Géométrie 3D des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau

Denis Feurer

▶ **To cite this version:**

Denis Feurer. Géométrie 3D des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Sciences de l'environnement. AgroParisTech; Université Laval, 2008. Français. NNT : . tel-00818380

HAL Id: tel-00818380
https://theses.hal.science/tel-00818380

Submitted on 25 Jul 2013

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.

DENIS FEURER

GÉOMÉTRIE 3D DES LITS DE RIVIÈRE PAR STÉRÉOPHOTOGRAMMÉTRIE À TRAVERS L'EAU

Thèse de doctorat en cotutelle présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec
dans le cadre du programme de doctorat en sciences géomatiques
pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

et

AGROPARISTECH
MONTPELLIER, FRANCE
pour l'obtention du grade de Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

2009

©denis feurer, 2009

Thèse

pour l'obtention des grades de

Docteur de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech)

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Eau

et

Philosophiae Doctor (Ph.D.)

Doctorat en Sciences Géomatiques - Université Laval

présentée et soutenue publiquement le 20 novembre 2008 par

Denis FEURER

Géométrie 3D des lits de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau

---

Membres du jury :

M. Pascal Allemand	Professeur, Université Lyon 1	Président du jury
M. Hervé Piégay	Professeur, CNRS	Rapporteur
M. Valery Gond	Professeur, CIRAD/Université Laval	Rapporteur
M. Brian Morse	Professeur, Université Laval	Examinateur
M. Christian Puech	Directeur de recherches, Cemagref	Directeur de thèse
M. Alain Viau	Professeur, Université Laval	Directeur de thèse
M. Yann Le Coarer	Ingénieur du GREF, Cemagref	Invité
M. André Paquier	Directeur de recherches, Cemagref	Invité

À mes parents

Avant-Propos

Ce document contient, chapitre 3, un article soumis à Progress in Physical Geography. Cet article a été rédigé et mis en forme par le premier auteur, Denis Feurer, et a bénéficié des conseils, relectures ainsi que d'un appui bibliographique des co-auteurs, Jean-Stéphane Bailly, Christian Puech, Yann Le Coarer et Alain A. Viau. Ces derniers ont fait partie intégrante du comité de suivi de la thèse.

Au moment du dépôt initial, l'article a été soumis à Progress in Physical Geography. La version soumise à la revue comporte quelques modifications de forme (principalement : numérotation des sous-parties, écriture des nombres) et a subit une légère contraction (synthèse du résumé et diminution du nombre de mots global) afin de respecter les contraintes du comité de rédaction.

Au moment du dépôt final, l'article est publié [Feurer et al., 2008].

Résumés

Résumé de la thèse

Les considérations environnementales occupent une place croissante dans l'opinion publique ainsi que dans les politiques nationales et internationales. Le cas de la rivière en est un exemple particulièrement frappant : au centre d'enjeux multiples et pour certains hautement stratégiques (énergie, irrigation), elle est le théâtre d'un conflit d'usages donnant lieu à l'établissement de compromis particulièrement fins pour la gestion de la ressource.

Dans les approches les plus courantes, la description de l'état et du fonctionnement d'un hydrosystème tel que celui de la rivière est effectuée par la mesure de variables physiques ou la mise en relation des variables d'intérêt avec les paramètres physiques quantifiables caractérisant le milieu (modèles hydrauliques, modèles hydrobiologiques). L'objectif de ce travail est donc de proposer une réponse à la question de la mesure de la géométrie de la rivière par télédétection.

On s'attache tout d'abord à décrire le contexte particulier de la rivière mentionné plus haut puis à effectuer un état de l'art faisant ressortir une lacune pour la restitution du relief immergé par stéréo à travers l'eau avec des moyens légers.

On propose ensuite une méthode complète d'acquisition d'images et de traitements permettant d'estimer le relief immergé de rivière. Le travail effectué repose sur la mise en oeuvre de moyens technologiques légers permettant une grande flexibilité pour l'acquisition des données. On se base sur les méthodes de stéréorestitution du relief, pour lesquelles on propose une adaptation au contexte spécifique de la photogrammétrie à travers l'eau. Enfin, on met en place des méthodes de correction des mesures brutes intégrant des contraintes a priori (cohérence hydraulique ; cohérence spatiale) pour la correction de l'effet de réfraction.

L'application de la méthode développée en conditions opérationnelles sur une rivière peu profonde à fond de galets montre que la mesure du relief immergé par stéréophotogrammétrie est possible, et permet une représentation de la topographie du lit d'une qualité compatible avec les modèles hydrobiologiques (modèles habitat-poisson). On a ainsi développé, testé, validé et determiné les conditions d'application d'une méthode de mesure de la géométrie de la rivière par télédétection originale et complémentaire des technologies existantes.

Résumé de l'article inséré dans le chapitre 3

Nous étudions l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des profondeurs en rivière, en commençant par une revue des méthodes existantes et en poursuivant par un travail complémentaire centré sur les eaux peu profondes et l'utilisation d'imagerie à très haute résolution spatiale.

Souvent, les techniques utilisées ont été développées en milieu marin et ensuite transposées aux rivières. Celles-ci sont soit actives (radar pénétrant, lidar), soit passives (stéréophotogrammétrie, modèles radiométriques). Si cette dernière technique est la plus fréquente dans la littérature, il existe une lacune en très haute résolution spatiale et utilisation de plates formes légères.

Nous proposons donc l'application des deux techniques passives (modèles radiométriques et stéréo) à partir de telles plates formes. Nous montrons que la mesure est possible en utilisant un filtrage spatial à environ un mètre pour la première méthode. Pour la deuxième méthode, la résolution doit être la plus fine possible afin de détecter les objets d'un fond de rivière hétérogène.

Remerciements

Il faut bien être pragmatique : cette thèse n'aurait pu voir le jour sans les financements du Cemagref, la demi-bourse ayant été complétée par les efforts des trois laboratoires de Montpellier (UMR 3S devenue UMR TETIS), d'Aix-en-provence (unité HYAX) et de Lyon (unité HHLY). Ces travaux ont aussi eu la chance de recevoir le soutien du laboratoire GAAP, de l'université Laval et de la faculté des études supérieures.

Le plus gros soutien scientifique, mais aussi éminemment humain m'est venu de mes deux directeurs de thèse, Christian Puech, et Alain Viau. Leur confiance, leur disponibilité, chacun de son côté de l'atlantique, ont permis de transformer une thèse franco-française en thèse en double-tutelle franco-québécoise, l'enrichissant ainsi du point de vue scientifique, humain, culturel, mais aussi administratif !

J'éprouve une profonde reconnaissance envers les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de mon travail et surtout pour leur disponibilité et leur flexibilité. Un remerciement particulier à Valéry Gond qui a eu un double travail en effectuant la première relecture de ma thèse avant le dépôt initial.

J'en viens tout naturellement à remercier les nombreuses personnes qui ont permis que les paperasses ne soient pas un frein à la recherche. Je pense aux directeurs successifs de l'UMR 3S, Sylvain Labbé, et de l'UMR TETIS, Pascal Kosuth, qui m'ont accueilli au sein de la Maison de la Télédétection. Merci à Alain Viau pour son accueil au sein du laboratoire GAAP à l'université Laval.
La liste des personnes qui ont huilé les rouages administratifs est longue, mais je me risque à en proposer un début : énorme merci du côté du vieux continent à Isabelle Altier, Françoise Boissier, Martine Rombaut, Paulette Robert, Françoise Mary, Françoise Launay, Alain Delacourt, Anne-Cécile Chartier ; du côté de Québec, Jean-Jacques Chevallier, Carmen Couture, Jacynthe Pouliot, Johanne Larouche, Ginette Guérard, Hélène Gagnon, Heidi Turcot.. Je suis d'autant plus triste à l'idée d'oublier quelqu'un dans cette liste que j'ai pu être heureux de voir que derrière une règle inflexible, on pouvait le plus souvent trouver un visage humain qui savait l'interpréter. Continuez à

transformer en machine humaine et souriante le rouleau compresseur de l'administration.

Merci à tous les scientifiques qui ont été mêlés de près ou de loin à mon travail pour leur sens du partage. Un grand merci à Yann Le Coarer et toute l'équipe d'HYAX pour m'avoir permis de bénéficier de leur énorme travail de terrain pour valider mes résultats sur la Durance. Merci à Jean-Stéphane Bailly pour sa disponibilité pour le co-encadrement de ma thèse. Merci à Christophe Delacourt pour ses conseils et sa confiance en début de thèse. Merci à Yves Egels pour m'avoir accueilli à l'ENSG. Merci à l'Avion Jaune pour les images de la Durance et bien d'autres choses.

Une thèse c'est aussi une expérience humaine très forte. Il m'est difficile de faire une liste des personnes qui y ont contribué, je pense en particulier à tous ceux qui font l'âme de la MTD : ils sont si nombreux ! Je pense à vous tous en écrivant ces remerciements, de vieux thésards aux petits nouveaux, des stagiaires passés, présents, au permanents, la grande majorité profondément humains. J'ai plus de facilités pour le petit nombre des habitants du GAAP que j'ai pu cotoyer : coucou à Bakary, Serge-Olivier, Josselin, Valéry, Richard, Guido.. Mes pensées se tournent finalement du côté de mes amis, de ma famille, et de mon épouse Tatiana.

Introduction générale

Les considérations environnementales, par nécessité ou par effet de mode, occupent une place croissante dans l'opinion publique ainsi que dans les politiques nationales et internationales.

Depuis l'adoption de la *directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2000, établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*, appelée plus couramment directive cadre sur l'eau ou DCE, la société européenne s'est donnée pour objectif à court terme la restauration ou la conservation d'un *bon potentiel écologique* de ses milieux aquatiques.

Dans le droit français, les lois sur l'eau, et notamment les lois récentes (loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 - transposition de la directive cadre européenne) ont donné un cadre législatif à cet objectif. Afin d'évaluer la réalisation de cet objectif, la société doit donc être capable de caractériser et de définir l'état écologique d'un milieu aquatique (zones humides, lacs, cours d'eau...).

Au Québec, le lancement de la Politique nationale de l'eau en 2002 a été l'aboutissement de cinq années de recherches, de consultations, de recommandations et de prises de position sur les enjeux, les orientations et les engagements à mettre en oeuvre en matière de gestion de l'eau. La mise en oeuvre de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant - réalisée en France par l'intermédiaire de structures telles que les syndicats mixtes d'aménagement ou les agences de l'eau - constitue un engagement majeur de cette politique.

Dans les approches les plus courantes, la description de l'état et du fonctionnement d'un écosystème (diversité, dynamiques des populations) est effectuée par la mise en relation de ces variables avec les paramètres physiques quantifiables qui caractérisent le milieu.

En hydrologie, le *problème de mesure* de ces paramètres physiques est un "classique". La nature même des variables concernées (pluie, débit) les rend difficilement mesurables. Le plus souvent, pour des raisons logistiques, les mesures sont effectuées sur des étendues spatiales restreintes, avec un plan d'échantillonnage insuffisant relativement à la variabilité des phénomènes concernés. La caractérisation d'un bassin versant ou d'un sous bassin versant est donc très grossière ou limitée à une zone d'intérêt de dimensions réduites représentative de l'ensemble.

En ce qui concerne la rivière, les mesures sont le plus souvent concentrées au niveaux de stations d'intérêt. Les mesures hydrauliques peuvent être effectuées par des stations de jaugeage fixes. La bathymétrie peut être acquise par sonar pour les rivières navigables. Cependant, dans le cas de la caractérisation des écosystèmes des rivières de faible profondeur (rivières régulées, rivières à saumon), la mise en oeuvre de mesures par sonar est délicate. Le problème lié à l'effort de terrain conduit le plus souvent à restreindre les études à de petites sections de la rivière, supposées représentatives de l'ensemble du tronçon, sur lesquelles sont concentrées les campagnes de terrain (pêches électriques, topographie, mesures de vitesse, caractérisation du substrat, granulométrie,...). Le problème de la représentativité de ces zones d'intérêt pose la question de la significativité des résultats obtenus.

Dans ce cadre, l'intérêt de techniques de mesure spatialisée, répétitive, sur de larges zones est incontestable. Les échelles de travail et les paramètres que l'on cherche à quantifier par télédétection sont très variés. La couverture végétale, le substrat, la vitesse de surface, la température, la charge sédimentaire, la profondeur, l'altitude de la surface de l'eau sont mesurées à l'échelle d'un chenal, d'une rivière ou d'un fleuve entier, en utilisant des technologies elles aussi très diverses, basées sur les propriétés du rayonnement visible, la propagation des ondes sonores, ou la rétrodiffusion des micro-ondes. Le potentiel de chaque technique de télédétection pour la mesure des paramètres physiques caractérisant la rivière doit donc être évalué en fonction des besoins thématiques.

L'objectif de ce travail est donc de proposer une réponse à la question de la mesure de la géométrie de la rivière par télédétection. En effet, les spécificités des méthodes mises en jeu, par exemple l'acquisition d'information spatiale, la répétitivité des acquisitions, permettent de penser qu'il existe une forte complémentarité entre la mesure de terrain et la mesure effectuée par télédétection.

Pour cela nous proposons un travail divisé en trois grandes parties. La première effectue une mise en contexte et présente en fonction de cette étude les objectifs autour

desquels la thèse est concentrée. La deuxième partie expose la méthode développée et les éléments de théorie utilisés dans le développement de cette méthode. Enfin, La troisième partie présente de manière concrète l'application opérationnelle de la méthode sur le terrain, la validation de ces résultats et leur discussion :

I Le premier chapitre expose le contexte de la multiplicité des usages et des acteurs entourant la rivière en s'appuyant sur un cas pédagogique qui concentre un grand nombre de problématiques. Le deuxième chapitre effectue le lien entre ces problématiques et le domaine de la télédétection en présentant les caractéristiques de l'étude des hydroécosystèmes en rivière. Le troisième chapitre présente un état de l'art des techniques de télédétection utilisées pour la mesure de la topographie et bathymétrie de rivière. Il s'agit d'un extrait d'une publication soumise en langue anglaise. Le quatrième chapitre décrit en quelques pages les objectifs de la thèse qui ont été déterminés suite à cette étude du contexte.

II La deuxième partie commence par une courte introduction visant à donner une vue analytique globale du problème de mesure du relief immergé par stéréo à travers l'eau avec des moyens légers. Le cinquième chapitre propose quelques éléments de photogrammétrie, ciblés sur les méthodes utilisées dans ce travail. Le sixième chapitre discute des spécificités de l'acquisition d'images par drone ou ULM, propose des recommandations et un protocole expérimental. Le septième chapitre étudie l'effet de la réfraction sur la restitution en stéréo à travers l'eau et la possibilité de la correction de cet effet. Le huitième chapitre présente une vue globale de la méthode développée et détaille la démarche de détermination de la position de l'interface air/eau par l'intégration de contraintes hydrauliques.

III La troisième partie est consacrée à l'application de la méthode développée. Elle s'ouvre sur une présentation détaillée des sites d'étude et des données utilisées dans la thèse. Le dixième chapitre effectue un bilan détaillé des résultats des différentes étapes de l'application de la méthode en conditions opérationnelles ainsi qu'une validation de ces résultats par comparaison avec des données de terrain indépendantes. Le onzième et dernier chapitre propose une discussion de ces résultats et expose les perspectives dégagées par ceux-ci.

À la suite de la conclusion générale, le lecteur pourra trouver une table des matières détaillée, la bibliographie complète de ce document, ainsi que des annexes.

Première partie

Mise en contexte

Plan de la Première partie

1 La rivière, centre d'enjeux multiples 7

1.1 Cas de la Durance - Situation et histoire . . . 8
1.2 Hydrologie . . . 9
1.2.1 Données naturelles . . . 10
1.2.2 Données actuelles . . . 10
1.2.3 Morphologie . . . 12
1.3 Biologie . . . 14
1.4 Les multiples usages de l'eau . . . 15
1.4.1 Agriculture : irrigation . . . 15
1.4.2 Production d'électricité . . . 17
1.4.3 Eau potable, eau industrielle et eau agricole . . . 17
1.4.4 Usages émergents . . . 17
1.4.4.a L'eau en tant que milieu . . . 17
1.4.4.b Usages touristiques et récréatifs . . . 18
1.5 Le risque d'inondation . . . 18
1.6 Synthèse - Enjeux - Site d'étude . . . 19

2 Une problématique : du poisson à l'image 21

2.1 Conflits d'usages et nouvelles problématiques en Durance . . . 22
2.2 Les modèles habitat/poisson . . . 23
2.2.1 Le concept d'hydrosignature . . . 24
2.2.1.a Calcul de l'hydrosignature . . . 25
2.2.1.b Intérêt et propriétés de l'hydrosignature . . . 26
2.2.2 Le modèle 5M7 . . . 27
2.3 Un besoin de mesure . . . 29
2.4 Apport de la télédétection . . . 31

2.4.1 Complémentarité des mesures 31
2.4.2 Le compromis entre couverture spatiale, échantillonnage, et précision de la mesure 32
2.4.3 Critères d'intérêt de la télédétection 33

3 Revue de littérature **36**

4 Objectif de la thèse **55**
Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière 56
... avec des moyens légers 57
... par stéréophotogrammétrie à travers l'eau 57

Chapitre 1

La rivière, centre d'enjeux multiples

La rivière est le théâtre d'un jeu d'acteurs complexe. S'appuyant le plus souvent sur l'unité hydrologique du *bassin versant*, la gestion de ce milieu intègre des usages aussi variés que contradictoires. Eau potable, prévention des risques, agriculture, industrie, ressource piscicole, conservation et restauration du milieu,... La liste des problématiques liées à la rivière n'est pas limitée à ces quelques exemples.

Parmi l'ensemble de celles-ci, les principales, d'un point de vue économique, sont probablement :

1. la prévention des risques. Le risque d'inondation est particulièrement présent dans les esprits en milieu méditérannéen, où des rivières telles que le Gardon (départements de la Lozère et du Gard, France) manifestent occasionnellement des dynamiques très violentes, alors que leur cours est tranquille la majeure partie de l'année. Ce risque important est lié à des intérêts économiques majeurs dans ces régions où l'activité économique est forte et la démographie galopante.
2. les usages agricoles et industriels. Ceux-ci font l'objet de compromis serrés pour les rivières régulées comme la Durance (région Provence-Alpes-Côte d'Azur et département de la Drôme, France) fortement équipées pour la production d'hydroélectricité. Cette production revêt de plus un aspect hautement stratégique dans la production nationale d'électricité. Elle permet notamment de répondre aux pics de consommation.
3. les usages commerciaux. Les activités économiques "secondaires" liées à la rivière sont en effet en pleine expansion et très variées : activités balnéaires et d'eau vive sur la Durance, pêche sportive dans les rivières à salmonidés comme la Rivière du Gouffre (Québec, Canada). Le chiffre d'affaire de cette dernière activité représente plus de 90 millions de dollars pour la seule région de la Capitale-Nationale

(troisième région de pêche) et dépasse le milliard de dollars à l'échelle du Québec [Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, 2004, p.6].

Le cas de la Durance présente l'avantage de concentrer une grande partie de ces enjeux : dans le passé, la Durance était crainte pour la violence de ces crues - de plus, la démographie est aujourd'hui en forte croissance dans cette vallée ; les activités agricoles et industrielles, notamment la production d'hydroéléctricité, constituent des postes économiques de premier plan ; enfin les usages récréatifs de l'eau sont aussi très présents, avec le sport en eaux vives et le tourisme autour du plan d'eau de Serre-Ponçon. On utilisera donc cette rivière comme support pour présenter le contexte expliquant le besoin de caractériser la géométrie 3D des rivières.

Cette rivière est fortement aménagée ; à l'origine afin de se protéger des effets des inondations et, plus récemment, pour la production d'énergie électrique ainsi que l'irrigation [Balland et al., 2002]. Par ailleurs, son patrimoine écologique en fait une région d'intérêt : la Durance constitue une ichthyorégion particulière au sein du bassin versant du Rhône [Changeux et Pont, 1995]. Elle présente des espèces typiques telles que l'apron (Zingel asper) ou le le barbeau méridional (Barbus meridionalis). L'ensemble de ces caractéristiques fait de cette rivière un site test idéal en ce qui concerne la problématique de l'optimisation des usages et en particulier des débits et régimes réservés[1].

1.1 Situation géographique et histoire de la Durance

La Durance est un affluent du Rhône dont la confluence se trouve en aval d'Avignon (84), à une vingtaine de mètres d'altitude. Elle prend sa source vers 2300 mètres d'altitude sur les pentes du sommet des Anges, entre le massif du Chenaillet et du Janus dans les Hautes-Alpes (05). Elle draine ainsi un bassin versant d'un peu plus de 14 000 km^2, situé en majeure partie en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (dont il occupe la moitié de la superficie) ainsi qu'en Drôme (figure 1.1) [SMAVD, 2008].

Historiquement, cette rivière était crainte pour la dureté de ses évènements extrêmes (crues et étiages). Elle a subi dès le XIIème siècle une dérivation de ses eaux, pour en utiliser la force motrice, ainsi que pour l'irrigation en deuxième usage [Balland et al., 2002]. Au XVIème siècle, d'autres aménagements ont eu lieu, conduisant à la première

[1] le débit minimal, fixé par les lois sur l'eau, est au moins égal au dixième du module ; il est fixé au quarantième pour les installations construites avant le 29 juin 1984. Les régimes reservés, possibilité offerte elle aussi par la loi sur l'eau, visent à faire varier le débit de manière saisonnière. Une expérimentation est actuellement en cours sur la Durance avec un débit égal au vingtième du module annuel en hiver et égal au quatorzième du module annuel en été.

