 points sur 700 ont été appariés, mais seuls 26 d’entre eux ont été gardés comme valides. En bas, la synchronisation est cette fois-ci au millième de seconde : 536 points sur 700 ont été appariés et 471 paires validées.

Les aspects techniques sur la synchronisation des capteurs et la collaboration avec le vecteur seront traités en détail dans la partie acquisition (voir la section 3.3.3 page 115). Nous nous intéressons ici aux conséquences du temps de synchronisation sur les algorithmes d’appariements face à une scène dynamique. La figure 3.43 page 101 montre l’importance du temps de synchronisation vis-à-vis du dynamisme de la scène observée en mettant en avant les conséquences sur la phase d’appariement. Les images sont prises dans un bassin extérieur et contiennent des mouvements à dynamique rapide : les caustiques. Nous remarquons qu’une synchronisation entre la demi-seconde et le centième de seconde est insuffisante pour saisir ces mouvements. En effet, les objets étudiés se sont déplacés entre les deux vues et l’appariement est difficile : moins de 4 % des points d’intérêts ont été appariés et plus de 90 % des vecteurs d’appariement candidats étaient erronés. En revanche, une synchronisation au millième de seconde permet de les capturer parfaitement : plus de 65 % des points d’intérêts sont appariés et les vecteurs d’appariement candidats erronés comptent pour moins de 15 %.

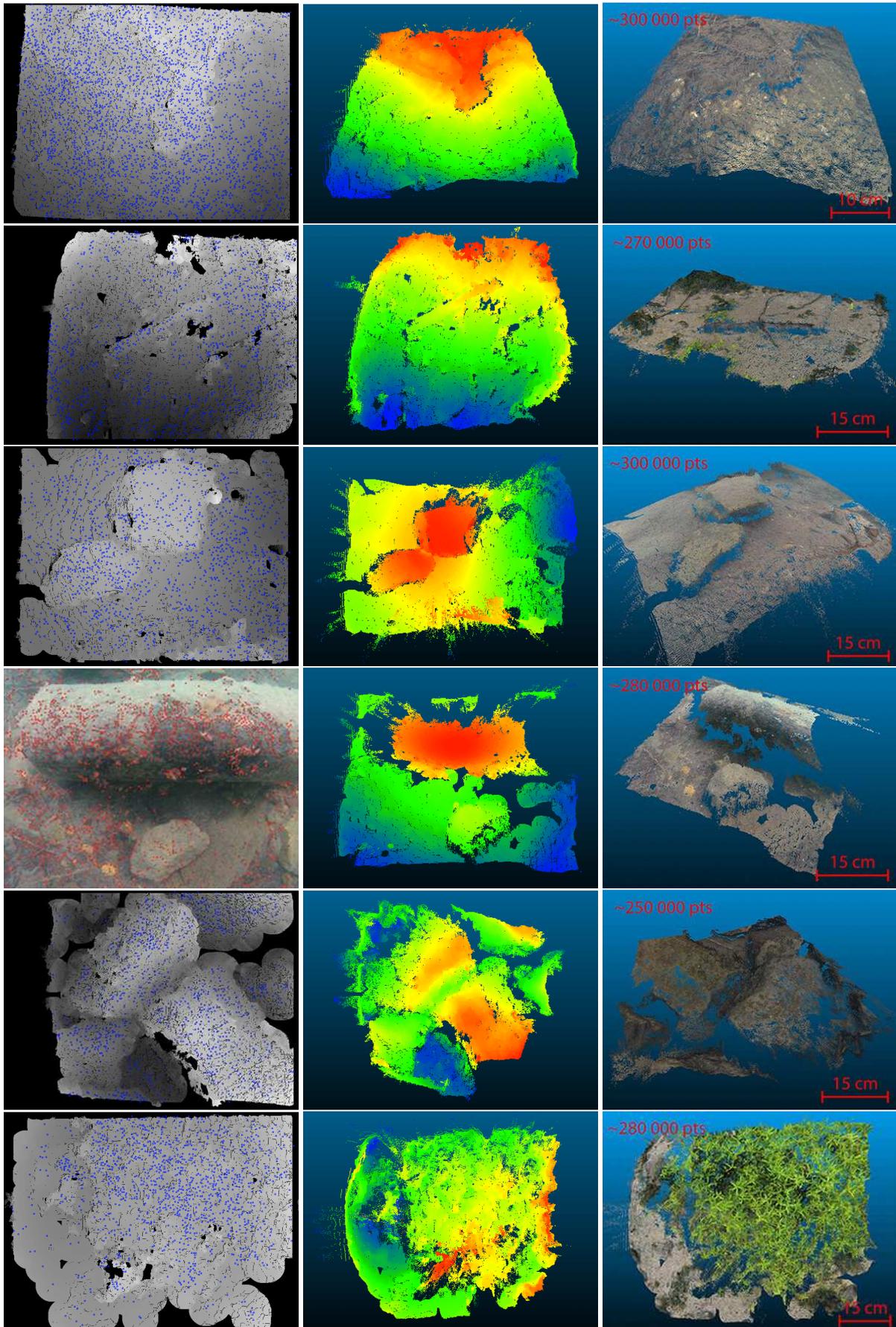
### Reprojection et nuages de points tridimensionnels

Pour finaliser notre traitement et obtenir un nuage de points tridimensionnels dense et coloré, il nous reste à reprojeter dans le repère de la caméra chacun des points de la carte de disparité. Pour cela, nous utilisons le modèle du sténopé compensé pour prendre en compte la présence des dioptries additionnels et les paramètres du capteur sont calibrés *in situ* à l’aide d’un objet étalon (voir section 3.3.2 page 104 pour plus de détails).

Les résultats des différentes étapes de notre algorithme de reconstruction tridimensionnelle sous-marine sont illustrés aux figures 3.44 page 102 et 3.45 page 103. Pour ce qui est de l’analyse qualitative de nos nuages, nous invitons le lecteur à se rendre au chapitre 4 pour trouver une discussion à ce propos, car ce type d’analyse implique de réaliser des mesures physiques sur la zone d’étude (voir la section 3.3.3 page 115 sur les relevés de vérité terrain) qui n’ont pas été effectuées sur les lieux de nos images échantillons (accès au milieu, temps, équipement, etc.).



**Figure 3.44** – Exemples d’illustrations de la première étape de notre chaîne de reconstruction locale : la génération de germes fiables [© L. Avantbey et al.]. Images originales à gauche, identification des zones texturées (points de Harris modifiés en rouge) au centre et appariement épars (flots de vecteurs) à droite. Les images sont prises à la main avec une caméra GoPro dans différents plans d’eau et leurs résolutions ont été réduites de  $5840 \times 2880$  px à  $700 \times 525$  px.



**Figure 3.45** – Suite des étapes de notre algorithme de reconstruction sur les images présentées à la figure 3.44 page 102 : appariement dense par propagation (carte de disparité), nuage de points en échelle de couleurs et nuage de points en couleurs réelles [© L. Avantbey et al.].

### 3.3.2 Problème d'étalonnage

L'état de l'art correspondant à ce problème a été détaillé à la section 3.2.2 du chapitre 3 page 69.

Au début du chapitre 3 (section 3.1.1 page 56), nous avons expliqué que l'utilisation d'un modèle représentatif des capteurs permettait de reprojeter les pixels des images stéréoscopiques acquises dans un repère tridimensionnel. Nous avons soulevé à la section 3.1.4 (chapitre 3, page 61) que le problème principal de la reprojection sous-marine provenait de la présence du dioptre eau-(verre-)air qui infléchit fortement la trajectoire des rayons lumineux perçus par le capteur. Parmi les différentes solutions proposées dans la littérature, nous avons choisi d'utiliser le modèle du sténopé compensé complété par un modèle polynomial pour corriger les distorsions tangentielle et radiale. En effet, les paramètres des autres modèles de caméras que nous avons répertoriés sont difficiles à estimer en pratique et l'utilisation d'un hublot hémisphérique pour annuler les effets des dioptries ne correspond pas à nos critères concernant la répliquabilité du système que nous cherchons à concevoir.

Nous avons vu dans l'état de l'art que pour obtenir une approximation satisfaisante de la reprojection avec le modèle du sténopé compensé, nous devons remplir les conditions suivantes :

- La lentille du capteur doit être positionnée au contact du hublot pour concentrer le plus possible les foyers multiples générés par le dioptre et les rapprocher du centre optique. Ce point mécanique est traité dans la section 3.3.3 « acquisition *in situ* » (page 115) grâce à un châssis ajustable sur lequel est montée la caméra lorsque le caisson étanche de cette dernière ne respecte pas cette contrainte.
- La distance d'étalonnage doit correspondre à la distance d'observation, car c'est à cet endroit que le modèle compensé est le plus juste. Ce point technique est lui aussi traité dans la section 3.3.3 « acquisition *in situ* » grâce à l'asservissement en profondeur du robot sous-marin.
- L'estimation des paramètres du modèle doit s'effectuer dans le milieu d'étude. Les dioptries sont ainsi assimilés à une lentille supplémentaire du système d'acquisition et compensés par un ajustement de la focale et de la distorsion radiale. Ce point méthodologique est traité dans cette section.

#### Paramètres à calibrer pour le modèle du sténopé compensé et les modèles polynomiaux de distorsions

Les paramètres que nous cherchons à calibrer sont résumés dans l'équation 3.1 page 104 et sont les suivants :

- La **focale compensée** ( $f_{cmm}$ , que l'on extrait en multipliant  $f_{u_{px}}$  ou  $f_{v_{px}}$  par la largeur  $p_{L_{mm}}$  ou la hauteur  $p_{H_{mm}}$  d'un pixel physique du capteur) nous permet de déterminer la distance au plan image du centre de projection du capteur incluant les dioptries.
- La **position du projeté du centre optique** ( $cu_{px}$ ,  $cv_{px}$ ) nous permet de déterminer la position dans le plan du centre de projection. Elle nous donne aussi accès à la disparité (distance entre deux pixels stéréoscopiques) qui, combinée à la **base** ( $T_{x_{mm}}$ , issue des paramètres extrinsèques stéréoscopiques), nous permet de fixer l'échelle de reconstruction.
- Les **coefficients des polynômes de distorsion** radiale ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ) et tangentielle ( $p_1$ ,  $p_2$ ) que nous utilisons pour compenser les courbures plus marquées des rayons arrivant sur les bords de l'image.

(a) Paramètres intrinsèques	(b) Paramètres extrinsèques stéréoscopiques	(c) Polynômes de distorsion
$\begin{bmatrix} f_{u_{px}} & s_{uv} & cu_{px} \\ 0 & f_{v_{px}} & cv_{px} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} R_{3 \times 3_{rad}} & T_{3 \times 1_{mm}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} u_{corr} = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ v_{corr} = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ u_{corr} = u + [2p_1 v + p_2(r^2 + 2u^2)] \\ v_{corr} = v + [p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 u] \end{cases} \quad (3.1)$

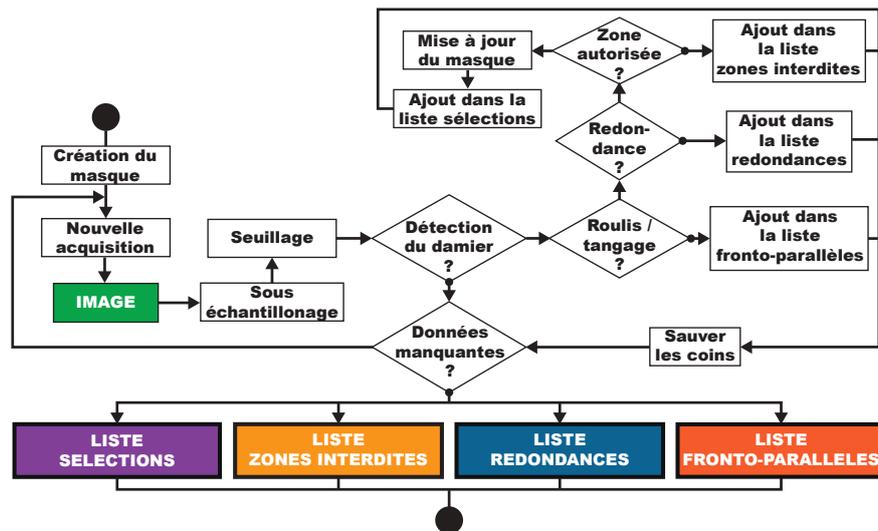


Figure 3.46 – Diagramme de notre algorithme de sélection d'images d'étalonnage [© L. Avantbey et al.].

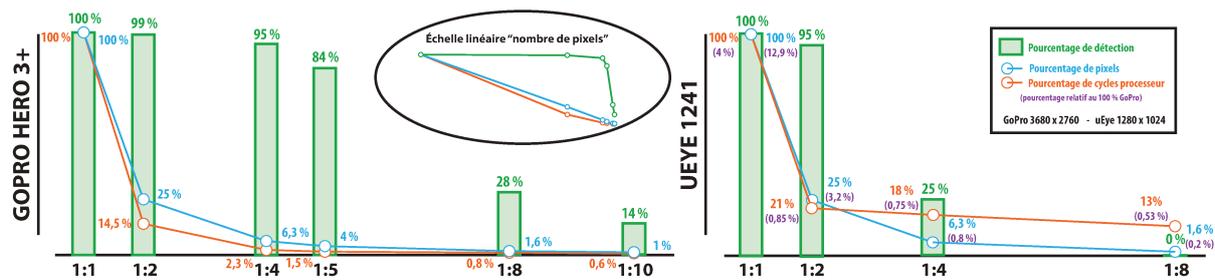
Nous pouvons poser certaines hypothèses pour simplifier ces systèmes. Par exemple, nous utilisons dans nos travaux des capteurs photographiques (voir section 3.3.3 page 115) et leurs méthodes actuelles de conception rendent négligeable la différence d'angle des axes du plan image : nous pouvons donc annuler le paramètre intrinsèque  $s_{uv}$  qui traduit la non-orthogonalité des pixels. D'autre part, il est d'usage de confondre les centres de distorsions avec le projeté du centre optique. De plus, la distorsion radiale est supposée symétrique par rapport à l'axe des ordonnées, ce qui en fait une fonction paire, c'est pourquoi nous ne considérons que les termes des puissances paires du polynôme de Taylor qui l'approxime. Le troisième coefficient est utilisé pour les caméras à grand-angle. Enfin, dans la configuration que nous avons choisie pour notre banc d'acquisition stéréoscopique (voir section 3.3.3 page 115), les paramètres extrinsèques stéréoscopiques de rotation seront proches de zéro et il en va de même pour les translations sur l'axe de la profondeur ( $T_{zmm}$ ) et sur celui de la hauteur ( $T_{ymm}$ ).

### Méthodologie d'étalonnage *in situ* et problématiques

Nous avons vu dans la littérature que l'étalonnage *in situ* par mire correspond à la méthode la plus compatible avec les contraintes opérationnelles de terrain et nous utilisons les méthodologies de Zhang [2000] et Brown [1971] pour l'estimation des paramètres intrinsèques et de distorsions à partir d'une mire. Ces dernières s'appliquent individuellement pour chacun des capteurs. Les paramètres extrinsèques du système, quant à eux, qui décrivent la position d'une caméra par rapport à l'autre, peuvent être estimés dans l'air comme dans l'eau (avec des paramètres intrinsèques connus), car ils ne sont pas dépendants du milieu.

Comme nous utilisons des capteurs photographiques, les vues sont prises « à l'aveugle », car ces capteurs ne permettent pas un contrôle visuel temps réel contrairement aux caméras. Il faut donc systématiquement prendre un grand nombre d'images pour espérer statistiquement disposer des informations nécessaires pour procéder à l'étalonnage. Nos jeux de données contiennent donc beaucoup d'informations inutiles et redondantes qui, en plus de ralentir le processus (nous parlons ici de plusieurs heures, voire plusieurs dizaines d'heures de calcul sur un ordinateur portable), peuvent venir brouter l'estimation et même la faire échouer.

En milieu sous-marin, ce problème prend encore plus d'ampleur : si l'étalonnage échoue ou donne un piètre résultat, il faut revenir sur la zone d'étude pour procéder à l'acquisition d'un nouveau jeu de données. C'est pour simplifier cet aspect que nous proposons une méthodologie pour trier directement sur zone et en quasi temps réel les images acquises et en extraire un sous-échantillon pertinent et suffisant. Le diagramme de notre algorithme est donné à la figure 3.46 page 105 et nous le décrivons à la section suivante.



**Figure 3.47** – Statistiques réalisées sur la base de données à propos de la relation entre le facteur de sous-échantillonnage et les pourcentages du nombre de pixels, du nombre de cycles processeur et de la probabilité de détection de la mire par rapport aux images en pleine résolution (1 : 1) où la mire a été détectée [© L. Avantbey et al.]. À gauche, les résultats pour les images GoPro, avec les facteurs d'échantillonnage 2, 4, 5, 8 et 10. La vignette en haut de ce graphique propose une représentation de ces courbes en considérant une échelle linéaire sur le nombre de pixels. À droite, les résultats pour les images uEye, avec les facteurs d'échantillonnage 2, 4 et 8. En dessous d'un certain nombre de pixels, le temps utilisé pour la phase de détection elle-même est négligeable par rapport au temps total du programme (inversion des deux courbes).

Pour évaluer nos résultats, nous avons créé une base de données d'images composées d'environ 60 000 images prises par six caméras de trois types différents (uEye, GoPro HD 2, GoPro Hero3+) dans des conditions environnementales variées : piscine, bassin extérieur ou mer Méditerranée, à des horaires et des saisons différentes. Elles sont réparties en une centaine de jeux, chacun contenant 500 à 2500 images, ce qui correspond à des séances d'acquisition d'environ 5 à 20 minutes. Nos distances d'observation sont comprises entre 50 cm et 2 m en moyenne.

Considérant les faibles profondeurs de travail lors de ces campagnes d'acquisition (1 à 4 mètres), nous avons préféré la configuration où la mire est fixe sur le fond et où nous déplaçons la caméra pour simplifier la manipulation en évitant les reflets liés à la surface.

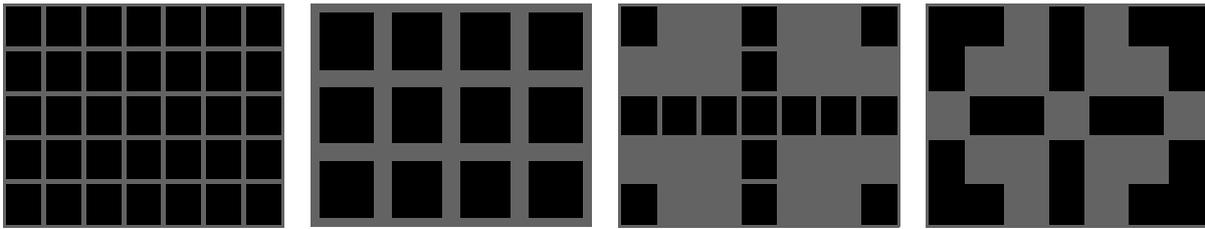
Nous avons vu dans l'état de l'art que la taille de la mire et son nombre de points résultent d'un compromis entre l'amélioration de la détection et la difficulté à faire converger l'estimation. Au regard de nos distances d'observation, nous avons choisi d'utiliser une mire de type damier mesurant  $45 \times 50$  cm. Composée de  $9 \times 10$  cases, elle offre 72 points d'ancrage (intersections des groupes de quatre cases). Nous l'avons faite imprimée sur un autocollant mat et apposée sur une plaque plastique rigide.

### Détection des mires sur les images en quasi temps réel

Nous commençons par filtrer les images en ne conservant que celles où tous les points d'ancrage de la mire sont localisés et ordonnés. La complexité algorithmique de cette tâche est la plus élevée de toute la chaîne d'échantillonnage, car elle est directement liée au nombre de pixels des images. Pour la réduire, nous sous-échantillons les images et nous procédons au tri sur les vignettes. Nous noterons que seuls les échantillonnages entiers (c'est-à-dire dont le facteur est diviseur des deux dimensions de l'image) et au plus proche voisin sont considérés pour préserver au mieux l'information radiométrique et spatiale (pas d'influence des voisins pour l'interpolation), notamment au niveau des changements de textures et donc autour des points de la mire.

Si nous prenons en exemple les images de notre base prises par les caméras GoPro Hero3+ ( $3680 \times 2760$ ), leurs facteurs entiers de sous-échantillonnages sont : 2, 4, 5, 8, 10, etc. Quant aux images prises par les caméras uEye ( $1280 \times 1024$ ), leurs facteurs entiers de sous-échantillonnages sont : 2, 4, 8, etc. Nous avons produit des statistiques à partir de notre base de données pour ces deux caméras et les résultats sont illustrés par les graphiques de la figure 3.47 page 106. Nous pouvons observer que jusqu'au facteur 5, le taux de détection des mires sur les images GoPro se maintient à 85 %, quelles que soient les conditions *in situ*. Au-delà, il tombe à moins de 30 % (facteur 8) et même à moins de 15 % (facteur 10).

Le coût en temps (cycles processeur) de l'algorithme est presque linéaire par rapport au nombre de pixels dans l'image. Le facteur 5, qui offre un gain de 95% en temps de calcul, est donc un bon compromis. Concernant



**Figure 3.48** – Exemples de masques utilisables pour la sélection [©️️️️ L. Avantbey et al.]. Les zones grises marquent les zones interdites pour le critère de position spatiale.

les images uEye, le facteur 2 (95 % de détection, 80 % du temps de calcul en moins) nous semble le plus pertinent. Concrètement, nous passons donc à un temps de calcul sur un ordinateur portable de quelques minutes seulement pour traiter un jeu de plusieurs centaines d’images.

En comparant, la taille respective des images uEye et GoPro, les deux facteurs choisis s’avèrent équivalents : nous nous arrêtons dans les deux cas à des vignettes contenant entre 300 000 et 400 000 pixels environ. Cela correspond, pour nos distances d’observation, à des cases de la mire mesurant une dizaine de pixels de côté. En dessous de cette taille, l’algorithme de détection rencontre plus de difficultés à identifier proprement la position des cases dans nos conditions environnementales. Le facteur d’échelle optimal est donc dépendant des dimensions de la mire et de sa distance d’observation.

Par ailleurs, le pourcentage d’images où la mire est détectée sur le sous-échantillonnage, mais ne l’est pas de manière correcte en pleine résolution reste négligeable (inférieur à 1 %). Ces cas sont essentiellement dus à la présence d’artefacts, lissés par le sous-échantillonnage.

Pour réaliser la détection, nous avons pris pour base l’algorithme implémenté dans la bibliothèque [OpenCV](#) (*findChessboardCorners*). Nous avons cependant dû modifier cet algorithme pour l’adapter aux spécificités de notre milieu de travail, ce dont nous discuterons plus en détail à la fin de cette partie (voir page 111).

### Sélection automatique d’un sous-échantillon d’images pour l’étalonnage

À l’issue de la phase de filtrage, nous disposons pour chaque mire détectée de la liste des positions de tous ses points d’ancrage dans l’image sous-échantillonnée (coordonnées pixel). Nous utilisons ces informations pour ne conserver qu’un échantillon réduit, mais suffisant, d’images pertinentes pour effectuer l’étalonnage. Pour ce faire, nous nous appuyons sur un masque qui va nous permettre d’identifier les données redondantes ainsi que sur deux autres critères de sélection : la répartition spatiale et la diversité des positions tridimensionnelles des points d’ancrage.

Une bonne répartition spatiale permet d’améliorer l’estimation de la focale et des paramètres de distorsion en assurant des données suffisamment riches en translations sur les deux axes ainsi que sur les bords et les coins des images [Lébraly, 2012; Servos et al., 2013]. Le masque est donc préalablement segmenté en zones et les coordonnées du centre de la mire (obtenues à partir des coordonnées des quatre coins) permettent de connaître la zone dont elle relève. Si cette dernière contient déjà des informations, la mire est rejetée pour redondance sur le critère de position spatiale. Nous noterons que le nombre de zones que comporte le masque doit être supérieur ou égal au nombre de mires minimum dont nous souhaitons disposer pour l’étalonnage.

Parallèlement, une bonne diversité des positions tridimensionnelles permet d’améliorer l’extraction des paramètres intrinsèques par invariance des matrices d’homographie [Zhang, 2000; Pessel et al., 2003; Kunz et Singh, 2010]. Nous avons vu de surcroît dans l’état de l’art qu’il était important que ces positions intègrent des mouvements de roulis ou tangage non nuls pour obtenir une meilleure estimation de la focale. Nous utilisons les coordonnées de quatre coins de la mire pour vérifier que l’empreinte du quadrilatère n’est pas un parallélogramme, mais bien un trapèze et une vérification avec le masque permet de rejeter les mires pour redondance

sur le critère de position tridimensionnelle.

Le masque, dont quelques exemples sont fournis à la figure 3.48 page 107, peut définir des zones interdites pour mieux contraindre la répartition spatiale, notamment pour éviter que deux mires de zones connexes se retrouvent presque superposées si leurs centres respectifs sont positionnés tous deux à proximité de la frontière. Il est également possible de masquer plusieurs zones d'un coup si l'on considère que l'information apportée par une mire vaut pour sa position spatiale symétrique.

En moyenne dans nos jeux, pour les images où la mire est détectée, 40 à 70 % d'entre elles sont rejetées, car elles sont trop proches des cas dégénérés (pas assez de roulis ou tangage). Le reste est classé redondant. Lorsque le nombre de mires voulu est atteint, la phase d'acquisition peut s'achever. Nous disposons maintenant de la liste des images sélectionnées et des coordonnées pixels de toutes les correspondances images-modèles associées, à la taille du sous-échantillonnage.

### Calibrage et sous-échantillonnage : problèmes et solutions

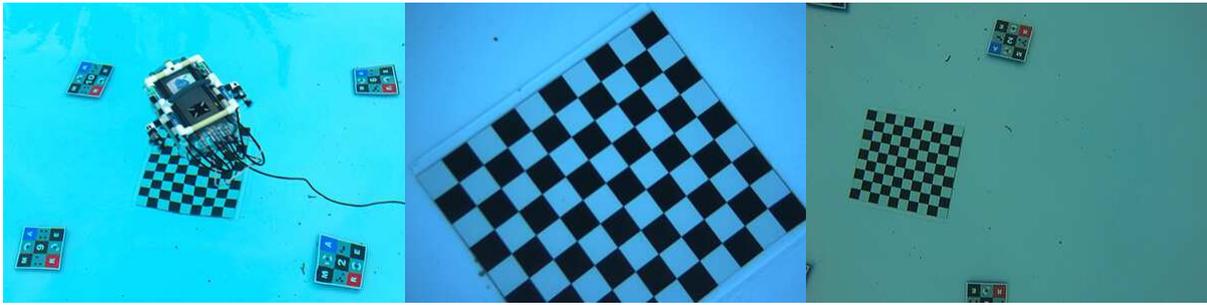
Nous ne pouvons pas utiliser directement ces données pour procéder à l'étalonnage. En effet, le sous-échantillonnage peut modifier artificiellement la position des projetés des points d'ancrage, et ce, de manière non uniforme sur le jeu d'image selon la position de la mire, ce qui a pour conséquence de fausser les estimations des paramètres de manière non négligeable. Pour illustrer cela, nous avons comparé les estimations des paramètres intrinsèques calculés sur les images GoPro Hero 3+ de notre base en pleine résolution avec celles des paramètres issus des mêmes images sous-échantillonnées d'un facteur 2, 4 et 5 et corrigés pour être ramenés en équivalence pleine résolution. Nous observons :

- que l'impact du facteur de sous-échantillonnage est visible : les estimations sont toutes différentes les unes des autres,
- que tous les paramètres intrinsèques ne sont pas impactés de la même manière : les variations maximales ont lieu sur la longueur focale où les écarts sont de l'ordre du millimètre (écart médian d'environ 3 mm) et peuvent dépasser 5 mm (focale différente d'un facteur 2 ou 3) ainsi que sur les coefficients de distorsion radiale où les écarts sont de l'ordre de la centaine.

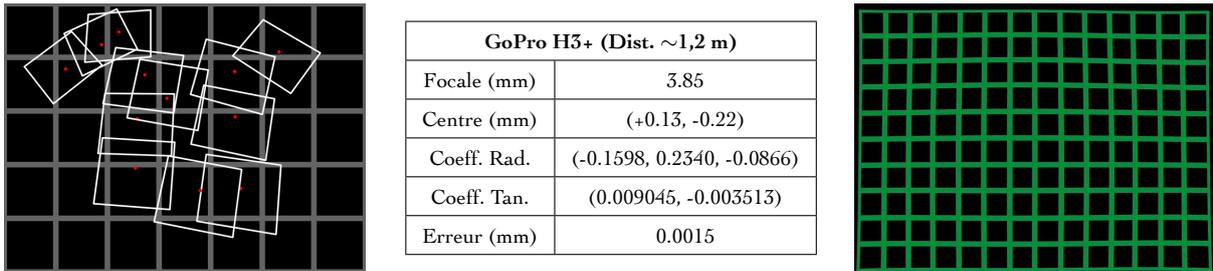
Les variations des autres paramètres sont moins extrêmes. L'erreur de reprojection est plus importante (25 fois plus grande en moyenne), mais reste néanmoins inférieure à 0,1 mm. Les écarts sur la position du projeté du centre optique sont de l'ordre du dixième de millimètre et ceux des coefficients de distorsion tangentielle sont de l'ordre du dixième.

Ainsi l'étalonnage doit s'effectuer à partir des données en pleine résolution. Il n'est cependant pas nécessaire de relancer l'intégralité du processus de détection des points d'ancrage sur la sélection d'images en pleine résolution. En effet, leurs coordonnées pixel obtenues sur les images sous-échantillonnées peuvent être converties en pleine résolution grâce au facteur d'échelle. Mais ces valeurs ainsi calculées ne tomberont que rarement avec précision sur la position des points d'ancrage dans les images en pleine résolution. Pour résorber ces erreurs, nous raffinons leur positionnement au niveau subpixelique sur l'image en pleine résolution. Le coût algorithmique de cette opération est indépendant du nombre de pixels de l'image, car seules des fenêtres autour des points d'ancrage sont étudiées (dépendance au nombre de points de la mire). Nos tests sur la base montrent que l'écart passe alors de 0,08 pixel à moins de  $1,5 \times 10^{-6}$  pixel en moyenne.

Pour revenir à une résolution de travail qui peut être différente de la pleine résolution, il suffit de diviser la longueur focale ( $f^{u_{px}}, f^{v_{px}}$ ) et les coordonnées du projeté de centre optique ( $cu_{px}, cv_{px}$ ) par le même facteur que celui du sous-échantillonnage. Les coefficients des distorsions restent inchangés, car leur relation est proportionnelle à la distance au centre de distorsion. Par ailleurs, s'il y a un rognage des bords de l'image, le projeté du centre optique devra être translaté d'autant.



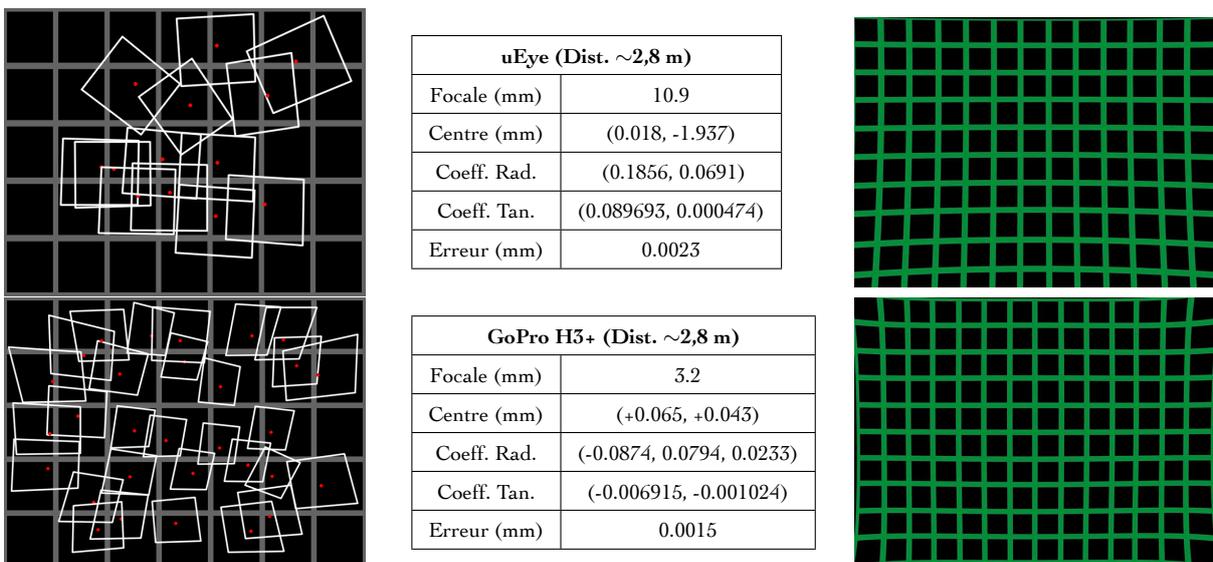
**Figure 3.49** – Acquisition d’images d’étalonnage au nadir dans un bassin extérieur [© L. Avantbey et al.]. À gauche, le robot en train d’acquérir des vues de la mire qui est déposée sur le fond à une distance d’environ un mètre, au centre un exemple d’une image acquise par les caméras uEye et à droite, un exemple d’une image acquise par les caméras GoPro.



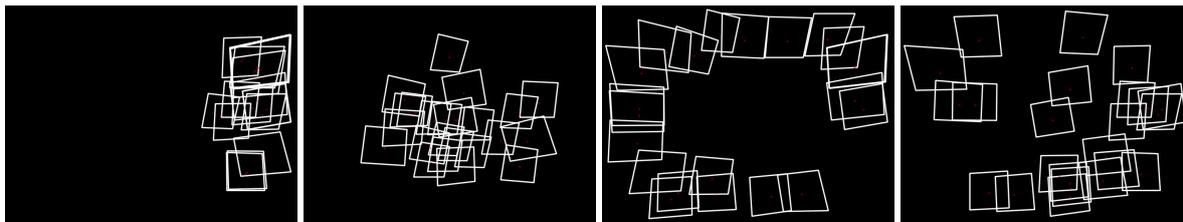
**Figure 3.50** – À gauche, le résultat de l’algorithme de sélection sur un jeu d’images GoPro acquises au nadir (12 images sélectionnées sur un jeu de plus de 400 images), au centre les résultats de l’étalonnage avec le sous-échantillon sélectionné et à droite une modélisation de la distorsion estimée [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.51** – Acquisition d’images d’étalonnage en latéral dans un bassin extérieur [© L. Avantbey et al.]. À gauche, le plongeur manipule le robot pour acquérir des vues de la mire appuyée sur la paroi à une distance d’environ 2,8 mètres, au centre un exemple d’une image acquise par les caméras uEye et à droite, un exemple d’une image acquise par les caméras GoPro.



**Figure 3.52** – À gauche, le résultat de l’algorithme de sélection sur un jeu d’images uEye (en haut) et GoPro (en bas) acquises en latéral (15 images sélectionnées sur un jeu de plus de 400 images pour les uEye et 57 images sélectionnées sur un jeu de plus de 2500 images pour les GoPro), au centre les résultats des étalonnages respectifs avec les sous-échantillons sélectionnés et à droite les modélisations des distorsions estimées [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.53** – Exemples de sous-échantillons considérés comme peu pertinents, manuellement constitués à partir du jeu de données GoPro de 2500 images prises en latéral [© L. Avanthey et al.]. De gauche à droite : répartition spatiale insuffisante, absence d'information sur les bords ou au centre, roulis ou tangage insuffisant.

### Pertinence et complétude de notre sous-échantillon d'image pour l'étalonnage

Pour estimer les paramètres intrinsèques à partir des correspondances images-modèles, nous utilisons la fonction d'étalonnage implémentée dans la bibliothèque **OpenCV** (*cvCalibrateCamera2*). Il est possible de faciliter la convergence de l'algorithme en lui suggérant pour paramètres de départ les coordonnées du centre de l'image comme approximation de la position du projeté du centre optique et la longueur focale aérienne multipliée par le facteur 1,33 comme approximation de la longueur focale sous-marine. Dans tous les cas, il est important de laisser suffisamment de marge sur le nombre d'itérations à l'algorithme et surtout d'exiger une grande précision sur l'optimisation.

La figure 3.49 page 109 montre un protocole d'acquisition au nadir en bassin extérieur et la figure 3.50 page 109 présente pour l'un des jeux de données le résultat de l'algorithme de sélection et les paramètres issus de l'étalonnage. Les caractéristiques des caméras utilisées peuvent être consultées à la section 3.3.3 page 115. Nous noterons qu'à la distance d'observation présentée ( $\sim 1,2$  m), le champ de vision des caméras uEye ne permet pas de contenir la mire en entier dans l'image : leur étalonnage n'a donc pas été possible.

Pour obtenir une meilleure maîtrise de la distance entre la mire et le robot pendant cette phase de prototypage, nous avons acquis des images d'étalonnage en latéral. La figure 3.51 page 109 montre un protocole d'acquisition en latéral, avec la mire appuyée contre le mur du bassin et la figure 3.52 page 109 présente le résultat de l'algorithme de sélection et les paramètres d'étalonnage obtenus pour un jeu de données pris par chaque caméra. Concernant les résultats des étalonnages réalisés en mer, nous invitons le lecteur à se rendre au chapitre 4.

Pour pouvoir évaluer la qualité de notre algorithme de sélection, nous avons tiré une quinzaine de sous-échantillons ( $> 50$  images) à partir du jeu de données GoPro utilisé pour la figure 3.52 page 109 (2500 images en latéral, distance de 2,8 m). Pour tous les sous-échantillons, la sélection réalisée par notre algorithme permet d'obtenir une estimation stable des paramètres d'étalonnage avec une précision correcte. En effet, l'erreur de reprojection ne dépasse pas 0,0015 mm et présente une variation maximale de 0,00025 mm sur l'ensemble des sous-échantillons. La variation sur l'estimation de la longueur focale est de l'ordre du centième de millimètre, comme celle de la position du projeté du centre optique. Quant aux coefficients de distorsion radiale, leur variation est de l'ordre du centième et celle des coefficients de distorsion tangentielle est de l'ordre du millièmètre. Nous pouvons donc conclure que la sélection automatique des images par notre algorithme est pertinente.

À titre de comparaison, nous avons constitué manuellement sur ce même jeu des sélections que nous considérons comme peu pertinentes et dont quelques exemples sont illustrés à la figure 3.53 page 110. Pour ces cas, les résultats montrent des écarts plus importants et un changement d'ordre ( $\times 10$ ) sur la précision. Considérant la manière dont sont acquis les jeux de données, il est très facile de tomber sur ce genre de cas si les images sont sélectionnées sans critère de pertinence (sélection d'un groupe d'images consécutives ou sélection d'une image toutes les  $n$  images par exemple). Les différentes variations des trois cas que nous avons étudiés (nos sélections, sélections aléatoires sur le même jeu et nos sélections sous-échantillonnées) sont résumées dans la table 3.3 page 111.

VARIATIONS		Focale	Centre	Coeff. Rad.	Coeff. Tan.	Erreur
Nos Sélections	Ordre	centième	centième	centième	millième	dix millième
	Écart	0,06 mm	0,06 mm	0,05	0,005	0,00025 mm
Sélections aléatoires	Ordre	dixième	dixième	dixième	centième	dix millième
	Écart	0,5 mm	0,5 mm	0,2	0,05	0.00075 mm
Sous résolution	Ordre	unité	dixième	centaine	dixième	centième
	Écart	5,5 mm	0,5 mm	175	0,15	0,05 mm

**Table 3.3** – Tableau de comparaison des différences de variations observées sur l'estimation des paramètres intrinsèques sur nos sélections, des sélections aléatoires du même jeu ou nos sélections sous-échantillonnées [© ⓘ ⊕ ⊖ L. Avantbey et al.].

### Calibrage et distance d'observation

Nous allons maintenant ajouter quelques commentaires en ce qui concerne la variation des paramètres du modèle sténopé compensé en fonction de la distance d'observation.

Nous remarquons d'une part que les paramètres que nous avons trouvés au nadir avec la caméra GoPro (figure 3.50 page 109) sont très proches de ceux estimés par [Helmholz \[2013\]](#) avec un étalonnage photogramétrique pour une caméra similaire (GoPro Hero 3+, édition *Black* au lieu de *Silver*) et pour des distances équivalentes. Les distorsions respectivement estimées présentent également le même schéma de déformation.

D'autre part, si nous comparons nos paramètres obtenus à 1,2 m (figure 3.50 page 109) et ceux obtenus à 2,8 m (figure 3.52 page 109) pour la caméra GoPro, nous observons que les résultats sont cohérents avec le modèle théorique. En effet, dans notre configuration où la lentille est collée au hublot, les foyers multiples convergent devant le centre optique. Donc plus la distance d'observation est faible, plus la focale est artificiellement élevée. C'est bien ce que nous observons avec une longueur focale de 3,85 mm à 1,2 m contre 3,2 mm à 2,8 m. Lorsque la distance augmente, nous avons également moins besoin de courber le plan image artificiel, et effectivement les coefficients de distorsion radiale estimés sont bien moins élevés à 2,8 m qu'à 1,2 m.

Il serait intéressant dans de futurs travaux d'établir la courbe d'évolution de la longueur focale en fonction de la distance d'observation et de la comparer pour différents types d'eau. Cela nécessite des pas d'échantillonnage en distance plus fins que ceux dont nous disposons actuellement dans notre base d'images d'étalonnage. Si l'on trouve que la longueur focale évolue de manière suffisamment significative pour être non négligeable par rapport aux différents plans de distances présents dans nos scènes d'études, il pourrait alors être envisagé de reprojeter les pixels d'une image de manière différenciée en fonction de leur éloignement (estimation initiale à la focale correspondant à la distance moyenne d'observation, puis raffinement à la focale correspondant à la distance estimée). Cela pourrait se faire à partir de la courbe et quelques mesures *in situ* si le modèle est constant ou bien à partir de quelques échantillons d'étalonnage à des distances représentatives (paliers).

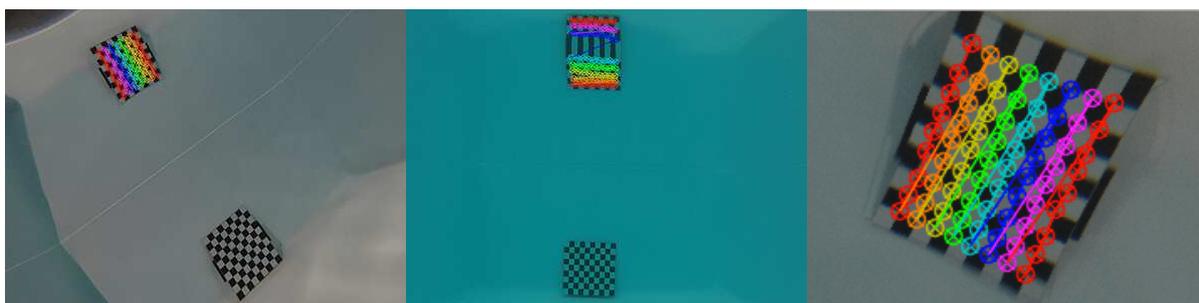
Enfin, pour réaliser de manière plus juste ces comparaisons d'étalonnage ainsi que les précédentes présentées, il sera nécessaire de mesurer les écarts par rapport à un canevas connu, plutôt que de simplement comparer les paramètres intrinsèques obtenus. En effet, la correction d'une même réfraction peut être exprimée par des combinaisons de longueur focale et de distorsion radiale différentes (voir la figure 3.14 de l'état de l'art, page 69).

### Discussion sur l'étalonnage *in situ*

Concernant la visibilité du schéma de points, de nombreux facteurs peuvent intervenir en environnement naturel. Par exemple, l'éclairage faible du milieu sous-marin fait ressortir le blanc de la mire qui sature alors le capteur et rend les acquisitions inutilisables. Nous avons donc remplacé cette couleur par une trame grise. De



**Figure 3.54** – Exemples de sources d’erreurs possibles pour la détection de la mire lors de l’étalonnage [© L. Avantbey et al.]. De gauche à droite : surexposition due à la trame blanche, passages de poissons devant les points d’intérêt (les couleurs claires les attirent), sable poussé sur le damier par le ressac.



**Figure 3.55** – Lorsque la surface est proche et qu’elle est suffisamment lisse pour réfléchir une image nette de la mire (effet miroir) les reflets peuvent être détectés à la place des originaux [© L. Avantbey et al.]. Voici trois exemples de détection erronée sur des images prises par les caméras GoPro, la dernière proposant un zoom sur le reflet.

plus, des objets mobiles peuvent venir se placer entre la mire et le capteur et masquer une partie du schéma de points d’ancrage. Les poissons, par exemple, sont attirés par les couleurs claires et viennent très souvent nager devant le damier. Autre exemple : déposé sur le fond, un damier plat peut se faire rapidement recouvrir (sable, algues, etc.) à cause des courants. Ces différents cas sont illustrés sur la figure 3.54 page 112.

Concernant la performance de l’algorithme de détection de mire implémenté dans la bibliothèque **OpenCV**, les statistiques produites sur notre base de données montrent qu’il n’est pas adapté à une utilisation sous-marine. En effet, le taux de détection (hors cas de mires absentes ou coupées) est très faible : il est inférieur à 10 % pour les jeux acquis en piscine et inférieur à 5 % pour ceux acquis en mer. Il peut monter jusqu’à 50 % si la distance d’observation est très rapprochée (< 2 m) et si la qualité des images est bonne.

Nous noterons que des faux positifs peuvent être trouvés lorsque la surface n’est pas loin et qu’elle est suffisamment lisse pour réfléchir la lumière en miroir (voir la section 2.1 page 18 du chapitre 2). Les reflets du damier peuvent alors être confondus avec l’original, et ce, malgré de grosses déformations, comme nous pouvons le voir sur les exemples de la figure 3.55 page 112.

Nous remarquerons d’autre part que la mire que nous avons imprimée ne contient pas de bordure extérieure claire. Nous devons en rajouter une, car en fonction de l’éclairage, les ombres peuvent ajouter une bordure sombre épaisse sur le pourtour du damier. Le même effet est provoqué lorsque le fond est sombre, ce qui est fréquent en milieu sous-marin. L’algorithme de détection d’**OpenCV** confond ces zones sombres avec des cases noires ce qui fait échouer le processus (nombre incorrect de cases détectées). Le lecteur peut voir deux exemples illustrés de ces cas à la figure 3.56 page 113.

Hormis ces deux cas particuliers, nous avons identifié que l’échec de l’algorithme provient essentiellement de la phase de binarisation qui seuille l’image avant de procéder à la détection des cases du damier, puis de ses intersections. En effet, cette dernière n’est pas robuste aux conditions environnementales très présentes en eau peu profonde (se référer à la section 2.1 page 18 du chapitre 2) : éclairage non uniforme (voir figure 3.57

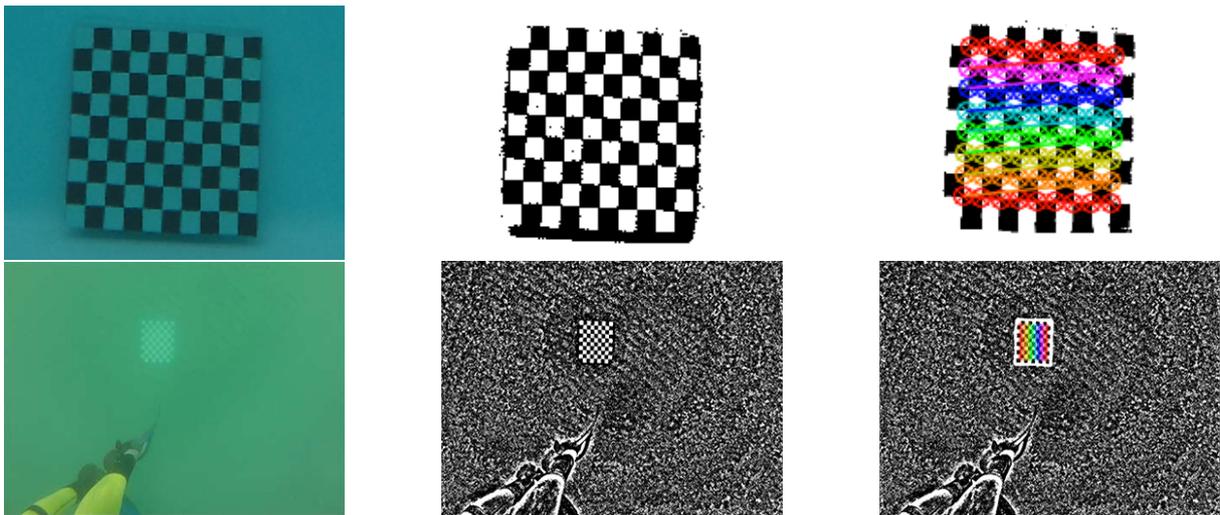


Figure 3.56 – Effets provoqués par l'absence d'une bordure claire autour de la mire [© L. Avantbey et al.] : ombre en haut et fond sombre en bas.

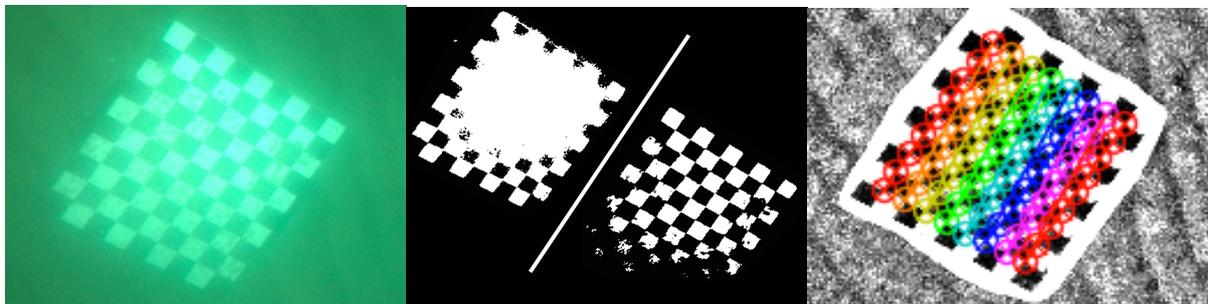


Figure 3.57 – Exemple d'éclairage non homogène provoqué par la concentration des rayons lumineux [© L. Avantbey et al.] L'effet sur l'image originale est mis en avant par saturation des tons clairs (à gauche), un seuillage classique perd alors une partie du schéma de la mire sur une teinte ou sur l'autre (au centre) alors que notre seuillage le conserve (à droite).

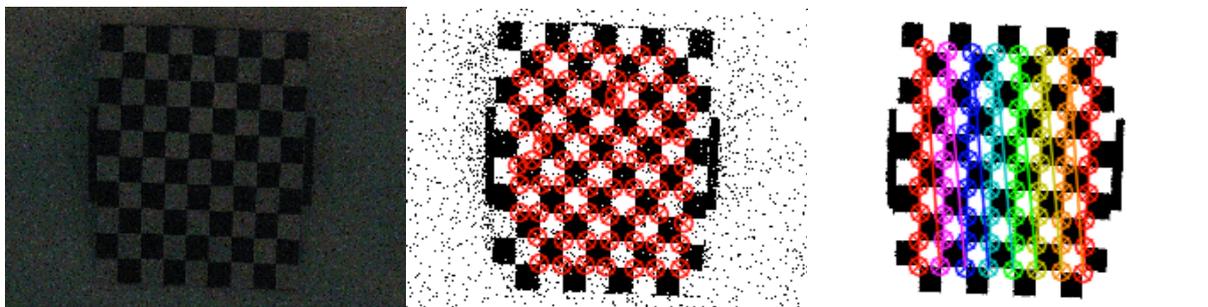


Figure 3.58 – Exemple de bruit sur une image dû à la faible luminosité lors de la prise de vue [© L. Avantbey et al.]. Le bruit de l'image originale (à gauche) est en partie conservé par le seuillage classique (au centre) ce qui perturbe la quantité et l'ordre des points détectés alors que notre seuillage permet de le supprimer totalement (à droite).

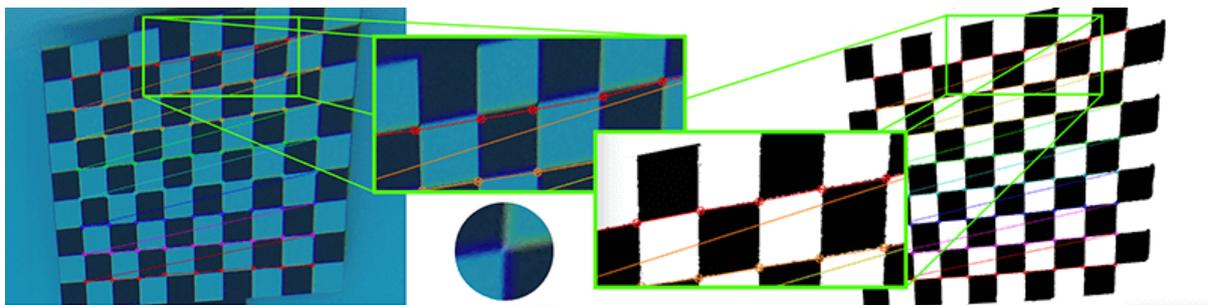
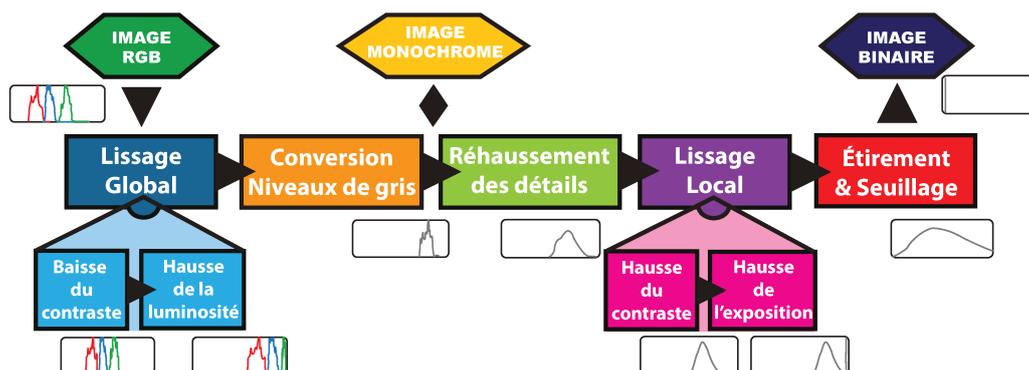


Figure 3.59 – Exemple des effets de la dispersion, très prononcée sur les bords de l'image [© L. Avantbey et al.]. Le seuillage classique (à gauche) a dû mal à distinguer les bords réels à cause de la séparation des rayons bleus et jaunes (détail au centre) alors que notre seuillage permet de réajuster comme il faut la position des points détectés.



**Figure 3.60** – Diagramme de notre algorithme de binarisation, plus robuste aux conditions environnementales sous-marines que celui implémenté dans la bibliothèque *OpenCV* [© L. Avanthey et al.].

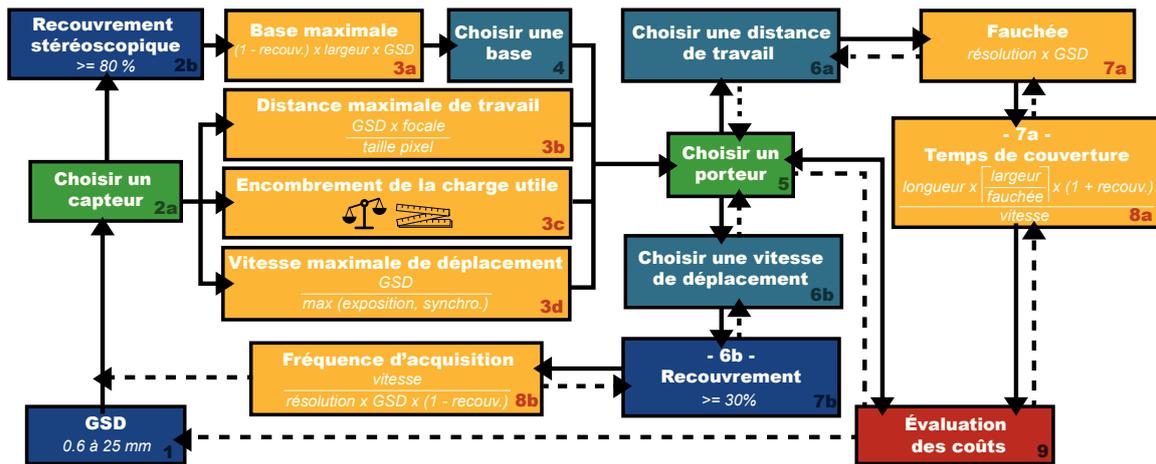
page 113), bruit (voir figure 3.58 page 113), dispersion des rayons lumineux (voir figure 3.59 page 113), etc. L’option de seuillage adaptatif proposée par la fonction ne résout pas le problème.

Nous réalisons donc notre propre binarisation et nous fournissons directement l’image prétraitée à l’algorithme d’*OpenCV*. Le diagramme de notre algorithme est disponible à la figure 3.60 page 114. Nous commençons par appliquer un lissage global sur les images en baissant le contraste (moyennage d’histogramme) et en rehaussant la luminosité (décalage d’histogramme). Nous convertissons ensuite l’image en niveau de gris et nous passons sur un canal unique dont l’échelle est linéaire (0-100). Ensuite, nous faisons ressortir les bords des cases de la mire en appliquant un microcontraste (contraste très local).

Puis nous lissons à nouveau les images, mais cette fois-ci localement, pour atténuer au mieux les derniers effets de l’éclairage non uniforme : rehaussement du contraste et rehaussement de l’exposition. Enfin, nous seuillons l’histogramme autour de sa valeur maximale (il est possible de décentrer légèrement cet intervalle sur les tons clairs pour renforcer les tons foncés sur l’image que nous avons beaucoup éclaircie) et nous l’étirons. Puis nous seuillons l’image en deux parties. Des exemples de résultats de détections sur les cas problématiques produits avec les images seuillées par notre algorithme sont affichés à droite des figures précitées. Nous obtenons, cette fois-ci, un taux de détection supérieur à 80 % sur l’ensemble de nos jeux.

Concernant les procédures d’acquisition, nous noterons qu’il est difficile de capturer la mire sur les bords de l’image, car elle se retrouve souvent coupée ou alors trop éloignée de ce dernier. Pour faciliter cet aspect, il serait possible d’employer le programme de sélection en quasi temps réel. En s’appuyant sur le masque et le retour vidéo d’une caméra, on peut alors traquer la position du robot et le diriger vers les zones où il manque de l’information (odométrie visuelle). Cette fonctionnalité permettrait de réduire le temps global de l’acquisition des vues d’étalonnage.

Enfin, nous ajouterons que nous réalisons la procédure d’étalonnage une seule fois pour tous les couples stéréoscopiques acquis au cours d’une mission du fait de la rigidité du banc binoculaire. Cependant, dans le cas où le temps de synchronisation est grand devant la vitesse de déplacement relative (voir section 3.3.3 page 115), la géométrie du couple réel est différente de celle du banc physique et les paramètres d’étalonnage ne seront plus valables.



**Figure 3.61** – Méthodologie de Réalité Terrain Étendue (RTE) adaptée à l'environnement sous-marin pour déterminer les critères de choix en ce qui concerne les outils d'acquisition (la charge utile et son vecteur) afin d'obtenir des données à l'échelle des individus [© L. Avanthey et al.]. Certains paramètres comme la taille de l'échantillon au sol (GSD) ou le recouvrement entre les couples successifs peuvent d'ores et déjà être fixés.

### 3.3.3 Problème d'acquisition *in situ*

L'état de l'art correspondant à ce problème a été détaillé à la section 3.2.5 du chapitre 3 page 76.

La collecte de données *in situ* comporte deux volets à caractère opérationnel : d'une part la couverture de la zone avec l'acquisition d'images stéréoscopiques, et d'autre part, le relevé de mesures de vérité terrain qui permettent de valider la cohérence des résultats obtenus.

L'état de l'art nous a montré que les outils sous-marins dédiés à l'acquisition optique sont globalement peu flexibles et surdimensionnés au regard de la taille des zones d'études qui nous intéressent (pour rappel, des espaces qui ne dépassent guère les  $2\,000\text{ m}^2$ , situés à proximité des côtes et dont les profondeurs n'excèdent pas 100 m) et que recourir à des plongeurs rend la systématisation de l'acquisition compliquée. Dans ce contexte, l'avenir des microrobots agiles et performants semble très prometteur. Nous proposons donc la conception d'un système d'acquisition léger qui offre une grande souplesse opérationnelle et permet la cartographie à l'échelle des individus en eau peu profonde. Pensé pour être facilement répliquable, ce système est composé de deux bancs stéréoscopiques modulables et synchronisés (charge utile), d'un microrobot sous-marin hybride (vecteur) et d'un petit véhicule de surface pour l'utilisation filoguidée (relais).

Bien que les images acquises par notre système constituent une vérité terrain en elles-mêmes pour ce qui est de l'identification des objets qui les composent, il n'en va pas de même pour les mesures que nous cherchons à effectuer sur les nuages de points qui en sont extraits. Nous avons vu que pour certifier ces dernières, et donc certifier notre chaîne de reconstruction, il est nécessaire de les contrôler par des mesures réalisées sur le terrain. Or, nous avons vu dans l'état de l'art que le relevé de métriques *in situ* est une tâche difficile et fastidieuse dans le milieu aquatique. Pour la simplifier, nous proposons une méthode qui permet d'enregistrer rapidement l'information analogique afin de reporter ultérieurement la phase de mesure en tant que telle. Nous présentons également les mires de vision que nous avons spécifiquement dessinées pour servir de points de contrôle sous-marins dans ce contexte.

#### Dimensionnement du système pour l'acquisition de données à l'échelle des individus

Pour pouvoir acquérir des données à l'échelle des individus et réaliser des mesures sur les nuages de points produits, nous devons prendre en compte un certain nombre de critères photogrammétriques et technologiques. Nous allons pour cela adapter notre méthodologie de Réalité Terrain Étendue (présentée au chapitre 2, section 2.2 page 33) au milieu sous-marin (voir figure 3.61 page 115).

La première question à poser est : *qu'observons-nous ?* Ou autrement dit en des termes plus pragmatiques, *quelle taille d'échantillon au sol ?* Si nous nous reportons au tableau des applications établi au début de la section 3.2 du chapitre 3 page 62, nous avons indiqué qu'il était intéressant de nous positionner sur des tailles d'objets centimétriques à décimétriques, car ces grandeurs étaient communes aux quatre thématiques les plus abordées dans la littérature (chantiers archéologiques, répartition des espèces, domaines benthiques et ouvrages d'art).

Pour que le lecteur puisse se faire une idée plus concrète, un objet d'intérêt peut être minéral (éboulis, rochers, galets, graviers, etc.), végétal (forêt, herbier, algue, herbe marine, etc.), animal (récif, banc, astérie, oursin, corail, anémone, pieuvre, poisson, etc.) ou encore manufacturé (épave, mur, coque agrès, conduit, céramique, etc.). Pour pouvoir identifier visuellement ces objets sur les images (voir section 2.2.2 page 41 du chapitre 2), nous aurons besoin d'une taille d'échantillon au sol comprise entre 0,6 mm pour les études les plus fines (dimensions des objets de quelques centimètres) et 25 mm pour les études à une échelle plus macroscopique (dimensions des objets de quelques dizaines de centimètres au minimum). Pour obtenir le dimensionnement des autres paramètres clés que nous allons détailler, nous avons utilisé les caractéristiques techniques représentatives des caméras légères présentées dans l'état de l'art.

Le choix de la taille de l'échantillon au sol ( $GSD_{mm}$ , section physique correspondant au côté d'un pixel) contraint la distance d'observation maximale ( $D_{mm}$ , communément appelée *altitude* en photogrammétrie aérienne) pour un capteur donné. Cette relation est exprimée par l'équation 3.2 où  $p_{mm}$  désigne la taille physique d'un pixel du capteur et  $f_{mm}$  sa longueur focale. En prenant en compte l'effet d'agrandissement provoqué par l'eau (voir chapitre 2, section 2.1.3, page 22), nous obtenons des distances entre 0,5 et 4 mètres pour les études détaillées et entre 10 et 15 mètres pour les études macroscopiques. Pour ce dernier cas, des distances plus élevées auraient pu être envisagées dans un contexte aérien, mais cela ne fait pas sens sous l'eau à cause de la limite de visibilité (section 2.1.4 du chapitre 2, page 25).

$$D_{mm} = \frac{GSD_{mm} \times f_{mm}}{p_{mm}} \quad (3.2)$$

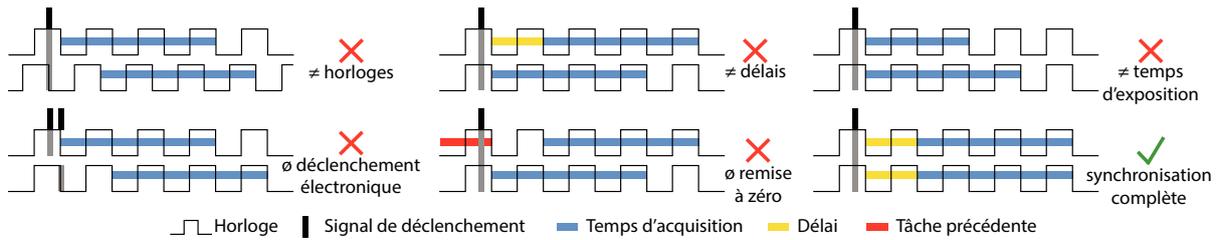
La distance d'observation va influencer un paramètre crucial pour la reconstruction tridimensionnelle : la granularité de la profondeur ( $Gz_{mm}$ , aussi connue sous le nom d'incertitude en profondeur) [Krig, 2014]. La granularité décrit la capacité du système à distinguer la profondeur d'un objet à une distance donnée. Pour une granularité de 4 mm par exemple, le système ne mesurera pas de différence pour des points situés entre 16 et 20 mm. Ces derniers seront ramenés à l'une ou l'autre extrémité du grain (16 ou 20 mm), ce qui donne une précision de mesure de  $\pm 2$  mm. L'équation 3.3 nous montre que la granularité est contrainte par la base ( $B_{mm}$ , distance physique qui sépare les centres optiques des acquisitions stéréoscopiques).

$$Gz_{mm} = GSD_{mm} \times \frac{D_{mm}}{B_{mm}} \quad (3.3)$$

Pour une taille d'échantillon au sol donnée (et donc pour une distance donnée), plus la base est grande, plus la granularité est fine. Cependant, agrandir la base a pour effet de réduire le recouvrement stéréoscopique ( $Rs_{prct}$ , la partie commune de la scène partagée par les images d'une paire stéréoscopique). Pour un système à double capteur, le recouvrement stéréoscopique et la base sont reliés par la largeur des images en pixel ( $W_{pix}$ ) et la taille de l'échantillon au sol (voir l'équation 3.4).

$$B_{mm} \leq (1 - Rs_{prct}) \times W_{pix} \times GSD_{mm} \quad (3.4)$$

Nous avons vu que le taux de recouvrement stéréoscopique sous-marin oscille en moyenne entre 60 % (0,6) – taux minimum recommandé en photogrammétrie aérienne, voir la section 3.1.3 du chapitre 3 page 59 – et 80 % (0,8) pour favoriser la reconstruction dense. Au regard de la taille de notre échantillon au sol, un recouvrement



**Figure 3.62** – Principaux paramètres impliqués dans le processus de synchronisation de deux caméras [© L. Avantbey et al.]. Seul le dernier cas peut être considéré comme une synchronisation complète : une horloge commune aux deux appareils, un signal de déclenchement électronique extérieur, un délai fixe entre la réception du signal et le démarrage physique de l'acquisition, la faculté de remise à zéro du capteur pour le libérer des actions engagées et commencer la nouvelle immédiatement et enfin, un temps d'acquisition fixe et commun aux deux capteurs.

de 80 % implique une base entre 5 et 30 cm pour les études les plus détaillées et de 1 m et plus pour les études macroscopiques. Ces configurations nous donnent accès à une granularité entre 1 et 50 mm pour les études fines et entre 125 et 250 mm pour les études macroscopiques. Si cette dernière est insuffisante par rapport aux besoins des thématiciens à l'origine de l'étude, il sera nécessaire de considérer une taille d'échantillon au sol plus petite.

Les considérations précédentes ne tiennent compte que des caractéristiques optiques du capteur. Or, sa composante électronique joue aussi un rôle important dans les choix de conception du système. Par exemple, le temps d'exposition ( $Exp_s$ ) désigne le temps nécessaire au capteur pour collecter suffisamment de photons et effectuer leur conversion en mesure numérique. Afin d'éviter la présence d'un flou de bougé sur les images acquises, le déplacement relatif de la scène observée vis-à-vis du capteur (mouvements des objets de la scène ajoutés aux mouvements du vecteur) ne doit pas excéder la taille de l'échantillon au sol pendant la durée de l'exposition. Autre exemple avec le temps de synchronisation ( $Synch_s$ ) qui désigne le temps qui sépare les prises de vue stéréoscopiques. Afin d'éviter la présence d'un flou de synchronisation, le déplacement relatif de la scène observée vis-à-vis du capteur ne doit pas, lui non plus, excéder la taille de l'échantillon au sol pendant le temps de synchronisation. La vitesse de déplacement relative ( $vr_{mm/s}$ ) doit donc être dynamiquement adaptée aux conditions *in situ* d'éclairage et de dynamisme (voir équation 3.5).

$$vr_{mm/s} \leq \frac{GSD_{mm}}{\max(Exp_s, Synch_s)} \quad (3.5)$$

En eau peu profonde, le temps d'exposition varie généralement autour de 3 ms. Il peut monter jusqu'à 70 ms lorsque l'éclairage est faible ou atteindre 1 ms dans de très bonnes conditions. Concernant le temps de synchronisation, à notre échelle d'observation, le dynamisme de la scène étudiée n'est pas négligeable et l'utilisation d'un capteur unique (paires stéréoscopiques temporelles) devient insuffisante, car sa fréquence maximale d'acquisition, contrainte par la base stéréoscopique, serait alors beaucoup trop basse. C'est pour cette raison que nous devons utiliser un système à deux capteurs. Le temps de synchronisation de ces systèmes se situe globalement entre 1 ms et 500 ms. En moyenne, nous nous retrouvons donc avec des vitesses de déplacement relatives entre 0,1 m/s pour les études détaillées et 2,5 m/s pour les études plus macroscopiques.

En pratique, obtenir une synchronisation suffisante et stable sur des capteurs légers peu onéreux est problématique. Les acquisitions simultanées (signal de déclenchement commun mécanique ou mieux, électronique) sont rarement suffisantes vis-à-vis du dynamisme des zones naturelles. Les paramètres qui permettent une vraie synchronisation (même début et même durée des acquisitions) sont gérés par les logiciels internes (*firmware*) des capteurs (voir figure 3.62 page 117) qui sont essentiellement propriétaires. Et l'interface de programmation (API – *Application Programming Interface*), lorsqu'elle existe, ne permet pas toujours l'accès à tous ces paramètres. Cette situation devrait évoluer dans un futur proche avec la démocratisation grandissante des *open firmwares*.

Pour des temps d'exposition et de synchronisation donnés, la variable d'ajustement vis-à-vis de la vitesse

Taille d'échantillon au sol	$GSD_{mm}$	0.6 mm	25 mm
Distance d'observation maximale	$D_{mm}$	500 à 4000 mm	10000 à >15000 mm
Base (pour un recouvrement de 80 %)	$B_{mm}$	50 à 300 mm	1000 à >2000 mm
Granularité	$Gz_{mm}$	1 à 50 mm	125 à 250 mm
Vitesse de déplacement	$vd_{mm/s}$	< 500 mm/s	< 2500 mm/s
Fréquence d'acquisition (pour un recouvrement de 50 %)	$F_{s-1}$	< 1 ips	< 15 ips
Fauchée	$F_{mm}$	500 à 4000 mm	>15000 mm
Temps de couverture (pour une zone de 1000 m <sup>2</sup> )	$T_s$	~ 1 à 10 h	~ 10-30 min

**Table 3.4** – Résumé des paramètres clés (dépendants du capteur) nécessaires pour dimensionner le système d'acquisition  
[© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.].

relative se trouve dans la vitesse de déplacement du vecteur. Pour cela, le vecteur et le capteur doivent pouvoir collaborer. Or nous avons vu dans l'état de l'art que les microsystèmes existants ne permettent pas ce niveau d'interaction. C'est l'une des raisons pour laquelle nous avons développé notre propre système robotique.

La vitesse moyenne de déplacement du vecteur permet d'estimer la fréquence minimum des acquisitions ( $F_{s-1}$ , nombre d'images par seconde) par rapport au taux de recouvrement nécessaire entre les couples stéréoscopiques ( $Rl_{prct}$ ) pour permettre le recalage des données à partir des images elles-mêmes, avec  $H_{pix}$  la résolution du capteur (voir équation 3.6). Nous avons vu dans l'état de l'art que ce taux de recouvrement temporel correspondait généralement à celui recommandé en photogrammétrie aérienne pour réaliser des mosaïques, c'est-à-dire 30 % minimum. Pour les tailles d'échantillon au sol qui nous intéressent, les fréquences les plus élevées sont donc aux alentours de 15 images par seconde et les plus faibles à moins d'une image par seconde.

$$F_{s-1} = \frac{vd_{mm/s}}{GSD_{mm} \times H_{pix} \times (1 - Rl_{prct})} \quad (3.6)$$

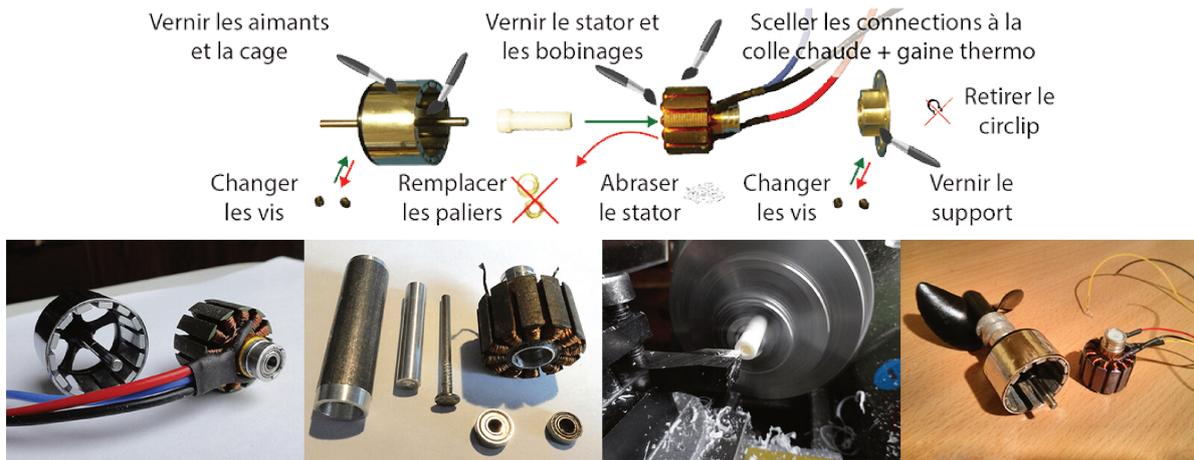
Associée à la fauchée ( $F_{mm}$ , largeur de l'empreinte au sol de l'image), la vitesse moyenne de déplacement du vecteur ( $vd_{mm/s}$ ) permet également d'estimer grossièrement le temps nécessaire pour couvrir une zone d'étude de longueur  $l_{mm}$  et de largeur  $L_{mm}$  (voir équation 3.7). Comme pour la fréquence, il faut prendre en compte dans ce calcul le taux de recouvrement entre les couples stéréoscopiques ( $Rl_{prct}$ ) : le recouvrement longitudinal (entre les couples successifs – *endlap*), mais aussi le recouvrement latéral (entre deux couples spatialement proches, mais temporellement éloignés – *sidelap*).

$$T_s \simeq l_{mm} \times \frac{\lceil \frac{L_{mm}}{F_{mm}} \rceil \times (1 + Rl_{prct})}{vd_{mm/s}} \quad (3.7)$$

L'équation 3.8 nous rappelle que la fauchée se calcule à partir de la taille de l'échantillon au sol et de la résolution en pixel du capteur ( $L_{pix}$ , nombre de colonnes). Pour les études détaillées, les fauchées sont comprises en moyenne entre 0,5 m et 4 m et sont d'environ 15 m à 50 m (en prenant en compte la limite de visibilité) pour les études plus macroscopiques. Il faut donc compter en moyenne entre une dizaine de minutes et une dizaine d'heures pour couvrir une zone de 1000 m<sup>2</sup> en fonction de la finesse de l'étude réalisée.

$$F_{mm} = GSD_{mm} \times L_{pix} \quad (3.8)$$

Le tableau 3.4 page 118 résume les paramètres clés théoriques qui vont permettre la création d'un système dédié à l'acquisition à l'échelle des individus.