FIG. 1.1 - *Situation géographique de la Durance en France. Données : IGN-BD CARTHAGE® et IGN-GéoFLA® Départements*

sortie des eaux de la Durance hors de son bassin versant, pour l'irrigation du bassin de la Crau. Au XIXème siècle des travaux de plus grande envergure ont été engagés afin de maîtriser les crues et de fertiliser les terres par apport de limons. [Rabotin, 2002]. Enfin, c'est au milieu du XXème siècle qu'ont été lancées les constructions des grands barrages tels que ceux du lac de Sainte-Croix (Var et Alpes-de-Haute-Provence) ou encore de Serre-Ponçon (Hautes-Alpes, Alpes-de-Haute-Provence), qui a longtemps été la plus grande retenue d'Europe par son volume, et qui est toujours le plus grand réservoir artificiel de France avec une contenance de $1,2$ milliards de mètres cubes [SMAVD, 2008].

1.2 Hydrologie

La Durance s'écoule sur un peu plus de 300 kilomètres, avec une dénivellation de plus de 2000 mètres. Cette forte différence d'altitude donne des cours d'eau très contrastés sur le bassin versant.

1.2.1 Données naturelles

Sans aménagement, le débit interannuel moyen à l'exutoire était d'environ $180 m^3.s^{-1}$, soit près de 6 milliards de mètres cubes drainés par la Durance sur une année [SMAVD, 2008].

Son régime est de type pluvio-nival méditerranéen avec d'une part, une influence nivale de la tête de bassin, caractérisée par des crues printanières et des étiages estivaux, et, d'autre part, une influence pluviale méditerranéenne avec des crues en hiver et des étiages en été, ainsi qu'une forte variabilité interannuelle. L'influence nivale est dominante et conduit à des mois de hautes eaux en avril mai juin et des mois de basses eaux en août et septembre. Les crues centennales ont un débit de $5000 m^3.s^{-1}$. Les étiages naturels les plus sévères n'ont jamais été inférieurs à $30 m^3.s^{-1}$ [SMAVD, 2008].

Les crues sont morphogènes pour des débits au niveau du pont de Mirabeau (Alpes-de-Haute-Provence) supérieurs à $100 m^3.s^{-1}$ [Juramy et Monfort, 1985], à partir desquels ont lieu des remaniements et des transports solides. Selon le débit, la morphologie de la rivière peut varier du chenal principal d'écoulement avec présence possible de petits chenaux secondaires (situation actuelle pour la moyenne Durance en débit reservé), au lit en tresses, jusqu'à un lit unique, chenaux noyés (au delà de $5000 m^3.s^{-1}$).

1.2.2 Données actuelles

Suite aux aménagements de la rivière, l'hydrologie de la Durance a été profondément modifiée à l'aval du barrage de Serre-Ponçon [Warner, 2000]. Ces modifications sont illustrées sur la figure 1.2 et les chroniques de débit actuelles sont présentées sur le diagramme 1.3. Hors événements ponctuels, le débit à la station de Bonpas (Vaucluse), située à une vingtaine de kilomètres de la confluence, est limité au débit réservé de $1/40^{eme}$ du module naturel, soit $4.7 m^3.s^{-1}$ [Rabotin, 2002]. Cette valeur est à comparer avec les étiages naturels les plus sévères ($30 m^3.s^{-1}$).

L'eau drainée par le bassin versant de la Durance circule à présent en majeure partie dans les canaux artificiels utilisés pour la production d'hydroélectricité, l'irrigation, et l'alimentation en eau de la basse Provence. L'exutoire principal de ces canaux qui suivent dans leur partie aval le trajet d'un ancien canal du Pléistocène [Juramy et Monfort, 1985] est l'étang de Berre, situé au sud du bassin versant naturel actuel de la Durance.

Les ouvrages hydrauliques ont pour effet de réduire les petites et moyennes crues

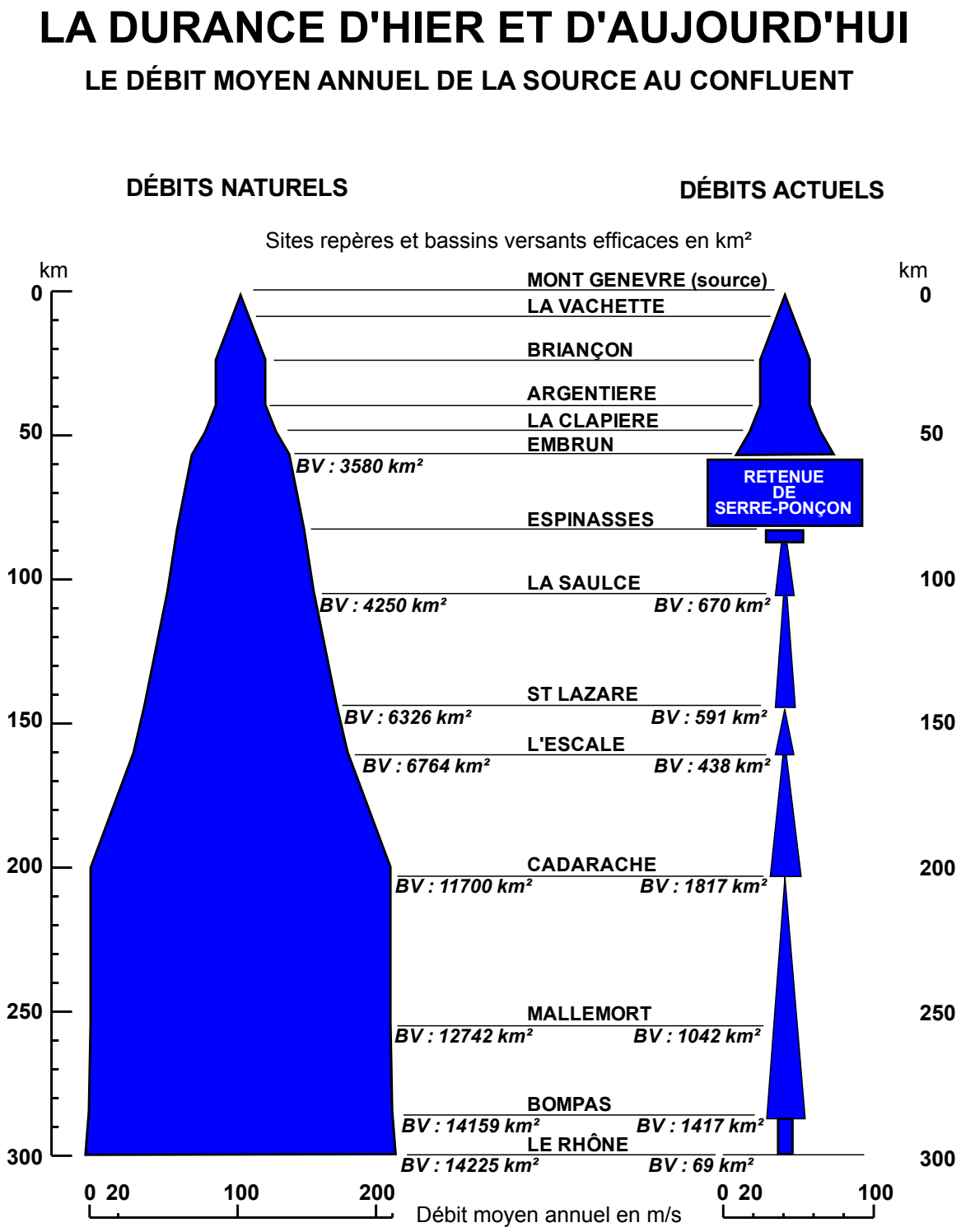


FIG. 1.2 - *Influence des ouvrages sur le débit observé dans le lit mineur (adapté de [Balland et al., 2002])*

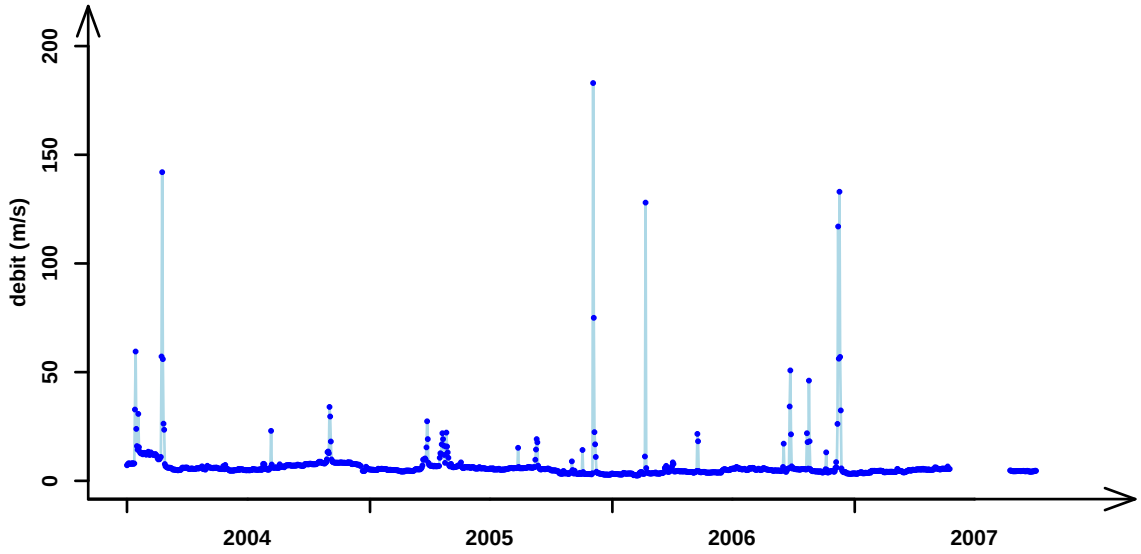


FIG. 1.3 - *Débits journaliers moyens sur la Durance à La Brillanne (Source : DIREN PACA/HYDRO-MEDD/DE [HYDRO, 2008])*

voire de les supprimer dans la partie haute du bassin versant. En revanche, les effets des plus fortes crues restent très sensibles, par exemple, la crue centennale à l'aval de Serre-Ponçon est de $1000m^3.s^{-1}$ au lieu de $1900m^3.s^{-1}$ avant aménagement [SMAVD, 2008]. Certaines crues de la partie moyenne du bassin versant peuvent conduire à des "lâchés" dans le lit naturel, une fois écrêtées du débit maximal de $250m^3.s^{-1}$ pouvant passer dans les canaux artificiels. Du fait de cette capacité d'absorption limitée des ouvrages, et de l'importante contribution des affluents, les fortes crues ont quasiment gardé leurs caractéristiques naturelles en aval du barrage de l'Escale.

1.2.3 Morphologie

Dans la partie haute du bassin versant, le tronçon[2] de Durance à l'amont du barrage de Serre-Ponçon et ses affluents sont des torrents de type alpins, et ont conservé pour la plupart leur morphologie naturelle.

A l'aval de Serre-Ponçon, plus précisément à l'aval de l'Escale, la Durance avait avant les années 1950 un lit en tresse à bras multiples fortement divaguant. La largeur du lit actif pouvait atteindre un kilomètre. Aujourd'hui, seule la partie située entre le

[2]on peut se référer à la figure 1.4 pour la définition de la sectorisation morphoécologique d'un cours d'eau

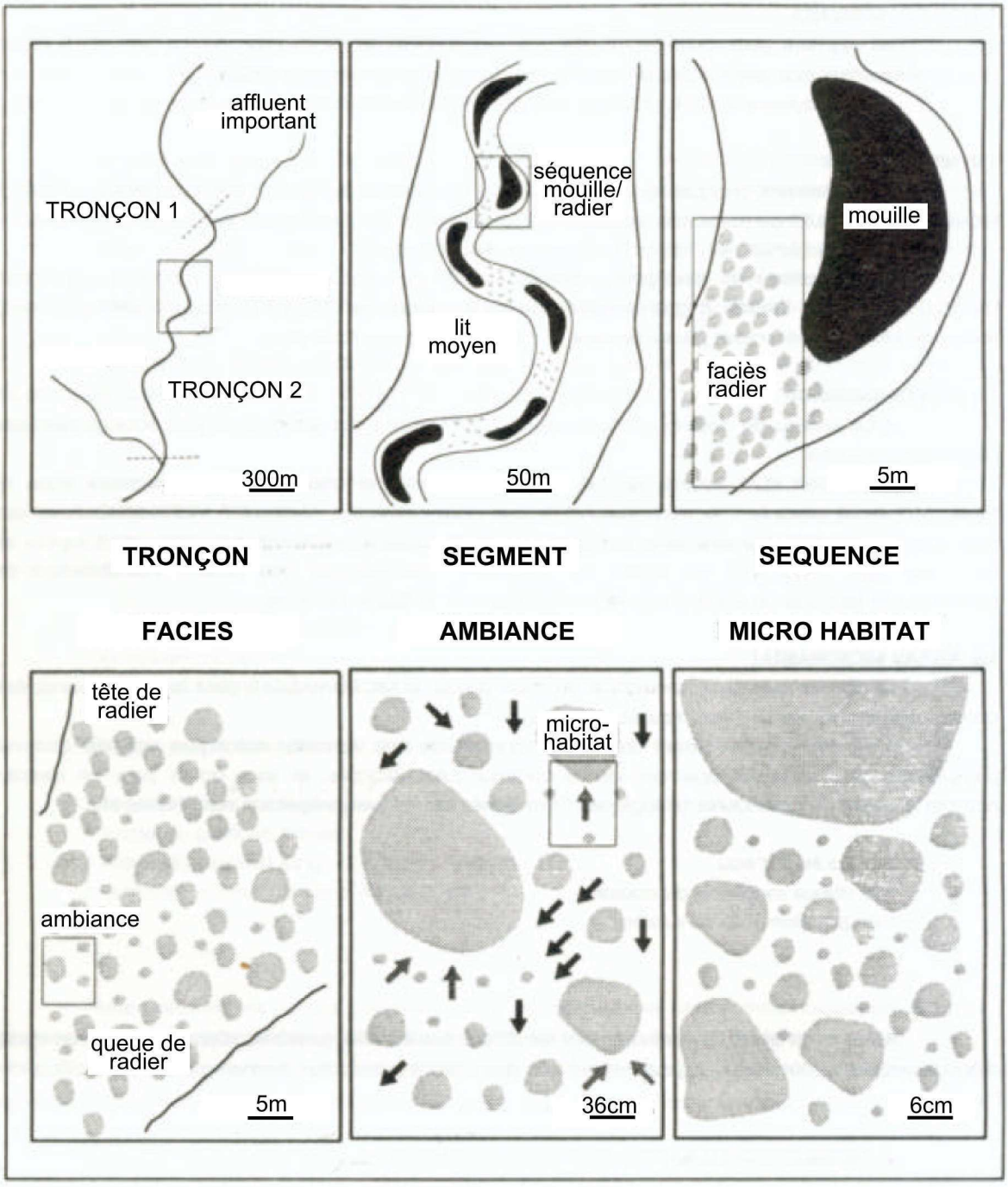


FIG. 1.4 - *Sectorisation morphoécologique d'un cours d'eau (extrait et adapté de [Malavoi, 1989])*

barrage de l'Escale et Cadarache conserve des apports naturels suffisants pour maintenir un tressage, mais sous une forme dégénérée : la végétation pousse sur les bancs émergés et l'on observe une tendance à la fixation du lit et à son encombrement, contre lequel des essartements (coupes des arbres et arbustes) sont régulièrement réalisés.

A l'aval de Cadarache les apports sont limités et le lit est peu mobile.

1.3 Biologie

Même s'il est difficile de définir un état écologique de référence, du fait des aménagements qui ont été réalisés très tôt sur la Durance, quelques études, notamment celle de Louis Léger en 1934 sur une partie du bassin versant permettent d'évaluer l'influence des ouvrages les plus récents [Rabotin, 2002].

Pour exemple, on reprend ici un texte publié par le Syndicat Mixte d'Aménagement de la Durance sur son site internet, où l'influence des ouvrages sur les espèces de poissons est discuté :

> "La faune de la Durance post-aménagement est désormais moins variée, moins abondante et ne contient pratiquement que des espèces peu exigeantes en terme d'habitat. [..] Les espèces les plus polluosensibles et les plus exigeantes en terme d'habitat sont devenues marginales. Seuls quelques rares secteurs hébergent encore une faune variée possédant des organismes sensibles à la pollution.
>
> 36 espèces ont été recensées au total [...] mais cette richesse apparente masque une représentation et une répartition inégale de ces espèces [...]. Le peuplement se caractérise par la faiblesse de la représentation de certaines espèces ou le caractère aléatoire de leur présence : truites, apron, bouvière, rotengle, loche de rivière... et par un déséquilibre marqué des peuplements en place dominés par quelques espèces de cyprinidés : chevesne, spirlin, blageon dans les zones courantes et brèmes au niveau des souilles.
>
> [...] La quasi permanence de faibles débits entraîne un cloisonnement longitudinal par insuffisance de la lame d'eau sur certaines têtes de radiers ; la concentration et l'exacerbation des pollutions et de leurs manifestations (proliférations algales) ; l'amplification de l'effet traumatisant des crues (variations hydrologiques plus brutales et présentant une amplitude plus forte).
>
> [...] Il est à noter que des opérations destinées à rétablir la continuité piscicole en aval du barrage de Mallemort ont été engagées depuis 2002 en anticipation du Contrat de Rivière du Val de Durance : aménagement de

passes à anguilles [...] et étude de franchissabilité des seuils [...]." [SMAVD, 2008]

On dispose de moins d'informations concernant la faune benthique. Cependant, l'étude de celle-ci devrait pouvoir fournir dans le futur une vision plus détaillée de l'impact des activités humaines sur les écosystèmes aquatiques. Il semble en effet possible de discriminer la part des différents facteurs humains sur la variation des écosystèmes par l'étude des macro-invertébrés [Charvet et al., 2000].

1.4 Les multiples usages de l'eau de la Durance

De part ses multiples usages, un jeu d'acteurs très complexe intervient sur la Durance, entre partenaires publics, privés, collectivités territoriales, associations. Des contraintes nouvelles, liées à la protection et à la remise en état des milieux imposées par les nouvelles lois nationales et européennes, sont apparues. Les données correspondant à tous ces usages, reportées dans les sections suivantes, sont en majeure partie extraites du rapport de la mission Balland conduite en 2001 [Balland et al., 2002]. La figure 1.5 donne une idée de l'équipement du bassin versant et des territoires voisins en retenues artificielles et canaux de dérivation.

1.4.1 Agriculture : irrigation

Le besoin d'irrigation de la Basse Durance, ainsi que, de l'autre côté des limites du bassin versant, la plaine de la Crau, a motivé la construction des premiers ouvrages déviant les eaux de la Durance. Aujourd'hui, ce sont près de 200 millions sur les $1,2$ milliards de mètres cubes des eaux de Serre-Ponçon et 250 millions de mètres cubes des eaux du Verdon qui sont alloués aux usages agricoles par convention entre EDF et le Ministère de l'Agriculture.

L'irrigation rendue possible par ces dispositifs, associée au climat favorable de la région, a permis de développer une agriculture dynamique (fruits et légumes, principalement). On estime le chiffre d'affaire annuel associé à 950 millions d'euros.

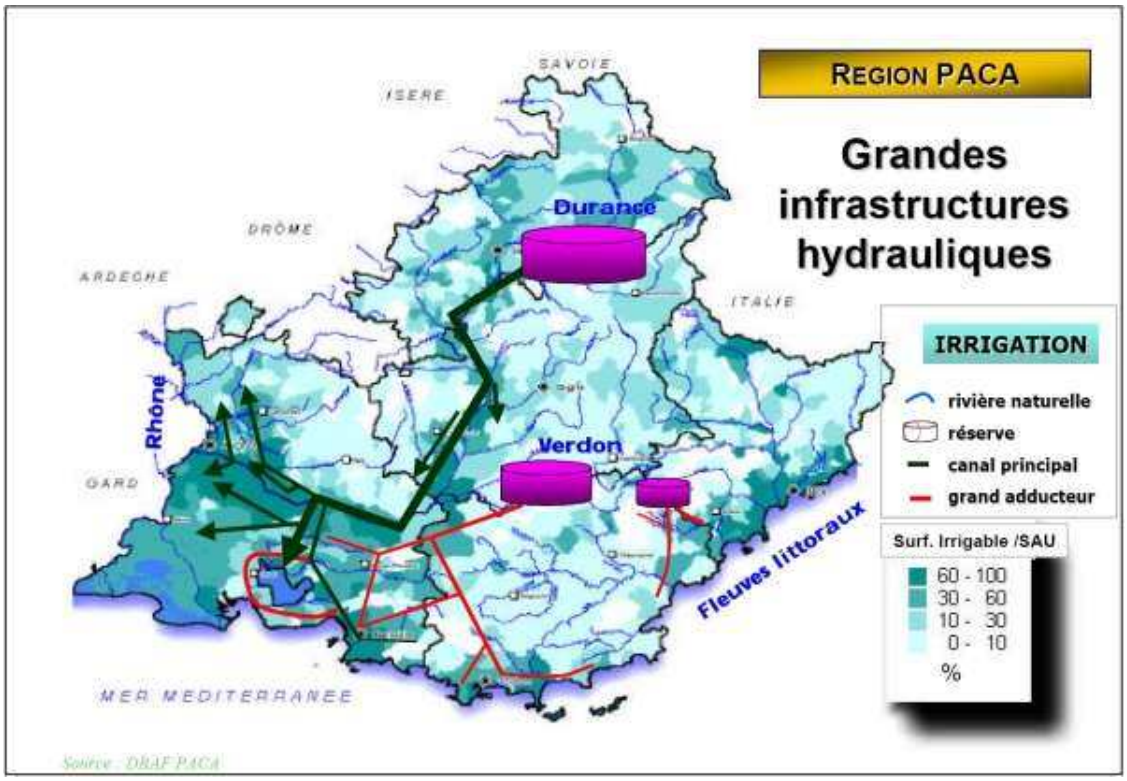


FIG. 1.5 - *Les grandes infrastructures hydrauliques en PACA (extrait de [Balland et al., 2002])*

1.4.2 Production d'électricité

Comme il a été évoqué dans la section précédente, la production d'électricité est une activité économique majeure, ayant conduit à la construction d'ouvrages importants (canaux de dérivation, notamment le canal "usinier" de 185 kilomètres de long et d'une capacité de $250 m^3.s^{-1}$, retenues artificielles, usines hydroélectriques). La production annuelle moyenne représente, avec plus de 6 milliards de kilowatt-heures, $1/10^{eme}$ de l'ensemble de la production d'électricité hydraulique française. L'ensemble des centrales hydroélectriques utilisant les eaux du bassin versant de la Durance - totalisant la puissance équivalente de 2 centrales nucléaires - est capable de fournir au réseau national 1800 mégawatts en moins de 10 minutes. Ceci constitue 15% des moyens nationaux de production de pointe. L'hydroélectricité produite en Durance est donc hautement stratégique. Enfin, le chiffre d'affaire annuel induit pour la région a été évalué à 450 millions d'euros par la mission Balland [Balland et al., 2002].

1.4.3 Alimentation en eau potable, eau industrielle et eau agricole

Ces usages correspondent aux droits d'eau gérés par la société du Canal de Provence. Ces droits, dont le total dépasse les 600 millions de mètres cube, sont utilisés pour l'instant à hauteur de 200 millions de mètres cubes [Balland et al., 2002]. La vente d'eau représente des recettes de 56 millions d'euros (chiffres 2001), correspondant pour 10% à un usage agricole, 26% à un usage rural non agricole, 32% à un usage industriel et 32% à un usage urbain. Cette distribution d'eau a lieu par l'intermédiaire d'un réseau de plus de 4700 kilomètres, allant jusqu'à Marseille et au littoral varois. Cet investissement, chiffré à 2 milliards d'euros, pose des problèmes d'amortissement et d'entretien.

1.4.4 Usages émergents

1.4.4.a L'eau en tant que milieu

L'eau n'est plus seulement considérée comme une ressource ou un bien marchand mais comme un *milieu*. La directive cadre européenne de 2000 a en effet fixé un objectif de bon état écologique des masses d'eau à l'horizon 2015 ainsi que le principe de non dégradation.

Or, dans l'état actuel des choses, seule la partie de la Durance à l'amont de Serre-Ponçon répond aux objectifs de la directive cadre. En effet, à l'aval, les étiages les plus sévères sont passés de $30m^3.s^{-1}$ à 3 à $4m^3.s^{-1}$, le régime des hautes eaux a presque disparu (moins de 4 jours par an à plus de $200m^3.s^{-1}$ au lieu de 100 jours par an originellement), ne subsistant ainsi que les crues extrêmes.

La dégradation du milieu physique est manifeste : en conséquence des débits faibles coulant en rivière la majeure partie de l'année, le lit n'est plus constitué que d'un chenal d'une dizaine de mètres encadré de bancs rapidement colonisés par la végétation au lieu d'un lit actif de 500 à 600 mètres avec lit mineur en tresses. De plus, les transports solides ont été fortement modifiés. Pour exemple, le volume de charriage est passé de $500000m^3$ par an à $40000m^3$ à l'aval de Cadarache. Cela a notamment un effet sur la côte méditerranéenne : on observe en effet un recul des plages qui peut être expliqué en partie par le manque de sédiments.

Cette dégradation du milieu physique (disparition du régime naturel, des crues moyennes, quasi permanence de l'étiage) a conduit à une dégradation des écosystèmes tout à fait réelle (section 1.3).

1.4.4.b Usages touristiques et récréatifs

Plusieurs sections de rivières naturelles, ainsi que plusieurs retenues EDF (lacs de Serre-Ponçon et de Sainte-Croix) sont exploitées à des fins touristiques. La mission de l'inspection générale de l'environnement de 2001 (Rapport Balland) évalue le chiffre d'affaire annuel de cette activité à 100 à 150 millions d'euros. Les problématiques sont variées, allant du maintien de l'altitude des plans d'eau artificiels pour la période touristique à la gestion du risque lié aux lâchés, voire à une gestion spécifique des lâchés permettant la pratique du sport en eau-vive.

1.5 Le risque d'inondation

Comme précisé plus haut, si les ouvrages mis en place ont permis de diminuer les petites et moyennes crues, ils restent transparents aux grandes crues. De plus, les aménagements mis en place peuvent conduire à une aggravation brutale des aléas en

cas de ruptures ou de déversement. Enfin l'augmentation de la vulnérabilité, due en partie à une impression de sécurité laissée par la disparition des effets des petites et moyennes crues, a fortement augmenté les effets des aléas exceptionnels. Les crues de 1994 ont mis en lumière cette réalité.

L'enjeu vis à vis du risque d'inondation est d'autant plus fort que la vallée est en croissance démographique, accompagnée du développement des infrastructures, zones industrielles et zones habitées.

1.6 Synthèse - Enjeux - Site d'étude

Comme on l'a vu dans les sections précédentes, la vallée de la Durance est - de longue date - le théâtre d'enjeux multiples, que [Balland et al., 2002] classent en eau électrique, eau agricole, eau potable, eau industrielle, eau "inondante", eau ludique et eau écologique. Les aménagements qui ont été effectués sur la Durance sont considérables (entre autres les grands barrages, les canaux de déviation conduisant la majeure partie du flux vers l'étang de Berre) et ont pour but de répondre aux nombreux usages de l'eau de la Durance.

Si les conflits d'usage étaient jusqu'alors modérés hors sècheresse, *l'équilibre est fortement remis en cause* dans la situation actuelle. D'une part, par un effet indirect dû à la diminution du nombre des crues, amplifié par une pression démographique croissante, la vulnérabilité aux inondations a fortement augmenté. D'autre part, la relative satisfaction de l'ensemble des usages n'a pu avoir lieu qu'au prix d'emprunts colossaux au milieu naturel, qui ont profondément modifié le style fluvial originel (voir section 1.2.2).

Avec l'émergence et le développement de la demande en eau écologique, la problématique de l'*optimisation des débits réservés* se complexifie et prend de nouveaux visages, parmi lesquels : l'utilisation des chasses hydrauliques pour la gestion du milieu aquatique, la réalisation d'essartements sélectifs, favorisant la diversité écologique et limitant le vieillissement et l'établissement de forêts dans le lit majeur.

La Durance est un exemple représentatif des nouvelles problématiques de gestion liées à la rivière. L'apparition de nouvelles contraintes, par exemples écologiques, mais aussi le durcissement des contraintes existantes dû aux pressions démographiques crois-

santes rend nécessaire une connaissance de plus en plus fine du fonctionnement de cet hydrosystème, de manière à ajuster les processus de prise de décision.

La meilleure prise en compte de ces problématiques, concernant divers domaines (écologie, aménagement, sécurité, agriculture, industrie,...), passe donc par le développement de nouveaux moyens de mesure. En rivière on envisage par exemple l'utilisation de stations de jaugeage virtuelles [Creutin et al., 2003], ou encore de stations virtuelles de mesures du niveau de l'eau par satellite pour les grands bassins versants [Bercher et al., 2006, Bercher et Kosuth, 2007].

Ces méthodes restent pour la plupart à développer. Les nouvelles contraintes liées à la gestion amènent donc un transfert des problématiques thématiques (comprendre un phénomène) vers des problématiques méthodologiques (développer des moyens de mesure). Ce transfert est abordé dans le chapitre qui suit.

Chapitre 2

Une problématique thématique : du poisson à l'image

Comme il a été vu dans le chapitre précédent, la rivière, et en particulier la Durance, est le *théâtre d'un conflit d'usages* nécessitant l'établissement de compromis fins, notamment au sujet de l'*optimisation des débits réservés* entre usages hydroélectriques, agricoles, touristiques et protection du milieu. On rappelle brièvement ces éléments et leurs implications en terme de problématiques de recherche dans une première section.

L'objectif de ce chapitre est de montrer par quels mécanismes une problématique thématique (compréhension du fonctionnement d'un hydrosystème) est transférée vers une problématique méthodologique (technique de mesure de paramètres physiques). Les applications thématiques sont variées : étude de la morphodynamique des rivières, modélisations hydrauliques, études hydroécologiques. Notre propos se concentre sur l'*aspect écologique* : celui-ci est en effet pédagogique dans le sens où les problématiques posées et les réponses scientifiques proposées se heurtent à un problème de représentativité, de significativité, d'échelle, et donc finalement d'accessibilité à une caractérisation spatiale du milieu sur de grandes étendues.

Depuis une dizaine d'années en Europe, la gestion de la ressource en eau doit prendre en compte sa dimension écologique (l'eau en tant que milieu de vie). Il y a donc dorénavant un besoin institutionnel de *caractériser et de comprendre le fonctionnement de la rivière pour sa gestion opérationnelle*. Les recherches menées par les laboratoires partenaires, notamment par le Cemagref d'Aix en Provence au travers du Thème de Recherche HYDRECO [Cemagref, 2004], le Cemagref de Lyon au travers du Thème de Recherche TRANSFEAU, et le GAAP (Université Laval) de Québec, au travers du projet

Hybacam [GAAP, 2008], utilisent une approche de modélisation de la géométrie de la rivière pour des applications thématiques variées. En particulier, les habitats des populations aquatiques (poissons, invertébrés, ..) sont caractérisés à partir de mesures de terrain (pêches, topographie) puis du calcul du champ des vitesses. Cette approche est présentée dans une deuxième section.

Enfin, au vu du besoin crucial de caractériser les paramètres physiques de la rivière et notamment la géométrie de son lit (topographie) pour l'établissement de modèles thématiques, la *question de la mesure* se pose naturellement. Si l'échelle du micro habitat ou du bief est celle de la compréhension de l'hydroécosystème, comment effectuer le transfert vers les échelles auxquelles s'effectuent les prises de décision ? Le potentiel de la télédétection pour la mesure de la topographie immergée de la rivière est introduit dans une dernière section.

2.1 Conflits d'usages et nouvelles problématiques en Durance

Les usages de l'eau de la Durance sont multiples, avec des intérêts pour les différents acteurs pouvant être opposés. Les sommes annuelles concernées dans les différents domaines, tels que l'agriculture, l'hydroélectricité, le tourisme, représentent *plusieurs centaines de millions d'euros* [Balland et al., 2002]. Les enjeux stratégiques de production électrique de pointe, de protection contre les inondations et les sècheresses sont cruciaux. En revanche, la prise en compte de l'état écologique du milieu dans la gestion de la ressource est très tardive et a conduit à des situations écologiques telles que celle de la portion de la Durance entre Serre-Ponçon et l'Escale, qui est quasiment "clouée" [Balland et al., 2002].

Or, depuis quelques années, notamment en France depuis la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 [Legifrance, 1992], la directive cadre européenne sur l'eau du 23 octobre 2000 [2000/60/CE, 2000], la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 [Legifrance, 2006], et au Québec depuis la Politique Nationale de l'Eau lancée le 26 novembre 2002 [Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs, 2002], la *préservation des écosystèmes aquatiques* ainsi que le *bon potentiel écologique des masses d'eau* sont devenus des objectifs à part entière de la gestion de la ressource en eau, considérée dorénavant par la loi française comme *faisant partie du*

patrimoine commun de la nation et par le gouvernement québécois comme *une priorité nationale.*

Dans ce cadre plusieurs problèmes se posent, notamment celui de la définition de ce bon potentiel écologique du cours d'eau ou encore de l'état écologique de référence. La communauté scientifique doit être capable de fournir aux différents acteurs et usagers de l'eau des moyens de mesurer cet état écologique [Wasson, 2001].

2.2 Les modèles habitat/poisson

Les recherches déjà conduites dans le domaine de l'écologie des cours d'eau ont mis en évidence le couplage entre physique et écologie et ont analysé les différentes échelles de ce couplage, du bassin versant (échelle de la gestion de la ressource) au microhabitat (échelle liée aux organismes vivants) [Bovee, 1982, Baras, 1992, Orth, 1995, Bovee, 1996, Le Coarer, 2007, Cemagref, 2004]. L'approche utilisée est celle de la modélisation habitat/poisson. Il s'agit de caractériser la relation entre les paramètres physiques de l'habitat (température, composition chimique, type de substrat, profondeur, vitesse, ...) et la présence préférentielle des individus des différentes espèces aquatiques. On regroupe les individus par taxons : il s'agit d'une unité systématique de classification, par exemple l'*espèce*. On peut utiliser des taxons de rang supérieur à l'espèce, comme la famille (exemple pour la Durance : les Cyprinidés), ou des taxons de rang inférieur à l'espèce, par exemple : regroupement des individus d'une même espèce par classes d'âge.

L'équipe du Cemagref d'Aix en Provence a développé un modèle baptisé 5M7 [Le Coarer, 2007]. Ce modèle, qui établit le lien entre les caractéristiques des habitats et la présence préférentielle des poissons, utilise comme base de description physique des habitats le concept d'*hydrosignature* [Le Coarer, 2005]. Le calcul d'hydrosignature peut s'effectuer à partir de relevés terrains grâce à un logiciel en version bêta mis à disposition sur le site http://hydrosignature.aix.cemagref.fr/. La deuxième source de données du modèle est fournie par des pêches électriques : il s'agit, à l'intérieur de polygones spatialisés ou non, d'attirer les poissons présents en immergeant une électrode. On prélève ensuite temporairement les individus afin de relever leur nombre et leurs caractéristiques.

2.2.1 Le concept d'hydrosignature

Partant du fait que, dans une rivière, la distribution des communautés aquatiques dépend de la distribution des variables hydrauliques [Gorman et Karr, 1978, Aadland, 1993, Bovee, 1996, Wildhaber et al., 2003], on cherche à caractériser cette dernière. Le plus souvent, on retient la profondeur et la vitesse comme variables d'intérêt. On ne considère donc dans ce cas ni la micro topographie ni la rugosité du fond de la rivière.

Ces deux variables sont réparties en *classes croisées (hauteur ; vitesse)*. On détermine les unités hydromorphologiques de la rivière selon ces classes. L'hydrosignature d'une section de rivière correspond aux *proportions relatives de chacune de ces classes* en surface ou en volume. Un exemple est présenté sur la figure 2.1.

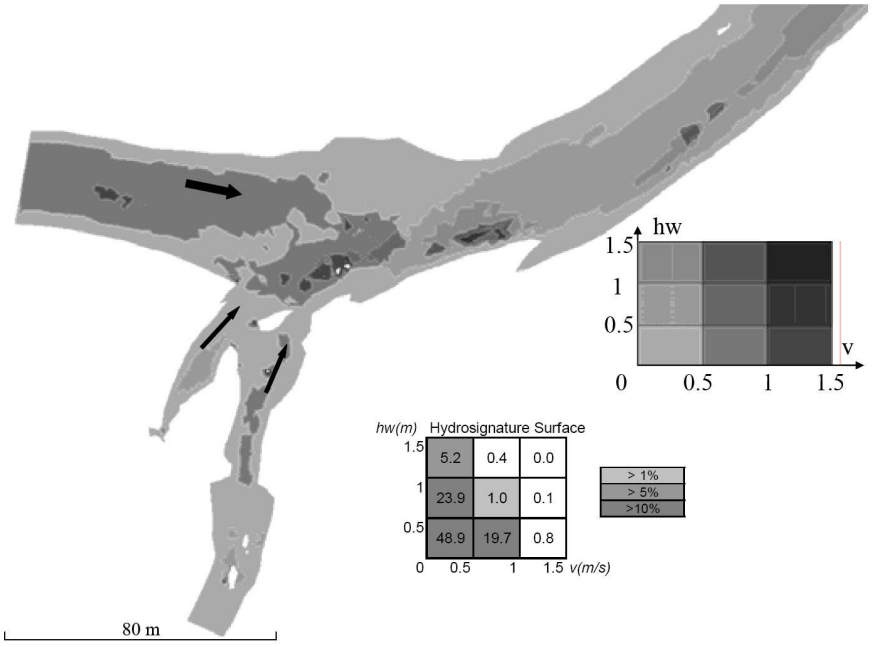


FIG. 2.1 - *Répartition spatiale des classes (hauteur ; vitesse) d'une portion de rivière. La définition des classes croisées (hauteur ; vitesse) et la légende des niveaux de gris est représentée à droite. L'hydrosignature en surface de la portion de rivière est représentée en bas (extrait de [Le Coarer, 2005]).*

2.2.1.a Calcul de l'hydrosignature à partir d'un nuage de points de mesure

Comme il a été mentionné plus haut, l'hydrosignature d'une rivière ou d'une portion de rivière s'appuie sur des classes croisées de hauteur d'eau et vitesse du courant, par exemple (figure 2.1), des classes de 50 centimètres pour les hauteurs et 50 centimètres par seconde pour les vitesses.

Le calcul de l'hydrosignature suivant ces classes peut être effectué à partir de données non spatialisées, spatialisées suivant des transects ou encore spatialisées suivant des nuages de points. Seul ce dernier cas est détaillé ci-dessous, selon [Le Coarer, 2005].

On s'appuie sur un réseau de triangles irréguliers de type Delaunay (abrégé TIN en anglais pour Triangulated Irregular Network). La première étape du calcul de l'hydrosignature est de découper ce maillage triangulaire en *hydroéléments* correspondant aux classes (hauteur ; vitesse).

Pour cela, on effectue une *interpolation spatiale* des valeurs mesurées sur le terrain. On détermine les points (nouveaux) où sont atteintes les valeurs seuil des classes (hauteur ; vitesse) et on crée un *nouveau maillage* pour lequel chaque maille représente un hydroélément. C'est à dire que les valeurs à l'intérieur de chaque maille sont *incluses dans une classe (hauteur ; vitesse)*.

Concrètement, pour un triangle du TIN couvrant 4 classes (hauteur ; vitesse), on détermine tout d'abord le point où sont atteintes les valeurs seuil en hauteur *et* en vitesse. Il s'agit du point frontière entre les 4 classes (le point D de la figure 2.2).

Puis, sur chaque arête du triangle, on détermine les points où les mesures passent par une valeur seuil en hauteur *ou* en vitesse. Il s'agit de points frontières entre 2 classes. Par exemple, pour l'arête reliant les mesures terrain $A(v = 0.1; h = 0.15)$ et $B(v = 0.25; h = 0.35)$, l'interpolation permet de déterminer le point $AB_h(v = 0.1375; h = 0.2)$ - pour lequel la valeur seuil en *hauteur* est atteinte - ainsi que le point $AB_v(v = 0.2; h = 0.283)$ - pour lequel la valeur seuil en *vitesse* est atteinte (voir figure 2.2). En répétant l'opération sur les trois arêtes du triangle, on détermine les sommets des 4 hydroéléments contenus dans le triangle.

En effectuant cette opération pour chaque triangle du TIN, on crée un nouveau maillage composé d'hydroéléments inclus dans les classes (hauteur ; vitesse).

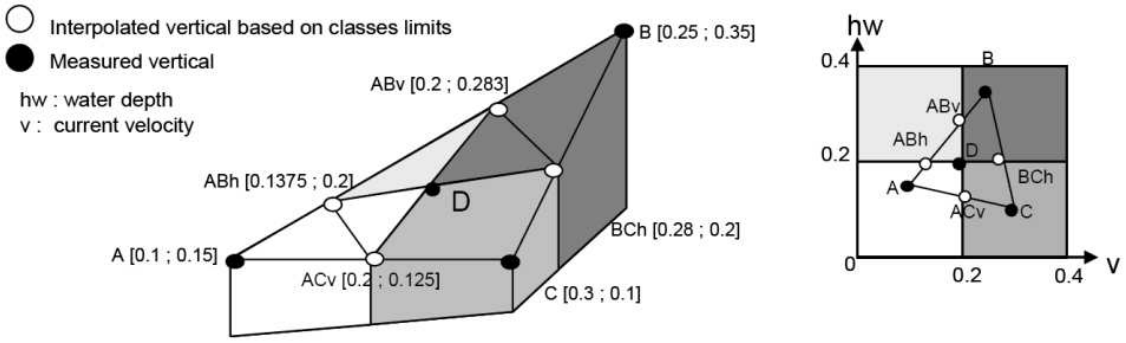


FIG. 2.2 - *Exemple de découpe d'un élément du TIN en hydroéléments (extrait de [Le Coarer, 2005]).*

On peut finalement calculer, à partir de ce nouveau maillage, les proportions relatives de chacune des classes par rapport à la surface totale - ou au volume total - de la portion de rivière considérée.

2.2.1.b Intérêt et propriétés de l'hydrosignature

Cette approche, spatialisée, présente plusieurs avantages. Notamment, elle rend possible la *caractérisation qualitative et la visualisation* de la diversité hydrodynamique du milieu étudié. La représentation des classes (hauteur ; vitesse) en donne une vision synthétique (voir figure 2.1).

D'autre part, le calcul de l'hydrosignature d'une section permet de *quantifier* cette diversité. On peut ensuite, en comparant l'hydrosignature d'un tronçon complet et l'hydrosignature d'une section de ce tronçon, déterminer si la section est représentative du tronçon ou non. C'est donc non seulement un outil de base pour l'établissement des modèles habitat/poisson mais cela peut aussi être un outil d'extrapolation de ces derniers.

Enfin, on remarque, par l'étude des exemples proposés (figure 2.1), que le calcul d'hydrosignature est réalisé selon une discrétisation des profondeurs par classes d'une

vingtaine de centimètres. Cet échantillonnage donne une idée de l'ordre de grandeur de la qualité attendue pour la mesure des paramètres physiques de la rivière.

2.2.2 Exemple de modèle habitat/poisson : le modèle 5M7

Le concept d'hydrosignature, présenté dans le paragraphe précédent permet de caractériser l'habitat des poissons. L'habitat des poissons est couramment caractérisé en fonction de la variabilité hydraulique de la rivière en s'appuyant sur la distribution bivariée (hauteur ; vitesse) [Baras, 1992, Orth, 1995, Le Coarer, 2007]. Il s'agit ensuite de faire le lien entre les habitats caractérisés et la présence des poissons. Comme mentionné plus haut, les données concernant la présence des poissons sont récoltées en effectuant des pêches électriques (voir figure 2.3). Les résultats des pêches sont spatialisés et les

FIG. 2.3 - *Pêche électrique en Durance : un opérateur manipule l'électrode, pendant que d'autres opérateurs prélèvent les poissons pour les mesurer et les recenser.*

hydrosignatures sont calculées à l'intérieur de chaque polygone de pêche.