**Figure 3.63** – Marinisation des moteurs brushless aériens [© L. Avantbey et al.]. En haut, le schéma illustrant la démarche à suivre pour mariniser un moteur brushless. Cette dernière implique notamment de changer le palier ainsi que les vis, de vernir les autres matériaux oxydables et de sceller à la colle chaude les connexions pour qu’elles puissent être immergées. En bas, de gauche à droite, illustration du procédé : moteur initial avec sa cage, moteur démonté et paliers ôtés à l’aide des trois petits outils posés à côté, usinage du palier en plastique à l’aide d’un tour de précision, moteur remonté, verni et scellé.

### Notre micro-système agile conçu pour l’acquisition stéréoscopique à la demande avec une logistique légère

Comme nous l’avons expliqué, le système d’acquisition doit pouvoir être utilisé par les thématiques. Pour cette raison, les critères d’agilité, de simplicité logistique et de répliquabilité jouent un rôle important dans les choix de conception. L’agilité opérationnelle d’un système et la complexité logistique qu’il implique pour son transport et son déploiement sur zone sont essentiellement liées à son dimensionnement (poids et taille). Quant à sa répliquabilité, critère important pour la flexibilité opérationnelle et la maintenance, elle dépend à la fois du coût et de la simplicité de la procédure de réalisation.

L’une des plus grandes contraintes sur le poids et la taille des robots sous-marins provient du système de propulsion (hélices, moteurs, contrôleurs et batteries). En effet, les moteurs les plus abordables disponibles sur le marché (comme les moteurs à courant continu de la marque Seabotix) ont des dimensions non négligeables ( $\gtrsim 20$  cm,  $\sim 700$  g) et nécessitent d’être alimentés par une batterie conséquente. Pour résoudre ce problème, nous avons adapté à l’environnement sous-marin les micromoteurs *brushless* (« sans balais ») efficaces que nous utilisons sur nos drones multiroteurs aériens [Gademer et al., 2010a,b]. Nous avons conservé les dimensions ( $< 5$  cm,  $\sim 50$  g) mais choisi un couple élevé (800 kV) pour une meilleure adéquation au milieu aquatique qui fournit une poussée de 690 g.

La méthode de marinisation que nous avons créée leur permet de tourner en totale immersion dans de l’eau salée [Avanthey et al., 2011]. Elle est illustrée par la figure 3.63 page 119 qui inclut les toutes dernières améliorations faisant suite à trois années d’expérimentation sur le terrain. Nous avons réalisé un banc de test pour évaluer nos résultats. Sans modification, un moteur tourne environ une centaine d’heures dans de l’eau douce avant de se gripper et à peine une dizaine d’heures dans de l’eau salée (concentration d’environ 40 g/L). En comparaison, un moteur modifié selon notre méthode ne montrait aucun signe d’usure après avoir tourné plus de 200 heures dans l’eau salée. En associant ce système de propulsion à la réduction en taille des composants électroniques, nous avons pu concevoir un robot de  $20 \times 20 \times 30$  cm pesant moins de 10 kg.

Du côté des capteurs, parmi les caméras légères correspondant aux paramètres que nous avons définis pour l’acquisition à l’échelle des individus (voir table 3.4 page 118) et à la taille du robot, nous avons sélectionné deux petits modèles complémentaires : les uEye et les GoPro. Une illustration de ces deux caméras ainsi que leurs caractéristiques sont disponibles à la figure 3.64 page 120.

Les uEye sont des caméras professionnelles peu onéreuses basées sur un capteur CMOS. Dans la littérature,



Caractéristiques	uEye 1241LE-C	GoPro HD2	GoPro H3+
Résolution (px)	1280 × 1024	3840 × 2880	3680 × 2760
Taille du pixel ( $\mu m$ )	5,30	1,60	1,46
Focale (mm)	8,0	2,5	2,8
Synchronisation (s)	0,003	0,500 / 0,030	
Datation (s)	0,001	1,000	
Fréquence (ips)	$\simeq 1,0$	$\simeq 0,5 / \simeq 2,0$	
Contrôle	<i>Ad hoc</i>	Auto / Hack	
Stockage	Ordinateur	SDHC	
Boîtier	Fait maison	Accessoire	
Taille (mm)	36 × 36 × 21	60 × 42 × 30	59 × 41 × 21
Poids (g)	16	100	74

Pour un GSD entre 0,6 et 25 mm		
Distance (mm)	1200 à >15000	1250 à >15000
Base (mm)	90 à 150	90 à 150
Granularité (mm)	5 à 1250	5 à 1200
Vitesse relative (m/s)	0,05 à 0,80	0,01 à 0,80
Fauchée (mm)	700 à 9000	2200 à 25000

Figure 3.64 – Choix des capteurs [© L. Avantbey et al.]. En haut à gauche, une caméra professionnelle, la uEye et le boîtier étanche que nous lui avons conçu ainsi que le châssis interne sur lequel elle est fixée. En bas à gauche, une caméra compacte grand public et son boîtier étanche du commerce, vu de face et de dos. À droite, les caractéristiques de ces capteurs.

elles ont été montées en banc stéréoscopique pour des applications de navigation autonome en quasi temps réel sur des drones aériens [Sanfourche et al., 2013] et ont été utilisées sur des robots sous-marins comme caméra embarquée pour le contrôle du vecteur [Walters et al., 2013]. Elles nécessitent un ordinateur afin de déclencher les acquisitions, récupérer les images et les sauvegarder. Nous avons conçu cette chaîne de contrôle de manière à optimiser l'utilisation des ressources (puissance, mémoire, etc.) qui sont limitées sur les ordinateurs embarqués (programmation parallèle). Tous les paramètres automatiques sont désactivés. Les délais et les durées (voir figure 3.62 page 117) sont fixés et les acquisitions sont déclenchées par un signal électronique produit par le vecteur. Le diagramme d'acquisition est donné à la figure 3.65 page 120.

En cours d'utilisation, le programme demande régulièrement (généralement toutes les cinq acquisitions, soit environ toutes les 5 secondes) au capteur de prendre une mesure afin d'ajuster le temps d'exposition aux changements fréquents de luminosité et de réflectance qui ont lieu en eau peu profonde. Cette valeur est transmise au vecteur pour qu'il puisse ajuster sa vitesse en conséquence et éviter le flou de bougé.

D'autre part, nous avons mesuré le temps de synchronisation pour les couples stéréoscopiques acquis avec cette chaîne en comparant sur les deux vues les valeurs d'un compteur digital (précis au millième de seconde).

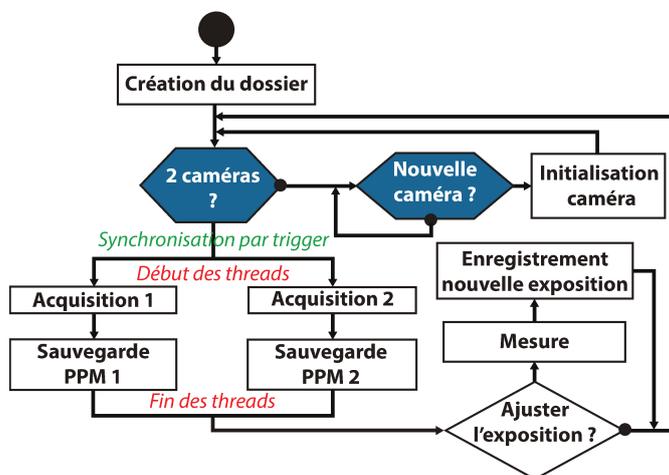
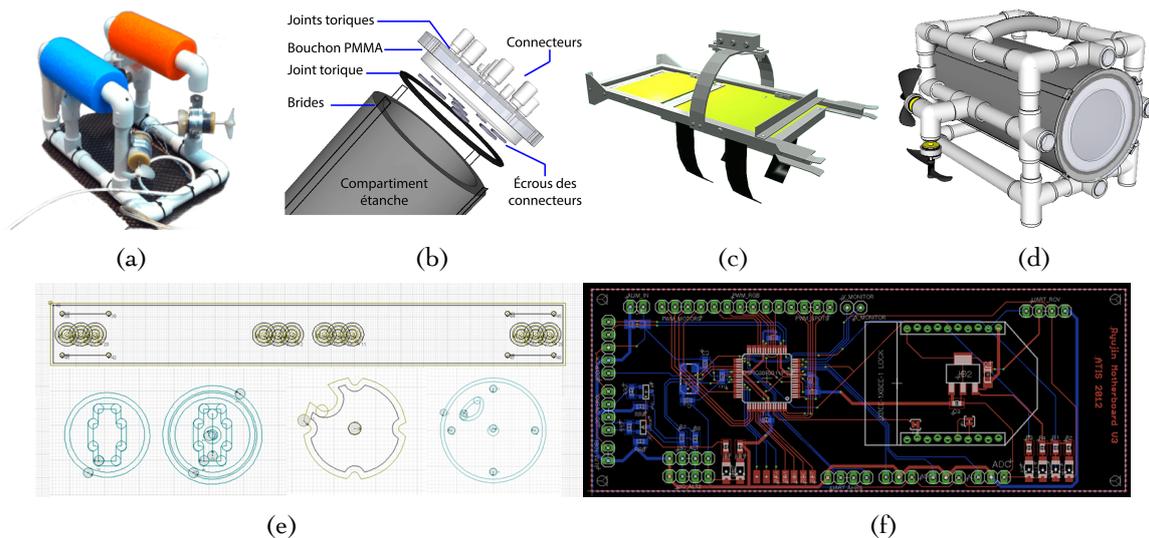


Figure 3.65 – diagramme de l'algorithme d'acquisition des couples d'images uEye [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.66** – Conception du robot sous-marin Ryujin [© L. Avantbey et al.]. De gauche à droite et de bas en haut : (a) le prototype du Seaperch que nous avons construit avec le kit du MIT et qui a inspiré la création de notre microrobot, (b) la vue tridimensionnelle éclatée de notre système d'étanchéité qui nous permet d'ajouter un compartiment étanche afin d'ajouter de l'intelligence, (c) le modèle tridimensionnel du châssis interne qui se glisse dans le tube et permet de fixer toute l'électronique, (d) le modèle tridimensionnel complet de notre robot avec le châssis extérieur qui supporte le compartiment étanche, (e) quelques exemples de nos dessins techniques pour l'usinage de pièces mécaniques à la machine à commande numérique, (f) un exemple de la conception sur ordinateur de nos circuits électroniques, ici notre carte mère.

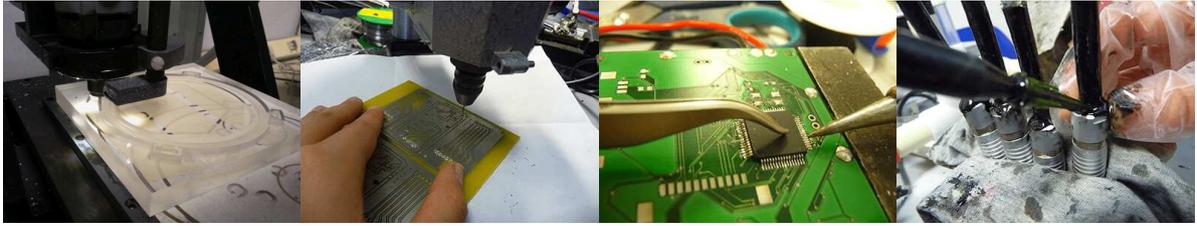
Nous obtenons un temps de synchronisation de trois millièmes de secondes, sans dérive dans le temps. Avec cette valeur et en considérant les temps d'exposition moyens, nous pouvons traiter des vitesses relatives inférieures à 0,8 m/s pour les études macroscopiques et inférieures à 0,05 m/s pour les études détaillées.

Non prévues pour une utilisation sous-marine, nous avons conçu leurs boîtiers étanches sur le même système que celui créé pour le sous-marin et que nous décrivons ultérieurement. Le châssis interne sur lequel se fixe la caméra permet d'ajuster la distance au hublot en fonction de l'optique choisie (pour minimiser les erreurs du modèle d'étalonnage) et bloque les translations et rotations pour que le capteur soit toujours positionné de la même manière.

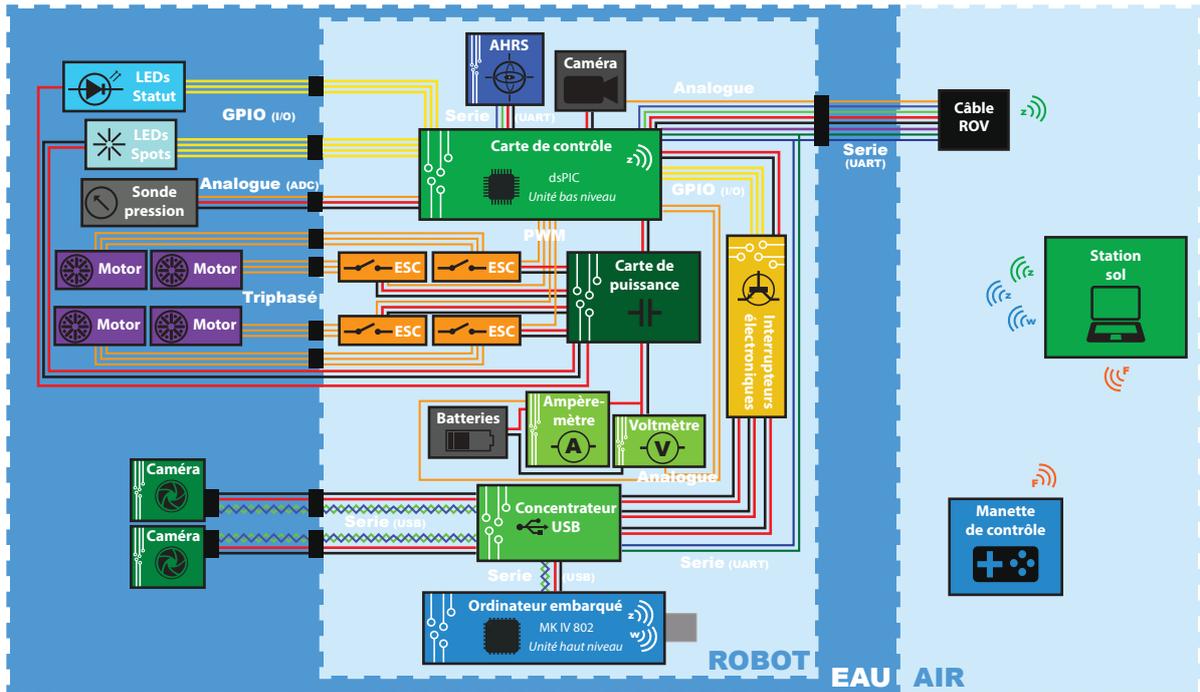
Le second modèle de capteur correspond à des caméras d'action populaires : les GoPro. Elles sont caractérisées par une bonne qualité d'images même en comparaison aux matériels professionnels [Gintert et al., 2012] et elles proposent un large choix d'accessoires dont notamment un boîtier étanche conforme (hublot plan, optique collée à ce dernier, caméra bloquée sur les différents degrés de liberté). Elles sont autonomes en énergie et enregistrent les images sur leur mémoire interne, mais elles ne sont pas conçues pour être intégralement configurées (certaines fonctions automatiques comme la balance des blancs, le temps d'exposition ou la sensibilité ne peuvent être fixés) ou facilement contrôlées par une plateforme robotique.

Nous avons mesuré le temps de synchronisation de la même manière qu'avec les uEye et nous obtenons une demi-seconde en mode intervallo-mètre et trois centièmes de secondes avec le câble de synchronisation, avec dans les deux cas une légère dérive dans le temps.

Concernant la simplicité de construction et la facilité de reproduction, le design de notre microrobot (voir figure 3.66 page 121) est inspiré par le projet pédagogique Seaperch mené par le MIT [Bohm et Jensen, 1997 ; Chryssostomidis, 2004]. Notre système d'étanchéité est à la fois simple et robuste, ce qui permet une ouverture ou une fermeture rapide du caisson n'importe où et sans outils. Notre compartiment étanche est composé d'un tube en PVC (*PolyVinyl Chloride*) à paroi large et de deux bouchons transparents usinés en PMMA (*PolyMethyl MethAcrylate*), maintenus par des brides et dont l'étanchéité est assurée par des joints toriques. Les éléments internes sont fixés sur un châssis usiné accroché au bouchon. Des connecteurs étanches installés sur ce dernier



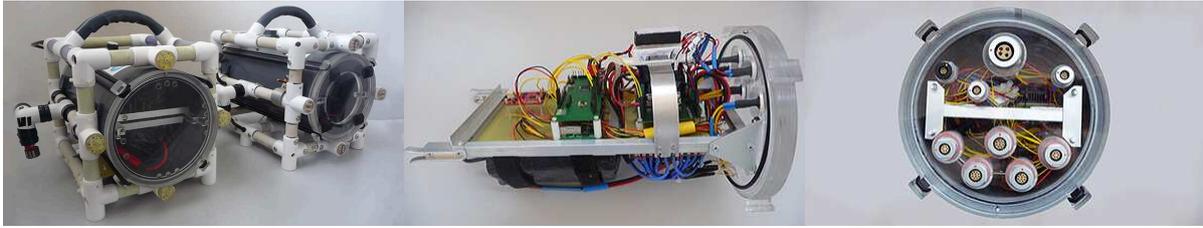
**Figure 3.67** – La réalisation du robot fait appel à de nombreuses compétences multidisciplinaires [© L. Avantbey et al.]. De gauche à droite sur cette illustration : usinage des pièces mécaniques avec une machine à commande numérique, prototypage des cartes électroniques à la chimie, soudure des cartes électroniques finales, scellage à la résine des connecteurs étanches.



**Figure 3.68** – Schéma système du robot sous-marin [© L. Avantbey et al.] qui contient un bloc étanche et plusieurs blocs immergés. Le câble ROV qui permet de faire le lien entre l'opérateur en surface et le robot peut être retiré pour réaliser une mission en autonomie ou arrimé sur un véhicule de surface pour augmenter le rayon d'action et faciliter la manœuvre.

leur permettent de communiquer avec les éléments immergés. Une grande partie de notre système est constituée d'éléments immergés pour favoriser la modularité (disposition, ajout ou retrait, etc.). Pour rendre ces éléments interchangeables, nous avons conçu une méthode de connexion étanche à partir de colle chaude et de gaine thermorétractable à la place de résine. Les éléments immergés sont fixés sur un châssis externe qui se remplit d'eau lors de la plongée et se vide en surface. Construit à partir de tubes et raccords en PVC, il se reconfigure facilement. La réalisation de toute cette structure ne requiert que des outils simples comme une machine à commande numérique (CNC – *Computer Numerical Control*), des scies ou des limes (voir figure 3.67 page 122).

Le schéma systémique de notre robot sous-marin est proposé à la figure 3.68 page 122. Pour une plus grande flexibilité, le vecteur est conçu comme un hybride : il peut être utilisé soit en mode ROV (filoguidé) soit en mode AUV (autonome) selon le type de mission. Afin d'assurer la systématisation des acquisitions, une partie des niveaux d'automatisation implémentés pour le mode AUV peuvent être utilisés pour assister le pilotage, comme le maintien de la consigne en cap ou en profondeur. Les tâches les plus critiques en contrôle et automatisation sont implémentées sur une architecture bas-niveau robuste et temps réel (microcontrôleur dsPIC) et les tâches haut-niveau, comme celles qui utilisent la vision par exemple, tournent sur un ordinateur embarqué (une clef multimédia MK802).



**Figure 3.69** – De gauche à droite [© ⓘ ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.] : deux prototypes du robot sous-marin réalisés, vue du châssis interne équipé et vue du bouchon arrière sur lequel sont fixés le châssis et les connecteurs étanches permettant la communication avec les blocs immergés.

Les tests expérimentaux de notre asservissement en profondeur donnent une précision subdécimétrique. Ces résultats sont suffisants pour maintenir la distance d'observation adéquate afin de garantir la taille d'échantillon au sol voulue sur une zone d'étude à faible dénivelé. Quant à la précision du contrôle de la vitesse absolue, possible grâce à la boucle de contrôle intégrée dans les moteurs *brushless*, elle est inférieure à 5 %. Cela permet d'éviter une bonne partie des flous de bougé et de synchronisation. Des automatisations plus avancées comme l'asservissement en altitude ou le contrôle de la vitesse relative peuvent être ajoutées si des conditions environnementales plus contraignantes (fort relief, fort courant, etc.) les rendent nécessaires. Le prototype final réalisé, Ryujin (« *Dragon des mers* »), que nous pouvons voir sur la figure 3.69 page 123 fait partie des premiers micro-robots hybrides construits. Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.5 page 124. Il a été testé une cinquantaine d'heures en fosse de plongée sur une période de trois ans (voir figure 3.70 page 124).

Pour faciliter le déroulement des missions filoguidées, nous avons conçu un petit véhicule de surface pour servir de plateforme relais. Conçu dans le même esprit que notre robot sous-marin, il est de type catamaran à moteurs. Le câble du sous-marin est accroché sur ce dernier qui le suit automatiquement depuis la surface dans ses déplacements grâce à une caméra. Pour ce faire, il est asservi en cap, en vitesse et en position sur cible. Il traite les données en provenance du sous-marin et les retransmet à l'opérateur sol. Le prototype réalisé, Kraken, est présenté sur la figure 3.71 page 124. Une seconde version, à la fois plus grande pour une meilleure stabilité en surface et moins encombrante pour le transport (flotteurs gonflables et châssis pliable) est en cours de test. Nous avons ajouté sur ce nouveau prototype un enrouleur de câble automatique pour faciliter l'opération sur zone du robot sous-marin. Des images des tests en piscine sont présentées sur la figure 3.72 page 124.

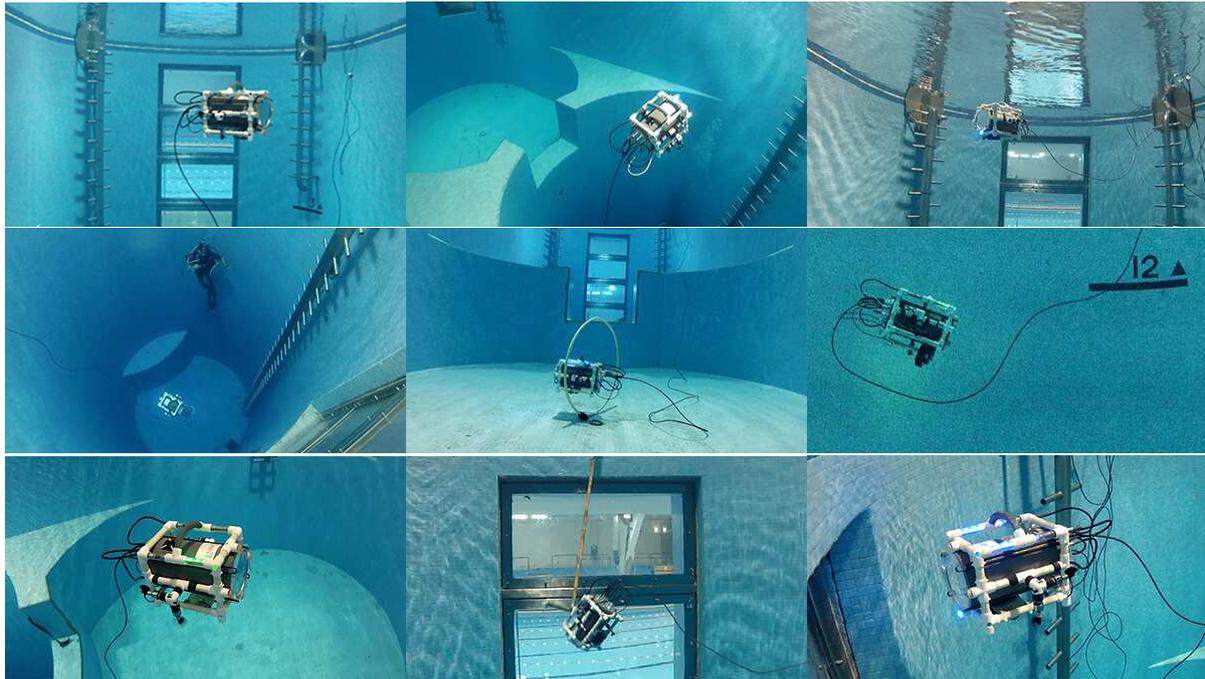
Nous avons conçu des supports pour monter les caméras en bancs stéréoscopiques. Ces derniers permettent d'ajuster la base entre 9 et 15 cm (pour rester dans les dimensions du vecteur) selon un pas centimétrique (voir figure 3.73 page 125). Les caméras ainsi fixées ne présentent pas de rotation ni de translation entre les différentes prises de vues). Les deux bancs, uEye et GoPro, sont montés simultanément sur le robot sous-marin. Leur complémentarité offre deux champs de vision différents et le réglage de deux bases différentes permet l'accès à deux niveaux de granularité en profondeur en un seul passage. Lorsque la profondeur de la zone d'étude est inférieure à cinq mètres, les bancs peuvent être montés sur le véhicule de surface qui effectue alors seul cette couverture. Les figures 3.74 page 125 et 3.75 page 125 montrent des images échantillons acquises par les deux bancs en piscine pour plusieurs tailles d'échantillon au sol.

### Nos simplifications sur la méthode de relevés terrain *in situ*

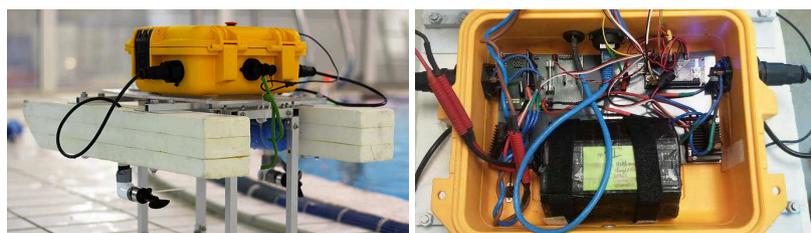
Nous avons vu que l'utilisation de marqueurs sur le terrain d'étude comme points de contrôle est une pratique courante en photogrammétrie comme en vision par ordinateur. Ces derniers permettent en effet d'estimer la précision du modèle tridimensionnel extrait en fournissant un repère visuel de référence dont l'échelle est connue grâce à des mesures physiques (distance, position, profondeur, etc.). Les marqueurs les plus couramment utilisés dans la littérature sous-marine, les règles étalons (alternance de bandes colorées représentatives d'une distance) et les étiquettes archéologiques (association de couleurs et de numéros), ne sont pas très adaptés pour être

<i>Ryujin</i>			
<b>Taille</b>	20×20×30 cm	<b>Profondeur maximale de travail</b>	100 m (testé jusqu'à 30 m)
<b>Poids</b>	9 kg	<b>Précision de l'asservissement profondeur</b>	~5 cm
<b>Autonomie</b>	~ 2 h	<b>Précision du contrôle de la vitesse absolue</b>	~5 %
<b>Coût</b>	~ 2000 €		

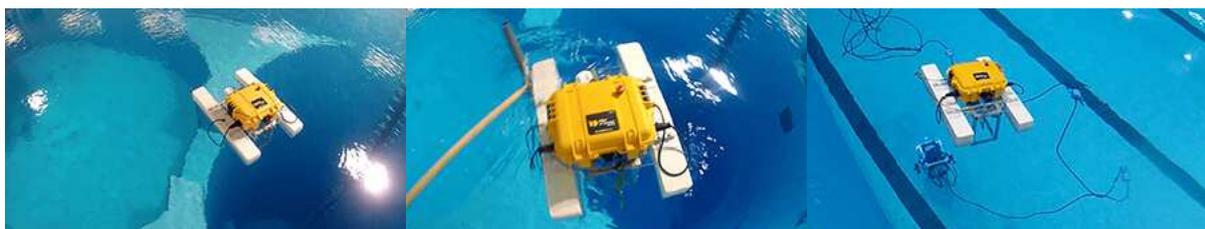
**Table 3.5** – Caractéristiques principales de notre microrobot hybride [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.70** – Ryujin en test dans la fosse de plongée de Charenton-le-Pont [© L. Avantbey et al.].



**Figure 3.71** – De gauche à droite, premier prototype construit de Kraken et vue sur l'intérieur de la valise étanche [© L. Avantbey et al.].



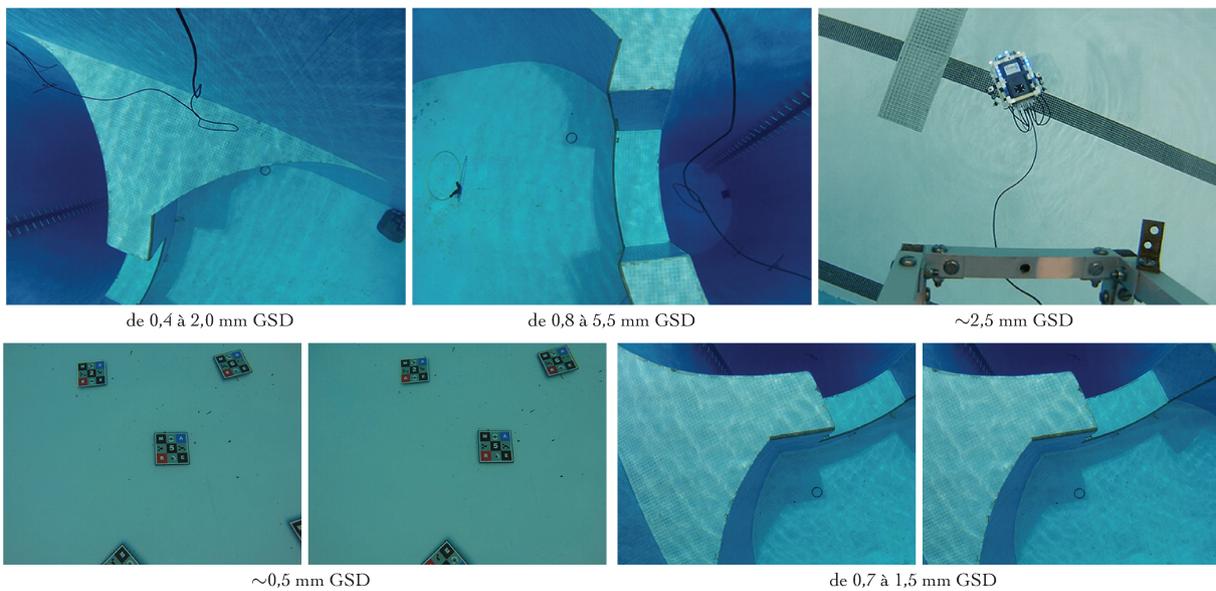
**Figure 3.72** – Kraken en test dans la fosse de plongée et la piscine de Charenton-le-Pont [© L. Avantbey et al.].



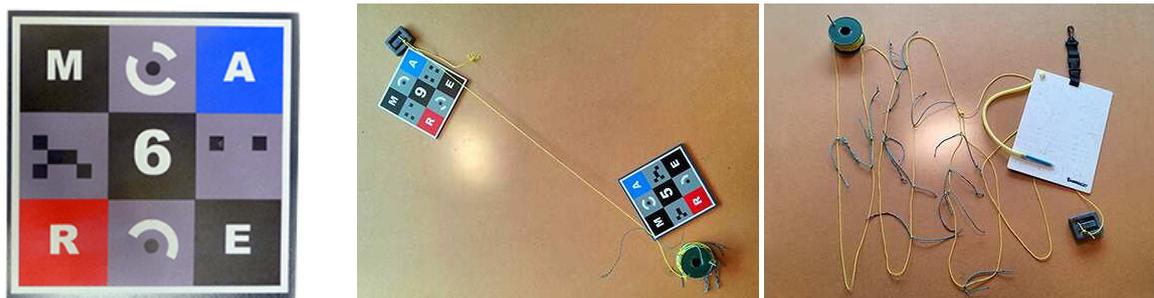
**Figure 3.73** – Conception des bancs stéréoscopiques [© L. Avantbey et al.]. À gauche, notre support stéréoscopique est composé d'une réglette rigide permettant l'ajustement de la base et la fixation sans invariance des caméras par deux points de fixations et un appui. Au centre, les deux bancs uEye (en haut) et GoPro (en bas). À droite, les bancs montés sous le robot.



**Figure 3.74** – Images échantillon prises en piscine avec le banc uEye [© L. Avantbey et al.]. En haut, des images issues de couples stéréoscopiques, en bas deux exemples complets de couples stéréoscopiques.



**Figure 3.75** – Images échantillon prises en piscine avec le banc GoPro [© L. Avantbey et al.]. En haut, des images issues de couples stéréoscopiques, en bas deux exemples complets de couples stéréoscopiques.



**Figure 3.76** – Méthodologie de relevés de métriques *in situ* pour contrôler les nuages de points extraits [© L. Avantbey et al.]. À gauche, exemplaire de l'un des marqueurs détectables, identifiables et orientables que nous avons conçus. Au centre, la distance entre deux marqueurs est enregistrée sous forme analogique : un nœud numéroté est ajouté sur la corde pour chaque distance mesurée et nous notons les lettres et numéros correspondant à la mesure, sur cet exemple « 9A-5M : 12 ». À droite, à l'issue des relevés, la corde contient la sauvegarde analogique de toutes les métriques réalisées (information brute), les distances peuvent alors être mesurées effectivement dans l'air; puis affectées au réseau de points de contrôle grâce à leurs références.

exploités par des algorithmes de vision par ordinateur. En effet, la répétition périodique du même schéma que présentent les règles étalons engendre de l'indécision dans un processus automatique. Ce problème n'a pas lieu avec les étiquettes archéologiques, mais leurs dimensions sont trop ponctuelles pour assurer une bonne détection.

Les marqueurs que nous avons conçus et dont nous pouvons voir un exemplaire sur la figure 3.76 page 126 sont un compromis entre ce qui se fait dans les travaux aériens en vision par ordinateur [Matthews, 2008] et le retour d'expérience sous-marin de Skarlatos et Rova [2010]. Ils mesurent  $20 \times 20$  cm pour être facilement détectés par les caméras. Les tuiles qui les composent font office de facteur d'échelle (équivalent des règles étalons). Chaque marqueur présente un schéma unique de cibles de vision par ordinateur, couleurs et numéro pour faciliter son identification et permettre de déterminer sa position spatiale.

Pour faciliter le relevé des métriques *in situ*, nous proposons de reporter la mesure effective en tant que telle à l'issue de la mission. Le plongeur dispose de brins numérotés selon un système inspiré du quipu inca (trait pour une unité, noeud pour cinq unités), d'une ardoise et d'une bobine de corde déroulante dont l'extrémité est reliée à un plomb. Il positionne ce dernier sur le coin d'un marqueur et déroule la corde jusqu'au coin d'un second marqueur à proximité. Il marque alors la distance en nouant l'un des brins sur la corde et note les références sur la tablette : numéro du brin, numéro pour le marqueur de départ et d'arrivée et lettres des coins correspondants (M, A, R ou E). Par exemple « 7R-4E : 2 » signifie que la distance entre le coin R du marqueur n°7 et le coin E du marqueur n°4 correspond à la mesure marquée par le brin n°2. Chaque marqueur doit être relié au minimum à trois autres marqueurs alentour. Lorsque le relief gêne l'opération, une tige dont la longueur est connue peut être utilisée pour surélever la mesure. La profondeur de chacun des marqueurs est mesurée avec un capteur et associée au numéro correspondant.

Les mesures peuvent ensuite être réalisées *a posteriori* sur la corde pour chaque brin puis reportées sur un schéma représentant le réseau de points de contrôle. Avec une telle méthode, nous pouvons envisager des erreurs sur les mesures d'environ 2 % de la distance (soit une justesse de  $\pm 8$  mm pour des marqueurs éloignés de 4 mètres), ce qui est comparable avec les résultats habituellement obtenus avec les mètres rubans [Holt, 2003]. L'un des intérêts de cette méthode est de limiter les erreurs dues aux conditions de plongée (froid, courant, visibilité, etc.). Dans la méthode classique, il faut lire la mesure avec précision sur l'instrument, puis la reporter et noter ses identifiants. Dans notre cas, nous avons juste à fixer le marqueur avec précision et seuls les identifiants sont notés. Les métriques sont ensuite réalisées dans des conditions plus confortables et donc avec une précision meilleure que sous l'eau. Si d'aventure les identifiants notés sont erronés, ils pourront être facilement corrigés grâce à la redondance des mesures. Autre avantage : il est possible de conserver une version analogique des mesures de la zone en coupant la corde dont la longueur totale n'excédera pas la plus grande distance mesurée et les métriques peuvent alors être vérifiées autant de fois que nécessaire.

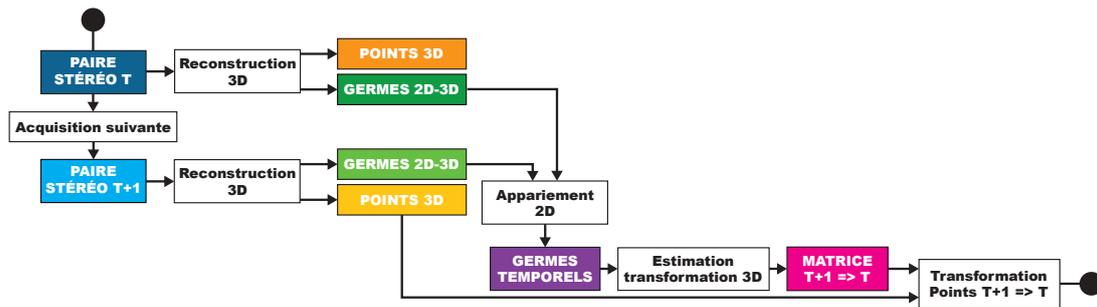


Figure 3.77 – Diagramme de l'algorithme d'estimation de la transformation affine entre deux couples stéréoscopiques consécutifs [© L. Avantbey et al.].

### 3.3.4 Problème de recalage des données

L'état de l'art correspondant à ce problème a été détaillé à la section 3.2.4 du chapitre 3 page 84.

Chaque nuage que nous créons à partir des paires stéréoscopiques (voir section 3.3.1 page 93) se situe dans son repère propre. En effet, leur origine correspond à la position de l'une des deux caméras du banc au moment de l'acquisition du couple d'images. Pour visualiser la reconstruction de la scène étudiée, nous devons fusionner tous ces nuages locaux en un nuage global cohérent. Cela implique de les replacer dans un repère commun (recalage des données) puis de décider de la pertinence de chaque information au sein du nuage global. Nous discuterons de la seconde partie dans la section « problème de redondance » (page 138).

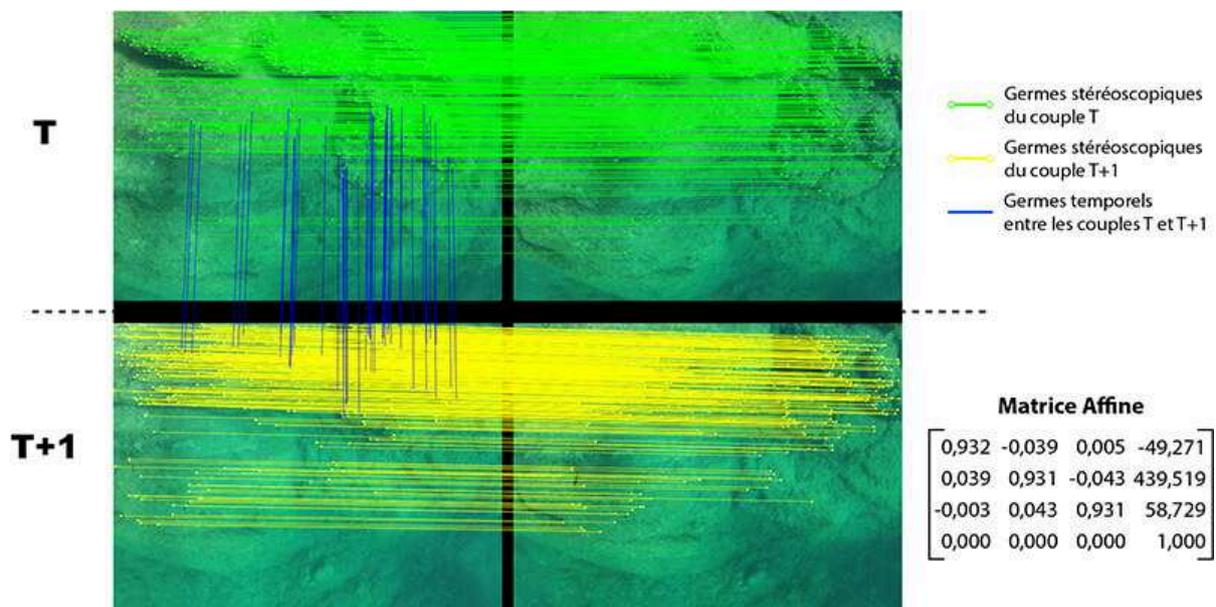
Parmi les méthodes de recalage proposées dans la littérature, nous avons choisi d'utiliser celles qui consistent à reconstruire la trajectoire en estimant les transformations successives appliquées au capteur entre chaque acquisition temporelle (techniques de la famille *Structure From Motion* – SFM). Cependant, nous avons vu que le cumul des transformations entraîne le cumul des erreurs, ce qui peut provoquer une dérive importante de la trajectoire estimée. La stratégie la plus courante pour minimiser cette dérive consiste à exploiter le fait que les trajectoires de couverture de zones repassent à proximité de zones déjà vues : on cherche alors des *fermetures de boucles* (correspondances entre deux vues non consécutives, mais spatialement proches) pour estimer une seconde transformation.

Dans l'état de l'art, nous avons distingué les approches par filtrage qui corrigent uniquement la position courante (par optimisation entre l'estimation temporelle et l'estimation spatiale) et les approches par lissage qui corrigent l'ensemble de la trajectoire passée (par optimisation sur l'ensemble des estimations temporelles et spatiales, majoritairement utilisées en post-traitement). L'algorithme de filtrage que nous proposons réalise des coupures sur le graphe des poses (nous rappelons que les poses désignent les positions et orientations du système d'acquisition lors des prises de vue) plutôt que des optimisations : il nous permet de réorganiser en quasi temps réel la trajectoire de manière à minimiser le nombre maximum de transformations cumulées. Nous utilisons par ailleurs une spatio-carte pour réduire la complexité algorithmique liée à la recherche de fermetures de boucle.

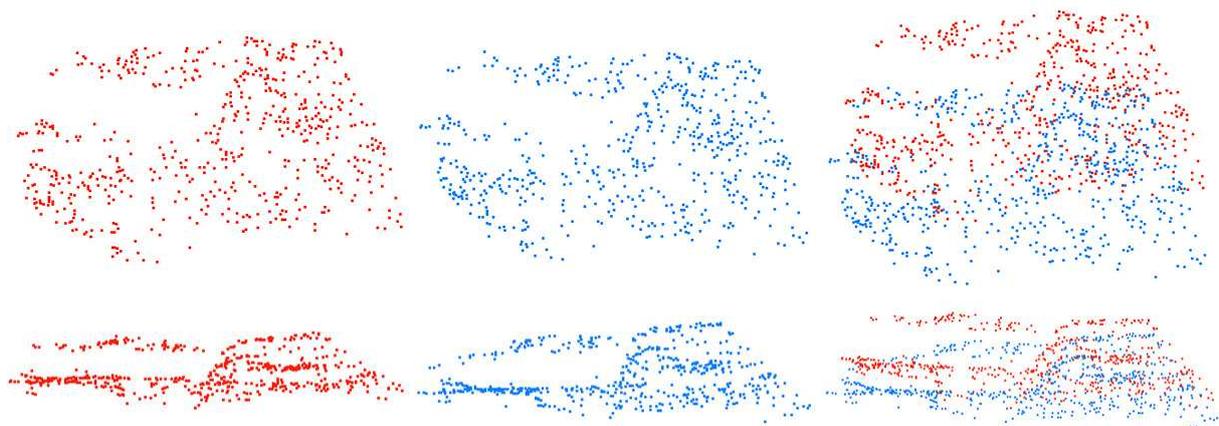
#### Estimations des transformations affines entre nuages locaux successifs grâce aux germes temporels

Dans l'espace tridimensionnel du monde réel, si nous ignorons les objets qui se déplacent, les transformations entre les différents points de vue sont affines et rigides (translations, rotations et leurs combinaisons). En utilisant les méthodes d'orientation absolue et les points des nuages tridimensionnels locaux, nous pouvons donc réduire l'estimation de la pose de la caméra à sept paramètres indépendants (similitude) au lieu de douze (transformation affine) ou quinze (transformation perspective) lorsque nous partons des images, et ce, tout en conservant les métriques. Le diagramme de notre algorithme de recalage de deux nuages est disponible à la figure 3.77 page 127.

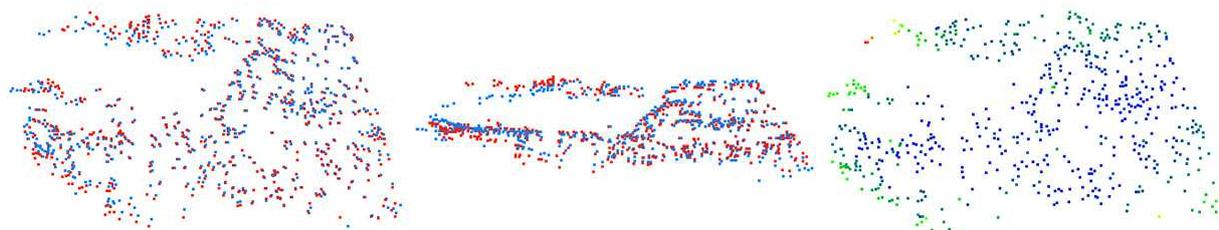
Les méthodes d'orientation absolue s'appuient sur la connaissance de correspondances entre les points tridimensionnels originaux et ceux ayant subi la transformation. La recherche de ces correspondances (denses ou



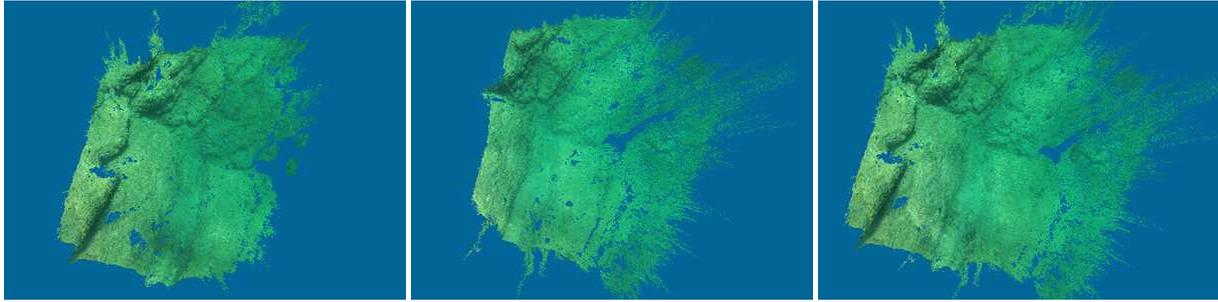
**Figure 3.78** – Estimation des transformations entre deux paires consécutives à partir des germes temporels [© L. Avanthey et al., Cap de Nice, août 2015]. Les germes stéréoscopiques sont appariés pour établir un sous-ensemble bijectif des deux nuages de points tridimensionnels formés ce qui permet d'estimer les translations, rotations et homothéties sous la forme d'une matrice affine. Le nombre de germes affichés sur cette illustration a volontairement été réduit pour en faciliter la compréhension.



**Figure 3.79** – Vues au nadir (en haut) et de profil (en bas) des deux nuages bijectifs correspondants à la reprojection des germes temporels (créés à la figure 3.78 page 128) dans leur couple stéréoscopique respectif [© L. Avanthey et al.]. Nous reconnaissons les mêmes reliefs sur le nuage épars T (à gauche, en rouge) et T+1 (au centre, en bleu) mais en les superposant (à droite), nous voyons bien apparaître le fait qu'ils ne sont pas exprimés dans un repère commun. La taille des points de ces nuages épars a été augmentée pour améliorer leur visualisation.



**Figure 3.80** – Recalage des deux nuages épars présentés à la figure précédente (3.79 page 128) [© L. Avanthey et al.]. Les vues au nadir et de profil des deux nuages T (bleu) et T+1 (rouge) sont présentées à gauche et au centre et la carte des erreurs de recalage est proposée à droite. Les couleurs les plus chaudes marquent les erreurs les plus prononcées. Nous les retrouvons essentiellement sur les bords, ce qui est directement lié à la qualité de l'étalonnage.



**Figure 3.81** – Vues dans leurs repères respectifs des deux nuages denses  $T$  (à gauche) et  $T+1$  (au centre) correspondants aux couples stéréoscopiques présentés à la figure 3.78 page 128 et vue des deux nuages recalés (à droite) dans le repère du premier nuage [© L. Avanthy et al.].

éparses) au sein des nuages locaux denses dont nous disposons serait coûteuse en temps de calcul (détection de points caractéristiques, appariement tridimensionnel, filtrage, etc.). C’est pourquoi nous allons réutiliser des informations que nous avons déjà calculées : les germes, qui ont été créés lors de l’appariement épars stéréoscopique (voir section 3.3.1 page 93) et qui représentent les zones les plus fiables (c’est-à-dire les plus texturées) des images. Nous allons donc combiner la technique « modèle à modèle » (M2M) d’estimation de la transformation avec une technique « image à image » (F2F) pour la mise en correspondance.

En réalisant un nouvel appariement épars sur deux jeux de germes stéréoscopiques issus de couples consécutifs, nous obtenons des germes temporels (voir figure 3.78 page 128). Le transfert de l’information de correspondance bidimensionnelle fournie par ces germes aux points tridimensionnels associés (obtenus par reprojction grâce aux coordonnées des germes, à leur disparité et aux paramètres d’étalonnage de la caméra) permet ensuite de finaliser la création d’un sous-échantillon bijectif des nuages de points locaux consécutifs. Nous pouvons observer un exemple de ces nuages épars sur la figure 3.79 page 128.

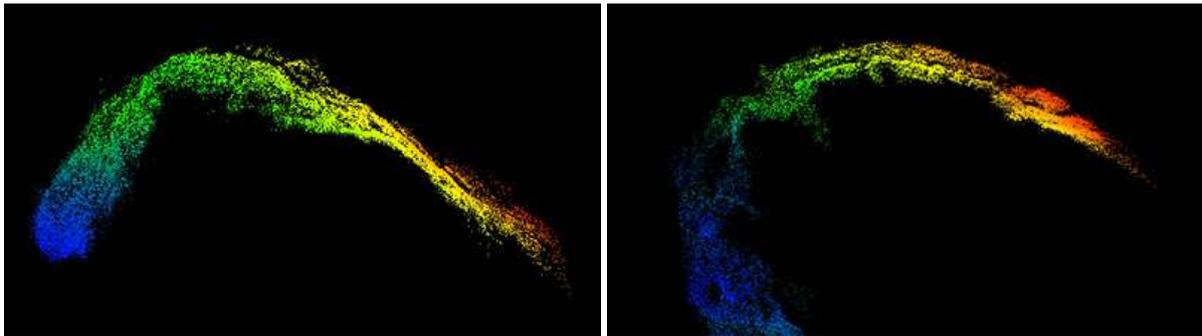
Nous utilisons ensuite l’algorithme d’Umeyama [1991] implémenté dans la bibliothèque `Eigen` pour calculer la matrice  $3 \times 4$  (ou bien  $4 \times 4$  si nous l’exprimons en coordonnées homogènes) qui lie les deux nuages épars bijectifs. La transformation estimée peut alors être appliquée à tous les points de l’un des deux nuages, épars ou dense, pour les replacer dans le repère du second, comme nous pouvons le voir sur les figures 3.80 page 128 et 3.81 page 129.

Grâce à la connaissance des correspondances, il est possible de mesurer les écarts entre les données éparses recalées pour calculer l’erreur moyenne systématique de la transformation estimée. Généralement évaluée aux moindres carrés (RMSE – *Root-Mean-Square Error*), nous avons déjà employé ce type d’erreur de reprojction sur les points de la mire pour évaluer l’estimation du modèle de caméra lors de l’étalonnage (voir section 3.3.2 page 104).

La figure 3.80 page 128 présente une carte de répartition des erreurs de reprojction (à droite) pour nos deux nuages épars d’exemple. Nous remarquons que les erreurs sont essentiellement localisées sur les bords de l’image, ce qui dénote une qualité moyenne de l’estimation des paramètres intrinsèques et de distorsions pour le capteur utilisé (voir le chapitre 4 page 143 à propos de l’étalonnage en mer).

En moyenne sur un jeu de test de plusieurs centaines de nuages, nous obtenons une erreur systématique planimétrique de l’ordre de quatre fois la taille de l’échantillon au sol ( $RMSE_{xy} \lesssim 4 \times GSD$ ) et l’erreur altimétrique est en moyenne de l’ordre de cinq fois la taille de l’échantillon au sol ( $RMSE_z \lesssim 5 \times GSD$ ). Ces erreurs sont évaluées sur un nombre moyen d’environ 300 points (intervalle de 100 à 1000 points).

Une fois les transformations successives estimées, elles sont combinées pour recalculer l’ensemble des nuages locaux dans un repère commun. La figure 3.82 page 130 présente deux exemples de recalage de séquences temporelles supérieures à 50 nuages.



**Figure 3.82** – Deux exemples de reconstruction temporelle éparse réalisés à partir de séries composées d’environ 70 nuages chacune [©ⓂⓃ L. Avantbey et al.]. L’acquisition s’est déroulée au Cap de Nice, au-dessus de la pointe d’une avancée rocheuse immergée. La scène du nuage de droite se situe un peu derrière celle représentée sur l’image de gauche, en remontant la pointe (les rochers y sont plus nombreux). La pointe est bordée par un chenal (à gauche, en bleu-vert) et une pente douce (à droite, en rouge-jaune).

### Spatiocarte et sélection des candidats pour les fermetures de boucle

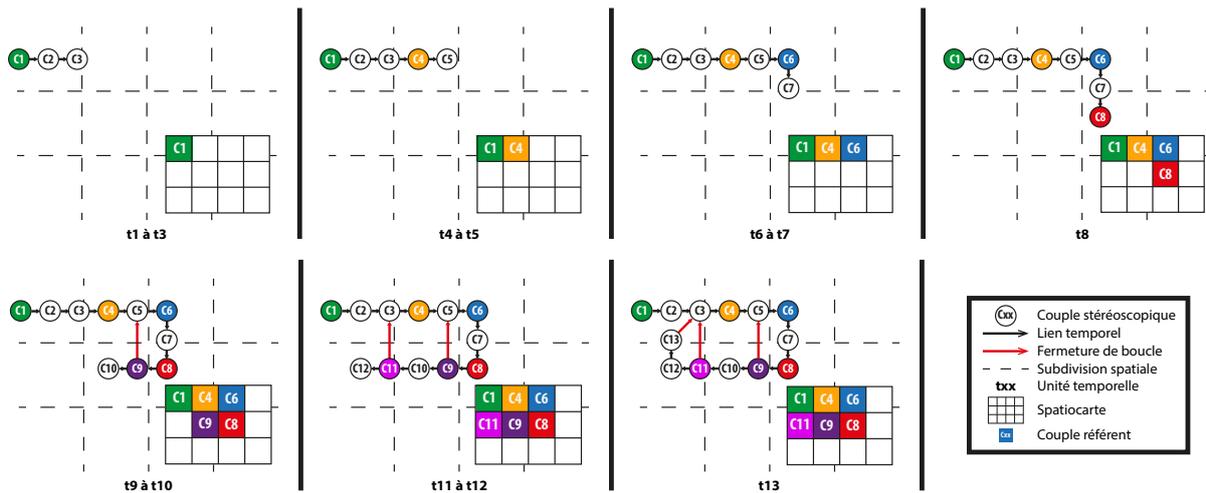
La trajectoire que nous obtenons grâce à la phase précédente consiste en une liste chaînée de transformations consécutives dont chaque nœud correspond à un couple stéréoscopique synchronisé et chaque arc représente la transformation pour passer d’un couple à l’autre. Dans l’objectif de minimiser la dérive qui s’amplifie à chaque nouveau nœud ajouté, nous cherchons à ajouter des arcs supplémentaires, appelés fermetures de boucle, à cette trajectoire.

La complexité de la détection des fermetures de boucle provient en partie de la difficulté à choisir avec pertinence des couples candidats parmi la grande quantité de données acquises. En effet, de nombreux couples ne possèdent aucun recouvrement avec le couple courant, quant à établir tous les liens avec ceux qui en ont reviendrait à de la reconstruction multivues. Pour traiter cette problématique, nous utilisons une spatiocarte qui subdivise la zone d’étude en unités spatiales élémentaires et enregistre la trajectoire. Nous ne chercherons alors à établir une fermeture de boucle que lorsque la trajectoire nous amène à changer de case. L’information de recouvrement potentiel fournie par le voisinage des cases permet de sélectionner un couple candidat pour une fermeture de boucle.

Le fonctionnement de notre spatiocarte est illustré à la figure 3.83 page 131. En fonction du type de trajectoire suivie, nous enregistrons la première acquisition en haut à gauche (radiateur, quadrillage, etc.) ou au centre de la carte (spirale, etc.). Il s’agit du couple de référence pour cette unité spatiale. Le calcul de la transformation qui sépare un nouveau couple du précédent, cumulé avec les transformations jusqu’au référent, permet de recalculer l’origine du nouveau repère dans celui du référent initial. Si la distance qui le sépare de la position de l’origine du couple référent dépasse la taille d’une unité spatiale, alors, nous déterminons de quel voisin relève la translation parmi les huit unités connexes. Nous distinguons ensuite deux cas de figure :

- Si l’unité spatiale ciblée est libre, nous y enregistrons le nouveau couple en référence. Nous considérons alors ses quatre voisins (nord, sud, est et ouest) qui donnent accès à du recouvrement avec les zones à proximité en excluant celui d’où nous venons : s’ils contiennent des référents (zones visitées), nous pourrions tester une fermeture de boucle avec le plus ancien de ces derniers.
- Si l’unité ciblée contient déjà un couple référent, il s’agit alors d’une revisite de la zone. Nous pouvons donc tester une fermeture de boucle avec le référent de l’unité.

Si le type de couverture utilisé revisite d’abord les zones les plus récentes (allers-retours comme pour les trajectoires en radiateur ou en quadrillage), la fermeture de boucle sera testée avec le dernier couple de l’unité spatiale liée au référent. À l’inverse, les trajectoires qui repassent à proximité des zones les plus anciennes en premier (comme les spirales) privilégieront un test directement avec le couple référent.



**Figure 3.83** – Décomposition du fonctionnement de la spatiocarte [© 2019 L. Avantbey et al.]. De gauche à droite et de haut en bas, la zone est divisée en unités spatiales. L'origine du repère de chaque couple stéréoscopique (chaque nuage) est ramenée dans le repère du premier couple et sa position dans le plan permet de définir l'unité spatiale dont il relève. Si cette case est libre, le couple y est enregistré comme référent. Dans le cas où elle contient déjà une référence où si elle se trouve à proximité (4 voisins) d'une autre case qui contient une référence, alors une fermeture de boucle peut être recherchée.

Avec cette manière de procéder, nous retrouvons l'idée de projection planaire de [Johnson-Roberson et al. \[2010\]](#) et l'idée des sous-cartes (*submaps*) proposée par [Pizarro et al. \[2004\]](#), sauf que dans notre cas, ce n'est pas un nombre de points qui ferme la sous-carte, mais une distance spatiale. La taille physique d'une unité définit la résolution de la carte. Elle se choisit par compromis : trop petite, le nombre de fermetures de boucle à réaliser serait très grand (coût élevé) et trop large, le taux de recouvrement ne serait plus suffisant pour trouver facilement des fermetures de boucle valides.

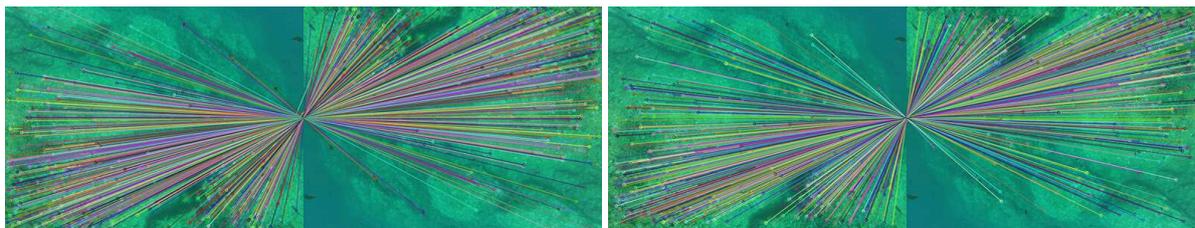
### Évaluation des fermetures de boucle et estimation des transformations spatiales

Pour former une fermeture de boucle, nous souhaitons reprendre le même principe qu'avec les germes temporels : appairer les germes stéréoscopiques des deux couples candidats pour former des germes spatiaux cette fois-ci et s'ils sont assez nombreux (autrement dit, si le recouvrement est suffisant), confirmer la fermeture de boucle et utiliser ces correspondances ainsi que les points tridimensionnels associés pour estimer la matrice de transformation spatiale.

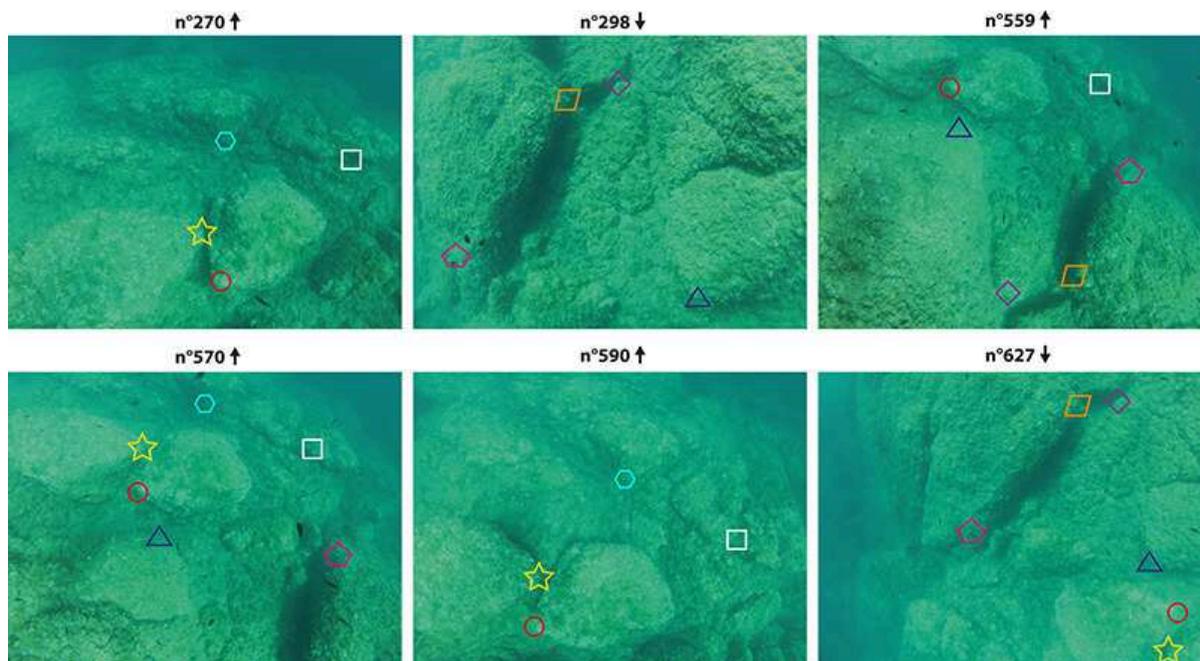
Cependant, nous avons vu dans l'état de l'art que les couples spatiaux diffèrent des couples temporels, notamment par le changement prononcé d'orientation des images qui les composent. Les caps du véhicule d'acquisition peuvent en effet être très différents entre les deux images :  $\simeq 180^\circ$  pour un aller-retour ou  $\pm 90^\circ$  pour un croisement, par exemple.

Or, les outils d'appariement que nous avons présentés à la section 3.3.1 page 93, c'est-à-dire notre descripteur de points basé sur la corrélation et notre filtrage statistique basé sur le flot de vecteurs local, ne sont pas adaptés à ce type de contraintes. Si nous prenons par exemple une image que nous retournons à  $180^\circ$  pour former une paire spatiale hypothétique avec l'image originale, notre algorithme ne donne effectivement aucun résultat. En revanche, comme attendu et illustré par la figure 3.84 page 132, l'utilisation de descripteurs et filtres robustes aux transformations est plus probante.

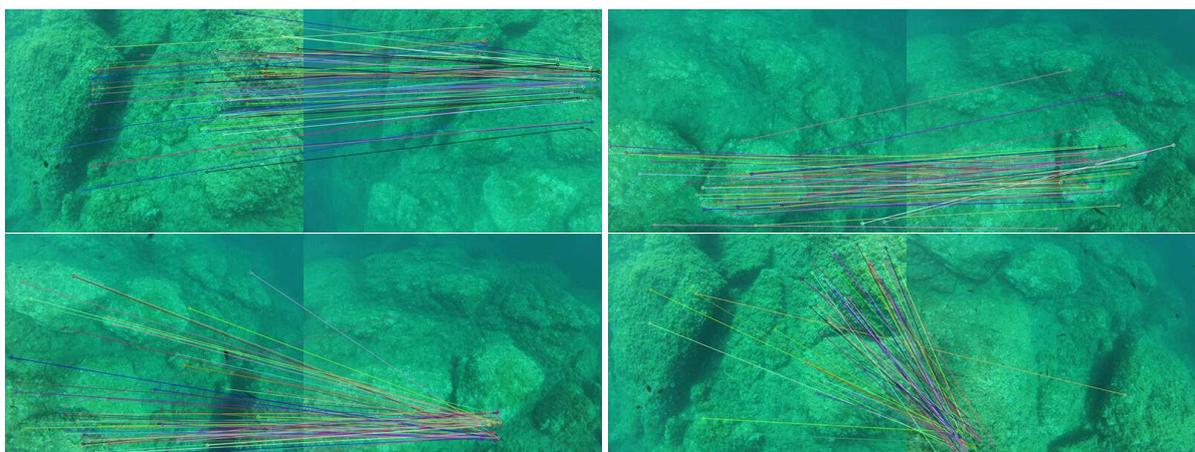
Mais nous avons noté dans l'état de l'art que les changements de points de vue entre deux images spatiales ne se résument pas à une simple rotation. Le problème est d'autant plus complexe que la distance d'observation est faible devant le relief de la scène, ce qui correspond tout à fait à notre problématique, comme nous le montre la figure 3.85 page 132. Nous subissons en effet de manière amplifiée les conséquences de la réflexion



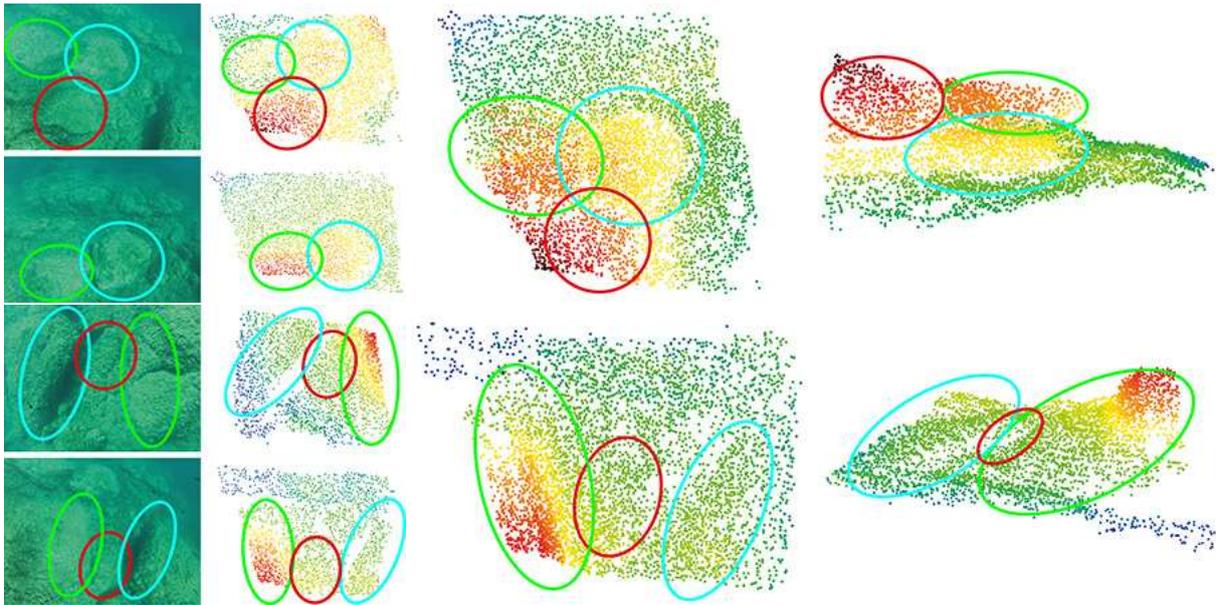
**Figure 3.84** – Si nous prenons une image que nous retournons à  $180^\circ$  pour former une paire spatiale hypothétique avec l'image originale, nous pouvons voir que les descripteurs robustes aux transformations comme SIFT (à gauche, algorithme implémenté dans la bibliothèque *OpenCV*) et SURF (à droite, algorithme implémenté dans la bibliothèque *OpenCV*) s'en sortent pour appairer les points (815 appariements pour SIFT, 556 pour SURF) [© L. Avantsbey et al.].



**Figure 3.85** – Illustration de la problématique d'appariement d'images spatiales pour établir des fermetures de boucle [© L. Avantsbey et al.]. Les orientations des points de vue sont très différentes, il en résulte donc un éclairage différent et par conséquent des ombres portées et des formes très différentes qui rendent la reconnaissance des amers complexe, et ce, même visuellement.



**Figure 3.86** – Exemples d'appariements avec le descripteur SIFT implémenté dans la bibliothèque *OpenCV* sur les échantillons d'images présentés à la figure 3.85 page 132 [© L. Avantsbey et al.]. Sur les couples du haut, l'appariement est plutôt réussi (71 points appariés sur le couple 298-627 à gauche et 61 sur le couple 590-270 à droite) malgré quelques erreurs, alors qu'en bas, l'appariement est complètement faussé (62 points appariés avec erreur sur le couple 570-270 à gauche et 69 sur le couple 298-559 à droite).



**Figure 3.87** – Deux exemples d’alignement par l’algorithme ICP [*Point Cloud Library (PCL)*] des deux nuages locaux produits à partir des couples d’images 570 et 270 (en haut) et des couples 298 et 559 (en bas) [© L. Avanthey et al.]. De gauche à droite : deux images successives extraites des couples, les nuages locaux vus au nadir en couleur d’échelle (relative à la caméra), les deux nuages recalés entre eux vus au nadir et vus de profil. Les cercles colorés soulignent des profils structurels remarquables pour mieux visualiser le recalage.

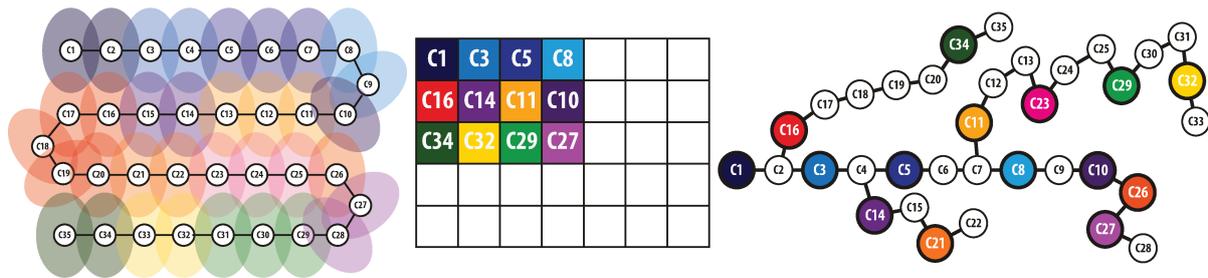
non lambertienne : un même objet observé depuis des points de vue spatialement proches renvoie une information très différente et influence la perception de la texture. Les formes et les ombres portées résultantes seront difficilement comparables, ce qui explique la complexité à établir des correspondances sur des couples spatiaux au ratio relief-distance élevé en se basant uniquement sur l’information image.

La figure 3.86 page 132 propose quelques exemples de mises en correspondance de nos images échantillons avec une implémentation du descripteur SIFT de la bibliothèque [OpenCV](#). Les deux premiers couples sont plutôt bien appariés malgré quelques erreurs non filtrées. Cela nous montre qu’il est donc possible pour une partie des images de nous appuyer sur la création de germes spatiaux, à condition d’adapter un nouveau descripteur sur nos points de Harris modifiés et de démontrer la fiabilité d’un filtrage approprié.

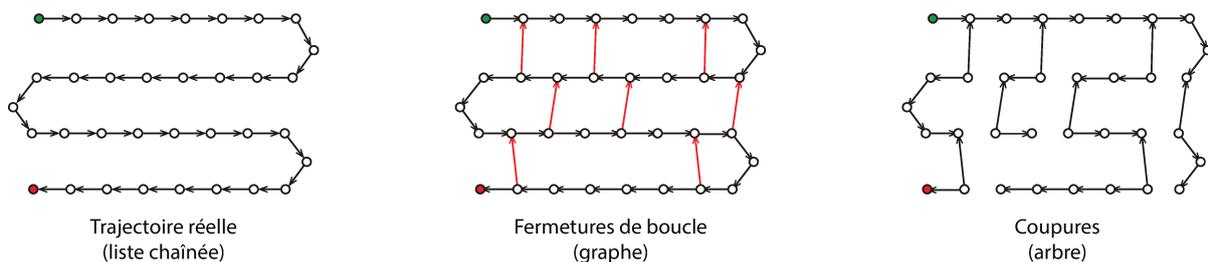
En revanche, les deux derniers couples de la figure 3.86 page 132 sont un échec complet : du fait que les algues couvrant les rochers présentent une texture ressemblante, les zones les plus texturées de chaque image ont été appariées entre elles alors qu’elles ne correspondent pas aux mêmes objets. Or l’apparition de ce type de couples spatiaux n’est pas improbable dans nos jeux d’images, d’autant que notre stratégie de carte spatiale ne garantit pas que l’image de référence utilisée pour la fermeture de boucle soit la plus favorable du lot pour être appariée avec l’image en cours d’étude. Dans le cas où l’appariement spatial échoue, nous pouvons procéder à un appariement structurel plutôt que textural.

Nous avons testé un algorithme de type ICP (*Iterative Closest Point*) implémenté dans la bibliothèque [Point Cloud Library \(PCL\)](#) [Rusu et Cousins, 2011]. La figure 3.87 page 133 montre le recalage réussi des deux couples pour lesquels l’estimation des germes spatiaux avait échoué. L’utilisation de cette technique est possible, car les deux nuages épars formés à partir des germes stéréoscopiques des couples spatiaux sont approximativement alignés du fait qu’ils ont été recalés temporellement (écarts liés uniquement aux erreurs cumulées).

Le principe de l’algorithme est le suivant. Les points du premier nuage sont respectivement associés aux points du second nuage se trouvant les plus proches d’eux et les correspondances arbitraires ainsi formées servent à estimer une transformation moyenne. Cette dernière est appliquée aux points de l’un des deux nuages puis le processus est réitéré de manière à minimiser l’erreur de reprojection.



**Figure 3.88** – Exemple de l'utilisation de la spatio-carte et du graphe de poses pour une trajectoire de type radiateur [© L. Avantbey et al.]. À gauche, les couples stéréoscopiques successifs ( $C_i$ ) et leurs empreintes au sol, dont les couleurs correspondent à la segmentation spatiale de la trajectoire. Au centre, la carte spatiale associée : lorsqu'un nouveau couple entre sur une case non visitée, on enregistre son identifiant. À droite, le graphe des poses. Les branches correspondant à une nouvelle case sont raccrochées à la branche présentant l'identifiant le plus antérieur parmi les quatre voisins. Si la case est déjà occupée, la branche est raccrochée à cet identifiant.



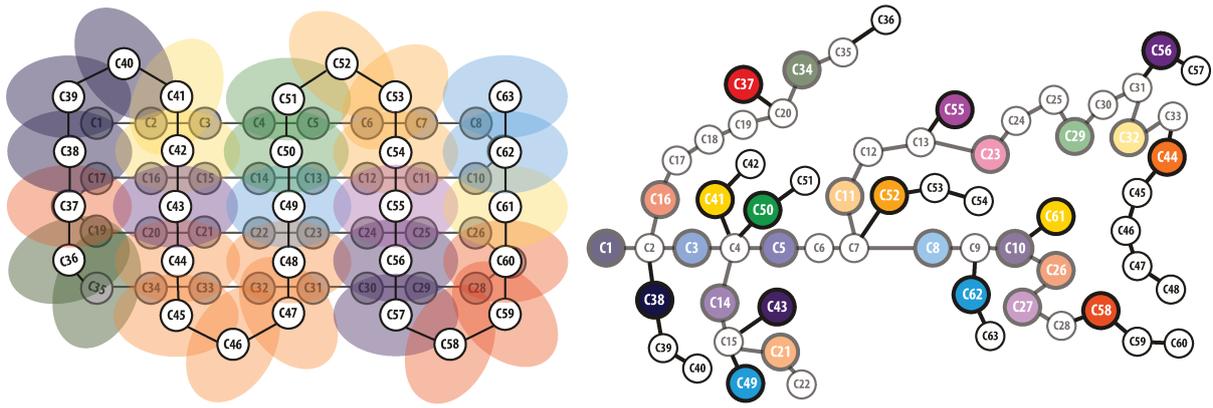
**Figure 3.89** – Si nous étudions le cas présenté à la figure 3.88 page 154 du point de vue de la trajectoire, nous pouvons voir que la réorganisation nous a permis de réduire le nombre initial de 54 transformations cumulées à un maximum de 17 ( $C1-C55$ ) grâce à 8 coupures de graphe effectuées à partir de 10 évaluations de fermetures de boucle [© L. Avantbey et al.]. Les graphiques proposés dans cette figure sont des représentations cumulées des états dans le temps, alors qu'en réalité les détections de fermetures de boucle et les coupures associées s'effectuent au fur et à mesure des nouvelles acquisitions.

Dans notre cas de figure, il est nécessaire d'appliquer un recalage partiel, c'est-à-dire, sur une portion seulement des nuages qui correspond à la zone de recouvrement. De cette manière, au lieu d'essayer d'associer systématiquement tous les points, si aucun point du second nuage ne se trouve dans un rayon donné autour du point en cours d'étude, alors ce dernier peut être ignoré et exclu du modèle. Il serait par ailleurs intéressant d'établir un autre critère de qualité pour évaluer le recalage spatial structurel effectué et pouvoir le valider. En effet, du fait que les correspondances ne sont pas véritables, l'erreur de reprojection fournie par l'algorithme est un indicateur faible. Une approche basée sur la distance d'un nuage à une surface serait peut-être plus pertinente.

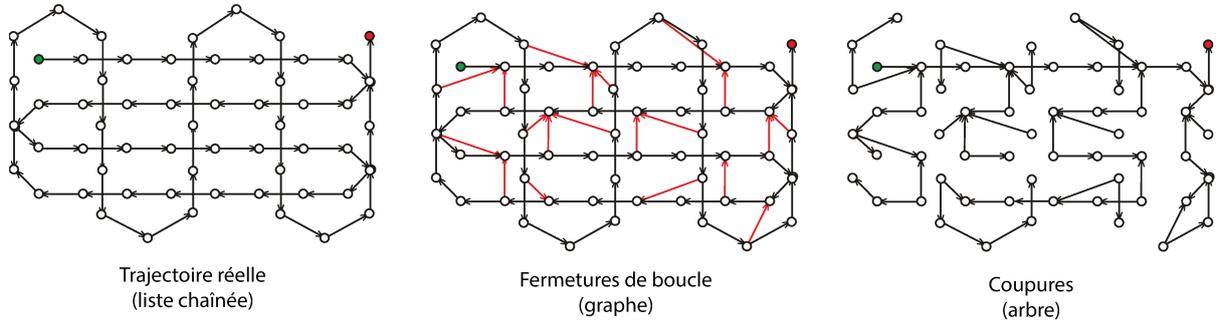
### Minimisation de la dérive par coupures du graphe des poses

L'ajout des fermetures de boucle transforme la liste chaînée de la trajectoire en graphe. À ce stade, plutôt que d'optimiser les positions de chaque nœud à partir de la multiplicité des informations (temporelles et spatiales) comme le font les algorithmes de filtrage de la littérature, nous exploitons ces nouveaux arcs pour réaliser des coupures dans le graphe. Notre stratégie consiste en effet à abandonner les arcs temporels au profit de ces arcs spatiaux. Les nouvelles branches sont donc déplacées et nous éliminons de cette manière toutes les transformations qui ont eu lieu entre le nœud courant et celui de la fermeture de boucle. En minimisant ainsi le nombre maximum de transformations successives de la trajectoire, nous limitons la propagation globale des erreurs.

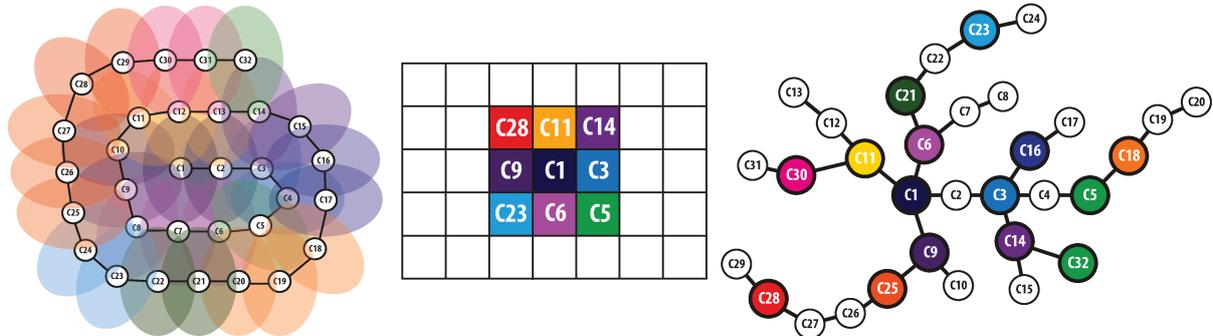
Le lecteur trouvera une illustration de ce procédé sur la trajectoire de type radiateur à la figure 3.88 page 134. La figure 3.89 page 134, quant à elle, montre que les coupures réalisées ont pour effet de réorganiser le graphe de la trajectoire en un arbre et qu'elles le maintiennent sous cette forme après chaque nouvel ajout d'une fermeture de boucle. Les mêmes illustrations sont proposées pour les trajectoires de type quadrillage sur les figures 3.90 page 135 et 3.91 page 135 ainsi que pour les trajectoires en spirale sur les figures 3.92 page 135 et 3.93 page 135.



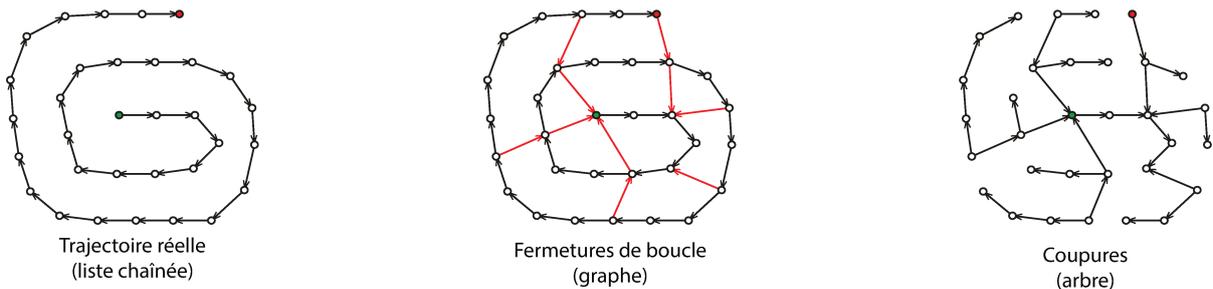
**Figure 3.90** – Exemple de l'utilisation de la spatiocarte et du graphe de poses pour une trajectoire de type quadrillage [©ⓈⓉ]. L. Avantbey et al.]. Comme il s'agit d'une variante de la trajectoire radiateur, nous ne revenons pas sur la première partie qui est grisée. À gauche, les couples successifs ( $C_i$ ) et leurs empreintes au sol, dont les couleurs correspondent à la segmentation spatiale de la trajectoire. La spatiocarte est identique à celle de la trajectoire radiateur, car il n'y a pas de nouvelle zone couverte. À droite, le graphe des poses mis à jour.



**Figure 3.91** – En analysant le cas présenté à la figure 5.90 page 155, nous observons qu'en réorganisant la trajectoire nous réduisons le nombre initial de 62 transformations cumulées à un maximum de 22 ( $C1-C48$ ) grâce à 21 coupures de graphe effectuées à partir de 25 évaluations de fermetures de boucle [©ⓈⓉ] L. Avantbey et al.].



**Figure 3.92** – Exemple de l'utilisation de la spatiocarte et du graphe de poses pour une trajectoire de type spirale [©ⓈⓉ]. L. Avantbey et al.]. À gauche : la trajectoire, les couples et leurs empreintes au sol colorés selon la segmentation spatiale. Au centre : la spatiocarte. À droite : le graphe des poses associé.



**Figure 3.93** – En étudiant le cas présenté à la figure 5.92 page 155, nous remarquons que nous avons pu réduire le nombre initial de 51 transformations cumulées à un maximum de 7 ( $C1-C20$ ) grâce à 10 coupures de graphe effectuées à partir de 12 évaluations de fermetures de boucle [©ⓈⓉ] L. Avantbey et al.].

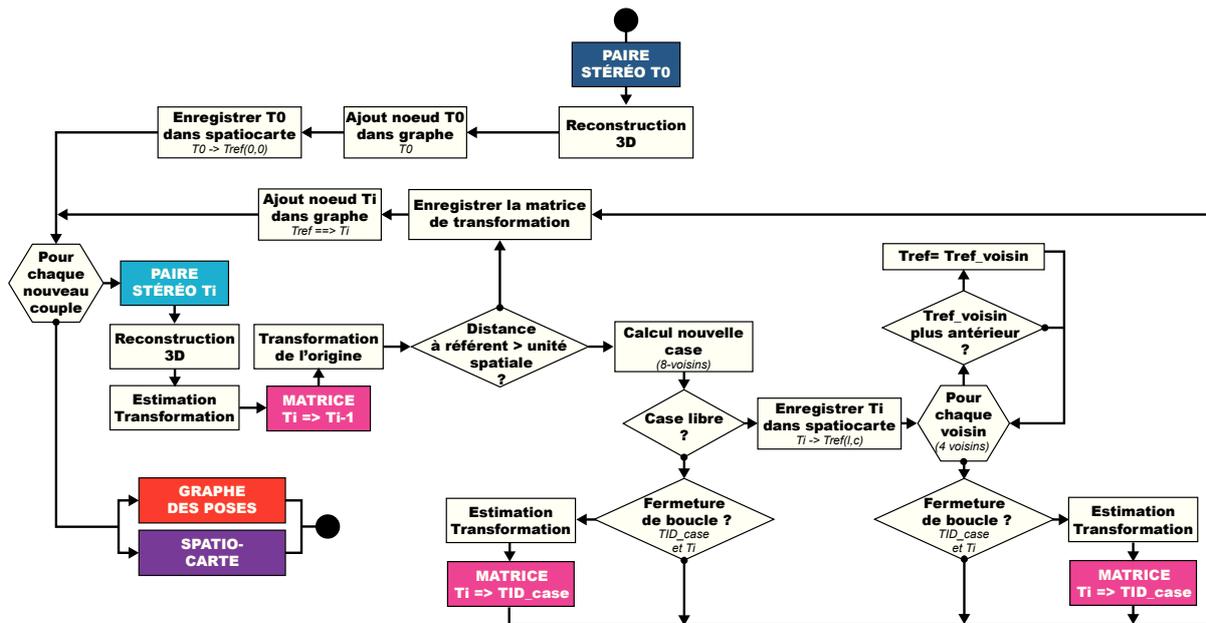


Figure 3.94 – Diagramme de l'algorithme de recalage avec spatiocarte et réorganisation de la trajectoire par coupures du graphe des poses [© L. Avantbey et al.].

Avec cette stratégie, nous pouvons envisager de réduire par un facteur deux à quatre le nombre total de transformations cumulées. Ce résultat est bien évidemment dépendant de la taille unitaire de la spatiocarte, du nombre de fermetures de boucle réussies et du type de trajectoire utilisé. En effet, toutes les trajectoires ne possèdent pas le même rendement. Nous constaterons par exemple que celle en spirale est particulièrement intéressante. Sa propriété de couverture à fort recouvrement immédiat avait déjà été remarquée dans le cadre du mosaïquage sous-marin par les travaux de Gintert *et al.* [2012] (« mosaïques-minute »). Nous rappelons cependant que le choix de la trajectoire de couverture reste aussi contraint par la configuration de la zone d'étude et dépend des capacités motrices du vecteur d'acquisition (voir section 3.3.3 page 115).

Par ailleurs, nous soulevons le fait que dans les exemples que nous avons présentés, nous conservons systématiquement le nœud de départ comme racine de l'arbre planaire de la trajectoire. Or, ce comportement n'est pas forcément le plus efficace pour minimiser le nombre de transformations cumulées. En effet, il pourrait être intéressant de s'inspirer des algorithmes de rééquilibrage d'arbre pour changer de nœud racine en fonction des transformations apportées à la trajectoire de manière à maintenir un certain critère d'équilibre. Toutefois, une telle manipulation entraînerait la perte de la faculté de recalage en quasi temps réel qui représente l'avantage des algorithmes de filtrage, car les changements réguliers occasionnés par la permutation de racine se répercuteraient sur des positions passées qui seront alors à recalculer.

Le diagramme complet de notre algorithme de recalage est proposé à la figure 3.94 page 136. Pour finaliser le processus de formation d'un nuage unique et dense représentant globalement la scène étudiée, les points des nuages denses locaux sont transformés successivement grâce à la lecture du graphe des poses puis agrégés.

Ces données de poses relatives issues uniquement de l'analyse des images peuvent être utilisées par le vecteur pour améliorer sa connaissance de sa position, par exemple en les fusionnant avec les données produites par d'autres capteurs.

### Discussion à propos du recalage et des mouvements

Rappelons-nous que nous avons proposé pour la reconstruction tridimensionnelle dense locale l'utilisation de la synchronisation pour nous abstraire des mouvements du milieu (voir les sections 3.3.1 page 93 et 3.3.3 page 115). Nous remarquerons que cette technique est valable uniquement pour la construction des nuages

locaux : le même problème se repose dès lors que nous essayons de les rassembler. En effet, ces derniers ont été pris à des instants différents et les éléments qu'ils contiennent (faune ou flore) ont potentiellement bougé entre les deux acquisitions temporelles.

En ce qui concerne les objets qui se déplacent relativement rapidement, comme les poissons, le problème est complexe et nous risquons inévitablement de les cartographier plusieurs fois en observation nadirale. Parallèlement pour les objets comme les herbiers, le problème principal vient du fait que, sur les portions en bonne santé, l'ensemble des éléments du champ de vision sont en mouvement : il n'y a aucun amer. Pour y remédier et permettre le recalage, outre la fusion de données avec des informations en provenance des différents capteurs de navigation, nous pouvons déposer des points d'ancrage (voir la section 3.3.3 page 115 à propos des mires de marquage) selon un maillage serré (deux à trois repères visibles par couples stéréoscopiques). Si nous souhaitons garder l'appariement temporel par points caractéristiques avec une telle configuration, il serait judicieux d'utiliser des mires aux textures plus discriminantes que celles que nous avons présentées. Autrement, pour éviter la confusion, il faudrait recourir à un appariement s'appuyant sur les cibles de vision par ordinateur qu'elles contiennent. En paramétrant ensuite l'algorithme de gestion de redondance (voir section 3.3.5 page 138) pour effectuer une décimation plus drastique des zones de recouvrement et en augmentant le nombre de fermetures de boucle à évaluer, nous pouvons envisager l'obtention d'un assemblage de tuiles nettes aux frontières floues.

Cependant, en fonction des caractéristiques physiques de la zone d'étude, il est plus ou moins compliqué de mettre en place les mires de marquage. En accroissant leur quantité, nous renforçons donc la complexité de cette tâche. D'un point de vue opérationnel, il serait alors pertinent d'utiliser des mires « mobiles » intelligentes, c'est-à-dire des mires qui restent fixes pendant l'acquisition des images de la zone puis qui se déplacent pour se positionner ailleurs sur le terrain quand nous sommes assurés de ne plus revenir à cet endroit. Les petits robots que nous avons développés sont tout à fait adaptés à ce genre d'utilisation. Dans ce contexte de flottille robotisée, les travaux de [Jaulin \[2006\]](#) sur la localisation par analyse d'intervalles [[Desrochers et Jaulin, 2016](#); [Brefort et al., 2015](#); [Bethencourt et Jaulin, 2013](#); [Sliwka et al., 2011](#), ...] prennent un intérêt tout particulier. Nous remarquerons que ce même système de mires mobiles peut-être déployé pour la cartographie de zones homogènes.

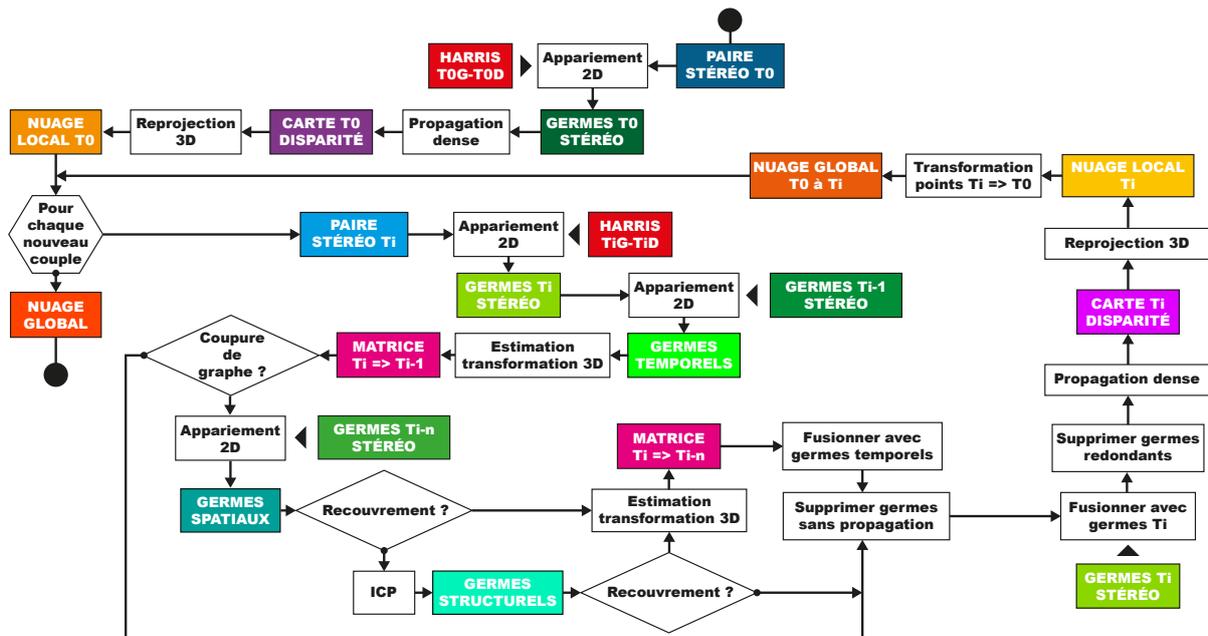


Figure 3.95 – Diagramme de notre algorithme de gestion de la redondance par identification des zones de recouvrement grâce aux germes interconnectés pour procéder à la fusion des nuages locaux recalés [© L. Avanthey et al.,].

### 3.3.5 Problème de redondance des données

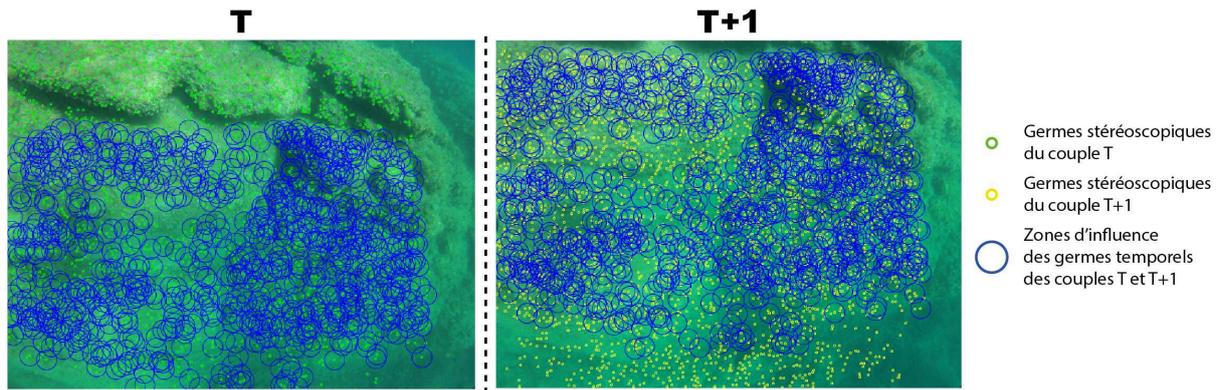
L'état de l'art correspondant à ce problème a été détaillé à la section 3.2.5 du chapitre 3 page 90.

Nous avons vu à la section précédente (3.3.4 page 127) comment recalculer les différents nuages locaux dans un repère commun. La fusion de toutes ces informations au sein d'un nuage global pose de nombreux problèmes. Nous nous intéresserons ici principalement au critère de redondance des informations : les couples acquis présentent un taux de recouvrement très élevé et un même point réel apparaîtra dans plusieurs de nos nuages locaux. Si nous ne filtrons pas cette information redondante, nous allons alourdir inutilement le nuage global (nous parlons ici de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de milliers de points). Mais la présence de bruit dans les mesures complexifie la distinction entre les doublons et les autres points réels qui se trouvent à proximité.

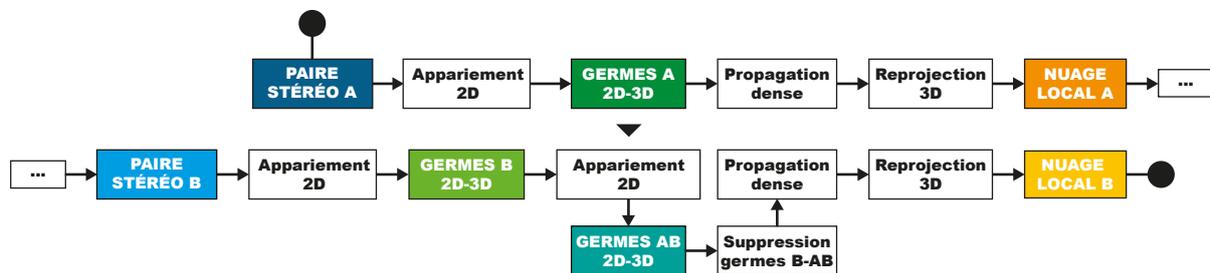
Dans l'état de l'art, nous avons remarqué que le problème de redondance en reconstruction épars n'entraîne qu'une faible conséquence sur le nuage global, car les quantités de points traitées ne sont pas très élevées. Il est de plus relativement trivial à traiter du fait que tous les points des nuages locaux consécutifs ont été appariés entre eux sur les images : il suffit alors de choisir le meilleur candidat représentatif et de supprimer les autres doublons identifiés. La quantité de données dans le nuage global dépend alors de la résolution choisie, c'est-à-dire du nombre de points épars dans chaque nuage local.

Dans notre cas, nous travaillons avec des données denses. Les chaînes de reconstruction locale basées sur la stéréoscopie temporelle peuvent reprendre le même principe que la reconstruction épars pour supprimer une grande partie des points redondants : l'appariement dense entre les pixels de chaque nouvelle image  $I_n$  et ceux de l'image précédente  $I_{n-1}$  permet de construire le nouveau nuage local tout en établissant un lien avec les points du précédent nuage construit avec les images  $I_{n-1}$  et  $I_{n-2}$ . Mais nos couples stéréoscopiques étant des couples synchronisés (les nuages sont créés à partir des deux vues prises en même temps et non successivement), il serait alors très coûteux de réaliser un appariement dense temporel pour la seule raison d'identifier les doublons.

L'algorithme que nous proposons dans cette section pour traiter ce problème est illustré par le diagramme de la figure 3.95 page 138. Notre approche consiste à nous appuyer sur l'appariement épars réalisé par l'algorithme de recalage pour estimer approximativement la zone de recouvrement entre deux couples et ne construire le nouveau nuage qu'à partir des zones originales du nouveau couple.



**Figure 3.96** – Identification de la zone de recouvrement grâce à la mise en place d'une zone d'influence autour des germes intercouple [© L. Avantbey et al.] sur les deux images successives extraites des couples utilisés dans la section « problème de recalage » à la figure 3.78 page 128. L'illustration présentée est réalisée sur des germes temporels, mais nous noterons que le même procédé reste applicable pour des germes spatiaux ou structurels.



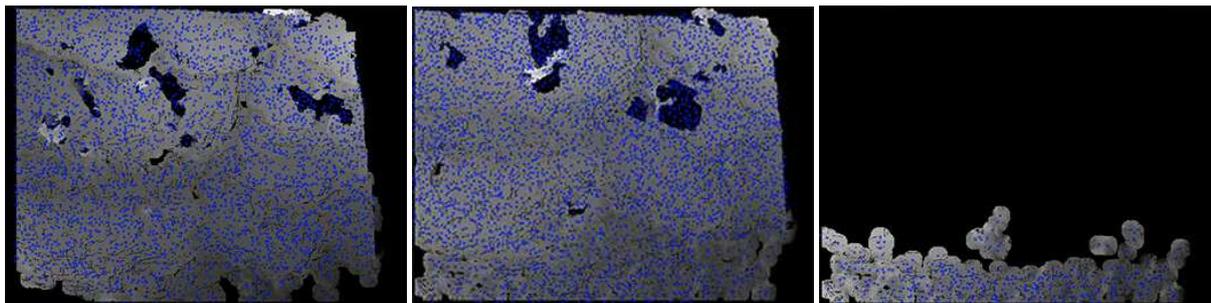
**Figure 3.97** – Diagramme d'identification de la zone de recouvrement entre deux couples stéréoscopiques – temporels, spatiaux ou structurels – et propagation dense pour le deuxième couple, uniquement sur les zones non déjà reconstruites par le premier couple [© L. Avantbey et al.].

### Identification du recouvrement entre deux couples et limitation de la propagation aux zones inconnues

Les pixels présents sur la partie commune partagée par deux couples d'images peuvent potentiellement se retrouver en situation de redondance s'ils ont été respectivement appariés sur leur couple stéréoscopique lors de la propagation dense. Plutôt que de nous focaliser sur l'identification individuelle de tous les pixels redondants, c'est-à-dire sur l'identification systématique de toutes les correspondances (approche *brute force*), nous cherchons à identifier globalement les parties des images correspondant à ces zones de recouvrement pour pouvoir les exclure systématiquement des nouveaux couples.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur l'appariement épars réalisé lors du recalage des nuages locaux (voir section 3.3.4 page 127). En effet, les germes temporels (issus de l'appariement des germes stéréoscopiques de couples successifs), spatiaux (issus de l'appariement des germes stéréoscopiques de couples correspondants à une fermeture de boucle) ou structurels (issus de l'appariement au plus proche voisin des germes stéréoscopiques de couples correspondants à une fermeture de boucle) obtenus à cette étape forment un échantillon de points représentatifs de la zone de recouvrement. Pour délimiter approximativement cet espace, nous étendons l'échantillon selon le principe des zones d'influence. Nous considérons en effet que les pixels situés dans le voisinage de l'un de ces germes intercouple ont une forte probabilité d'appartenir eux aussi à la zone de recouvrement. Une illustration à ce sujet est proposée à la figure 3.96 page 139.

La liste des germes intercouple est disponible au cours de la création des nuages locaux juste avant l'étape d'appariement dense. Cette temporalité, combinée à la faculté de propagation par voisinage de notre algorithme de reconstruction, nous permet d'exploiter l'information *a priori* pour ne pas engendrer de la redondance, plutôt qu'*a posteriori* pour la supprimer (voir le diagramme sur la figure 3.97 page 139). En effet, si pour le nouveau



**Figure 3.98** – Illustration d’une reconstruction partielle [© L. Avanthey et al.]. À gauche, la carte de disparité du premier couple. Au centre, la carte de disparité obtenue pour une propagation normale du deuxième couple. À droite, la carte partielle prenant en compte l’exclusion de la zone de recouvrement.

couple étudié nous soustrayons de la liste des germes stéréoscopiques à propager ceux qui appartiennent aux zones de recouvrement, la propagation dense ne s’effectuera qu’à partir des germes nouveaux. Or ces derniers présentent une faible probabilité de créer de la redondance, car ils se situent dans des zones jusque-là inexplo- rées.

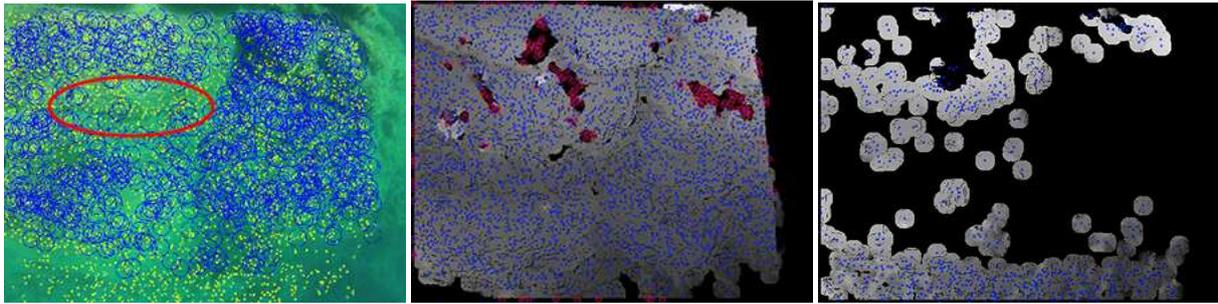
Une reconstruction partielle peut être observée sur la figure 3.98 page 140. Elle a été réalisée à partir du couple temporel présenté sur la figure précédente (3.96 page 139). En moyenne, 40 à 50 % des germes stéréoscopiques sont des germes temporels (20 à 30 % pour les germes spatiaux et structurels) pour nos taux de recouvrement temporel. Nous comptons environ la même proportion de germes stéréoscopiques situés dans la zone d’influence d’un germe temporel et qui seront donc eux aussi supprimés. En ne conservant que 10 à 50 % des germes pour chaque nouveau couple ajouté, notre algorithme dédié au traitement de la redondance permet d’accélérer l’algorithme de reconstruction en plus d’alléger les nuages produits, le tout pour un surcoût algorithmique peu élevé. Cela le rend compatible avec les contraintes opérationnelles sous-jacentes à nos travaux.

### Gestion des zones d’occlusion

Nous avons expliqué comment nous délimitons approximativement les zones de recouvrement entre deux couples stéréoscopiques pour ne reconstruire que les zones de la scène d’étude qui n’ont pas encore été explorées, mais le changement de point de vue entre les deux acquisitions de ces couples peut dévoiler des objets qui étaient occultés au cœur même de la partie de recouvrement. Nous distinguons deux cas, illustrés à la figure 3.99 page 141 : les zones d’occlusion stéréoscopiques et les zones d’occlusion temporelles ou spatiales.

Les premières apparaissent au sein des images d’un même couple stéréoscopique. Un germe stéréoscopique a été trouvé, mais il n’a pas pu se propager à cause d’un voisinage trop différent entre les deux vues (d’observation trop rapprochée par rapport au relief de la scène). Dans ce cas, si ce germe est également un germe temporel, spatial ou structurel, nous lui laissons une seconde chance de se propager sur le nouveau couple. Nous utilisons donc la carte de disparité créée par l’algorithme de propagation dense pour vérifier le voisinage spatial des germes intercouple et s’il s’avère insuffisamment renseigné, ils ne seront pas supprimés des germes stéréoscopiques du second couple. En moyenne dans nos jeux de données, environ 5 % des germes stéréoscopiques ne se propagent pas et environ 30 % de ces derniers (soit 2 à 5 % des germes stéréoscopiques au total) sont des germes intercouple qui pourront donc obtenir une deuxième chance.

Quant aux zones d’occlusion temporelles ou spatiales, elles apparaissent lorsqu’une nouvelle partie de la scène située dans la zone de recouvrement devient visible sur le nouveau couple grâce au changement de point de vue. Si elles ne sont pas trop petites, ce cas est géré automatiquement par notre algorithme. En effet, ces zones invisibles sur le premier couple n’auront pas généré de germes stéréoscopiques, et ne feront donc pas partie des germes spatiaux ou temporels. En revanche, si elles sont visibles sur le nouveau couple, elles auront la possibilité de fournir des germes stéréoscopiques qui pourront alors participer à la propagation du nouveau



**Figure 3.99** – Occlusions et reconstruction partielle [©️️️ L. Avantbey et al.]. À gauche, une zone d’occlusion temporelle située au sein de la zone de recouvrement est marquée en rouge. Au centre, les germes qui ne se sont pas propagés à cause de l’occlusion stéréoscopique sont cerclés de rouge. À droite la carte de disparité obtenue après une propagation partielle prenant en compte les occlusions stéréoscopiques et temporelles lors de l’exclusion de la zone de recouvrement (à comparer avec la carte de la figure 3.98 page 140).



**Figure 3.100** – Reconstruction partielle et fusion de nuages de points [©️️️ L. Avantbey et al.]. À gauche, le nuage coloré reconstruit à partir du premier couple, au centre le nuage partiel reconstruit à partir du second couple et à droite la fusion des deux nuages. Nous invitons le lecteur à comparer ce résultat à celui, brut, obtenu sur la figure 3.81 page 129 de la section « problème de recalage » (3.3.4 page 127).

couple et compléter les informations manquantes sur ces parties de la scène. La présence de ces zones est à nouveau fortement dépendante du relief de la scène et de la distance d’observation. En moyenne, dans nos images, nous comptons 10 à 20 % de germes stéréoscopiques correspondant à ce cas.

Nous pouvons observer à droite de la figure 3.99 page 141 une reconstruction partielle obtenue en prenant en compte les zones d’occlusion situées au cœur de la zone de recouvrement. Notre algorithme permet en moyenne l’économie de la génération d’environ 50 % des points qui auraient dû être produits pour chaque nouveau nuage local ajouté. Les deux nuages locaux reconstruits en couleurs réelles à partir de ces cartes de disparité ainsi que leur fusion sont visibles sur la figure 3.100 page 141.

Nous invitons le lecteur à comparer ce résultat avec celui sans gestion de la redondance présenté à la figure 3.81 de la section 3.3.4 page 129. Nous remarquons notamment que les complétudes des deux nuages sont presque identiques, avec seulement une très légère perte d’information au niveau de quelques zones d’occlusion sur le nuage reconstruit par morceaux. En contrepartie, l’effet de flou provoqué par le bruit des points redondants n’est plus présent, ce qui améliore grandement la perception de la texture et la qualité visuelle globale du nuage.

### Discussion sur les limites de la gestion de la redondance et sur d’autres critères de fusion

Nous remarquerons que, pour notre algorithme comme pour ceux utilisés en reconstruction éparsse ou en reconstruction dense temporelle, l’ensemble des zones de recouvrement n’est jamais entièrement géré. En effet, pour des raisons de complexité, nous ne calculons pas toutes les fermetures de boucles qu’il est possible de réaliser avec tous les couples possédant du recouvrement. Dans la littérature, ces résidus sont généralement

traités par un filtrage appliqué *a posteriori* au nuage local ou au nuage global. Une autre approche envisageable serait de reprojeter approximativement la zone de recouvrement sur les nouveaux couples situés entre deux fermetures de boucles grâce aux informations dont nous disposons avec la spatiocarte et le graphe des poses.

En ce qui concerne particulièrement la redondance temporelle, nous pouvons également envisager de baisser la fréquence d'ajout des nuages de points comme cela se fait dans la littérature. Les nuages épars sont systématiquement calculés pour suivre la trajectoire contrairement aux nuages denses qui ne sont inclus que tous les  $n$  couples ce qui permet de diminuer drastiquement le taux de redondance. Nous distinguerons deux approches possibles de notre algorithme pour résoudre le problème de redondance résiduelle dans ce cas : soit nous traquons les germes temporels entre les deux couples concernés par l'ajout des nuages denses pour identifier leur zone de recouvrement, soit nous n'appliquons pas une fréquence fixe, la diminution de la taille de la zone de recouvrement est suivie sur les couples successifs et le nouvel ajout est décidé quand cette dernière passe sous un certain seuil.

En ce qui concerne les autres critères de la fusion, l'algorithme que nous proposons conserve systématiquement les points les plus anciens dans les cas de redondance identifiée. Il pourrait être intéressant de changer ce comportement pour privilégier plutôt la position spatiale dans l'image au critère d'ancienneté en échange d'un coût algorithmique un peu plus élevé. Un pixel sur les bords de l'image (là où les déformations sont plus prononcées) sera en effet systématiquement reprojété avec une moins bonne précision qu'un pixel proche du centre optique. Un germe, temporel ou spatial, dont la position est plus avantageuse sur le nouveau couple d'images peut être conservé pour fournir des points plus favorables suite à la propagation. Parallèlement, il est nécessaire de décimer dans le nuage global les points tridimensionnels de son voisinage qui ont été précédemment créés par les autres couples en recouvrement pour éviter les doublons.

De même, la qualité globale des images peut également entrer en ligne de compte dans les critères de fusion. Si nous souhaitons conserver les germes du couple présentant une meilleure qualité plutôt que les plus anciens, il suffit de s'appuyer sur le seuil de convergence de l'algorithme de détection de points caractéristiques (voir section 3.3.1 page 93). Le couple d'images qui possède les seuils les plus hauts pour des intervalles cibles identiques est celui qui présente la meilleure qualité (plus de texture).



## Mise en œuvre et analyse

「[...] 設計家は夢に形を与えるのだ。  
[...] センスは時代を先駆ける。技術は後からついてくる」

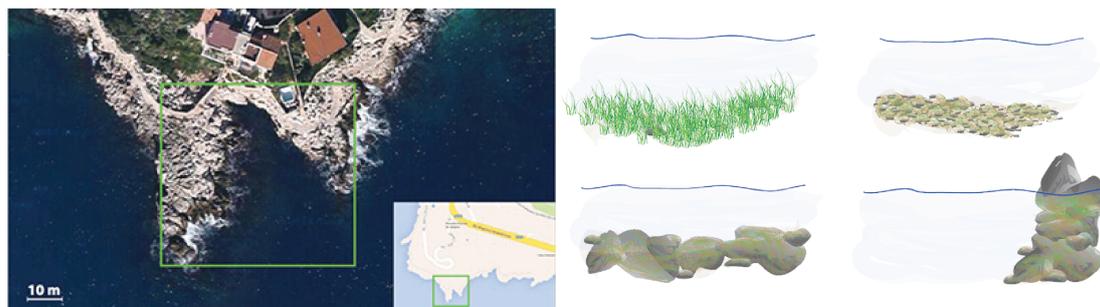
「風立ちぬ」 – 宮崎駿

« [...] les ingénieurs transforment les rêves en réalité.  
[...] L'inspiration ouvre les portes de l'avenir. Lorsque l'inspiration est là, la technologie suit. »

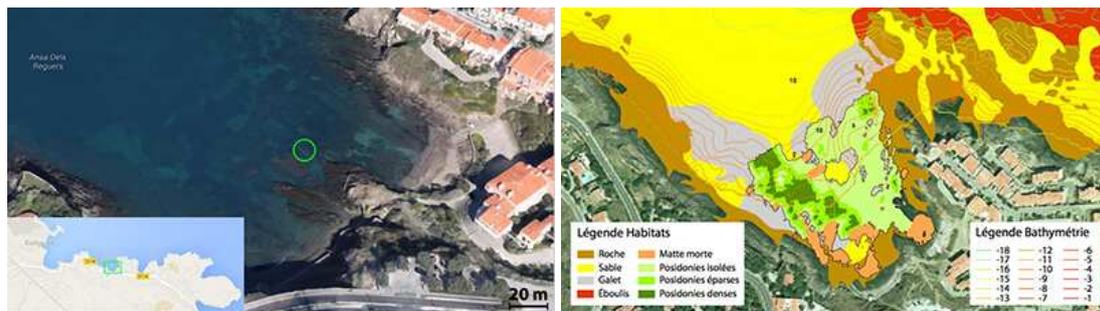
*Le vent se lève* – Hayao Miyazaki

Dans ce dernier chapitre, nous confrontons nos travaux à l'expérience terrain. L'analyse que nous allons présenter vient compléter les résultats exposés au cours de la section 3.3 page 93 du chapitre 3 et concerne toute la chaîne, du système d'acquisition aux algorithmes de reconstruction. Nous avons travaillé sur deux zones d'étude situées sur la côte méditerranéenne : l'une au Cap de Nice (Côte d'Azur) et l'autre dans l'anse dels Reguers à Collioure (Côte Vermeille).

La zone d'étude du Cap de Nice, délimitée sur la carte satellite de la figure 4.1 page 143, jouxte la côte et mesure environ 1 000 m<sup>2</sup>. Elle présente de nombreux intérêts pour la réalisation d'une mission. En effet, ses fonds marins sont très variés et texturés (cailloux, rochers, herbiers de posidonies, éboulis, etc.) et les profondeurs proposées offrent tout un panel de choix (4-15 mètres de profondeur). La mission terrain s'est déroulée sur trois jours en août 2013 et deux jours sur la fin octobre 2013.



**Figure 4.1** – Zone d'étude du Cap de Nice. À gauche, les 1 000 m<sup>2</sup> marqués par un rectangle vert sur l'image satellite [© Google Maps] et à droite les types de fonds que l'on peut y trouver [© L. Avantbey et al.] : des herbiers de posidonies, des graviers, des rochers et des tombants.



**Figure 4.2** – Zone d'étude de l'anse dels Reguers à Collioure. À gauche, les 70 m<sup>2</sup> marqués par un cercle vert sur l'image satellite [© Google Maps] et à droite la carte de l'anse produite entre 2005 et 2004 dans le cadre de l'étude du site classé Natura 2000 [Licari et al., 2004].

La zone d'étude de Collioure, quant à elle, est située au cœur du site Natura 2000 de la côte des Albères [Licari et al., 2004, FR9101482] et est notamment remarquable par la présence de ses herbiers de posidonies. Pour cette étude, nous avons choisi un espace plus petit de seulement 70 m<sup>2</sup>, situé à une trentaine de mètres du bord et dont nous pouvons voir le marquage sur la carte satellite de la figure 4.2 page 144. La zone est bordée par l'herbier de posidonies précédé de la matte morte d'un côté, et de rochers au relief varié provenant d'un ancien éboullis de l'autre côté. En son centre, d'anciennes conduites cassées sont réparties un peu partout sur un fond de gravier au dénivelé faible et régulier. La mission terrain s'est déroulée durant un après-midi du mois d'octobre 2015.

**Concernant la mise en place du réseau de points de contrôle sur le terrain** Nous avons expérimenté plusieurs configurations en partant des répartitions en cercles ou en ellipses préconisées par Bowens [2011], auxquelles des points secondaires sont ajoutés à l'intérieur. Nous avons observé qu'un compromis entre une équirépartition spatiale et verticale (marquage des différents paliers de profondeur) permet d'extraire une information riche et très utile pour la phase d'analyse sur la morphologie tridimensionnelle de la scène d'étude.

Les marqueurs sont déposés sur le fond et lestés chacun par un plomb d'un kilogramme pour qu'ils ne soient pas déplacés par le ressac ou les courants durant le déroulement de la mission. Pour équiper la zone du Cap de Nice, nous estimons qu'une trentaine de points de contrôle est nécessaire et qu'un peu moins d'une dizaine suffisent amplement pour la zone de Collioure. Avec le retour d'expérience des premiers essais en mer, nous avons remplacé la trame blanche initiale de nos marqueurs par une trame grise, comme pour les mires d'étalonnage, afin d'éviter une surexposition sur les images qui les contiennent.

La profondeur de chaque marqueur a été mesurée sur les deux sites et nous avons expérimenté à Collioure notre méthode de relevé de distance entre les points de contrôle pour former le réseau. Nous avons compté



**Figure 4.3** – Établissement du réseau de points de contrôle sur la zone d'étude [© L. Avantbey et al.] : le plongeur répartit les marqueurs sur le fond (à gauche) puis relève les distances qui les séparent. Pour cela, il dépose le plomb sur le coin d'un marqueur (au centre) et déroule la corde (à droite) jusqu'au coin d'un autre marqueur. Un brin numéroté noué permet d'enregistrer la mesure et ses références sont notées sur l'ardoise.



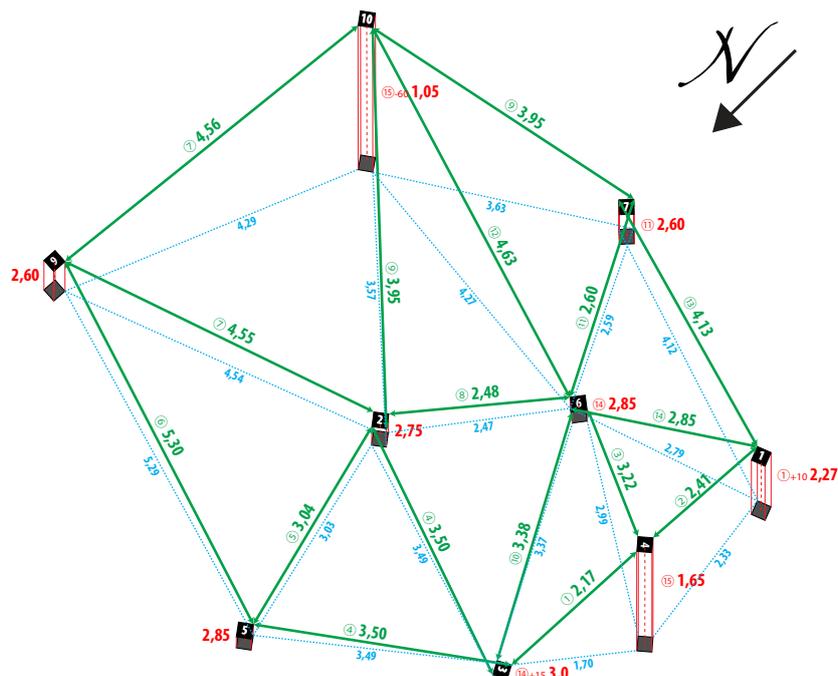


Figure 4.6 – Schéma du réseau de points de contrôle que nous avons déployé sur la zone de Collioure puis reconstitué à l'aide des relevés métriques effectués sur le terrain [© L. Avantbey et al.].

environ une minute pour qu'un plongeur seul puisse effectuer une mesure complète (inférieure à 15 mètres de longueur) avec prises de notes (voir figure 4.3 page 144). Ces mesures de vérité terrain complétées par des prises de notes *in situ* nous ont permis de dresser des cartes approximatives de nos zones d'études (voir les figures 4.4 page 145 et 4.5 page 145) qui servent de base aux opérateurs pour le repérage et la prise de décision. Le schéma reconstitué du réseau de Collioure est présenté sur la figure 4.6 page 146.

**Concernant la méthodologie d'étalonnage *in situ*** Notre mire d'étalonnage (72 points d'ancrage,  $9 \times 10$  cases de 5 cm de côté) nous donne des résultats satisfaisants, mais nos tests nous amènent à penser que des cases plus grandes (7-10 cm de côté) amélioreraient la détection du damier, notamment pour les distances d'observation autour de 3 mètres. Pour ne pas augmenter la taille de la mire qui est déjà encombrante, cela signifierait de réduire à 42 ( $7 \times 8$ ) ou à 20 ( $5 \times 6$ ) points le nombre de points d'ancrage. De la même manière, il serait intéressant de prévoir une mire plus petite pour les distances d'observation très rapprochées (inférieures à 2 m), afin que cette dernière rentre dans l'image et puisse offrir une meilleure variation de positions. La trame grise mériterait d'être encore un peu plus foncée (notamment lorsque l'éclairage est non uniforme) sans toutefois que cela n'entrave la détection, car il faut conserver suffisamment de contraste pour la binarisation. De plus,

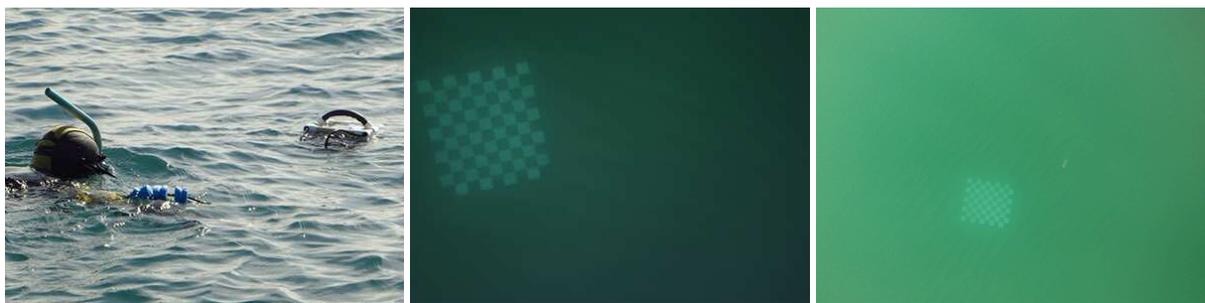
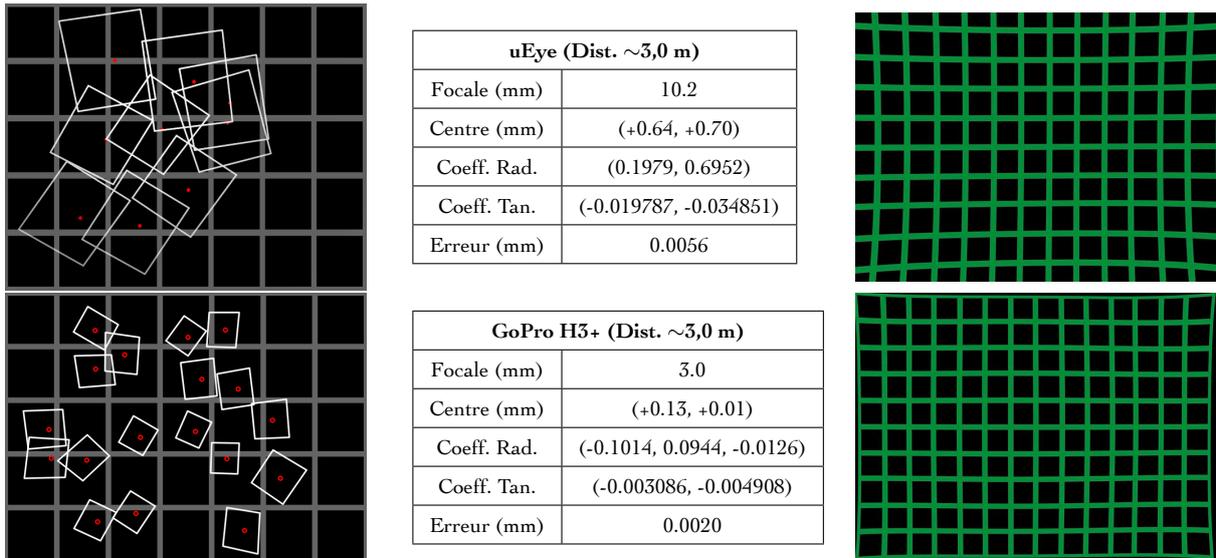


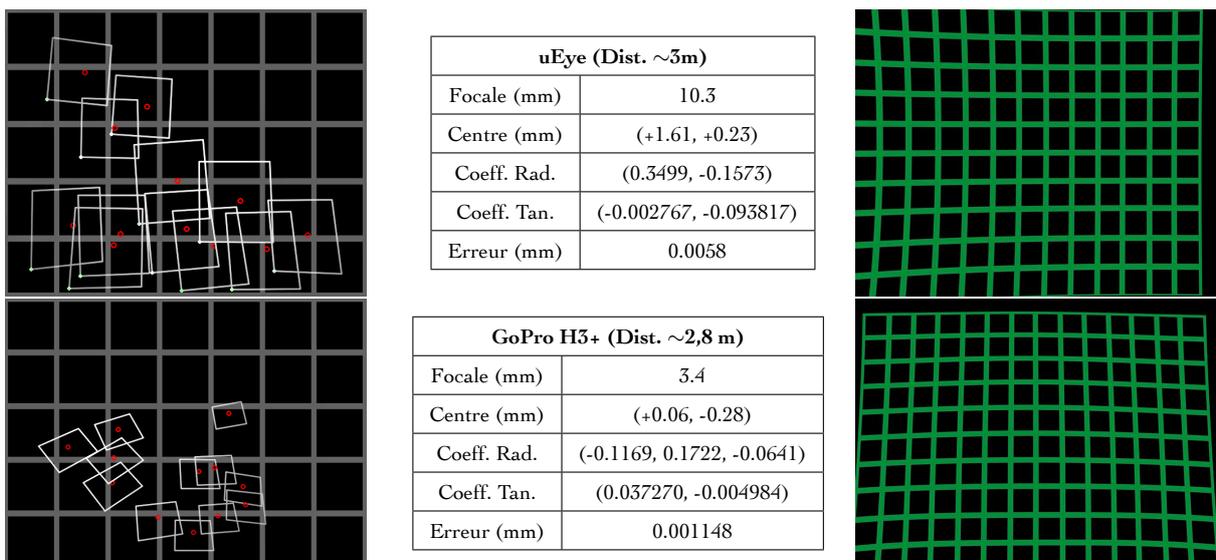
Figure 4.7 – Calibrage *in situ* au nadir, avec au centre un exemple tiré du jeu d'images acquises par les caméras uEye et à droite un exemple du jeu d'images acquises par les GoPro [© L. Avantbey et al.]. La distance d'observation est d'environ 3 mètres.



**Figure 4.8** – À gauche, le résultat de notre algorithme de sélection sur un jeu d'images uEye (en haut, 9 images sélectionnées sur 60) et GoPro (en bas, 18 images sélectionnées sur 4 200) acquis en mer au nadir, au centre les résultats des étalonnages respectifs sur les sous-échantillons et à droite les modélisations des distorsions estimées [© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.].



**Figure 4.9** – Calibrage in situ en latéral, avec au centre un exemple tiré du jeu d'images acquis par les caméras uEye et à droite un exemple du jeu acquis par les GoPro [© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.]. La distance d'observation est d'environ 3 mètres pour les uEye et 2,8 mètres pour les GoPro.



**Figure 4.10** – À gauche, le résultat de notre algorithme de sélection sur un jeu d'images uEye (en haut, 12 images sélectionnées sur 150) et GoPro (en bas, 12 images sélectionnées sur 1 100) acquis en mer en latéral, au centre les résultats des étalonnages respectifs sur les sous-échantillons et à droite les modélisations des distorsions estimées [© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.].

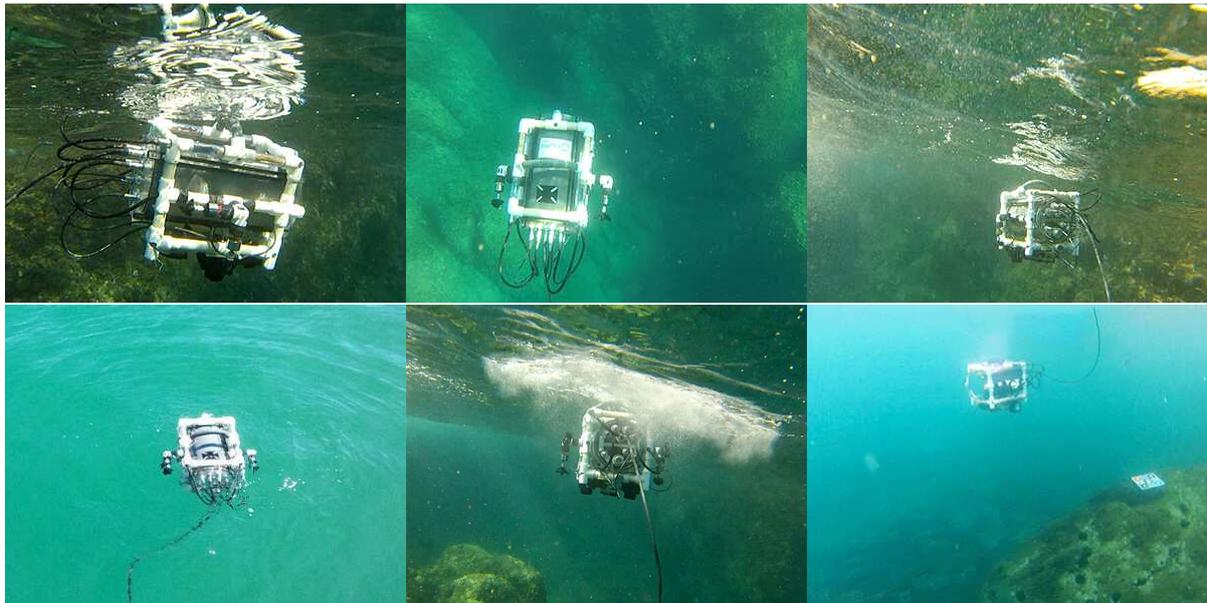


Figure 4.11 – Ryujin en cours d’acquisition sur les lieux de mission [© L. Avantbey et al.].

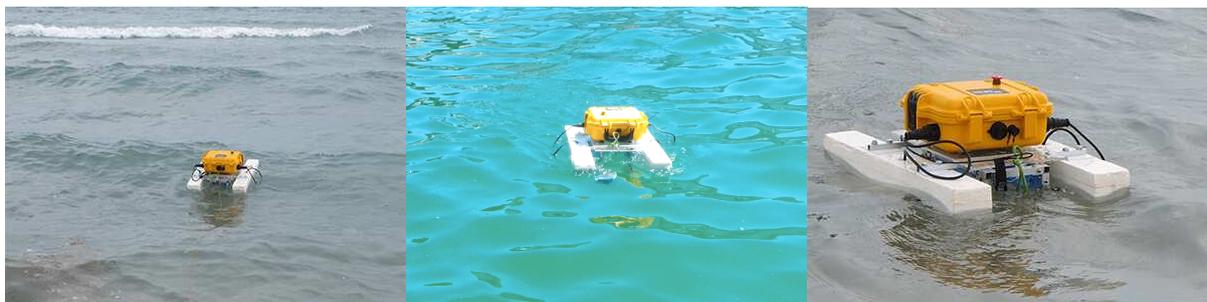


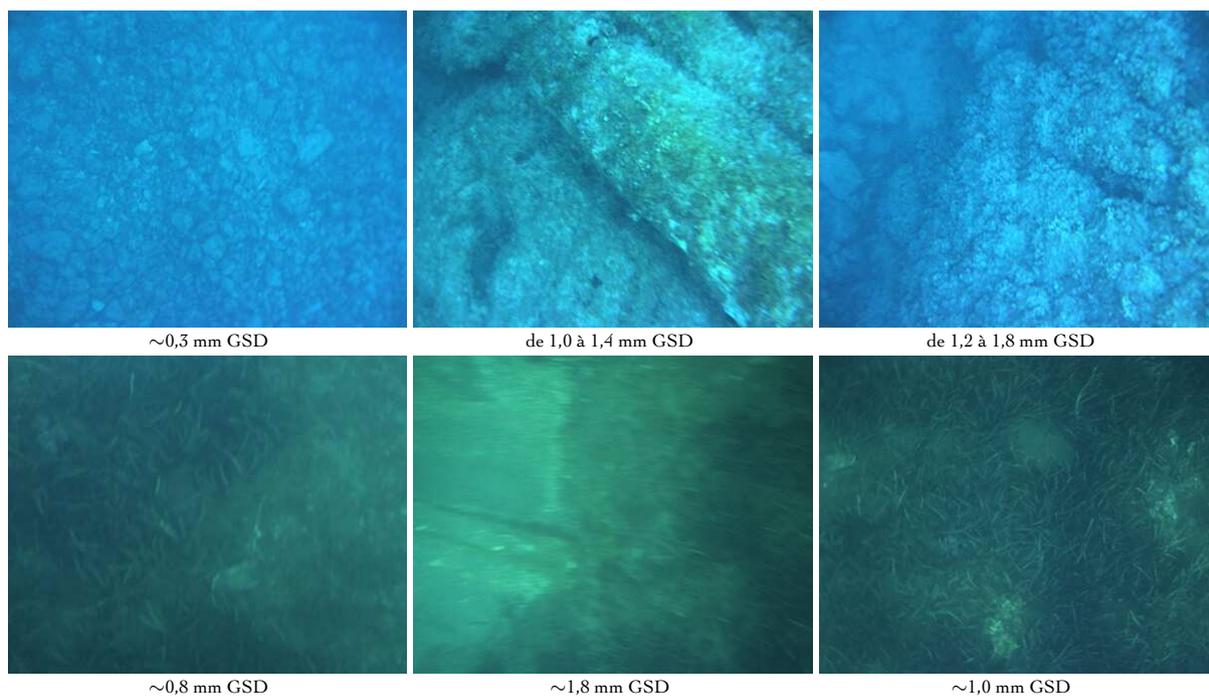
Figure 4.12 – Kraken au cours d’un test en mer [© L. Avantbey et al.].

des petites cales pourraient être ajoutées au dos de la mire (elles peuvent même remplacer les plombs) pour la surélever un peu du sol afin qu’elle soit moins recouverte par le sable ou les algues au cours de l’acquisition.

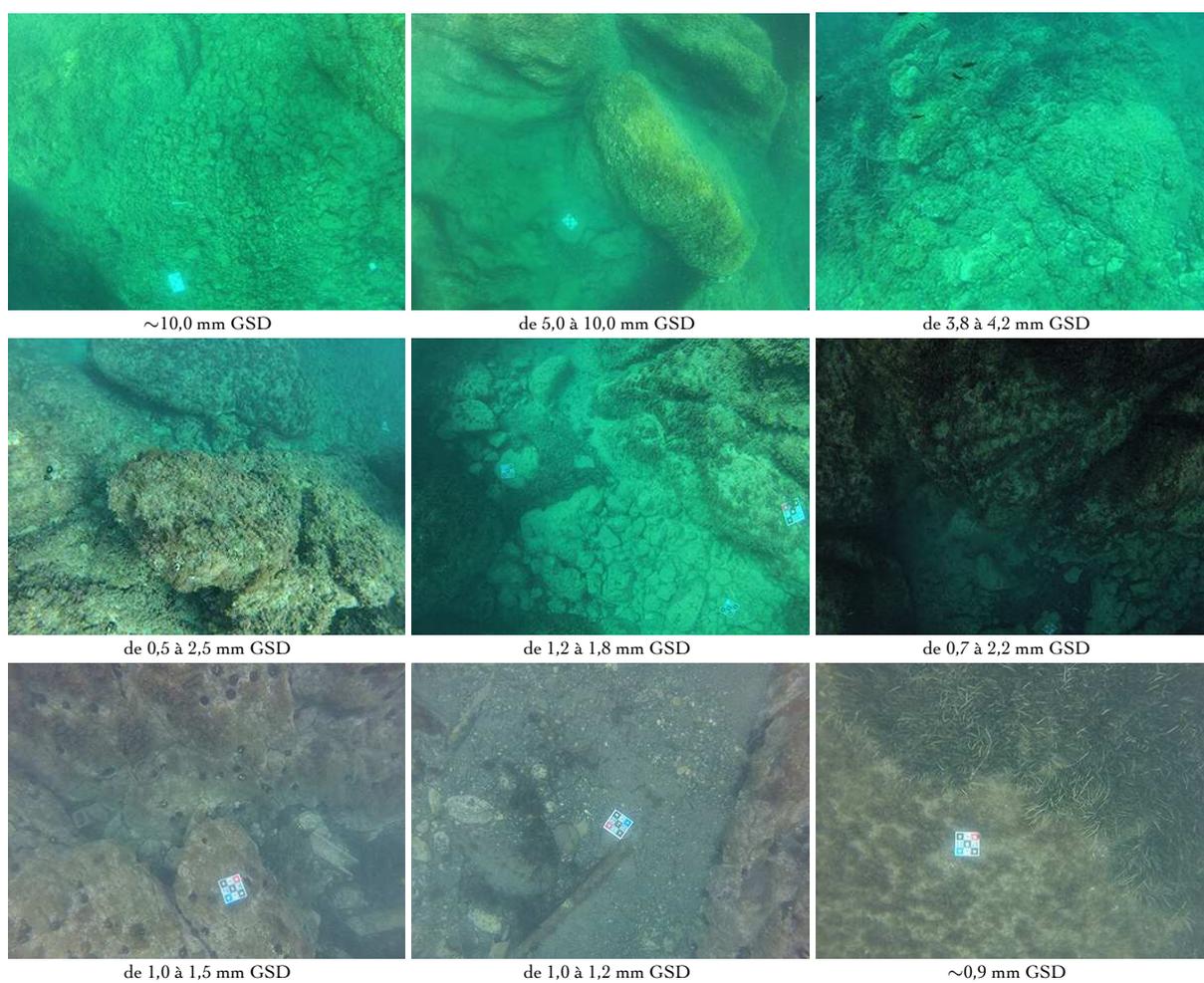
Comme en piscine, nous avons procédé à des prises de vue d’étalonnage au nadir et en latéral (voir figure 4.7 page 147) et les résultats de notre algorithme de sélection ainsi que les paramètres intrinsèques estimés sont présentés sur les figures 4.8 page 147 et 4.10 page 147. Nous noterons qu’une estimation des coefficients d’ordres supérieurs pour la distorsion radiale ( $k_4$ ,  $k_5$ , etc.) pourrait peut-être améliorer la correction sur les bords pour la GoPro où les déformations persistent (grand angle) [Drap et Lefèvre, 2016].

De plus, la prise d’images d’étalonnage « en aveugle » nous a amenés à ne pas faire assez varier les positions des caméras. La mire n’a pas été vue et détectée par le capteur sur des zones entières, ce qui réduit la fiabilité de l’étalonnage effectué. Nous voyons avec cet exemple l’importance de pouvoir utiliser le code de sélection sur zone en quasi temps réel afin d’obtenir ces informations au cours de la manipulation. Nous ajouterons également qu’il est plus difficile pour le plongeur de maintenir une distance constante lors des acquisitions en latéral à cause des remous.

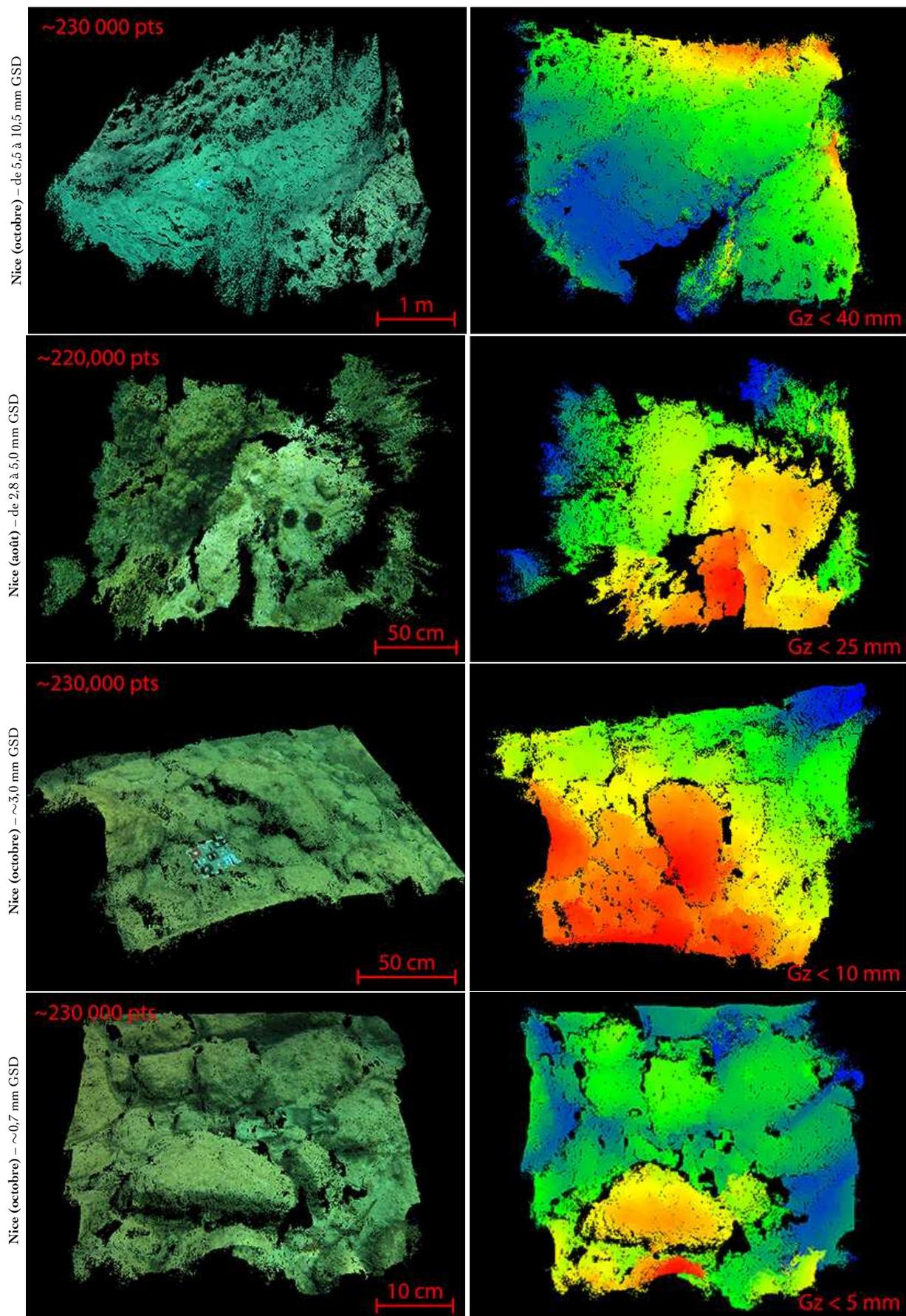
Néanmoins, nous pouvons tout de même remarquer que les résultats sont cohérents avec le modèle théorique. En effet, l’eau de mer est plus réfringente que l’eau douce de la piscine et pour une distance égale, il est donc nécessaire de compenser plus amplement les effets du dioptre ( focale artificielle plus élevée) : 3,2 mm pour les GoPro en piscine contre 3,4 mm en mer pour une distance d’environ 2,8 m.