A partir de toutes ces données, le modèle 5M7 calcule, pour chaque taxon et pour chaque classe (hauteur ; vitesse), un indice de préférence. Un résultat extrait d'une étude réalisée en Moyenne Durance est présenté figure 2.4 [Le Coarer, 2007]. Il s'agit de l'indice de préférence selon les classes de (hauteur ; vitesse) du Barbeau (*Barbus barbus*)

de moins de 40 milimètres.

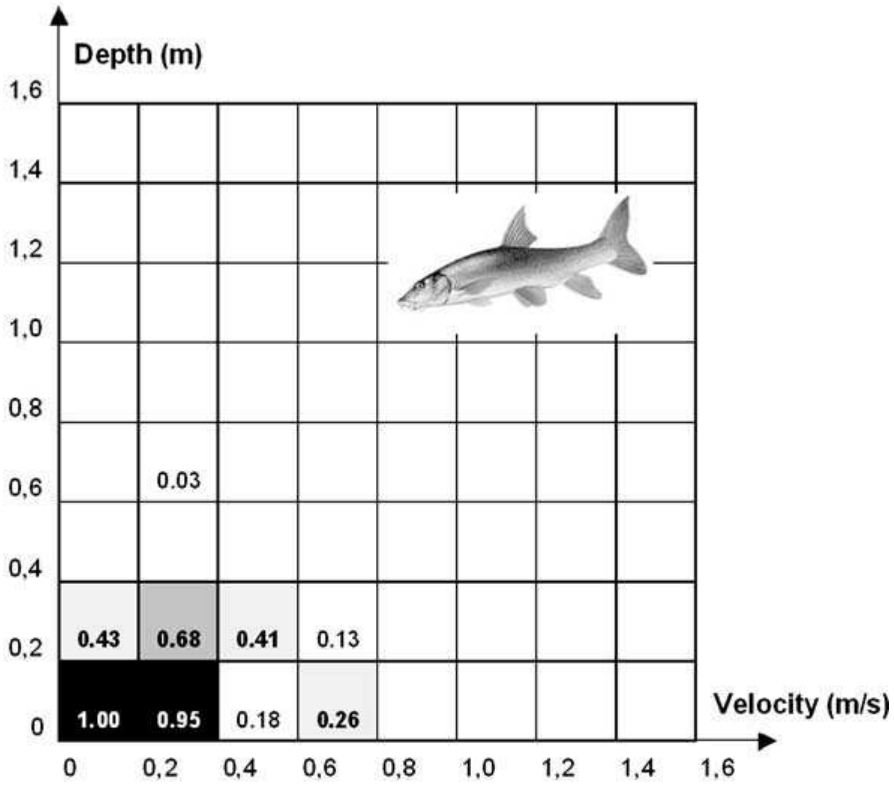


FIG. 2.4 - *Indice de préférence du Barbeau (*Barbus barbus*) calculé par le modèle 5M7 (extrait de [Le Coarer, 2007]).*

Il est ensuite possible, à partir des indices de préférence obtenus pour chaque taxon, et des hydrosignatures calculées pour toute la portion de rivière, de produire une carte de présence préférentielle d'un taxon. De plus, si l'on constate de fortes préférences d'un taxon à la frontière de l'hydrosignature d'une portion de rivière, c'est à dire que le taxon est présent dans les unités pour lesquelles les paramètres sont maximaux, on peut émettre l'hypothèse que le taxon irait dans des habitats présentant de plus fortes valeurs de (hauteur ; vitesse) si de tels habitats étaient présents.

Autre exemple : on étudie l'évolution de la présence préférentielle de taxons d'une même espèce de taille et/ou d'âge croissants dans l'espace des hydrosignatures. On peut ainsi évaluer la disponibilité des habitats pour l'espèce selon la croissance des individus. Si la courbe obtenue atteint les limites de l'hydrosignature et "stagne" pour des stades de développement croissants, on peut émettre l'hypothèse de l'absence de certains habitats

préférentiels pour l'espèce considérée dans la portion de rivière considérée. Évidemment ce type d'hypothèse doit être manipulé avec beaucoup de précaution.

2.3 Un besoin de mesure

Comme on l'a vu dans la section précédente, les modèles hydroécologiques ne peuvent être établis sans une connaissance des paramètres physiques caractérisant la rivière. En conséquence, il y a un besoin crucial de mesure de la topographie immergée de la rivière.

Cette mesure est encore effectuée dans la majorité des cas par des campagnes de terrain. Des méthodes spécifiques ont été développées dans ce but [Carter et Shankar, 1997, Crowder et Diplas, 2000, Le Coarer et Dumont, 1995b, Le Coarer et Dumont, 1995a]. Le matériel utilisé est celui de la topographie classique en terrain sec : un tachéomètre (mesure des angles et des distance), un prisme monté sur une canne de hauteur connue, ainsi que des radios permettant la communication entre l'opérateur tachéomètre et les opérateurs prisme. Un carnet électronique associé au tachéomètre stocke les numéros des points et les informations relatives aux points données par les opérateurs prisme par radio, comme le type de point (émergé/immergé) ou encore un paramètre physique décrivant la rivière associé à la position courante (hauteur d'eau, type de substrat). De cette manière, il est possible d'effectuer une description très détaillée de la rivière et de ses limites : lignes de rives, tracés d'iles. La méthode décrite par [Le Coarer et Dumont, 1995b, Le Coarer et Dumont, 1995a] utilise un échantillonnage adaptatif, le semis de points étant d'autant plus dense que la géométrie de la rivière est complexe. Elle implique donc une certaine expertise ou du moins un certain "bon sens" ou expérience de terrain chez l'opérateur.

Pour les zones d'écoulement torrentiel, on mesure les hauteurs d'eau sur la canne graduée de manière centimétrique afin de reconstituer la surface. Ailleurs, la surface peut être calculée à partir des lignes de bordure de lit mouillé. Ces techniques permettent d'obtenir une représentation de la *position moyenne du fond*[1] (voir section 9.4.2.a et figure 9.11 pour une description du protocole de terrain) et de la surface avec une précision centimétrique. En revanche, même si ces méthodes sont déjà 2 à 3 fois plus rapides que d'autres méthodes utilisant niveaux optiques et mires, elles restent très coûteuses. La cartographie d'une section d'un kilomètre de la Durance a ainsi mobilisé

[1] la rugosité du fond peut être en effet localement très importante, avec des blocs de plusieurs dizaines de centimètres de hauteur

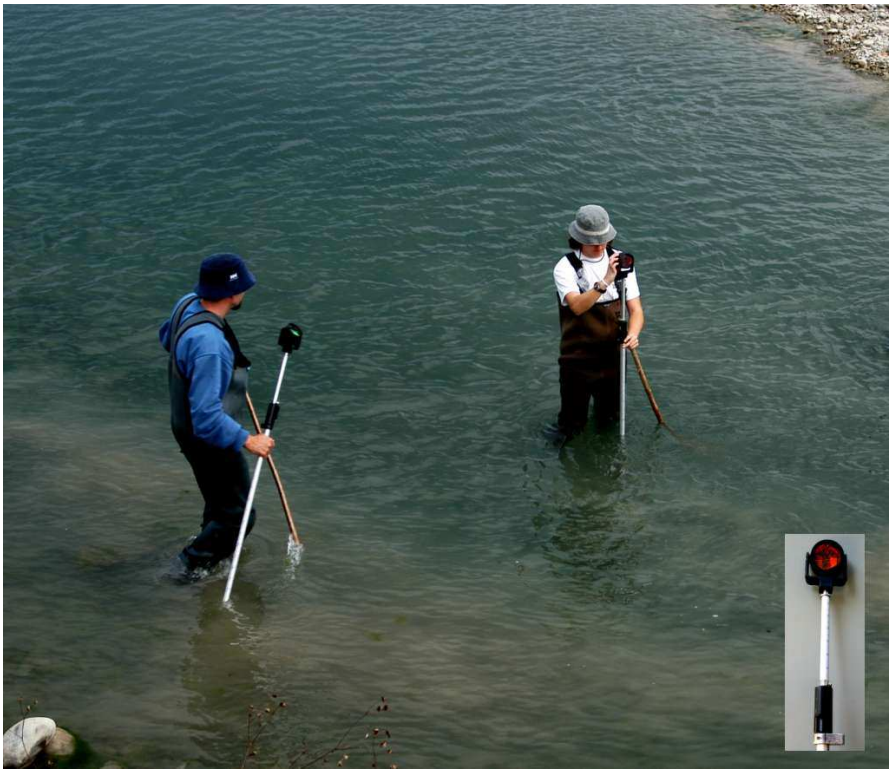


FIG. 2.5 - *Mesure de la topographie immergée de la rivière ; détail d'un prisme.*

en tout un mois de terrain (une vingtaine de jours "technicien" et une dizaine de jours "scientifique") et trois semaines de post-traitements (deux semaines "scientifique" et une semaine "technicien"), pour un prix au kilomètre linéaire de plus de 35 000 euros (cf. figure A en annexe).

D'un autre côté, les résultats de calcul d'hydrosignatures et d'indices de préférence se présentent par classes croisées (hauteur ; vitesse). L'amplitude de ces classes est en général de plusieurs décimètres pour les hauteurs et de plusieurs décimètres par seconde pour les vitesses (figures 2.1 et 2.4). La précision obtenue par la mesure terrain issue de la méthode présentée ci-dessus est donc largement suffisante pour la modélisation des relations entre les habitats et la faune aquatique. Cette précision permet même l'établissement de modèles hydrauliques pour le calcul des vitesses et des débits sur les tronçons considérés.

2.4 Apport de la télédétection

L'acquisition de données de terrain indispensables à la modélisation de la relation entre la faune aquatique et les habitats disponibles peut s'effectuer majoritairement par des campagnes de terrain. Ces dernières, si elles permettent une description très fine et très précise de petits tronçons de la rivière, restent très coûteuses. Le relevé topographique d'un kilomètre linéaire de rivière est en effet évalué à plus de 30 000 euros (figure A en annexe). Cette somme est à comparer au coût des données de télédétection (exemple coût SpotImage : 0.3 euros par kilomètre carré [SpotImage, 2008]). L'acquisition de mesures terrain pour une étude à l'échelle d'un bassin versant peut donc s'avérer être un investissement très lourd en temps et en argent et finalement un facteur limitant [Marcus, 2002].

2.4.1 Complémentarité des mesures

La télédétection, notamment l'imagerie aérienne ou spatiale, permet l'acquisition d'une information sur la rivière ayant, entre autres, les caractéristiques suivantes [Lane, 2000, Mertes, 2002, Gilvear et al., 2004a, Priestnall et Aplin, 2006, Feurer et al., 2007a] (voir figure 2.6 pour exemple sur la Durance) :

- échantillonnage spatial systématique et régulier
- couverture spatiale globale (toute la zone visible dans une image)
- pas de limitation liée à la difficulté d'accès au terrain
- répétitivité de la mesure
- résolution spatiale au détriment de la couverture

Ces caractéristiques font de la télédétection un moyen de mesure *complémentaire* à la mesure sur le terrain, permettant d'envisager l'accès à des domaines de travail plus vastes, à un coût modéré [Hilldale et Raff, 2007]. Les applications nombreuses ont même conduit à la mise en place récente d'une communauté scientifique "télédétection de rivières" et à la proposition de création d'un réseau d'observatoires [Marcus, 2008]. Il ne s'agit pas de remplacer totalement les mesures issues de campagnes terrain, car l'accès à une information aussi précise que celle recueillie sur le terrain, sur des linéaires beaucoup plus longs, n'est pas encore envisageable (pour des raisons techniques et pécuniaires). En revanche, comme on l'a vu dans la section précédente, la précision de la mesure utilisée dans les modèles est de l'ordre de la dizaine de centimètres. On se situe cette fois dans les ordres de grandeur de résolution spatiale des images aériennes prises à basse altitude, permettant la couverture d'un tronçon de 1 kilomètre avec une

FIG. 2.6 - *Photographie aérienne de la Durance : la résolution au sol est d'environ 40 centimètres par pixel et la couverture spatiale de 1km300 par 1km (Crédits image http://www.lavionjaune.fr).*

dizaine d'images. C'est à ce niveau qu'il faut étudier l'apport possible de mesure issue de la télédétection.

2.4.2 Le compromis entre couverture spatiale, échantillonnage, et précision de la mesure

Lorsque l'on parle d'applications à partir d'images de télédétection, on est très rapidement confronté au problème du compromis entre largeur du domaine d'application (couverture spatiale) et finesse de l'échantillonnage (résolution spatiale). Cela a donc une conséquence directe sur le type d'éléments hydrologiques qu'il est possible de caractériser [Legleiter, 2002, Legleiter et Roberts, 2005, Priestnall et Aplin, 2006]. En effet, qu'il s'agisse d'imagerie satellitaire ou aérienne, l'optimisation de l'une se fait au détriment de l'autre. Pour exemple, une image SPOT 4, qui couvre une surface au sol de 60 kilomètres de large, propose une résolution de 10 mètres ; une image de la BD ORTHO® fait 1 kilomètre de côté pour un pixel au sol de 50 centimètres.

Un échantillonnage dense ne peut être obtenu que si en contrepartie les zones couvertes par chaque image sont de taille modeste. On pourra à l'inverse obtenir des in-

formations sur des zones étendues avec peu d'images à condition de se satisfaire d'un échantillonnage moindre. Les applications restent nombreuses dans ce deuxième cas. L'image comme support cartographique a notamment été utilisée dans tous les travaux cités par [Mertes, 2002], ainsi que plus récemment [Brasington et Smart, 2003, Marcus et al., 2003, Gilvear et al., 2004b, Legleiter et al., 2004, Leckie et al., 2005, Carbonneau et al., 2006, Lejot et al., 2007] et finalement sur la Durance dans [Le Coarer et al., 2005]. L'objectif dans ce dernier travail était de disposer d'un fond géoréférencé utilisé pour localiser et caractériser des éléments de la rivière. On y a ainsi déterminé des unités hydromorphologiques ou encore des transects le long desquels les mesures terrain ont été recueillies.

Dans le cas d'applications en photogrammétrie et plus particulièrement en stéréorestitution, la précision de la mesure est directement reliée à la finesse de l'échantillonnage - plus l'échantillonnage est fin, plus la mesure est précise - mais ce n'est pas le cas en général pour les autres techniques de traitement d'image. Pour d'autres méthodes en effet, une résolution spatiale trop fine - par rapport à la taille des objets auxquels on s'intéresse - peut apporter du bruit sur la mesure. Par exemple, la radiométrie de certaines surfaces agricoles sera homogène avec des pixels au sol de 10 mètres et hétérogène avec des pixels au sol de 10 centimètres.

2.4.3 Critères d'intérêt de la télédétection

Au vu des caractéristiques des données de télédétection présentées dans la section 2.4.1, ainsi que des besoins présentés dans la section 2.3, on peut préciser les critères d'intérêt de ces techniques.

L'apport de l'imagerie aérienne par rapport au travail de terrain ne se situe pas en général au niveau d'une précision accrue de la mesure du relief immergé de la rivière : il est plutôt pertinent au niveau de la rapidité de l'acquisition, de la couverture spatiale répetitive et systématique dans les mêmes conditions de prise de vue et donc de la possible systématisation des méthodes, et enfin des caractéristiques spatiales de la mesure (échantillonnage, densité). En revanche, pour une méthode de télédétection donnée, il est nécessaire d'évaluer la meilleure précision de mesure du relief possible (figure 2.7), en fonction des conditions expérimentales par exemple.

A une échelle locale, on doit pouvoir obtenir des mesures comparables aux mesures

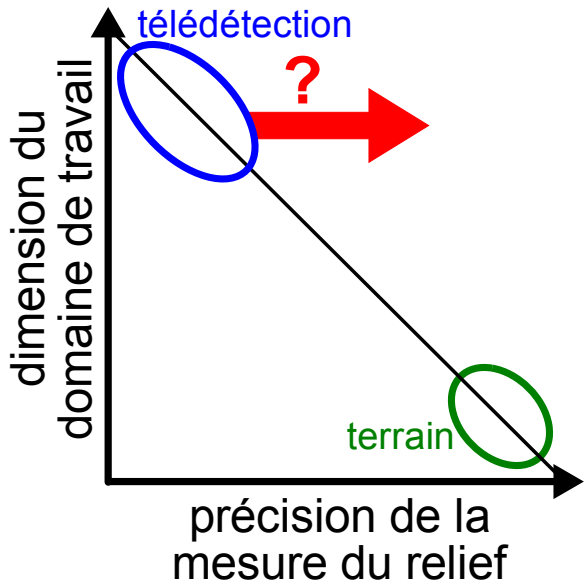


FIG. 2.7 - *Compromis entre étendue du domaine de travail et précision de la mesure du relief - exemple de la stéréorestitution. L'objectif de nos travaux est de déterminer la meilleure précision de mesure expérimentale que l'on peut obtenir pour une dimension de domaine de travail donnée.*

effectuées sur le terrain, et potentiellement utilisables pour le calcul d'hydrosignatures ou avec les modèles habitat/poisson [Feurer et al., 2005]. Une application envisageable des méthodes de télédétection est la cartographie de la rivière sur des domaines de travail plus étendus. On peut ainsi caractériser les paramètres physiques des cours d'eaux avec une précision de mesure moindre que la mesure terrain, mais sur de plus grands linéaires et/ou sur des zones difficilement accessibles.

L'intérêt à moyen terme est le suivant : la caractérisation de longs linéaires de la rivière, même moins précise, peut permettre de choisir *a priori* des zones représentatives. Sur ces zones, il est ensuite possible de mener des études plus fines, concentrant la majeure partie du travail de terrain. Ces travaux peuvent par exemple consister en l'étalonnage de modèles hydrobiologiques, que l'on généralisera ensuite à tout le tronçon en s'appuyant sur le fait que la zone d'étalonnage est représentative de l'ensemble.

Ces considérations ne sont pas nouvelles : la télédétection est utilisée depuis ses débuts pour étudier la rivière à différentes échelles (hydrologie du bassin versant, étude de la plaine d'inondation, du couloir rivulaire, ...) [Schmugge, 1987, Muller et al., 1993, Ritchie et Rango, 1996, Schultz et Engman, 2000, Mertes, 2002, Schmugge et al., 2002, *non exhaustif*]. Notre étude est concentrée sur la caractérisation de la *partie immergée de*

la rivière et plus particulièrement *la topographie du lit mouillé*, à propos de laquelle les références bibliographiques sont moins nombreuses. L'objectif du chapitre suivant est d'établir un état des lieux de ces travaux, se focalisant sur l'utilisation de la télédétection pour caractériser la géométrie de la rivière.

Le développement d'une méthode de mesure du relief immergé par télédétection, puis la validation de ses résultats permettront de déterminer son potentiel dans le cadre de la problématique présentée plus haut. On part du principe que, d'une part, le travail sur le terrain permet d'avoir accès à une mesure du relief immergé précise sur des surfaces réduites, et que, d'autre part, les données de télédétection pourront fournir des mesures moins précises sur des surfaces plus importantes (voir figure 2.7).

On cherche donc à *déterminer la précision de mesure du relief immergé que l'on peut obtenir avec la méthode de télédétection choisie à partir d'images d'une échelle donnée*. On effectue dans un premier temps une revue des travaux existant en matière de mesure de la profondeur ou de la topographie immergée de rivière par télédétection. Cette revue, réalisée sous forme d'un article, est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Revue de littérature

L'étude des problématiques concernant la rivière a été réalisée dans le premier chapitre. On a ainsi montré que la gestion de la rivière comprenait un nombre croissant de contraintes, notamment les contraintes de conservation voire de restauration du milieu.

Le deuxième chapitre a montré, à partir de l'exemple de la faune aquatique, comment ces nouvelles contraintes ont mis en exergue une problématique classique, d'autant plus en hydrologie, qui est celle du besoin de mesure pour caractériser les milieux étudiés. Pour l'application spécifique de la modélisation en rivière, il apparaît que la vitesse et la topographie immergée sont deux variables physiques fondamentales.

De nombreux travaux existent par ailleurs pour développer des méthodes de mesure de la vitesse de surface, principalement autour de la mesure de vitesse par images de particules (en anglais PIV) [Adrian, 1984, Fujita et al., 1997, Holland et al., 2001, Creutin et al., 2003, Muste et al., 2004, Hauet, 2006], le RADAR Doppler [Melcher et al., 2002, Plant et al., 2005], et de futures applications du LIDAR Doppler sont envisageables.

Nos travaux se concentrent sur l'étude de la topographie immergée de rivière. L'état de l'art réalisé concerne donc les travaux relatant d'applications concrètes de la détermination du relief immergé ou de la bathymétrie de rivière avec des techniques de télédétection. Ce chapitre contient la version intégrale de l'article : "Feurer, D., Bailly, J., Puech, C., Le Coarer, Y., et Viau, A. (2008). Very high resolution mapping of river immersed topography by remote sensing. *Progress in Physical Geography*, 32(4) :403-419" [Feurer et al., 2008]. Cette revue de littérature a de plus été présentée au colloque TISORS II [Feurer et al., 2006]

Very high-resolution mapping of river-immersed topography by remote sensing

Denis Feurer,[1,2]* Jean-Stéphane Bailly,[1] Christian Puech,[1] Yann Le Coarer[3] and Alain A. Viau[2]

[1]Maison de la Télédétection, 500 rue Jean-François Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5, France
[2]GAAP, Pavillon Louis-Jacques Casault, Québec, Québec G1K 7P4, Canada
[3]Cemagref HYAX, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix en Provence Cedex 5, France

Abstract: Remote sensing has been used to map river bathymetry for several decades. Non-contact methods are necessary in several cases: inaccessible rivers, large-scale depth mapping, very shallow rivers. The remote sensing techniques used for river bathymetry are reviewed. Frequently, these techniques have been developed for marine environment and have then been transposed to riverine environments. These techniques can be divided into two types: active remote sensing, such as ground penetrating radar and bathymetric lidar; or passive remote sensing, such as through-water photogrammetry and radiometric models. This last technique – which consists of finding a logarithmic relationship between river depth and image values – appears to be the most used. Fewer references exist for the other techniques, but lidar is an emerging technique. For each depth measurement method, we detail the physical principles and then a review of the results obtained in the field. This review shows a lack of data for very shallow rivers, where a very high spatial resolution is needed. Moreover, the cost related to aerial image acquisition is often huge. Hence we propose an application of two techniques, radiometric models and through-water photogrammetry, with very high-resolution passive optical imagery, light platforms, and off-the-shelf cameras. We show that, in the case of the radiometric models, measurement is possible with a spatial filtering of about 1 m and a homogeneous river bottom. In contrast, with through-water photogrammetry, fine ground resolution and bottom textures are necessary.

Key words: immersed topography, remote sensing, river, through-water, very high spatial resolution.

I Introduction

Rivers have a prominent role in many contexts – as a natural environment, as a transfer medium, as a physical medium, as a natural resource. This list is not exhaustive. Understanding the river physical and ecological processes requires knowledge of the three-dimensional geometry of the riverbed, at various spatial and temporal scales, as shown by three examples. First, a key parameter in water resource management is the volume of water flowing in the river and it may be computed by measuring the immersed topography as well as the water level. Second, river morphology monitoring and riverine landscape management requires understanding of underlying physical processes. This is currently done through hydraulic models. These models are most often calibrated or validated with gauging data, which are available at only a few points. The need for detailed knowledge of riverbed topography is hence critically real. Third, when studying processes driving fish population dynamics, the fish habitat approach using spatial data is increasingly used. These spatial models determine, for each fish species and each development stage, the relationship between a presence index and river physical parameters (depth, speed, bottom type) (Le Coarer and Dumont, 1995a). These last two needs are at the root of the work presented hereafter.

Three-dimensional representations of riverbeds are now commonly used in hydrological studies (Lane *et al.*, 1994). Accurate measurement of the river geometry at a large scale, and frequently with very high spatial resolution, is required. If these measures can be obtained from a boat for navigable rivers, the operational fieldwork is tedious. Ground surveys that provide such measurements are time-consuming and necessitate large amounts of manpower. As a consequence, the ratio cost/area covered is very high and investigation is constrained to small parts of the river. As a result, limited funding and working time mean that hydrologic studies cannot be validated for a sufficiently representative section of the river: other solutions to measure river topography have to be investigated.

The scale question shows up quite often in hydrologic studies. Remote sensing has hence been widely used in this domain (Muller *et al.*, 1993; Gendreau and Puech, 2002; Mertes, 2002; Schmugge *et al.*, 2002). Moreover, remote sensing, as a non-contact measurement method, allows one to collect data about an inaccessible river and, in addition, provides complementary data characterizing the river (Creutin, 2001). In the literature river-immersed topography or water depth is often one parameter among others and is rarely the main issue. We have extracted from the literature the information of interest and synthesized it into a review of remote sensing techniques that have been used to map depth and/or riverbed-immersed topography (Table I).

Excepting sonar, four techniques exist: (1) spectral methods, exploiting the correlation between depth and light absorption; (2) ground penetrating radar (GPR); (3) bathymetric lidar; (4) photogrammetry. These techniques are either active (ie, the illumination is provided by the device) or passive (ie, the illumination is provided by the sun). For each of these techniques, we give a short physical explanation of the method, its applicability, with regard to the different experimental conditions, and finally the measured characteristics, scale, and expectable positioning precision (planimetric and altimetric).

The first part of this paper is a review of the references summarized in Table I. Thematic applications and remote sensing tools used in these papers are very diverse. In order to deal with such heterogeneous information, the review covers first active remote sensing techniques and then passive ones. In the second part, we present two additional methods, focused on mapping river depth and immersed topography at very high spatial resolution. Indeed, many research issues

Table 1 River bathymetry by remote sensing – case studies

Sites	Platform; sensor	References	Spectral	GPR	Lidar	Stereo
Yukon River, AK, USA	frozen surface; GPR	Annan and Davis (1977)		X		
Willimantic River, CT, USA	boat; 80 MHz GPR	Beres and Haeni (1991)		X		
St Mary River, MI, USA	plane; Daedalus 1260	Lyon *et al*. (1992)	X			
Green River, UT, USA	plane; COHU 4810	Hardy *et al*. (1994)	X			
Faith Creek, AK, USA	plane; Hamamatsu	Gilvear *et al*. (1995)	X			
Rupnarayan-Hooghly river confluence, India	satellite; IRS-1b LISS-II	Kumar *et al*. (1997)	X			
Southwestern WA, USA	cable; 100 MHz GPR	Spicer *et al*. (1997)		X		
River Tummel, Scotland	plane; ATM, B&W photo	Winterbottom and Gilvear (1997); Gilvear *et al*. (2004)	X			
Saco River, Maine	helicopter; SHOALS	Irish and Lillycrop (1999)			X	
River Tay, Scotland	plane; ATM, B&W photo	Bryant and Gilvear (1999)	X			
Harrison and Horsefly Rivers, BC, Canada	plane; 3 CCD cameras + imaging spectrometer VIFIS	Roberts and Anderson (1999)	X			
Skagit River, WA, USA	cable; 100 MHz GPR	Costa *et al*. (2000); Haeni *et al*. (2000)		X		
Ashburton River, New Zealand	plane; Zeiss LMK15	Westaway *et al*. (2000; 2001)				X
Cowlitz River, WA, USA	helicopter; 100 MHz GPR	Melcher *et al*. (2002)				
Lamar River, WY, USA	helicopter; Probe-1	Marcus *et al*. (2003)	X			
Waimakariri River, New Zealand	plane; Zeiss LMK15	Westaway *et al*. (2003)	X			
Durance, France	UAV; non-metric 35 mm camera	Chaponnière (2004)	X			
River Tummel, Scotland	plane; 35 mm colour camera and daedalus 1260	Gilvear *et al*. (2004)	X			
Soda Butte Creek , WY, USA	helicopter; ADAR and Probe-1	Legleiter *et al*. (2004)	X			
Sagavanirktok River, AK, USA	frozen surface; GPR	Lunt and Bridge (2004)		X		

(*Continued*)

Table I (*Continued*)

Sites	Platform; sensor	References	Spectral	GPR	Lidar	Stereo
Colorado River, CO, USA	helicopter; SHOALS 1000-T	Davis *et al.* (2005)			X	
Tofino Creek, BC, Canada	plane; CASI	Leckie *et al.* (2005)	X			
Yakima River, WA, USA	plane, helicopter; SHOALS 1000-T	Millar *et al.* (2005)			X	
Lamar River, WY, USA	plane; AISA	Legleiter and Roberts (2005)	X			
Sainte-Marguerite River, QC, Canada	helicopter; XEOS	Carbonneau *et al.* (2006)	X			
Middle Fork Salmon River, ID, USA	plane; EAARL	McKean *et al.* (2006)			X	
Platte River, NE, USA	plane; EAARL	Kinzel *et al.* (2007)			X	
Ain and Drôme Rivers, France	UAV; Canon Powershot G5	Lejot *et al.* (2007)	X			

remain: in short, active methods imply heavy logistics and great costs, and hence have been first studied with simulated data rather than in the field (Lesaignoux, 2006; Lesaignoux *et al.*, 2007). Meanwhile, for local-scale hydrologic studies, in small streams, where centimetric precision is required, there is a big issue in assessing the potential of very high spatial resolution imagery as a tool to map river depth or immersed topography. This is the topic of the two studies presented in the second part of this paper.

II Review of the remote sensing techniques for bathymetry

Most methods employed in the riverine environment have first been developed and tested for the marine environment (Hickman and Hogg, 1969; Polcyn *et al.*, 1970; Lyzenga, 1978; Fryer, 1983; Morel, 1998). The theoretical background of the methods described hereafter comes largely from these works. The review is divided into two parts: first, the theoretical background of each method; second, the experimental results obtained in terms of feasibility, characteristics and quality of the measure.

1 Principle of the different methods

a Spectral methods: These methods, using passive optical imagery, are based on the fact that light is attenuated through the water column. Thus, image information is related to water depth. As a consequence, these methods do not give access to the absolute position of the river bottom (river-bed topography). Several publications have proposed methods based on image classification (Hardy *et al.*, 1994; Marcus *et al.*, 2003; Gilvear *et al.*, 2004; Leckie *et al.*, 2005). In these works, depth is a descriptive parameter among others, such as bottom type or hydrodynamic unit. The main objective is often to map and characterize the river and its habitats.

A second method, with a physical background, has also been quite widely used.

When the effects due to scattering in the water and internal reflection at the water surface ere neglected, light energy decreases exponentially through the water column (Polcyn *et al*., 1970; Lyzenga, 1978). Lyzenga (1978) thus proposed using a variable, defined by Xi = ln (Li – Lio), with i, spectral band index; Li, radiance measured by the sensor; Lio, radiance of a theoretical infinite water column. The Xi variable is approximately linearly correlated to the depth. Remaining internal reflection effects are significant only for very shallow water and high bottom reflectance. For a given wavelength, atmospheric condition and bottom type, extinction depth value depends on the attenuation coefficient of the water, which mainly depends on water turbidity. Hence, the possibility of measuring depth strongly depends on turbidity conditions.

In addition, an interesting piece of work should be cited here, even though it has not yet been applied to riverine environments. Morel (1998) proposed a method to derive water depth from remote sensing images without in situ measured depths. The method, called 4SM, uses shallow areas of the image to derive ratios Xi/Xj for all pairs of spectral wavelengths i and j. With these data and the attenuation coefficients given by Jerlov (1976), a digital elevation model and a low-tide view (corresponding to bottom reflectance) are computed.

b Stereophotogrammetry: Photogrammetry includes a set of techniques for deriving spatial information from images. Among these techniques, stereorestitution consists of determining terrain elevation from several pictures of the same area taken with different viewing angles. Indeed, within two images of the same area, one – motionless – point will have a different location because of: (1) the sensors' internal characteristic differences (if two different sensors are used); (2) different positions of the two sensors; (3) different viewing angles; (4) point relative height (see Figure 1).

It is thus possible to calculate point heights from their positions within the two images. The information needed is: (1) positions of the image points; (2) sensor internal geometry; (3) sensor external geometry.

In the particular case of through-water photogrammetry, the air/water interface implies additional processing. Refraction

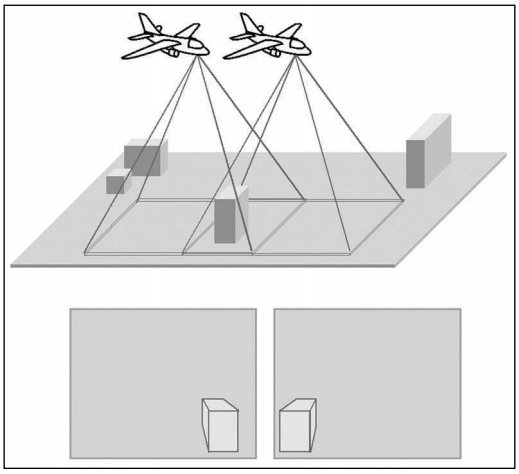


Figure 1 The stereoscopic effect: image acquisition (3D); stereo pair (2 × 2D)

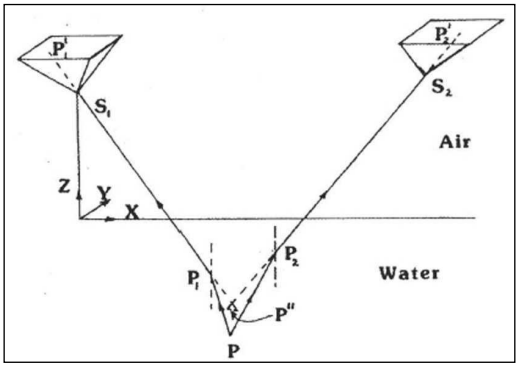


Figure 2 Geometry of through-water photogrammetry (from Fryer, 1983). P is the actual position of the immersed point, P'' is the apparent point. P_1 and P_2 are the intersections of light rays with the water surface. S_1 and S_2 are the optical centres of the two cameras. P'_1 and P'_2 are the image points of the point P

through water surface leads to apparent depths inferior to the actual ones (see Figure 2, where P″ is the apparent position of P). Waves and specular reflection add extra error sources (Okamoto, 1982; Fryer, 1984; 1985; Feurer *et al*., 2007).

c Ground penetrating radar (GPR): The principle of ground penetrating radar is the following (see Figure 3): one antenna generates an electromagnetic wave, which is transmitted, absorbed and reflected by the media and interfaces between two media. The part of the energy returning to the sensor is received by the antenna and recorded. Record shape (echo amplitude and/or two-way time – see Figure 4) allows one to determine the geometry of the crossed media. For instance, interfaces between two media provoke strong reflections that are generally easily detectable. A quite detailed understanding of the physics associated can be found in Davis and Annan (1989).

GPR was first developed for geological studies, and its use was then extended to hydrogeological and hydrological studies. It has also been used to measure lake or river depths, either when their surface is frozen or during flood events. Physically, both the air/water and the water/ground interfaces return echoes, so water thickness can be measured.

d Lidar (Light detection and ranging): Lidar is the name of an active sensor. Two pulses of different wavelengths are sent out. The near-infrared one only penetrates a few centimetres and is hence quickly attenuated and returned by the water surface. The green one penetrates the water and is returned by the bottom. Measuring the signal travel times allows calculation of the water depth (see Figure 5).

Laser pulses are deflected by a rotating mirror, which allows ground scanning across the flight line, in front of the platform. Water depth calculation algorithms can use various

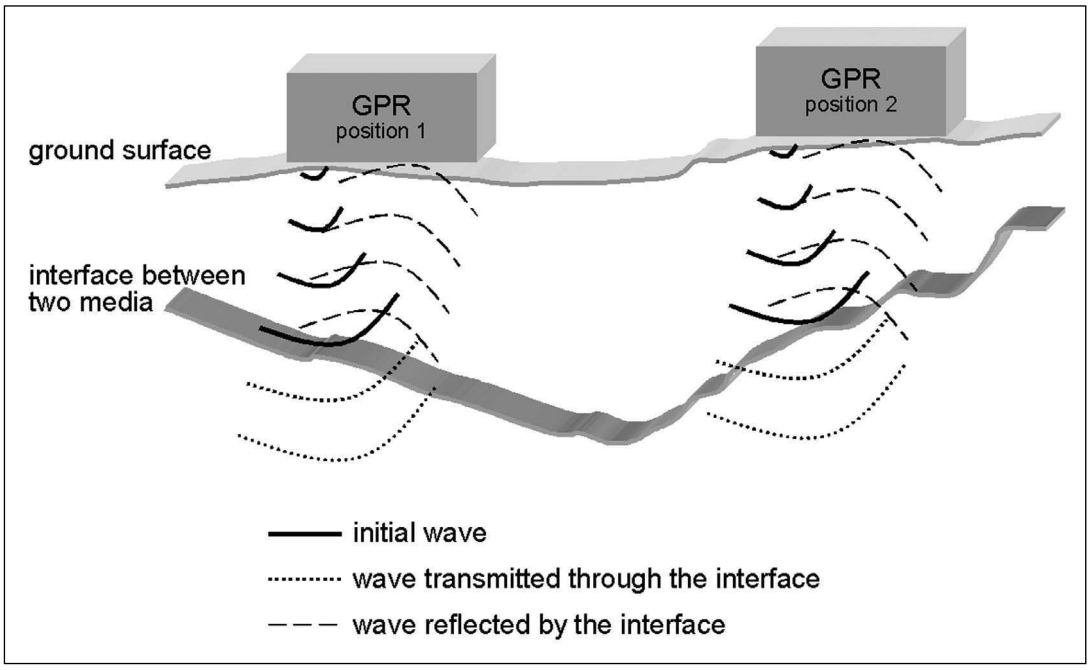


Figure 3 The principle of ground penetrating radar (GPR)

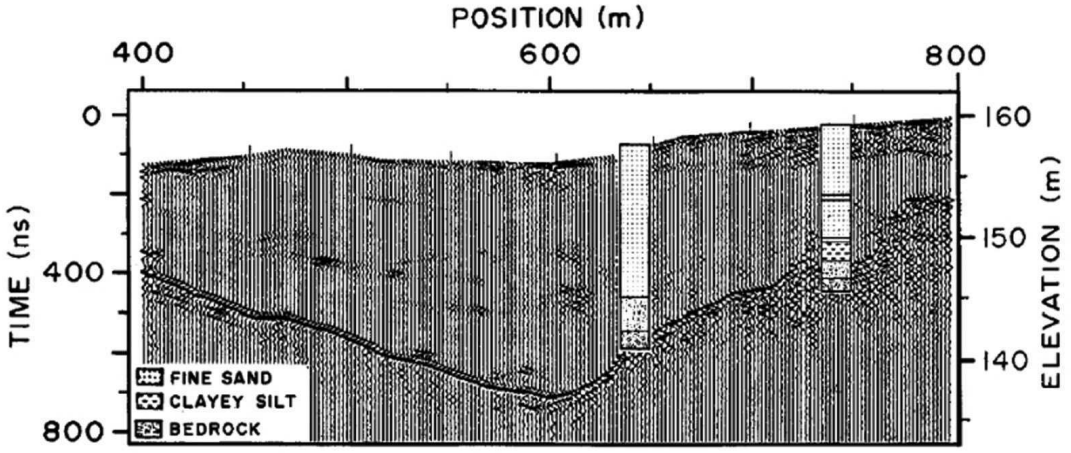


Figure 4 Example of record obtained by GPR (Davis and Annan, 1989). Every single return full waveform has been put vertically side by side so that the whole cross-section is described

wave returns (Pe'eri and Philpot, 2007; Allouis and Bailly, 2008): (1) infrared return: strongly absorbed, penetrates very little in water, used to determine the air/water interface; (2) red return: due to Raman diffusion, characterizes the volume diffusion; (3) first green return: water interface slightly reflects the green pulse – when significant, this first green return can help in the localization of the water surface; (4) last green return, corresponding to river bottom.

The bibliography for bathymetric lidar is essentially focused on applications in coastal marine environment (for instance, Hoge *et al.*, 1980; Lyzenga, 1985; Muirhead and Cracknell, 1986; Irish and Lillycrop, 1997; 1999; Parson *et al.*, 1997; Irish and White, 1998; Cracknell, 1999, Guenther *et al.*, 2000; Buonaiuto and Kraus, 2003; Fitzgerald *et al.*, 2003; Storlazzi *et al.*, 2003). As noticed by Wozencraft and Millar (2005), lidar river bathymetry remains rare. At present the only two peer-reviewed works are Hilldale and Raff (2007) and Kinzel *et al.* (2007). In addition, one can find an increasing number of conference/workshop presentations (Millar *et al.*, 2005; McKean *et al.*, 2006; Pe'eri and Philpot, 2007; Bailly *et al.*, 2008).

2 Measurement characteristics and scale – applicability

a Potential of passive optical imagery: spectral methods and stereophotogrammetry: Applicability of these methods mainly depends on the solar energy transmitted through the water column and reflected by the river bottom, which must be visible. As a consequence, measurement is severely limited in turbid waters, locally impeded by overhanging vegetation or specular reflections (sun glints); maximum measurable depth depends on water clarity. As noticed by Lejot *et al.* (2007), a limit of around 1 m is often reported for gravel-bed rivers (Winterbottom and Gilvear, 1997; Brasington *et al.*, 2003), but some experiments have been done for rivers deeper than 3 m (Lyon *et al.*, 1992; Lejot *et al.*, 2007), and even 10 m (Kumar *et al.*, 1997). These techniques perform a pixel-based image analysis. Thus, depth measurement is spatialized on a regular grid. Depth measurement planimetric resolution ranges from 5.6 cm (Brasington *et al.*, 2003) to 36.25 m (Kumar *et al.*, 1997), depending on sensor and data processing. Using images implies finding a compromise

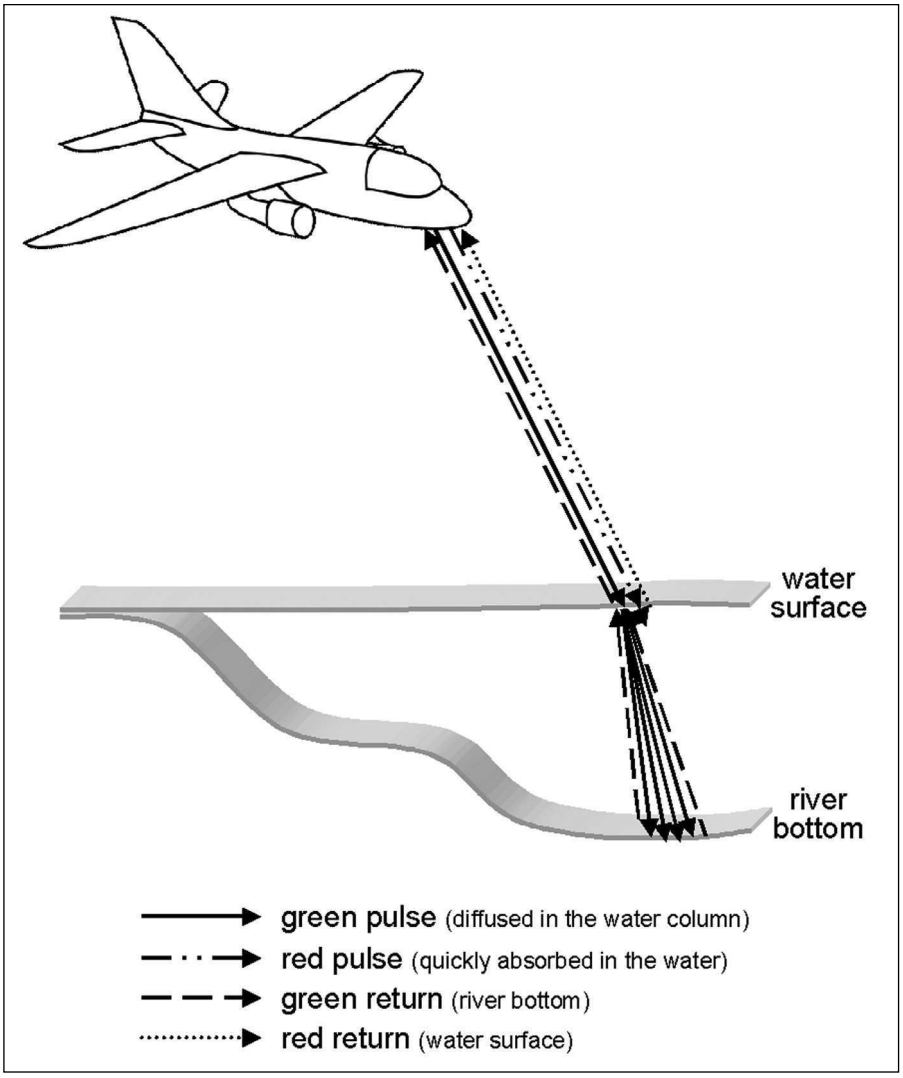


Figure 5 The principle of lidar

between planimetric resolution and spatial coverage of each image (and thus global cost). As reported by Gilvear *et al.* (2004), data processing strongly depends on study site and experiment conditions (bottom spectral heterogeneity, turbidity), and error sources are diverse (riparian vegetation shadows, sun glints). Most often, the results are qualified by giving the correlation between observed and computed data. A few references qualify the results in terms of mean error and standard deviation of the errors. With very high spatial resolution (centimetric ground pixels), measure precision is no better than 20 cm and measure accuracy around 10 cm. Working scales mainly depend on sensors and platforms used. For large streams (over 200 m wide), satellite imagery can be used. For smaller streams (between 20 and 200 m wide), airborne remote sensing is used.