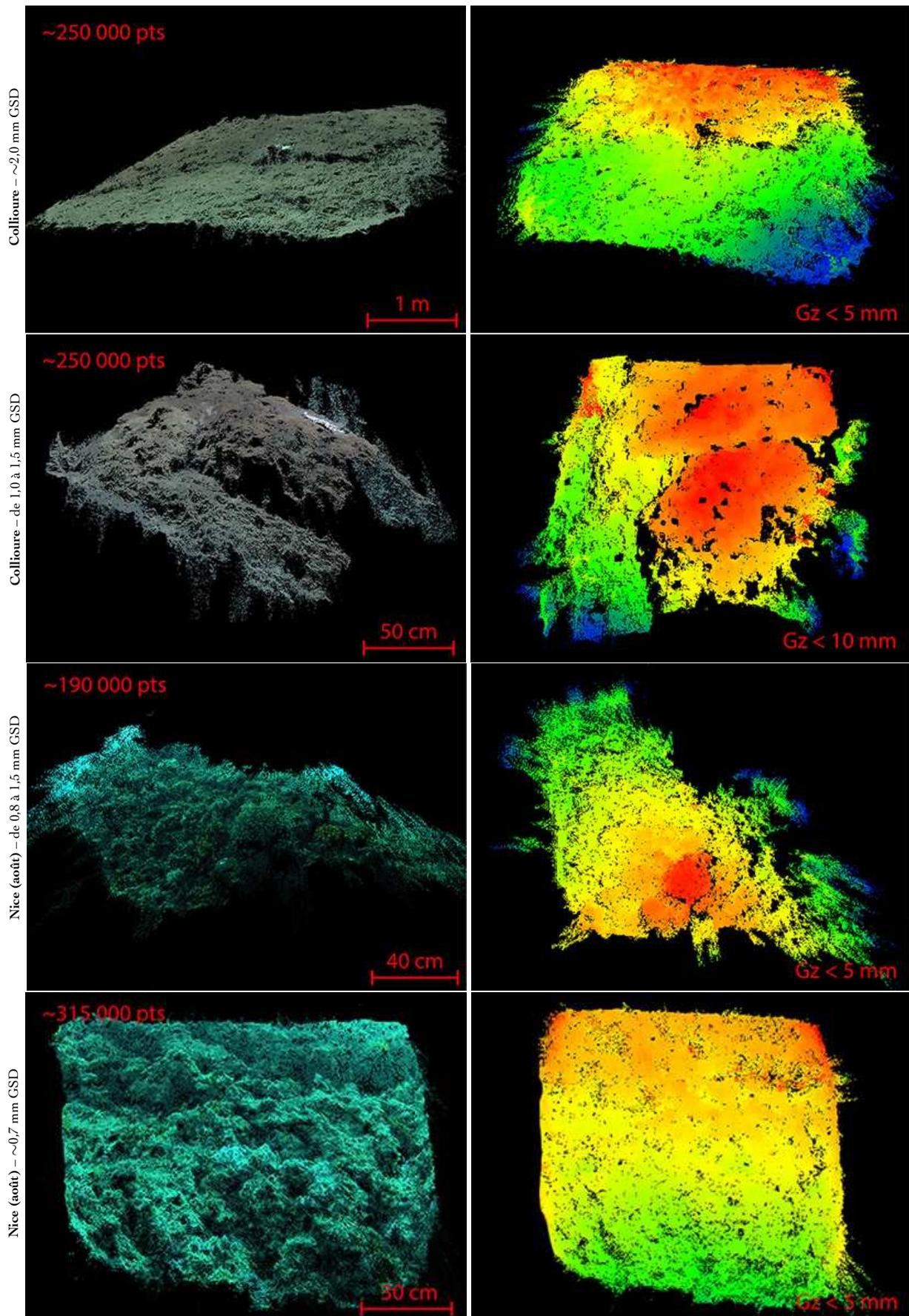
**Figure 4.13** – Images échantillons des paires stéréoscopiques acquises par le banc uEye [© L. Avantbey et al.] : cap de Nice (en haut) et Collioure (en bas).



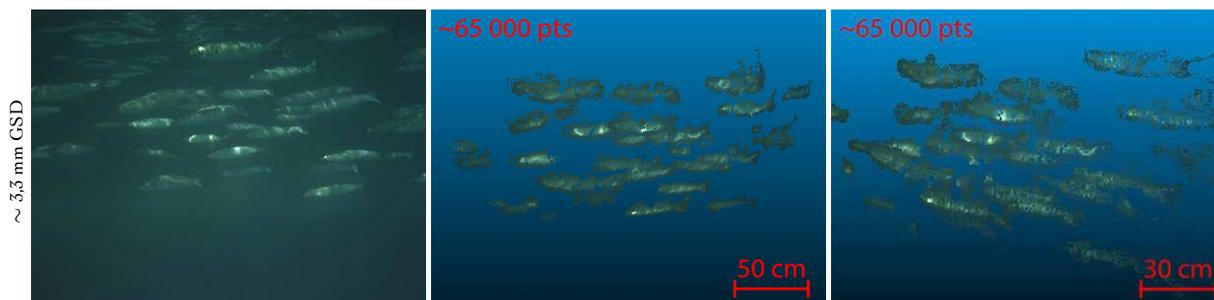
**Figure 4.14** – Images échantillons des paires stéréoscopiques acquises par le banc GoPro [© L. Avantbey et al.] : cap de Nice en août (en haut) et en octobre (au milieu) et Collioure (en bas).



**Figure 4.15** – Exemples de nuages de points locaux, chacun extrait d'une paire stéréoscopique (quatre nuages, deux vues par nuage) [© L. Avantsbey et al.]. À gauche, le nuage obtenu en couleurs réelles et à droite, le même nuage en couleur d'échelle. La reprojexion tridimensionnelle est relative au capteur; plus les points sont proches de ce dernier; plus leur couleur est chaude. La résolution des images a été réduite par un facteur 5 (la taille de l'échantillon au sol est donnée vis-à-vis des images sous-échantillonnées).



**Figure 4.16** – Exemples de nuages de points locaux (suite), chacun extrait d'une paire stéréoscopique (quatre nuages, deux vues par nuage) [© L. Avantbey et al.]. À gauche, le nuage obtenu en couleurs réelles et à droite, le même nuage en couleur d'échelle. La reprojction tridimensionnelle est relative au capteur; plus les points sont proches de ce dernier, plus leur couleur est chaude. La résolution des images a été réduite par un facteur 5 (la taille de l'échantillon au sol est donnée vis-à-vis des images sous-échantillonnées).



**Figure 4.17** – La reconstruction tridimensionnelle de la faune devient possible dès lors que nous utilisons un temps de synchronisation adapté entre les prises de vues stéréoscopiques [© L. Avantbey et al.]. Sur cet exemple, un banc de mulets (La Grande-Motte, 2015) a été capturé avec un temps de synchronisation inférieur à un millième de seconde (image originale à gauche) et reconstruit en trois dimensions (deux vues du nuage de points obtenus à droite). La résolution des images a été réduite de  $1280 \times 960$  à  $700 \times 525$  pixels et la taille de l'échantillon au sol (GSD) est donnée en conséquence.

**Concernant l'acquisition des données à l'échelle des individus** Sur les deux zones d'étude, les acquisitions ont été réalisées avec le système sous-marin en mode ROV asservi en profondeur (voir figure 4.11 page 148). Le robot a été systématiquement accompagné par un plongeur pendant tout le déroulement des missions. En ce qui concerne le véhicule relais de surface, il a été testé dans sa première version (voir figure 4.12 page 148). La plateforme nous semble légèrement sous-dimensionnée lorsqu'il y a un peu de houle, bien qu'elle soit déjà assez encombrante pour le transport. La seconde version du prototype, qui cherche à améliorer ces aspects et à ajouter la gestion du câble du sous-marin, est toujours en phase de développement et n'a donc pas été testée sur les lieux de mission. La zone de Collioure étant plus petite, la faculté de déplacement était moins indispensable et un bateau gonflable (plus grand, mais prenant moins de place pour le transport) a donc été utilisé.

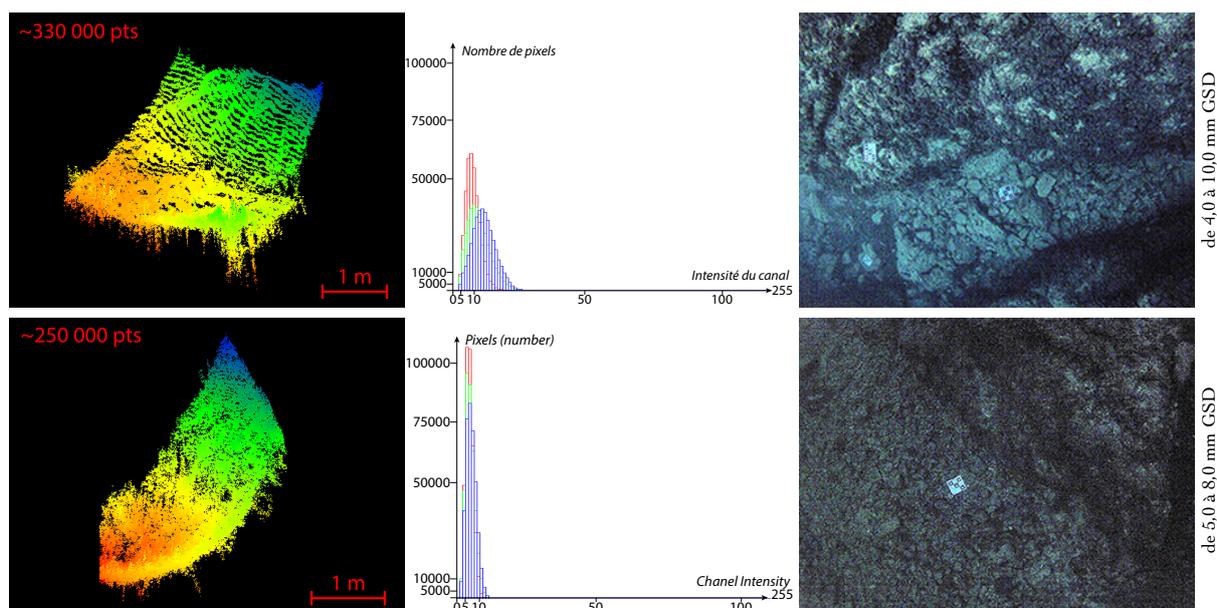
Environ 20 000 paires stéréoscopiques ont été acquises sur la zone du Cap de Nice et environ 8 000 paires à Collioure. Des images échantillons de ces couples stéréoscopiques uEye et GoPro pris lors des différentes interventions sont disponibles sur les figures 4.13 page 149 et 4.14 page 149 avec leur taille d'échantillon au sol.

Une première analyse des images permet de vérifier que l'identification visuelle des objets d'intérêt est possible. Les images contenant des marqueurs de terrain permettent de contrôler la conformité de la taille d'échantillon au sol acquise. La taille d'échantillon théorique peut être calculée grâce à la connaissance de la profondeur du marqueur et celle du robot. Ces deux valeurs nous donnent accès à la distance entre le capteur et le marqueur que nous pouvons combiner avec les paramètres du capteur. Quant à la taille d'échantillon au sol expérimentale, comme nous connaissons la taille réelle du marqueur, il suffit de mesurer le nombre de pixels qui le compose sur l'image étudiée. Les résultats obtenus entre taille d'échantillon théorique et expérimentale sont très proches. Les différences résiduelles s'expliquent essentiellement par l'erreur sur les mesures de profondeur ( $\pm 5$  cm).

Nous noterons par ailleurs que de nombreuses images acquises dans des conditions d'éclairage médiocres (en soirée ou avec une météorologie peu clémente) présentent un flou de bougé, notamment avec les caméras uEye. L'asservissement vitesse en relation avec le capteur doit donc être amélioré pour limiter ces cas.

Nous avons extrait plusieurs nuages de points locaux de ces bases d'images. Un échantillon de ces productions est illustré sur les figures 4.15 page 150 et 4.16 page 151.

**Concernant la synchronisation des acquisitions** Le temps de synchronisation du banc stéréoscopique uEye est suffisant pour la plupart des objets d'intérêt. La figure 4.17 page 152 montre par exemple la reconstruction tridimensionnelle dense d'un banc de mullet capturé par les uEye au millième de seconde. La reconstruction de la faune en trois dimensions, rendue possible grâce à un temps de synchronisation adapté, peut s'avérer très intéressante pour nombre de thématiciens. Notre résultat, par exemple, peut venir alimenter le travail des biologistes marins qui travaillent sur les mesures statistiques concernant les bancs de poissons [Harvey et al., 2003; Birt et al., 2012; Santana-Garcon et al., 2014; Seiler et al., 2012; Shortis, 2015]. Le temps de synchronisation



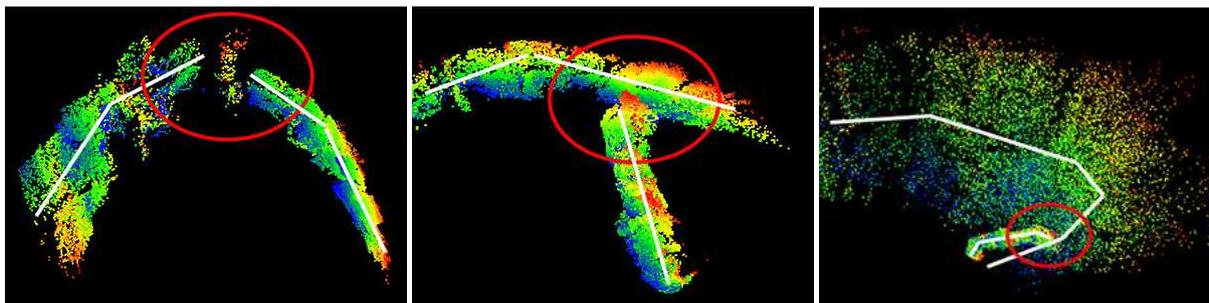
**Figure 4.18** – Test des limites de notre seuillage adaptatif à partir de deux paires stéréoscopiques acquises dans des conditions lumineuses très faibles [© L. Avanthey et al.]. À gauche, les deux nuages de points obtenus à partir des images originales (sans prétraitement). Au centre, les histogrammes des images originales montrant que leur dynamique est concentrée sur moins de 12 % de la plage [0 – 255] pour le premier couple et sur moins de 6 % pour le second couple. À droite, les images gauches des couples dont le contraste a été fortement rebaissé à la main pour donner une idée de la scène observée.

du banc stéréoscopique GoPro, quant à lui, est trop élevé pour ce type de mouvement ou celui des posidonies par exemple, mais il reste suffisant pour les objets qui se déplacent plus lentement comme les algues basses qui recouvrent les rochers.

**Concernant la robustesse à la qualité des images acquises** Les différentes reconstructions tridimensionnelles que nous avons produites confirment que la modification de l’algorithme de Harris est nécessaire. En effet, sur des images acquises dans des conditions similaires, le seuil final sur lequel converge notre algorithme pour atteindre un nombre de points contenu dans l’intervalle cible présente une variation non négligeable de 20 %.

Les images acquises dans des conditions lumineuses très faibles (prises de vue durant la période autour du coucher du soleil) nous ont permis de tester les limites de notre algorithme. Ces images présentent un histogramme très étroit : toute leur dynamique est comprise sur 15 % seulement de la plage [0 – 255]. Sur ces dernières, le seuil adaptatif converge sur une valeur en moyenne 80 % plus faible que celles obtenues avec les cas généraux. Nous confirmons que les points extraits dans ces conditions sont toujours fiables pour permettre la reconstruction comme nous pouvons le voir sur les nuages de points de la figure 4.18 page 153, bien que le bruit soit plus prononcé.

**Concernant la fiabilité des appariements pour le recalage des nuages locaux** Les appariements temporels se comportent globalement de manière aussi fiable que les appariements stéréoscopiques. Cependant, nous voyons apparaître quelques exceptions pour lesquelles les couples temporels présentent les mêmes inconvénients que les couples spatiaux ce qui rend leur appariement plus complexe. Comme nous l’avons stipulé pour le spatial, ces cas surviennent généralement lorsque le rapport entre le relief et la distance d’observation est élevé. Ils peuvent correspondre à plusieurs situations : une accélération du vecteur d’acquisition, par exemple, ou bien encore une acquisition qui n’a pas fonctionné correctement (mémoire tampon saturée, temps d’acquisition dépassant le délai de fréquence, etc.). Ces couples fournissent un nombre de germes temporels anormalement bas ce qui permet de les repérer. Cette distinction automatique des ruptures de la chaîne temporelle est importante pour pouvoir scinder la reconstruction en morceaux distincts. Autrement, nous effectuerons un raccord faussé (trop



**Figure 4.19** – Si le graphe n’est pas automatiquement scindé lorsqu’un appariement temporel échoue (problématique proche des couples spatiaux, peu de germes sont trouvés) alors la transformation erronée se répercutera sur le reste de la trajectoire et faussera la reconstruction globale [© L. Avantbey et al.]. Les nuages épars présentés (entre 30 à 60 par image) sont dans leurs propres couleurs d’échelle. Les lignes blanches marquent les plans et les cercles rouges ciblent les endroits où l’appariement n’a pas fonctionné.



**Figure 4.20** – Deux exemples de reconstructions globales denses avec gestion de la redondance regroupant environ 70 nuages pour chaque séquence [© L. Avantbey et al.]. Les images ont été acquises sur la zone du Cap de Nice, au bout de la pointe du « rempart » qui est bordée d’un côté par le chenal et de l’autre part une pente douce. Le nuage de gauche est composé de 5 millions de points. Le nuage de droite, lui, dont la zone de la faille est agrandie sur l’image du centre, possède 8,5 millions de points.

peu d’information pour réaliser une bonne estimation de la transformation temporelle) et la scène globale sera corrompue (voir quelques exemples à la figure 4.19 page 154). Il serait intéressant à ce propos d’adapter la spatio-carte pour qu’elle puisse gérer plusieurs graphes à la fois et permettre leur raccordement en cours d’exécution grâce aux fermetures de boucles.

Quant à la robustesse des appariements spatiaux et structurels, elle mériterait pour sa part d’être plus amplement testée pour confirmer la fiabilité de la validation des fermetures de boucle qui atteste que le recouvrement est suffisant entre deux couples spatiaux pour être exploité, ainsi que la fiabilité de l’estimation de la transformation spatiale qui impacte la qualité de la reconstruction.

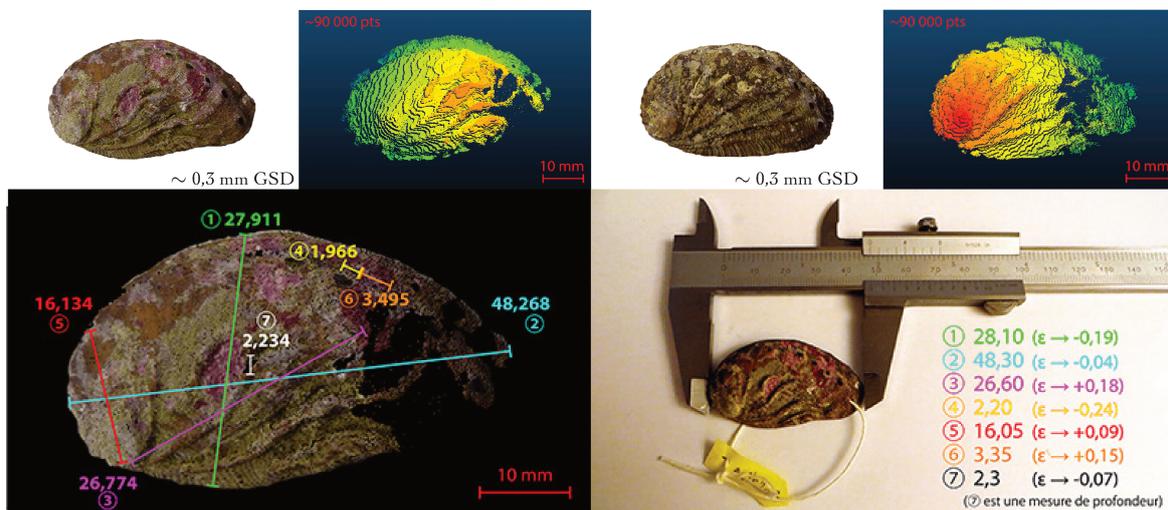
**Concernant la densité des nuages de points créés** Nos résultats montrent que nos algorithmes permettent l’appariement dense de 60 % à 85 % des pixels des images d’une paire stéréoscopique présentant un recouvrement entre 70 % et 90 %. L’algorithme de gestion de la redondance permet en moyenne d’éviter la création de 50 % de ces points pour un nouveau couple pour empêcher la surdensification des zones de recouvrement. Ses résultats sont plutôt satisfaisants (voir la figure 4.20 page 154) mais améliorables. La densité mesurée sur les nuages de points est consistante avec la taille de l’échantillon au sol des acquisitions. Si nous prenons en exemple les deux derniers nuages que nous avons présentés à la figure 4.15 page 150, nous obtenons environ 1 à 2 points par centimètre carré pour une taille d’échantillon au sol entre 7 mm et 5,5 mm (premier nuage) et environ 6 à 7 points par centimètre carré pour une taille d’échantillon au sol d’environ 3 mm (deuxième nuage). Cette densité se retrouve presque doublée au niveau des bandes qui bordent les zones de recouvrement sur les nuages locaux fusionnés (redondance non supprimée sur la largeur du rayon d’expansion).

**Concernant la justesse des nuages de points créés** Comme la justesse est liée à l’échelle d’acquisition, nous l’évaluons vis-à-vis de la taille d’échantillon au sol. Les mesures réalisées *in situ* sur des objets caractéristiques de

GSD (mm)	Vérité terrain (mm)	Mesure 3D (mm)	Erreur (mm)
10	875	862.7	-12.3
10	298	307.2	9.2
10	49	42.3	-6.7
8	1273	1248.6	-24.4
3	732	734.2	2.2
3	218	216.7	-1.3

GSD (mm)	Vérité terrain (mm)	Mesure 3D (mm)	Erreur (mm)
0.8	433	434.1	1.1
0.8	427	427.8	0.8
0.8	350	349.1	-0.9
0.6	220	219.5	-0.5
0.6	170	170.8	0.8
0.6	113	112.9	-0.1

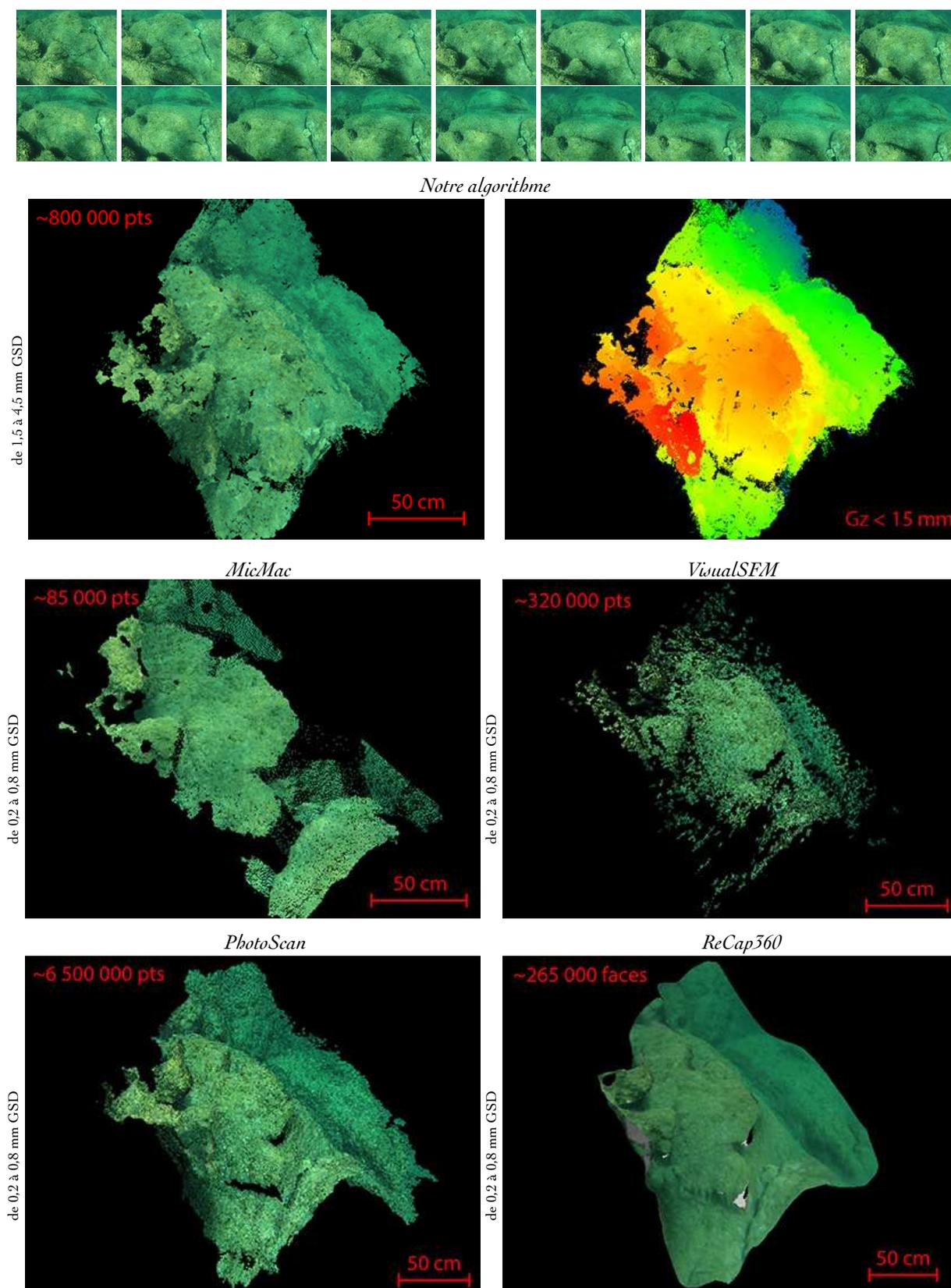
**Table 4.1** – Échantillon de mesures réalisées *in situ* sur des rochers avec un mètre ruban accompagnées de leurs mesures correspondantes sur les nuages de points extraits à une taille d'échantillon au sol donnée [© L. Avantbey et al.]. L'écart sur la justesse est inférieur à deux fois la taille de l'échantillon au sol. Considérant l'échelle de nos distances d'observation, l'imprécision des mesures terrain de grandes tailles dépasse l'imprécision moyenne du modèle. Ces mesures ne peuvent donc pas être significatives pour évaluer la qualité de la reconstruction (voir la quatrième ligne du tableau de gauche par exemple).



**Figure 4.21** – Évaluation de la précision des reconstructions locales grâce aux relevés métriques [© L. Avantbey et al.]. En haut, deux coquilles d'ormeau (*Haliotidae*,  $\sim 5 \times 3$  cm) trouvées sur les zones d'étude et leurs nuages de points tridimensionnels respectifs en couleur d'échelle. En bas, les mesures numériques réalisées sur le nuage en couleurs réelles de la première coquille d'ormeau (à gauche) et les mesures physiques équivalentes effectuées sur la coquille (à droite). La différence entre ces deux jeux de mesures est en moyenne de  $\pm 0,2$  mm, soit environ deux fois la taille de l'échantillon au sol.

l'environnement comme des pierres ou des rochers permettent de vérifier la justesse obtenue au sein d'un nuage. Quant à celles réalisées sur le réseau de marqueurs, elles permettent de contrôler la justesse et la cohérence du recalage des différents nuages locaux. Rappelons que les mesures *in situ* sont réalisées avec une corde et mesurées au mètre ruban ce qui leur confère une précision de quelques centimètres.

En ce qui concerne la justesse locale, la comparaison des mesures physiques avec celles estimées sur les nuages de points produits (voir un échantillon sur la table 4.1 page 155) permet d'estimer un écart sur la justesse inférieur à deux fois la taille de l'échantillon au sol ( $j < \pm 2 \times \text{GSD}$ ). Nous devons discuter de certains points à propos de la pertinence d'une telle évaluation. Les mesures terrain sont difficiles à réaliser avec une grande précision sous l'eau [Holt, 2003; Bowens, 2011]. En effet, la précision des outils de mesures utilisés est d'environ  $\pm 1$  mm. De surcroît, plus la distance mesurée est grande, plus sa justesse sera faible à cause des problèmes liés à la tension de ruban ou à la difficulté à rester dans le plan. Lorsque l'imprécision d'une mesure de vérité terrain devient beaucoup plus grande que la précision de la reconstruction (voir section 3.3.3 page 123, où nous estimons l'erreur de mesure *in situ* à environ 2 % de la distance mesurée), elle ne peut être prise en compte pour évaluer la justesse de cette reconstruction. Une autre difficulté est qu'il est difficile de s'appuyer précisément sur les mêmes points d'ancrage entre les mesures physiques *in situ* et les mesures prises sur le nuage tridimensionnel.



**Figure 4.22** – Résultats obtenus sur un jeu de 18 images séquentielles (tout en haut) avec notre algorithme (en haut, nuage en couleur réel à gauche et en couleur d'échelle à droite), avec le logiciel open source MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2014] (nuage au centre, à gauche), avec le logiciel gratuit VisualSFM [Wu, 2015] qui implémente le logiciel libre CMVS [Furukawa et Ponce, 2007] (nuage au centre, à droite), avec le logiciel propriétaire PhotoScan [PhotoScan] (nuage en bas, à gauche) et avec le logiciel propriétaire ReCap360 [ReCap360] (modèle en bas, à droite). Nous rappelons que contrairement à ces logiciels de la littérature, les nuages que nous produisons sont bruts (non filtrés).

	Notre algorithme	MicMac	PhotoScan	VisualSFM	ReCap360
Densité	***	***	***	*	**
Texture	***	***	***	**	*
Complétude	***	**	***	*	***
Redondance	**	*	***	**	*
Bruit	**	*	**	**	**

**Table 4.2** – *Appréciations des résultats présentés à la figure 4.22 page 156*

C'est pourquoi nous avons réalisé un autre échantillon de mesures sur des petits objets. Cela nous permet en effet de réduire l'erreur de vérité terrain, car nous pouvons utiliser des outils de mesure plus précis ( $\pm 0,5$  mm). De plus, nous disposons d'un meilleur contrôle sur les points d'ancrage, car nous pouvons extraire l'objet étudié de la zone d'étude : les mesures peuvent alors être refaites autant de fois que nécessaire en fonction des points d'ancrage disponibles sur le nuage. Pour que les résultats puissent être significatifs, ces petits objets doivent posséder une structure et des caractéristiques physiques (forme, texture, couleur, etc.) comparables à celles des objets qui composent la zone d'étude. Nous avons donc choisi des coquilles d'ormeau, trouvées sur le terrain. La figure 4.21 page 155 montre la reconstruction tridimensionnelle de deux coquilles ainsi qu'un petit échantillon de mesures réalisées physiquement sur l'une d'entre elle et sur le nuage tridimensionnel associé. L'écart en justesse entre les distances physiques et les distances sur le nuage de points correspond environ à la taille de l'échantillon au sol ( $j < \pm 1 \times \text{GSD}$ ), ce qui est cohérent avec les résultats *in situ*.

Enfin, en ce qui concerne les nuages globaux, nous avons vu que l'erreur moyenne systématique calculée sur plusieurs centaines de points pour chaque transformation n'excédait pas cinq fois la taille de l'échantillon au sol ( $\text{RMSE} \lesssim 5 \times \text{GSD}$ ). Ce résultat est cohérent avec la justesse des nuages locaux. Quant à la justesse des nuages globaux, nous n'avons pu l'évaluer, car bien que nous disposons des mesures de vérité terrain à Collioure, les images acquises n'ont pas permis la finalisation d'un nuage global. Parmi les raisons principales, nous pouvons citer la présence de très nombreuses images floues, liées aux conditions météorologiques, qui créent des ruptures importantes dans le chaînage temporel et la qualité insuffisante que nous avons évoquée de l'étalonnage effectué en mer qui ne nous permet pas la réalisation d'une bonne reprojection. Ce cas souligne l'importance d'aborder notre problématique d'un point de vue systémique : dès lors que l'un des maillons fait défaut, c'est la chaîne tout entière qui ne fonctionne plus. La maîtrise de chacun d'entre eux est fondamentale.

**Concernant les résultats des logiciels de la littérature** La figure 4.22 page 156 montre les différents résultats obtenus à partir d'une séquence de 18 images sous-marines acquises sur la zone du Cap de Nice par notre algorithme ainsi que par les logiciels de la littérature accessibles : MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2014], VisualSFM [Wu, 2013] (qui implémente CMVS [Furukawa et Ponce, 2007]), PhotoScan [PhotoScan] et ReCap360 [ReCap360]. Nous remarquerons de prime abord que nous pouvons espérer une amélioration de nos résultats en traitant les images en pleine résolution comme nous l'avons fait avec les autres logiciels. La version prototype de notre chaîne de reconstruction n'a pas la capacité mémoire pour le faire et les images ont été traitées avec une taille d'échantillon au sol environ six fois moins précise. La comparaison de ces résultats, présentée dans le tableau 4.2 page 157, nous montre que notre nuage global présente une géométrie correcte malgré quelques erreurs de reprojection visibles à certains endroits (bavures sur le nuage). La mesure de la justesse globale permettra d'apporter une information plus précise à ce propos. Notre nuage offre également une bonne densité de points sans que leur quantité ne soit excessive. La complétude est convenable (les zones d'occlusions résiduelles sont peu nombreuses) et la texture de la scène a été bien préservée.





## Conclusion et perspectives

*« Tiens l'œil fixé sur la vue du sommet, mais n'oublie pas de regarder à tes pieds.  
Le dernier pas dépend du premier. Ne te crois pas arrivé parce que tu vois la cime.  
Veille à tes pieds, assure ton pas prochain, mais que cela ne te distraie pas  
du but le plus haut. Le premier pas dépend du dernier. »*

*Le Mont Analogue – René Daumal*

**N**ous nous sommes intéressés tout au long de ce mémoire à la manière d'obtenir une information tridimensionnelle dense, haute résolution et cohérente d'une scène sous-marine en eau peu profonde. Nous avons pour objectif général de contribuer à la conception d'un système permettant d'obtenir à la demande ces données, et ce, à l'échelle des individus, pour permettre la réalisation de cartes thématiques à grande échelle. Introduite au chapitre 1, nous avons exploré l'univers de cette problématique au cours du chapitre 2 à travers trois domaines thématiques : nous avons passé en revue les caractéristiques particulières du milieu aquatique qui le différencient du milieu aérien, puis les spécificités des plateformes mobiles de télédétection rapprochée qui permettent l'accès flexible et systématique à la haute résolution et enfin, les outils et méthodes qui donnent accès à l'acquisition de données tridimensionnelles.

À l'issue de cette étude, nous avons choisi de nous tourner vers l'utilisation de capteurs optiques montés sur des petites plateformes sous-marines automatisées pour l'acquisition et les méthodes de reconstruction tridimensionnelle dense pour l'extraction de l'information. Nous avons proposé dans le premier volet du chapitre 3 une explication plus approfondie sur le procédé de reconstruction afin de mieux en saisir les tenants et les aboutissants. Nous avons conclu cet exposé en dégageant cinq problèmes majeurs qui émergent lors de l'utilisation de ces techniques dans le milieu sous-marin : problème d'appariement dense, problème d'étalonnage, problème d'acquisition *in situ*, problème de recalage des données et problème de redondance des données.

Dans le deuxième volet du chapitre 3, nous avons présenté un tour d'horizon sur les solutions apportées par la communauté sur chacun de ces problèmes à travers de nombreuses thématiques, ce qui nous a permis de positionner nos contributions. Que ce soit pour cet état de l'art ou pour celui plus général présenté au chapitre 2, une attention particulière a été portée sur la taxonomie des méthodes exposées ainsi qu'à leur illustration.

L'approche que nous avons retenue pour répondre aux cinq problèmes est délibérément transverse sur l'ensemble de la chaîne d'acquisition et de traitement. Nous avons détaillé nos contributions sur chacun des problèmes dans le troisième volet du chapitre 3, puis nous avons présenté les résultats d'une mise en application sur le terrain de l'ensemble de notre chaîne dans le chapitre 4. Nous proposons ici au lecteur un résumé de nos principales contributions.

**Concernant le problème d'appariement dense sous-marin** Nous avons proposé une stratégie de propagation de l'appariement depuis les zones les plus fiables jusqu'aux frontières des zones contenant peu d'information. En modifiant le détecteur de Harris, nous obtenons un algorithme robuste à la variabilité en qualité de nos images pour un surcoût de 10 % seulement sur le temps de calcul. Pour amorcer la propagation, notre algorithme forme un appariement épars plus fiable (55 %) et plus stable (55 %) que ceux de la littérature (fiabilité < 45 % et stabilité < 40 %). En limitant le rayon d'expansion, nous avons montré que notre méthode permettait d'exclure automatiquement les zones sans information avec un coût moindre (calcul de distance). Nous avons également montré qu'une synchronisation des prises de vues associée à une adaptation dynamique de la vitesse de déplacement du vecteur permettait de s'abstraire des mouvements et offrait l'opportunité de reconstruire la faune et la flore. Les nuages produits contiennent entre 60 et 85 % des pixels des images (pour des taux de recouvrement compris entre 70 et 90 %) et la justesse de la reprojection est de deux fois la taille de l'échantillon au sol.

**Concernant le problème d'étalonnage sous-marin** Nous avons choisi le modèle de la littérature le plus compatible avec les contraintes opérationnelles et nous avons rassemblé au sein d'une procédure les différentes solutions qui permettent d'améliorer l'estimation. Nous avons proposé un algorithme qui permet de trier directement sur zone les grands jeux de données acquis pour en tirer un sous-échantillon pertinent et suffisant pour l'étalonnage, permettant ainsi d'accélérer et d'améliorer les chances de réussite de la phase d'optimisation des paramètres. Nous avons montré que la détection des mires pouvait être robuste au sous-échantillonnage avec une précision équivalente et une perte sur le taux de détection inférieure à 20 % en contrepartie d'une économie en temps de calcul supérieur à 80 %. Nous avons montré que notre algorithme de sélection permettait d'extraire des sous-échantillons pertinents pour l'étalonnage à partir des jeux de données. Enfin, nous avons proposé une adaptation au milieu sous-marin de l'algorithme de binarisation utilisé par l'algorithme de détection pour passer d'un taux de détection inférieur à 10 % en moyenne à un taux supérieur à 80 %.

**Concernant le problème d'acquisition *in situ*** Nous avons adapté au milieu sous-marin une méthodologie qui permet de dimensionner les paramètres d'acquisition pour obtenir des données à l'échelle des individus répondant aux besoins principaux des études applicatives. Nous avons ajouté à ces critères la simplicité logistique et la répliquabilité, qui impactent notamment les dimensions et les coûts (réalisation, maintenance, déploiement). Nos principaux apports sont la marinisation de moteurs *brushless* et un *design* simple, mais robuste. Cela nous a amenés à concevoir l'un des premiers microrobots hybrides agiles ( $20 \times 20 \times 30$  cm, < 10 kg, ~2000 €). D'autre part, nous avons montré qu'il était possible d'obtenir des taux de synchronisation corrects et stables (de l'ordre du millième ou centième de seconde) même avec des capteurs légers peu onéreux. Enfin, nous avons vérifié que nos niveaux d'automatisation (asservissement profondeur, contrôle de la puissance des moteurs) permettent d'assurer l'obtention de la taille voulue d'échantillon au sol et la limitation des flous de bougé et de synchronisation. Par ailleurs, nous avons proposé une méthode pour simplifier la prise de relevés sur le terrain qui consiste à enregistrer les informations de distance via des cordelettes et à reporter ultérieurement les mesures métriques. La procédure est alors réalisable par un seul opérateur et moins coûteuse en temps pour une précision égale.

**Concernant le problème de recalage des nuages de points** Nous employons une stratégie de recalage séquentielle de la famille *Structure From Motion* (SFM) pour replacer les nuages locaux dans un repère commun. Nous avons établi une méthode mixte « image à image » (F2F) et « modèle à modèle » M2M pour la mise en correspondance et l'estimation des transformations successives. L'erreur systématique du recalage calculée sur plusieurs centaines de points est en moyenne inférieure à cinq fois la taille de l'échantillon au sol ( $RMSE \lesssim 5 \times GSD$ ). Pour corriger la dérive introduite dans la trajectoire par le cumul de ces erreurs, nous utilisons les informations fournies par les fermetures de boucles avec un algorithme de filtrage (pas de correction des poses passées) qui réorganise la trajectoire en arbre par des coupures sur le graphe des poses. Cette minimisation de la longueur des branches de l'arbre permet de réduire par un facteur 2 à 4 le nombre maximum de transformations cumulées. La détection des fermetures de boucle est guidée par une spatio-carte pour limiter les tests.

**Concernant le problème de redondance des nuages de points** Nous avons choisi d'éliminer la majorité de la redondance en écartant de la reconstruction du nouveau nuage toutes les zones de recouvrement. Nous obtenons cette information à partir de l'appariement épars réalisé entre deux couples successifs ou spatiaux lors du recalage. Tous les points appariés sont retirés de la liste des germes stéréoscopiques du nouveau couple et il en va de même pour ceux situés dans leur voisinage proche. Afin de permettre une réévaluation des parties où la propagation a échoué (occlusion par exemple) dans la zone de recouvrement, nous conservons les points dont le voisinage sur la carte de disparité est peu renseigné. Cette stratégie nous permet d'économiser en moyenne sur nos jeux d'images la création d'environ 50 % des points lors de l'ajout d'un nouveau couple pour une complexité algorithmique minimale.



Nous concluons maintenant ce mémoire en proposant au lecteur une ouverture sur différentes thématiques connexes à notre sujet. Par ailleurs, nous invitons également le lecteur à consulter les annexes sur les valorisations scientifiques et pédagogiques du travail effectué (annexe [A](#) page 169), sur les récits des missions terrain réalisées (annexe [B](#) page 175) et sur les historiques des séances de test en fosse de plongée (annexe [C](#) page 221).

**À propos de la complétude des données** Cette information critique représente la répartition spatiale des zones imagées et le niveau de qualité des données acquises. Si elle est obtenue en quasi temps réel, grâce aux informations issues des cartes de disparité ou du nuage global par exemple, elle peut éviter un retour sur zone pour compléter la reconstruction. La reconstruction quasi temps réel est un sujet largement traité dans la littérature pour les nuages épars, notamment avec les techniques de type SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*). Les stratégies peuvent s'appuyer sur la réduction du nombre de données à traiter (baisse de la résolution) d'une part et les optimisations de code, d'algorithme ou encore de matériel d'autre part. À titre d'exemple, des tests préliminaires ont montré que la simple transposition des parties les plus coûteuses du prototype de notre chaîne de reconstruction (sans optimisation de code ni d'algorithme) sur FPGA et surtout sur GPU permettait un gain en temps d'exécution supérieur à 50 %.

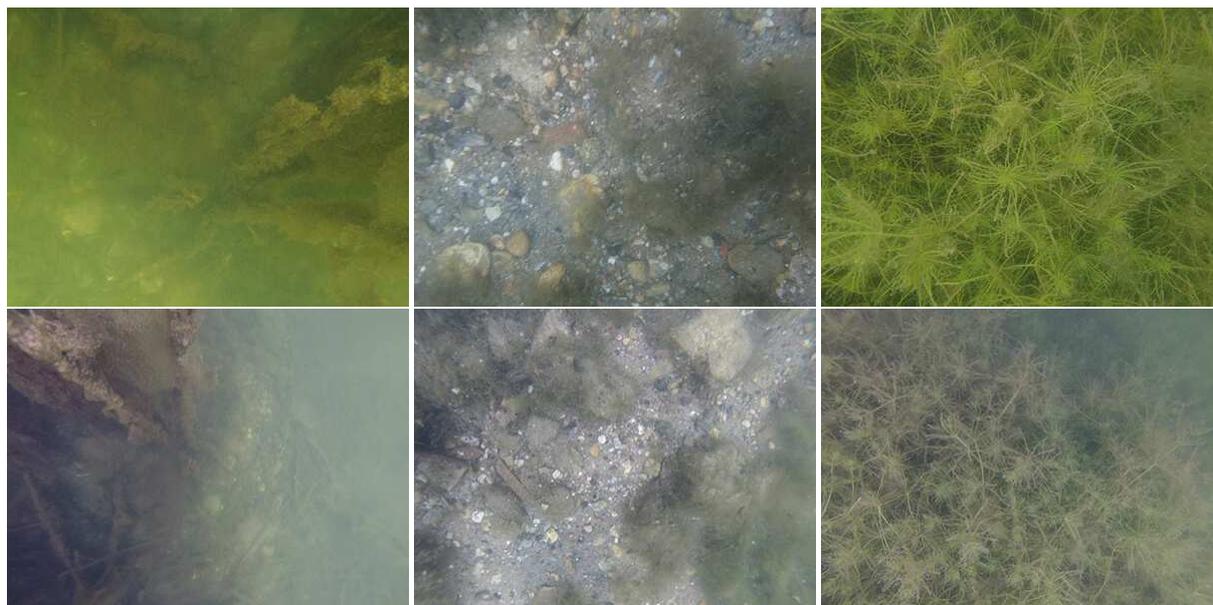
[[Hadjitheophanous et al., 2010](#); [Braux-Zin, 2012](#); [Sanfourche et al., 2013](#), ...]

**À propos de l'analyse des données tridimensionnelles produites** Les nuages denses produits par nos algorithmes sont bruts. Pour faciliter l'analyse, il est d'usage de travailler sur la fluidité de leur visualisation (avec les techniques de *page level*, par exemple) et sur leur post-traitement : filtrage pour retirer le bruit, maillage pour réduire la complexité, correction des couleurs pour aider à l'identification, etc. De nombreuses méthodes existent dans la littérature, mais il serait intéressant de les adapter de manière spécifique au milieu sous-marin ou plus généralement aux milieux naturels en prenant notamment en compte la problématique de distinction du végétal et du minéral.

[[Johnson-Roberson et al., 2010](#); [Petitpas, 2011](#); [Campos et al., 2015](#), ...]

**À propos de recalages multimodaux** Nous avons traité dans nos travaux la reconstruction d'une scène tridimensionnelle dense cohérente à partir de données acquises au sein d'une même mission par un vecteur. La problématique peut s'élargir par ordre de complexité à : des données prises par plusieurs vecteurs, des données prises à différentes dates (revisite, complément, etc.), des données de densité ou de sources différentes (éparses / denses, lidar / sonar / caméra, etc.), des données des terres émergées et submergées (gestion de l'interface air / eau et de ses turbulences).

[[Williams et al., 2010](#); [Papadopoulos et al., 2011](#); [Méline, 2013](#), ...]



**Figure 5.1** – Trois échantillons d’images sous-marines (en haut) acquises par la caméra PiCam avec la PiZero comme ordinateur de bord dans le lac de la Plage Bleue (Valenton, juillet 2016) par temps nuageux. Les images GoPro prises à proximité au même instant sont données (en bas) à titre de comparaison [© ⓘ ⓘ L. Avanthey et al.].

**À propos des vecteurs d’acquisition** Les microrobots possèdent un fort potentiel de développement. Leurs deux atouts principaux, agilité et répliquabilité, offrent non seulement l’opportunité de procéder plus fréquemment et plus largement au recueil systématique de données, mais ils ouvrent également la porte à la collaboration. En effet, la réalisation rapide et abordable de plusieurs unités est rendue possible grâce à la révolution électronique (miniaturisation et amélioration de la performance des composants<sup>1</sup>) et à l’émergence des solutions de prototypage rapide (simplification et démocratisation de la conception des systèmes complexes<sup>2</sup>). Comme nous avons pu l’observer dans le domaine des systèmes d’information géographique (SIG) avec OpenStreetMap ou dans celui de l’inventaire des espèces avec les observatoires de la biodiversité, ces nouvelles méthodes de sciences participatives qui impliquent des non professionnels offrent un réel potentiel pour la communauté scientifique. [Wilkinson *et al.*, 2011 ; Anderson, 2012 ; Gershenfeld, 2012, ...]

**À propos des capteurs d’acquisition** L’évolution dont nous sommes les témoins en robotique s’applique également au domaine des capteurs dont la taille, les performances et les prix doivent eux aussi s’adapter au nouveau paradigme. Nous voyons arriver sur le marché une nouvelle génération de microcapteurs performants et programmables qui vont faciliter la conception de capteurs communicants (un ordinateur dans le boîtier de chaque caméra, un ordinateur dans le robot) plutôt que des capteurs dépendants (ordinateur uniquement dans le robot) ou uniquement autonomes (pas de communication avec le robot). Nous avons réalisé à titre d’exemple un test d’acquisition en lac avec la très récente caméra PiCam V2 et une unité de traitement PiZero<sup>3</sup>. Un échantillon de ces prises de vue est disponible sur la figure 5.1 page 162. Ces premiers résultats sont assez encourageants, même si la qualité d’adaptation du temps d’exposition à la vitesse de déplacement reste à évaluer. [Siegel, 2001 ; Privat, 2002 ; Maksimović *et al.*, 2014, ...]

1. À titre d’exemple, le coût d’un transistor a été réduit par plus de cinq billions en 60 ans et sa taille par plus de 99 %.

2. Cartes de développement (Arduino, Raspberry Pi, etc.), interlogiciels (*middlewares*, ROS ou ROCK par exemple) ou outils de conception (CNC, imprimantes 3D, imprimantes de circuits électroniques, etc.) mis à disposition dans les ateliers de fabrication (*fablab*).

3. Informations de comparaison :

- PiCam V2 (3280 × 2464 px – 1,12 μm – 3 g – 25 × 23 × 9 mm – \$25)

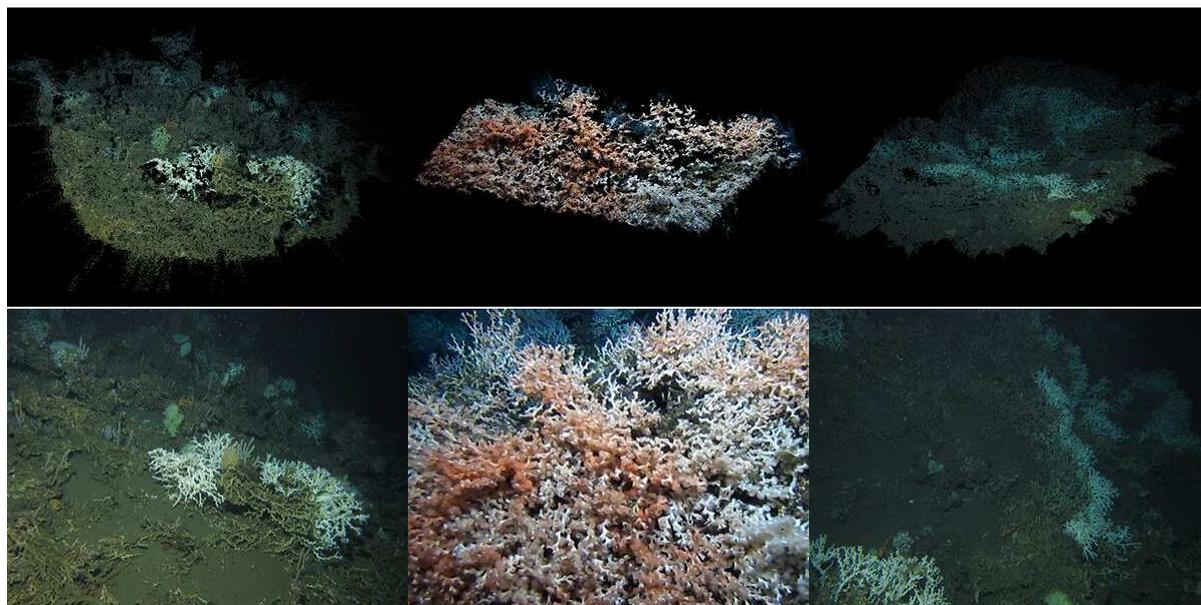
- uEye (1280 × 1024 px – 5,30 μm – 16 g – 36 × 36 × 21 mm – 450 €)

- GoPro H3+ (3680 × 2760 px – 1,46 μm – 74 g – 59 × 41 × 21 mm – 450 €)

- Mk802-IV (1,6 GHz – 4 cœurs – 2 GB RAM – 97 × 28 × 12 mm – 19 g – \$80)

- Raspberry Pi 3 (1,2 GHz – 4 cœurs – 1 GB RAM – 86 × 57 × 17 mm – 45 g – \$35)

- PiZero (1,0 GHz – 1 cœur – 512 Mo RAM – 65 × 30 × 5 mm – 9 g – \$5)



**Figure 5.2** – Nuages tridimensionnels [© L. Avantbey et al.] produits avec notre algorithme de reconstruction (en haut) à partir des images [images ROV © MARUM, Centre des Sciences de l'Environnement Marin, Université de Brême, Allemagne] acquises sous une lumière artificielle par le ROV SQUID du MARUM lors de l'expédition M122 « ANNA » du R/V METEOR (en bas).

**À propos de la mise à disposition des données** Les modèles actuels tendent de plus en plus à rendre gratuits l'accès et la diffusion des données (*Open Data*) et reporter les intérêts sur l'analyse ou l'extraction d'information (*Data Mining*). Cette évolution enthousiasmante devrait contribuer aux avancées scientifiques en facilitant l'aspect collaboratif. Néanmoins, à ce jour, les infrastructures ne sont pas encore tout à fait prêtes pour une mise en œuvre opérationnelle (quantité et taille des données, tris pertinents, etc.) et la transition de l'ancien modèle vers le nouveau demandera donc un peu de temps.

[Murray-Rust, 2008 ; Molloy, 2011 ; Kitchin, 2014, ...]

**À propos de l'éclairage artificiel en l'absence de lumière naturelle** Nos travaux ont porté pour le moment uniquement sur l'étude de scènes éclairées par lumière naturelle. Or nous avons indiqué que nous nous intéressons à la plage 0-100 m et au-delà d'une certaine profondeur, la lumière du soleil ne pénètre plus : un éclairage artificiel est requis. Les effets de cette illumination sont différents des effets variables rencontrés à proximité de la surface, mais certaines problématiques se recouvrent : éclairage non uniforme, zones sans information, etc. À titre expérimental, nous avons pu tester notre chaîne de reconstruction sur des données acquises par le ROV SQUID du MARUM entre 350 et 400 m de profondeur au large de la marge continentale angolaise lors de l'expédition M122 « ANNA » du R/V METEOR (*Cold-water Coral Ecosystems off ANgola and NAmibia*) [Hebbeln et al., 2016]. Les résultats sont plutôt encourageants et peuvent être observés à la figure 5.2 page 163. L'algorithme ne rencontre pas de difficulté particulière par rapport aux images en eau peu profonde.

Nous remercions chaleureusement Pr. Dierk Hebbeln (scientifique en chef de l'expédition M122 du R/V METEOR), Dr. Claudia Wienberg (co-chef scientifique) ainsi que Vincent Vittori (membre de l'équipe du ROV SQUID) pour nous avoir fourni les images du ROV SQUID.

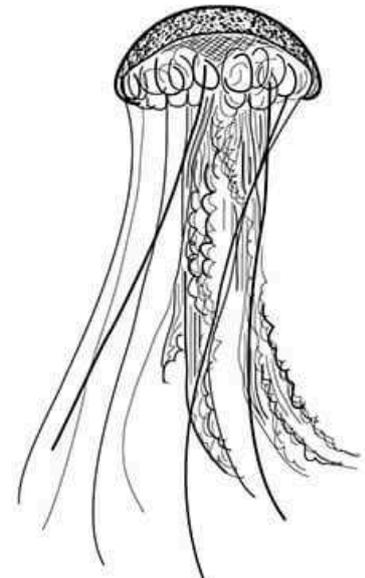
[Rives et al., 1978 ; Garcia et al., 2002 ; Robertson-Brown, 2013, ...]







# ଶିଶୁ





# **Annexes**



# Publications, valorisation & pédagogie

*"The relevant equation is : Knowledge = power = energy = matter = mass ;  
a good bookshop is just a genteel Black Hole that knows how to read."*

*Guards ! Guards ! – Sir Terry Pratchett*

*« L'équation appropriée est la suivante : Savoir = pouvoir = énergie = matière = masse ;  
une bonne librairie n'est qu'un trou noir distingué qui sait lire. »*

*Au guet ! – Sir Terry Pratchett*



ette thèse a fait l'objet de 5 articles de journaux et 1 publication dans une conférence internationale avec actes. Les communications ont pris la forme de 3 présentations orales et 2 sessions poster.

*Un grand merci à Jane et Peter pour avoir eu la patience de relire et corriger nos articles en anglais !*

Les compétences de recherche ont été revalorisées à travers les enseignements et les encadrements de projets dans les domaines de l'informatique et de l'électronique numérique.

## A.1 Revues internationales avec comité de lecture

- *En attente de parution* Antoine **Gademer**, Loïca **Avanthey**, Laurent **Beaudoin**, Michel **Roux**, Jean-Paul **Rudant** : Micro-charges utiles dédiées à l'acquisition de données par drone pour l'étude des zones naturelles, dans *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT)*.
- *En attente de parution* Laurent **Beaudoin**, Antoine **Gademer**, Loïca **Avanthey**, Samira **Mobaied**, Jean-Paul **Rudant** : Faucon noir, retour d'expérience sur une étude de la biodiversité par drone, dans *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT)*.
- [**Avanthey et al., 2016**] Loïca **Avanthey**, Laurent **Beaudoin**, Antoine **Gademer**, Michel **Roux** : Tools to Perform Local Dense 3D Reconstruction of Shallow Water Seabed, dans *Sensors*, volume 16, numéro 5, page 712, 2016.
- [**Beaudoin et al., 2015**] Laurent **Beaudoin**, Loïca **Avanthey**, Antoine **Gademer**, Michel **Roux**, Jean-Paul **Rudant** : Dedicated payloads for low altitude remote sensing in natural environments, dans *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XL-3/W3, pages 405-410, 2015.



**Figure A.1** – De gauche à droite [© L. Avanthey et al.] : remise des prix à la conférence OCOSS à Nice (octobre 2013), extrait du poster présenté au colloque Drones à Montpellier (juin 2014), présentation devant les membres du GDR à l'IFREMER lors des journées Robotique Marine à La Seyne-sur-Mer (avril 2015).

- [Gademer et al., 2013] Antoine Gademer, Laurent Beaudoin, Loïca Avanthey, Jean-Paul Rudant : Application of the Extended Ground Truth concept for risk anticipation concerning ecosystems, dans *Radio Science Bulletin (RSB)*, volume 345, pages 35-50, 2013.

## A.2 Conférences internationales avec comité de sélection et actes

- [Avanthey et al., 2013] Loïca Avanthey, Antoine Gademer, Laurent Beaudoin, Michel Roux : First steps for operational dense and high-resolution mapping of shallow water using dedicated robots, dans *Conference on Ocean & Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models & information Systems, OCOSS'13*, Nice, France, octobre 2013. **Best Student Paper Award**

## A.3 Communications

- [Présentation orale] Laurent Beaudoin, Loïca Avanthey : Dedicated payloads for low altitude remote sensing in natural environments, dans *ISPRS Geospatial Week - GeoUAV Workshop*, La Grande Motte, France, octobre 2015.
- [Présentation orale] Loïca Avanthey : Premières étapes pour la cartographie opérationnelle dense et haute résolution en eau peu profonde avec des robots, dans *GDR Robotique : Journées Robotique Marine à l'IFREMER*, La Seyne-sur-Mer, France, avril 2015.
- [Poster] Antoine Gademer, Loïca Avanthey, Laurent Beaudoin : Micro-charges utiles dédiées à l'acquisition de données par drone pour l'étude des zones naturelles, dans *Colloque scientifique francophone Drones et moyens légers aéroportés d'observation*, Montpellier, France, juin 2014.
- [Poster] Laurent Beaudoin, Antoine Gademer, Loïca Avanthey : Faucon noir, retour d'expérience sur une étude de la biodiversité par drone, dans *Colloque scientifique francophone Drones et moyens légers aéroportés d'observation*, Montpellier, France, juin 2014.
- [Présentation orale] Loïca Avanthey : First steps for operational dense and high-resolution mapping of shallow water using dedicated robots, dans *Conference on Ocean & Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models & information Systems, OCOSS'13*, Nice, France, octobre 2013.

## A.4 Enseignements

- [ESIEA - L1] TD et TP d'informatique : *Introduction à l'algorithmique et à la programmation en langage C* (semestre 1 - 18 h de TD, 36 h de TP) et *Conception et analyse d'algorithmes* (semestre 2 - 18 h de TD, 36 h de



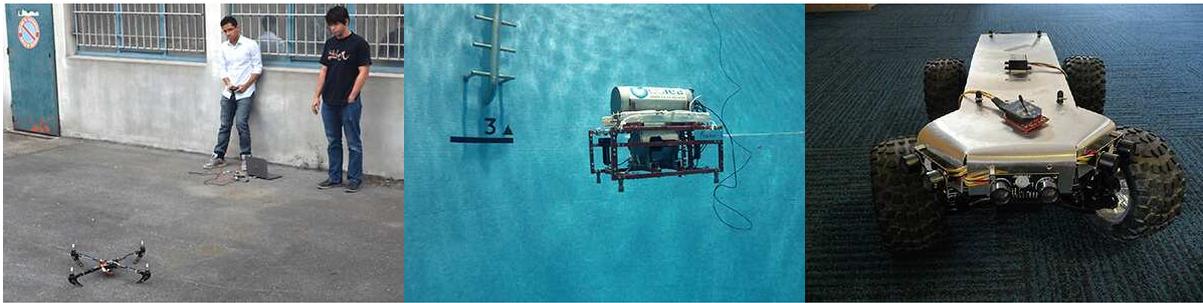
**Figure A.2** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : « Projet Drone » à l'EPF, cours « Télédétection rapprochée et microdrones » à l'UPEM et TP « Hack e3 Drive » à l'ESIEA.

TP). Base de l'algorithmique et de la programmation. Mise en place avec l'équipe d'une réforme complète des cours, TD et TP et conception d'outils pédagogiques (autocorrect, projets traitement d'images, etc.). Équipe : L. Beaudoin, A. Gademer, R. Erra, 2012 à 2014.

- [EPF - L3-M1] TP d'informatique : *Extraction d'information - Programmation VBA et bases de données MySQL* (8 h). Prise en main des outils, initiation à la production d'indicateurs. 2016.
- [ESIEA - M1] TP de robotique : *Hack e3 Drive* (12 h). Introduction à la programmation embarquée sur microcontrôleur (DSPIC) et prise de contrôle électronique d'une voiture radiocommandée du commerce. Création du module. Équipe : L. Beaudoin, A. Gademer, 2013 à 2014.
- [UPEM - M2] Cours de spécificité : *Télédétection rapprochée et microdrones* (6 h). Télédétection basse altitude ou *in situ*, drones volants, terrestres, de surface et sous-marins, charges utiles et capteurs, traitements des données, législation et applications. 2015 à 2016.
- [EPF - M2] Cours de spécificité et projet : *Drones aériens* (30 h). Compréhension des drones volants d'un point de vue système et étude de la législation en vigueur, conception et réalisation de 5 miniquadricoptères par petits groupes, vols d'essai des prototypes en gymnase. 2014.

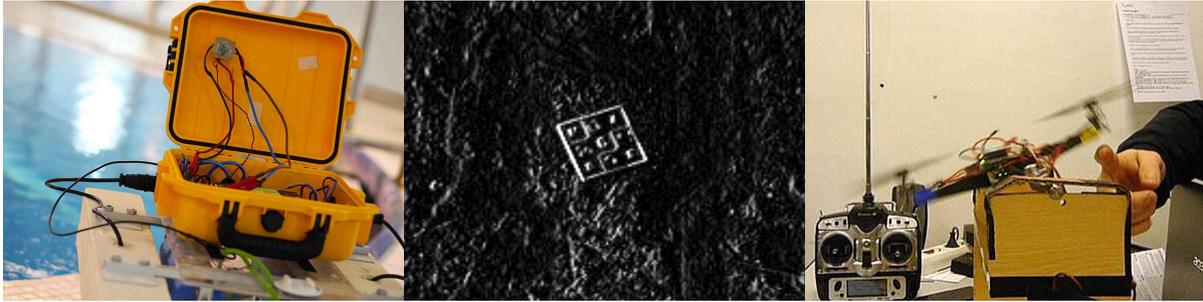
## A.5 Co-encadrement de projets étudiants

- [2015-2016 - M1] T. Demme : Odométrie visuelle – Tracking d'une cible sous-marine à partir d'un véhicule de surface automatisé (USV), *rapport interne Espoir Recherche*, ESIEA.
- [2015-2016 - M1] M. Mayeur : Odométrie visuelle – Reconstruction 3D sous-marine à partir d'un véhicule de surface automatisé (USV), *rapport interne Espoir Recherche*, ESIEA.
- [2015-2016 - M1] A. Soto : Odométrie visuelle – Égo-localisation visuelle à partir d'une caméra 360° montée sous un véhicule de surface automatisé (USV), *rapport interne Espoir Recherche*, ESIEA.
- [2015-2016 - M1] T. Demme, P. Kutz, M. Mayeur, A. Soto : Kraken – Conception d'un véhicule de surface automatisé (USV) avec flotteurs gonflables et dérouleur de câble faisant office de relais entre un robot sous-marin et sa station au sol, *rapport de projet interne*, ESIEA.
- [2015-2016 - L2] M. Schuller, A. Soulat, A. Teboulle, M. Velay : *Data mining* – Préparation automatique d'un jeu d'images sous-marines : détection et reconnaissance des mires, détection des images floues, etc., *rapport de projet interne*, ESIEA.
- [2014-2015 - M1] V. Liccioni, S. Pairault, R. Philippe : Stéréovision – Optimisation d'une chaîne de stéréo-reconstruction 3D sous-marine, *rapport de projet interne*, ESIEA.



**Figure A.3** – De gauche à droite [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.] : projets étudiants Multicoptère (2012-2015 – M1), Aquatis (2013-2014 – L3) et Bl'Hack Panther (2013-2014 – L2) dans le cadre du laboratoire ATIS de l'ESIEA.

- [2014-2015 - M1] T. Cazeilles, J. Deroubaix, G. Elisabeth, X. Losco : Égo-localisation – Utilisation de la plateforme ROS pour l'égo-localisation et la reconstruction 3D sur l'USV, *rapport de projet interne*, ESIEA.
- [2014-2015 - L2] F. Caron, A. Ferreira, Y. Kidjo, M. Lazo La Torre : Aquatis – Asservissement cap et vision, *rapport de projet interne*, ESIEA.
- [2013-2014 - L3] L. Benguigui, V. Liccioni, S. Pairault : Stéréovision – Traduction en langage C d'un prototype de chaîne de reconstruction 3D sous-marine, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L3] C. Michel, R. Philippe, V. Marquet : Aquatis – Asservissement cap et vision sur l'UUV, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L3] K. Combet, M. Hassan, P. Kalvindkar : Multicoptère – Asservissement attitude, hauteur et position d'UAV, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L3] L. L. D. Tchoteke, D. Pavius, M. Bangoula, R. Sarbaji : Tri-cam – Réalisation d'une charge-utile multicaméras asservie, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L2] S. Féaudierre, N. Gossart, R. Kamalakaran : Kraken – Intégration de RoboPic & RoboCom sur l'USV, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L2] T. Demme, J. Mankouri, S. Raullet, S. Ventribout : Bl'Hack Panther – Interfaçage d'une centrale inertielle sur un UGV, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2013-2014 - L2] Y. Benboubetra, J. Deman, W. Descamps : Bl'Hack Panther – Réalisation d'une tourelle asservie aux mouvements de la tête pour une vision déportée sur UGV, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - M1] A. Putters : Multicoptère – Intégration d'une centrale inertielle à bas coût et asservissements pour un UAV, *rapport interne Espoir Recherche*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - M1] J. Shuman : Multicoptère – Asservissement en position par Optic Flow pour un UAV, *rapport interne Espoir Recherche*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - M1] A. Clouet, A. Putters, J. Shuman : Multicoptère - Conception d'une carte électronique pour des drones modulaires à bas coût, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - L3] J. Baron, A. Devin, Q. Vernot : Odométrie laser – Égo-localisation laser pour robots automatisés, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - L3] U. Budin, V. Guillebaud, H.-H. Traing, V. Vigneux : Odométrie visuelle – Vision stéréoscopique pour égo-localisation de robots automatisés, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - L3] V. Abbadie, T. Fanel, M. Haubensack, P. Hewins, S. Lamyeyche : Kraken – Localisation dans le plan d'une cible sous-marine à partir d'un robot de surface, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.



**Figure A.4** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : projets étudiants Kraken (2015-2014 – L2), Data mining (2015-2016 – L2) et Multicoptère (2015-2014 – L3) dans le cadre du laboratoire ATIS de l'ESIEA.

- [2012-2013 - L2] P. Ecarlat, V. Liccioni, S. Pairault : Bl'Hack Panther – Évitement d'obstacles pour robot roulant, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.
- [2012-2013 - L2] J. Baud, L. Cousi, R. Philipe, C. Michel : Aquatis – Prise en main, documentation et stabilisation du robot sous-marin, *rapport de projet interne*, ATIS, ESIEA.

## A.6 Co-encadrement de stages

- [2013] - L2 V. Liccioni : Bl'Hack Panther – Fiabilisation de l'évitement d'obstacles pour l'UGV, *rapport de stage ouvrier*, ATIS, ESIEA.
- [2013] - L2 S. Pairault : Bl'Hack Panther – Fiabilisation de l'évitement d'obstacles pour l'UGV, *rapport de stage ouvrier*, ATIS, ESIEA.

*Je profite de cette section pour remercier spécifiquement mes collègues de recherche, d'enseignement et d'administration : à l'Esiea d'hier et d'aujourd'hui, Laurent B., Antoine G., Vincent G., Vincent V., Hubert, Robert, Vincent Gu., Damien, Laurence, Brigitte B., Mohammed, Villy, Brigitte D., Éric K., Cyril, Sylvie, Pierre S., Claire, Vincent T., Dominique S., Jean-Louis, Valérie N., Thomas, Nicole, Dominique R., Carine, Jane, Peter, Martin, Abdelrhani, Abdallah, Catherine D., Gloria, Swann, Pierre A., Isabelle, Maro, Marine, Valérie T., Audrey, Hélène, Camille, Sarah, Laurent H., Antoine L., Omer ; à Télécom, Michel, Florence, Sonia, Flora D., Flora W. ; à Paris-Est, Jean-Paul, Marc, Pierre-Louis, Nicolas ; à l'Epf, Jean-Michel, Catherine L., Odile T., François, Odile S. ; ainsi que tous les autres dont j'ai moins souvent eu l'occasion de croiser le chemin !*

*Je remercie également particulièrement les étudiants qui ont travaillé avec nous durant cette période sur nos travaux de recherche : Joseph Shuman et Anthony Putters, mais aussi Lucas Benguigui, Lucas Cousi, Tanguy Demme, Vincent Liccioni, Mickaël Mayeur, Vincent Marquet, Clément Michel, Sébastien Pairault, Romain Philippe et Alexis Soto.*





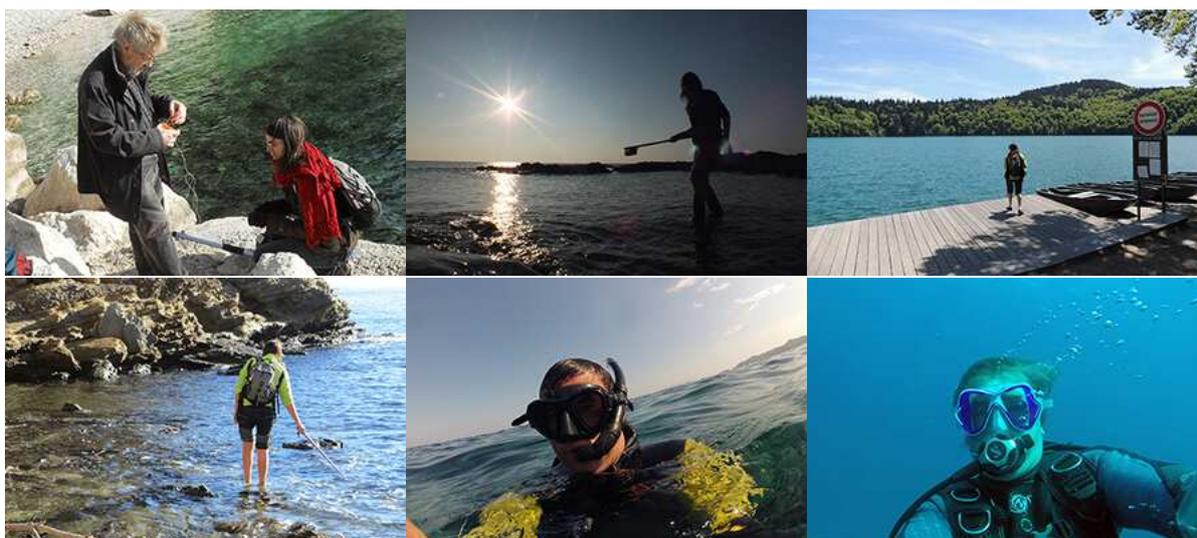
## Récits de mission

*« Notre seul soucis pour le moment est d'achever à bord, le plus vite possible, la mise au point du matériel et de mettre à l'épreuve des hommes et des équipements en vue d'un programme de travail considérable qui nous attend. Il s'agit également de confronter avec la réalité les méthodes que j'ai définies à priori au départ. »*

*La vie et la mort des coraux – Commandant Jacques-Yves Cousteau & Philippe Diolé*

Les récits de mission peuvent apporter aux lecteurs des éléments supplémentaires à ce qui en a été tiré pour écrire la méthodologie présentée dans ce mémoire. En relatant jour par jour les événements et réflexions qui ont eu lieu, ils font partager l'expérience acquise et son impact sur l'évolution des méthodes et des matériels. Dans cette annexe, nous présentons trois missions : deux réalisées au Cap de Nice en 2013 (5 jours en août et 2 demi-journées en octobre) et une dernière sur les côtes du Languedoc-Roussillon en octobre 2015.

En complément de ces campagnes de tests et d'acquisition, des images de travail ont été acquises « à la main » dans différents types d'eau (cf. figure B.1 page 175) : lacs, mers, océans, etc. *Je tiens à remercier particulièrement Laurent et Michel pour les images en plongée, ainsi que tous ceux qui m'ont accompagnée lors de ces différentes acquisitions : Christine, Françoise, Jacky, Vincent, Catherine, Anne-Marie, Carole, Danièle, Laurent, Antoine, Ludmilla, Valérie et Frédéric et notamment les petits scientifiques en herbe, Salomé, Laora, Léna, Jabil, Malo, Lalitha, Axel et Quentin.*



**Figure B.1** – Exemples d'acquisition d'images de travail [© L. Avantbey et al.], de gauche à droite : Marseille, calanque de Sormiou, décembre 2012 – Noirmoutier, plage des Lutins, février 2015 – Besse-en-Chandesse, lac Pavin, juin 2015. La Ciotat, l'anse du grand Mugel, décembre 2015 – Le Lavandou, calanques du Pilon, août 2014 – Égypte, Ras Mohamed, décembre 2015. Pour compléter la liste, voici les autres lieux d'acquisition dont les images apparaissent à différents endroits du mémoire : Mer Rouge, décembre 2011 – Nice, Cap de Nice, juillet 2012 – Valenton, Plage Bleue, juin 2015 – Noirmoutier, Pointe du Devin, juillet 2015 – Palavas-les-Flots, jetée, juin 2014 – La Seyne-sur-Mer, rade, avril 2015 – Saint-Maxire, Lavoir de la Fontaine, décembre 2015 – Valenton, Plage Bleue, juillet 2016.

## B.1 Mission terrain au Cap de Nice - Été 2013

*Relation de la mission terrain au Cap de Nice sur la fin du mois d'août de l'an deux-mille-treize*

*Latitude de 45 degrés, 41 minutes et 8 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitude de 7 degrés, 17 minutes et 45 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

*Loïca Avanthey, Laurent Beauvain, Antoine Gademer et Ludmila Lopes*

Les objectifs de cette première mission sont multiples. Ils sont définis et organisés comme tels :

- **Objectif principal** : Acquérir des couples d'images d'un fond sous-marin rocheux pour pouvoir alimenter le travail de l'année à venir (fusion de nuages de points locaux afin d'obtenir une information tridimensionnelle globale de la zone d'étude).
- **Objectif secondaire a)** : Valider la chaîne d'acquisition des deux bancs stéréoscopiques préparés durant le premier semestre 2013.
- **Objectif secondaire b)** : Obtenir des couples parfaitement synchronisés pour prévenir les problèmes liés aux mouvements présents dans les zones naturelles et effectuer des comparaisons avec des couples non synchronisés.
- **Objectif secondaire c)** : Tester les fonctionnalités du robot sous-marin Ryujin sur le terrain et sa capacité à couvrir une zone.
- **Objectif secondaire d)** : Gagner en expérience opérationnelle pour la réalisation de ce type de missions terrain et l'équipement en repères (mires) de la zone d'étude.

Nous avons choisi le Cap de Nice comme lieu de mission pour les nombreux intérêts qu'il présente : l'eau y est très claire, les fonds essentiellement rocheux – ce qui offre relief et texture – et les profondeurs sont suffisantes (4 à 30 mètres de fonds à moins de 10 m de la côte) ce qui épargne l'utilisation d'un bateau. De plus, cette zone n'est pas accessible en voiture et n'offre pas de plage. Ainsi seuls quelques pêcheurs, plongeurs et randonneurs l'occupent, même en saison touristique. Y trouver un emplacement non occupé reste donc relativement aisé.

### B.1.1 Contraintes opérationnelles en mission terrain

Il s'agit de la première vraie mission terrain sous-marine que nous effectuons, notre expérience en la matière se limitant jusqu'à maintenant à quelques sorties terrain avec des drones volants du laboratoire (Bretagne, Fontainebleau). Nous ne développons des robots sous-marins que depuis 2009, soit depuis 4 ans. Ces derniers sont sortis du laboratoire uniquement pour des séances en fosse de plongée dans une commune à proximité (durée de 2 heures maximum, 60 heures cumulées) et pour le concours SAUC-E trois années consécutives en Italie (durée d'une semaine à chaque fois). Les missions terrains présentent des contraintes opérationnelles beaucoup plus fortes que ces lieux à l'environnement « contrôlé ».

Le principal point critique concerne la dépendance électrique sur la zone d'étude. En effet, nous devons alimenter pendant plusieurs heures l'ensemble du matériel électronique utilisé (robot, station au sol, etc.). Or les allers-retours entre la zone d'étude et le lieu de stockage du matériel (laboratoire temporaire) sont souvent très coûteux en temps (les lieux de mission sont rarement dans des endroits très accessibles), il est donc nécessaire d'apporter sur place suffisamment de matériel de rechange (comme des batteries).

Le nombre de personnes à déployer durant la mission représente un autre élément important. Il faut suffisamment de personnes pour pouvoir transporter l'ensemble du matériel sur la zone d'étude et se répartir les différentes tâches. Mais trop de monde occasionnerait des gênes sur le terrain et complexifierait les déplacements, tant en terme de coût que de temps d'organisation. Nous avons fait le choix de composer l'équipe avec des spécialistes de chaque domaine technique impliqué, mais suffisamment polyvalents pour qu'ils puissent intervenir sur l'ensemble des tâches.



(a) Vue satellite (Google Maps) et aérienne (Bing Maps) du Cap de Nice. La zone d'étude est délimitée par le cadre vert.



(b) Photographie du Sentier de la Mer, chemin de pierres blanches bordant le cap de Nice.

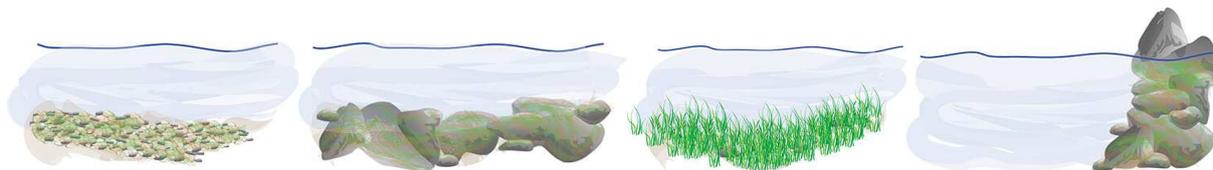
(c) Photographie de la plateforme choisie pour monter le camp en contrebas du Sentier de la Mer.

Figure B.2 – Lieux de la mission [© L. Avantbey et al.].

Enfin, une dernière contrainte non négligeable que nous pouvons soulever est la possibilité de trouver sur la zone d'étude un espace idéal pour pouvoir y établir un camp pratique. Idéalement : une plateforme en dehors des chemins battus qui soit suffisamment large pour y tenir à plusieurs et y installer le matériel (dont la station au sol), qui puisse être équipée pour protéger la zone des conditions climatiques (pluie, soleil, etc.), et qui offre un accès facile à la zone d'étude pour les robots (comme un espace de mise à l'eau ou un espace de décollage accessible et à proximité).

À titre d'information, voici une description succincte du matériel que nous avons emporté. Comme nous effectuons le trajet en train, nous nous sommes contraints à tout faire tenir dans deux petites valises de 20 litres et une grande de 60 litres. Quant au robot lui-même, nous l'avons transporté dans un sac en toile à part pour qu'il ne soit pas abîmé.

- Le matériel opérationnel se compose : de l'ordinateur de la station au sol avec les récepteurs ZigBee et le routeur WiFi, de nos deux bancs stéréoscopiques, des aimants d'arrêt d'urgence du robot (un par personne), des manettes Xbox, des plombs pour lester le robot et d'une serviette pour l'essuyer, des *talkies-walkies*.
- Quant au matériel de rechange, il comporte : des batteries et des piles (du robot, des caméras, du routeur, etc.), les chargeurs associés et une multiprise pour pouvoir brancher le tout dans l'hôtel, des optiques, des cartes électroniques, des moteurs et des contrôleurs, ainsi que des joints toriques.
- Parmi le matériel électronique, nous avons sélectionné : un oscilloscope numérique, une alimentation stabilisée, un fer à souder léger utilisable sur zone, une station à souder (fer à souder et fer à air chaud), de l'étain, des bobines de fil électrique de couleurs, de la gaine thermorétractable de différentes tailles, de la tresse à dessouder, des pinces de précision, une pince à dénuder, une carte électronique de prototypage, des programmeurs et divers composants électroniques passifs (résistances, condensateurs, etc.).



**Figure B.3** – Illustrations de la diversité du fond marin de la zone d'étude du Cap de Nice [© L. Avantbey et al.].  
De gauche à droite : caillasse, rochers, herbiers de posidonies et tombants.

- En ce qui concerne les outils pour toute intervention sur les parties matérielles (mécaniques), nous avons emporté : une pince coupante, une pince à bec long, une pince universelle, des clefs 6 pans, des tournevis de précisions, un tournevis multifonction, des limes, un outil rotatif multifonction et des forets, des vis de divers diamètres, des plaques époxy, un sachet de colliers de serrage (trois tailles), deux ou trois bâtons de colle chaude, du scotch, du chatterton, du scratch double face et du scratch adhésif.

Enfin, nous avons glissé à plat dans les valises des sacs en tissu qui pourront toujours trouver une utilité sur place, notamment pour faciliter le transport sur zone des objets volumineux. Dans nos sacs personnels, nous emportons le matériel de plongée (combinaisons, gilets stabilisateurs, masques et palmes, ordinateurs de plongée, couteaux, plombs, etc.) ainsi que des ordinateurs pour travailler, une caméra GoPro et un appareil photographique pour documenter la mission. À Nice, nous nous fournissons en bouteilles d'eau (dont quelques-unes pour pouvoir rincer le robot), en bouteilles de plongée et nous achèterons une batterie de voiture pour tout ce qui doit se brancher ou se recharger sur zone. Notons que la batterie de voiture ne possède pas un poids négligeable et qu'il est par conséquent préférable de disposer de matériels fonctionnant intégralement sur batterie ainsi que des rechanges pour chacun.

## B.1.2 Premier jour : préparatifs

### Phase de repérage

Après six heures de train pour effectuer le trajet Paris-Nice, nous avons consacré la première demi-journée à repérer les alentours afin de choisir le lieu du camp et définir la zone d'étude. En parcourant le Sentier de la Mer – un étroit chemin de pierres blanches qui longe la côte du Cap de Nice jusqu'à Villefranche-sur-Mer, représenté sur la figure B.2b page 177 – nous avons trouvé une plateforme idéale à un demi-kilomètre de marche. Bien qu'elle nécessite un peu d'escalade pour y accéder, elle correspond dans l'ensemble à nos critères. Comme nous pouvons le voir sur la figure B.2c page 177, elle présente notamment un espace relativement plat pour déployer le matériel et deux marches naturelles au niveau de la mer qui faciliteront la mise à l'eau.

À partir de cette plateforme, nous effectuons ensuite un repérage sous-marin pour prendre des repères visuels et identifier la zone à cartographier. Nous nous décidons pour la crique sur laquelle donne directement la plateforme, soit une zone d'à peu près 1 000 m<sup>2</sup>, dont nous avons reporté les délimitations sur la figure B.2a page 177. Comme illustré par la figure B.3 page 178, les fonds qu'elle présente sont assez variés tant en terme de relief (gros rochers, galets, graviers, tombants, algues épilithes et posidonies) qu'en terme de plateaux de profondeur (environ toutes les variations entre 0 et 10 mètres).

Nous repartons à l'hôtel au coucher du soleil pour commencer la préparation technique.

### Derniers préparatifs techniques

De nombreux problèmes techniques et administratifs durant le premier semestre 2013 ont retardé l'avancée de nos travaux avant de partir. Nous avons cependant pu terminer l'essentiel, c'est-à-dire le banc stéréoscopique et la chaîne d'acquisition qui va avec, sans toutefois pouvoir les attacher sur le robot, ni les tester en piscine. Un



Figure B.4 – Vue annotée de la station au sol [© L. Avantbey et al.].

dernier point manquait : la finalisation de la communication entre l'ordinateur de bord haut niveau et la carte-mère bas niveau. Cette fonctionnalité facilite le déroulement de la mission en informant le robot, et donc nous par la même occasion, sur l'état de l'acquisition en temps réel. C'est donc à ces derniers préparatifs techniques que nous consacrons la première soirée.

Les différentes tâches que nous entreprenons portent sur les points suivants :

- Installer la charge utile sur le robot (banc stéréoscopique que nous avons réalisé avec des caméras uEye placées dans des boîtiers étanches).
- Préparer le robot et effectuer un test complet de fonctionnement.
- Ajouter un moyen de communication quelconque, en WiFi ou UART (par Xbee), afin de pouvoir connaître l'état du programme d'acquisition au cours de la mission sans avoir à ouvrir le robot (ce qui est délicat sur le lieu de mission, car la fatigue et le manque d'attention peuvent engendrer une mauvaise fermeture et donc des fuites aux conséquences catastrophiques).
- Charger l'ensemble des batteries (robot, ordinateurs, caméras, etc.).
- Préparer le matériel qui sera apporté sur le lieu de mission.

Pour achever tout cela, nous dérogeons à la règle inflexible des quatre heures de sommeil minimum en mission longue que nous avons établie. Rencontrant toujours des difficultés pour mettre en place la communication WiFi, nous passons à l'atelier soudure afin d'interfacer un second moyen de communication, cette fois-ci en ZigBee. Nous arrivons à l'établir, mais le débit est très lent : nous pouvons faire transiter des statuts, pas des images. Mais c'est toujours mieux que rien. Nous continuons à avancer sur le WiFi et nous arrivons enfin à communiquer avec l'ordinateur haut niveau, mais uniquement lorsque la carte-mère du robot est éteinte. Ceci ne nous avance guère, car la carte-mère, en plus du contrôle du robot, s'occupe du déclenchement des acquisitions synchronisées. Une photographie de la station au sol et de tous ses moyens de communication est présentée à la figure B.4 page 179. Il est quatre heures du matin et il est temps d'aller nous reposer un peu. La mission a bel et bien démarré.

### B.1.3 Deuxième jour : mission I

Nous dédions le deuxième jour à la réalisation de tests. Les objectifs que nous nous sommes fixés sont les suivants :

- Première mise à l'eau et test d'étanchéité du robot et de la charge utile.
- Test de contrôle du robot.
- Test de fonctionnement de la chaîne d'acquisition (communication, acquisition synchronisée, etc.).



**Figure B.5** – Première mise à l'eau et test d'étanchéité [© L. Avantbey et al.].



**Figure B.6** – Tests de communication entre la carte-mère du robot et la station au sol via le câble ROV pour le contrôle des moteurs et la réception d'informations en provenance du robot [© L. Avantbey et al.].

- Premier balisage du terrain avec des mires (cibles) pour pouvoir acquérir les bases dans ce domaine (où placer les mires, à quelle distance les unes des autres, etc.).
- Premières acquisitions d'images suivies d'une analyse des données afin d'améliorer les critères qui le requièrent (qualité des images, vitesse de déplacement, couloirs de parcours, visibilité, etc.).

Au cours des premiers essais lors du petit-déjeuner, la communication en WiFi fonctionne momentanément, mais cela ne tient pas le redémarrage. Peut-être s'agit-il d'un problème d'interférence ? Nous décidons de ne pas perdre de temps et de gérer le problème directement sur le terrain.

### Installation & tests

Notre équipe est composée de quatre personnes et nous transportons environ 30 kg de matériel chacun sur le Sentier de la Mer jusqu'à la plateforme où nous installons le camp. Pour protéger la zone du soleil, nous tendons des câbles depuis les pitons du chemin en surplomb jusqu'à la mer, et, à défaut de grands morceaux de tissus, nous y suspendons des parasols.

Une fois installés, nous testons à nouveau la communication avec l'ordinateur haut niveau, mais rien n'y fait, nous n'arrivons pas à reproduire le comportement du début de matinée. La communication Zigbee ne se porte pas mieux pour des raisons qui nous échappent. Le temps sur place étant limité, nous décidons d'y aller à l'aveugle et de faire confiance au démarrage automatique de nos programmes.

Nous commençons par les tests d'étanchéité, robot éteint (cf. figure B.5 page 180). Il s'agit là d'une procédure obligatoire avant toute mise à l'eau opérationnelle. De ce côté, tout va bien, notamment pour la charge utile que nous n'avions pas pu expérimenter au préalable.

Nous passons ensuite aux tests de contrôle du robot que nous pouvons voir sur la figure B.6 page 180. Nous vérifions la communication entre la carte-mère et la station au sol, via le câble ROV, afin de pouvoir contrôler



**Figure B.7** – Première tentative d'équipement du terrain avec des mires [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.].

les moteurs et recevoir les informations des capteurs en provenance du robot. Cependant, l'opération remporte moins de succès. Le robot perd très fréquemment le signal ce qui le rend impossible à contrôler. Les symptômes ressemblent fortement au problème que nous avons eu quelques mois auparavant avec le connecteur du câble ROV qui s'était un peu oxydé lors de la dernière édition du concours SAUC-E et provoquait des faux contacts.

Nous pensons l'avoir résolu lors des dernières séances piscine, mais le connecteur n'ayant pas été changé, il n'est pas impossible que le problème resurgisse. À défaut, nous décidons pour le moment d'emporter le robot à la main et de suivre les couloirs de parcours de cette manière afin de nous concentrer sur l'objectif premier : l'acquisition de couples stéréoscopiques en milieu marin.

Quoi qu'il en soit, il est très difficile de piloter un robot sous-marin depuis le sol sans avoir une vue immergée rapprochée. En effet à cause de la surface de l'eau (dioptrisme air/eau), il n'est pas possible de distinguer suffisamment le robot pour pouvoir le contrôler correctement dès qu'il s'éloigne d'un ou deux mètres ou qu'il plonge ne serait-ce que d'un mètre. Or notre robot n'est pas encore équipé pour retransmettre un flux vidéo vers la station au sol et nous n'avons pas terminé le mini catamaran (véhicule de surface - ASV) qui pourrait le filmer au nadir avec une caméra immergée. Nous n'aurions donc pas pu faire de très belles acquisitions en le pilotant, mais tester le contrôle en milieu naturel nous aurait permis de repérer les points d'amélioration pour les prochaines missions.

### Équipement du terrain

Pendant ces tests préparatifs, nous avons discuté sur la manière de positionner nos mires sur le terrain d'étude, comme cela se fait en photogrammétrie. Avant de partir, nous n'avons pas trouvé beaucoup d'éléments sur ce point dans la littérature. En terme de marqueur, nous avons répertorié essentiellement les règles (bandes de couleurs alternées représentant des distances connues) et les marqueurs archéologiques (étiquettes dotées de numéros & quadrillage du terrain avec des bandes souples). Nous estimons que les règles sont importantes pour l'étude d'objets, mais qu'elles sont moins adaptées pour l'étude de zones. Quant aux marqueurs archéologiques, ils ne sont pas très appropriés à des traitements entièrement automatisés. Nous avons également très peu d'informations sur le nombre de mires à utiliser en fonction de la taille et de la nature du terrain, ou encore sur la manière de les positionner et de les repérer.

Face à ces nombreuses incertitudes, nous avons choisi de faire des essais et d'améliorer notre pratique par la suite en tenant compte de nos observations en conditions réelles. Nous avons dessiné nos premiers marqueurs en nous inspirant des mires d'étalonnage aériennes. Ce sont des damiers noir et blanc aux cases larges dont la taille est connue et peut servir d'échelle (équivalent des règles). Nous avons coloré deux cases opposées pour donner un sens d'orientation aux mires et nous en avons plastifié quatre exemplaires afin qu'elles puissent résister à l'eau.

Pour cette première plongée, nous avons décidé de placer les mires à plat sur les rochers en les répartissant



**Figure B.8** – Premier quadrillage de la zone d'étude avec le robot à la main, en surface [© L. Avantbey et al.].

sur les différents niveaux de profondeur, comme indiqué sur la figure B.7 page 181. Nous les avons maintenues avec des cailloux, car les feuilles plastifiées sont légères et le mouvement de l'eau en profondeur provoqué par le ressac des vagues les soulève assez facilement. Nous avons pu vérifier qu'elles étaient bien visibles (position, forme et couleurs), et nous pouvions même les apercevoir depuis la terre ferme à travers la surface de l'eau.

### Premier quadrillage

*Luminosité extérieure bonne, soleil et quelques nuages, vent, température extérieure 25°C – eau à 24-25°C, houle légère, visibilité de 10-15 mètres*

Nous prenons le robot à la main, et nous quadrillons la zone pendant presque deux heures. N'ayant pas encore loué les blocs de plongée, nous évoluons en surface. Nous pouvons voir des photographies de ce procédé sur la figure B.8 page 182. Nous effectuons un premier balayage en suivant des couloirs dans la longueur, puis nous croisons dans l'autre sens, à 90 degrés du premier passage. Nous essayons de temps à autre de communiquer avec l'ordinateur embarqué, mais il reste toujours muet.

Après cette première couverture, nous décidons de ranger et de retourner au laboratoire temporaire. Nous souhaitons d'une part regarder si nous avons acquis des images – et, le cas échéant, vérifier leur qualité –, et d'autre part essayer de régler les problèmes de communication pour avoir un retour sur zone du programme d'acquisition. De plus, un orage s'approche lentement : il est de l'autre côté de la Baie des Anges qui borde la ville de Nice et se dirige droit sur nous. Nous plions bagage !

### Interlude : sauvetage de goéland

Sur le chemin du retour, nous apercevons en contre-bas un goéland (ou gabian si nous prenons le nom local) à l'attitude étrange : à la surface de l'eau, les ailes à moitié dépliées et la tête dans l'eau qu'il redresse par à-coups. Est-il en train d'observer avant de plonger ? Normalement, ces oiseaux guettent directement en vol. Cela nous intrigue et en y regardant de plus près, il semble plutôt être en train de se noyer et tente désespérément de se débattre pour respirer.

Nous posons les affaires sur le chemin et l'équipe se met en action. Laurent part chercher son matériel (palmes, couteau, etc.) à la voiture et repasse dans l'autre sens pour rejoindre l'avancée rocheuse au bout de la crique qui permet d'accéder à l'eau. Pendant ce temps, nous parvenons du haut du chemin à attirer l'attention d'une plongeuse un peu plus loin. Ayant nagé jusqu'à la crique, elle réussit à remonter tant bien que mal le goéland sur les rochers.

À deux, ils bloquent les mouvements du goéland et le libèrent des fils de pêche dans lesquels il est totalement emmêlé, mais le couteau ne peut rien faire pour les hameçons. En effet, le goéland s'est enchevêtré dans une palangre qui était vraisemblablement accrochée dans un poisson que nous avons retrouvé un peu après dans la crique : il a trois hameçons dans une patte, un dans l'autre, un dans l'abdomen et un dernier dans le bec. Rien d'étonnant à ce qu'il n'arrive pas à s'en dépêtrer !



**Figure B.9** – Un goéland s’est empêtré dans une palangre et se noyait dans la crique. L’équipe, épaulée par une plongeuse qui passait au loin, entreprend un sauvetage improvisé [© L. Avantbey et al.].

Heureusement, nous sommes équipés. Antoine va chercher une pince coupante dans la voiture (en effectuant un petit détour à l’autre bout pour récupérer les clefs et les vêtements de Laurent sur l’avancée rocheuse) et Ludmila part demander aux restaurants et au poste de secours du côté de CocoBeach s’ils n’ont pas d’autres outils au cas où notre pince ne marcherait pas. Nous attachons la pince à une bouteille d’eau vide avec du fil électrique (il faut faire avec ce que l’on a sous la main) et nous l’envoyons dans la crique. La majorité des hameçons étant galvanisés, il est quasiment impossible de les couper. Mais en aplatissant leurs ardillons (contre-pointes) avec la pince, ils parviennent à les décrocher. Heureusement, celui du bec n’est pas galvanisé, lui, car le goéland est suffisamment paniqué pour ne surtout pas vouloir ouvrir son bec. L’opération est présentée en images à la figure B.9 page 183.

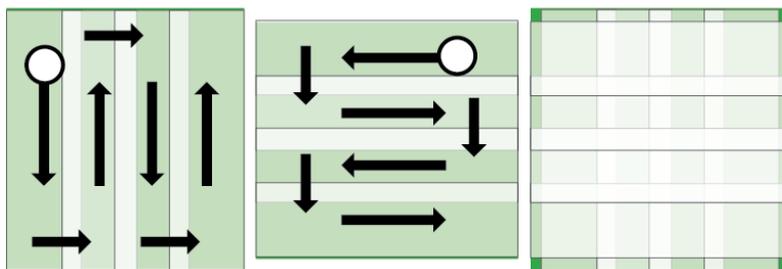
Une fois relâché, il se réfugie un peu plus haut sur les rochers en claudiquant : il revient de loin ! Il est temps de partir manger. L’orage est là et gronde maintenant juste au-dessus de nous. Nous avons à peine le temps de ranger les affaires dans le coffre et de rentrer dans la voiture que la pluie se met à tomber à verse. Opération réussie dans les temps !

Le goéland a été unanimement baptisé Jonathan “A.” en souvenir de la rencontre avec l’extraordinaire plongeuse de 84 ans au parcours atypique qui nous a aidés dans ce sauvetage. Depuis hier, nous avons rencontré de nombreuses personnes très différentes les unes des autres et toujours très intéressantes et enrichissantes.

### Travail au laboratoire temporaire

De retour au laboratoire temporaire, nous ouvrons le robot pour pouvoir accéder aux données. Mais l’acquisition en aveugle n’a pas fonctionné. Le script qui devait activer certaines fonctionnalités au démarrage ne s’est pas lancé pour une raison inconnue. Ainsi, les quelques images que nous avons acquises ne sont pas synchronisées. Nous travaillons pour régler ce problème. Par ailleurs, nous retrouvons sans n’avoir rien changé la communication avec l’ordinateur haut niveau, alors que la carte-mère est allumée. Il n’est pas impossible que le dysfonctionnement remarqué soit lié aux conditions environnementales (température, humidité, etc.).

Le temps passe vite, nous effectuons encore quelques tests pour être certains que tout fonctionne bien et nous remettons la réparation du contrôle à plus tard (nous continuerons de déplacer le robot à la main). Nous voulons en effet absolument avoir le temps de tenter à nouveau une acquisition avant la fin de journée. Il est 19h30, nous installons le banc stéréoscopique GoPro (non synchronisé) en plus du banc uEye et nous repartons sur la zone d’étude avec tout le matériel.



**Figure B.10** – Schéma illustrant le procédé de quadrillage et mettant en évidence le recouvrement [©️📷📄 L. Avantbey et al.].

### Quadrillage du soir

*Luminosité extérieure faible, ciel nuageux, température extérieure 22-25°C – eau à 20-22°C, houle prononcée, visibilité de 5-10 mètres, particules en suspension*

Revenus sur les lieux, nous ne perdons pas de temps et tout le monde se répartit les tâches : installation des mires au fond de l'eau, test d'étanchéité, allumage des GoPro, test de fonctionnement du programme d'acquisition des uEye, test de la synchronisation sur les premières images, etc. Tout est bon : nous partons pour deux heures de quadrillage, selon le schéma présenté à la figure B.10 page 184. À la fin de chaque aller-retour, nous soulevons le robot hors de l'eau pour pouvoir vérifier par WiFi que l'acquisition se déroule comme il le faut. La communication avec l'ordinateur embarqué fonctionne à merveille tout au long de la mission.

### Analyse des données

Nous repartons frigorifiés à la tombée de la nuit. Après le repas du soir, nous visionnons les images obtenues. Mais le résultat n'est pas encore à la hauteur de nos attentes. Les caméras GoPro n'étaient pas dans le bon mode et n'ont rien enregistré. Il est effectivement difficile de bien voir leur écran sous le robot, avec les reflets de l'eau et la buée du masque. Quant aux uEye, nous obtenons de superbes couples synchronisés, mais ils sont totalement flous, comme nous pouvons le constater sur la figure B.11 page 185.

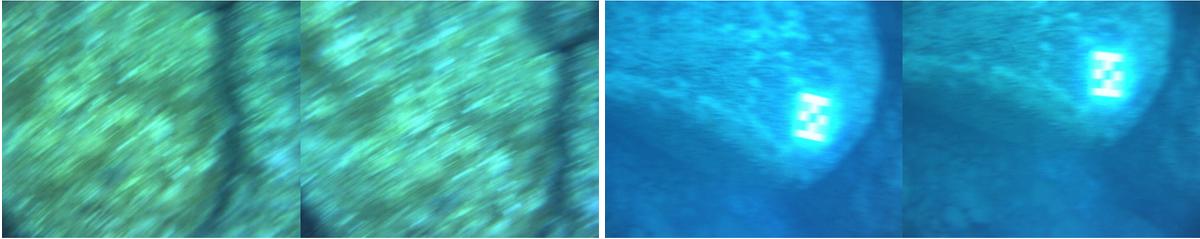
Le soleil s'est couché peu après le début de la mission et cela a provoqué une baisse de la luminosité sous l'eau. Par conséquent, le temps d'exposition des caméras était plus élevé qu'en plein jour. Or, nous étions en surface avec le robot et il y avait suffisamment de houle pour que les mouvements soient importants. Ces deux facteurs conjugués expliquent en grande partie le flou de nos images. Un autre point que nous remarquons concerne les cibles. Leur fond blanc provoque une importante surexposition quand elles apparaissent sur les images. Ce phénomène a dû être amplifié par la durée longue d'exposition.

Qu'à cela ne tienne, demain matin nous y retournons avec des bouteilles de plongée et la lumière du soleil. Si tout se passe bien, nous devrions bientôt obtenir nos images synchronisées.

### B.1.4 Troisième jour : mission II

Pour ce troisième jour de mission, nous prévoyons d'aller louer des blocs de plongée pour tenter une nouvelle acquisition. Loin de la surface et de la houle, nous profiterons de la lumière du soleil matinale pour ne pas subir les mêmes problèmes d'exposition que la veille.

La nuit porte toujours conseil, même quand elle est courte : au réveil, nous avons une explication plausible et une solution concernant la défaillance du câble ROV. Mais comme cette réparation nécessite quelques soudures, nous décidons de la réaliser à midi au profit d'une acquisition le matin.



**Figure B.11** – Premiers résultats des caméras uEye [©ⓂⓃ L. Avantbey et al.] : images synchronisées au 1/100<sup>e</sup> de seconde, mais floues et surexposées.

En contrepartie, une mauvaise nouvelle nous attend. En effectuant les tests de fonctionnement avant de partir, nous remarquons que l'une des deux caméras n'arrive plus à se connecter. Le problème semble sérieux, alors nous optons pour un changement de plan : la mission du matin se transforme en temps de laboratoire.

### Travail au laboratoire temporaire

Après plusieurs tests, nous arrivons à identifier que le problème vient du câble étanche. S'il s'était agi d'un problème de fil rompu, nous aurions peut-être pu le réparer, mais ce n'est apparemment pas le cas et nous avons du mal à identifier la cause exacte de la défaillance. Après plusieurs manipulations, nous réussissons de temps en temps à retrouver la connexion avec la caméra. Les effets sont presque les mêmes qu'un faux contact, même si la cause est peut-être différente (notre meilleure piste serait une corruption électromagnétique des données lors du transfert).

Nous avons profité de ce temps pour réaliser les soudures nécessaires à la réparation du contrôle et pour nettoyer le connecteur oxydé. Quelques tests nous permettent de voir que cette réparation devrait être suffisante. Nous avons également modifié le code d'acquisition pour améliorer l'exposition des images uEye et leur qualité. Nous avons parallèlement numéroté les mire, et pour les rigidifier, nous les avons attachées à des ardoises que nous avons lestées. Enfin, nous avons été chercher des bouteilles de plongée dans un magasin spécialisé. En fin de compte, tout cela nous prend la matinée et nous partons sur la zone vers 13h30, aux heures les plus chaudes.

### Quadrillage de l'après-midi

*Luminosité extérieure bonne, soleil, température extérieure 25-26°C – eau à 25°C, boue légère, visibilité de 10-15 mètres, particules en suspension*

Sur place, nous rencontrons une fois de plus des difficultés avec la connexion de la caméra. En effet, nous sommes obligés de rebrancher les caméras à chaque fois que l'ordinateur de bord redémarre afin qu'elles puissent être détectées, ce qui pose problème avec notre câble défaillant. Après une dizaine de minutes, nous finissons par la faire fonctionner. Nous prenons soin cette fois-ci de bien mettre les GoPro dans le bon mode et nous descendons le robot à l'eau.

Test du contrôle : tout semble fonctionner cette fois-ci, sauf que le robot est trop léger malgré sa charge utile. Et la place que nous avons laissée entre les caméras ne permet pas d'accrocher assez de poids (l'eau de la Méditerranée est particulièrement salée et la densité est par conséquent très élevée). Il est donc quasiment impossible de descendre en profondeur. De plus, le capteur de pression (qui nous permet de connaître la profondeur du robot) nous retourne des valeurs aberrantes alors qu'il semblait plutôt bien fonctionner la veille. Quelques photographies des tests de contrôle sont présentées dans la figure B.12 page 186.

Nous faisons quelques aller-retour avec le robot à la main avant de le ressortir pour pouvoir vérifier les images prises. Mais la caméra défaillante a rencontré une anomalie de fonctionnement juste avant l'entrée dans l'eau : nous n'avons même pas un seul couple sous-marin synchronisé. Après cela impossible de faire repartir

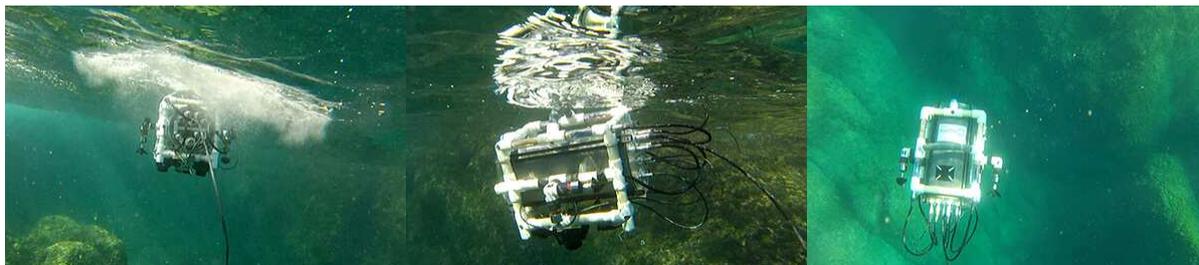


Figure B.12 – Tests de pilotage du robot [© L. Avantbey et al.].



Figure B.13 – Quadrillage de la zone d'étude avec le robot à la main, en plongée [© L. Avantbey et al.].

la caméra, et ce, malgré nos efforts. Le câble ne veut définitivement plus rien savoir. Nous décidons donc de couvrir la zone en comptant sur le banc GoPro. Bien qu'il ne soit pas parfaitement synchronisé (plus ou moins une demi-seconde), les données seront quand même très intéressantes pour nos travaux.

Grâce à l'expérience des jours précédents, nous sommes maintenant plus à l'aise pour équiper la zone et pour la parcourir. Les bouteilles de plongée nous permettent de nous éloigner de la surface turbulente et facilitent le maintien de cap ainsi que la stabilité du robot. Cette couverture est illustrée par la figure B.13 page 186. Nous repartons en fin d'après-midi après avoir quadrillé la zone en long et en large.

### Analyse des données

Le soir, nous transférons et visionnons les photographies obtenues, dont nous observerons un petit échantillon à la figure B.14 page 187. Même si elles ne sont pas synchronisées, nous sommes plutôt contents de ces premières images acquises.

Quant au câble de la caméra uEye, nous abandonnons les tentatives de réparation, car au vu de ce que nous comprenons du problème, tout ce que nous pouvons essayer sur place ne le résoudra pas. Nous manquons de matériel pour refaire un câble et nous n'en avons pas de rechange. Malgré nos essais répétés, nous ne retrouvons pas une seule fois la connexion. Il faudra donc nous passer du banc synchronisé jusqu'à la fin de la mission. Sur le reste de la soirée, nous préparons les objectifs du lendemain, dernier jour de mission.

### B.1.5 Quatrième et dernier jour : mission III

Pour cette dernière journée, nous nous sommes fixé cinq objectifs :

- Second quadrillage de la zone avec les bouteilles de plongée et le banc GoPro à la main détaché du robot.
- Tests de pilotage avec le robot et vérification des données du capteur de pression.
- Prise de vues avec une caméra uEye pour tester les réglages de paramètres, mieux les comprendre et améliorer l'image.



**Figure B.14** – Résultats du banc GoPro [© L. Avantbey et al.] : exemples d'images gauches de couples non synchronisés.

- Croquis de la zone d'étude hors eau et sous-marine.
- Test de visibilité du sous-marin à 15 mètres depuis une caméra de surface immergée, et enregistrement de vidéos pour servir de données tests au travail sur le véhicule de surface (ASV).

### Dernier quadrillage et autres travaux

*Luminosité extérieure bonne, soleil, température extérieure 25-26°C – eau à 25°C, houle prononcée, visibilité de 10-15 mètres*

Dès le début de la matinée, nous équipons la zone et nous commençons le balayage avec le banc GoPro à la main. Non seulement un balayage complet consiste en une série d'allers-retours dans un sens (nord-sud par exemple) puis une autre série qui croise la première à 90 degrés (est-ouest), mais il est nécessaire que chaque passage recouvre le précédent, c'est-à-dire que deux vues côte à côte de deux passages différents (aller-retour) doivent présenter une grande partie commune. Les croisements permettent de minimiser le problème d'occultation : quand il y a du relief, certaines parties de la scène ne sont pas visibles par l'observateur, car elles sont masquées par d'autres objets. Quant au recouvrement, en générant de la redondance, nous sommes sûrs de ne pas avoir de trou dans notre couverture. Cela permet également de créer des mosaïques à partir des images acquises, c'est-à-dire une vue globale à partir de chaque image locale.

Les mires commencent à prendre l'eau, malgré la plastification. Pour les missions à venir, il nous faudra trouver un autre moyen pour les rendre étanches, par exemple les usiner en plastique ou les tirer directement en autocollants, comme celui que nous avons sur le robot et qui tient plutôt bien l'immersion. De plus, nous avons plusieurs idées pour les améliorer et les impliquer davantage dans le processus d'appariement des vues dans la chaîne de traitement tout en réduisant leur effet de surexposition dans la balance des blancs. Nous estimons également qu'il nous faudrait presque le double du nombre de mires (entre 8 et 10) que nous avons pour bien équiper la zone sur laquelle nous travaillons par rapport à sa taille et aux différents plateaux de profondeur qu'elle présente.

Pendant ce temps, et malgré la houle, nous attaquons le deuxième objectif : tests de pilotage. Cette fois-ci, le robot est mieux lesté, du fait de la place acquise en retirant le banc GoPro, ce dernier étant utilisé directement à la main. Le contrôle fonctionne toujours bien, mais l'un des moteurs latéraux ne tourne pas comme il faut. Si nous avons été moins fatigués, peut-être que nous aurions reconnu là un comportement auquel nous avons déjà été confrontés lors des séances piscine et qui résulte d'un câble d'alimentation qui s'est débranché à l'intérieur. Mais ce ne fut pas le cas, nous nous passerons donc des essais de pilotage. Quant au capteur de pression, il renvoie toujours des résultats aberrants. Nous devons refaire des tests en piscine pour mieux cerner le problème et vérifier qu'il n'est pas défectueux.

Passons au troisième objectif : tests de réglages de paramètres uEye dans le milieu. Cependant, le sort s'acharne sur nous : l'ordinateur haut-niveau n'arrive pas à démarrer. En nous connectant avec une interface



Figure B.15 – Esquisse de la zone d'étude hors eau et sous-marine [© L. Avantbey et al.].

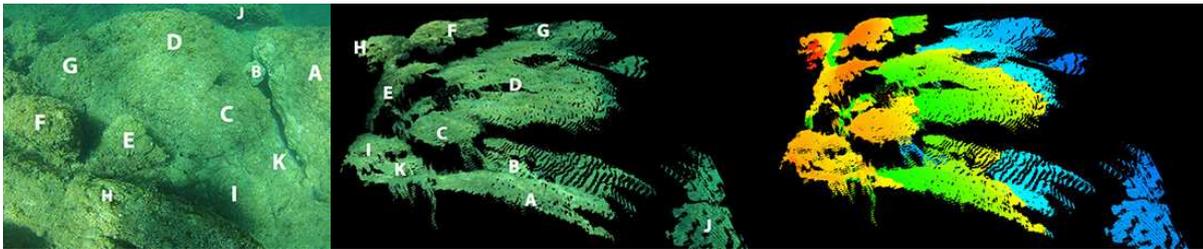
graphique, nous pouvons relever la nature de l'erreur qui le bloque : il s'agit d'une erreur d'entrée/sortie (*input error*), mais cette information ne nous aide pas à résoudre le problème. Au final, nous ne pouvons effectuer les tests caméras.

Objectif suivant : croquis de la zone. Le soleil brille, rien ne pourra nous empêcher d'atteindre notre but. Nous commençons par la vue hors d'eau que nous dessinons d'en haut depuis le chemin. Nous représentons le trait de côte en perspective plongeante pour pouvoir le comparer à des cartes ou à des images aériennes. En revanche, nous dessinons les avancées rocheuses en perspective oblique pour maintenir les points de repère caractéristiques utiles à un opérateur terrain. Nous prenons soin de noter les rochers émergents et ceux visibles à travers la surface de l'eau. Puis nous reportons rapidement le tracé de la côte en miniature sur l'ardoise sous-marine dont nous disposons pour pouvoir situer plus facilement les croquis réalisés sous l'eau. L'ardoise est petite et tout ne peut pas tenir sur une seule face ce qui rend le travail difficile, d'autant plus que sous l'eau, nous n'avons qu'une vue locale et que nous devons parcourir toute la zone pour dessiner l'ensemble. Heureusement, les mires nous servent de repères. Sur le croquis, que nous pouvons voir dans la figure B.15 page 188, nous avons représenté les différents plateaux de profondeur en les notant en relatif. Nous avons par la suite croisé ces valeurs avec les mesures de profondeur que nous avons effectuées pour chaque mire et nous avons ainsi pu obtenir les profondeurs approximatives des différents plateaux.

Enfin, nous sommes allés de l'autre côté du cap, un peu au large de la zone appelée "l'Aquarium" pour pouvoir travailler sur le dernier objectif. Nous avons descendu le robot à 15 mètres de profondeur tout en le filmant depuis la surface avec une caméra immergée. Nous sommes plutôt satisfaits, car le robot se voit parfaitement à cette profondeur (notons que l'eau est quand même plutôt claire dans cette partie de la côte) grâce à sa structure blanche qui est très visible sur les images numériques (blanc de référence dans la balance des blancs) et



**Figure B.16** – Test de visibilité du robot sous-marin depuis la surface à 10 et 15 mètres de profondeur [©ⓉⓁ L. Avantbey et al.].



**Figure B.17** – Premiers résultats sur les fonds marins [©ⓉⓁ L. Avantbey et al.] : à gauche, l'image gauche annotée du couple utilisé en basse résolution pour produire le nuage de points, à droite en couleur réelle et en couleur d'échelle (plus un point est proche de la caméra, plus sa couleur est chaude).

qui se détache bien du fond, que celui-ci soit rocheux ou bleu/vert (fond non visible, car plus profond). La figure B.16 page 189 donne une idée de ce que nous voyons depuis la surface. Allumer les LEDs de statut du dessus n'améliore pas sa visibilité, car on les distingue à peine par rapport au blanc de la structure. Nous enregistrons plusieurs vidéos depuis la surface qui nous serviront pour travailler sur l'asservissement en position afin que le robot de surface reste en permanence au-dessus du robot sous-marin en suivant automatiquement ses déplacements.

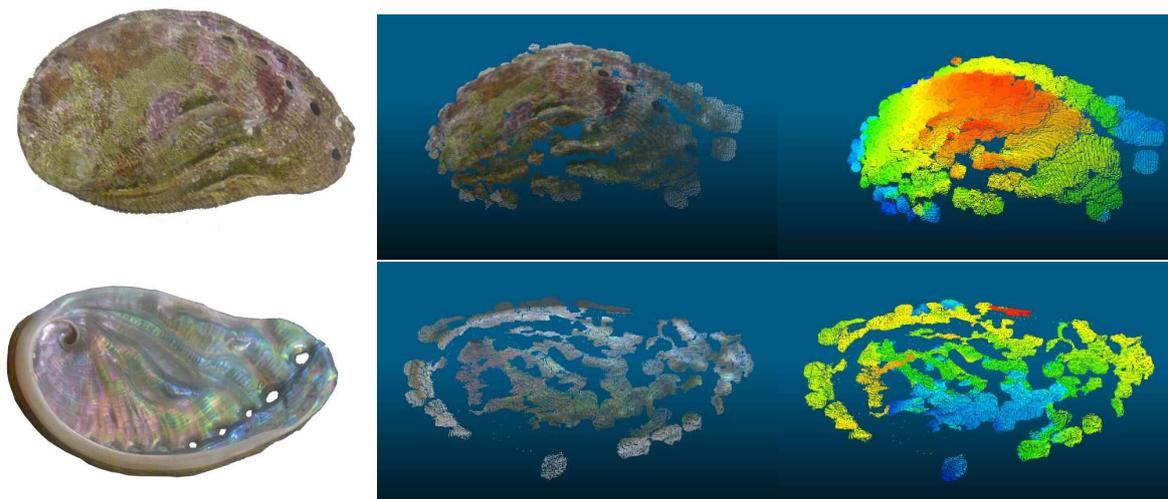
Il est 16h30 et plus que temps d'aller manger. Nous remballons le matériel et nous repartons au laboratoire temporaire : la dernière sortie terrain est terminée, mais il reste encore du travail. Nous devons ranger et sécuriser tout le matériel, tester nos algorithmes sur les données et poursuivre la rédaction de l'article scientifique.

### Travail sur les données et premiers résultats

Les images récupérées du jour sont très satisfaisantes et même presque meilleures qu'hier, car l'intégralité des prises de vues a pu être réalisée dans de bonnes conditions d'éclairage, et avec moins de suspensions dans l'eau (les effets de l'orage finissent par s'estomper).

Après avoir préparé les valises pour le train de demain midi, nous travaillons sur les images pour avoir un aperçu des nuages de points que nous obtenons à partir de nos données. La figure B.17 page 189 présente un exemple de nuage de points réalisé à partir de deux images GoPro dont nous avons réduit la résolution (de  $3840 \times 2880$  à  $930 \times 700$ ). En effet, la version prototype de notre chaîne n'est pas adaptée à prendre les images en pleine résolution. Les nuages de points proposés dans la figure B.18 page 190 représentent quant à eux l'extérieur et l'intérieur d'une coquille d'ormeau que nous avons ramassée sur la zone pour donner une idée du résultat de l'algorithme sur un objet. L'intérieur est difficile à reconstruire à cause de la nacre : la couleur d'un même point change totalement (rose au vert au bleu) dès que l'on n'est plus exactement à la même position.

Même s'il nous reste encore beaucoup de travail pour les améliorer, nous sommes plutôt satisfaits de ces premiers résultats. Nous avons de la matière pour écrire notre article scientifique qui sera présenté à la conférence OCOSS'13 (*Conference on Ocean & Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models & information Systems*) qui se déroulera à Nice fin octobre.



**Figure B.18** – Premiers résultats sur un objet [©L. Avantbey et al.] : à gauche, les images gauches des couples utilisés en basse résolution pour produire le nuage de points, à droite en couleur réelle et en couleur d'échelle (plus on est proche de la caméra, plus les couleurs sont chaudes). En haut la partie extérieure de la coquille d'ormeau, en bas la partie intérieure.

Au cours de la mission nous avons récupéré environ 20 000 couples d'images au total qui couvrent une zone d'environ 1 000 m<sup>2</sup>. Tout cela pourra alimenter notre travail de l'année. La réalisation de cette mission a été très importante pour nous. Il s'agissait de la première que nous réalisons dans le cadre sous-marin. Aller sur le terrain est crucial dans notre domaine : cela permet de mieux comprendre les problématiques opérationnelles pour pouvoir y répondre de manière plus appropriée. Ce que l'on imagine n'est pas toujours viable sur le terrain et ce que l'on pense potentiellement problématique ne correspond pas forcément à ce qui l'est vraiment. Durant ces quatre jours, nous avons grandement gagné en expérience, mais nous avons encore beaucoup à apprendre !

*Ainsi s'achève la mission terrain qui s'est déroulée au Cap de Nice durant l'été 2013.*



## B.2 Mission terrain au Cap de Nice - Automne 2013

*Relation de la mission terrain au Cap de Nice sur la fin du mois d'octobre de l'an deux-mille-treize*

*Latitude de 43 degrés, 41 minutes et 8 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitude de 7 degrés, 17 minutes et 45 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

*Loïca Avantbey et Laurent Beaujoin*

Nous profitons de notre déplacement à la conférence OCOSS (*Conference on Ocean et Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models et information Systems*) qui se déroule à Nice du 28 au 30 octobre 2013 pour tenter d'entreprendre une micromission sur les créneaux laissés libres. Les objectifs que nous essayons de valider cette fois-ci sont les suivants :

- Tester et valider les nouvelles mires sous-marines que nous avons confectionnées suite aux observations de la dernière mission.
- Valider la synchronisation du système d'acquisition stéréoscopique dans l'eau maintenant que le câble défaillant est réparé.
- Prendre des images avec les caméras uEye pour tester leur qualité sous l'eau et vérifier le réglage des paramètres.
- Améliorer le croquis de la partie sous-marine pour disposer d'un référentiel commun précis pour la préparation de missions.
- Valider l'étanchéité du robot à une profondeur supérieure à 15 mètres.
- Valider la correction du problème de démarrage de l'ordinateur embarqué qui était généré par l'erreur d'entrée/sortie liée à la carte micro SD (*input error*).
- Continuer à acquérir de l'expérience sur l'équipement de terrain et le déroulement de missions sous-marines.
- Prendre des images de la faune et de la flore extérieure pour anticiper les futures missions air-eau
- Valider la luminosité et l'étanchéité des nouvelles barres LEDs de statut dans le milieu eau.

Les conditions pour cette mission sont beaucoup moins bonnes qu'en août. D'une part, nous ne sommes que deux, ce qui limite grandement notre capacité d'emport de manière générale. Nous amenons donc uniquement le matériel opérationnel (robot, charge utile, station au sol et matériel associé, mires, matériel de plongée, batteries diverses et leurs chargeurs), ce qui est déjà considérable à amener par le train. D'autre part, les journées sont maintenant beaucoup plus courtes et la nuit commence à tomber dès 17 heures. La belle saison est passée et le temps est incertain. Notre priorité étant la conférence, il nous sera donc difficile de trouver des créneaux adéquats.

### B.2.1 Première sortie : mission I

*Luminosité extérieure moyenne puis faible, nuages et averses, vent, température extérieure 18-20°C – eau à 19°C, houle, visibilité de 3-7 mètres, particules en suspension*

Après avoir pris connaissance du planning de la conférence, nous prévoyons notre première sortie terrain le mardi en fin d'après-midi. La veille au soir, nous collons sur des plaques PVC les mires sous-marines imprimées pour terminer leur préparation. Nous en profitons également pour planifier le parcours du lendemain. Nous décidons de ne pas couvrir la zone entière, mais de nous concentrer plutôt sur le secteur plus réduit du chenal qui débute au rocher « Tête-de-requin » et longe ensuite en s'évasant l'avancée rocheuse orientale de la crique. Nous pouvons voir l'entrée du chenal sur les photographies de la figure [B.19](#) page [192](#).

À 16h30, nous sortons de la conférence, nous récupérons les affaires à l'hôtel et nous nous arrêtons louer les bouteilles, les ceintures de plombs et les poids de lest au magasin de plongée. Il est effectivement plus avisé



**Figure B.19** – Photographies illustrant les lieux [© L. Avantbey et al.] : rocher « Tête-de-requin » à gauche et entrée du chenal à droite.

de louer les poids sur place plutôt que de les transporter par le train comme nous le faisons auparavant, ce qui représente une économie d'une dizaine de kilogrammes tout de même. 17h00 : nous voici de nouveau sur le Sentier de la Mer et bien que le matériel soit plus réduit que cet été, il n'est tout de même pas aisé de le transporter à deux jusqu'à la plateforme. Pour les futures missions, il nous faudra réfléchir à nous équiper pour pouvoir transporter plus de matériel sur le dos (dont le robot) plutôt que dans des sacs à la main. Même nos quelques valises roulantes ne nous sont pas d'une grande utilité entre la surface irrégulière des pierres du chemin et ses nombreux escaliers.

Le ciel est parsemé de nuages légers, mais l'horizon se charge à l'est derrière la presqu'île du cap Ferrat. Nous nous activons pour déployer le matériel avant que le temps ne change. Équipement pour la plongée et installation des mires sur les fonds marins d'une part, installation de la station, tests d'étanchéité et lancement des programmes d'acquisition d'autre part : avec une équipe réduite, le partage des tâches est drastique et il n'est pas facile de gérer l'ordinateur tout en étant mouillé soi-même.

Nous n'avons pas eu le temps de lester les mires lors de la préparation de la veille et par conséquent elles ne veulent pas rester en place et se retrouvent emportées par la houle. Nous les rattrapons et les calons avec des pierres. Chemin faisant, nous retrouvons au fond de l'eau l'aimant que nous avons égaré durant l'été : une chance, car nous l'avions perdu un peu plus loin et ce dernier est sombre et petit ; autant dire que si nous l'avions cherché nous aurions eu plus de succès pour trouver une aiguille dans une botte de foin. Quelques gouttes de pluie commencent à tomber, mais nous avons prévu des sacs-poubelles pour protéger le matériel informatique de la station au sol. Nous démarrons le parcours de la zone d'étude avec le robot, toujours à la main comme cet été (pas de pilotage ni de navigation autonome), mais très vite nous nous rendons compte que l'une des caméras ne prend plus d'images.

Le message d'erreur est légèrement différent de la dernière fois, mais le problème est fortement similaire. Nous ressortons le robot de l'eau et nous procédons à une série de tests. Il semble effectivement que le câble que nous avons réparé soit de nouveau en cause. Comme lors de la dernière mission, il nous est impossible de retrouver une communication avec la seconde caméra, et ce, malgré nos différents essais. Le temps passe et la luminosité décroît rapidement. Il ne pleut plus, mais le ciel est toujours très encombré. Considérant l'ensemble de nos objectifs, nous décidons de continuer la mission avec les caméras GoPro, même si elles ne sont toujours pas synchronisées.

Les nouvelles barres de statut LED fonctionnent très bien et offrent même une meilleure visibilité que les précédentes. Nous avons acheté nos barres initiales dans le commerce et nous les avons découpées et résinées pour les adapter à nos besoins. Le problème venait de leur largeur et du fait que ce soit des circuits imprimés : il



**Figure B.20** – À gauche les barres LED initiales, achetées dans le commerce, coupées et résinées et à droite, les nouvelles que nous avons conçues sur le même modèle, usinées, câblées puis résinées [©(f) L. Avantbey et al.].

nous fallait résiner les bords pour éviter l'électrolyse, mais alors la barre ne pouvait plus rentrer dans nos tubes transparents. Nous devions donc les limer pour obtenir du jeu et cela compromettait notre étanchéification. Les fuites portaient essentiellement sur les masses, ce qui ne provoque pas de courts-circuits, mais abîme le matériel (corrosion) et pose des problèmes d'interprétation, car des LED s'allument alors qu'elles ne le devraient pas. De plus, les LED n'étaient pas idéalement positionnées par rapport à nos dimensions. Nous avons donc pris la décision de réaliser nos propres barres LED en nous basant sur le même schéma et les mêmes références de LED que nos barres commerciales. Nous avons fait le choix d'usiner des sillons dans une plaque de PVC dans lequel nous glissons les fils électriques gainés et les résistances. Quant aux LED, elles sont montées en traversant. Nous soudons les différentes parties ensemble et nous emplissons les sillons de résine. Nous avons rencontré quelques problèmes, car les LED que nous avons trouvées sont plus grandes que les précédentes et la hauteur de la barre dépassait alors le rayon du tube transparent. Faute de temps, nous avons dû faire avec et nous les avons positionnées à l'horizontale, ce qui réduit un peu la luminosité renvoyée et gêne légèrement l'étanchéité. Comme nous les avons confectionnées rapidement juste avant de partir, nous avons mal réparti la résine et les barres présentent donc encore quelques fuites de masse, mais nous pensons tenir la bonne démarche de conception. Les anciennes et nouvelles barres LED sont présentées à la figure B.20 page 193.

Au bout de trois quarts d'heure, le soleil s'est couché et la nuit commence à tomber, il se remet à pleuvoir et le vent se renforce et se refroidit. La visibilité sous l'eau est maintenant très faible, ce qui est surtout handicapant pour nos caméras qui ont une moins bonne sensibilité que nos yeux. Les photographies de la figure B.21 page 194 présentent un aperçu de la luminosité captée par les caméras du début à la fin de la mission. Nous décidons donc de nous arrêter là et nous rangeons notre équipement tant bien que mal dans le noir. Nous rapportons le matériel de plongée au magasin et nous déposons rapidement les affaires à l'hôtel. Ryu devra attendre pour être rincé à l'eau claire, et nous aussi par la même occasion, car nous avons à peine le temps de rejoindre le lieu de rendez-vous au pas de course pour la suite du programme de la conférence.

## B.2.2 Seconde sortie : mission II

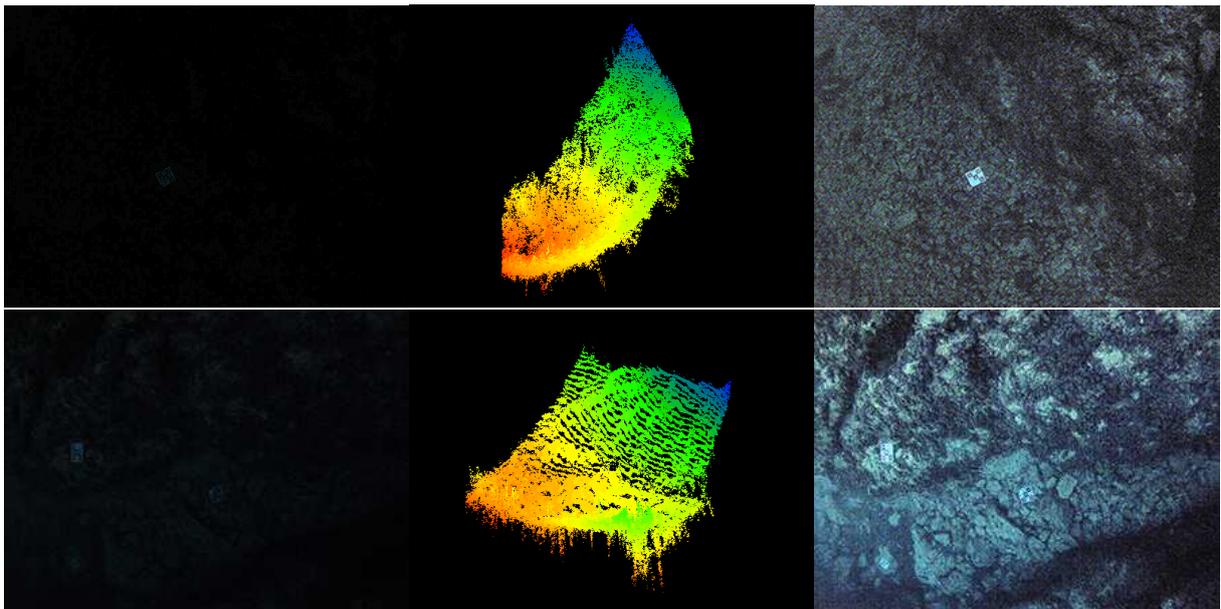
*Luminosité extérieure bonne, soleil et quelques nuages, température extérieure 20-22°C – eau à 19-20°C, boue prononcée, visibilité de 10-15 mètres, particules en suspension*

Notre train ne partant que dans l'après-midi, nous profitons du début de matinée pour effectuer une seconde sortie le jeudi matin, profitant ainsi cette fois-ci de la lumière du jour. La nuit précédente, nous avons fixé les plombs sur les mires pour les lester et éviter les problèmes rencontrés mardi soir.

Nous avons sauvegardé et visionné les images prises lors de la précédente sortie. Une fois encore, nous ne disposons d'aucune image synchronisée des fonds marins : le problème du câble est survenu dès la mise à l'eau. Quant aux images prises par les caméras GoPro durant la dernière demi-heure, elles sont presque totalement



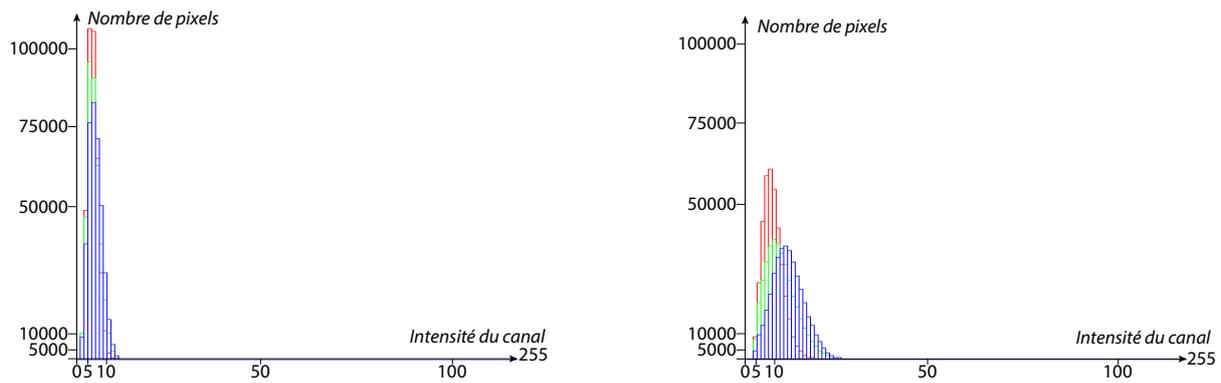
**Figure B.21** – Photographies témoignant de la visibilité lors de la mise à l'eau (17b45), au cours de la mission (18b00 et 18b15) et juste avant la sortie de l'eau (18b50) [© L. Avantbey et al.]. Nous noterons que les mires restent visibles sur l'ensemble des images.



**Figure B.22** – Exemples de reconstructions tridimensionnelles sur des couples à luminosité très réduite dont nous pouvons voir les images droites des couples stéréoscopiques sur la colonne de gauche [© L. Avantbey et al.]. À l'œil, nous distinguons à peine les mires et quelques ombres de rochers. La dynamique des deux images est présentée à la figure B.25 page 195. La colonne centrale montre les nuages de points obtenus à partir de ces couples. Le bleu-vert est proche de la caméra, le rouge-orangé s'en éloigne. La colonne de droite propose une version au contraste manuellement rehaussé des images d'origine.

dépourvues de lumière, et sans rehaussement de contraste, seuls quelques dégradés de gris permettent de distinguer difficilement quelques reliefs à l'œil dans le meilleur des cas. Ces prises de vues sont intéressantes, car elles retraduisent quasiment le rendu des conditions en plongée profonde (aux environs de 60 mètres en Méditerranée par exemple) sans éclairage artificiel. Nous avons testé nos algorithmes de reconstruction sur quelques échantillons sans prétraitement et les résultats, bien que fortement bruités, sont très encourageants. Deux exemples de ces nuages et des nuages de points obtenus sont présentés à la figure B.22 page 194.

Nous avons également examiné le problème du câble de plus près. Nous pensions cet été que l'un des deux connecteurs, qui nous paraissait très lâche, était à la source du problème et nous l'avons changé un peu avant de partir à la conférence. Les tests réalisés au laboratoire ont montré que le câble remarquait parfaitement après ce changement. Mais le problème est survenu à nouveau, au moment de la mise à l'eau. Cette fois-ci, nous remarquons que le plot de connexion du second connecteur (celui que nous n'avons pas changé) se trouve beaucoup plus au fond de l'embase que les autres. La surface de contact pour chaque broche doit donc être plutôt faible de manière générale. Peut-être qu'en présence d'humidité, d'eau ou de sel, la connexion s'en retrouve d'autant plus amoindrie, et occasionne alors des bruits trop importants sur les signaux pour la circulation de



**Figure B.23** – Histogrammes des deux images sombres utilisées pour les reconstructions tridimensionnelles proposées à la figure B.22 page 194 [© L. Avantbey et al.]. Nous pouvons remarquer que toute la dynamique de chaque image est concentrée sur moins de 15% de la plage totale (0 à 255).

données très haut débit qu'est l'USB. Nous n'arrivons plus du tout à faire remarquer le câble, même dans l'air. Il nous faut donc changer le second connecteur, ce que nous ne pouvons faire sur place, faute de matériel de réparation.

Nous décidons donc de tester au moins le rendu de la caméra uEye qui fonctionne pour pouvoir éprouver la qualité de leurs images en milieu aquatique, ce que nous n'avons pas pu faire cet été, car l'ordinateur ne voulait plus démarrer à cause d'une erreur d'entrée/sortie (*Input Error*, réglé en changeant la marque de la carte micro SD sur laquelle démarre le système). Nous modifions le code pour qu'il puisse tourner avec une caméra, mais au cours des tests de fonctionnement, une soudure se rompt alors que nous remettons la carte SD en place. Malheureusement, il s'agit du câble d'alimentation de l'ordinateur de bord et ce dernier provoque un court-circuit et dégage de la fumée dans l'intervalle de temps qu'il nous faut pour couper d'urgence le système. Il nous faudra nous passer d'ordinateur embarqué, car nous n'avons pas de fer à souder avec nous, il est donc impossible de le remettre en marche et de tester s'il fonctionne toujours. Cela signifie que nous ne pourrons pas utiliser la caméra uEye : décidément, ce n'est pas encore cette fois que nous réussirons à les tester en environnement naturel. Mais nous avons cependant suffisamment d'objectifs à traiter, et nous terminons la préparation du robot en conséquence.

En nous rendant sur le lieu de mission, nous prenons le temps sur le chemin de prendre des photographies de la zone extérieure. Certaines sont des vues en gros plans des différentes espèces de la faune et de la flore. D'autres constituent des séries de photographies présentant un fort recouvrement entre elles et balayent des petites zones en simulant à la main un vol à très basse altitude. Ces dernières nous ont permis de tester la réalisation de mosaïques d'images. Un exemple de mosaïque terrestre est présenté à la figure B.24<sup>1</sup> page 196.

Le temps est clair ce matin à 10 heures, il y a peu de vent et le ciel est dégagé, ce qui est idéal pour la saison. Arrivés à la plateforme, nous installons les mires lestées sur le même périmètre que la veille et nous procédons à la couverture de la zone. Le bilan pour les nouvelles mires s'avère positif : grâce à leur trame grisée, elles ne provoquent plus les effets de surexposition remarqués en août, mais elles restent malgré tout bien visibles par les caméras même en condition de faible éclairage. Les nombreux points d'ancrage qu'elles offrent sont utilisés à bon escient par les algorithmes de reconstruction tridimensionnelle, qui peuvent alors s'appuyer de manière fiable dessus. Nous avons préparé deux types de nouvelles mires : d'une part des autocollants imprimés que nous positionnons sur des plaques PVC, et d'autre part des dalles usinées dans du PVC coloré et assemblées par

1. Les mosaïques ont été réalisées avec le logiciel Autostitch de l'Université de la Colombie-Britannique (*University of British Columbia* - UBC), développé par Brown et basé sur ses travaux et ceux de Lowe (source : <http://www.cs.bath.ac.uk/brown/autostitch/autostitch.html>). Nous avons testé la réalisation des mosaïques avec d'autres outils, mais les résultats se sont avérés moins bons ou équivalents : Hugin (<http://hugin.sourceforge.net/>), JIM (<http://sourceforge.net/projects/jimatis/>), Autopano Giga (<http://www.kolor.com/fr/logiciel-assemblage-images-autopano-giga.html>).



**Figure B.24** – Mosaïque d'une partie de la zone extérieure, sur les avancées rocheuses, réalisée à partir de 25 photographies  
 [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.].

collage. Entre les deux, les mires imprimées présentent selon nous le meilleur rendu. Elles sont moins sujettes aux reflets et possèdent l'avantage d'être plus rapides à confectionner et moins consommatrices en matière première. Nous passerons sûrement l'ensemble des motifs cibles en blanc sur la version imprimée, comme c'est le cas sur les mires usinées, plutôt que de les laisser en noir, car cela les rend moins visibles. Nous trouverons à la figure B.25 page 197 des photographies des premières mires utilisées en août ainsi que des photographies des nouvelles versions expérimentées lors de cette mission.

Nous poursuivons la couverture de la zone en effectuant un parcours à environ deux mètres de profondeur pour obtenir des images moins définies, mais à fauchée plus large tout en évitant les remous de surface. Nous voulons à partir de cela tester la faisabilité de créer rapidement des mosaïques d'images de zones sous-marines inconnues pouvant servir de plans de repère pour faciliter le déroulement des missions. Nous n'avons pas encore développé d'outils spécifiques pour faire des mosaïques sous-marines, car pour l'instant nous nous concentrons sur la reconstruction tridimensionnelle. Les outils que nous utilisons sont prévus pour des images aériennes ou terrestres. De nombreux essais ont été nécessaires pour obtenir une mosaïque à peu près représentative de la zone de l'entrée du chenal. Cela n'a pas été facile, et nous pouvons noter que les erreurs ne sont pas toujours très visibles, car elles font parfois illusion comme nous pouvons l'observer sur la figure B.26 page 198 où sont présentées deux mosaïques de la même zone. Pour le moment, nous ne sommes pas encore très satisfaits de ces résultats et de la connaissance a priori qu'il faut du terrain pour les valider. Il nous faudra donc développer cette idée, car il s'agit d'un outil important sur lequel nous souhaiterions nous appuyer par la suite.

Nous discutons par ailleurs du problème de cartographie de la zone littorale dans son ensemble, soit les parties émergées comme les parties immergées. Nous envisageons de diviser l'espace à cartographier en plusieurs secteurs et de répartir ces derniers entre les différents robots d'exploration sur lesquels nous travaillons.

Les zones émergées pourront être couvertes par des drones volants, essentiellement par des vues au nadir,



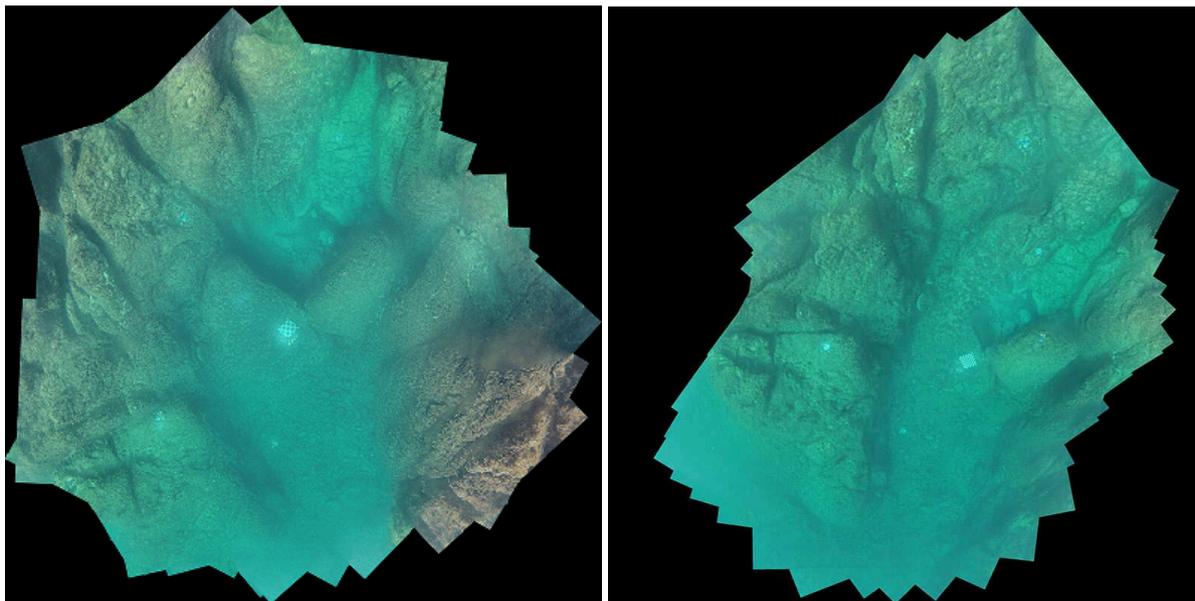
**Figure B.25** – Mires sous-marines [© L. Avantbey et al.]. Les mires 5 et 4 à gauche sont les premières que nous avons utilisées, lors de la mission d'août. Avec le retour d'expérience de cette mission, nous avons conçu les nouvelles mires, à droite, selon deux versions à tester. Les mires 5 et 6 en haut sont imprimées sur des autocollants collés sur des plaques de PVC et les mires 1 et 2 en bas sont usinées dans du PVC.

comme nous l'avons déjà réalisé à plusieurs occasions dans d'autres contextes (mission botanique dans les landes de Fontainebleau par exemple). Dans le cadre de la fusion des nuages de points représentatifs respectivement des zones terrestres et sous-marines, la surface de l'eau peut s'avérer problématique. En effet, cette dernière vue du ciel est fortement texturée et ne sera en conséquence pas omise de la cartographie. Nous avons donc pour idée d'utiliser particulièrement une non-synchronisation pour les vues aériennes sur lesquelles nous voulons supprimer la mer : comme la texture est toujours en mouvement, ces zones seront écartées automatiquement en désynchronisant. En contrepartie, nous risquons de supprimer certains éléments floristiques par la même occasion et de retomber ainsi sur notre problème initial caractéristique des espaces naturels. La zone d'étude de Nice ne possède que des espèces de rocailles, nous ne rencontrerons donc vraisemblablement pas ce problème dans ce cadre, mais il sera susceptible de survenir sur d'autres zones d'études et nous devons donc nous pencher plus attentivement dessus.

Pour ce qui est des zones peu profondes, des rochers ou des tombants émergents ou bien encore des coques de bateaux : tous ces éléments sont peu accessibles pour le robot sous-marin dont les caméras, au nadir ou obliques, sont situées en dessous de lui. Nous considérons donc que le véhicule de surface, en plus de servir de lien entre les opérateurs et le robot sous-marin, est le plus adapté à cartographier l'ensemble des éléments se trouvant dans la zone comprise entre un demi-mètre au-dessus de la surface et trois mètres en dessous. À cause des mouvements de la surface, la synchronisation nous semble indispensable, mais il faudra réaliser des tests pour prendre conscience de l'ensemble des problématiques pouvant apparaître dans ces conditions où le ressac est souvent fort, ce qui modifie sans cesse le paysage et gêne grandement la vision (projections de gouttelettes sur la lentille).

Enfin, les zones en dessous de trois mètres de profondeur – fonds, tombants et objets – pourront être traitées directement par le robot sous-marin.

Après la couverture de surface pour les mosaïques, nous avons réalisé une série de photographies panoramiques au-dessus de chaque mire. Ces vues offrent à l'opérateur humain une vision oblique discriminante et plus parlante du relief environnant et permettent ainsi un meilleur repérage des amers. N'ayant pas de caméra



**Figure B.26** – *Mosaïques sous-marines* [©️🇱🇧 L. Avantbey et al.]. À gauche, mosaïque approximativement correcte de la zone d'entrée du chenal (le rocher « Tête-de-requin » est positionné en haut de l'image) réalisée à partir de 50 images. À droite, une mosaïque de la même zone présentant plusieurs erreurs importantes, mais difficiles à relever sans procéder à une analyse fine sur les lieux sont inconnus.

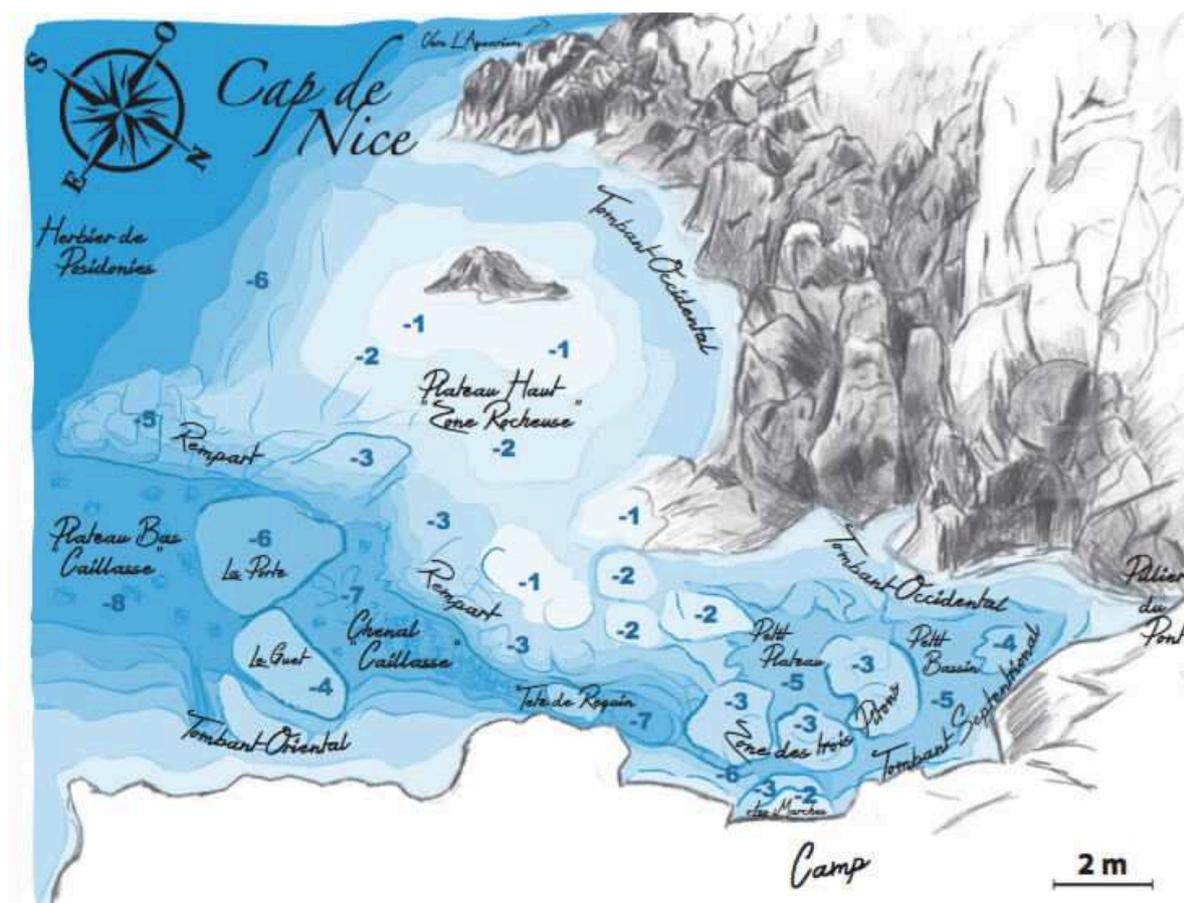
latérale installée pour cette mission, nous avons basculé le robot à la verticale et utilisé le banc stéréoscopique GoPro pour réaliser les balayages sur 360°. Malgré les différences de hauteur dans nos prises de vue induites par la difficulté de la manœuvre à la main (cette dernière sera plus aisée avec l'utilisation conjointe d'une caméra oblique et d'une rotation automatique), nous pensons que ces visions à 360° au niveau de certains points de repère sont plus exploitables et pertinentes que des vues obliques acquises en permanence comme nous l'avions fait cet été. Quelques panoramas réalisés sont présentés à la figure B.27<sup>2</sup> page 198.