Works dealing with remote sensing of smaller streams are less numerous, because of spatial resolution limitations (Gilvear *et al.*, 2004).

b Potential of GPR: Following the work of Annan and Davis (1977), Kovacs (1978) measured water depths up to 5 m under 2 m thick ice, and Moorman and Michel (1997) measured water depths up to 20 m, both on frozen lakes. Most often, GPR is used very close to the surface of the river, frozen river, bridge, cable, or low-flying helicopter. At present, only one reference to GPR mounted on a helicopter exists (Melcher *et al.*, 2002). GPR is most often used along a transect (cable, bridge). Creutin (2001) mentioned a survey in which a 200 m long transect was measured within 10 minutes. Using a helicopter, Melcher *et al.* (2002) flew over three sites spanning 100 km within 60 minutes (characteristics of each site are not given). Resolution in elevation mainly depends on the frequency used. The higher the frequency, the higher is the resolution, approximately a third of the wavelength: with a 100 MHz radar, vertical resolution is about 10 cm (Spicer *et al.*, 1997). Due to the fact that water depth is derived from a travel time, precision and accuracy of the measure depend on how well the medium characteristics are known. Penetration depth is best for low water conductivities and low electromagnetic wave frequencies. This leads (see above) to a compromise between penetration depth and vertical resolution. Penetration depth in pure water with a 100 MHz GPR is about 10 m (Spicer *et al.*, 1997). GPR can be used through only low-conductivity water, less than 1000 S cm^{-1}, and sediment concentration lower than 10,000 mg L^{-1} (Creutin, 2001).

c Potential of bathymetric lidar: This method encounters the same limitations as passive optical ones concerning the overhanging vegetation, but does not depend on illumination conditions (Hilldale and Raff, 2007). Nevertheless, this technique is still sensitive to water turbidity. Energy of laser pulse allows the penetration of the water column only typically up to two or three times the Secchi depth. The technique involves algorithms that detect and discriminate energy peaks, which is hardly possible for depths lower than 0.50 m (Lesaignoux *et al.*, 2007). Depth measures obtained with bathymetric lidar consist of a non-regular point cloud. Laser pulse footprints have a typical 2 m diameter extent. It is larger on the river bottom because of light dispersion and refraction through water. The planimetric positioning accuracy of each spot ranges from 1 to 5 m depending on the positioning technology used (see Irish and Lillycrop, 1999, for SHOALS specifications). Vertical accuracy is minimally 0.20 m. Swath width depends on the sensor, acquisition mode and flight height. It is roughly included within the range of 0.5 to 0.75 h where h is the flight height. Ordinarily, flight height is about 200 to 500 m, which gives about 100 to 400 m swath widths. The area covered within one hour ranges from about 20 to 60 km^2.

3 Synthesis

This review shows that, among the four methods presented, the majority of studies concern the spectral methods. Some very specific applications use GPR. In addition, river applications of bathymetric lidar are becoming more numerous. There is a crucial lack of experiments in through-water photogrammetry, with only one test, on the Ashburton River, New Zealand (see Table 2).

In addition, it is noticeable that image acquisition from ultra-light aircrafts or unmanned aerial vehicles (UAV), with off-the-shelf sensors, is still very new in the literature (Lejot *et al.*, 2007). Hence, we decided to test the two passive methods with this specific equipment, easily exploitable in field and affordable for the majority.

Table 2 River depth mapping by remote sensing: characteristics of each method

Technique	Measure density	Accuracy	Data acquisition	Applicability	Remarks
Lidar	2×2 m to 5×5 m	XY: 1 to 2.5 m Z: 0.18 to 0.35 m	1 hour for 70 km^2	0.5 to 60 m according to turbidity, no overhanging vegetation	in development for shallow waters
GPR	depends on protocol	Z: 0.30 m at 100 MHz (estimated)	2 $m.s^{-1}$ along a cable, airborne in test	turbid and flooding rivers	vertical precision decreases with max. penetration depth
Spectral	pixel size (5.6 cm to 36.25 m)	XY: subpixel Z: highly variable (min. 0.20 m)	aerial or satellite imagery	clear water, homogeneous bottoms, no overhanging vegetation	need for calibration data
Photogrammetry	pixel size	XY: subpixel Z: 0.20 cm	aerial imagery, 60% overlap	clear water, homogeneous bottoms, no overhanging vegetation	data taken from the unique available reference

III Case study of small-scale river bathymetry with small-format cameras and ultra-light aircraft

1 Test site and data acquisition

The test site is located on the middle Durance River, France. This part of the river is a 60 km long regulated stretch, downstream of the Serre-Ponçon dam. Water level and discharge are fairly low and constant in the natural bed of the river and the shallow waters are usually clear. Four tributaries still bring small natural variations, so this section was chosen as a test site for hydrobiological studies. River width varies between 5 and 100 m. The mean depth is around 0.30 m, with maximum depths around 2 m. Our study was focused on two test sites of about 1 km length (see Figure 6). On these two test sites, depth varies from 0 to 1.6 m with a mean of 0.26 m; width ranges from 10 to 50 m.

Images were acquired from ultra-light aircrafts and UAVs. Such aircraft can fly relatively slowly and low. In addition, such aerial platforms allow acquisition at a reduced cost and improve the acquisition flexibility. Usually, UAVs are considered as scale models and benefit from lighter regulation. Images treated with the radiometric method were acquired for September 2004, with a 35 mm film NIKON F100 camera aboard a Pixy (Asseline *et al.*, 1999). We used natural colour, colour infrared, and tungsten films, which cover various spectral bands. Flying heights were between 50 and 150 m, giving ground resolutions between 1 and 3 cm. Some targets (black and white test cards) were installed in the field in order to retrieve acquisition geometry.

A second image acquisition campaign was held in September 2005, with a view to testing the photogrammetric method. We used a Sony DSC-F828 small-format non-metric digital camera. We also used a polarizing filter in order to limit sun glints. The sensor was fixed on a custom-built platform, hand-held off board a Ballerit HM-1000 ultra-light aircraft. Within such conditions

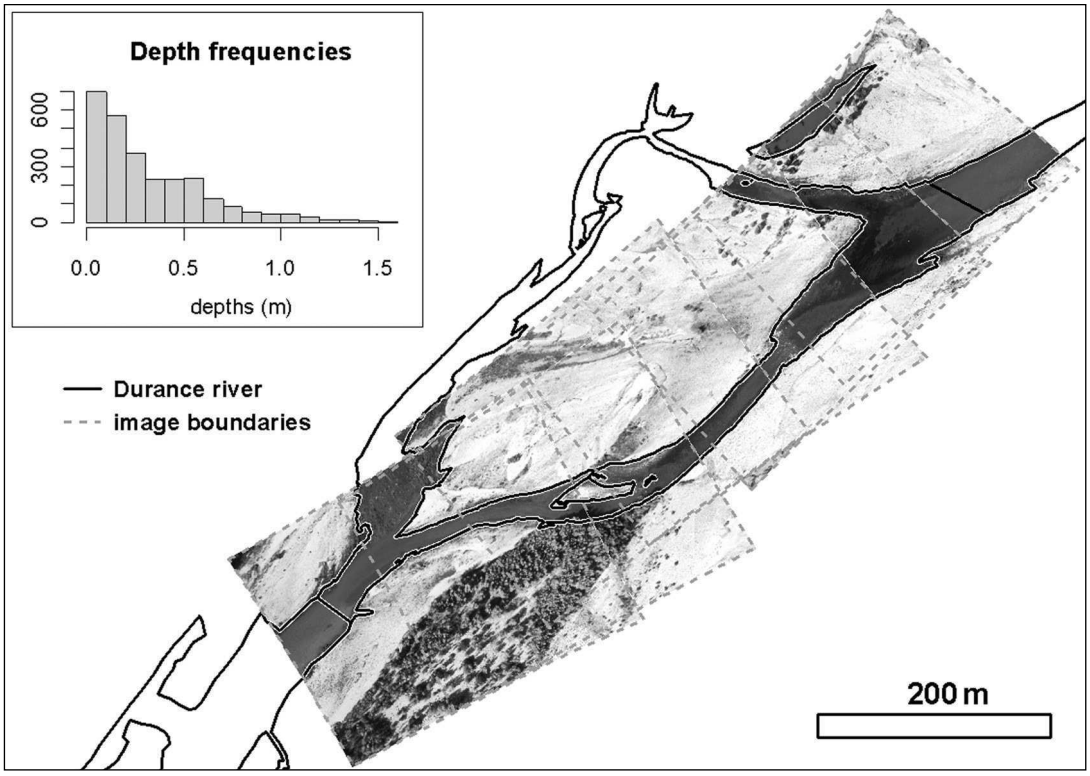


Figure 6 Test site on the Durance River and left channel depth distribution (histogram). The river flows from top right to bottom left. An image band is superimposed on the left channel

Source: Images from http://www.lavionjaune.fr

the photographer is able to set the rotation of the polarizing filter and even rectify the position of the platform to the near vertical in real time. About 200 red crosses were painted as ground control points. Flying height and speed were fixed, and a timing interval was determined in order to obtain consistent flying axes with 60% overlapping. With an average flying height of 220 m, the ground resolution is approximately 0.09 cm. Independent validation data sets were acquired with a Leica TCRA1102 total station, according to the method published by Le Coarer and Dumont (1995b). Ground control points have been positioned with either the same equipment or a Leica 1200 differential GPS in RTK mode.

2 Methodology

a Radiometric models: Using Lyzenga's (1978) method, Winterbottom and Gilvear (1997) exploited the logarithmic relationship between image reflectance and water depth through regression analysis. Orthophotos were produced with ERDAS Imagine Orthobase, thanks to the ground control points visible in the images. Three image blocks, corresponding to the three film types colour infrared, tungsten, and natural colours), were formed. These stereo models have RMSE of 2.26 (colour infrared), 2.88 (tungsten) and 3.87 pixels (natural colours), with ground pixel sizes respectively of 1 cm, 2 cm and 1 cm. Once the georeferencing step

was done, the regression analysis between image data and ground truth followed. One-third of the ground truth points were saved as an independent validation data set. The remaining two-thirds were used to determine the relationship between radiometry and water depth. Two sub-areas (pools and riffles) for each image were analysed. The coefficients A, B, C and D of the following equation were determined for each image and each sub-area:

$$\text{Depth} = A * \ln(R) + B * \ln(G) + C * \ln(B) + D$$

with R, G and B the red, green and blue image bands.

The first regressions performed on a pixel base showed R^2 values ranging from 0.2 to 0.5 depending on photographic emulsion and river sector. When comparing the depths predicted by these models to the actual ones, the correlation ranges between 0.23 and 0.60. Analysis of differences between predicted and actual depths shows a strong sensitivity of the regression laws to features such as residual sun glints or local algal cover. To reduce the effect of these local features, different median spatial filters, with window sizes from 1×1 to 200×200 pixels, were used. The same regression analysis was done for each of these window sizes.

b Through-water photogrammetry: This method takes advantage of the image geometric information. Knowing the acquisition geometry and the position of a point within two images, the (x, y, z) position of this point can be computed. In the case of a riverbed, an additional issue has to be taken into account: refraction of light rays through the air/water interface. In order to measure depths from the set of images, we followed a three-step procedure: (1) geometric calibration; (2) stereo measurement; (3) processing of the refraction effect. Interior calibration consisted of lens distortion correction, and determination of the position of the CCD matrix relatively to the body of the camera and the optical system. Exterior orientation was done for each stereo pair with bundle adjustment. Stereorestitution implies image point identification between the two images. This can be accomplished with automatic matching algorithms or by manual stereo matching. For the latter technique, we used special glasses and software allowing the operator to see the stereo model in relief. The main advantage of the latter technique is the noticeable reduction of false matching. Finally, the effect of refraction was taken into account. Interface position was derived from the bank lines. Given the positions of the river bed point, of the interface, and the stereo pair acquisition parameters, it was possible to compute the geometry of incident rays and thus the intersection of refracted rays (Feurer *et al.*, 2008).

3 Potential of the methods

a Radiometric models: An optimal window size between 50 and 100 pixels occurred for both the riffles and pools (Figure 7). This corresponds to an approximate ground resolution between 1 and 2 m. This is consistent with the results obtained by Carbonneau *et al*. (2006) on the same type of river. The regression laws corresponding to the optimal coefficient of determination were then used to produce depth maps. More than 500 independent immersed points were used for the validation, within the different sectors of the river, and for the different film emulsions. The mean error ranged between 0.03 and 0.13 m. The root mean square error ranged between 0.04 and 0.16 m. The detailed error statistics are summarized in Table 3. As a comparison, actual depths ranged between 0 and 0.90 m, with a standard deviation of 0.22 m and a mean value of 0.40 m. There are still residual errors related to sun glint and algal cover, which are not taken into account by the logarithmic model. A way

Table 3 Radiometric method: comparison with an independent ground truth data set; RMSE is for root mean square error and ME for mean error

Emulsion	Riffles	Pools
colour infrared pixel: 1 cm	RMSE: 0.04 cm ME: 0.03 cm	RMSE: 0.16 cm ME: 0.13 cm
natural colours pixel: 1 cm	RMSE: 0.07 cm ME: 0.05 cm	RMSE: 0.09 cm ME: 0.07 cm
tungsten pixel: 2 cm	RMSE: 0.06 cm ME: 0.04 cm	RMSE: 0.13 cm ME: 0.10 cm

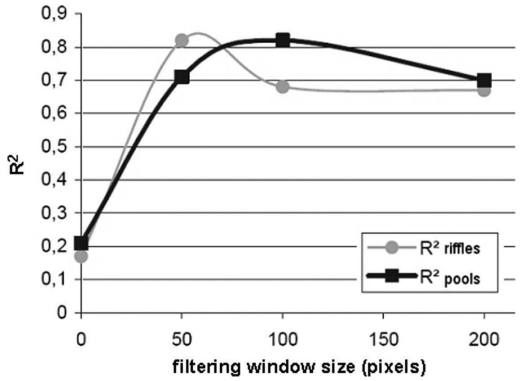


Figure 7 Determination of the optimal spatial resolution for the radiometric models method

to improve these results is to refine the algorithm by applying different regressions to more numerous sectors, for instance sectors showing bright and dark bottoms. This has been tested on one natural-colour image and decreased the RMSE from to 0.09 to 0.06 m in the pools with bright bottoms.

b Through-water photogrammetry: Interior orientation and lens calibration was done from four stereo pairs of a known scene, including 50 points in three points, whose position is known with a millimetric accuracy. The Etalonnage software (Egels, 2000) allowed reduction of the RMSE of the models from 5 to 0.25 pixels by taking into account a radial distortion. The exterior orientation parameters were determined for each of the nine stereo pairs covering the full 800 m long reach by the Poivilliers E software, described in Egels (2000). The residual parallax of each stereo model ranged from 0.17 to 0.85 pixels. Due to turbidity and clogging conditions, the distribution of matched points was not uniform. Due to diffusion phenomenon linked to water turbidity, the 0.09 m ground resolution hardly allowed the detection of individual cobble or pebble. Typically, these objects could have been pointed out in very shallow waters, where their sharp shadow provided a good contrast. In deeper waters, the matched points corresponded most often to a limit between algal cover and bottom without immersed vegetation.

The mean error on the whole reach was 0.10 m. The standard deviation of the error was 0.19 m. The deviation of the error was 0.13 m for stereo pairs with better acquisition condition (B/h ratios around one), which should be compared to 0.20 m, the standard deviation of the error for the stereo pairs with a B/h around 0.50. A positive bias can be noticed for all the stereo pairs. This systematic error can be explained by several factors. The river bottom surveyed in field is filtered; indeed, operators survey the mean bottom level and avoid taking into account the local variations due to an isolated rock or immersed vegetation covering the riverbed. In addition, in the case of this experiment, most points were taken on the edge of a vegetated area, which increased the relative influence of these areas. This requires further study, in particular with different acquisition geometries and scales allowing the detection of individual rocks and coarse pebbles.

IV Conclusion

This review shows that, among the four presented methods, most studies concern spectral methods; most often, data acquisition is from a plane. In the light of this work, we decided to test the two passive methods with very high spatial resolution and specific equipment easily exploitable in field and affordable for the majority. The first study, described with more detail in Chaponnière (2004), used radiometric models extrapolated at the image scale from calibration points. This work showed that the smallest ground resolution is not the most effective; ground pixels of about 1 m seem indeed to produce the best results. This leads to the conclusion that very high-resolution satellite imagery is a fair compromise when using such models.

The second study, whose method was presented in Feurer *et al*. (2008), showed that through-water photogrammetry is possible with such platforms and cameras, with special care taken about geometric calibration and refraction correction. On the other hand, measure precision is proportional to the ground resolution, and measure accuracy is critically sensitive to the geometry acquisition and the accuracy of these parameters when computed from ground control points. Some improvements must therefore be done on the control of these parameters in order to obtain a satisfactory accuracy and precision for long flight lines.

Finally, the bathymetric lidar, which was not tested here, appears as a very interesting tool to monitor river bathymetry, because active laser allows measurement even within bad illumination conditions or with low turbidity. On the other hand, its ability to map depth lower than 0.50 m has not yet been demonstrated. For smaller depths, the use of other algorithms and other wavelengths (such as a red one, to detect the Raman diffusion peak, for instance) is necessary (Pe'eri and Philpot, 2007; Allouis *et al*., 2008).

References

Allouis, T. and **Bailly, J.** 2008: On the use of Raman, infra-red, and green waveforms in bathymetric LiDAR for very shallow waters. In European Geosciences Union (EGU) General Assembly, 14–18 April, Vienna.

Annan, A. and **Davis, J.** 1977: Impulse radar applied to ice thickness measurements and fresh water bathymetry. Technical report, Current Research Part B, GSC Paper 77-1b, Geological Survey of Canada, 63–65.

Asseline, J., de Noni, G. and **Chaume, R.** 1999: Conception et utilization d'un drone à vol lent pour la télédétection rapprochée. *Photo Interprétation* 37, 3–13.

Bailly, J., Le Coarer, Y., Allouis, T., Stigermark, C.J., Languille, P. and **Adermus, J.** 2008: Bathymetry with LiDAR on gravel bed-rivers: quality and limits. In European Geosciences Union (EGU) General Assembly, 14–18 April, Vienna.

Beres, M.J. and **Haeni, F.** 1991: Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. *Ground Water* 29, 375–86.

Brasington, J., Langham, J. and **Rumsby, B.** 2003: Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53, 299–316.

Bryant, R.G. and **Gilvear, D.J.** 1999: Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland. *Geomorphology* 29(38445), 307–21.

Buonaiuto, F. and **Kraus, N.** 2003: Limiting slopes and depths at ebb-tidal shoals. *Coastal Engineering* 48, 51–65.

Carbonneau, P.E., Bergeron, N. and **Lane, S.N.** 2006: Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Lamdforms* 31, 1413–23.

Chaponnière, P. 2004: Télédétection et bathymétrie des rivières: application à la Durance. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG).

Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, P.F., Melcher, N.B., Thurman, M.E., Plant, W.J. and **Keller, W.C.** 2000: Measuring stream discharge by non-contact methods: a proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters* 27, 553–56.

Cracknell, A. 1999: Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones-an update. *International Journal of Remote Sensing* 20, 485–96.

Creutin, J. 2001: Local remote sensing of rivers (418). Technical Report, IIHR-Hydroscience and Engineering, University of Iowa.

Davis, J.L. and **Annan, A.** 1989: Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37, 531–51.

Davis, P.A., Gonzales, F.M., Brown, K.M. and **Melis, T.S.** 2005: Evaluation of the SHOALS 1000T bathymetric LIDAR system for monitoring channel sediment within the Colorado River in Arizona. In American Geophysical Union (AGU) Fall meeting.

Egels, Y. 2000: Photogrammétrie et micro-ordinateur. *XYZ* 82, 31–35.