Après les prises de vues panoramiques, nous profitons du temps qu'il nous reste pour acquérir des jeux de données correspondant à des trajectoires courtes : nous décrivons des formes de « 4 » en nous déplaçant de mire en mire. La trajectoire du quatre est intéressante, car elle boucle sur la fin au niveau du premier transect. Cela nous permettra, lorsque nous travaillerons sur le sujet, de pouvoir tester les erreurs de positionnement et de

2. Les panoramas ont été réalisés avec le logiciel libanais Dermandar (source : <http://www.dermandar.com/create.php>).



**Figure B.27** – *Deux exemples de panoramas 360°, dépliés, réalisés au-dessus de deux mires pour obtenir un meilleur aperçu du relief environnant et des points d'amer de la zone* [©️🇱🇧 L. Avantbey et al.].



**Figure B.28** – Croquis amélioré de la zone d'étude, complété à partir de nouvelles prises de notes in situ et à partir de l'analyse a posteriori des images acquises lors des deux campagnes [© (f) (o) L. Avanthey et al.].

voir si nous les recalons bien en croisant une zone déjà cartographiée. Cette problématique très courante dans le domaine de la cartographie est connue sur le nom de *Problème de Fermeture de Boucles* (*Loop Closing Problem*).

Parallèlement, en tuba depuis la surface nous reprenons des notes pour préciser le croquis de la zone d'étude sous-marine. La tâche n'est pas aisée, car la mer est froide et très agitée. Il est donc difficile de rester au-dessus d'un point et de garder ses repères. Nous avons ajouté de nouveaux repères et corrigé certaines proportions de la version antérieure (figure B.15 page 188). La nouvelle carte a été complétée en visualisant les images acquises et est présentée à la figure B.28 page 199.

Enfin, nous terminons par un test de validation de profondeur du robot. Comme tout test de profondeur, le robot est éteint et ne contient pas ses batteries pour des raisons de sécurité en cas d'échec. Nous l'emmenons au pied du cap à 26 mètres de profondeur, soit à une pression de deux bars et demi supplémentaires par rapport à la surface, qu'il a soutenue sans aucun problème ! À cette profondeur, chaque centimètre carré du robot supporte alors environ 15 kg. Mais pourquoi 26 mètres et non 30 mètres de profondeur ? La raison est simple : pour atteindre les 30 mètres, il nous aurait fallu nous éloigner du tombant. Or cela n'était pas prudent, car nous risquions de perdre nos repères alors que nos bouteilles étaient déjà bien entamées, d'autant plus que la fatigue de la semaine s'accumulait avec celle d'être dans l'eau depuis presque une heure et demie. Nous pouvons avoir un aperçu de ce que voyait le robot à 26 mètres de profondeur à travers les yeux des caméras GoPro sur la figure B.29 page 200.

Il est presque 13 heures et nous devons lever le camp pour prendre le train dans les temps. Mais pendant le rangement, nous nous apercevons que nous avons oublié de noter la position et la profondeur des mires de



**Figure B.29** – Vues embarquées prises par les caméras GoPro lors du test d'étanchéité du robot à 26 mètres de profondeur  
[© L. Avantbey et al.].

ce jour. Nous retournons rapidement dans l'eau prendre les mesures tant que notre mémoire est encore fraîche. Après cela, nous pouvons quitter les lieux, épuisés, mais sereins.

L'aspect opérationnel n'est pas encore fonctionnel, mais nous pouvons observer des progrès depuis cet été. Nous sommes notamment plus à l'aise sur le terrain et dans les procédures de parcours. Nous avons en outre renforcé nos procédures de journal de mission (*log*) avec la préparation de formulaires à remplir sur le terrain (heures de début et de fin, météorologie, plan pour positionner les mires et indiquer leur profondeur, etc.). Ces derniers sont pour le moment incomplets et écrits à la main juste avant les sorties terrains, mais nous pensons les améliorer et les formaliser pour les prochaines missions.

Nous souhaitons notamment y ajouter un tableau pour pouvoir mieux qualifier les remous afin de permettre une meilleure comparaison des conditions des différentes missions. Dans cette même optique, mais cette fois-ci sur le critère de visibilité, nous souhaitons tester une version modifiée du disque de Secchi. Attaché au bout d'une corde, ce dispositif, soit intégralement blanc, soit croisé de noir et blanc, permet de fournir une échelle de transparence de l'eau en mesurant la profondeur à laquelle il devient invisible depuis la surface.

Dans notre cadre de travail, nous envisageons plusieurs problèmes liés à son utilisation telle quelle. Le principal étant que dans les eaux claires et peu profondes (< 20 m) de notre lieu de mission, le disque risque d'être en permanence visible jusqu'au fond alors qu'à l'oeil nous observons des variations de la visibilité entre les différentes sorties terrains. De plus, le soleil étant plutôt fort dans ces régions, il nous sera difficile de nous abstraire des reflets liés à la surface, et l'observation qui doit s'effectuer bien au nadir du disque ne sera pas facilitée, car nous ne disposons pas de plateforme flottante ni de bateau et qu'il faudra la réaliser en étant nous-mêmes dans l'eau.

Nous envisageons donc de tester une nouvelle procédure. L'observation se ferait juste sous la surface de l'eau de manière générale ou plus profondément de manière ponctuelle pour s'abstraire des effets de la surface. Elle ne se ferait pas à l'oeil, ce qui est très subjectif en terme de comparaison, mais par une caméra sous-marine, ce qui rend la démarche plus facilement reproductible, et en conservant les images il est même possible de réinterpréter les résultats.

La caméra pourrait alors prendre une série d'images alors que la cible s'éloigne progressivement d'elle (la distance pourra même être retrouvée à partir de la taille du disque et des paramètres sous-marins d'étalonnage de la caméra). L'éloignement peut se faire verticalement ou même horizontalement. Une courbe (ou son intégrale) pourra être fournie à partir de la série d'images à des fins de comparaison. Il sera intéressant de tester la plus-value de l'ajout de zones de couleurs sur le disque. Nous réfléchissons encore un peu au visuel du disque et nous

essaierons d'effectuer des tests pour voir s'il s'agit d'une bonne idée, en piscine tout d'abord pour obtenir une référence d'eau claire et ensuite en mer pour pouvoir comparer.

Si nous arrivons à obtenir des créneaux à la fosse de plongée de la ville de Charenton-Le-Pont au cours de l'année, cela devrait nous aider pour la partie robotique à finaliser les systèmes d'acquisition synchronisée, GoPro et uEye, et compléter ainsi que fiabiliser les asservissements des deux robots : le sous-marin et celui de surface. Pour ce qui est de la partie traitement d'images, l'essentiel des travaux de l'année devrait se concentrer sur des méthodes exploratoires pour fusionner les nuages de points obtenus à partir de chaque couple stéréoscopique afin de créer une carte tridimensionnelle globale de l'ensemble de la zone couverte. Il nous reste encore beaucoup de travail avant une prochaine mission.

*Nous remercions chaleureusement Anne et Claude pour la logistique extérieure (déplacements et repas) sans laquelle il nous aurait été difficile de mener à bien cette mission en parallèle de la conférence.*

*Ainsi s'achève la micromission terrain qui s'est déroulée au Cap de Nice durant l'automne 2015.*



## B.3 Mission terrain en Languedoc-Roussillon - Automne 2015

*Relation de la mission terrain sur les côtes du Languedoc-Roussillon sur le mois d'octobre de l'an deux-mille-quinze*

*Des latitudes de 45 degrés, 55 minutes et 15 secondes à 42 degrés, 51 minutes et 25 secondes au nord de l'Équateur*

*Des longitudes de 4 degrés, 6 minutes et 3 secondes à 3 degrés, 5 minutes et 56 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

*Loïca Avanthey, Laurent Beaudoin, Antoine Gademer, Ludmila Lopes e3 Mei*

Et voici la dernière mission terrain avant la fin de la thèse (mais qui, nous l'espérons, marquera le début d'une longue série !). Deux ans après les premières missions, nous retournons en bord de mer pour tester les travaux effectués depuis et acquérir les données qui nous manquent. Des contraintes pratiques nous ont poussés à changer de lieu d'étude et nous voilà donc dans la région Languedoc-Roussillon, notre camp de base se situant à Teyran, petit village en périphérie de Montpellier. Les conditions qu'offre la côte aux alentours sont moins optimales qu'à Nice (fonds de sables, eau plus turbide, peu de profondeur accessible depuis la côte, etc.), cette mission comporte donc quelques inconnues.

Les objectifs sont les suivants :

- Tester la méthodologie d'étalonnage : au nadir avec un robot sous-marin et en latéral avec un plongeur (ayant été élaborée à l'issue des dernières séances piscine, nous n'avons pas pu l'expérimenter).
- Calibrer les caméras uEye et GoPro en piscine et en mer.
- Réaliser des acquisitions en piscine et en mer avec les caméras uEye pour acquérir des objets en mouvement (notamment de flore & faune) pour pouvoir tester la synchronisation (durant les dernières missions terrains, le câble de l'une des caméras présentait des fuites et elles n'ont pas pu être utilisées).
- Campagne d'acquisition et test de trajectoires sur une zone d'intérêt (fonds profilés) en mer équipée des mires de marquage avec relevé des métriques en guise de vérité terrain.

Comme pour les autres déplacements, nous voyageons en train avec le matériel. Nous emportons dans nos valises et sacs à dos le matériel opérationnel (ordinateurs, récepteurs ZigBee et routeur WiFi, câble ROV, manette Xbox, bancs stéréoscopiques, mires de marquage, mire d'étalonnage, perche et caméra étanche, serviette du robot, sacs en tissus, etc.), le matériel de plongée (combinaisons, masques, palmes, gilet stabilisateur, ceintures, etc.) un peu de matériel mécanique (chatterton, colliers de serrage, scratch double face et adhésif, vernis, lime, clef 6 pans, etc.) et de rechange (visserie, aimants, joints, brides, batteries et piles, chargeurs, optiques, moteurs, etc.). Quant au robot, il voyage sous le siège !

Les plombs seront achetés sur place et l'outillage mécanique (pinces, clefs, tournevis, limes, perceuse et forets, pistolet et bâtons de colle chaude, etc.) et électronique (oscilloscope, alimentation stabilisée, multimètre, station de soudure, étain, tresse à dessouder, gaines thermorétractables, fils électriques, connecteurs, programmeurs, multiprises, etc.) nous est mis à disposition par l'EPF Montpellier via Antoine.

### B.3.1 Premier jour : préparatifs

Nous commençons cette première journée par une installation dans la salle du quartier général (figure B.30 page 203) et nous rassemblons le matériel dont nous allons avoir besoin.

La première étape est d'établir un bilan météorologique sur les cinq jours de mission afin de pouvoir planifier au mieux nos activités. Alors que la semaine précédente s'est vue gratifiée d'un temps presque estival, les prochains jours s'annoncent plus mouvementés. Les modèles consultés divergent et nous amènent à penser que la situation est très instable, nous devons donc affiner ces informations au jour le jour. Le temps d'aujourd'hui est ensoleillé, une légère pluie est annoncée pour le lendemain matin et le ciel devrait se dégager en fin d'après-midi. Pas de pluie sur le troisième jour, mais des précipitations probables sur les deux qui suivent. Cela ne nous arrange pas, car c'est généralement sur les derniers jours que nous plaçons les acquisitions à la journée, lorsque



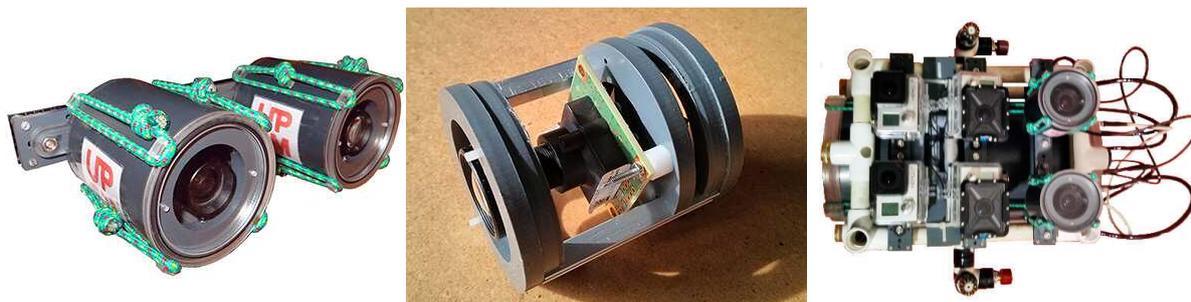
**Figure B.30** – À gauche, préparatifs au quartier général dans les locaux de l'EPF et à droite, le dragon des mers (en eau douce) qui rode dans la nuit noire, éclairé par la lumière de la lune (Du flash en réalité, car bien que ce soit soir de pleine lune et que l'équinoxe soit encore proche, l'astre nocturne n'est levé que depuis une demi-heure) [CC BY-NC L. Avantbey et al.].

les préparatifs, les essais et les corrections associées ont été effectués. Mais les déplacements pour les missions sont prévus à l'avance et il faut donc faire avec.

Après ce point météorologique, nous procédons aux tâches indispensables de maintenance du fait que le robot n'est pas retourné à l'eau depuis cinq mois (dernière plongée dans la darse de La Seyne-sur-Mer) et qu'il vient de voyager : raccord de vernis sur les moteurs, changements des joints et des brides, nettoyage des hublots, etc. Les brides que nous utilisons sont des joints toriques, mais leur matière n'a pas supporté la température élevée de la canicule ni l'air particulièrement sec de cet été et elles se sont toutes rompues. Nous avons donc mis en place un système de brides de stockage avec de la corde à tendeur (cette même corde est utilisée pour faire les brides opérationnelles des nouveaux boîtiers caméras dont nous parlerons un peu plus tard). Les doubles brides toriques sont maintenant montées uniquement avant une mise à l'eau. De plus, cela nous permet de gagner du temps lorsque nous avons besoin d'ouvrir le robot pour travailler dessus.

Nous réalisons ensuite le contrôle de toutes les fonctionnalités du robot. En premier lieu, l'allumage, puis la communication avec la carte mère par le biais du câble ROV relié en filaire à l'ordinateur (TTL USB) : fonctionnel. Même test, mais cette fois-ci avec une connexion sans fil entre le câble et l'ordinateur (Zigbee) : le test échoue. Nous vérifions la programmation des puces XBee et le paramétrage de la vitesse de communication, mais tout semble correct. Un examen sur les connexions mécaniques nous amène à repérer une soudure abîmée que nous réparons : la communication fonctionne, mais nous notons quand même quelques perturbations (ce n'est pas la première fois).

Nous testons ensuite le retour vidéo de la caméra embarquée à travers l'EasyCap : fonctionnel. Nous lui avons refait un support avant de partir pour la rapprocher au maximum du hublot ce qui nous offre maintenant un meilleur champ de vision. Puis nous allumons l'ordinateur embarqué (MK 802) grâce à un signal émis par la carte mère et nous nous y connectons en WiFi. Le test suivant consiste à brancher les caméras uEye et à lancer le script d'acquisition. C'est un feu vert de ce côté, avec tout de même un problème récurrent : de manière aléatoire, l'ordinateur repasse automatiquement dans le mode par défaut qui lui permet de distribuer sa puissance à la demande (*on demand*) au lieu d'être toujours à 100% disponible (*userspace*) ce qui a pour effet de planter l'acquisition (les caméras renvoient des erreurs de transfert) et nous devons donc régulièrement relancer le script à la main pour rétablir le mode à la demande. Nous n'avons toujours pas trouvé de solution à ce problème, ce qui nous oblige à rester constamment en communication avec l'ordinateur embarqué. Cela implique une communication série supplémentaire par le câble ROV. En effet, à l'heure actuelle, l'ordinateur de bord ne communique pas avec la carte mère et le signal WiFi est perdu dès que nous descendons sous la surface (et pour le retrouver, il faut redémarrer le robot). Nous remettons en place pour cette occasion le double connecteur partagé avec la reprogrammation : nous réinversons deux fils qui avaient été permutés par erreur lors d'un précédent rebranchement et nous raccourcissons le connecteur lui-même pour que la connexion soit



**Figure B.31** – À gauche, les nouveaux boîtiers des uEye, conçus sur le modèle du caisson de Ryujin ainsi que le rail intérieur, au centre, qui permet de fixer la caméra dans le boîtier tout en ajustant sa distance au hublot, enfin à droite les trois bancs montés sur le robot (vous ne lui trouvez pas un petit air familier en le penchant à 90°CCW?) [© L. Avantbey et al.].

plus stable et que la masse soit par conséquent moins perturbée.

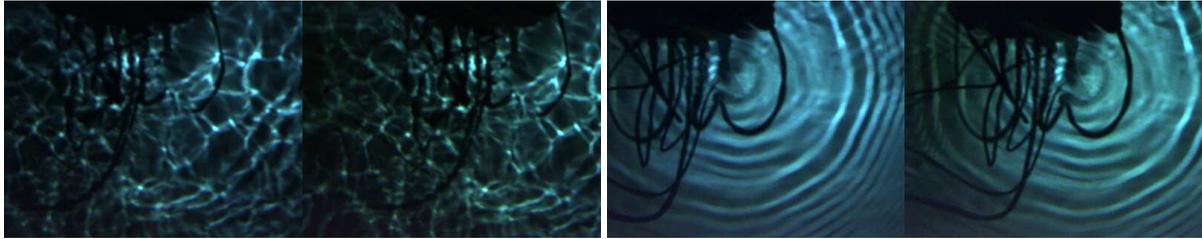
En revanche, l'ajout de la carte électronique d'interrupteurs lors des dernières séances piscines (voir l'annexe C page 229) est une vraie plus-value et nous a réglé deux problèmes : via des signaux envoyés par la carte mère, nous pouvons maintenant allumer ou éteindre l'ordinateur de bord sans avoir à redémarrer le robot tout entier et nous pouvons brancher ou débrancher électroniquement les caméras étanches (il n'est plus nécessaire de le faire manuellement par les connecteurs étanches). Ce dernier point résout l'inconvénient généré par les pilotes uEye qui sont chargés après la lecture initiale des ports USB. Il est donc obligatoire de brancher les caméras après cette étape pour qu'elles soient détectées, et nous devons auparavant ressortir le robot après chaque redémarrage pour procéder à cette manipulation. Nous n'avons pas encore eu l'occasion de profiter de cette amélioration en opérationnel à cause de divers problèmes annexes lors de nos dernières mises à l'eau.

Test suivant : les moteurs. Tout fonctionne sauf le moteur latéral n°1 qui nous paraît bien grippé (le palier doit être abîmé, ce moteur avait déjà montré des signes de faiblesse lors des tests à l'IFREMER). Il faudra donc le changer, mais nous reportons cette réparation au lendemain matin (autant rentabiliser la période de pluie !). Quant au capteur de pression, il communique, mais il faudra tester ses valeurs en condition pour confirmer son bon fonctionnement.

Côté nouveautés, nous avons fait imprimer un second autocollant pour la mire d'étalonnage, mais cette fois-ci avec une trame grise à la place des carreaux blancs afin d'éviter la surexposition provoquée en contraste avec les couleurs ternes et la faible luminosité du milieu sous-marin. Nous avons déjà procédé à ce changement sur les mires de marquage et le résultat avait été satisfaisant. Malgré l'emballage de protection, l'autocollant a été abîmé pendant le transport, ce qui complique la mise en place qui n'est déjà pas une tâche aisée à réaliser au vu de la taille de ce dernier : il ne faut pas déformer l'autocollant en tirant trop sur les côtés, mais il ne faut pas non plus former des bulles d'air ou des plis, le tout en veillant à rester bien droit sur la surface d'applique. Nous collons cette nouvelle mire au dos de la précédente afin de pouvoir basculer d'une version à l'autre en cas de problème non anticipé. Nous fixons également du scratch autocollant au dos des mires de marquage pour pouvoir les lester (nous achèterons les plombs le lendemain), car nous avons remarqué lors de la précédente mission terrain que leur poids propre ne suffisait plus lorsqu'il y avait un peu de houle.

Il est presque 18h, nous refermons le robot et rassemblons le matériel pour rejoindre la piscine (il est trop tard pour aller en mer !) et terminer les tests fonctionnels qui nécessitent une immersion. Nous arrivons sur les lieux à 19h30, le soleil s'est couché et la nuit tombe rapidement. Il y a bien des petites ampoules d'éclairage tout autour de la table où nous installons le matériel à côté de la piscine, mais le câble d'alimentation est arraché. Nous le réparons pour y voir un peu plus clair pendant que nous immergeons les nouveaux boîtiers uEye, vides, au fond de la piscine pour un test d'étanchéité. En effet, ces derniers, très récents, n'ont été testés jusque-là que dans un saladier (immersion pendant trois semaines).

Pour rappel, les anciens boîtiers Shockwave, malgré les modifications que nous avons fait faire dessus, ne



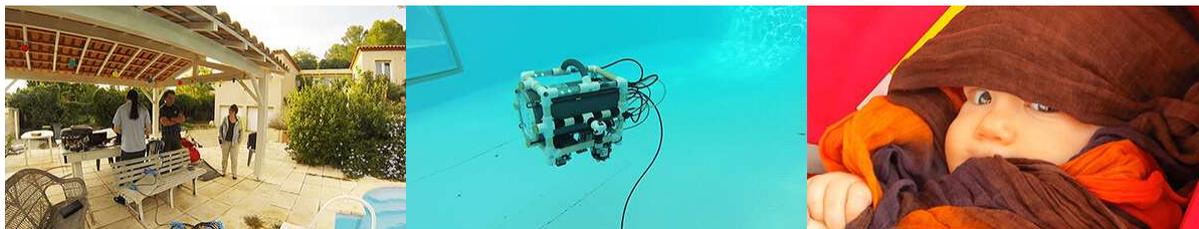
**Figure B.32** – Deux couples d’images stéréoscopiques acquis par les uEye [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.]. La lumière bleutée des LED de statut du robot éclaire la surface de l’eau. Cette dernière, ridée par le mouvement des moteurs, projette des arabesques de lumière (caustiques) sur le fond de la piscine. L’écart temporel qui sépare les images du couple stéréoscopique est inférieur à un millième de seconde et nous permet de saisir l’instant de ces mouvements hautement dynamiques.

permettaient pas l’intégration d’optiques plus longues, nécessaires pour améliorer la qualité des images acquises : manquant de profondeur, il était alors impossible de les refermer. Il est difficile de trouver dans le commerce des boîtiers adaptés à ces dimensions et à celles du robot. Nous avons donc dû concevoir les nôtres. Pour une question de faisabilité et d’assurance de résultat, nous sommes partis sur le même principe de caisson étanche que celui de Ryujin (voir la figure B.31 page 204) : un tube PVC aux larges parois pour accueillir un joint torique à chaque extrémité, un bouchon doté d’un connecteur étanche et un hublot à l’autre bout – tout deux en PMMA et usinés à la machine à commande numérique (CNC) – et enfin, des brides pour maintenir l’ensemble. Nous en avons profité pour ajouter deux fixations sur le bouchon (la plupart des boîtiers n’en proposent qu’une) permettant ainsi de supprimer le degré de liberté en rotation lors du montage de la caméra sur le banc. Un rack, composé de rondelles PVC usinées à la CNC et fixés sur des U en aluminium, permet de maintenir la caméra dans le caisson tout en ajustant sa distance par rapport au hublot (en fonction du réglage du focus) et en calant sa position en rotation (alignement toujours fixe par rapport au banc).

Nous avons dû trouver une autre solution que les joints toriques pour le rôle de brides. En effet, le diamètre de notre boîtier ne laissait que peu de liberté sur le choix du diamètre de tore des joints d’étanchéité. Plus épais que prévu, ils nécessitent une force de traction pour les écraser supérieure à celle que peuvent nous fournir les joints présentant les bonnes dimensions pour faire les brides. Nous nous sommes donc tournés vers l’utilisation de cordes élastiques (tendeurs). Les premiers résultats sont plutôt satisfaisants, le seul inconvénient notable étant la matière qui ne nous permet pas d’obtenir un scellage propre des embouts coupés avec une flamme (comme il est possible de le faire avec de la paracorde par exemple). Nous réservons notre jugement sur le long terme, nous devons tester leur comportement sur plusieurs critères : capacité à garder la tension dans la durée, résistance aux coups brusques, réaction par rapport au sel, etc. Un avantage non négligeable de ce système est son coût très inférieur qui permet un remplacement beaucoup plus fréquent. Mais il implique aussi un risque, car les brides sont réalisées à la main : il faut donc toutes les tester avant usage.

Nous ressortons les boîtiers de l’eau au bout de 20 minutes : aucune trace de fuite ! C’est une bonne nouvelle, et c’était loin d’être gagné, car l’un des hublots, terminé juste avant de partir, avait rencontré un problème lors de sa conception. La CNC était cassée, mais nous avons pu malgré tout réaliser nos usinages en recourant à quelques astuces. Cependant, sur la dernière pièce, la profondeur n’a pas été régulière et il s’est formé une rampe sur le sillon du joint qui empêche ce dernier de s’écraser correctement... N’ayant plus accès à la machine quand nous avons remarqué ce trempin d’un millimètre et quelques, nous avons donc dû improviser en corrigeant l’usinage à l’aide d’un tournevis (hérésie !). Mais ça a réussi : deux jours entiers dans une cocotte (plus profond qu’un saladier) sans fuite ! Nous sommes donc soulagés par cette validation en piscine qui nous confirme que nous pourrions enfin utiliser les caméras uEye pendant une mission. Ultérieurement, nous devons les valider à des profondeurs plus élevées (supérieures à 15 m).

Les tests d’étanchéité du robot se passent également sans problème, même s’ils ne sont pas faciles à exécuter dans le noir (on regrette la lampe frontale) ! Nous fixons les trois bancs (uEye, GoPro Hero2, GoPro Hero3+)



**Figure B.33** – *Nouvelle séance piscine du soir, mais cette fois-ci à la lumière du jour, ce qui permet de mieux s’y retrouver côté station au sol et matériel, mais aussi de mieux voir le robot pour le pilotage [© L. Avantbey et al.]. Tous nos faits et gestes sont sagement observés par de petits yeux attentifs et curieux [© L. Avantbey et al.].*

sous le robot (voir figure B.31 page 204) mais nous rencontrons un problème mécanique avec les câbles du banc uEye : sur le dernier que nous avons refait, le scellage remonte plus que nécessaire le long de la gaine provoquant ainsi une hauteur de boucle trop grande pour se loger sous le tube du robot. La base de nos nouveaux bancs est réglable (3 à 4 positions pour chaque caméra), nous les écartons donc pour que les câbles passent de part et d’autre du tube. Et s’il s’avère à l’avenir que nous avons besoin de la base la plus petite, nous devrons alors refaire des câbles en prenant en compte cette contrainte.

Nous testons dans l’eau toutes les fonctionnalités que nous avons testées au quartier général et nous procédons à quelques acquisitions uEye. Les arabesques de lumière ou caustiques, résultantes de la lumière des LED du robot et des rides de la surface provoquées par son mouvement, nous permettent de vérifier que le taux de synchronisation que nous obtenons avec ces caméras (au millième de seconde) devrait être suffisant pour nos applications, car il s’agit là d’un phénomène hautement mobile. Sur les images équivalentes prises avec les caméras GoPro, dont le taux de synchronisation est moins bon (cinquante centièmes de seconde) la structure globale de la scène reste reconnaissable, mais les détails montrent de nombreuses différences. Nous pouvons observer deux exemples de couples synchronisés uEye à la figure B.32 page 205.

À 21h15, nous rangeons le matériel et terminons ainsi cette première journée.

### B.3.2 Deuxième jour : suite des préparatifs

La météorologie est confirmée pour ce deuxième jour, bien que le temps soit plutôt au crachin qu’à la pluie ce matin. En revanche, les prévisions de pluie pour les prochains jours empirent et n’augurent rien de bon.

Nous mettons en charge toutes les batteries et nous partons faire les courses pour acheter le matériel dont nous avons besoin : une clef 6 pans de précision (1,5 mm) pour démonter le moteur à remplacer (nous n’avons pas eu le temps de préparer des blocs entiers de rechange), de la colle mastic afin de recoller les fonds des boîtiers GoPro Hero2 sur les supports amovibles du banc (le double face adhésif est efficace avec les Hero 3+, car la surface du boîtier est plane, ce qui n’est pas le cas pour les Hero2 qui possèdent un léger rebord d’un millimètre d’épaisseur), les plombs pour les mires et des cordelettes pour mettre en place un système pour prendre les mesures sous l’eau.

Les vis BTR du moteur sont coincées à cause des dépôts d’oxydation de l’aluminium. N’ayant pas les bons produits sous la main, nous n’avons pas d’autre choix que de démonter l’un des blocs moteurs de Kraken, le robot de surface, que nous remplacerons lorsque nous aurons débloqué le moteur. Les raccords étanches d’un bloc sont faciles et très rapides à effectuer.

Nous démarrons le robot pour tester le montage de ce nouveau moteur, mais un problème de communication survient : le message d’accueil « Welcome to Ryujin » s’affiche normalement, mais après cela, il n’y a plus que du bruit. Il ne s’agit pas d’un problème inconnu et nous réparons la soudure fautive du TTL USB. La communication reprend normalement et le moteur fonctionne comme il le faut. Nous réactivons l’exposition automatique périodique dans le programme d’acquisition des uEye et nous vérifions si les focus des caméras ont bougé pen-



**Figure B.34** – Nous déposons les mires de marquage et d'étalonnage au fond de la piscine pour procéder à des tests sur les prises de vues uEye afin d'ajuster le facteur d'exposition automatique, la station au sol permet de contrôler l'acquisition et d'afficher les retours (vidéo, capteurs, etc.) [© L. Avantbey et al.]

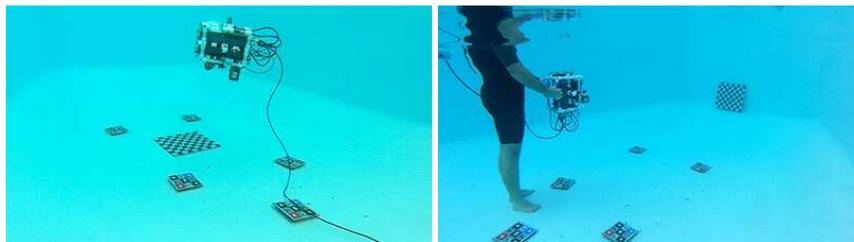
dant le transport. Nous les avons réglés avant de partir en faisant la mise en point sur un point lumineux (on cherche alors à atteindre le point le plus petit possible sur l'image) distant de cinq mètres (la profondeur de champ est plus grande que lorsque le focus est réglé à trois mètres). Le système ne prévoyant pas de vis de serrage, nous avons donc maintenu ce réglage avec du ruban Téflon. Cela nous a permis par la même occasion de combler le jeu un peu trop large entre le pas de vis et l'embase qui rendait nos optiques sensibles au moindre mouvement. Nous remarquons au passage que nous avons oublié trois des cartes micro-SD pour les caméras GoPro et nous retournons les tiroirs d'Antoine pour dénicher des remplaçantes de secours.

Nous travaillons ensuite sur l'ordinateur de bord. Nous avons acquis une version plus récente (MK802 IV) que celle qui se trouve dans le robot (MK802 II). Comme nous souhaitons à terme effectuer du traitement sur des images à bord en quasi temps réel, la présence de deux cœurs supplémentaires sur la nouvelle version est importante, car les deux actuels sont entièrement utilisés par l'acquisition (synchronisation et fréquence des prises de vues). De plus, nous espérons que cela puisse améliorer les erreurs de transferts et le changement de mode intempestif. Nous copions donc le système, puis nous câblons la nouvelle MK par dessus le connecteur USB pour pouvoir la brancher temporairement sur le HUB du robot à la place de la carte actuelle. Nous alimentons le tout, mais la nouvelle MK ne démarre pas. Nous la repassons en fonctionnement autonome, mais elle ne répond plus : il s'agit sûrement d'un problème avec la mémoire flash, ce qui signifie qu'il va falloir réinstaller tout le système (tâche longue et complexe, car ces cartes multimédias sont conçues à l'origine pour fonctionner sous android et non sous linux). Quant à celle du robot, elle non plus ne démarre plus, mais c'est une soudure du connecteur qui s'est rompue durant la manipulation. Après réparation, le robot fonctionne à nouveau.

Nous arrêtons là nos essais et nous rassemblons notre matériel pour arriver un peu plus tôt que la veille à la piscine et pouvoir tester notre nouvelle procédure d'étalonnage avec nos deux bancs d'acquisition (le banc des Hero2 termine de sécher). Mise à l'eau et début des tests à 18h, cette fois-ci à la lumière du jour (figure B.33 page 206). Nous avons beau être très tard dans la saison, les tigres (volants !) sont encore d'attaque et c'est l'heure de la chasse...

Nous ajustons le lestage du robot avec un plomb de 500 g qui nous permet d'obtenir une flottabilité très légèrement positive. Nous lestons également les mires de marquage et la mire d'étalonnage. Puis mise à l'eau générale (figure B.34 page 207) : robot, mires et plongeur, le thermomètre indique 15°C au mercure dans la piscine ! Grâce au programme de génération de vignettes que nous avons conçu lors des dernières séances piscine, nous pouvons visionner des échantillons d'images transmis par le câble ROV directement pendant l'acquisition, sans avoir à attendre la sortie de l'eau. Le réglage automatique de l'exposition sur les premières acquisitions nous semble beaucoup trop exagéré, c'est peut-être pour cette raison que nous avons désactivé cette fonctionnalité (voir historique du 12 mai 2014 page 228). Nous maintenons le mode automatique, mais nous lui ajoutons un facteur multiplicateur que nous ajustons jusqu'à obtenir un résultat convenable. Au cours de la séance, nous remarquons malgré tout de temps à autre une surexposition des images (mauvais échantillonnage lors de la mise à jour automatique du temps d'exposition ?).

Nous activons l'asservissement en profondeur pour garder une distance constante à la mire d'étalonnage



**Figure B.35** – Premiers tests de la méthodologie d'étalonnage en piscine [©ⓃⓁ L. Avantbey et al.] : au nadir en pilotant le robot asservi en profondeur et en latéral en manipulant le robot à la main.



**Figure B.36** – À gauche, deux images d'étalonnage GoPro et à droite deux images uEye, au nadir et en latéral, la distance d'acquisition est la même pour les deux bancs [©ⓃⓁ L. Avantbey et al.].

qui est déposée sur le fond de la piscine et nous pilotons le robot au-dessus de cette dernière de manière à ce qu'elle puisse être capturée sur toutes les parties du capteur (bords, coins, centre) et sous différents angles. Nous prenons soin de coupler les translations avec des rotations et, nous l'espérons, à un peu de roulis et de tangage. La profondeur de la piscine n'est pas suffisante pour les uEye qui n'arrivent pas à acquérir la mire en entier, le grand-angle des GoPro leur épargne cet inconvénient. Or si nous voulons pouvoir faire des acquisitions avec les deux bancs simultanément, il est nécessaire de les calibrer tous les deux à la même distance (limitation de la correction apportée au modèle du sténopé pour prendre en compte le phénomène de réfraction). Nous passons donc au deuxième mode de notre méthodologie : l'étalonnage en latéral.

La mire est adossée à la paroi de la piscine et le robot est tenu à la main. Nous n'avons pas encore prévu un système qui permet de basculer les bancs (et donc qui permettrait au robot d'effectuer l'acquisition) mais l'étalonnage en latéral étant surtout utile lorsque la profondeur est insuffisante ou en surface, l'intervention d'un opérateur n'est généralement pas compliquée à mettre en place. Pour ce qui est de la procédure d'acquisition en latéral, le principe est le même qu'au nadir : rotations couplées à de petits angles de roulis et tangage, le tout avec des translations pour obtenir des images avec des mires bien réparties sur tout l'espace de vision du capteur. Ces deux méthodes d'acquisition sont illustrées à la figure B.35 page 208 et des exemples d'images obtenues sont proposés à la figure B.36 page 208.

Fin des tests piscine à 20h. Nous rentrons au camp de base pour vider les cartes mémoire, parcourir rapidement à l'oeil les données acquises (nous n'avons plus assez de temps pour conduire des analyses plus poussées) et mettre à charger les batteries. Au vu du bilan météorologique sur les derniers jours, nous décidons de profiter de l'absence de pluie sur le lendemain pour réaliser une campagne d'acquisition à la journée même si tout n'est pas entièrement prêt. Le lieu de mission choisi est l'endroit que nous avons envisagé lors de la préparation du déplacement : le Cap d'Agde. Par ailleurs, nous étudions les cartes de la côte méditerranéenne pour trouver un lieu de mission hors de la zone de pluie pour le dernier jour. Les prévisions sont plutôt optimistes sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et nous envisageons donc un déplacement du côté des calanques, de l'autre côté de Marseille (entre 200 et 270 km de route) : Cassis, La Ciotat ou encore Le Lavandou, trois lieux que nous connaissons bien.



**Figure B.37** – À gauche le matériel que nous emportons sur le terrain : le robot, les mires, les affaires de plongées, la station au sol et le matériel associé ainsi que la valise d'outillage, à droite, c'est une mer très formée qui nous accueille au Cap de Sète et nous retrouvons le même tableau à notre arrivée au Cap d'Agde [© L. Avantbey et al.].



**Figure B.38** – La mer blanchit du côté du Cap d'Agde et les rochers des Deux-Frères sont submergés par les déferlantes, au Grau-d'Agde, nous trouvons sans grande surprise deux fronts de vagues, qui se transforment par moments en rouleaux [© L. Avantbey et al.].

### B.3.3 Troisième jour : le Cap d'Agde

*Latitudes de 45 degrés, 16 minutes et 50 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitudes de 5 degrés, 50 minutes et 57 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

Ce matin, le ciel est couvert, mais il y a de la clarté et peu de vent. Nous préparons le robot et nous lui ajoutons le banc des Hero2 qui a terminé de sécher. Nous rassemblons toutes les affaires pour les mettre dans la voiture (figure B.37 page 209) : le matériel opérationnel est réparti dans deux sacs de toile et nos sacs à dos, le matériel de plongée se trouve dans un sac à roulette, quant à la valise, elle contient l'outillage et le matériel de rechange, elle restera donc dans le coffre. Nous nous sommes fait prêter pour la journée une batterie de rechange pour la station au sol.

Notre destination, le Cap d'Agde, se situe à environ 85 km de route. Nous décidons de faire une escale au deux tiers du chemin, au Cap de Sète, afin d'évaluer si nous pouvons l'utiliser en lieu de replis en cas de nécessité. Mais arrivés au Théâtre de la Mer, c'est un spectacle inattendu qui nous accueille (figures B.37 et B.38 page 209) : une mer formée, avec des creux d'environ deux mètres à l'approche des côtes. Le temps est calme et le vent peu actif, la houle doit donc venir de loin. Nous poussons jusqu'à la plage de la Conque au Cap d'Agde en espérant qu'elle soit un peu plus abritée, mais la houle arrive en direction de l'est et toute la côte alentour est orientée dans ce sens. Et effectivement, dans l'ancienne caldera, plusieurs fronts de vagues balayent la plage, les rochers du Cap sur lesquels nous avons prévu de nous installer sont noyés dans des bouillons d'écume et de part et d'autre, des déferlantes s'écrasent jusqu'au sommet des rochers des Deux-Frères.

Il ne sert à rien de risquer une mise à l'eau dans ces conditions, la présence des rochers affleurants rendant cette entreprise peu prudente pour le matériel comme pour nous. De plus, le fort ressac laisse supposer des conditions de visibilité très médiocres pour conduire une mission (taux de particules en suspension élevé et quantité de lumière transmise par la surface agitée faible).

Sans grand espoir, nous nous dirigeons vers le Grau-d'Agde près des digues qui marquent l'embouchure de l'Hérault, mais ici, ce sont de véritables rouleaux et des creux encore plus profonds qui nous attendent. Nous repartons donc bredouilles. Nous entendons qu'un avis de tempête a été émis ce matin sur la Corse, ce qui pourrait expliquer la situation. Les tempêtes d'automne sont certes moins nombreuses que leurs homologues



**Figure B.39** – *Prospection des digues, ici à La Grande-Motte, en perspective d'une mise à l'eau le lendemain : nous vérifions la direction de la houle, la visibilité et l'accessibilité à l'eau* [© L. Avantbey et al.].

hivernales, mais elles existent bel et bien et ne se privent pas aujourd'hui de se rappeler à notre bon souvenir...

Toujours est-il que nous avons perdu beaucoup de temps et que nous aurions dû regarder les webcams avant de partir pour éviter toute cette route ! Il ne reste que deux jours de mission et les prévisions météorologiques empirent : il faut résister au stress de revenir sans données.

De retour au campement de base, nous travaillons sur l'analyse des acquisitions de la veille. Nous testons notre programme de présélection des images d'étalonnage que nous avons développé pour trier à la volée les données qui seront utiles à l'estimation du modèle sténopé.

Ce programme commence par sous-échantillonner les images pour y rechercher le damier. Dans le cas où la détection serait positive, il analyse la position de la mire : si nous disposons déjà d'une information à cet endroit, la nouvelle image, considérée comme redondante, est rejetée. Nous profitons de notre test pour ajouter une nouvelle contrainte sur la forme : si la mire ne présente pas d'angle de roulis ni de tangage, nous rejetons également l'image, car elle n'apporte que trop peu d'information (données parallèles au capteur). Si l'image passe tous ces tests, le damier est recherché à nouveau, mais cette fois-ci à la résolution à laquelle se déroulera l'estimation des paramètres d'étalonnage (il est en effet possible que la détection échoue à cause du flou). À la fin de ce traitement, le programme fournit la liste des images répondant à tous ces critères ainsi qu'une représentation de la répartition des empreintes des mires retenues.

Mais à notre grande surprise, aucune mire n'est détectée sur les centaines d'images acquises, qu'elles proviennent des uEye ou des GoPro. Pourtant, visuellement, les images nous paraissaient de bonne qualité. Nous retestons notre programme sur les images d'étalonnage acquises dans la fosse de Charenton et la détection fonctionne bien. Est-ce donc un problème dû à la nouvelle trame grise de la mire ? À l'utilisation des GoPro Hero3+ ? À la faible luminosité ? Les hypothèses sont trop larges pour réussir à en tirer quelque chose. Nous faisons varier un peu à l'aveugle les paramètres de la fonction de détection du damier et nous finissons par obtenir un résultat !

Bien que nous ne comprenons pas exactement pourquoi les valeurs initiales ne fonctionnaient pas, le nouveau réglage permet globalement de relâcher des contraintes (le problème doit donc probablement résulter d'un mélange de conséquences entre la trame grise et la faible luminosité). Nous obtenons 100% de détection sur les images GoPro prises au nadir, mais nous n'avons pas assez déplacé le robot en translation au regard du grand-angle de ces caméras : les mires se retrouvent donc assez concentrées sur le centre des images (et le programme de sélection élimine la redondance) et nous disposons de très peu d'information sur les bords. Quant aux images prises en latéral, toujours avec les GoPro, aucune mire n'y est détectée. En y regardant de plus près, ces images, prises sur la fin de séance alors que le soleil s'était couché, sont toutes tremblotantes (résultat d'un temps d'exposition long et du tremblement du plongeur qui refroidissait depuis plus d'une heure dans l'eau). Et cela ne doit pas faciliter la détection des intersections du damier, car ces dernières sont toutes floues. Quant aux images uEye, pas une seule au nadir ne contient la mire en entier (la profondeur n'était pas suffisante) et les images latérales souffrent du même problème que celles des GoPro (en plus prononcé encore, car le capteur est moins sensible à la lumière).

Nous installons les bibliothèques nécessaires pour pouvoir exécuter ce programme directement sur l'ordinateur de bord. Même si nous ne pouvons pas le faire tourner à la volée pendant l'acquisition (rappelez-vous, notre



**Figure B.40** – La journée se termine par une nouvelle procédure d'étalonnage en piscine, cette fois-ci uniquement en latéral [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.]. Comme il fait nuit noire, nous installons deux mini-soleils artificiels (lampes halogènes) pour que les caméras puissent voir la mire, ce qui intrigue beaucoup les bérissons.



**Figure B.41** – Dans ces conditions d'éclairage faible, les GoPro Hero2 fournissent des images (gauche) beaucoup plus bruitées et sombres que les GoPro Hero3+ (droite) [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.]. Les deux images de droite sont un agrandissement de celles de gauche pour mieux visualiser la différence de qualité.

ordinateur manque de cœurs), nous pourrions tout de même l'utiliser en cours de test, entre deux acquisitions, sans avoir à attendre le transfert des images en WiFi lorsque le robot est sorti de l'eau (tâche assez longue au regard de la taille des fichiers à transférer).

La fin de journée approche et pour préparer le programme du lendemain nous décidons d'aller prospecter deux digues (figure B.39 page 210) qui devraient être un peu plus abritées. Il est en effet peu probable que la houle se calme avant plusieurs jours, et cela compromet nos sites d'études initiaux. La première correspond à la digue extérieure du port de Palavas-les-Flots, protégée de l'Est par le port lui-même, quant à la seconde, il s'agit de la digue intérieure du port de La Grande-Motte, protégée de l'Est par la pointe de l'Espiguette (Grau-du-Roi). Nous nous décidons pour cette dernière, car le ressac y est un peu moins fort et l'eau nous y semble un peu plus claire d'après les échantillons vidéos malgré les particules en suspension. De plus, le parking est moins loin et l'accès à l'eau par les rochers y est plus aisé.

Enfin, pour terminer la journée, nous retournons faire un test en piscine avec les trois bancs pour retravailler les prises de vues en latéral. Il est 19h30 et le soleil se couche. Pour obtenir un rendu exploitable, nous installons autour de la piscine deux halogènes en guise de mini-soleils (figure B.40 page 211). Le plongeur enfle une combinaison plus chaude que celle de la veille, car l'eau de la piscine n'a pas réchauffé depuis, bien au contraire ! Entre deux séries d'acquisitions, nous lançons le programme de sélection : beaucoup de mires non détectées, mais ça passe sur une partie. Pour les GoPro, il faudra attendre la sortie de l'eau pour savoir ce qu'il en est, mais nous prenons soin d'effectuer des translations sur toute la largeur de la piscine pour essayer d'obtenir de l'information jusque sur les bords des images.

À 22h, nous ressortons de l'eau un petit robot et un petit plongeur tout transits : retour au camp. Pendant que les images des cartes sont copiées sur les disques durs et que les batteries rechargent, nous ajoutons dans le programme de sélection la possibilité d'enregistrer l'image des empreintes à chaque nouvelle mire sélectionnée afin de pouvoir visionner le résultat au fur et à mesure du traitement sans en attendre la fin.

Les images sont beaucoup moins tremblantes que la veille, même si certaines restent floues malgré l'effort que nous avons mis à réaliser des déplacements très lents. Nous remarquons que l'échec de détection des mires correspond souvent à la présence des arabesques de lumière sur les intersections du damier. Mais certains cas extrêmes semblent passer sans problème : la détection demeure un mystère ! De plus, en vérifiant visuellement



**Figure B.42** – Arrivée sur la jetée, installation du camp, vérification de la visibilité par le plongeur, puis mise à l'eau du robot et de la mire d'étalonnage [©④⑤ L. Avantbey et al.].



**Figure B.43** – Le plongeur installe la mire sur le fond de sable (environ trois mètres de profondeur) et le robot commence les acquisitions au nadir depuis la surface, à droite une image GoPro et une image uEye [©④⑤ L. Avantbey et al.].

les images, nous remarquons que certaines détections valides correspondent au reflet de la mire sur la surface ! Nous constatons également une différence flagrante de sensibilité à la lumière entre les Hero2 et les Hero3+ : les images des premières sont beaucoup plus sombres et sont très bruitées comme nous pouvons le voir sur la figure B.41 page 211 !

Notre programme du lendemain est prêt et nous nous penchons maintenant sur la planification de la dernière journée d'acquisition. Les bulletins météorologiques commencent à annoncer de la pluie sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Malgré tout, l'eau y est plus claire que par ici et la présence des criques sur la côte permet de s'assurer de trouver un endroit passablement abrité. Nous maintenons donc cette destination, et nous penchons pour une mission à La Ciotat. En fonction des conditions sur place, nous pourrions choisir entre la calanque du Grand Mugel, la pointe de Nege Froume ou le Cap de l'Aigle.

### B.3.4 Quatrième jour : la jetée du port de La Grande-Motte

*Latitudes de 43 degrés, 53 minutes et 16 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitudes de 4 degrés, 4 minutes et 57 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

*Luminosité extérieure bonne, soleil et quelques nuages, température extérieure 20°C – eau à 17-18°C, houle faible, visibilité de 2-4 mètres, particules en suspension*

Ce matin, le ciel est voilé, mais la couverture nuageuse tend à se lever au cours de la matinée. Nous partons donc en direction du port de La Grande-Motte. Mais arrivés sur les lieux, nous nous rendons compte que la batterie de la station au sol n'a pas été chargée ! Et aujourd'hui, nous n'avons pas pu emprunter la batterie de rechange que nous avions la veille. Sur le deuxième ordinateur, la station au sol rencontre un dysfonctionnement qui le fait redémarrer systématiquement. Il nous reste le troisième ordinateur, mais il faut tout installer, merci la 3G ! La même erreur que sur le deuxième ordinateur se produit, mais elle ne conduit pas à un redémarrage du système, ça fera donc l'affaire (nous essayons de ne pas trop entamer la batterie avec toutes ces démarches). En parallèle, nous ne perdons pas de temps et nous installons tout le matériel sur les rochers de la jetée pour être prêts à mettre à l'eau (figure B.42 page 212).

La houle est faible (inférieure à 20 centimètres) et les vagues qui arrivent sur la jetée oscillent entre 40 et 80 centimètres avec à intervalles réguliers une vague plus forte (un peu plus d'un mètre). La barrière rocheuse



**Figure B.44** – La turbidité étant forte, le plongeur installe la mire sur les rochers, juste en dessous de la surface et procède à l'étalonnage en latéral, à droite une image GoPro et une image uEye [© L. Avantbey et al.].



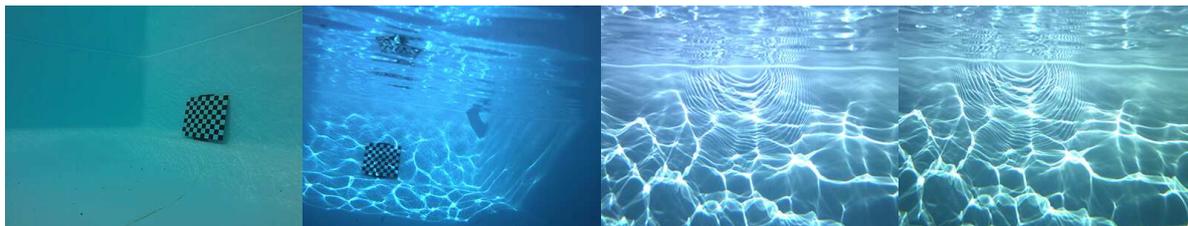
**Figure B.45** – Pendant l'acquisition, un joli banc de mulets passe entre la mire et le robot (ici capturé par les GoPro et les uEye) et nous avons aussi croisé quelques poulpes [© L. Avantbey et al.] !

s'enfonce dans l'eau jusqu'au sable. La turbidité rappelle celle des plages de l'Atlantique (typique des fonds de sable, forte absorption, diffusion dans le vert). Le plongeur installe la mire d'étalonnage à environ trois mètres de profondeur et c'est parti pour une acquisition au nadir avec les trois bancs (figure B.43 page 212). Nous rencontrons un problème avec le réglage automatique de l'exposition des caméras uEye : les vignettes que nous récupérons sont entièrement noires. Même si la visibilité n'est pas terrible, ça ne peut pas être pire que le premier soir à la piscine dans le noir total avec les LED pour seul éclairage. Nous désactivons le réglage automatique et nous fixons manuellement plusieurs valeurs d'exposition (en suivant une stratégie dichotomique), mais nous obtenons aléatoirement soit des images noires, soit des images blanches, sans information aucune, même minimale (tout à 0 ou à 255) : incompréhensible ! Nous repassons en mode automatique, sans succès. Le temps passe, nous décidons de continuer l'acquisition au minimum avec les GoPro.

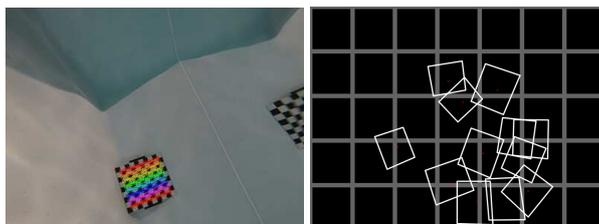
Mais en redémarrant une dernière fois l'ordinateur de bord et le programme d'acquisition, nous obtenons enfin des images. Des tests ultérieurs nous amèneront à penser que les images noires ou blanches enregistrées correspondaient peut-être à des erreurs de transferts qui par erreur auraient conduit à la sauvegarde des fichiers alors que ces derniers n'existent pas. Encore une fois, ce problème est sûrement lié au mode de distribution de puissance de la MK.

En visionnant les vignettes, nous ne sommes pas sûrs que la mire sera détectée sur les images : l'absorption est forte et la houle amène sans cesse du sable par-dessus le damier (le plongeur descend régulièrement pour le balayer). Nous décidons donc de passer à la procédure d'acquisition en latéral et de profiter ainsi au maximum de la lumière traversante en restant proche de la surface (figure B.44 page 213). La mire est placée en appui sur les rochers de la jetée (nous testerons plusieurs emplacements) et le plongeur prend le robot à la main. Pendant l'acquisition, un banc de mulets, décide de passer entre la mire et le robot. Le plongeur tourne le robot pour les suivre un maximum en espérant les capturer de manière synchronisée : c'est dans la boîte (figure B.45 page 213) ! Nous verrons si nous arrivons à en faire quelque chose.

La batterie de l'ordinateur nous abandonne sur la fin de la troisième manipulation latérale. Nous continuons un petit moment en aveugle puis nous ressortons le matériel de l'eau. En remontant sur le chemin de la digue, un gros rocher se fend littéralement en deux en mettant le pied dessus ! Heureusement, plus de peur que de



**Figure B.46** – Parmi la récolte du soir : une image GoPro et une image uEye ainsi qu'un couple uEye synchronisé au dix millièmes de seconde capturant les caustiques [©️📷 L. Avantbey et al.].



**Figure B.47** – Voici un premier résultat du programme de sélection des mires sur les images GoPro acquises en piscine [©️📷 L. Avantbey et al.]. Malgré le faible taux de détection, la répartition de l'échantillon semble prometteuse.

mal et nous retournons en un seul morceau au camp de base pour mettre à charger les batteries et transférer les données.

Nous exécutons le programme d'étalonnage sur plusieurs sous-échantillonnages des images de la veille pour évaluer l'impact de la résolution sur l'estimation des paramètres. L'idée est de pouvoir effectuer le calcul (qui est assez coûteux en temps) sur des petites images et de multiplier les résultats par le facteur d'échelle adapté à la résolution utilisée pour la reconstruction tridimensionnelle. Les résultats préliminaires à ce propos sont mitigés : certains paramètres semblent varier beaucoup.

Après ces essais, les batteries étant de nouveau pleines, nous retournons faire une dernière acquisition en piscine tant que la nuit n'est pas encore tombée. Quelques images de la séance du jour sont proposées à la figure B.46 page 214 et un premier résultat du programme de sélection est affiché à la figure B.47 page 214.

De retour au camp, nous préparons le matériel pour la sortie à la journée du lendemain : batteries chargées (toutes !), cartes mémoire vidées, robot bouclé, station au sol et matériel opérationnel associé, bateau gonflable en état (nous n'avons pas eu le temps de remettre un moteur sur Kraken), ressources en eau et en nourriture rassemblées, etc. Nous terminons également un bricolage pour pouvoir effectuer plus facilement les mesures sous l'eau, et dont nous présenterons le principe plus en détail dans la suite de ce récit.

Un dernier bilan météorologique nous fait changer d'avis sur notre lieu de destination, car les prévisions de pluies ont encore empiré et ce sont maintenant plusieurs dizaines de millimètres attendus sur toute la partie est de la Méditerranée depuis notre position. Nous regardons donc à l'opposé, du côté de l'ouest. D'après les cartes satellites, pour trouver des fonds rocheux proches de la côte, il faut se rendre jusqu'à la Côte Vermeille, derrière Argelès-sur-Mer. Comme le Cap d'Agde [Foulquié et al., 2003, FR9101414], il s'agit d'un site Natura 2000 [Licari et al., 2004, FR9101482], ce qui nous donne accès à une documentation détaillée de la zone.

Collioure nous semble un bon choix avec plusieurs petits caps abritant des criques aux orientations différentes et accessibles par des chemins avec des parkings assez proches. Les fonds sont peu profonds, ce qui nous arrange, car il sera difficile de louer des bouteilles ce qui nous limite donc entre deux et quatre mètres de fond pour pouvoir travailler correctement. Une observation des webcams et les dernières mises à jour des prévisions météorologiques demain au lever nous permettront de donner le *go / no go* final. Il est presque 2h du matin, il faut aller recharger nos propres batteries afin d'être en forme pour cette dernière journée de mission qui s'annonce longue.



**Figure B.48** – *Nous partons de Montpellier sous une pluie battante et nous arrivons à Collioure où un magnifique soleil et une mer calme nous offrent une visibilité extraordinaire sur les fonds* [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.].



**Figure B.49** – *En à peine une vingtaine de minutes, le temps d'effectuer le repérage, les nuages envahissent la côte. Il se met à pleuvoir; le vent se lève, la houle se forme et nous perdons définitivement la jolie couleur bleu-lagon de l'eau qui nous garantissait des conditions de visibilité optimales pour les caméras. Mais nous ne perdons ni le sourire ni l'espoir, il faut y aller malgré tout et récupérer des données* [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.].

### B.3.5 Cinquième et dernier jour : Collioure et la Côte Vermeille

*Latitudes de 42 degrés, 51 minutes et 27 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitudes de 5 degrés, 5 minutes et 45 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

*Luminosité extérieure médiocre, nuages épais, un peu de vent, température extérieure 18-20°C – eau à 20-21°C, petite houle, visibilité de 6-7 mètres, particules en suspension*

Nous chargeons le coffre de la voiture, dernières vérifications et c'est un *go* pour Collioure. Le départ a lieu sous des trombes d'eau et pour un peu, nous partions directement équipés avec les combinaisons de plongée, le masque, le tuba et les palmes ! Passé Narbonne, le déluge torrentiel se calme et les nuages s'éclaircissent, des bouts de ciel bleu font timidement leur apparition.

Nous arrivons aux pieds des Pyrénées-Orientales avec un contraste étonnant : les montagnes du massif des Albères sont englouties dans les sombres nuages d'orage, mais ces derniers ne débordent pas sur la côte qui est, elle, inondée de soleil. Nous nous rendons compte que nous ne sommes qu'à une poignée de kilomètres de Banyuls-sur-Mer, et nous résistons à l'envie de déplacer le lieu de mission sur ces terres (ou plutôt ces mers) mythiques où se sont déroulés les travaux de Louis Boutan ! Nous sécurisons la mission avant tout : en effet, nous n'avons pas étudié en détail les cartes jusque-là et nous ne souhaitons pas prendre de risque pour notre dernière occasion d'acquérir des données terrains.

Nous arrêtons une première fois la voiture pour évaluer la petite avancée rocheuse qui sépare l'anse de Reguers en deux criques. Puis nous déplaçons la voiture pour aller voir un autre emplacement un peu plus loin, du côté de la crique d'En Baux, sur les rochers du Cap Gros. Le ciel bleu est magnifique, il n'y a ni vent ni houle et la mer couleur bleu lagon nous laisse apercevoir les fonds avec une visibilité extraordinaire (figure B.48 page 215) ! Les profondeurs autour de cette deuxième plateforme nous paraissent plus basses (cinq-six mètres) et le chemin pour s'y rendre est plus long, nous optons donc pour la première.

Nous passons acheter un sandwich et nous ressortons sous un torrent de pluie ! Il ne s'est pas passé 20 minutes depuis notre arrivée que les nuages se sont massés sur la côte et le ciel bleu ne subsiste plus qu'au large



**Figure B.50** – Nous avons choisi une petite zone d'étude d'environ 70 m<sup>2</sup> dans l'anse dels Reguers, marquée par le cercle vert [© L. Avantbey et al.]. Toute la zone alentours est classée Natura 2000, ce qui nous permet d'avoir accès à de nombreux documents, comme cette carte de l'anse produite entre 2003 et 2004 [Licari et al., 2004].



**Figure B.51** – Nous terminons les préparatifs du bateau de surface qui nous servira de relais avec la station au sol et nous mettons le tout à l'eau [© L. Avantbey et al.].

(figure B.49 page 215). Le vent s'est levé, la houle s'est formée : nous perdons la visibilité si optimale que nous aurions pu avoir sous l'eau. Bien que la pluie s'arrête rapidement, le soleil, lui, ne reviendra pas de la journée et la houle ne se calmera qu'en soirée.

Un coup d'œil à la côte de part et d'autre nous montre que la situation est identique partout ailleurs. Nous ne nous décourageons pas : il nous faut des données, même si elles auraient pu être meilleures, ça sera mieux que rien. Nous croisons les doigts pour qu'au minimum la pluie ne revienne pas. Le plongeur se met à l'eau pendant que nous installons le matériel sur l'avancée rocheuse. Nous testons la limite de portée du câble, mais les quinze mètres dont nous disposons ne suffiront pas. En effet, les rochers immergés de la plateforme sont trop proches de la surface (environ 50 à 70 cm d'eau) et ils sont essentiellement entourés de sables.

Le plongeur part à la nage voir les criques alentour pour savoir si finalement un autre lieu ne nous serait pas plus propice. Il y a bien des fonds intéressants en direction de la crique de L'Oli, mais la houle y est beaucoup plus forte et les vagues s'écrasent avec fracas sur les rochers. En poussant un peu plus loin, un autre endroit, plus abrité, manque cette fois-ci d'un accès (il se situe au pied des falaises abruptes) et de l'autre côté, vers la pointe de Baleta, l'eau nous semble tout autant agitée et nous n'avons pas repéré d'accès voiture en arrivant.

Nous décidons donc de rester là où nous sommes et choisissons une zone d'étude d'environ 70 m<sup>2</sup> située à une trentaine de mètres en face de notre position sur l'avancée rocheuse que nous pouvons visualiser sur les cartes de la figure B.50 page 216. Elle est bordée par l'herbier de posidonies et des rochers de différentes profondeurs. Au centre, d'anciennes conduites cassées sont réparties un peu partout sur un fond de gravier. Le plongeur transporte les mires de marquage dans un sac grillagé attaché à une bouée de plongée et commence à équiper la zone et à prendre les mesures.

Nous envisageons d'utiliser le bateau de surface comme nous l'aurons fait de Kraken, c'est-à-dire en plateforme de relais (mais non motorisée) et nous lui arrimons le câble ROV. Malheureusement, nous n'avons pas la connectique nécessaire pour brancher la puce XBee de l'ordinateur embarqué à la place du TTL. Nous ten-



**Figure B.52** – À gauche les essais de pilotage, au centre le bateau relais en surface et à droite le quadrillage de la zone avec le plongeur [© L. Avantbey et al.].



**Figure B.53** – Images obliques des fonds de la zone d'étude [© L. Avantbey et al.] : rochers de différentes tailles, graviers et anciennes conduites, matte morte bordée par la posidonie.

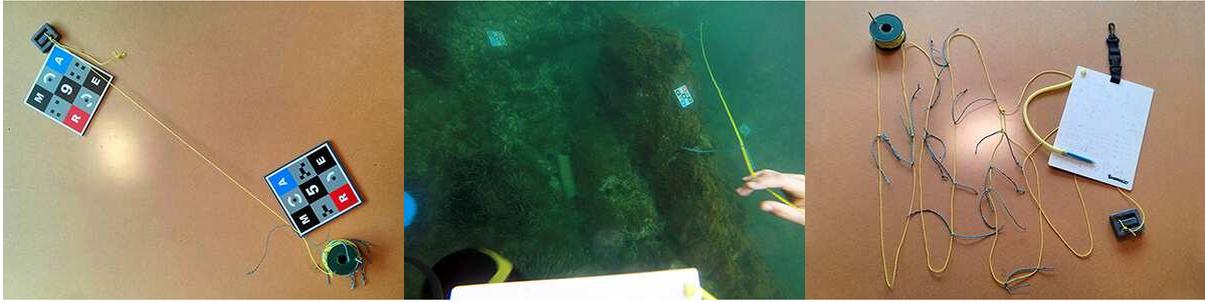
terons donc une communication WiFi avec ce dernier et une communication ZigBee avec la carte mère. Nous n'aurons donc pas de retour sur l'acquisition uEye et comme la luminosité baisse rapidement, nous ne pourrions pas perdre du temps en remontant régulièrement en surface pour redémarrer le robot et relancer l'acquisition, nous aurons donc essentiellement des images GoPro. Nous mettons le tout à l'eau : robot, bateau et deuxième plongeur (figure B.51 page 216).

Nous procédons à quelques tests de pilotage sur zone, mais la communication est erratique et la caméra embarquée ne nous offre qu'une vue latérale (très pratique pour descendre le long d'un tombant, beaucoup moins pour piloter avec des repères uniquement au nadir). Maintenant que nous avons récupéré les boîtiers Shockwave, nous pourrions installer une caméra analogique sous le robot au nadir et transférer son retour par le câble ROV, mais ce n'est pas pour tout de suite (il faut refaire un bouchon et un câble étanche).

Par ailleurs, le capteur de pression nous renvoie des valeurs aberrantes, comme ce fut le cas lors de la première mission. Impossible d'envisager un asservissement profondeur dans ces conditions. Comme il a bien fonctionné lors de la mise à l'eau dans la darse à La Seyne-sur-Mer, nous supposons que le problème ne vient pas de l'eau de mer (notre première hypothèse, car il a toujours bien fonctionné en piscine) mais du branchement (à l'IFREMER, nous étions en TTL contrairement à la première mission où nous étions en XBee, comme c'est le cas ici). Nous soupçonnons donc fortement que les problèmes apparents sur la communication via la puce XBee perturbent la référence de notre capteur (la masse).

Nous lançons le programme d'acquisition uEye en espérant qu'il tienne le plus longtemps possible et nous attrapons le robot à la main pour quadriller la zone en suivant des transects courts de mires à mires. Pendant ce temps, nous prenons en notes sur la plaquette à dessin des repères visuels pour pouvoir réaliser le croquis de la zone, et nous prenons des vidéos au nadir et obliques pour garder les lieux en mémoire. Les photographies proposées aux figures B.52 et B.53 page 217 illustrent tous ces événements. Nous tournons également des 360° vidéo au-dessus de chacune des mires. Au bout de deux heures, nous sortons le robot de l'eau et le plongeur termine les métriques.

Le système de mesure auquel nous avons pensé durant les premiers jours est simple et efficace. Le plongeur est équipé d'une plaquette au poignet avec des brins d'une dizaine de centimètres maintenus par deux élastiques. Chaque brin possède un numéro : un trait au feutre noir indélébile compte pour 1, un nœud compte pour 5. Ce système de quipu peut être réalisé avec des perles de tailles différentes, mais nous n'en avons pas sous la main.

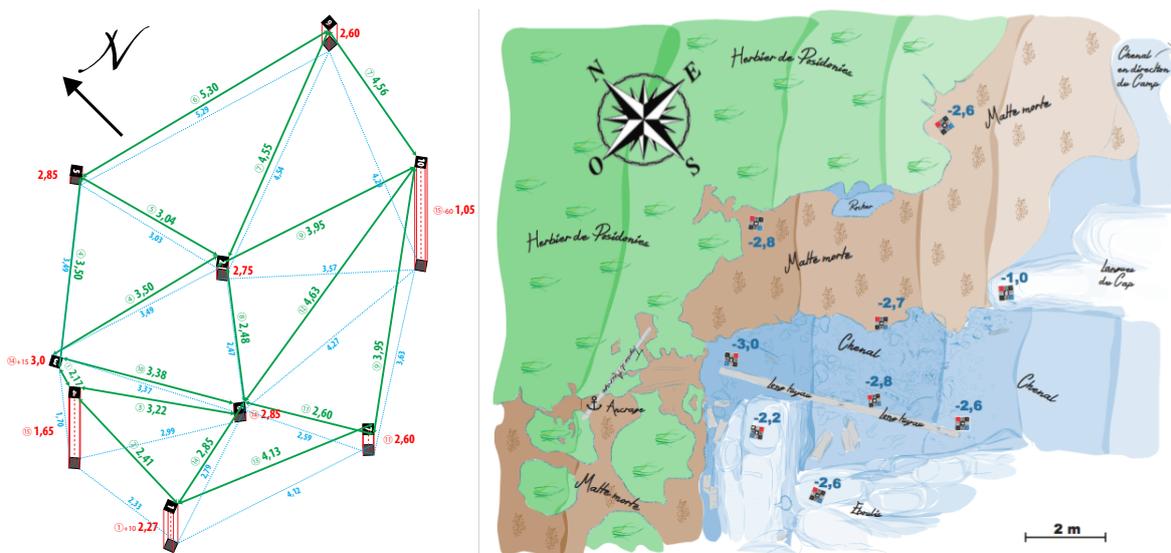


**Figure B.54** – À gauche, illustration du système de mesure, l'exemple ici sera noté « 9A-5M : 12 », au centre les métriques sont en cours de réalisation sur la zone d'étude, à droite la corde de 5,50 m qui contient la sauvegarde analogique de toutes les mesures effectuées et les notes associées [© L. Avantbey et al.].

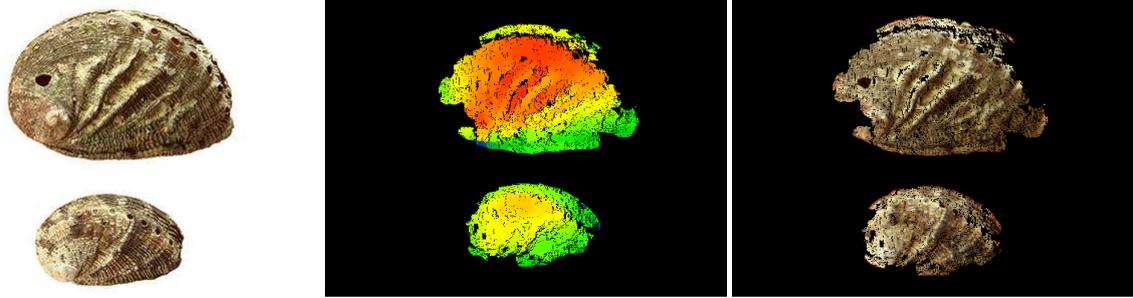
Le plongeur dispose également d'une bobine de plusieurs dizaines de mètres de corde dont l'extrémité est reliée à un plomb. Ce dernier est positionné sur le coin d'une mire et le plongeur déroule la corde jusqu'au coin d'une autre mire à proximité. Il marque alors la distance mesurée en nouant l'un des brins sur la corde et note les références sur la tablette (lettre du coin – M, A, R ou E – et numéro de la mire pour le départ et l'arrivée, ainsi que le numéro du brin, par exemple « 4E-9A : 12 » signifie que la distance entre le coin E de la mire n°4 et le coin A de la mire n°9 correspond à la mesure du brin n°12).

Le lecteur trouvera une illustration de ce système à la figure B.54 page 218. Chaque mire doit être reliée au minimum à trois autres mires alentour. Lorsque le relief est prononcé, une tige dont la longueur est connue peut être utile pour surélever la mesure. Comme nous avons oublié l'ordinateur de plongée à Paris, nous avons relevé les profondeurs des mires sur le même principe : le poids est déposé au centre de la mire et le plongeur remonte à la surface pour fixer le brin (très approximatif lorsqu'il y a des vagues).

Les mesures sont alors réalisées *a posteriori* sur la corde pour chaque brin puis associées aux mires et reportées sur un schéma. Avec une telle méthode, nous pouvons envisager une précision à plus ou moins 10 cm (à condition que les mires restent dans le champ de vision les unes des autres). L'intérêt majeur est de pouvoir conserver une version analogique des métriques de la zone en coupant la corde dont la longueur totale n'excédera pas la plus grande distance. Il est alors possible de refaire les mesures plus tard si le besoin s'en ressent. Nous avons fixé



**Figure B.55** – À gauche, le schéma du réseau de mires déposé sur le terrain réalisé grâce au report des métriques et aux vidéos 360° (les mesures sont en mètres, avec une précision d'une dizaine de centimètres) et à droite, le croquis de la zone d'étude [© L. Avantbey et al.].



**Figure B.56** – Reconstructions tridimensionnelles de coquilles d'ormeaux [© L. Avantbey et al.]. À gauche, deux coquilles trouvées sur la zone d'étude de Collioure ( $\sim 4,0 \times 2,5$  cm et  $\sim 2,5 \times 1,5$  cm), au centre les nuages de points denses reconstruits en couleurs d'échelle (les couleurs les plus chaudes marquent les points les plus proches de la caméra) et à droite les mêmes nuages, mais en couleurs réelles.