Feurer, D., Bailly, J., Le Coarer, Y., Puech, C. and **Viau, A.A.** 2007: On the use of very high resolution optical images to map river bathymetry: upscaling from aerial to satellite imagery. In Second Space For Hydrology Workshop 'Surface water storage and runoff: modeling, in-situ data and remote sensing', 12–14 November, Geneva.

Feurer, D., Bailly, J. and **Puech, C.** 2008: Measuring depth of a clear, shallow, gravel-bed river by through-water photogrammetry with small format cameras and ultra light aircrafts. In *Geophysical Research Abstracts* 10, European Geosciences Union (EGU) General Assembly, 14–18 April, Vienna.

Fitzgerald, D., Zarillo, G. and **Johnston, S.** 2003: Recent developments in the geomorphic investigation of engineered tidal inlets. *Coastal Engineering Journal* 45, 565–600.

Fryer, J. 1983: Photogrammetry through shallow water. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying* 38, 25–38.

— 1984: Errors in depth determined by through-water photogrammetry. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying* 40, 29–39.

— 1985: Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry. *Photogrammetric Record* 11, 745–53.

Gendreau, N. and **Puech, C.** 2002: Hydrology and remote sensing information. *Houille Blanche-Revue Internationale de l'Eau* 1, 31–34.

Gilvear, D.J., Davids, C. and **Tyler, A.N.** 2004: The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology. River Tummel, Scotland. *River Research and Applications* 20, 795–811.

Gilvear, D.J., Waters, T.M. and **Milner, A.M.** 1995: Image analysis of aerial photography to quantify changes in channel morphology and instream habitat following placer mining in interior Alaska, Freshwater Biology 34, 389–98.

Guenther, G., Brooks, M. and **LaRocque, P.E.** 2000: New capabilities of the 'SHOALS' airborne lidar bathymeter. *Remote Sensing of Environment* 73, 247–55.

Haeni, F., Buursink, M.L., Costa, J.L., Melcher, N.B., Cheng, R.T. and **Plant, W.J.** 2000: Ground-penetrating radar methods used in surface-water discharge measurements. In Noon, D.A., Stickley, G.F. and Longstaff, D., editors, *GPR 2000*, 8th International Conference on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, 494–500.

Hardy, T.B., Anderson, P.C., Neale, M.U. and **Stevens, D.K.** 1994: Application of multispectral videography for the delineation of riverine depths and mesoscale hydraulic features. In Marston, R. and Hasfurther, V., editors, *Effects of human-induced changes on hydrologic systems*, Symposium of the American Water Resources Association, Jackson Hole, Wyoming, 445–54.

Hickman, G.D. and **Hogg, J.E.** 1969: Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment* 1, 47–58.

Hilldale, R.C. and **Raff, D.** 2007: Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 773–83.

Hoge, F., Swift, R.N. and **Frederick, E.B.** 1980: Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. *Applied Optics* 19, 871–83.

Irish, J. and **Lillycrop, W.** 1997: Monitoring New Pass, Florida, with high density lidar bathymetry. *Journal of Coastal Research* 13, 1130–40.

— 1999: Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 123–29.

Irish, J. and **White, T.** 1998: Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry. *Coastal Engineering* 35, 47–71.

Jerlov, N. 1976: *Marine optics*. Amsterdam: Elsevier.

Kinzel, P.J., Wright, C.W., Nelson, J.M. and **Burman, A.R.** 2007: Evaluation of an experimental LiDAR for surveying a shallow, braided, sand-bedded river. *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 838–42.

Kovacs, A. 1978: Remote detection of water under ice-covered lakes on the north slope of Alaska. *Arctic* 31, 448–58.

Krauss, K. and **Waldhäusl, P.** 1998: *Manuel de photogrammétrie*. Paris: Editions Hermès.

Kumar, V.K., Palit, A. and **Bhan, S.** 1997: Bathymetric mapping in Rupnarayan-Hooghly river confluence using Indian remote sensing satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 18, 2269–70.

Lane, S., Chandler, J. and **Richards, K.** 1994: Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 19, 349–68.

Leckie, D., Cloney, E., Jay, C. and **Paradine, D.** 2005: Automated mapping of stream features with high-resolution multispectral imagery: an example of the capabilities. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71, 145–55.

Le Coarer, Y. and **Dumont, B.** 1995a: Virtual rivers for the study of aquatic fauna. *Ingénieries* 2, 21–28.

— 1995b: Modelling stream morphodynamics for research in habitat-aquatic fauna relationships.

Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 337/339, 309–16.

Legleiter, C. and **Roberts, D.** 2005: Effects of channel morphology and sensor spatial resolution on image-derived depth estimates. *Remote Sensing of Environment* 95, 231–47.

Legleiter, C., Roberts, D.A., Marcus, A.W. and **Fonstad, M.A.** 2004: Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream habitat: physical basis and feasibility. *Remote Sensing of Environment* 93, 493–510.

Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M. and **Allemand, P.** 2007: Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 1705–25.

Lesaignoux, A. 2006: Modélization et simulations de trains d'ondes LiDAR 'vert': application à la détection de faibles lames d'eau en rivière. Master's thesis, Université Montpellier II – CNAM.

Lesaignoux, A., Bailly, J. and **Feurer, D.** 2007: Small water depth detection from green lidar simulated full waveforms: application to gravel-bed river bathymetry. In Physics in Signal and Image Processing (PSIP) Fifth Internation Conference, 31 January–2 February, Mulhouse, France.

Lunt, A. and **Bridge, J.** 2004: Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska. *Sedimentology* 51, 415–32.

Lyon, J.G., Lunetta, R.S. and **Williams, D.C.** 1992: Airborne multispectral scanner data for evaluating bottom sediment types and water depths of the St. Mary's River, Michigan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58, 951–56.

Lyzenga, D.R. 1978: Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics* 17, 379–83.

— 1985: Shallow water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 6, 115–25.

Marcus, A.W., Legleiter, C.J., Aspinall, R.J., Boardman, J.W. and **Crabtree, R.L.** 2003: High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams. *Geomorphology* 55, 363–80.

McKean, J., Wright, W. and **Isaak, D.** 2006: Mapping channel morphology and stream habitat with a full waveform water-penetrating green lidar. In European Geosciences Union (EGU) General Assembly, 2–7 April, Vienna.

Melcher, N.B., Costa, J., Haeni, F., Cheng, R., Thurman, E., Buursink, M., Spicer, K., Hayes, E., Plant, W., Keller, W. and **Hayes, K.** 2002: River discharge measurements by using helicopter-mounted radar. *Geophysical Research Letters* 29(22), 2084, DOI: 10.1029/2002GL015525.

Mertes, L.A.K. 2002: Remote sensing of riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47, 799–816.

Millar, D., Woolpert, J.G. and **Hilldale, R.** 2005: Using airborne lidar bathymetry to map shallow river environments. In Coastal GeoTools '05, 56–57.

Moorman, B.J. and **Michel, F.A.** 1997: Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar. *Journal of Paleolimnology* 18, 61–73.

Morel, Y.G. 1998: Passive multispectral bathymetry mapping of Negril Shores, Jamaica. In Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, San Diego, 5–7 October.

Muirhead, K. and **Cracknell, A.** 1986: Airborne lidar bathymetry. *International Journal of Remote Sensing* 7, 597–614.

Muller, E., Decamps, H. and **Dobson, M.** 1993: Contribution of space remote sensing to river studies. *Freshwater Biology* 29, 301–12.

Okamoto, A. 1982: Wave influences in two-media photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 48, 1487–99.

Parson, L. Lillycrop, W. Klein, C. Ives, R. and **Orlando, S.** 1997: Use of lidar technology for collecting shallow water bathymetry of Florida Bay. *Journal of Coastal Research* 13, 1173–80.

Pe'eri, S. and **Philpot, W.** 2007: Increasing the existence of very shallow-water LIDAR measurements using the red-channel waveforms. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 45, 1217–23.

Polcyn, F., Brown, W. and **Sattinger, I.** 1970: The measurement of water depth by remote sensing techniques (8973-26-F). Technical Report, Willow Run Laboratories, Ann Arbor, MI: University of Michigan.

Roberts, A. and **Anderson, J.** 1999: Shallow water bathymetry using integrated airborne multi-spectral remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 20, 497–510.

Schmugge, T. J., Kustas, W. P., Ritchie, J. C., Jackson, T. J. and **Rango, A.** 2002: Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources* 25, 1367–85.

Spicer, K.R., Costa, J.E. and **Placzek, G.** 1997: Measuring flood discharge in unstable channels using ground-penetrating radar. *Geology* 25, 423–26.

Storlazzi, C., Logan, J. and **Field, M.** 2003: Quantitative morphology of a fringing reef tract from high-resolution laser bathymetry: Southern Molokai, Hawaii. *Bulletin of the Geological Society of America* 115, 1344–55.

Westaway, R., Lane, S. and **Hicks, D.** 2000: The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 209–26.

— 2001: Remote sensing of clear-water, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67, 1271–81.

— 2003: Remote survey of large-scale braided, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *International Journal of Remote Sensing* 24, 795–815.

Winterbottom, S.J. and **Gilvear, D.J.** 1997: Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. *Regulated Rivers: Research and Management* 13, 489–99.

Wozencraft, J. and **Millar, D.** 2005: Airborne lidar and integrated technologies for coastal mapping and nautical charting. *Marine Technology Society Journal* 39(3), 27–35.

Chapitre 4

Objectif de la thèse

Les trois chapitres précédents ont mis en lumière les problématiques suivantes :

La société, par une législation (lois françaises de 1992 et 2006 sur l'eau), des politiques (Politique Nationale de l'eau au Québec en 2002) et des directives (européenne n° 2000/60/CE) récentes, s'est donnée l'obligation d'être capable de caractériser et de définir l'état écologique d'un cours d'eau, en se donnant comme objectif à terme un bon potentiel écologique pour tous les milieux aquatiques (section 2.1). Cette obligation constitue une nouvelle contrainte à prendre en compte dans la gestion des nombreux usages de l'eau dans des bassins versants qui concentrent de nombreuses problématiques comme celui de la Durance (voir chapitre 1).

D'autre part, la communauté scientifique a mis en évidence l'intérêt d'outils établissant le lien entre paramètres physiques de la rivière et réponse de la faune aquatique (section 2.2). Ces outils sont gourmands en données caractérisant la géométrie tridimensionnelle du lit de la rivière, et la télédétection apparaît comme un moyen de subvenir à ce besoin (sections 2.3 et 2.4).

Enfin, une revue des travaux relatant l'usage de la télédétection pour la caractérisation de la topographie immergée de la rivière ou la cartographie des profondeurs montre que la majeure partie des travaux porte sur la cartographie des profondeurs à partir de la couleur de l'eau - modèles radiométriques (chapitre 3). Des lacunes existent donc quant aux techniques actives ou encore la photogrammétrie à travers l'eau. De plus l'utilisation de moyens légers (drone, ULM) est très limitée. La recherche et le

développement de méthodes restent donc ouvertes dans ce domaine.

En conséquence, il convient d'évaluer le potentiel d'autres techniques de télédétection pour la mesure de la géométrie du lit de la rivière.

Surtout utilisé localement sur des transects, ou sur des rivières gelées, le GPR semble souffrir d'un besoin de calibration et d'une certaine expertise pour l'interprétation du signal [Creutin, 2001]. Son usage à partir de plateforme aérienne est encore du domaine de la recherche [Costa, 2001, Melcher et al., 2002].

L'une des techniques les plus prometteuses semble être le LIDAR bathymétrique, développé à l'origine pour des applications marines. Son utilisation en rivière n'est pour l'instant pas opérationnelle et fait l'objet de recherches dont le nombre s'accroit actuellement [Bailly et al., 2007, Hilldale et Raff, 2007, Kinzel et al., 2007, Lesaignoux et al., 2007, Allouis et Bailly, 2008, Bailly et al., 2008, Hilldale, 2008, Kinzel et al., 2008, Millar, 2008]. Les premiers instruments et algorithmes ont en effet une limitation pour les faibles profondeurs.

Il existe donc une "niche[1]" pour une technique pouvant être appliquée à des rivières de faible profondeur comme la Durance, le Gardon, ou la rivière du Gouffre. Il s'agit de l'utilisation de la stéréophotogrammétrie.

L'objectif de la thèse, résumé en une phrase, est le suivant :

> Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie immergée de rivière avec des moyens légers par stéréophotogrammétrie à travers l'eau

Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière...

Comme on l'a rappelé plus haut, la caractérisation de l'état écologique des masses d'eaux, en particulier des rivières, a été rendue nécessaire par l'établissement de nouvelles législations, nationales et européennes. Le chapitre 2 a montré que cette pro-

[1] méthodologique, et non pas écologique !

blématique (comme bien souvent en hydrologie) incluait *un problème de mesure*, plus précisément de mesure des paramètres physiques de la rivière, et notamment de la topographie immergée.

Notre travail sera centré sur l'étude de la partie *immergée* de la rivière.

... avec des moyens légers...

Comme il a été précisé dans la section 2.3, une des principales limitations de la méthode de mesure sur le terrain est son coût [Marcus, 2002]. Si la mesure de la topographie immergée par lidar bathymétrique paraît prometteuse, elle conserve l'inconvénient d'être coûteuse et reste en cours de qualification pour les très faibles profondeurs [Lesaignoux et al., 2007, Allouis et Bailly, 2008, Bailly et al., 2008, Kinzel et al., 2008, Millar, 2008]. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier le potentiel d'une technique utilisant des moyens moins onéreux tels que le drone ou l'ULM. Quelques travaux utilisant la radiométrie pour l'estimation de la profondeur ont déjà été réalisés [Chaponnière, 2004, Lejot et al., 2007].

Un deuxième avantage de telles techniques est la flexibilité de leur utilisation. Cette caractéristique, requise dans le cas où l'on veut pouvoir effectuer une acquisition avec une bonne réactivité vis à vis des conditions terrain, est détaillée dans le chapitre 6.

... par stéréophotogrammétrie à travers l'eau

Comme on l'a vu plus haut, les techniques passives basées sur la couleur de l'eau sont les plus largement répandues. Il y a donc un manque d'expérience en matière d'utilisation de stéréophotogrammétrie à travers l'eau pour mesurer la topographie de rivière.

Or, dans le cas de rivières régulées, où d'une part les problématiques d'optimisation des usages de l'eau sont fortes, et d'autre part la profondeur est relativement faible, avec des périodes où l'eau est très transparente, il est intéressant d'évaluer le potentiel de cette méthode.

Cette méthode présente la particularité d'étudier le trajet de rayons lumineux dans deux milieux différents (air et eau). Les phénomènes de réfraction à travers la surface de la rivière devront donc être pris en compte.

Bilan : Le coeur de ce document est consacré à l'examen de la faisabilité et au développement d'une méthode de mesure par stéréophotogrammétrie à travers l'eau avec des moyens d'acquisition légers. Il s'agit de savoir d'une part si l'on peut fournir des données de topographie immergée par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. D'autre part, la qualité de la mesure obtenue sera évaluée par validation croisée avec des données de terrain indépendantes.

Finalement, l'intérêt, le potentiel, et le cadre d'application d'une telle méthode, ainsi que les perspectives dégagées par les résultats obtenus seront discutés.

Deuxième partie

Méthodes

Introduction à la deuxième partie

Ce sont les conditions spécifiques d'expérimentation ainsi que les applications thématiques qui guident le développement et la mise en place de la méthode de mesure du relief immergé de la rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. La revue de la littérature a montré que cette mesure était possible dans le cas de campagnes d'acquisitions photogrammétriques "classiques", c'est à dire avec des plateformes stables, munies de systèmes inertiels, de système de compensation du filé, utilisant des appareils grand format métriques [Westaway et al., 2000, Lane, 2000, Westaway et al., 2001].

L'objectif de cette introduction est d'examiner *a priori* les composantes du problème de mesure de la topographie du lit mouillé de rivière par stéréophotogrammétrie dans le cas de l'utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques. La chaîne reliant l'objet au capteur est décrite de manière analytique afin de préciser les contraintes spécifiques à notre travail.

Le schéma 4.1 représente cette chaîne. On y a retenu les cinq éléments principaux suivants :

1. les caractéristiques des images/du capteur
2. les conditions d'acquisition des images
3. la réfraction à l'interface
4. la traversée de la colonne d'eau
5. les caractéristiques propres de l'objet (ce que l'on cherche à mesurer)

L'utilisation de capteurs et de plates-formes légères, la traversée de l'interface air/eau et de la colonne d'eau apportent en effet non seulement des contraintes très fortes sur la faisabilité de la mesure mais aussi des sources d'erreurs géométriques multiples [Feurer et al., 2007b].

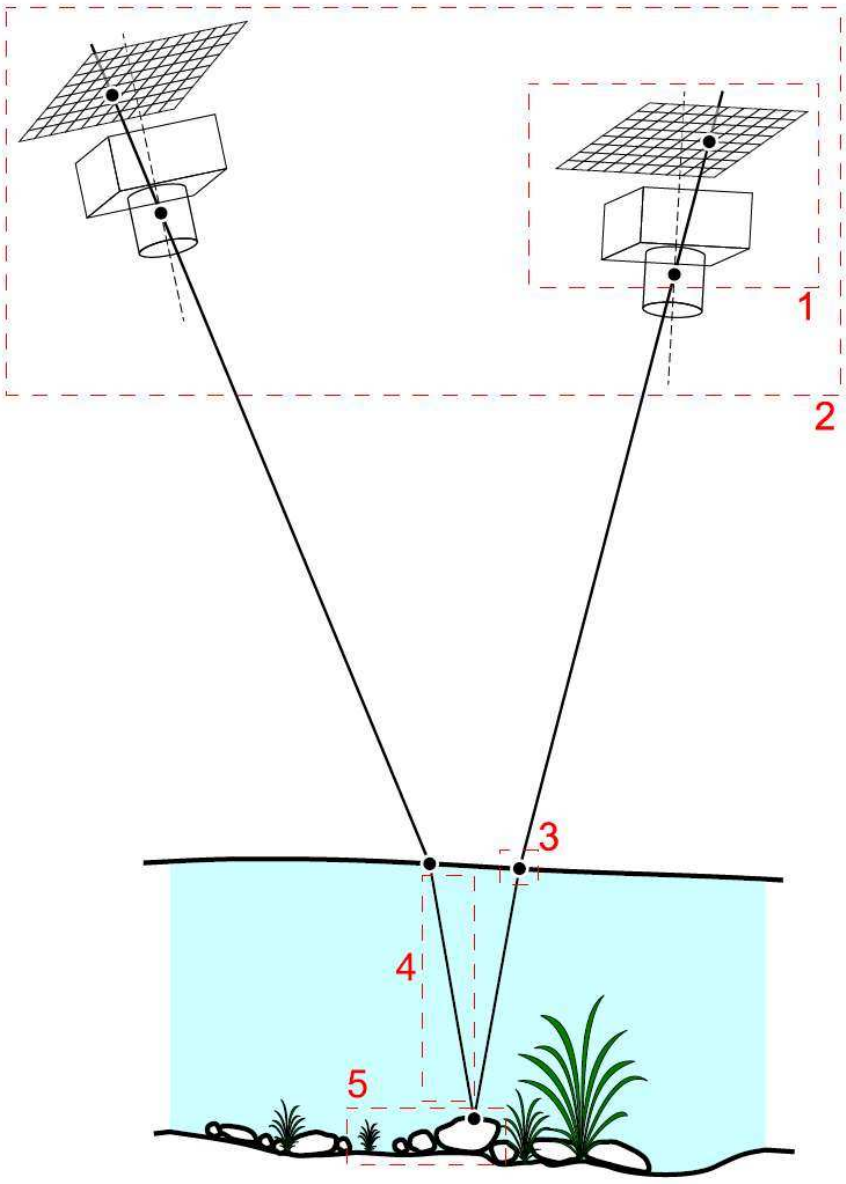


FIG. 4.1 - *Facteurs intervenant dans la mesure de la position d'un objet par stéréophotogrammétrie à travers l'eau : 1 - caractéristiques des images/du capteur ; 2 - conditions d'acquisition des images ; 3 - réfraction à l'interface ; 4 - traversée de la colonne d'eau ; 5 - caractéristiques propres de l'objet.*

La mesure de la géométrie immergée de la rivière est possible à deux conditions : (i) les objets doivent être identifiables dans les images ; (ii) la géométrie d'acquisition doit être connue. Ces deux conditions imposent des critères sur les sites d'applications ainsi que sur les méthodes à utiliser. Les rivières doivent avoir un fond visible (rivières peu profondes et/ou peu turbides) et texturé. La surface de l'eau doit être plane relativement à la profondeur, la taille des objets, l'angle de prise de vue et la résolution des images.

A l'examen de tous ces critères, les rivières régulées (débit constant sur de longues périodes, apports en particules solides de la part des affluents relativement faibles) à fond de graviers (fond clair et texturé) apparaissent comme des terrains d'application *a priori* favorables [Westaway et al., 2001]. Ce sont de plus des rivières qui présentent la problématique d'optimisation des débits réservés (voir section 1.6 et [Balland et al., 2002]).

Dans le cas où la mesure de la topographie immergée est possible, les sources d'erreurs restent nombreuses. Une partie des erreurs possibles est liée à la prise en compte de la traversée de l'interface (point 3) ; les caractéristiques géométriques de cette dernière sont en effet difficiles à mesurer et à connaître. D'autre part, la géométrie de prise de vue externe et interne (points 4 et 5) n'est pas connue dans le cas général et est donc déterminée par calcul. Enfin, dans le cas d'utilisation de drones ou d'ULM, les conditions de prises de vues (taille des pixels, angle de prise de vue - point 4) comportent une variabilité non négligeable, ce qui a des conséquences sur le succès ou l'échec d'appariement des points.

Notre travail est centré sur l'application au milieu spécifique qu'est la rivière. Son objectif n'est donc pas le développement de nouvelles méthodes de calcul de géométrie de prise de vue de clichés ou encore d'algorithmes d'appariement de points. Cependant, la photogrammétrie est au coeur de notre travail et les méthodes que nous avons utilisées seront détaillées (chapitre 5).