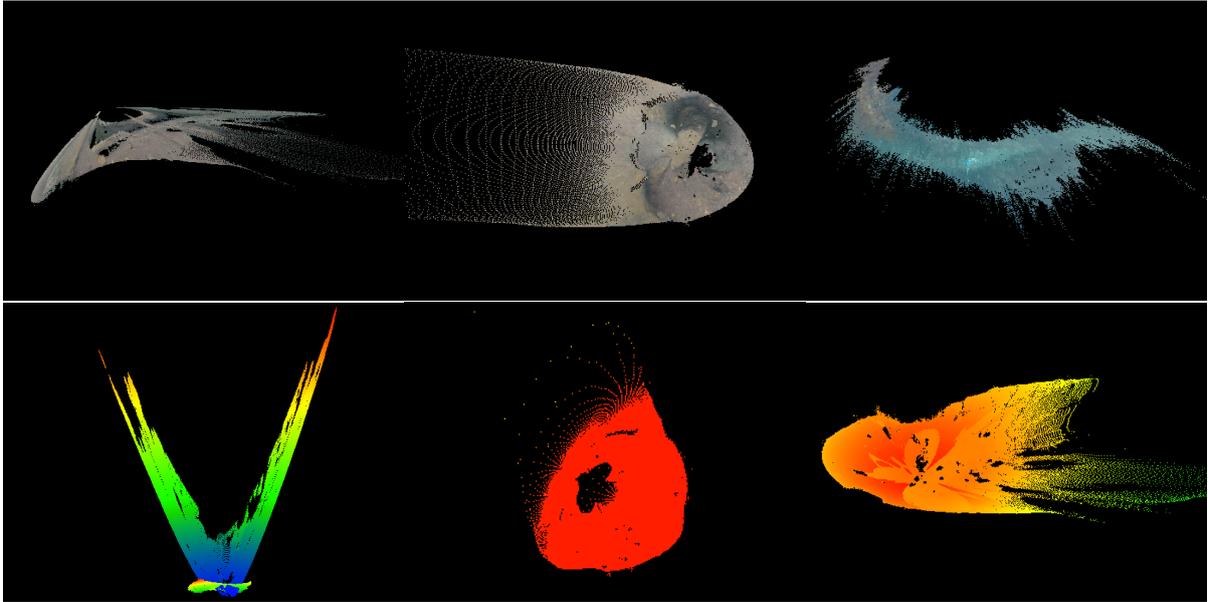
**Figure B.57** – Les premières reconstructions tridimensionnelles locales (à partir d'un couple stéréoscopique) des fonds de Collioure [© L. Avantbey et al.]. À gauche, l'entrée du chenal vue depuis le sud-est avec les rochers sur le bord, au centre, une partie du chenal bordé par la matte morte et à droite les rochers de l'éboulis au sud-ouest qui remonte le long du chenal.

un plomb de 500 g mais ce dernier était insuffisant, car il était difficile de tendre la corde sans le déplacer, un plomb de 2 kg serait plus adapté. De même, nous n'avions pas prévu assez de brins pour pouvoir en affecter un par mesure (pour les 9 mires que nous avons, il en aurait fallu une vingtaine). Le schéma créé à partir des relevés terrains ainsi que le croquis de la zone sont proposés à la figure B.55 page 218.

Après 5 heures passées dans l'eau, le plongeur récupère les mires et ramène le matériel restant sur la plage où nous avons débarqué le bateau et le robot. Le temps de tout boucler, il est 19h30 et la nuit tombe. Les orages sont passés et nous faisons la route de retour au sec. Arrivés à 22h15, nous apprenons qu'une trombe marine s'est formée au niveau du Cap de l'Aigle à La Ciotat – là où nous avons prévu de travailler initialement avant de changer d'avis pour Collioure – et a tenté de devenir une tornade en grimpant sur les terres ! Les pluies ont été torrentielles pendant toute la journée de Montpellier jusqu'à Cannes. Finalement, nous ne nous en sommes pas si mal tirés que cela et le revirement de l'est à l'ouest a été fort à propos !

Avant de faire nos bagages, nous vidons les cartes mémoires utilisées pour l'acquisition sur nos disques durs pour en faire des copies en double exemplaire. Puis nous reportons les métriques jusqu'à 2 heures du matin avant de sombrer pour un repos bien mérité à l'issue de cette journée très chargée. Demain, notre train part à midi.

Comme après chaque mission, nous ne partons pas sans une reconstruction tridimensionnelle de nos petites coquilles d'ormeaux, trouvées sur le terrain et que nous pouvons observer à la figure B.56 page 219. Nous réalisons également les premières reconstructions locales à partir des couples stéréoscopiques. Un échantillon est présenté à la figure B.57 page 219. Il nous reste maintenant à réaliser le prototype du code de recalage pour essayer d'obtenir nos premiers nuages globaux.



**Figure B.58** – *Quelques ratés de reprojection obtenus au cours de tests avec les paramètres d'étalonnage et qui ne sont pas dénués d'intérêt artistique [© ⓘ ⓘ L. Avantbey et al.]*

Nous terminerons ce récit de mission par l'illustration de reprojections ratées à la figure B.58 page 220. Nous les avons obtenues au cours de tests avec les paramètres de distorsion que nous avons réalisés pour mieux saisir leur comportement. Les échecs possèdent également leur lot d'intérêts !

*Merci à l'EPF pour le prêt des locaux et du petit matériel (et d'Antoine !). Nous remercions également Robert et Bernadette de nous avoir gentiment donné l'accès à leur piscine ainsi que Mathieu pour son accueil et son aide malgré nos horaires pas toujours commodes. Enfin, nous remercions chaleureusement Josette pour tout ce qu'elle a fait pour nous, de l'accueil à l'hébergement et de la logistique au soutien : un grand merci !*

*Ainsi s'achève la mission terrain qui s'est déroulée en Languedoc-Roussillon durant l'automne 2015.*



## Historique des séances piscine

*"There is an art [...] or rather, a knack to flying. The knack lies in learning how to throw yourself at the ground and miss. Pick a nice day [...] and try it."*

---

*The Hitchhiker's Guide to the Galaxy – Douglas Adam*

*« Il existe un art [...] ou plutôt un truc, pour voler. Le truc est d'apprendre à se flanquer par terre en ratant le sol. Choisir de préférence une belle journée pour s'y essayer. »*

---

*Le Guide du voyageur galactique – Douglas Adam*

 ici un historique des séances d'essais qui ont eu lieu à partir de l'année 2014 (les événements de 2013 n'ont pas été reportés et ne peuvent donc être présentés ici). Chaque séance piscine se déroule sur un créneau d'environ une heure et correspond à un temps d'environ 45 minutes dans l'eau si tout se passe comme prévu.

Le journal des événements est très important et parfois même indispensable pour comprendre les raisons d'un problème rencontré. C'est par exemple en revenant sur nos notes écrites un an auparavant que nous avons pu analyser et identifier la cause d'une fuite en 2012.

*Nous remercions encore la mairie de la ville de Charenton-le-Pont et la fosse de plongée du palais des sports Téliemaco-Gouin de nous permettre d'utiliser leurs infrastructures et plus particulièrement : Benoît Gailbac, Dominique Besinge, Olivier Leclercq, Boban Nikolic, Véronique Rieu, Guy-Louis Durand, Gilles Berthélémy, Jean-Marc Nguyen et Benoît Lemasson.*

### C.1 Séances de l'année 2014

- \* **Dernière mise à l'eau** : octobre 2013 (Nice, mer méditerranée).
- \* **Dernière utilisation des moteurs** : août 2013 (Nice, mer méditerranée).

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Moteur n°1 (horizontal gauche) enlevé, car un brin du bobinage est cassé et le moteur ne tournait plus (correspond au problème détecté en août).
- ⇒ Nouveau moteur n°1 installé, repris du robot de surface.
- ⇒ Ponçage des patins des quatre moteurs et application d'un vernis marin bicomposant sur l'ensemble (patins + bobinages).



Figure C.1 – De gauche à droite [©ⓉⓁ L. Avantbey et al.] : photographies de l'effet de réfraction, pilotage depuis la surface, Ryujin côté petit bassin (15 et 27 janvier).

### C.1.1 Séance n°1 : 13 janvier 2014

Visiteur : Ludmila L.

Robot : Ryujin (roboPIC v1).

#### Préparation :

- 1) Test de communication : **non fonctionnel**. Problèmes de communication au démarrage. Il s'avère qu'un processus lancé en arrière-plan perturbe le fonctionnement de minicom, nous le trouvons et forçons son arrêt : **fonctionnel**.
- 2) Test de contrôle des moteurs : **non fonctionnel**. Frottement important sur les quatre moteurs, à cause du vernis qui a formé des épaisseurs en séchant, particulièrement sur les moteurs verticaux. Limage des patins : **fonctionnel pour les moteurs horizontaux**, mais les moteurs verticaux frottent toujours, surtout le n°3. Prise de décision de finir de roder le dernier moteur dans l'eau.
- 3) Test d'étanchéité : **non fonctionnel**. Difficulté à brancher les connecteurs LED dans leurs embases : le joint abîmé gêne la manipulation, mais nous arrivons à le rentrer en force. Fuite immédiate lors de la mise à l'eau sur ces deux connecteurs. **Arrêt du test robot**.

#### Tests :

- Prise de photographies pour illustrer l'effet de réfraction au niveau d'un dioptre (ici air/eau).

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Changement des connecteurs LED (à cause des joints abîmés)
- ⇒ Identification de la cause de la fuite : les écrous des connecteurs LED étaient un peu desserrés.
- ⇒ Mise à l'eau du robot dans la poubelle durant une journée entière : pas de fuite visible à l'issue.

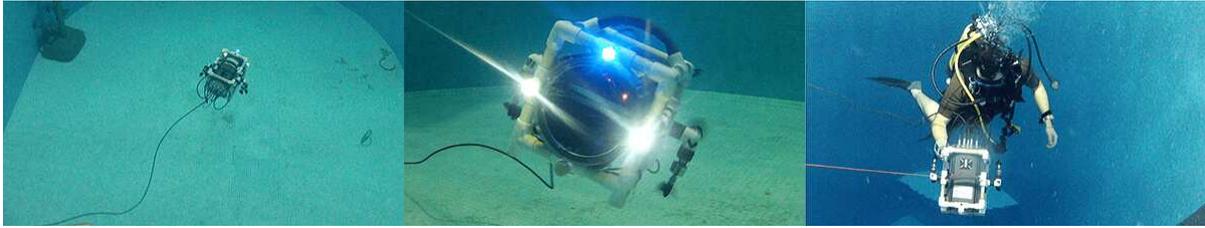
### C.1.2 Séance n°2 : 27 janvier 2014

Visiteur : Jean-Paul R.

Robot : Ryujin (roboPIC v1).

#### Préparation :

- 1) Test de communication : **fonctionnel**.
- 2) Test du contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.
- 3) Test du contrôle des moteurs verticaux : **fonctionnel**, mais un problème persiste sur le moteur n°3. En effet, il présente encore d'importants frottements et le moteur ne tourne quasiment pas, voire pas du tout par moment (il se bloque). Pourtant l'essentiel du vernis a été limé et il n'en reste presque plus. Peut-être que le frottement proviendrait plutôt d'un problème de palier. Quant au moteur n°4 qui frottait encore un peu la dernière fois, il semble s'être rodé.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, **fonctionnel**.



**Figure C.2** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : pilotage de Ryujin dans les bassins, le moteur 3 fonctionne mal et le robot gite fortement pour descendre, descente à la main du robot à 15 m pour tester les valeurs de l'ADC (27 janvier et 3 février).

- 5) Test d'asservissement profondeur : **globalement fonctionnel**, même si un seul moteur est actif, ce qui fait giter fortement le robot.

**Tests :**

- Séance courte de pilotage dans les deux bassins de la fosse pour vérifier que tout fonctionne bien (les batteries n'ayant pas été chargées (oubli) le temps d'utilisation est par conséquent très réduit).

○ **Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau**

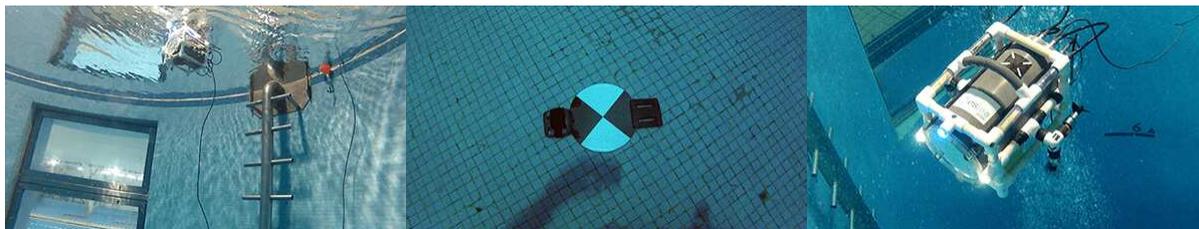
- ⇒ Après analyse, le problème du moteurs n°3 est effectivement dû au palier. De plus le contrôleur associé ne veut plus fonctionner et clignote en rouge pour indiquer un dysfonctionnement, même quand le moteur n'est pas branché ou encore s'il est branché sur un autre moteur.
- ⇒ Réinitialisation du contrôleur : ce dernier est de nouveau fonctionnel.
- ⇒ Changement du palier du moteur n°3, repris de l'ancien moteur n°1 : le moteur est de nouveau fonctionnel.
- ⇒ Test d'application d'un vernis à ongles coloré à la place du vernis marin bicomposant sur les moteurs verticaux après ponçage. L'objectif est de réduire les épaisseurs lors de l'application, de mieux voir lorsque le vernis est abîmé et nécessite une maintenance, et de pouvoir en remettre facilement sans devoir tout refaire.
- ⇒ Test de fonctionnement : le moteur n°3 ne fonctionne plus, il s'agit cette fois-ci d'un problème de phase (bruit caractéristique). Identification de la soudure défectueuse et réparation : le moteur est de nouveau fonctionnel.

### C.1.3 Séance n°3 : 3 février 2014

*Robot : Ryujin (roboPIC v1).*

**Préparation :**

- 1) Test de communication : **non fonctionnel**. Problème de configuration d'un Xbee, réglé en le réinitialisant : **fonctionnel**.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : **fonctionnel**.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, **fonctionnel**.
- 5) Test d'asservissement profondeur : **globalement fonctionnel**, mais présente malgré tout des oscillations non attendues. De plus, de temps à autre, un des moteurs verticaux (le gauche ?) semble s'arrêter et le robot gite violemment.
- 6) Test d'étanchéité à 15 m de profondeur : (robot éteint) rien à signaler, **fonctionnel**.



**Figure C.3** – De gauche à droite [©ⓂⓁ L. Avantbey et al.] : contrôle des moteurs, disque de Secchi à 15 m de profondeur, réglage des coefficients d'asservissement profondeur (10 février).

#### Tests :

- Descente jusqu'à quinze mètres et remontée à la main par paliers de 50 cm et mesure du capteur de pression ADC pour validation de la formule de profondeur
- Descente et remontée automatique (asservissement profondeur) par paliers de 1 m et enregistrement des mesures du capteur de pression ADC pour validation de la formule de profondeur. À noter deux redémarrages presque successifs vers 12/13 mètres sans raison connue, remontée avant d'arriver aux quinze mètres.

### C.1.4 Séance n°4 : 10 février 2014

*Robot : Ryujin (roboPIC v1).*

#### Préparation :

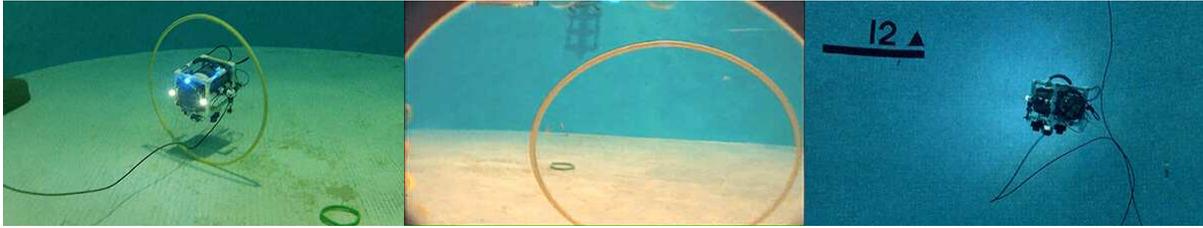
- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : fonctionnel.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- 5) Test d'asservissement profondeur : globalement fonctionnel, les oscillations sont toujours présentes.

#### Tests :

- Tests de réglages des coefficients d'asservissement pour retirer les oscillations : c'est mieux, mais ce n'est toujours pas aussi bien que les réglages d'avant l'été, et les coefficients que nous avons mis sont très éloignés de ces derniers.
- Test de prises de vue avec deux disques de Secchi en papier (sous pochette plastique). Premier procédé : le disque est descendu par le plongeur tandis qu'une caméra filme de la surface, arrivé au fond le disque est déposé et le plongeur s'éloigne pour que les bulles ne gêne pas la vision, puis il reprend le disque et remonte progressivement vers la caméra. Second procédé : le disque est déposé en bas de la fosse, le plongeur filme en remontant, puis filme en descendant et récupère le matériel.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Ajout d'une caméra KX dans le robot, désactivation de la fonctionnalité de reprogrammation via le câble ROV en échange du retour du flux vidéo analogique.



**Figure C.4** – De gauche à droite [©ⓂⓁ. Avantbey et al.] : pilotage hors vue via le retour vidéo KX sur la station au sol, extrait de la vue embarquée avant le passage dans l'anneau, descente à 15 m en suivant le mur sur le retour vidéo (10 mars).

### C.1.5 Séance n°5 : 10 mars 2014

Visiteur : *Mohammed L.*

Robot : *Ryujin (roboPIC v1)* équipé d'une caméra KX, du banc stéréoscopique uEye et d'une GoPro Hero3 oblique externe

#### Préparation :

- 1) Test de communication : **fonctionnel**.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : **fonctionnel**.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, **fonctionnel**.
- 5) Test d'asservissement profondeur : **globalement fonctionnel**, les oscillations sont toujours présentes, mais plus de gros tangage apparent.
- 6) Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : **fonctionnel**.
- 7) Test de lancement du script d'acquisition synchronisée : **fonctionnel**, mais nous ne l'avons pas relancé après le redémarrage du robot, or à l'issue de la séance il ne semble avoir pris que très peu d'images ce qui nous semble étrange. Nous n'avons pas pu monitorer le script en temps réel, car pas de communication WiFi ou Xbee possible quand on est dans l'eau et l'UG802 ne communique pas encore avec la carte mère. Nous n'avons pas non plus de retour par le câble ROV car tous les fils sont déjà utilisés.

#### Tests :

- Test de pilotage avec la vision interne : entreprise plutôt réussie, plusieurs passages dans l'anneau à 5 m, plusieurs descentes à quinze mètres, et navigation à travers tout le bassin.
- Problème avec un moteur vers la fin de la séance : le contrôleur se met en sécurité et le robot gite violemment en conséquence. Nous devons redémarrer le robot pour récupérer un moteur vertical fonctionnel. La cause reste pour le moment inconnue.
- L'asservissement en profondeur nous paraît toujours perturbé, et le capteur de pression semble renvoyer des données qui oscillent énormément.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Remappage des fils du câble ROV, pour pouvoir profiter de la fonctionnalité de reprogrammation en plus du retour vidéo.

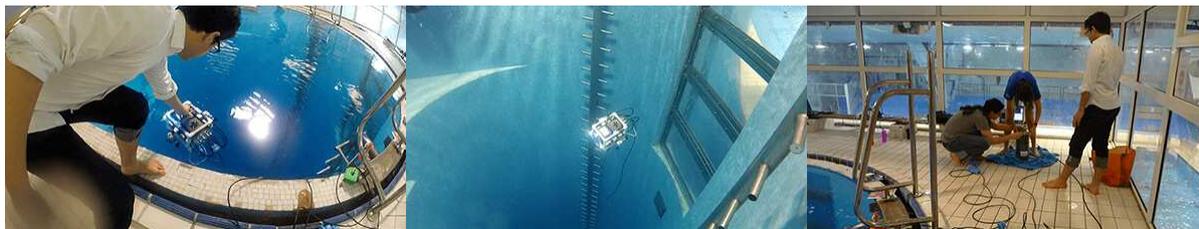


Figure C.5 – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : mise à l'eau, pilotage et test d'acquisition d'images, ouverture pour maintenance sur le bord du bassin (24 mars).

### C.1.6 Séance n°6 : 24 mars 2014

Visiteurs : Joseph S., équipe Aquatis (Clément M., Romain P. et Vincent M.), Josette. C.

Robots : Ryujin (roboPIC v1) équipé d'une caméra KX, du banc stéréoscopique uEye et d'une GoPro Hero3 oblique externe. Aquatis.

#### Préparation :

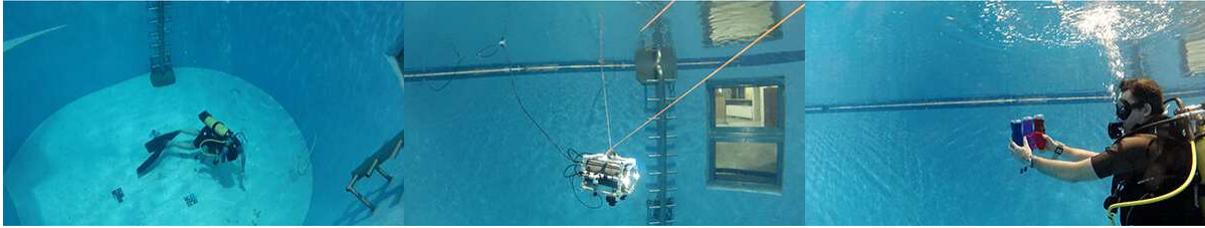
- 1) Test de communication : **non fonctionnel**, l'ordinateur embarqué ne répond pas. Nous rouvrons le robot, la carte SD n'était pas enclenchée comme il faut. Second test : **fonctionnel**.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : **fonctionnel**.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, **fonctionnel**.
- 5) Test d'asservissement profondeur : **globalement fonctionnel**, toujours les mêmes oscillations.
- 6) Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : **fonctionnel**.
- 7) Test de lancement du script d'acquisition synchronisée : **fonctionnel**.

#### Tests :

- Installation des mires de marquage au fond du bassin pour pouvoir faire les acquisitions avec le banc stéréoscopique.
- Acquisition de couples stéréoscopiques. À un moment, l'ensemble du flux de données par le câble ROV s'est retrouvé perturbé. Cela ressemble à un problème de masse du côté du robot. Nous rouvrons à nouveau Ryu et nous appuyons sur le connecteur de reprogrammation/flux vidéo, les perturbations disparaissent. Nous fixons le tout avec un scotch en attendant de reprendre le connecteur au laboratoire.
- De temps à autre, le programme d'acquisition *freeze* sans raison apparente, nous remontons le robot à la surface pour pouvoir communiquer en WiFi et nous forçons l'arrêt du programme pur pouvoir le relancer.
- Un contrôleur s'est mis en sécurité vers la fin de la séance (température interne au niveau du processeur : 70-75°C).

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Mise en place d'un retour série ZigBee de l'ordinateur embarqué à la place de la fonctionnalité de reprogrammation pour pouvoir mieux monitorer le déroulement du script d'acquisition.
- ⇒ Stabilisation du connecteur de reprogrammation/flux vidéo pour éviter les problèmes de masse.
- ⇒ Création d'un script de monitoring de la température interne du processeur.
- ⇒ Création d'un script qui teste combien de vrais couples stéréoscopiques synchronisés ont été acquis.



**Figure C.6** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : mise en place des mires de marquage au fond du petit bassin, Ryujin sur une tyrolienne pour pouvoir effectuer les tests de prises de vue malgré un moteur latéral qui dysfonctionne, photographies pour illustrer la flottabilité (31 mars).

### C.1.7 Séance n°7 : 31 mars 2014

Visiteurs : Joseph S., équipe Aquatis (Clément M., Romain P. et Vincent M.).

Robots : Ryujin (roboPIC v1) équipé d'une caméra KX et du banc stéréoscopique uEye. Aquatis.

#### Préparation :

- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : **non fonctionnel**, le moteur n°1 ne tourne pas. Le bruit caractéristique qu'il produit indique probablement une rupture de phase.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- 5) Test d'asservissement profondeur : globalement fonctionnel, beaucoup d'oscillations (le robot n'est pas très bien lesté (trop léger, et déséquilibré), ce qui produit un effet « glider »).
- 6) Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : fonctionnel.
- 7) Test de lancement du script d'acquisition synchronisée : fonctionnel.

#### Tests :

- Le monitoring constant que nous avons maintenant via le câble ROV sur l'ordinateur embarqué nous permet de voir que lorsque le script rencontre une erreur non identifiée, il n'arrive pas à se relancer et nous sommes obligés de redémarrer l'ordinateur embarqué.
- Le script de comptage des vrais couples stéréoscopiques permet de voir que les couples synchronisés "à la seconde" sont majoritaires et que la plupart d'entre eux sont synchronisés à la centième de seconde. Nous avons une impression contraire et nous pensions obtenir que peu de vrais couples.
- Nous avons installé une tyrolienne pour faire naviguer le robot d'un bord à l'autre en maintenant le cap avec la manette et un moteur de contrôle, des mires ont été installées en dessous.
- À la fin de la séance, le moteur n°1 semble fonctionner de nouveau, peut-être s'agit-il d'un faux contact ?
- Prise de photographies pour illustrer la flottabilité.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Changement des barres LED de statut.
- ⇒ Réparation des soudures cassées sur les spots.
- ⇒ Ponçage et vernissage au vernis à ongles des patins des moteurs horizontaux.
- ⇒ Test des moteurs : pas de problème apparent avec le moteur n°1, à surveiller pendant la prochaine la séance piscine.

### C.1.8 Séance n°8 : 7 avril 2014

Séance annulée.

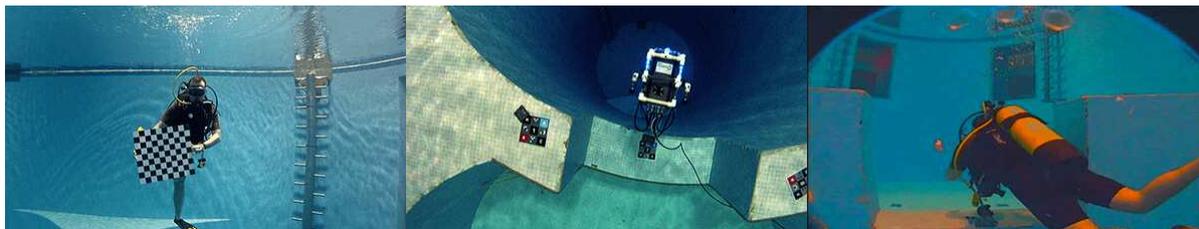


Figure C.7 – De gauche à droite [⊕⊖⊕ L. Avantbey et al.] : prises de vue latérales de la mire d'étalonnage, prises de vues au-dessus des mires, vue embarquée du robot qui suit le plongeur (12 mai).

### C.1.9 Séance n°9 : 12 mai 2014

Visiteurs : Joseph S.

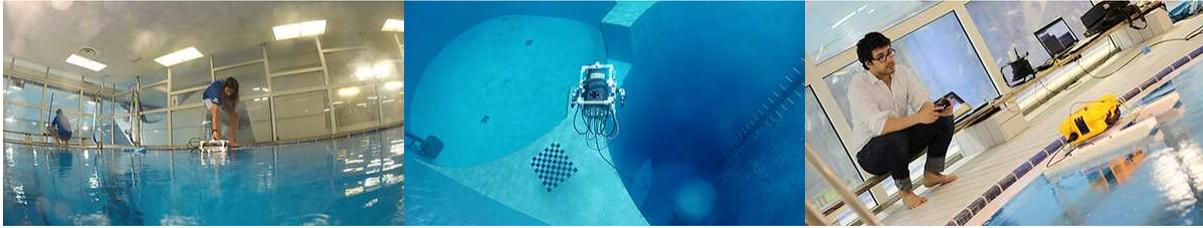
Robot : Ryujin (roboPIC v1) équipé d'une caméra KX et du banc stéréoscopique uEye.

#### Préparation :

- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : fonctionnel.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- 5) Test d'asservissement profondeur : globalement fonctionnel, oscillations d'environ 60 cm autour de la consigne observées sur les courbes *a posteriori*.
- 6) Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : non fonctionnel. Problème de masse, câble branché à l'envers côté station au sol. Inversion : fonctionnel.
- 7) Test de lancement du script d'acquisition synchronisée : fonctionnel.
- 8) Ajustement du lest : lestage du robot avec 300 g de plus que prévu (donc 600 g au total).

#### Tests :

- Les nouvelles barres LEDs présentent des fuites de masses : sur les trois couleurs à droite, et sur au moins le vert à gauche. Impossible de savoir si les fuites proviennent directement des barres ou des connexions filaires.
- Test de prise de vue, mais l'exposition est encore trop élevée (30ms) et les photos risquent d'être floues. Nous regardons pour désactiver le calcul automatique d'exposition et fixer une valeur à la main. Entreprise non terminée avant la fin de la séance, donc non testée.
- Log des mesures de la température intérieure à partir du script codé la dernière fois.
- Récupération et log des coefficients d'asservissement.
- Pendant les tests de navigation, nous sommes rentrés en collision par au-dessus avec le muret (l'enregistrement vidéo était en route et donc la vision embarquée présentait un délai de deux secondes). Les deux hélices verticales ont été légèrement abîmées, la cage du moteur droit surtout a basculé et a endommagé le vernis des patins. Le script d'acquisition s'est arrêté à ce moment et s'est relancé.
- Prises de vues du fond avec une GoPro en suivant des trajectoires en allers-retours autour des mires ou des déplacements en forme de 4 (constitution de jeux de tests pour l'estimation de trajectoires).
- Prises de vues en latéral avec une GoPro de la mire d'étalonnage à environ trois mètres de distance. La distance était un peu élevée et la mire ne couvrait pas toutes les images. La séance s'est terminée avant d'avoir pu procéder à d'autres tests.
- Les caméras GoPro ont beaucoup dysfonctionné durant la séance et nous avons dû retirer leurs batteries de nombreuses fois pour les redémarrer.



**Figure C.8** – De gauche à droite [©] [i] [d] [e] L. Avantbey et al.] : mise à l'eau de Ryujin, test de contrôle de Ryujin avec le nouveau code, test de contrôle de Kraken (19 mai).

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Installation de roboPIC v2 (code du robot) sur Ryujin avec le contrôle et l'asservissement profondeur.
- ⇒ Installation et câblage de la carte de contrôle sur le robot pour pouvoir alimenter ou couper individuellement chacune des prises du HUB USB. Cela devrait permettre de pouvoir déconnecter et connecter électroniquement (contrôle GPIO depuis la carte mère) les caméras au lieu de le faire par le biais des câbles étanches (la déconnexion et reconnexion après le démarrage de l'ordinateur est nécessaire pour que les caméras soient reconnues, car les pilotes ne se lancent pas tout de suite). Il sera également possible de redémarrer l'ordinateur embarqué indépendamment du robot.
- ⇒ Ajout d'un connecteur double pour retrouver la fonctionnalité de reprogrammation via le câble ROV en plus de la communication série avec l'ordinateur.
- ⇒ Ajout de résine sur les barres de statut LED aux endroits identifiés comme points de fuite (légère corrosion visible).
- ⇒ Remise en fonction mécanique du robot de surface Kraken : préparation des moteurs, installation d'une carte ULC et d'une carte de puissance RYUJIN, reprogrammation des contrôleurs, fixation sur une plaque de châssis interne.
- ⇒ Installation de roboPIC v2 (code du robot) sur Kraken pour le contrôle uniquement (pas d'asservissement pour le moment).

### C.1.10 Séance n°10 : 19 mai 2014

*Visiteurs : Joseph S., Lucas C.*

*Robots : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX et d'un banc stéréoscopique uEye. Kraken (roboPIC v2).*

#### Préparation Ryujin :

- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs latéraux : fonctionnel.
- 3) Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- 4) Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- 5) Test d'asservissement profondeur : fonctionnel, mais à l'envers.
- 6) Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : fonctionnel.
- 7) Test de lancement du script d'acquisition synchronisée : **non fonctionnel**, l'ordinateur de bord ne s'allume pas. Nous sortons le robot de l'eau et nous l'ouvrons, le connecteur du HUB s'est défait. L'ordinateur s'allume de nouveau, mais il ne détecte plus les caméras à travers la carte de contrôle. Changement de l'un des connecteurs caméra de place sur la carte de contrôle, car la tension d'alimentation de ce dernier était d'environ 2 V au lieu de 5 V. Les deux connecteurs sont à 4,9 V, peut-être que c'est insuffisant, ou bien peut-être que l'ampérage est insuffisant ? Abandon du test avec les caméras. Le robot est refermé et mis à l'eau.



**Figure C.9** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : vue hors eau du bassin, Ryujin en asservissement profondeur du côté du petit bassin, prise de vue pour l'étalonnage (19 mai).

- 8) Ajustement du lest : 50 g en moins (donc 550 g au total) pour rééquilibrer par rapport à l'ajout de la carte de contrôle.

#### Préparation Kraken :

- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs : fonctionnel.

#### Tests :

- Fuite de masses à nouveau sur les barres de statut LED, malgré les raccords d'étanchéité.
- Test de RoboPIC v2. Reprogrammation pour ajuster les paramètres de commandes de RoboPIC v2 : l'ancien code est écrasé, mais la carte n'est pas reprogrammée (problème de masse avec le nouveau connecteur qui partage la reprogrammation et la communication avec l'ordinateur de bord). Plusieurs essais infructueux, il reste 5 minutes ce qui ne permet pas de rouvrir le robot pour retirer le connecteur de l'ordinateur de bord (non utilisé, car les caméras ne fonctionnent pas). Dernière tentative : fonctionnel, la reprogrammation passe, nous procédons aux tests de RoboPIC v2 en dépassant un peu sur l'heure.
- La navigation marche bien, pas de problème à première vue.
- L'asservissement est parfait, le nouveau lestage a permis de supprimer les oscillations que nous observons depuis janvier et de retrouver la stabilité du test de juin dernier. Constat : même si le code compense les instabilités, il le fait avec des compromis et ne peut pas supprimer toutes les oscillations provoquées par la poussée d'Archimède à moins d'être activé avec une très grande fréquence (meilleure réactivité pour que le robot ne s'éloigne pas trop de la consigne).
- Test d'asservissement sous contrainte : introduction de perturbations avec le balai en poussant le robot de sa consigne plus ou moins fort, plus ou moins longtemps, plus ou moins loin.
- Test d'asservissement en profondeur avec une descente à quinze mètres dans la fosse : tout se passe bien.
- Nouvelles prises de vues pour l'étalonnage, en se mettant plus proche de la caméra. Première série en latéral avec la mire qui bouge, et deuxième série au nadir avec la mire posée sur le sol.
- Les GoPro ne présentent pas les problèmes de la dernière fois, le fait de les avoir chargées avec le LCD-Backpac installé a peut-être réglé le dysfonctionnement (batterie interne du backpack ?).
- Pilotage de Kraken pour vérifier que la nouvelle intégration système (moteurs / carte-mère / roboPIC) fonctionne bien comme il le faut.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Analyse et correction des problèmes liés à la carte de contrôle et à la reprogrammation. Trois mosfets de la carte de contrôle sont grillés et à changer.
- ⇒ Réparation d'un fil de courant de l'une des deux caméras au niveau de l'embase sur le bouchon.
- ⇒ Installation d'une centrale d'attitude (AHRS) UM6 dans Ryujin et ajout du code de communication de la centrale et de l'asservissement cap dans roboPIC v2.



**Figure C.10** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : équipe et robots, station au sol, test de l'asservissement cap de Kraken avec perturbations (2 juin).

- ⇒ Installation d'une centrale d'attitude (AHRS) UM6 dans Kraken et ajout du code de communication de la centrale et de l'asservissement cap dans roboPIC v2.
- ⇒ Test du code de sélection des images pour l'étalonnage sur le jeu de données acquis : le schéma de la mire n'est pas repéré sur les images latérales (la luminosité n'est pas bonne et il y a beaucoup de bruit), mais il l'est sur les images verticales (images plus claires).

### C.1.11 Séance n°11 : 2 juin 2014

*Visiteurs : Joseph S.*

*Robots : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX, d'une AHRS UM6 et d'un banc stéréoscopique uEye. Kraken (roboPIC v2) équipé d'une AHRS UM6.*

#### Préparation Ryujin :

- 1) Test de programmation (avant de partir) : **non fonctionnel**. Il semblerait que l'ajout de la centrale d'attitude, qui communique en 11200 baud, provoque un conflit avec l'UART, lui aussi en 11200 baud.

#### Préparation Kraken :

- 1) Test de communication : **fonctionnel**.
- 2) Test de contrôle des moteurs : **fonctionnel**.
- 3) Test réception données AHRS : **fonctionnel**.
- 4) Test asservissement cap : **fonctionnel**.

#### Tests :

- Tentatives infructueuses de régler le problème sur le robot sous-marin, nous rencontrons de plus des difficultés sur la programmation même de la carte. Nous avons essayé d'échanger les ports UART, entre la communication PC et la centrale d'attitude, sans succès. De plus, nous avons oublié le chargeur de l'un des ordinateurs portables et cela ne facilite pas le travail (temps de batterie limité). Finalement, Ryujin n'ira pas à l'eau pour cette séance.
- Test de l'asservissement cap sur Kraken : tout fonctionne comme prévu. Nous effectuons des tests d'orientation en lui envoyant des consignes d'angles successives et en s'assurant qu'il revienne bien à sa position de départ (exemple :  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $-135^\circ(225^\circ)$ ,  $-45^\circ(315^\circ)$ ). Le résultat est plutôt satisfaisant, il nous faudra cependant rajouter une option de circularité. En effet, lorsque le robot est avant ou après l'angle de consigne, il ne cherche pas à minimiser le déplacement (entre un angle de  $30^\circ$  et l'angle complémentaire de  $330^\circ$  par exemple) et tourne pour le moment toujours dans la même direction.
- Test du maintien de consigne : nous faisons traverser Kraken d'un bout à l'autre du bassin en ligne droite. Sans asservissement en lacet, le robot dévie très rapidement de son cap (surtout en marche avant, car les biseaux des deux flotteurs ne sont pas équivalents). Lorsque nous activons l'asservissement, la ligne droite est bien maintenue.



**Figure C.11** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : station au sol et pilotage depuis les rochers sur la plage, prise de vue du fond par les caméras installées sous le robot, Kraken dans le ressac (23 juin).

- Test du maintien de consigne avec perturbations. Nous fixons une consigne d'angle à Kraken et nous le poussons à la main et à l'aide du balai alors qu'il est immobile : le véhicule maintient bien son orientation. Lorsqu'il effectue une ligne droite, nous formons des vagues dans l'eau qui, sans asservissement, le font fortement dévier de son cap, il maintient en revanche parfaitement sa trajectoire lorsque l'asservissement est actif : les tests sont donc plutôt concluants !
- Côté étalonnage, nous effectuons de nouveau des prises de vue de la mire. Cette dernière est posée sur le rebord du muret entre les deux bassins et le plongeur prend les photos par au-dessus. Malheureusement, l'une des caméras GoPro prend l'eau, car l'écran était mal enclenché lors de la fermeture du boîtier ce qui a compromis son étanchéité. Nous nous en sommes rendu compte suffisamment vite pour éviter l'électrolyse et les prises de vues ont pu se poursuivre avec la seconde GoPro.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Ouverture du boîtier de la GoPro ayant pris l'eau pour pouvoir faire sécher les cartes électroniques et les connecteurs.
- ⇒ Modification du PID du lacet pour que le sens de rotation soit choisi pour minimiser le déplacement.
- ⇒ Tests de programmation de la carte de Ryujin, tout semble fonctionner comme il faut.
- ⇒ Réalisation de la nouvelle structure mécanique du banc uEye (plus rigide).

### C.1.12 Séance n°12 : 16 juin 2014

*Visiteurs : Riwana K., Sébastien F., Nicolas G.*

*Robots : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX, d'une AHRS UM6 et d'un banc stéréoscopique uEye. Kraken (roboPIC v2) équipé d'une AHRS UM6.*

Séance annulée pour maintenance exceptionnelle de l'ensemble du complexe aquatique.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Test d'intégration d'un GPS sur Kraken, mais nous rencontrons des problèmes de communication entre ce dernier et la carte électronique.

### C.1.13 Séance additionnelle en Mer (Montpellier) : 23 juin 2014

*Robot : Kraken (roboPIC v2) équipé d'une AHRS UM6.*

*Nous profitons de notre participation au Colloque Drones 2014 qui a lieu à Montpellier pour faire une sortie terrain. Le test s'est déroulé en mer pendant 1h50, à Palavas-les-Flots, à 19h00, par mer agitée et vent de sud-sud-ouest, le long d'un épi rocheux au dos du port. L'heure et le ciel nuageux ne donnaient pas de bonnes conditions de visibilité pour les caméras, nous nous sommes donc concentrés sur la navigation et le contrôle.*

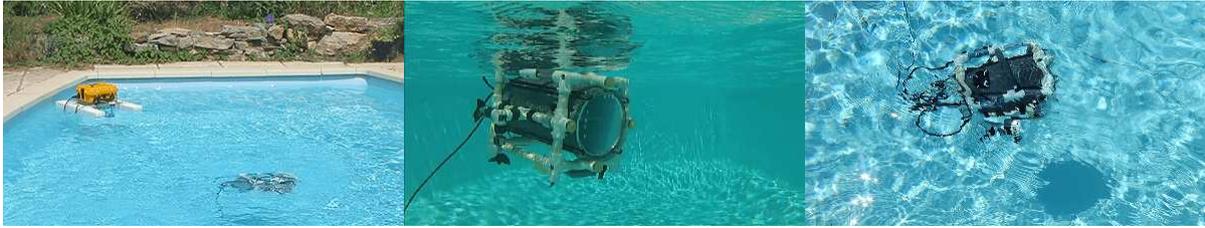


Figure C.12 – De gauche à droite [©ⓃⓁ L. Avantbey et al.] : Kraken en test GPS, Ryujin test d'asservissement cap sous l'eau, Ryujin depuis la surface (27 juin).

Latitudes de 45 degrés, 51 minutes et 27 secondes au nord de l'Équateur

Longitudes de 3 degrés, 55 minutes et 46 secondes à l'est du méridien de Greenwich

#### Préparation :

- 1) Test de communication : fonctionnel.
- 2) Test de contrôle des moteurs : fonctionnel.
- 3) Test réception données AHRS : fonctionnel.
- 4) Test asservissement cap : fonctionnel.

#### Tests :

- 1) Test de l'asservissement cap : fonctionnel malgré les vagues.
- 2) Test de contrôle en plus de l'asservissement : il semble que le contrôle soit perdu lorsque l'asservissement est activé, problème potentiellement lié aux dernières modifications (asservissement circulaire). Parfois, nous observons une perte de contrôle totale qui nécessite un redémarrage du robot.
- 3) Nous effectuons un test de portée jusqu'à 50 mètres. À cette distance, nous recevons les données, mais nous ne pouvons plus transmettre d'ordre. Il est à noter que les puces XBee étaient équipées d'antenne PCB et que des antennes filaires donneraient sûrement un meilleur résultat.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Soudure d'un câble de connexion entre la carte-mère et la carte de puissance.
- ⇒ Résolution du problème avec le module GPS (le schéma du connecteur sur la datasheet était en miroir et donc notre câble était à l'envers).
- ⇒ Implémentation des logs du module GPS.

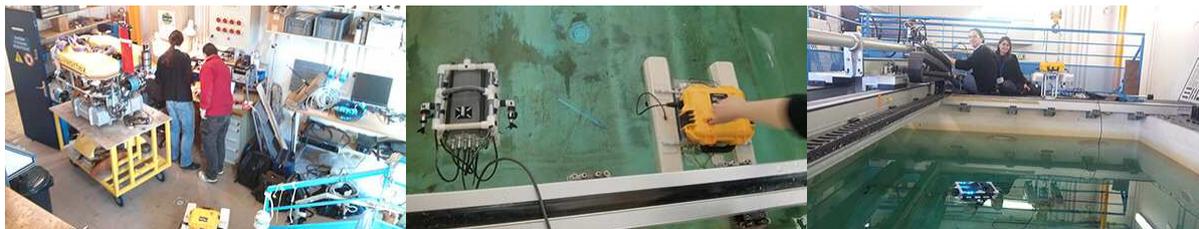
### C.1.14 Séance additionnelle en Piscine (Montpellier) : 27 juin 2014

*Robots : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX, d'une AHRS UM6 et d'un banc stéréoscopique uEye. Kraken (roboPIC v2) équipé d'une AHRS UM6 et d'un GPS Holux.*

*Toujours en bordure du Colloque Drones 2014 de Montpellier, nous avons pu avoir accès à une piscine privée sur un créneau d'environ 40 minutes pour tester les deux robots. Merci à Bernadette et Robert pour leur accueil !*

#### Préparation Ryujin :

- Test de communication : fonctionnel.
- Test de contrôle des moteurs latéraux : fonctionnel.
- Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- Test d'asservissement profondeur : fonctionnel.
- Test réception données AHRS : fonctionnel.



**Figure C.13** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : préparation des robots dans l'atelier sous le regard du Vortex, Ryujin est déjà à l'eau, démarrage de Kraken, travail sur l'asservissement cap de Ryujin (9 juin).

- Test d'asservissement cap : **non fonctionnel**, il semble y avoir un conflit dans les ordres passés via la manette et il n'est pas possible de lancer cet asservissement.
- Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : **fonctionnel**.

#### Préparation Kraken :

- Test de communication : **fonctionnel**.
- Test de contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.
- Test réception données AHRS : **fonctionnel**.
- Test d'asservissement cap : **fonctionnel**.
- Test réception données GPS : **fonctionnel**.

#### Tests :

- Pilotage du robot sous-marin en filaire, comme l'asservissement cap ne peut pas être testé.
- Parcours de la piscine avec le robot de surface et enregistrement des données GPS pour voir s'il est possible de retrouver la trajectoire.

#### ○ Réparations et améliorations depuis la dernière mise à l'eau

- ⇒ Amélioration des logs du module GPS (notamment affichage d'une plus grande précision pour les coordonnées) car les données récupérées dans la piscine ne sont pas du tout assez précises devant les petites dimensions parcourues.
- ⇒ Test du GPS dans la cour, logs et reconstruction de la trajectoire : la précision n'est pas aussi bonne qu'espérée, mais les résultats sont corrects, à part quelques points totalement aberrants.
- ⇒ Modification du code GPS pour pouvoir écarter les points aberrants.
- ⇒ Ponçage et revernissage des patins des quatre moteurs de Ryujin et des deux moteurs de Kraken.
- ⇒ Réglage du conflit pour le lancement des deux asservissements profondeur et cap sur Ryujin.

## C.2 Séances de l'année 2015

### C.2.1 Séance additionnelle en Bassin d'eau douce (La Seyne-sur-Mer) : 9 juin 2015

*Robots : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX, d'une AHRS UM6 et d'un banc stéréoscopique GoPro. Kraken (roboPIC v2) équipé d'une AHRS UM6 et d'un GPS Holux.*

*Nous profitons de notre participation au Colloque GDR « Journées scientifiques robotique sous-marine » organisé dans le Centre Européen de Technologie Sous-Marine (CETSM) de l'Ifremer à La Seyne-sur-Mer, les 8 et 9 juin 2015, pour tester nos deux robots qui n'ont pas été à l'eau depuis presque un an. Nous commençons nos essais dans un bassin d'eau douce intérieur.*

#### Préparation Ryujin :

- Test de communication : **fonctionnel**.
- Test de contrôle des moteurs latéraux : **fonctionnel**.



**Figure C.14** – De gauche à droite [©ⓂⓃ L. Avantbey et al.] : mise à l'eau de Ryujin sur le bord de la rade, vue embarquée sur les piliers pendant la descente, photographie du fond du port à 6 m de profondeur (9 juin).

- Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- Test d'asservissement profondeur : fonctionnel.
- Test réception données AHRS : fonctionnel.
- Test d'asservissement cap : globalement fonctionnel, mais il semble y avoir un biais entre les valeurs d'angle en consigne et les valeurs réelles.
- Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : fonctionnel.

#### Préparation Kraken :

- Test de communication : fonctionnel.
- Test de contrôle des moteurs latéraux : globalement fonctionnel, mais un moteur frotte beaucoup (il s'agit d'un moteur initialement défectueux que nous avons monté, car nous n'avions pas d'autre pièce de rechange).
- Test réception données AHRS : fonctionnel.
- Test d'asservissement cap : fonctionnel.

#### Tests :

- Tests pour améliorer l'asservissement cap sur Kraken, mais le moteur qui frotte fini par se gripper et ne tourne plus du tout. Nous arrêtons les essais avec ce robot, nous ne pourrions pas tester l'enregistrement de trajectoire GPS dans la darse, ni si Kraken peut voir Ryujin au fond du port depuis la surface.
- Tests de l'asservissement cap sur Ryujin. Nous avons du mal à comprendre les raisons du problème de biais qui provoque un comportement différent de celui attendu. Nous réussissons à résoudre le problème au bout d'un certain temps (erreur propagée à travers les modules).
- L'asservissement profondeur et le pilotage de Ryujin, quant à eux, fonctionnent très bien.
- Les deux asservissements peuvent être lancés simultanément mais l'asservissement cap empêche le robot d'avancer quand on lui en donne l'ordre (toute la puissance des moteurs semble être utilisée pour le maintien). Nos différentes tentatives sont infructueuses.

## C.2.2 Séance additionnelle en Port maritime (La Seyne-sur-Mer) : 9 juin 2015

*Robot : Ryujin (roboPIC v2) équipé d'une caméra KX, d'une AHRS UM6 et d'un banc stéréoscopique GoPro.*

*Toujours dans le cadre du Colloque GDR, nous avons pu avoir accès à la darse depuis les quais du centre pour avoir une idée de ce à quoi ressemble le fond d'un port vu par notre robot. Un grand merci à Lorenzo Brignone pour nous avoir permis l'accès aux installations de l'IFREMER !*

*Latitudes de 45 degrés, 6 minutes et 20 secondes au nord de l'Équateur*

*Longitudes de 5 degrés, 55 minutes et 7 secondes à l'est du méridien de Greenwich*

#### Préparation Ryujin :

- Test de communication : fonctionnel.



**Figure C.15** – De gauche à droite [© L. Avantbey et al.] : mise à l'eau de Ryujin depuis l'échelle, photographie au nadir des piliers verticaux pendant la descente, vue depuis la surface (9 juin).

- Test de contrôle des moteurs latéraux : fonctionnel.
- Test de contrôle des moteurs verticaux : fonctionnel.
- Test d'étanchéité : rien à signaler, fonctionnel.
- Test d'asservissement profondeur : fonctionnel.
- Test retour vidéo temps réel de la KX en filaire : fonctionnel.
- Ajustement du lest : **non fonctionnel**, nous n'avons pas de variations de poids de lest assez fines (paliers de 500 g uniquement) et par conséquent le robot est soit trop lourd et coule (les moteurs n'arrivent pas à compenser le poids), soit il est trop léger et reste en surface (les moteurs n'arrivent pas à le faire descendre).

#### Tests :

- Ne pouvant pas ajuster le lest comme il faut, nous attachons Ryujin à un bout et lestons le robot de manière à ce qu'il coule. Nous possédons le contrôle sur le plan horizontal et nous ajustons la profondeur avec le bout.
- Descente au fond de la darse à 6 m de profondeur, en restant proche des piliers qui soutiennent le quai grâce au retour vidéo de la station au sol. Le robot se pose au fond du port, qui s'avère mieux que ce que nous avons anticipé : aucun sédiment ne se soulève, la visibilité est correcte et le sol est texturé. Nous remontons ensuite le robot, toujours en suivant les piliers.
- Nous avons installé une GoPro sur un manche pour tenter de filmer le robot juste sous la surface de l'eau (comme l'aurait fait Kraken) mais les angles de prises de vue que nous pouvons effectuer avec la perche depuis la hauteur du quai ne sont pas adaptés et le robot est hors champ dès qu'il descend au-delà d'un mètre.



# Bibliographie

- [[Abdo, 2007](#)] David D. **Abdo** : *Maintenance and Structuring of Two Temperate Haliclona Sponge Populations*. Thèse de doctorat, University of Western Australia, Australia, 2007. (Cité aux pages [71](#), [73](#), et [237](#).)
- [[Aber et al., 2008](#)] James S. **Aber**, Susan W. **Aber**, Juraj **Janočko**, Ryszard **Zabielski** et Maria **Górska-Zabielska** : High-Altitude Kite Aerial Photography. *Transactions of the Kansas Academy of Science (TKAS)*, volume 111, numéro 1, pages : 49–60, 2008. ISSN 0022-8443. (Cité aux pages [38](#) et [237](#).)
- [[Agrawal et al., 2012](#)] Amit **Agrawal**, Srikumar **Ramalingam**, Yuichi **Taguchi** et Vishes **Chari** : A Theory of Multi-Layer Flat Refractive Geometry. Dans *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 3346–3353, Providence, États-Unis, juin 2012. ISBN 978-1-467-31226-4. (Cité aux pages [70](#), [71](#), et [237](#).)
- [[Alcantarilla et al., 2013](#)] Pablo F. **Alcantarilla**, Chris **Beall** et Frank **Dellaert** : Large-Scale Dense 3D Reconstruction from Stereo Imagery. Dans *IROS Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (PPNIV)*, Tokyo, Japon, novembre 2013. (Cité aux pages [90](#) et [237](#).)
- [[Altan et al., 2004](#)] M. Orhan **Altan**, T. Murat **Celikoyan**, Gerhard **Kemper** et Gönül **Toz** : Balloon Photogrammetry for Cultural Heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 35, numéro B5, pages : 964–968, 2004. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages [37](#) et [237](#).)
- [[Anders et al., 2013](#)] Niels **Anders**, Rens **Masselink**, Saskia **Keesstra** et Juha **Suomalainen** : High-Res Digital Surface Modeling using Fixed-Wing UAV-Based Photogrammetry. Dans *Conference & Workshops on Geomorphometry*, Nanjing, Chine, octobre 2013. (Cité aux pages [38](#) et [237](#).)
- [[Anderson, 2012](#)] Chris **Anderson** : *Makers : La Nouvelle Révolution Industrielle*. Pearson, 2012. ISBN 978-2-744-06468-5. (Cité aux pages [162](#) et [237](#).)
- [[Antić et al., 2009](#)] Borislav **Antić**, Dubravko **Ćulibrk**, Vladimir **Crnojević** et Vladan **Minić** : An Efficient UAV Based Remote Sensing Solution for Precision Farming. Dans *BioSense - International Workshop on ICT and Sensing Technologies in Agriculture, Forestry and Environment*, Novi Sad, Serbie, octobre 2009. (Cité aux pages [38](#) et [237](#).)
- [[Arun et al., 1987](#)] K. Somani **Arun**, Thomas S. **Huang** et Steven D. **Blostein** : Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 1, numéro 5, pages : 698–700, 1987. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages [85](#) et [237](#).)
- [[Aulinas et al., 2011](#)] Josep **Aulinas**, Marc **Carreras**, Xavier **Llado**, Joaquim **Salvi**, Rafael **Garcia**, Ricard **Prados** et Yvan R. **Petillot** : Feature Extraction for Underwater Visual SLAM. Dans *IEEE OCEANS Conference*, pages 1–7, Santander, Espagne, juin 2011. ISBN 978-1-457-70086-6. (Cité aux pages [65](#), [76](#), [81](#), [85](#), [87](#), et [237](#).)

- [Avanthey *et al.*, 2016] Loïca **Avanthey**, Laurent **Beaudoin**, Antoine **Gademer** et Michel **Roux** : Tools to Perform Local Dense 3D Reconstruction of Shallow Water Seabed. *Sensors*, volume 16, numéro 5, pages : 712, 2016. ISSN 1424-8220. (Cité aux pages 169 et 238.)
- [Avanthey *et al.*, 2013] Loïca **Avanthey**, Antoine **Gademer**, Laurent **Beaudoin** et Michel **Roux** : First Steps for Operational Dense and High-Resolution Mapping of Shallow Water Using Dedicated Robots. *Dans Ocean and Coastal Observation : Sensors and observing systems, numerical models and information Systems (OCOSS)*, Nice, France, octobre 2013. (Cité aux pages 170 et 238.)
- [Avanthey *et al.*, 2011] Loïca **Avanthey**, Vincent **Vittori**, Vincent **Germain**, Antoine **Barbier** et Robert **Terisse** : Ryujin AUV. Journal Paper, International Student Autonomous Underwater Vehicle Challenge - Europe (SAUC-E), 2011. (Cité aux pages 29, 119, et 238.)
- [Ballard, 2007] Robert D. **Ballard** : Archaeological Oceanography. *Oceanography*, volume 20, numéro 4, pages : 62–67, 2007. ISSN 1042-8275. (Cité aux pages 76 et 238.)
- [Ballard *et al.*, 2000] Robert D. **Ballard**, Anna Marguerite **McCann**, Dana R. **Yoerger**, Louis L. **Whitcomb**, David A. **Mindell**, John **Oleson**, Hanumant **Singh**, Brendan **Foley**, Jonathan **Adams**, Dennis **Piechota** et Cathy **Giangrande** : The Discovery of Ancient History in the Deep Sea Using Advanced Deep Submergence Technology. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, volume 47, numéro 9, pages : 1591–1620, 2000. ISSN 0967-0637. (Cité aux pages 62, 76, et 238.)
- [Balletti *et al.*, 2015] Caterina **Balletti**, Carlo **Beltrame**, Elisa **Costa**, Francesco **Guerra** et Paolo **Vernier** : Underwater Photogrammetry and 3D Reconstruction of Marble Cargos Shipwreck. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XL-5/W5, numéro -, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 62, 64, 76, 81, 82, et 238.)
- [Bay *et al.*, 2006] Herbert **Bay**, Tinne **Tuytelaars** et Luc **Van Gool** : SURF : Speeded Up Robust Features. *Dans European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 404–417, Graz, Autriche, mai 2006. ISBN 978-3-540-33832-1. (Cité aux pages 65 et 238.)
- [Beall *et al.*, 2011] Chris **Beall**, Frank **Dellaert**, Ian **Mahon** et Stefan B. **Williams** : Bundle Adjustment in Large-Scale 3D Reconstructions Based on Underwater Robotic Surveys. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–6, Santander, Espagne, juin 2011. ISBN 978-1-457-70086-6. (Cité aux pages 79, 84, 85, 86, 87, 90, et 238.)
- [Beall *et al.*, 2010] Chris **Beall**, Brian J. **Lawrence**, Viorela **Ila** et Frank **Dellaert** : 3D Reconstruction of Underwater Structures. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4418–4423, Taipei, Taïwan, octobre 2010. ISBN 978-1-424-46674-0. (Cité aux pages 62, 64, 65, 66, 69, 75, 79, 81, 91, et 238.)
- [Beaudoin *et al.*, 2015] Laurent **Beaudoin**, Loïca **Avanthey**, Antoine **Gademer**, Michel **Roux** et Jean-Paul **Rudant** : Dedicated Payloads for Low Altitude Remote Sensing in Natural Environments. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XL-3/W3, numéro -, pages : 405–410, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 169 et 238.)
- [Beaudoin *et al.*, 2014] Laurent **Beaudoin**, antoine **Gademer**, Loïca **Avanthey**, Samira **Mobaied** et Jean-Paul **Rudant** : Faucon Noir : Retour d'Expérience sur une Étude de la Biodiversité par Drone. *Dans Colloque scientifique francophone Drones et moyens légers aéroportés d'observation*, Montpellier, France, juin 2014. (Cité aux pages 54 et 238.)
- [Beraldin *et al.*, 2003] Jean-Angelo **Beraldin**, François **Blais**, Luc **Cournoyer**, Guy **Godin**, Marc **Rioux** et John **Taylor** : Active 3D Sensing for Heritage Applications. *Dans Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Annual Conference (CAA)*, Vienne, Autriche, avril 2003. ISBN 978-9-089-64715-3. (Cité aux pages 47 et 238.)

- [Besl et McKay, 1992] Paul J. **Besl** et Neil D. **McKay** : Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 14, numéro 2, pages : 239–256, 1992. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages 85 et 239.)
- [Bethencourt et Jaulin, 2013] Aymeric **Bethencourt** et Luc **Jaulin** : Cooperative Localization of Underwater Robots with Unsynchronized Clocks. *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics*, volume 4, numéro 4, pages : 233–244, 2013. ISSN 2081-4836. (Cité aux pages 137 et 239.)
- [Bianco et al., 2011] Gianfranco **Bianco**, Alessandro **Gallo**, Fabio **Bruno** et Maurizio **Muzzupappa** : A Comparison Between Active and Passive Techniques for Underwater 3D Applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XXXVIII-5/W16, numéro -, pages : 357–363, 2011. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 64, 70, 73, 79, et 239.)
- [Bingham et al., 2010] Brian **Bingham**, Brendan **Foley**, Hanumant **Singh**, Richard **Camilli**, Katerina **Delaporta**, Ryan **Eustice**, Angelos **Mallios**, David **Mindell**, Christopher **Roman** et Dimitris **Sakellariou** : Robotic Tools for Deep Water Archaeology : Surveying an Ancient Shipwreck with an Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Field Robotics (JFR)*, volume 27, numéro 6, pages : 702–717, 2010. ISSN 1556-4967. (Cité aux pages 62 et 239.)
- [Birt et al., 2012] Matthew J. **Birt**, Euan S. **Harvey** et Timothy J. **Langlois** : Within and Between Day Variability in Temperate Reef Fish Assemblages : Learned Response to Baited Video. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, volume 416, numéro -, pages : 92–100, 2012. ISSN 0022-0981. (Cité aux pages 152 et 239.)
- [Bogacki et al., 2010] Miron **Bogacki**, Miłosz **Giersz**, Patrycja **Prządka-Giersz**, Wiesław **Małkowski** et Krzysztof **Misiewicz** : GPS RTK Mapping, Kite Aerial Photogrammetry, Geophysical Survey and GIS Based Analysis of Surface Artifact Distribution at the Pre-Hispanic site of the Castillo de Huarmey, North Coast of Peru. *Dans EARSeL Symposium : Remote Sensing for Science, Education and Culture*, volume 31, pages 121–130, Paris, France, mai-juin 2010. ISBN 978-3-000-33435-1. (Cité aux pages 38 et 239.)
- [Bohm et Jensen, 1997] Harry **Bohm** et Vickie **Jensen** : *Build your Own Underwater Robot and Other Wet Projects*. West-coast Words, 1997. ISBN 978-0-968-16100-5. (Cité aux pages 121 et 239.)
- [Botelho et al., 2009] Silvia Silva da Costa **Botelho**, Paulo **Drews**, Gabriel Leivas **Oliveira** et Monica Da Silva **Figueiredo** : Visual Odometry and Mapping for Underwater Autonomous Vehicles. *Dans IEEE Regional Latin American Robotics Symposium (LARS)*, pages 1–6, Valparaíso, Chili, octobre 2009. ISBN 978-1-424-46256-8. (Cité aux pages 64, 65, 76, 79, 84, et 239.)
- [Bouguet et al., 2000] Jean-Yves **Bouguet**, Brian **Curless**, Paul **Debevec**, Marc **Levoy**, Shree K. **Nayar** et Steven **Seitz** : Overview of Active Vision Techniques. *Dans ACM SIGGRAPH Course on 3D Photography (19)*, La Nouvelle-Orléans, États-Unis, juillet 2000. (Cité aux pages 47 et 239.)
- [Bourgeois et McDowell, 2001] Brian S. **Bourgeois** et Patrick M. **McDowell** : UUV Teams for Deep Water Operations. Defense Technical Information Center (DTIC) document, Naval Research Laboratory - Marine Geosciences Division, 2001. (Cité aux pages 15 et 239.)
- [Boutan, 1900] Louis **Boutan** : *La photographie sous-marine et les progrès de la photographie*. Schleicher frères, 1900. (Cité aux pages 28, 54, et 239.)
- [Bowens, 2011] Amanda **Bowens**, éditeur. *Underwater archaeology : the NAS guide to principles and practice*. John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-1-405-17591-3. (Cité aux pages 82, 144, 155, et 239.)
- [Bradski et Kaehler, 2008] Gary **Bradski** et Adrian **Kaehler** : *Learning OpenCV : Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly, 2008. ISBN 978-0-596-51613-0. (Cité aux pages 72 et 239.)

- [Brandou *et al.*, 2007] Vincent **Brandou**, Anne-Gaëlle **Allais**, Michel **Perrier**, Ezio **Malis**, Patrick **Rives**, Jozee **Sarrazin** et Pierre-Marie **Sarradin** : 3D Reconstruction of Natural Underwater Scenes Using the Stereovision System IRIS. Dans *IEEE OCEANS Conference*, pages 674–679, Aberdeen, Écosse, juin 2007. ISBN 978-1-424-40634-0. (Cité aux pages 62, 64, 65, 69, 73, 76, 81, 89, et 240.)
- [Braux-Zin, 2012] Jim **Braux-Zin** : Toward Real-Time Dense 3D Reconstruction Using Stereo Vision. Mémoire de D.E.A., Royal Institute of Technology, School of Computer Science and Communication, Sweden, 2012. (Cité aux pages 161 et 240.)
- [Brefort *et al.*, 2015] Quentin **Brefort**, Luc **Jaulin**, Martine **Ceberio** et Vladik **Kreinovich** : Towards fast and reliable localization of an underwater object : an interval approach. *Journal of Uncertain Systems (JUS)*, volume 9, numéro 2, pages : 95–102, 2015. ISSN 1752-8917. (Cité aux pages 137 et 240.)
- [Brown, 1971] Duane C. **Brown** : Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, volume 37, numéro 8, pages : 855–866, 1971. (Cité aux pages 71, 105, et 240.)
- [Burns *et al.*, 2015] John Henrik Robert **Burns**, Donna **Delparte**, Ruth D. **Gates** et Misaki **Takabayashi** : Integrating Structure-From-Motion Photogrammetry with Geospatial Software as a Novel Technique for Quantifying 3D Ecological Characteristics of Coral Reefs. *PeerJ*, volume -, numéro -, 2015. ISSN 2167-8359. (Cité aux pages 62, 66, 75, 79, 81, 87, et 240.)
- [Cai, 2003] Yang **Cai** : How Many Pixels do we Need to See Things ? Dans *International Conference on Computational Science (ICCS)*, volume 3, pages 1064–1073, Saint Petersburg, Russie / Melbourne, Australie, juin 2003. ISBN 3-540-40196-2. (Cité aux pages 41 et 240.)
- [Calmant *et al.*, 2002] Stéphane **Calmant**, Muriel **Berge-NGuyen** et Cazenave **Anny** : Global Seafloor Topography from a Least-Squares Inversion of Altimetry-Based High-Resolution Mean Sea Surface and Shipboard Soundings. *Geophysical Journal International (GJI)*, volume 151, numéro 3, pages : 795–808, 2002. ISSN 0956-540X. (Cité aux pages 35 et 240.)
- [Calmant *et al.*, 2006] Stéphane **Calmant**, Anny **Cazenave** et Muriel **Bergé-NGuyen** : Carte des fonds océaniques par altimétrie spatiale. Cartes & Notices cédérom N°116, IRD & CNES, 2006. (Cité aux pages 35 et 240.)
- [Campos *et al.*, 2015] Ricard **Campos**, Rafael **Garcia**, Pierre **Alliez** et Mariette **Yvinec** : A Surface Reconstruction Method for In-Detail Underwater 3D Optical Mapping. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)*, volume 34, numéro 1, pages : 64–89, 2015. ISSN 0278-3649. (Cité aux pages 90, 91, 161, et 240.)
- [Capra *et al.*, 2015] Alessandro **Capra**, Marco **Dubbini**, Eleonora **Bertacchini**, Cristina **Castagnetti** et Francesco **Mancini** : 3D Reconstruction of an Underwater Archaeological Site : Comparison Between Low Cost Cameras. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XL-5/W5, numéro -, pages : 67–72, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 69, 80, et 240.)
- [Carron *et al.*, 2001] Michael J. **Carron**, Peter R. **Vogt** et Woo-Yeol **Jung** : A Proposed International Long-Term Project to Systematically Map the World's Ocean Floors from Beach to Trench : GOMaP (Global Ocean Mapping Program). *The International Hydrographic Review (IHR)*, volume 2, numéro 3, pages : 49–55, 2001. ISSN 0020-6946. (Cité aux pages 34 et 240.)
- [Castellani *et al.*, 2005] Umberto **Castellani**, Andrea **Fusiello** et Vittorio **Murino** : Underwater Environment Modeling by Fast 3D Mosaicing. Dans *International Conference on Computer Vision / Computer Graphics Collaboration Techniques and Applications (MIRAGE)*, pages 145–152, Rocquencourt, France, mars 2005. (Cité aux pages 85 et 240.)

- [] Licence Creative Commons 4.0 International  : Attribution - Pas de Modification. URL <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>. (Cité aux pages 9, 10, et 241.)
- [] Licence Creative Commons 4.0 International  : Attribution - partage dans les mêmes conditions. URL <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>. (Cité aux pages 9, 10, et 241.)
- [Chen *et al.*, 2013] Ling **Chen**, Sen **Wang**, Klaus **McDonald-Maier** et Huosheng **Hu** : Towards Autonomous Localization and Mapping of AUVs : a Survey. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems (IJUIS)*, volume 1, numéro 2, pages : 97–120, 2013. ISSN 2049-6427. (Cité aux pages 84 et 241.)
- [Chen et Medioni, 1991] Yang **Chen** et Gérard **Medioni** : Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. Dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 3, pages 145–155, Sacramento, États-Unis, avril 1991. ISBN 0-818-62163-X. (Cité aux pages 85 et 241.)
- [Chen et Lee, 2012] Yong-Qi **Chen** et Yuk-Cheung **Lee** : *Geographical Data Acquisition*. Springer, 2012. ISBN 978-3-211-83472-5. Chapitre 8 – Technique for underwater data acquisition, section 3 – Soundings. (Cité aux pages 21 et 241.)
- [Christ et Wernli, 2008] Robert D. **Christ** et Robert L. **Wernli** : *The ROV Manual : a User Guide for Observation Class Remotely Operated Vehicles*. Elsevier Science, 2008. ISBN 978-0-750-68148-3. (Cité aux pages 18, 84, et 241.)
- [Chryssostomidis, 2004] Chrys **Chryssostomidis** : SeaPerch Initiative : Past, Present and Future. Présentation, MIT Sea Grant, 2004. (Cité aux pages 121 et 241.)
- [CIDCO, 2006] CIDCO : Synthèse critique des outils de télédétection appliqués à la cartographie des habitats benthiques en domaine côtier. Rapport pour le Service hydrographique du Canada (Région du Québec), Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO), 2006. (Cité aux pages 49 et 241.)
- [Comer *et al.*, 1998] Robert **Comer**, Gerry **Kinn**, Don **Light** et Charles **Mondello** : Talking Digital. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PE&RS)*, volume 64, numéro 12, pages : 1139–1142, 1998. ISSN 0099-1112. (Cité aux pages 41 et 241.)
- [Corfield et Hillenbrand, 2003] Simon **Corfield** et Christopher **Hillenbrand** : Defence Applications for Unmanned Underwater Vehicles. Dans *Ocean Science and Technology : Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, volume 2, pages 161–178. Taylor & Francis, 2003. ISBN 0-415-30154-8. (Cité aux pages 15 et 241.)
- [Corke, 2011] Peter **Corke** : *Robotics, Vision and Control : Fundamental Algorithms in MATLAB*, volume 73. Springer Science & Business Media, 2011. ISBN 978-3-642-20143-1. (Cité aux pages 57, 59, et 241.)
- [Costa, 1993] Daniel P. **Costa** : The Secret Life of Marine Mammals. *Oceanography*, volume 6, numéro 3, pages : 120–128, 1993. ISSN 1042-8275. (Cité aux pages 22 et 241.)
- [Danson, 2003] Edwin F. S. **Danson** : AUV Tasks in the Offshore Industry. Dans *Ocean Science and Technology : Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, volume 2, pages 127–138. Taylor & Francis, 2003. ISBN 0-415-30154-8. (Cité aux pages 15 et 241.)
- [Desrochers et Jaulin, 2016] Benoit **Desrochers** et Luc **Jaulin** : Computing a guaranteed approximation of the zone explored by a robot. *IEEE Transaction on Automatic Control (TACON)*, volume PP, numéro 99, pages : 1, 2016. ISSN 0018-9286. (Cité aux pages 137 et 241.)
- [Devernay, 1997] Frédéric **Devernay** : *Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces*. Thèse de doctorat, École Polytechnique (X), France, 1997. (Cité aux pages 61 et 241.)

- [Di *et al.*, 2008] Kaichang **Di**, Fengliang **Xu**, Jue **Wang**, Sanchit **Agarwal**, Evgenia **Brodyagina**, Rongxing **Li** et Larry **Mathies** : Photogrammetric Processing of Rover Imagery of the 2003 Mars Exploration Rover Mission. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (PeRS)*, volume 63, numéro 2, pages : 181–201, 2008. ISSN 0924-2716. (Cité aux pages 39 et 242.)
- [Diamanti *et al.*, 2013] Eleni **Diamanti**, Andreas **Georgopoulos** et Fotini **Vlachaki** : Geometric Documentation of Underwater Archaeological Sites. *Geoinformatics FCE CTU*, volume 11, numéro -, pages : 37–48, 2013. ISSN 1802-2669. (Cité aux pages 81, 82, 86, et 242.)
- [Diamanti et Vlachaki, 2015] Eleni **Diamanti** et Fotini **Vlachaki** : 3D Recording of Underwater Antiquities in the South Euboean Gulf. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 1, numéro -, pages : 93–98, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 62, 63, 64, 66, 76, 78, 79, 84, 87, 90, et 242.)
- [Drap, 2012] Pierre **Drap** : Underwater Photogrammetry for Archaeology. *Dans Special Applications of Photogrammetry*, pages 111–136. InTech, 2012. ISBN 978-9-535-10548-0. (Cité aux pages 62, 64, 68, 69, 76, 79, 81, 86, 87, 90, et 242.)
- [Drap et Lefèvre, 2016] Pierre **Drap** et Julien **Lefèvre** : An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions. *Sensors*, volume 16, numéro 6, pages : 807, 2016. ISSN 1424-8220. (Cité aux pages 148 et 242.)
- [Drap *et al.*, 2015] Pierre **Drap**, Djamel **Merad**, Bilal **Hijazi**, Lamia **Gaoua**, Mohamad Motasem **Nawaf**, Mauro **Saccone**, Bertrand **Chemisky**, Julien **Seinturier**, Jean-Christophe **Sourisseau**, Timmy **Gambin** et Filipe **Castro** : Underwater Photogrammetry and Object Modeling : A Case Study of Xlendi Wreck in Malta. *Sensors*, volume 15, numéro 12, pages : 30351–30384, 2015. ISSN 1424-8220. (Cité aux pages 65, 79, et 242.)
- [Drap *et al.*, 2003] Pierre **Drap**, Julien **Seinturier** et Luc **Long** : A Photogrammetric Process Driven By an Expert System : a New Approach for Underwater Archaeological Surveying Applied to the 'Grand Ribaud F' Etruscan Wreck. *Dans IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW)*, volume 1, pages 16–16, Madison, États-Unis, juin 2003. ISBN 0-769-51900-8. (Cité aux pages 81, 82, et 242.)
- [Drap *et al.*, 2007] Pierre **Drap**, Julien **Seinturier**, David **Scaradozzi**, Pamela **Gambogi**, Luc **Long** et Frédéric **Gauch** : Photogrammetry for Virtual Exploration of Underwater Archeological Sites. *Dans CIPA International Symposium*, Athènes, Grèce, octobre 2007. (Cité aux pages 69, 71, 81, et 242.)
- [Dunbabin *et al.*, 2005] Matthew **Dunbabin**, Jonathan **Roberts**, Kane **Usher**, Graeme **Winstanley** et Peter **Corke** : A Hybrid AUV Design for Shallow Water Reef Navigation. *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2105–2110, Barcelone, Espagne, avril 2005. ISBN 0-780-38914-X. (Cité aux pages 76 et 242.)
- [Dunford *et al.*, 2009] Robert **Dunford**, Kristell **Michel**, Matthieu **Gagnage**, Hervé **Piégay** et M.-L. **Trémelo** : Potential and Constraints of Unmanned Aerial Vehicle Technology for the Characterization of Mediterranean Riparian Forest. *International Journal of Remote Sensing (IJRS)*, volume 30, numéro 19, pages : 4915–4935, 2009. ISSN 0143-1161. (Cité aux pages 38 et 242.)
- [Eigen] **Eigen** : Bibliothèque d'algèbre linéaire – Matrices, vecteurs, solveurs numériques et algorithmes associés. URL <http://eigen.tuxfamily.org/>. (Cité aux pages 129 et 242.)
- [Eisenbeiss, 2006] Henri **Eisenbeiss** : Applications of Photogrammetric Processing Using an Autonomous Model Helicopter. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 36, numéro 185, pages : 51–56, 2006. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 38 et 242.)

- [Eriksen *et al.*, 2001] Charles C. Eriksen, T. James Osse, Russell D. Light, Timothy Wen, Thomas W. Lehman, Peter L. Sabin, John W. Ballard et Andrew M. Chiodi : Seaglider : a Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research. *IEEE Journal of Oceanic Engineering (JOE)*, volume 26, numéro 4, pages : 424–436, 2001. ISSN 0364-9059. (Cité aux pages 40 et 243.)
- [Faugeras, 1993] Olivier Faugeras : *Three-Dimensional Computer Vision - A Geometric Viewpoint*. MIT Press, 1993. ISBN 978-0-262-06158-2. (Cité aux pages 56, 58, 85, et 243.)
- [Ferreira *et al.*, 2012] Hugo Ferreira, Carlos Almeida, Alfredo Martins, José Miguel Almeida, André P. Dias, Guilherme Silva et Eduardo Silva : Environmental Modeling With Precision Navigation Using ROAZ Autonomous Surface Vehicle. *Dans IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM)*, Vilamoura, Portugal, octobre 2012. (Cité aux pages 39 et 243.)
- [Fillinger et Funke, 2013] Laura Fillinger et Tobias Funke : A New 3-D Modelling Method to Extract Subtransect Dimensions from Underwater Videos. *Ocean Science*, volume 9, numéro 2, pages : 461–476, 2013. ISSN 1812-0784. (Cité aux pages 62, 64, 66, 76, 79, 80, 81, 83, 91, et 243.)
- [Fischler et Bolles, 1981] Martin A. Fischler et Robert C. Bolles : Random Sample Consensus : a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM (CACM)*, volume 24, numéro 6, pages : 381–395, 1981. ISSN 0001-0782. (Cité aux pages 85 et 243.)
- [Foley *et al.*, 2009] Brendan P. Foley, Katerina Dellaporta, Dimitris Sakellariou, Brian S. Bingham, Richard Camilli, Ryan M. Eustice, Dionysis Evagelistis, Vicki Lynn Ferrini, Kostas Katsaros, Dimitris Kourkoumelis, Angelos Mallios, Paraskevi Micha, David A. Mindell, Christopher Roman, Hanumant Singh, David S. Switzer et Theotokis Theodoulou : The 2005 Chios Ancient Shipwreck Survey : New Methods for Underwater Archaeology. *Hesperia*, volume 78, numéro -, pages : 269–305, 2009. ISSN 0018-098X. (Cité aux pages 66, 68, 76, 79, 81, 87, et 243.)
- [Forsyth et Ponce, 2003] David A. Forsyth et Jean Ponce : *Computer Vision : a Modern Approach*. Prentice Hall, 2003. ISBN 978-0-130-85198-7. (Cité aux pages 58 et 243.)
- [Foulquié *et al.*, 2003] Mathieu Foulquié, Renaud Dupuy de la Grandrive, Didier Collart, Sylvain Blouet, Priscilla Dupont et Aude Ruiz : Posidonies du Cap d’Agde (FR 9101414). Document d’objectifs site Natura 2000 (DOCOB), Conseil Général de l’Hérault, 2003. (Cité aux pages 214 et 243.)
- [Fryer et Fraser, 1986] John G. Fryer et Clive S. Fraser : On the Calibration of Underwater Cameras. *The Photogrammetric Record*, volume 12, numéro 67, pages : 73–85, 1986. ISSN 1477-9730. (Cité aux pages 73 et 243.)
- [Furukawa et Ponce, 2007] Yasutaka Furukawa et Jean Ponce : Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *Dans IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1–8, Minneapolis,  tats-Unis, juin 2007. ISBN 1-424-41179-3. (Cité aux pages 65, 156, 157, et 243.)
- [Gademer, 2010] Antoine Gademer : *Réalité Terrain étendue : une nouvelle approche pour l’extraction de paramètres de surface biophysiques et géophysiques à l’échelle des individus*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est de Marne-la-Vallée (UPEM), décembre 2010. (Cité aux pages 15, 54, et 243.)
- [Gademer *et al.*, 2014] Antoine Gademer, Lo ca Avanthey, Laurent Beaudoin, Michel Roux et Jean-Paul Rudant : Micro-Charges Utiles Dédiées à l’Acquisition de Données par Drone pour l’étude des Zones Naturelles. *Dans Colloque scientifique francophone Drones et moyens légers aéroportés d’observation*, Montpellier, France, juin 2014. (Cité aux pages 54 et 243.)
- [Gademer *et al.*, 2013] Antoine Gademer, Laurent Beaudoin, Lo ca Avanthey et Jean-Paul Rudant : Application of the Extended Ground Truth Concept for Risk Anticipation Concerning Ecosystems. *Radio Science Bulletin (RSB)*, volume -, numéro 345, pages : 35–50, 2013. ISSN 1024-4530. (Cité aux pages 14, 42, 170, et 243.)

- [Gademer *et al.*, 2010a] Antoine **Gademer**, Benoit **Petitpas**, Samira **Mobaied**, Laurent **Beaudoin**, Bernard **Riera**, Michel **Roux** et Jean-Paul **Rudant** : Developing a Lowcost Vertical Take Off and Landing Unmanned Aerial System for Centimetric Monitoring of Biodiversity the Fontainebleau Forest Case. *Dans IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 600–603, Honolulu, Hawaii, juillet 2010a. ISBN 978-1-424-49566-5. (Cité aux pages 119 et 244.)
- [Gademer *et al.*, 2010b] Antoine **Gademer**, Vincent **Vittori** et Laurent **Beaudoin** : From Light to Ultralight UAV. *Dans International Conference on Unmanned Aircraft System (ICUAS) - Eurosatory*, Paris, France, juin 2010b. (Cité aux pages 119 et 244.)
- [Garcia *et al.*, 2002] Rafael **Garcia**, Tudor **Nicosevici** et Xevi **Cufi** : On the Way to Solve Lighting Problems in Underwater Imaging. *Dans IEEE OCEANS Conference*, volume 2, pages 1018–1024, Mississippi, États-Unis, octobre 2002. ISBN 0-7803-7534-3. (Cité aux pages 163 et 244.)
- [Garlan, 2004] Thierry **Garlan** : *Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 2004. (Cité aux pages 50 et 244.)
- [Gauglitz *et al.*, 2011] Steffen **Gauglitz**, Tobias **Höllerer** et Matthew **Turk** : Evaluation of Interest Point Detectors and Feature Descriptors for Visual Tracking. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, volume 94, numéro 3, pages : 335–360, 2011. ISSN 0920-5691. (Cité aux pages 59 et 244.)
- [Gawlik, 2014] Natalia **Gawlik** : 3D Modelling of Underwater Archaeological Artefacts. Mémoire de D.E.A., Norwegian University of Science and Technology, 2014. (Cité aux pages 64 et 244.)
- [Genelle, 2012] Fanny **Genelle** : *Les méthodes géophysiques pour la caractérisation des couvertures d'installation de stockage de déchets*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2012. (Cité aux pages 48 et 244.)
- [Georgiades *et al.*, 2004] Christina **Georgiades**, Andrew **German**, Andrew **Hogue**, Hui **Liu**, Chris **Prahacs**, Arlene **Ripsman**, Robert **Sim**, Luz-Abril **Torres**, Pifu **Zhang**, Martin **Buehler**, Gregory **Dudek**, Michael **Jenkin** et Evangelos **Milios** : AQUA : an Aquatic Walking Robot. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 4, pages 3525–3531, Sendaï, Japon, septembre-octobre 2004. ISBN 0-780-38463-6. (Cité aux pages 40 et 244.)
- [Gershenfeld, 2012] Neil **Gershenfeld** : How to Make Almost Anything : The Digital Fabrication Revolution. *Foreign Affairs*, volume 91, numéro 6, pages : 43–57, 2012. ISSN 0015-7120. (Cité aux pages 162 et 244.)
- [Gillham, 2011] Jason **Gillham** : Understanding the Impact of Water Clarity when Scanning with the ULS-100. Livre blanc, 2G Robotics, 2011. (Cité aux pages 52 et 244.)
- [Gintert *et al.*, 2012] Brooke **Gintert**, Arthur C. R. **Gleason**, Kasey **Cantwell**, Nuno **Gracias**, Meghan **Gonzalez** et R. Pamela **Reid** : Third-Generation Underwater Landscape Mosaics for Coral Reef Mapping and Monitoring. *Dans International Coral Reef Symposium (ICRS)*, Cairns, Australie, juillet 2012. ISBN 978-0-980-85725-2. (Cité aux pages 79, 80, 87, 121, 136, et 244.)
- [Gracias *et al.*, 2013] Nuno **Gracias**, Pere **Ridao**, Rafael **Garcia**, Javier **Escartín**, Michel **L'Hour**, Franca **Cibecchini**, Ricard **Campos**, Marc **Carreras**, David **Ribas**, Narcís **Palomeras**, Lluís **Magi**, Albert **Palomer**, Tudor **Nicosevici**, Ricard **Prados**, Ramon **Hegedüs**, Laszlo **Neumann**, Francesco de **Filippo** et Angelos **Mallios** : Mapping the Moon : Using a Lightweight AUV to Survey the Site of the 17th Century Ship 'La Lune'. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–8, Bergen, Norvège, juin 2013. ISBN 978-1-479-90001-5. (Cité aux pages 40, 62, 63, 76, 81, 84, 86, et 244.)
- [Gracias et Santos-Victor, 2001] Nuno **Gracias** et José **Santos-Victor** : Underwater Mosaicing and Trajectory Reconstruction Using Global Alignment. *Dans IEEE OCEANS Conference*, volume 4, pages 2557–2563, Honolulu, États-Unis, novembre 2001. ISBN 0-933-95728-9. (Cité aux pages 69, 70, 87, et 244.)

- [Grocholsky *et al.*, 2004] Ben **Grocholsky**, Selcuk **Bayraktar**, Vijay **Kumar** et George **Pappas** : UAV and UGV Collaboration for Active Ground Feature Search and Localization. *Dans Technical Conference, Workshop and Exhibit AIAA Unmanned Unlimited (UU)*, Chicago, États-Unis, septembre 2004. ISBN 978-1-624-10081-9. (Cité aux pages 15 et 245.)
- [Grossberg et Nayar, 2005] Michael D. **Grossberg** et Shree K. **Nayar** : The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration. *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, volume 61, numéro 2, pages : 119–137, 2005. ISSN 0920-5691. (Cité aux pages 70 et 245.)
- [Hadjitheophanous *et al.*, 2010] Stavros **Hadjitheophanous**, Christos **Ttofis**, Athinodoros S. **Georghiades** et Theodoris **Theocharides** : Towards Hardware Stereoscopic 3D Reconstruction : A Real-Time FPGA Computation of the Disparity Map. *Dans Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, pages 1743–1748, Dresden, Germany, mars 2010. ISBN 978-3-981-08016-2. (Cité aux pages 161 et 245.)
- [Haralick *et al.*, 1991] Robert M. **Haralick**, Chung-Nan **Lee**, Karsten **Ottenburg** et Michael **Nolle** : Analysis and Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem. *Dans IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 592–598, Maui, Hawaii, juin 1991. ISBN 0-818-62148-6. (Cité aux pages 85 et 245.)
- [Harris et Stephens, 1988] Chris **Harris** et Mike **Stephens** : A Combined Corner and Edge Detector. *Dans Alvey Vision Conference*, volume 15, pages 147–152, Manchester, Royaume-Uni, août-septembre 1988. (Cité aux pages 65 et 245.)
- [Hartley et Zisserman, 2003] Richard **Hartley** et Andrew **Zisserman** : *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 978-0-521-54051-3. (Cité aux pages 57, 58, 85, et 245.)
- [Harvey *et al.*, 2003] Euan S. **Harvey**, Mike **Cappo**, Mark **Shortis**, Stuart **Robson**, Jeff **Buchanan** et Peter **Speare** : The Accuracy and Precision of Underwater Measurements of Length and Maximum Body Depth of Southern Bluefin Tuna (*Thunnus Maccoyii*) with a Stereo-Video Camera System. *Fisheries Research*, volume 63, numéro 3, pages : 315–326, 2003. ISSN 0165-7836. (Cité aux pages 152 et 245.)
- [Hassan *et al.*, 2011] Faez M. **Hassan**, Hwee San **Lim** et Mohd Zubir Mat **Jafri** : CropCam UAV for Land Use/Land Cover Mapping over Penang Island, Malaysia. *Pertanika Journal of Science & Technology (JST)*, volume 19, numéro -, 2011. ISSN 0128-7680. (Cité aux pages 38 et 245.)
- [Hebbeln *et al.*, 2016] Dierk **Hebbeln**, Claudia **Wienberg**, Maren **Bender**, Fenna **Bergmann**, Klaus **Dehning**, Wolf-Christian **Dullo**, René **Eichstädter**, Sebastian **Flöter**, André **Freiwald**, Andrea **Gori**, Julia **Haber Kern**, Leon **Hoffmann**, Francisco **João**, Marc **Lavaleye**, Tom **Leymann**, Kei **Matsuyama**, Birgit **Meyer-Schack**, Furu **Mienis**, Irene **Moçambique**, Nicolas **Nowald**, Covadonga **Orejas**, Carlos **Ramos**, Dimitar **Saturov**, Christian **Seiter**, Jürgen **Titschack**, Vincent **Vittori**, Anne-Marie **Wefing**, Maik **Wilsenack** et Paul **Wintersteller** : ANNA – Cold-Water Coral Ecosystems off Angola and Namibia. *Journal d’expédition – R/V METEOR Cruise No. M122*, December 30, 2015 – January 31, 2016, Walvis Bay (Namibia) – Walvis Bay (Namibia), METEOR Reports, M122, 2016. (Cité aux pages 163 et 245.)
- [Helmholz, 2013] Petra **Helmholz** : 3D Modelling of Underwater objects using Photogrammetry, WALIS Forum, Crown Perth, Australie, Novembre 2013. (Cité aux pages 111 et 245.)
- [Henderson *et al.*, 2013] Jon **Henderson**, Oscar **Pizarro**, Matthew **Johnson-Roberson** et Ian **Mahon** : Mapping Submerged Archaeological Sites using Stereo-Vision Photogrammetry. *International Journal of Nautical Archaeology*, volume 42, numéro 2, pages : 243–256, 2013. ISSN 1095-9270. (Cité aux pages 79, 81, 82, et 245.)

- [Herbort et Wöhler, 2011] Steffen **Herbort** et Christian **Wöhler** : An Introduction to Image-Based 3D Surface Reconstruction and a Survey of Photometric Stereo Methods. *3D Research (3DR)*, volume 2, numéro 3, pages : 1–17, 2011. ISSN 2092-6731. (Cité aux pages 47 et 246.)
- [Hildebrandt, 2014] Marc **Hildebrandt** : *Development, Evaluation and Validation of a Stereo Camera Underwater SLAM Algorithm*. Thèse de doctorat, Universität Bremen, Deutschland, 2014. (Cité aux pages 76 et 246.)
- [Hildebrandt et al., 2012] Marc **Hildebrandt**, Christopher **Gaudig**, Leif **Christensen**, Sankaranarayanan **Natarajan**, Patrick **Paranhos** et Jan **Albiez** : Two Years of Experiments with the AUV Dagon – A Versatile Vehicle for High Precision Visual Mapping and Algorithm Evaluation. Dans *IEEE Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pages 1–9, Southampton, Royaume-Uni, septembre 2012. ISBN 978-1-457-72055-0. (Cité aux pages 79 et 246.)
- [Hogue et al., 2007] Andrew **Hogue**, Andrew **German** et Michael **Jenkin** : Underwater environment reconstruction using stereo and inertial data. Dans *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, pages 2372–2377, Montréal, Canada, octobre 2007. ISBN 978-1-424-40991-4. (Cité aux pages 62, 68, 69, 84, et 246.)
- [Hogue et al., 2006] Andrew **Hogue**, Andrew **German**, James **Zacher** et Michael **Jenkin** : Underwater 3D Mapping : Experiences and Lessons Learned. Dans *IEEE Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, pages 24–24, Québec, Canada, juin 2006. ISBN 0-769-52542-3. (Cité aux pages 67 et 246.)
- [Holt, 2003] Peter **Holt** : An Assessment of Quality in Underwater Archaeological Surveys Using Tape Measurements. *International Journal of Nautical Archaeology (IJNA)*, volume 32, numéro 2, pages : 246–251, 2003. ISSN 1095-9270. (Cité aux pages 126, 155, et 246.)
- [Horaud et al., 1989] Radu **Horaud**, Bernard **Conio**, Olivier **Leboulleux** et Bernard **Lacolle** : An Analytic Solution for the Perspective 4-Point Problem. Dans *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 500–507, San Diego,  tats-Unis, juin 1989. ISBN 0-818-61952-x. (Cité aux pages 85 et 246.)
- [Horn, 1987] Berthold K. P. **Horn** : Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions. *Journal of the Optical Society of America (JOSA) A*, volume 4, numéro 4, pages : 629–642, 1987. ISSN 1084-7529. (Cité aux pages 85 et 246.)
- [Hu et al., 2014] Han **Hu**, Yuri **Rzhanov** et Thierry **Boyer** : A Robust Quasi-Dense Matching Approach for Underwater Images. Dans *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference (ASPRS)*, Louisville,  tats-Unis, mars 2014. ISBN 978-1-632-66534-8. (Cité aux pages 66 et 246.)
- [Hugenholtz et al., 2013] Chris H. **Hugenholtz**, Ken **Whitehead**, Owen W. **Brown**, Thomas E. **Barchyn**, Brian J. **Moorman**, Adam **LeClair**, Kevin **Riddell** et Tayler **Hamilton** : Geomorphological Mapping with a Small Unmanned Aircraft System (sUAS) : Feature Detection and Accuracy Assessment of a Photogrammetrically-Derived Digital Terrain Model. *Geomorphology*, volume 194, numéro -, pages : 16–24, 2013. ISSN 0169-555X. (Cité aux pages 38 et 246.)
- [Hygounenc et al., 2004] Emmanuel **Hygounenc**, Il-Kyun **Jung**, Philippe **Soueres** et Simon **Lacroix** : The Autonomous Blimp Project of LAAS-CNRS : Achievements in Flight Control and Terrain Mapping. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)*, volume 23, numéro 4-5, pages : 473–511, 2004. ISSN 0278-3649. (Cité aux pages 37 et 246.)
- [Ibata et al., 2013] Rodrigo A. **Ibata**, Geraint F. **Lewis**, Anthony R. **Conn**, Michael J. **Irwin**, Alan W. **McConnachie**, Scott C. **Chapman**, Michelle L. **Collins**, Mark **Fardal**, Annette M. N. **Ferguson**, Neil G. **Ibata**, A. Dougal **Mackey**, Nicolas F. **Martin**, Julio **Navarro**, R. Michael **Rich**, David **Valls-Gabaud** et Lawrence M. **Widrow** : A Vast, Thin Plane of Corotating Dwarf Galaxies Orbiting the Andromeda Galaxy. *Nature*, volume 493, numéro 7430, pages : 62–65, 2013. ISSN 0028-0836. (Cité aux pages 15 et 246.)

- [Jannoura *et al.*, 2015] Ramia **Jannoura**, Katja **Brinkmann**, Daniel **Uteau**, Christian **Bruns** et Rainer Georg **Joergensen** : Monitoring of Crop Biomass Using True Colour Aerial Photographs Taken from a Remote Controlled Hexacopter. *Biosystems Engineering*, volume 129, numéro -, pages : 341–351, 2015. ISSN 1537-5110. (Cité aux pages 38 et 247.)
- [Jarnac, 2008] Guy **Jarnac** : Cartographie numérique et développement des territoires. Programme IRIS 2007 - Étude, ITEMS International et Laboratoire A+H, 2008. (Cité aux pages 13 et 247.)
- [Jasiobedzki *et al.*, 2008] Piotr **Jasiobedzki**, Stephen **Se**, Michel **Bondy** et Roy **Jakola** : Underwater 3D Mapping and Pose Estimation for ROV Operations. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–6, Québec, Canada, septembre 2008. ISBN 978-1-424-42619-5. (Cité aux pages 64, 65, 69, 85, 90, et 247.)
- [Jaulin, 2006] Luc **Jaulin** : Localization of an Underwater Robot Using Interval Constraint Propagation. *Dans International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP)*, pages 244–255, Nantes, France, septembre 2006. ISBN 978-3-540-46267-5. (Cité aux pages 137 et 247.)
- [Jenkin *et al.*, 2007] Michael **Jenkin**, Andrew **Hogue**, Andrew **German**, Sunbir **Gill**, Anna **Topol** et Stephanie **Wilson** : Underwater Surface Recovery and Segmentation. *Dans IEEE International Conference on Cognitive Informatics*, pages 373–380, Lac Tahoe, États-Unis, août 2007. ISBN 978-1-424-41327-0. (Cité aux pages 90 et 247.)
- [Jenkin *et al.*, 2010] Michael **Jenkin**, Bart **Verzijlberg** et Andrew **Hogue** : Progress Towards Underwater 3D Scene Recovery. *Dans ACM C\* Conference on Computer Science and Software Engineering (C3S2E)*, pages 123–128, Montréal, Canada, mai 2010. ISBN 978-1-605-58901-5. (Cité aux pages 64, 66, 76, 79, 81, 86, 90, 91, et 247.)
- [Jensen *et al.*, 2008] Austin M. **Jensen**, Marc **Baumann** et Yang Quan **Chen** : Low-cost Multispectral Aerial Imaging Using Autonomous Runway-Free Small Flying Wing Vehicles. *Dans IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, volume 5, pages 506–509, Boston, États-Unis, juillet 2008. ISBN 978-1-424-42807-6. (Cité aux pages 38 et 247.)
- [Jensen *et al.*, 2007] Troy **Jensen**, Armando **Apan**, Frank R. **Young** et Leslie Charles **Zeller** : Detecting the Attributes of a Wheat Crop Using Digital Imagery Acquired from a Low-Altitude Platform. *Computers and Electronics in Agriculture (COMPAG)*, volume 59, numéro 1-2, pages : 66–77, 2007. ISSN 0168-1699. (Cité aux pages 15 et 247.)
- [Johnson, 1958] John **Johnson** : Analysis of Image Forming Systems. *Dans Image Intensifier Symposium*, page 249, Fort Belvoir, États-Unis, octobre 1958. (Cité aux pages 41 et 247.)
- [Johnson-Roberson *et al.*, 2010] Matthew **Johnson-Roberson**, Oscar **Pizarro**, Stefan B. **Williams** et Ian **Mahon** : Generation and Visualization of Large-Scale Three-Dimensional Reconstructions from Underwater Robotic Surveys. *Journal of Field Robotics (JFR)*, volume 27, numéro 1, pages : 21–51, 2010. ISSN 1556-4967. (Cité aux pages 62, 64, 66, 76, 79, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 90, 91, 131, 161, et 247.)
- [Jordt-Sedlazeck et Koch, 2012] Anne **Jordt-Sedlazeck** et Reinhard **Koch** : Refractive Calibration of Underwater Cameras. *Dans European Conference on Computer Vision (ECCV)*, volume V, pages 846–859, Florence, Italie, octobre 2012. ISBN 978-3-642-33714-7. (Cité aux pages 70 et 247.)
- [Kalantari et Kasser, 2008] Mahzad **Kalantari** et Michel **Kasser** : Photogrammétrie et Vision par Ordinateur. *Revue XYZ*, volume -, numéro 117, pages : 49–54, 2008. ISSN 0290-9057. (Cité aux pages 57 et 247.)
- [Kannala et Brandt, 2007] Juho **Kannala** et Sami S. **Brandt** : Quasi-Dense Wide Baseline Matching Using Match Propagation. *Dans IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 1–8, Minneapolis, États-Unis, juin 2007. ISBN 978-1-424-41179-5. (Cité aux pages 59 et 247.)

- [[Kawahara et al., 2013](#)] Ryoichi **Kawahara**, Shohei **Nobuhara** et Takashi **Matsuyama** : A Pixel-Wise Varifocal Camera Model for Efficient Forward Projection and Linear Extrinsic Calibration of Underwater Cameras with Flat Housings. *Dans IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, pages 819–824, Sydney, Australie, décembre 2013. ISBN 978-1-479-93022-7. (Cité aux pages [70](#) et [248](#).)
- [[Kaye et Laby, 1995](#)] George William Clarkson **Kaye** et Thomas Howell **Laby** : *Tables of Physical and Chemical Constants*. Kaye & Laby Online - Version 1.0 (2005), 1995. URL [www.kayelaby.npl.co.uk](http://www.kayelaby.npl.co.uk). Chapitre 2 – General physics. (Cité aux pages [28](#) et [248](#).)
- [[Kitchin, 2014](#)] Rob **Kitchin** : *The Data Revolution : Big Data, Open Data, Data Infrastructures and their Consequences*. Sage, 2014. ISBN 978-1-446-28747-7. (Cité aux pages [163](#) et [248](#).)
- [[Krig, 2014](#)] Scott **Krig** : *Computer Vision Metrics : Survey, Taxonomy, and Analysis*. Apress, 2014. ISBN 978-1-430-25929-9. (Cité aux pages [116](#) et [248](#).)
- [[Kunz et Singh, 2010](#)] Clayton **Kunz** et Hanumant **Singh** : Stereo Self-Calibration for Seafloor Mapping Using AUVs. *Dans IEEE Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pages 1–7, Monterey, États-Unis, septembre 2010. ISBN 978-1-612-84980-5. (Cité aux pages [62](#), [64](#), [65](#), [73](#), [79](#), [81](#), [83](#), [84](#), [86](#), [87](#), [107](#), et [248](#).)
- [[Ladroit, 2012](#)] Yoann **Ladroit** : *Amélioration des méthodes de détection et de qualification des sondes pour les sondes multi-faisceaux bathymétriques*. Thèse de doctorat, Télécom Bretagne, Université de Rennes 1, France, 2012. (Cité aux pages [49](#) et [248](#).)
- [[Lavest et al., 2000](#)] Jean-Marc **Lavest**, Gérard **Rives** et Jean-Thierry **Lapresté** : Underwater Camera Calibration. *Dans European Conference on Computer Vision (ECCV)*, volume 2, pages 654–668, Dublin, Irlande, juin-juillet 2000. ISBN 978-3-540-45053-5. (Cité aux pages [73](#) et [248](#).)
- [[Lavest et al., 2003](#)] Jean-Marc **Lavest**, Gérard **Rives** et Jean-Thierry **Lapresté** : Dry Camera Calibration for Underwater Applications. *Machine Vision and Applications (MVA)*, volume 13, numéro 5-6, pages : 245–253, 2003. ISSN 0932-8092. (Cité aux pages [73](#) et [248](#).)
- [[Lébraly, 2012](#)] Pierre **Lébraly** : *Étalonnage de Caméras à Champs Disjoints et Reconstruction 3D : Application à un Robot Mobile*. Thèse de doctorat, Université Blaise-Pascal (Clermont-Ferrand II), France, 2012. (Cité aux pages [107](#) et [248](#).)
- [[Leedekerken et al., 2014](#)] Jacques C. **Leedekerken**, Maurice F. **Fallon** et John J. **Leonard** : Mapping Complex Marine Environments with Autonomous Surface Craft. *Dans International Symposium of Experimental Robotics (ISER)*, pages 525–539, Marrakech/Essaouira, Maroc, juin 2014. ISBN 978-3-642-28571-4. (Cité aux pages [39](#) et [248](#).)
- [[Lesparre et al., 2012](#)] Nolwenn **Lesparre**, Dominique **Gibert**, Jacques **Marteau**, Jean-Christophe **Komorowski**, Florence **Nicollin** et Olivier **Coutant** : Density Muon Radiography of La Soufrière of Guadeloupe Volcano : Comparison with Geological, Electrical Resistivity and Gravity Data. *Geophysical Journal International*, volume 190, numéro 2, pages : 1008–1019, 2012. ISSN 1365-246X. (Cité aux pages [47](#) et [248](#).)
- [[Lhuillier, 2008](#)] Maxime **Lhuillier** : Automatic Scene Structure and Camera Motion Using a Catadioptric System. *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, volume 109, numéro 2, pages : 186–203, 2008. ISSN 1077-3142. (Cité aux pages [70](#) et [248](#).)
- [[Lhuillier et Quan, 2000](#)] Maxime **Lhuillier** et Long **Quan** : Robust Dense Matching using Local and Global Geometric Constraints. *Dans IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, volume 1, pages 968–972, Barcelone, Espagne, septembre 2000. ISBN 0-769-50750-6. (Cité aux pages [58](#) et [248](#).)

- [[Licari et al., 2004](#)] Marie-Laure **Licari**, Philippe **Lenfant**, Jean-Michel **Amouroux**, Renaud Dupuy de la **Grandrive**, Céline **Labruno**, Mathieu **Foulquié**, Elisabeth **Rochel**, Patrick **Bonhomme** et Gwenaél **Cadiou** : Posidonies de la Côte des Albères (FR 9101482). Document d'objectifs site Natura 2000 (DOCOB), Conseil Général des Pyrénées-Orientales, 2004. (Cité aux pages [144](#), [214](#), [216](#), et [249](#).)
- [[Linder, 2009](#)] Wilfried **Linder** : *Digital Photogrammetry*. Springer, 2009. ISBN 978-3-540-92724-2. Page 15. (Cité aux pages [60](#) et [249](#).)
- [[Lirman et al., 2007](#)] Diego **Lirman**, Nuno Ricardo **Gracias**, Brooke Erin **Gintert**, Arthur Charles Rogde **Gleason**, Ruth Pamela **Reid**, Shahriar **Negahdaripour** et Philip **Kramer** : Development and Application of a Video-Mosaic Survey Technology to Document the Status of Coral Reef Communities. *Environmental Monitoring and Assessment*, volume 125, numéro 1-3, pages : 59–73, 2007. ISSN 0167-6369. (Cité aux pages [76](#), [79](#), [81](#), et [249](#).)
- [[Lowe, 1999](#)] David G. **Lowe** : Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. *Dans IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, volume 2, pages 1150–1157, Corfou, Grèce, septembre 1999. ISBN 0-7699-50164-8. (Cité aux pages [65](#) et [249](#).)
- [[Ludvigsen et al., 2007](#)] Martin **Ludvigsen**, Bjorn **Sortland**, Geir **Johnsen** et Hanumant **Singh** : Applications of geo-referenced underwater photo mosaics in marine biology and archaeology. *Oceanography*, volume 20, numéro 4, 2007. ISSN 1042-8275. (Cité aux pages [62](#), [76](#), [81](#), [87](#), et [249](#).)
- [[Lurton, 2001](#)] Xavier **Lurton** : Précision de mesure des sonars bathymétriques en fonction du rapport signal/bruit. *Traitement du signal*, volume 18, numéro 3, pages : 179–194, 2001. ISSN 0765-0019. (Cité aux pages [49](#) et [249](#).)
- [[Mahon et al., 2011](#)] Ian **Mahon**, Oscar **Pizarro**, Matthew **Johnson-Roberson**, Ariell **Friedman**, Stefan B. **Williams** et Jon C. **Henderson** : Reconstructing Pavlopetri : Mapping the World's Oldest Submerged Town Using Stereo-vision. *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2315–2321, Shanghai, Chine, mai 2011. ISBN 978-1-612-84386-5. (Cité aux pages [62](#), [63](#), [64](#), [65](#), [66](#), [76](#), [78](#), [79](#), [81](#), [84](#), [86](#), [87](#), [90](#), [91](#), et [249](#).)
- [[Maksimović et al., 2014](#)] Mirjana **Maksimović**, Vladimir **Vujović**, Nikola **Davidović**, Vladimir **Milošević** et Branko **Perišić** : Raspberry Pi as Internet of Things Hardware : Performances and Constraints. *Dans International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN)*, page 8, Vrnjačka Banja, Serbia, juin 2014. ISBN 978-8-680-50970-9. (Cité aux pages [162](#) et [249](#).)
- [[Mamayev, 2010](#)] Oleg Ivanovich **Mamayev** : *Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters*. Elsevier, 2010. ISBN 978-0-444-41251-5. Chapitre 2 – The Equation of State of Sea Water. (Cité aux pages [30](#) et [249](#).)
- [[Matthews, 2008](#)] Neffra A. **Matthews** : Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology : Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Rapport 428, U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado, 2008. (Cité aux pages [57](#), [126](#), et [249](#).)
- [[Mazzei et al., 2015](#)] Luca **Mazzei**, Lorenzo **Corgnati** et Simone **Marini** : Low Cost Stereo System for Imaging and 3D Reconstruction of Underwater Organisms. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–4, Gênes, Italie, mai 2015. (Cité aux pages [80](#), [81](#), et [249](#).)
- [[McGlone et al., 1980](#)] Chris J. **McGlone**, Edward M. **Mikhail**, Jim S. **Bethel** et Roy **Mullen** : *Manual of Photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), cinquième (2004) édition, 1980. ISBN 978-1-570-83071-6. Page 1109. (Cité aux pages [60](#) et [249](#).)
- [[Méline, 2013](#)] Arnaud **Méline** : *Fusion Multimodale pour la Cartographie Sous-Marine*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France, 2013. (Cité aux pages [73](#), [161](#), et [249](#).)

- [Méline *et al.*, 2010] Arnaud **Méline**, Jean **Triboulet** et Bruno **Jouvencel** : A Camcorder for 3D Underwater Reconstruction of Archeological Objects. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–9, Seattle, États-Unis, septembre 2010. ISBN 978-1-424-44332-1. (Cité aux pages [65](#), [73](#), [76](#), et [250](#).)
- [Méline *et al.*, 2012] Arnaud **Méline**, Jean **Triboulet** et Bruno **Jouvencel** : Comparative Study of Two 3D Reconstruction Methods for Underwater Archaeology. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 740–745, Vilamoura, Portugal, octobre 2012. ISBN 978-1-467-31737-5. (Cité aux pages [64](#), [65](#), [66](#), [81](#), et [250](#).)
- [Ministère de l'écologie *et al.*, 2012] **Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement** : Arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent. *Journal Officiel de la République Française (JORF)*, volume 11 mai, numéro (texte) 8, pages : 8643, 2012. ISSN 0242-6773. (Cité aux pages [43](#) et [250](#).)
- [Ministère des Universités, 1980] **Ministère des Universités** : Arrêté du 28 novembre 1980 : terminologie de la télédétection aérospatiale. *Journal Officiel de la République Française (JORF)*, volume 11 décembre, numéro complémentaire, pages : 10848, 1980. ISSN 0242-6773. (Cité aux pages [33](#) et [250](#).)
- [Minorsky, 1922] Nicolas **Minorsky** : Directional Stability of Automatically Steered Bodies. *Journal of the American Society for Naval Engineers (ASNE)*, volume 42, numéro 2, pages : 280–309, 1922. ISSN 1559-3584. (Cité aux pages [95](#) et [250](#).)
- [Miyamoto *et al.*, 2001] Michiru **Miyamoto**, Kunihiro **Yoshino** et Keiji **Kushida** : Use of Balloon Aerial Photography for Classification of Kushiro Wetland Vegetation, Northeastern Japan. *Wetlands*, volume 24, numéro 3, pages : 701–710, 2001. ISSN 0277-5212. (Cité aux pages [37](#) et [250](#).)
- [Molloy, 2011] Jennifer C. **Molloy** : The Open Knowledge Foundation : Open Data Means Better Science. *PLoS Biology*, volume 9, numéro 12, pages : e1001195, 2011. ISSN 1544-9173. (Cité aux pages [163](#) et [250](#).)
- [Morat, 2008] Julien **Morat** : *Vision stéréoscopique par ordinateur pour la détection et le suivi de cibles pour une application automobile*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France, 2008. (Cité aux pages [60](#) et [250](#).)
- [Murray-Rust, 2008] Peter **Murray-Rust** : Open Data in Science. *Serials Review*, volume 34, numéro 1, pages : 52–64, 2008. ISSN 0098-7913. (Cité aux pages [163](#) et [250](#).)
- [Narasimhan *et al.*, 2008] Srinivasa G. **Narasimhan**, Sanjeev J. **Koppal** et Shuntaro **Yamazaki** : Temporal Dithering of Illumination for Fast Active Vision. *Dans European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pages 830–844, Marseille, France, octobre 2008. ISBN 978-3-540-88685-3. (Cité aux pages [51](#) et [250](#).)
- [Negahdaripour et Madjidi, 2003] Shahriar **Negahdaripour** et Hossein **Madjidi** : Stereovision Imaging on Submersible Platforms for 3-D Mapping of Benthic Habitats and Sea-Floor Structures. *IEEE Journal of Oceanic Engineering (JOE)*, volume 28, numéro 4, pages : 625–650, 2003. ISSN 0364-9059. (Cité aux pages [62](#), [85](#), [87](#), et [250](#).)
- [Nelson *et al.*, 2014] Erik A. **Nelson**, Ian T. **Dunn**, Jeffrey **Forrester**, Timothy **Gambin**, Christopher M. **Clark** et Zoë J. **Wood** : Surface Reconstruction of Ancient Water Storage Systems – An Approach for Sparse 3D Sonar Scans and Fused Stereo Images. *Dans International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)*, pages 161–168, Lisbonne, Portugal, janvier 2014. ISBN 978-9-897-58002-4. (Cité aux pages [62](#), [64](#), [76](#), [80](#), [81](#), [89](#), et [250](#).)

- [[Nicosevici et Garcia, 2008](#)] Tudor **Nicosevici** et Rafael **Garcia** : Online Robust 3D Mapping Using Structure from Motion Cues. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–7, Kobe, Japon, avril 2008. ISBN 978-1-424-42125-1. (Cité aux pages [62](#), [68](#), [76](#), [79](#), [81](#), [85](#), [87](#), [90](#), et [251](#).)
- [[O'Byrne et al., 2015](#)] Michael **O'Byrne**, Bidisha **Ghosh**, Franck **Schoefs** et Vikram **Pakrashi** : Protocols for Image Processing Based Underwater Inspection of Infrastructure Elements. *Dans International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS)*, volume 628, page 012130, Gand, Belgique, août 2015. (Cité aux pages [62](#), [72](#), [76](#), [79](#), [81](#), [89](#), et [251](#).)
- [[O'Byrne et al., 2014](#)] Michael **O'Byrne**, Vikram **Pakrashi**, Franck **Schoefs** et Bidisha **Ghosh** : A Comparison of Image Based 3D Recovery Methods for Underwater Inspections. *Dans European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*, Nantes, France, juillet 2014. (Cité aux pages [64](#), [65](#), et [251](#).)
- [[Olson et al., 2013](#)] Edwin **Olson**, Johannes **Strom**, Rob **Goeddel**, Ryan **Morton**, Pradeep **Ranganathan** et Andrew **Richardson** : Exploration and Mapping with Autonomous Robot Teams. *Communications of the ACM (CACM)*, volume 56, numéro 3, pages : 62–70, 2013. ISSN 0001-0782. (Cité aux pages [39](#) et [251](#).)
- [[ONF, 2013](#)] ONF : Diagnostic sanitaire et de tenue biomécanique - Commune de Colomiers. Rapport, Office National des Forêts (ONF), 2013. (Cité aux pages [48](#) et [251](#).)
- [[OpenCV](#)] **OpenCV** : Bibliothèque de vision par ordinateur open-source. URL <http://http://opencv.org/>. (Cité aux pages [98](#), [107](#), [110](#), [112](#), [114](#), [132](#), [133](#), et [251](#).)
- [[Papadopoulos et al., 2011](#)] Georgios **Papadopoulos**, Hanna **Kurniawati**, Ahmed Shafeeq Bin Mohd **Shariff**, Liang Jie **Wong** et Nicholas M. **Patrikalakis** : 3D-Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures Using an Autonomous Surface Vehicle. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3551–3557, San Francisco, États-Unis, septembre 2011. ISBN 978-1-612-84454-1. (Cité aux pages [161](#) et [251](#).)
- [[Parunak et al., 2003](#)] Henry Van Dyke **Parunak**, Sven A. **Brueckner** et James J. **Odell** : Swarming Coordination of Multiple UAV's for Collaborative Sensing. *Dans Technical Conference, Workshop and Exhibit AIAA Unmanned Unlimited (UU)*, San Diego, États-Unis, septembre 2003. ISBN 978-1-624-10094-9. (Cité aux pages [15](#) et [251](#).)
- [[Paull et al., 2014](#)] Liam **Paull**, Saeed **Saeedi**, Mae **Seto** et Huaqing **Li** : AUV Navigation and Localization : A Review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering (JOE)*, volume 39, numéro 1, pages : 131–149, 2014. ISSN 0364-9059. (Cité aux pages [84](#) et [251](#).)
- [[Payne, 2006](#)] Craig M. **Payne** : *Principles of Naval Weapon Systems*. Naval Institute Press, 2006. ISBN 978-1-591-14667-4. Chapitre 9 – Principles of underwater sound, section 3 – Speed of sound in the sea, page 159. (Cité aux pages [21](#) et [251](#).)
- [[Pelevin et Rostovtseva, 2001](#)] Vadim N. **Pelevin** et Vera V. **Rostovtseva** : Modelling of Bio-Optical Parameters of Open Waters. *Oceanologia*, volume 43, numéro 4, pages : 469–477, 2001. ISSN 0078-3234. (Cité aux pages [26](#) et [251](#).)
- [[Penney et al., 2007](#)] David **Penney**, Manuel **Dierick**, Veerle **Cnudde**, Bert **Masschaele**, Jelle **Vlassenbroeck**, Luc **Van Hoorebeke** et Patric **Jacobs** : First Fossil Micropholcommatidae (Araneae), Imaged in Eocene Paris Amber Using X-Ray Computed Tomography. *Zootaxa*, volume 1623, numéro -, pages : 47–53, 2007. ISSN 1175-5326. (Cité aux pages [47](#) et [251](#).)
- [[Pessel et al., 2003](#)] Nathalie **Pessel**, Jan **Opderbecke** et Marie-José **Aldon** : Camera Self-Calibration in Underwater Environment. *Dans International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pages 104–110, Plzeň, République Tchèque, février 2003. ISBN 809-03100-1-X. (Cité aux pages [65](#), [72](#), [73](#), [107](#), et [251](#).)

- [Petillot *et al.*, 2008] Yvan **Petillot**, Joaquim **Salvi** et Elisabet **Batlle** : 3D Large-Scale Seabed Reconstruction for UUV Simultaneous Localization and Mapping. *Dans IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV)*, Killaloe, Irlande, avril 2008. (Cité aux pages 64, 65, 66, 86, et 252.)
- [Petitpas, 2011] Benoît **Petitpas** : *Extraction de Paramètres Bio-Géo-Physiques de Surfaces 3D Reconstituées par Multi-Stéré-Restitution d'Images Prises Sans Contraintes*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est Marne-La-Vallée, France, 2011. (Cité aux pages 54, 161, et 252.)
- [PhotoScan] **PhotoScan** : Logiciel de photogrammétrie développé par Agisoft. URL <http://www.agisoft.com/>. (Cité aux pages 156, 157, et 252.)
- [Picavet, 1912] Pierre Louis **Picavet** : Photographie Aérienne : Suspension Pendulaire Elliptique. *La Revue du Cerf-Volant*, volume 1, numéro 8, 1912. (Cité aux pages 36 et 252.)
- [Pierrot-Deseilligny, 2014] Marc **Pierrot-Deseilligny** : *Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell*. Manuel, IGN, 2014. (Cité aux pages 64, 156, 157, et 252.)
- [Pizarro *et al.*, 2004] Oscar **Pizarro**, Ryan **Eustice** et Hanumant **Singh** : Large Area 3D Reconstructions from Underwater Surveys. *Dans IEEE OCEANS Conference*, volume 2, pages 678–687, Kobe, Japon, novembre 2004. ISBN 0-780-38669-8. (Cité aux pages 64, 65, 76, 79, 84, 85, 86, 87, 90, 131, et 252.)
- [Point Cloud Library (PCL)] **Point Cloud Library (PCL)** : Bibliothèque pour le traitement des images et des nuages de points (2D-3D). URL <http://pointclouds.org/>. (Cité aux pages 133 et 252.)
- [Polidori, 1995-2001] Laurent **Polidori** : Introduction à la télédétection spatiale. Cours, École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT), 1995-2001. (Cité aux pages 35 et 252.)
- [Prabhakar et Kumar, 2012] C. J. **Prabhakar** et P. U. Praveen **Kumar** : 3D Surface Reconstruction of Underwater Objects. *Dans National Conference on Advanced Computing and Communications (NCACC)*, pages 31–37, Shirpur, Inde, avril 2012. ISBN 973-9-380-86984-1. (Cité aux pages 62, 64, 66, 72, 81, et 252.)
- [Privat, 2002] Gilles **Privat** : Les Objets Communicants : Nouvelle Frontière des Télécommunications ? *Revue de l'Électricité et de l'Électronique (REE)*, volume 1, numéro 8, pages : 75–81, 2002. ISSN 1265-6534. (Cité aux pages 162 et 252.)
- [Pudelko *et al.*, 2012] Rafal **Pudelko**, Tomasz **Stuczynski** et Magdalena **Borzecka-Walker** : The Suitability of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for the Evaluation of Experimental Fields and Crops. *Žemdirbystė=Agriculture*, volume 99, numéro 4, pages : 431–436, 2012. ISSN 1392-3196. (Cité aux pages 38 et 252.)
- [Quan et Lan, 1999] Long **Quan** et Zhongdan **Lan** : Linear N-Point Camera Pose Determination. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 21, numéro 8, pages : 774–780, 1999. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages 85 et 252.)
- [Ramalingam, 2006] Srikumar **Ramalingam** : *Generic Imaging Models : Calibration and 3D Reconstruction Algorithms*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France, 2006. (Cité aux pages 70 et 252.)
- [ReCap360] **ReCap360** : Logiciel de photogrammétrie développé par Autodesk. URL <https://recap360.autodesk.com/>. (Cité aux pages 156, 157, et 252.)
- [Rende *et al.*, 2015] Sante Francesco **Rende**, Andrew D. **Irving**, Antonio **Lagudi**, Fabio **Bruno**, Simone **Scalise**, Piero **Cappa**, Monica **Montefalcone**, Tiziano **Bacci**, Marina **Penna**, Benedetta **Trabucco**, Rossella **Di Mento** et Anna Maria **Cicero** : Pilot Application of 3D Underwater Imaging Techniques for Mapping Posidonia

- Oceanica (L.) Delile Meadows. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 1, numéro -, pages : 177–181, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 62, 65, 66, 72, 75, 76, 80, 81, 84, 86, 90, 91, et 252.)
- [Rey Otero et Delbracio, 2014] Ives **Rey Otero** et Mauricio **Delbracio** : Anatomy of the SIFT Method. *Image Processing On Line*, volume 4, numéro -, pages : 370–396, 2014. URL <http://dx.doi.org/10.5201/ipo1.2014.82>. (Cité aux pages 96 et 253.)
- [Rinaudo et al., 2012] Fulvio **Rinaudo**, Filiberto **Chiabrando**, Andrea Maria **Lingua** et Antonia Teresa **Spanò** : Archaeological Site Monitoring : UAV Photogrammetry Can Be an Answer. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 39, numéro B5, pages : 583–588, 2012. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 38 et 253.)
- [Rives et al., 1978] Claude **Rives**, **Chenz** et Christian **Pétron** : *La prise de vue sous-marine*. Fillipacchi, 1978. ISBN B003WVVHTC. (Cité aux pages 19, 26, 28, 54, 73, 163, et 253.)
- [Robertson-Brown, 2013] Nick **Robertson-Brown** : *Underwater Photography : Art and Techniques*. The Crowood Press, 2013. ISBN 978-1-847-97657-4. (Cité aux pages 163 et 253.)
- [Rothermel et al., 2014] Mathias **Rothermel**, Norbert **Haala** et Dieter **Fritsch** : Generating Oriented Pointsets from Redundant Depth Maps using Restricted Quadrees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume XL-3, numéro -, pages : 281–287, 2014. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 90 et 253.)
- [Rubin et al., 2011] Stephen **Rubin**, Ian **Miller**, Nancy **Elder**, Reg **Reisenbichler**, Jeffrey **Duda**, Rob **Pedersen**, Mike **McHenry** et Matt **Beirne** : Scuba Surveys to Assess Effects of Elwha Dam Removal on Shallow, Subtidal Benthic Communities. *Dans Elwha River Science Symposium*, pages 41–43, Washington, États-Unis, septembre 2011. (Cité aux pages 81, 82, et 253.)
- [Rudnick et al., 2004] Daniel L. **Rudnick**, Russ E. **Davis**, Charles C. **Eriksen**, David M. **Fratantoni** et Mary Jane **Perry** : Underwater Gliders for Ocean Research. *Marine Technology Society Journal (MTS)*, volume 38, numéro 2, pages : 73–84, 2004. ISSN 0025-3324. (Cité aux pages 40 et 253.)
- [Rusu et Cousins, 2011] Radu Bogdan **Rusu** et Steve **Cousins** : 3D is Here : Point Cloud Library (PCL). *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1–4, Shanghai, Chine, mai 2011. ISBN 978-1-612-84386-5. (Cité aux pages 133 et 253.)
- [Sagala et Bambang, 2011] Faisal **Sagala** et Riyanto T. **Bambang** : Development of Sea Glider Autonomous Underwater Vehicle Platform for Marine Exploration and Monitoring. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS)*, volume 40, numéro 2, pages : 287, 2011. ISSN 0379-5136. (Cité aux pages 40 et 253.)
- [Sallee et Meier, 2010] Jeff **Sallee** et Lesley R. **Meier** : Kite Aerial Photography as a Tool for Remote Sensing. *Journal of Extension (JOE)*, volume 48, numéro 3, 2010. ISSN 1077-5315. (Cité aux pages 38 et 253.)
- [Sanfourche et al., 2013] Martial **Sanfourche**, Vincent **Vittori** et Guy **Le Besnerais** : eVO : a Realtime Embedded Stereo Odometry for MAV Applications. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2107–2114, Tokyo, Japan, novembre 2013. ISBN 978-1-467-36356-3. (Cité aux pages 120, 161, et 253.)
- [Santana-Garcon et al., 2014] Julia **Santana-Garcon**, Stephen J. **Newman** et Euan S. **Harvey** : Development and validation of a mid-water baited stereo-video technique for investigating pelagic fish assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, volume 452, numéro -, pages : 82–90, 2014. ISSN 0022-0981. (Cité aux pages 152 et 253.)

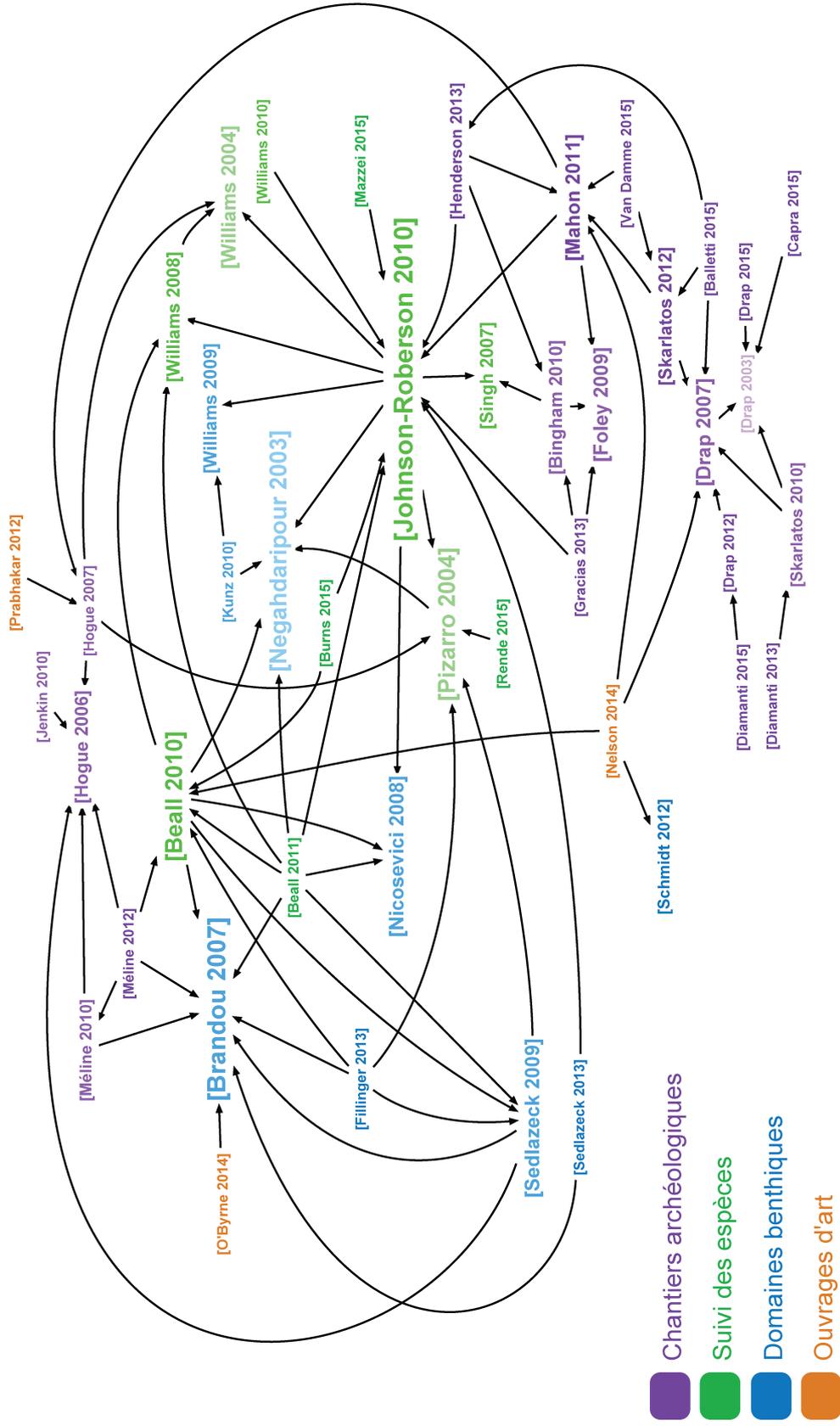
- [Schmidt et Rzhanov, 2012] Val E. **Schmidt** et Yuri **Rzhanov** : Measurement of Micro-Bathymetry with a GOPRO Underwater Stereo Camera Pair. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–6, Virginia Beach, États-Unis, octobre 2012. ISBN 978-1-467-30829-8. (Cité aux pages 64, 65, 70, 80, 81, et 254.)
- [Sedlazeck et Koch, 2011] Anne **Sedlazeck** et Reinhard **Koch** : Calibration of Housing Parameters for Underwater Stereo-Camera Rigs. *Dans British Machine Vision Conference (BMVC)*, pages 1–11, Dundee, Écosse, août-septembre 2011. ISBN 1-901-72543-X. (Cité aux pages 70 et 254.)
- [Sedlazeck et Koch, 2012] Anne **Sedlazeck** et Reinhard **Koch** : Perspective and Non-Perspective Camera Models in Underwater Imaging – Overview and Error Analysis. *Dans Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis*, pages 212–242. Springer, 2012. (Cité aux pages 70, 71, 73, et 254.)
- [Sedlazeck et al., 2009] Anne **Sedlazeck**, Kevin **Köser** et Reinhard **Koch** : 3D Reconstruction Based on Underwater Video from ROV Kiel 6000 Considering Underwater Imaging Conditions. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–10, Brême, Allemagne, mai 2009. ISBN 978-1-424-42522-8. (Cité aux pages 40, 64, 65, 67, 76, 79, 81, 85, 89, et 254.)
- [Seiler et al., 2012] Jan **Seiler**, Alan **Williams** et Neville **Barrett** : Assessing Size, Abundance and Habitat Preferences of the Ocean Perch *Helicolenus Percoides* Using a AUV-Borne Stereo Camera System. *Fisheries Research*, volume 129, numéro -, pages : 64–72, 2012. ISSN 0165-7836. (Cité aux pages 152 et 254.)
- [Servos et al., 2013] James **Servos**, Michael **Smart** et Steven Lake **Waslander** : Underwater Stereo SLAM with Refraction Correction. *Dans IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3350–3355, Tokyo, Japon, novembre 2013. ISBN 978-1-467-36356-3. (Cité aux pages 64, 65, 70, 71, 79, 85, 107, et 254.)
- [Shaw et al., 2012] Joseph A. **Shaw**, Paul W. **Nugent**, Nathan A. **Kaufman**, Nathan J. **Pust**, Devin **Mikes**, Cassie **Knierim**, Nathan **Faulconer**, Randal M. **Larimer**, Angela C. **DesJardins** et W. Berk **Knighon** : Multispectral Imaging Systems on Tethered Balloons for Optical Remote Sensing Education and Research. *Journal of Applied Remote Sensing (JARS)*, volume 6, numéro 1, 2012. ISSN 1931-3195. (Cité aux pages 37 et 254.)
- [Shi et Tomasi, 1994] Jianbo **Shi** et Carlo **Tomasi** : Good Features to Track. *Dans IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 593–600, Seattle, États-Unis, juin 1994. ISBN 0-818-65825-8. (Cité aux pages 65 et 254.)
- [Shkurti et al., 2011] Florian **Shkurti**, Ioannis **Rekleitis** et Gregory **Dudek** : Feature Tracking Evaluation for Pose Estimation in Underwater Environments. *Dans Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, pages 160–167, Saint-Jean de Terre-Neuve, Canada, mai 2011. ISBN 978-0-769-54362-8. (Cité aux pages 64, 75, 76, 79, 81, 84, 86, 90, et 254.)
- [Shortis, 2015] Mark **Shortis** : Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems. *Sensors*, volume 15, numéro 12, pages : 30810–30826, 2015. ISSN 1424-8220. (Cité aux pages 152 et 254.)
- [Siegel, 2001] Mel **Siegel** : Smart Sensors and Small Robots. *Dans IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, volume 1, pages 303–308, Budapest, Hongrie, mai 2001. ISBN 0-780-36646-8. (Cité aux pages 162 et 254.)
- [Sigloch et al., 2008] Karin **Sigloch**, Nadine **McQuarrie** et Guust **Nolet** : Two-Stage Subduction History Under North America Inferred from Multiple-Frequency Tomography. *Nature Geoscience*, volume 1, numéro 7, 2008. ISSN 1752-0894. (Cité aux pages 47 et 254.)
- [Singh et al., 2007] Hanumant **Singh**, Chris **Roman**, Oscar **Pizarro**, Ryan **Eustice** et Ali **Can** : Towards High-Resolution Imaging from Underwater Vehicles. *The International Journal of Robotics Research (IJRR)*, volume 26, numéro 1, pages : 55–74, 2007. ISSN 0278-3649. (Cité aux pages 66, 85, 86, 87, et 254.)

- [Skarlatos *et al.*, 2012] Dimitrios **Skarlatos**, Stella **Demestiha** et Stavroula **Kiparissi** : An ‘open’ method for 3D modelling and mapping in underwater archaeological sites. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, volume 1, numéro 1, pages : 1–24, 2012. ISSN 2047-4970. (Cité aux pages 62, 63, 64, 65, 69, 76, 81, 84, 86, 87, 90, et 255.)
- [Skarlatos et Rova, 2010] Dimitrios **Skarlatos** et Margarita **Rova** : Photogrammetric Approaches for the Archaeological Mapping of the Mazotos Shipwreck. *Dans International Conference on Science and Technology In Archaeology and Conservation (STIAC)*, Pétra, Jordanie, décembre 2010. (Cité aux pages 66, 71, 73, 78, 126, et 255.)
- [Sliwka *et al.*, 2011] Jan **Sliwka**, Fabrice **Le Bars**, Olivier **Reynet** et Luc **Jaulin** : Using interval methods in the context of robust localization of underwater robots. *Dans Annual Conference of the North American Fuzzy Information processing Society (NAFIPS)*, pages 1–6, El Paso, États-Unis, mars 2011. ISBN 978-1-612-84968-3. (Cité aux pages 137 et 255.)
- [Smith et Sandwell, 2003] Walter H. F. **Smith** et David T. Sandwell **Sandwell** : Conventional Bathymetry, Bathymetry from Space, and Geodetic Altimetry. *Oceanography*, volume 17, numéro 1, pages : 8–23, 2003. ISSN 1042-8275. (Cité aux pages 34 et 255.)
- [Stipanov *et al.*, 2008] Marin **Stipanov**, Vedran **Bakarić** et Zdravko **Eškinja** : ROV Use for Cave Mapping and Modeling. *Dans IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV)*, pages 208–211, Porto, Portugal, avril 2008. ISBN 978-3-902-66135-7. (Cité aux pages 40 et 255.)
- [Strecha *et al.*, 2003] Christoph **Strecha**, Tinne **Tuytelaars** et Luc **Van Gool** : Dense Matching of Multiple Wide-Baseline views. *Dans IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 1194–1201, Nice, France, octobre 2003. ISBN 0-769-51950-4. (Cité aux pages 59 et 255.)
- [Swirski *et al.*, 2010] Yohay **Swirski**, Yoav Y. **Schechner**, Ben **Herzberg** et Shahriar **Negahdaripour** : Underwater Stereo Using Natural Flickering Illumination. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–7, Seattle, États-Unis, septembre 2010. ISBN 978-1-424-44332-1. (Cité aux pages 66, 76, 79, 81, et 255.)
- [Szeliski, 2010] Richard **Szeliski** : *Computer Vision : Algorithms and Applications*. Springer, 2010. ISBN 978-1-848-82934-3. (Cité aux pages 58 et 255.)
- [Tang *et al.*, 2002] Li **Tang**, Chengke **Wu** et Zezhi **Chen** : Image Dense Matching Based on Region Growth with Adaptive Window. *Pattern Recognition Letters*, volume 23, numéro 10, pages : 1169–1178, 2002. ISSN 0167-8655. (Cité aux pages 59 et 255.)
- [Theberge, 1989] Albert E. **Theberge** : Sounding Pole to Sea Beam. *Dans ASPRS/ACSM Annual Convention*, volume 5, pages 334–346, Baltimore, États-Unis, avril 1989. ISBN 978-0-944-42624-1. (Cité aux pages 49 et 255.)
- [Thrun *et al.*, 2004] Sebastian **Thrun**, Scott **Thayer**, William **Whittaker**, Christopher **Baker**, Wolfram **Burgard**, David **Ferguson**, Dirk **Hähnel**, Michael **Montemerlo**, Aaron **Morris**, Zachary **Omohundro**, Charlie **Reverte** et Warren **Whittaker** : Autonomous Exploration and Mapping of Abandoned Mines. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, volume 11, numéro 4, pages : 79–91, 2004. ISSN 1070-9932. (Cité aux pages 39 et 255.)
- [Torrallba, 2009] Antonio **Torrallba** : How Many Pixels Make an Image? *Visual neuroscience*, volume 26, numéro 1, pages : 123–131, 2009. ISSN 0952-5238. (Cité aux pages 41 et 255.)
- [Treibitz *et al.*, 2012] Tali **Treibitz**, Yoav Y. **Schechner**, Clayton **Kunz** et Hanumant **Singh** : Flat Refractive Geometry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 34, numéro 1, pages : 51–65, 2012. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages 69, 70, 71, 73, et 255.)

- [[Tyack et Clark, 2000](#)] Peter L. **Tyack** et Christopher W. **Clark** : Communication and Acoustic Behavior of Dolphins and Whales. *Dans Hearing by Whales and Dolphins*, pages 156–224. Springer New York, 2000. ISBN 978-1-461-21150-1. (Cité aux pages [22](#) et [256](#).)
- [[Udin et Ahmad, 2012](#)] Wani Sofia **Udin** et Anuar **Ahmad** : Large Scale Mapping Using Digital Aerial Imagery of Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Scientific & Engineering Research (IJSER)*, volume 3, numéro 11, pages : 1–6, 2012. ISSN 2229-5518. (Cité aux pages [38](#) et [256](#).)
- [[Umeyama, 1991](#)] Shinji **Umeyama** : Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 13, numéro 4, pages : 376–380, 1991. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages [85](#), [129](#), et [256](#).)
- [[Van Damme, 2015](#)] Thomas **Van Damme** : Computer Vision Photogrammetry for Underwater Archaeological Site Recording in a Low-Visibility Environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 1, numéro -, pages : 231–238, 2015. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages [64](#), [76](#), et [256](#).)
- [[VanMiddlesworth et al., 2015](#)] Mark **VanMiddlesworth**, Michael **Kaess**, Franz **Hover** et John J. **Leonard** : Mapping 3D Underwater Environments with Smoothed Submaps. *Dans Field and Service Robotics (FSR)*, pages 17–30, Toronto, Canada, juin 2015. ISBN 978-3-319-07488-7. (Cité aux pages [86](#) et [256](#).)
- [[Walters et al., 2013](#)] Patrick **Walters**, Nathan **Sauder**, Matt **Thompson**, Forrest **Voight**, Andy **Gray** et Eric M. **Schwarz** : SubjuGator 2013. Competition paper AUVSI/ONR, University of Florida, 2013. (Cité aux pages [120](#) et [256](#).)
- [[Warren et al., 2007](#)] Daniel J. **Warren**, Robert A. **Church**, Kimberly L. **Eslinger** et C&C **Technologies** : Deepwater Archaeology with Autonomous Underwater Vehicle Technology. *Dans Offshore Technology Conference (OTC)*, pages 1329–1339, Houston, États-Unis, avril-mai 2007. ISBN 978-1-604-23146-5. (Cité aux pages [15](#) et [256](#).)
- [[Wilkinson et al., 2011](#)] Clare **Wilkinson**, Karen **Bultitude** et Emily **Dawson** : “Oh Yes, Robots ! People Like Robots ; the Robot People Should Do Something” : Perspectives and Prospects in Public Engagement with Robotics. *Science Communication*, volume 33, numéro 3, pages : 367–397, 2011. ISSN 1075-5470. (Cité aux pages [162](#) et [256](#).)
- [[Williams et Mahon, 2004](#)] Stefan B. **Williams** et Ian **Mahon** : Simultaneous Localisation and Mapping on the Great Barrier Reef. *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 1771–1776, La Nouvelle-Orléans, États-Unis, avril-mai 2004. ISBN 0-780-38232-3. (Cité aux pages [76](#) et [256](#).)
- [[Williams et al., 2009](#)] Stefan B. **Williams**, Oscar R. **Pizarro**, Michael V. **Jakuba** et Neville **Barrett** : AUV Benthic Habitat Mapping in South Eastern Tasmania. *Dans International Conference on Field and Service Robotics (FSR)*, pages 275–284, Cambridge, États-Unis, juillet 2009. ISBN 978-3-642-13408-1. (Cité aux pages [40](#) et [256](#).)
- [[Williams et al., 2012](#)] Stefan B. **Williams**, Oscar R. **Pizarro**, Michael V. **Jakuba**, Craig R. **Johnson**, Neville S. **Barrett**, Russell C. **Babcock**, Gary **Kendrick**, Peter D. **Steinberg**, Andrew J. **Heyward**, Peter J. **Doherty**, Ian **Mahon**, Matthew **Johnson-Roberson**, Daniel **Steinberg** et Ariell **Friedman** : Monitoring of Benthic Reference Sites : Using an Autonomous Underwater Vehicle. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, volume 19, numéro 1, pages : 73–84, 2012. ISSN 1070-9932. (Cité aux pages [62](#) et [256](#).)
- [[Williams et al., 2010](#)] Stefan B. **Williams**, Oscar R. **Pizarro**, Michael V. **Jakuba**, Ian **Mahon**, Scott D. **Ling** et Craig R. **Johnson** : Repeated AUV Surveying of Urchin Barrens in North Eastern Tasmania. *Dans IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 293–299, Anchorage, États-Unis, mai 2010. ISBN 978-1-424-45038-1. (Cité aux pages [62](#), [81](#), [83](#), [86](#), [87](#), [90](#), [161](#), et [256](#).)

- [Williams *et al.*, 2008] Stefan B. Williams, Oscar R. Pizarro, Matthew Johnson-Roberson, Ian Mahon, Jody Webster, Robin Beaman et Tom Bridge : AUV-Assisted Surveying of Relic Reef Sites. *Dans IEEE OCEANS Conference*, pages 1–7, Québec, Canada, septembre 2008. ISBN 978-1-424-42619-5. (Cité aux pages 64 et 257.)
- [Woodward *et al.*, 1987-2007] David Woodward, John Brian Harley et G. Malcolm Lewis, éditeurs. *The History of Cartography*, volume I, II & III. University of Chicago Press, 1987-2007. ISBN vI : 978-0-226-31633-8, vII-t1 : 978-0-226-31635-2, vII-t2 : 978-0-226-31637-6, vII-t3 : 978-0-226-90728-4, vIII : 978-0-226-90732-1. (Cité aux pages 13 et 257.)
- [Woźniak et Pelevin, 1991] Bogdan Woźniak et Vadim N. Pelevin : Optical Classifications of the Seas in Relation to Phytoplankton Characteristics. *Oceanologia*, volume 31, numéro -, pages : 25–55, 1991. ISSN 0078-3234. (Cité aux pages 26 et 257.)
- [Wu, 2013] Changchang Wu : Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion. *Dans IEEE International Conference on 3D Vision (3DV)*, pages 127–134, Seattle, États-Unis, juillet 2013. ISBN 978-0-769-55067-1. (Cité aux pages 156, 157, et 257.)
- [Yamamuro *et al.*, 2002] Masumi Yamamuro, Kiyokazu Nishimura, Kiyoyuki Kishimoto, Ken Nozaki, Ken Kato, Akira Negishi, Kenji Otani, Hirofumi Shimizu, Takeshi Hayashibara, Motohiko Sano, Motoya Tamaki et Kouki Fukuoka : Mapping Tropical Seagrass Beds With an Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV). *Dans Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON)*, pages 177–181, Chiba, Japon, juillet 2002. (Cité aux pages 40 et 257.)
- [Zhang, 2008] Yongjun Zhang : Photogrammetric Processing of Low Altitude Image Sequences by Unmanned Airship. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)*, volume 37, numéro -, pages : 751–758, 2008. ISSN 1682-1750. (Cité aux pages 37 et 257.)
- [Zhang, 2000] Zhengyou Zhang : A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, volume 22, numéro 11, pages : 1330–1334, 2000. ISSN 0162-8828. (Cité aux pages 61, 71, 72, 105, 107, et 257.)

Carte bibliographique d'une sélection d'articles comptants parmi les plus représentatifs vis-à-vis de notre domaine d'étude : l'acquisition et la reconstruction de nuages de points 3D sous-marins



*„Wahre dich besser  
wahre dich Wanderer  
mit dem selber auch gehenden Weg“*

---

Bruchstücke, *Sonette an Orpheus* – Rainer Maria Rilke

*« Prends garde, ô voyageur, la route aussi, marche »*

---

Fragments, *Sonnets à Orphée* – Rainer Maria Rilke



## Acquisition et reconstruction de données 3D denses sous-marines en eau peu profonde par des robots d'exploration

**RÉSUMÉ :** Notre planète est pour l'essentiel recouverte par les mers et les océans, or notre connaissance des fonds marins est très inférieure à celle que nous possédons sur les terres émergées. Dans ce mémoire, nous cherchons à concevoir un système dédié à la cartographie thématique à grande échelle pour obtenir à la demande un nuage de points dense représentatif d'une scène sous-marine ou subaquatique par reconstruction tridimensionnelle. Le caractère complexe de ce type de système nous amène à privilégier une approche délibérément transversale.

Nous nous intéresserons en particulier aux problématiques posées par l'étude à l'échelle des individus de petites zones en eau peu profonde. Les premières concernent l'acquisition *in situ* efficace de couples stéréoscopiques avec une logistique adaptée à la taille des zones observées : nous proposons pour cela un microsystème agile, peu coûteux et suffisamment automatisé pour fournir des données reproductibles et comparables. Les secondes portent sur l'extraction fiable de l'information tridimensionnelle à partir des données acquises : nous exposons les algorithmes que nous avons élaborés pour prendre en compte les caractéristiques particulières du milieu aquatique (dynamisme, propagation difficile des ondes électromagnétiques, etc.). Nous abordons donc en détail dans ce mémoire les problèmes d'appariement dense, d'étalonnage, d'acquisition *in situ*, de recalage et de redondance des données rencontrés dans le milieu sous-marin.

**Mot-clefs :** *environnement sous-marin, microrobots d'exploration, nuage de points 3D dense, stéréoreconstruction, acquisition in situ*

## Acquisition and reconstruction of dense underwater 3D data by exploration robots in shallow water

### ABSTRACT:

Our planet is mostly covered by seas and oceans. However, our knowledge of the seabed is far more restricted than that of land surface. In this thesis, we seek to develop a system dedicated to precise thematic mapping to obtain a dense point cloud of an underwater area on demand by using three-dimensional reconstruction. The complex nature of this type of system leads us to favor a multidisciplinary approach.

We will examine in particular the issues raised by studying small shallow water areas on the scale of individual objects. The first problems concern the effective *in situ* acquisition of stereo pairs with logistics adapted to the sizes of the observed areas: for this, we propose an agile, affordable microsystem which is sufficiently automated to provide reproducible and comparable data. The second set of problems relates to the reliable extraction of three-dimensional information from the acquired data: we outline the algorithms we have developed to take into account the particular characteristics of the aquatic environment (such as its dynamics or its light absorption). We therefore discuss in detail the issues encountered in the underwater environment concerning dense matching, calibration, *in situ* acquisition, data registration and redundancy.

**Keywords:** *underwater environment, exploration microrobots, 3D dense point cloud, stereoreconstruction, in situ acquisition*