L'une des originalités de ce travail réside dans l'utilisation de capteurs et plateformes légères pour l'acquisition d'images exploitables en stéréophotogrammétrie. Les problèmes spécifiques posés par une telle acquisition, dans le milieu spécifique de la rivière, seront exposés dans le chapitre 6.

De plus, notre travail met en oeuvre des techniques de photogrammétrie à deux milieux. Dans le cas particulier de la rivière, ces techniques sont assez peu détaillées dans la littérature et sont traitées dans le chapitre 7.

Enfin, la spécificité du milieu d'intérêt peut être exploitée pour le développement d'une méthode de mesure du relief immergé. L'objet de notre étude est en effet régi par des lois physiques connues : la rivière est le siège d'un écoulement, la géométrie de la rivière obéit donc à certaines contraintes. L'intégration de ces contraintes dans la méthode doit pouvoir permettre de diminuer le bruit sur la mesure dû à la mauvaise connaissance générale de la géométrie de l'acquisition. On détaillera cette approche et la méthode complète de la mesure du relief immergé dans le chapitre 8.

Plan de la Deuxième partie

Introduction à la deuxième partie **60**

5 Eléments de photogrammétrie **67**

5.1 Cadre théorique . . . 68

5.1.1 Bases théoriques - Vocabulaire . . . 68

5.1.2 Équations de la photogrammétrie . . . 69

5.1.3 Exploitation des équations de la photogrammétrie . . . 71

5.2 Orientation de clichés . . . 73

5.2.1 Orientation interne - étalonnage de l'appareil . . . 74

5.2.2 Orientation externe d'un couple stéréoscopique . . . 75

5.2.3 Compensation en bloc par faisceaux avec autocalibration . . . 76

5.3 Stéreorestitution . . . 77

5.3.1 Appariement par corrélation automatique . . . 78

5.3.2 Restitution manuelle . . . 79

5.3.3 Corrélation supervisée par vision stéréoscopique . . . 80

5.3.4 Intérêt de l'utilisation des deux méthodes avec corrélation numérique . . . 81

5.4 Précision en Z en photogrammétrie numérique . . . 81

6 Acquisition d'images par drone ou ULM **83**

6.1 Paramètres imposés et variables à optimiser . . . 83

6.1.1 Cahier des charges pour l'acquisition des images . . . 83

6.1.2 Utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques 84

6.2 Protocole d'acquisition des images . . . 87

6.2.1 Contraintes . . . 87

6.2.2 Choix effectués - réglage du capteur, plan de vol . . . 90

6.2.3 Travail sur le terrain associé . . . 90

6.2.4 Mise en oeuvre opérationnelle du plan de vol 91
6.3 Limites et potentiels 91
6.3.1 Limites 93
Connaissance de la position du vecteur 93
Vitesse de la plate-forme 93
Capteur petit format 93
6.3.2 Potentiels 94
Coût 94
Très haute résolution spatiale 94
Flexibilité des acquisitions 94

7 Que voit-on en stéréo à travers l'eau ? 95
7.1 Cadre théorique 96
7.1.1 Réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux 96
7.1.2 Réfraction et stéréo - notion de point apparent 97
7.1.3 Existence du point apparent 100
7.1.4 Équations de la photogrammétrie à deux milieux 102
7.2 Études préliminaires - présentation de l'approche 103
7.2.1 Résolution d'un cas simplifié 104
Application numérique et représentation graphique 105
7.2.2 Cas réel : images doubles, occlusions 106
7.2.3 Approche choisie : méthode inverse 107
7.3 Stéréo à travers une surface localement plane 111
7.3.1 Cas d'une surface plane 111
7.3.2 Résultats 113
7.3.2.a Caractéristiques spatiales 113
7.3.2.b Influence de la focale 115
7.3.2.c Influence du B/Z 116
7.3.2.d Influence du h/Z 116
7.3.3 Bilan 118
7.4 Influence d'une erreur sur la position de la surface 119
7.5 Influence des vagues 122
7.5.1 Approche de modélisation 123
7.5.2 Résultats des simulations 126
7.5.2.a Visibilité du fond 126
7.5.2.b Influence des vaguelettes sur la mesure 128

Faisabilité - Déformation des objets 128
Erreur sur l'altitude 130
7.6 Discussion et conclusions 131
7.6.1 Effet de la réfraction en stéréo 131
7.6.2 Correction de la réfraction et bruit de mesure 131
7.6.3 Influence des vagues - faisabilité de la mesure 132
7.6.4 Importance de l'altitude de l'interface 133

8 Plan d'eau - contraintes hydrauliques 134
8.1 Cadre - objectif 135
8.1.1 Hypothèses de travail 135
8.1.2 Objectif de l'algorithme 136
8.2 Concepts et notations 137
8.2.1 Minorants et majorants locaux 137
8.2.2 Cohérence, compatibilité, conflits 138
8.2.3 Enveloppes MIN et MAX 139
8.3 Principe et mise en place de l'algorithme 140
8.3.1 Calcul des enveloppes MIN et MAX - régularisation 140
8.3.2 Amélioration de la précision 142
8.4 Implémentation et résultat de l'algorithme 143
8.5 Correction de la réfraction 144
8.5.1 Estimation de la position de la surface de l'eau 144
8.5.2 Estimation de la position réelle du point 145

Chapitre 5

Eléments de photogrammétrie - présentation des méthodes utilisées

La photogrammétrie regroupe un ensemble de techniques visant à effectuer des mesures spatiales à partir d'images. Parmi elles la steréorestitution correspond au calcul du relief d'une scène à partir de plusieurs images de cette scène prises selon des angles de vue différents. En effet, pour plusieurs images d'une même scène, un même point - immobile - du décor aura une position différente d'une image à l'autre à cause :

- de la différence de position du capteur d'une image à l'autre,
- de la différence de l'angle de visée du capteur d'une image à l'autre,
- de la différence des caractéristiques internes du capteur[1],
- et enfin de la position même de ce point (voir figure 1 dans le chapitre 3).

Il est donc possible, à partir de plusieurs images d'une même scène, dont on connaît la géométrie d'acquisition dans un référentiel lié au terrain, de calculer la position terrain des points de cette scène.

Le cadre théorique des méthodes correspondantes est détaillé dans une première section. On expose ensuite les méthodes de calcul de la géométrie de prise de vue qui ont été utilisées dans ce travail (géométrie interne et externe). Enfin on présentera les techniques d'appariement des points homologues et de calcul de la position terrain utilisées dans ce travail (stéréorestitution).

[1] ceci inclut par exemple les différences de position du négatif, ou encore les déformations dues à l'objectif.

5.1 Cadre théorique - équations de la photogrammétrie

5.1.1 Bases théoriques - Vocabulaire

Une image est une projection en deux dimensions (sur le négatif ou la matrice CCD, par exemple) de l'espace réel à trois dimensions. La modélisation de cette projection a donné lieu à de nombreux travaux.

En vision par ordinateur, ou plus généralement dans le cas d'utilisation de capteurs pour lesquels la distance focale est petite par rapport à la distance entre le capteur et l'objet, on utilise le *modèle sténopé* - l'ensemble des rayons lumineux passe par un seul point, le *centre optique* - pour cette projection [Rabaud, 2005, p.7].

En photogrammétrie, on parlera plus couramment de *géométrie perspective* ou de *projection centrale* [Krauss et Waldhäusl, 1998]. Dans cette géométrie, les trois points, centre optique, point image et point terrain, appartiennent à un même rayon lumineux rectiligne. Cette propriété géométrique, représentée sur la figure 5.1, correspond à la *condition de colinéarité*. La mise en équation de cette condition permet d'obtenir des relations entre coordonnées image et coordonnées terrain [Krauss et Waldhäusl, 1998].

Dès l'établissement de ces bases, ainsi que pour la suite de notre propos, il est nécessaire de définir les termes techniques utilisés dans ce document, provenant de la littérature de la photogrammétrie. La liste des termes et définitions qui suit est tirée et adaptée du lexique topographique de l'Association Française de Topographie [AFT, 2000], de [Krauss et Waldhäusl, 1998], ainsi que d'un article paru dans *The Photogrammetric Record* [Newby, 2007]. Elle est loin d'être exhaustive et est surtout destinée à une meilleure lecture de ce document.

- *géométrie perspective* ou *projection centrale* : modèle de la formation des images utilisé en photogrammétrie et en vision par ordinateur (sous le nom *modèle sténopé*). Selon ce modèle, l'ensemble des rayons lumineux (rectilignes) allant de l'espace objet à l'espace image passe par un point unique, le *centre optique* ;
- *centre optique* (noté O sur la figure 5.1) : point virtuel modélisant comme confondus les centres de projection de l'espace image et de l'espace objet. En toute rigueur ces deux points sont distincts. La notion de centre optique est à la base du *modèle sténopé* présenté ci-dessus. On peut aussi parler de *centre de projection*, ou encore de *centre perspectif* ;

- *point principal d'autocollimation* : projection orthogonale du *centre optique* sur l'espace image. Ce terme peut être trouvé sous la forme abrégée de *point principal* ;
- *distance principale* (notée c sur la figure 5.1) : distance entre le *centre optique* et le plan du capteur - ou du fond de chambre. On utilise aussi le terme de *constante de chambre*, ou encore de *distance focale*, couramment abrégé en *focale* ;
- *géométrie interne* ou encore *paramètres d'orientation interne*, parfois abusivement abrégé en *orientation interne* : ensemble des paramètres caractérisant la façon dont est formée l'image dans le capteur. Ces paramètres incluent en général la *distance focale*, la position du *point principal*, mais aussi les paramètres caractérisant la distorsion due à l'objectif ;
- *couple stéréoscopique* : ensemble de deux photographies prises de deux points de vue différents, présentant une partie commune et permettant le phénomène physiologique de fusionnement (perception du relief par la formation d'une image plastique de la scène en 3D) ;
- *base* : distance séparant les deux *centres optiques* lors de la prise de vue de deux clichés formant un *couple stéréoscopique* ;
- *rapport base sur éloignement*, paramètre caractérisant pour partie la précision de la stéréorestitution. Il est noté dans ce document B/Z afin de conserver la lettre h pour désigner la profondeur de la rivière ;
- *géométrie externe* ou encore *paramètres d'orientation externe*, parfois abusivement abrégé en *orientation externe* : ensemble de 6 paramètres (3 de position, 3 angulaires), caractérisant la position et l'orientation du capteur au moment de l'acquisition d'un cliché ;
- *point de contrôle au sol* ou *GCP* : point connu en planimétrie et/ou en altimétrie - par des relevés sur le terrain - et identifié sur les photographies. L'abréviation *GCP* correspond au terme anglais *ground control point*. On trouve aussi le terme de *point d'appui*, ou *point de calage*. Il peut être matérialisé sur le terrain par des *mires* ;
- les termes *orientation*, *stéréorestitution*, *calibration*, *compensation*, sont définis dans la section 5.1.3

5.1.2 Équations de la photogrammétrie

A partir des bases théoriques exposées dans la section précédente, et en s'appuyant sur les notations reprises dans la figure 5.1, on établit les équations décrivant les relations entre coordonnées-image et coordonnées-terrain de points de la scène.

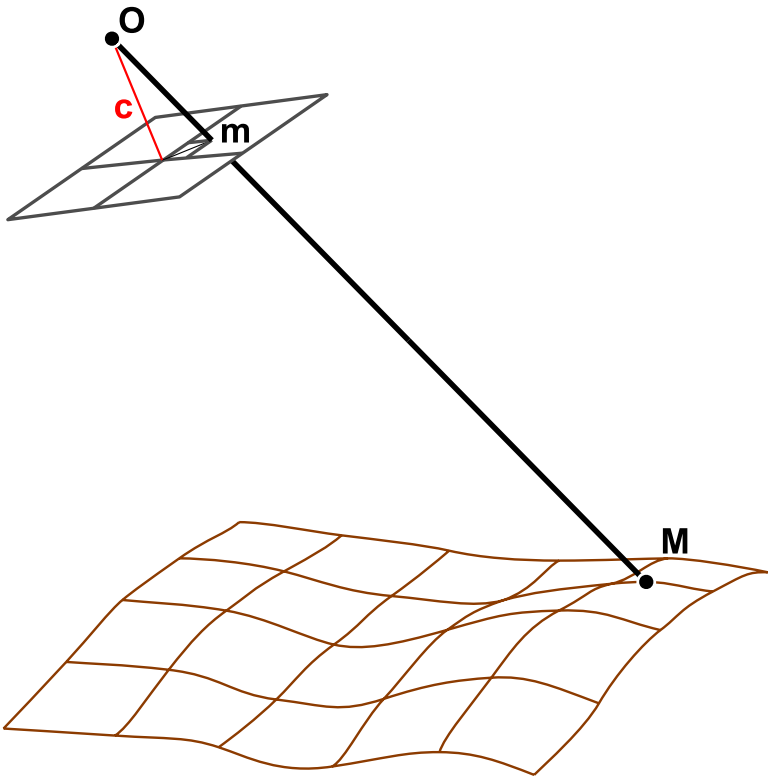


FIG. 5.1 - *Géométrie de prise de vue - Notations*

Si O est le centre de projection, M un point terrain et m un point image, m est l'image de M si et seulement si $\overrightarrow{Om}$ et $\overrightarrow{OM}$ sont colinéaires c'est à dire qu'il existe un réel k tel que $\overrightarrow{Om} = k \cdot \overrightarrow{OM}$. Avec les notations suivantes :

- en coordonnées terrain, $O = (X_0, Y_0, Z_0)$, $M = (X, Y, Z)$ (ce sont les 3 paramètres de position de la géométrie externe)
- en coordonnées capteur, $O = (\xi_0, \eta_0, c)$, $m = (\xi, \eta, 0)$ (c est la distance focale, ξ_0,η_0 et c sont les trois paramètres principaux de la géométrie interne)
- matrice de passage de la base du repère capteur à la base du repère terrain :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

  Cette matrice est une matrice de rotation dans l'espace, à trois paramètres ω, ϕ et κ, qui sont les trois paramètres angulaires de la géométrie externe (voir figure B.1 en annexe).

La condition de colinéarité, exprimée dans le repère capteur, se traduit finalement par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c\dfrac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z_a - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c\dfrac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \tag{5.1}$$

En exprimant la condition de colinéarité dans le repère terrain, on obtient, pour chaque point et chaque image, le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} X = X_0 + (Z - Z_0)\dfrac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y = Y_0 + (Z - Z_0)\dfrac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{cases} \tag{5.2}$$

Les étapes du calcul ainsi que l'expression des coefficients de la matrice de rotation figurent en annexe page 241.

Ces équations sont à la base de la plupart des méthodes de photogrammétrie : en effet, selon les données dont on dispose et les paramètres que l'on considère comme inconnus, on pourra effectuer différentes opérations.

5.1.3 Exploitation des équations de la photogrammétrie

L'objectif de cette section est de donner quelques pistes d'utilisation concrète des équations de la photogrammétrie. En effet, on a vu dans la section précédente que celles-

ci permettaient d'effectuer le lien entre coordonnées terrain et coordonnées images. On montre ici quelles applications pratiques sont possibles par le biais d'exemples.

Supposons la géométrie interne (ξ_0, η_0, c) ainsi que la géométrie externe $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ connues, et les 3 coordonnées terrain (X, Y, Z) d'un point inconnues.

En mesurant les coordonnées (ξ_1, η_1) de ce point dans une image, on obtient un système linéaire de 2 équations à 3 inconnues (cf. système 5.2). Pour déterminer un tel système, on a besoin d'au moins une équation supplémentaire. En utilisant une deuxième prise de vue de la même scène, en repérant la position (ξ_2, η_2) du même point dans la deuxième image, et en exprimant la condition de colinéarité pour ce point dans la deuxième image, on obtient 2 équations supplémentaires. On peut alors résoudre le système et déterminer la position (X, Y, Z) du point. Cette opération, impliquant l'appariement des points homologues[2] (ξ_1, η_1) et (ξ_2, η_2), s'appelle la *stéréorestitution*.

Supposons que l'on ne connaisse ni la position ni l'angle de visée du capteur au moment de la prise de vue. On a 6 inconnues $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ par image.

Dans ce cas, on utilise des points d'appui, aussi appelés *points de contrôle au sol* ou encore GCPs (pour Ground Control Points). Si l'on mesure leur position au sol (X, Y, Z), l'expression de la condition de colinéarité pour ces points fournit 2 équations par image et par point. On a donc besoin d'un minimum de 3 points connus en (X, Y, Z) qui soient présent dans chaque image. La résolution du système d'équations permet finalement de déterminer la géométrie externe de prise de vue des images. Le calcul de la géométrie externe à partir de 3 points terrains comme décrit dans ce paragraphe, est appelé *relèvement spatial*. Le calcul des paramètres de la prise de vue (interne et/ou externe) à partir de points de contrôle est appelé en général procédure d'*orientation*.

Supposons que l'on dispose de plus de points de contrôle au sol que nécessaire (système sur-déterminé).

On calcule alors le stéréomodèle s'ajustant au mieux aux différentes mesures. Ceci permet l'amélioration de la précision du calcul en incluant, selon les algorithmes, l'élimination des points faux (mires mal pointées). Il s'agit de méthodes de *compensation*.

[2] se dit de points image correspondant au même point terrain

Si l'on dispose de suffisamment de points, il est de plus possible d'ajouter aux inconnues du système les paramètres décrivant plus en détail la géométrie interne, notamment la distorsion - ou la distorsion résiduelle non radiale - due à l'objectif. Cela nécessite en contrepartie un nombre suffisant de points connus (dans le système de coordonnées lié au terrain) pour caler les modèles. C'est une des méthodes permettant la *calibration* d'un appareil.

Les sections suivantes s'attachent à décrire les méthodes de détermination de la géométrie d'acquisition utilisées dans notre travail. Enfin, une dernière section sera dédiée aux méthodes de stéréorestitution que nous avons mises en oeuvre.

5.2 Orientation de clichés

Comme mentionné plus haut, l'orientation correspond à la détermination de la géométrie de prise de vue à partir de points image et de points de contrôle au sol. De nombreuses méthodes permettent d'effectuer cette opération. Il est en effet possible par exemple d'effectuer l'orientation en une seule étape (orientation globale) ou alors de séparer le processus d'orientation en plusieurs étapes, comme une orientation relative (une image par rapport à une autre), suivie d'une orientation absolue, en coordonnées terrain. Cette dernière technique fait appel à un système de coordonnées intermédiaires, appelé coordonnées-objet.

L'ensemble de ces méthodes n'est pas décrit ici. On peut pour cela se référer par exemple à [Krauss et Waldhäusl, 1998] ou [Kasser et Egels, 2001]. On se concentrera plutôt sur les méthodes adaptées à notre cas, c'est à dire aux données et aux logiciels disponibles pour notre étude. Du fait de l'utilisation de capteurs légers (caméras non-métriques) il est nécessaire de choisir une approche incluant la modélisation de la géométrie interne et de la distorsion de l'objectif.

Dans un premier temps, on déterminera de manière indépendante les paramètres de la géométrie interne (section 5.2.1) incluant la distorsion de l'objectif. La réalisation de l'étalonnage de la caméra utilisée est primordiale pour les applications pratiques de restitution 3D à partir des mesures effectuées dans les images [Faugeras et Toscani, 1987].

Ces informations seront ensuite utilisées pour la phase d'orientation externe, effectuée couple par couple (section 5.2.2) ou encore en bloc par une compensation par faisceaux (section 5.2.3) avec paramètres additionnels. Cette deuxième méthode permettra de tester la modélisation d'erreurs systématiques éventuelles, dont la distorsion résiduelle de l'objectif.

5.2.1 Orientation interne - étalonnage d'un appareil non-métrique

Avec l'arrivée des capteurs numériques et le développement de la photogrammétrie numérique, mettant à la disposition du plus grand nombre ces outils, les applications en photogrammétrie mettant en oeuvre des capteurs non métriques sont de plus en plus nombreuses [Burnside et Marshall, 1992, Carbonneau et al., 2003, Mills et al., 2003, Chandler et al., 2005]. Afin de pouvoir mettre en oeuvre les techniques développées pour des caméras métriques étalonnées, il est donc nécessaire de passer par une phase de calibration des caméras [Clarke et Fryer, 1998, Chandler, 2001, Short, 1992].

Les bases théoriques de la distorsion, due au décentrement des lentilles par exemple, ont été étudiées de longue date [Brown, 1966, Brown, 1971]. Si l'étalonnage d'une caméra métrique est effectué en général sur un banc optique [Krauss et Waldhäusl, 1998, Clarke et Fryer, 1998], dans le cas d'une caméra non métrique, l'étalonnage peut être réalisé à partir des images, en s'appuyant sur les mêmes principes que ceux utilisés en vision (robotique) [Faugeras et Toscani, 1987, Mei, 2005]. Le principe peut être grossièrement décrit de la manière suivante : on effectue plusieurs prises de vues, selon différents angles, d'un polygone de points dont les positions sont connues avec un biais et une dispersion négligeables devant la taille des pixels des prises de vue. On établit des modèles stéréoscopiques à partir de ces images. On utilise dans un premier temps une valeur initiale pour les paramètres d'orientation interne ξ_0, η_0 et c. Les modèles stéréoscopiques établis comportent des erreurs systématiques liées à l'imprécision de la valeur initale des paramètres d'orientation interne. Ces erreurs systématiques se traduisent par des résidus d'ajustement du modèle stéréoscopique sur chacun des points mesurés. On utilise finalement ces résidus pour ajuster un modèle de distorsion et recalculer une valeur plus correcte des paramètres d'orientation interne.

On effectue l'étalonnage de la caméra en modélisant la distorsion par une fonction radiale polynomiale de degré 7 (équation 5.3). On détermine, en plus de la position du point principal et de la focale, les coefficients de ce polynôme ainsi que le centre de symétrie de la distorsion. Celle-ci est ajustée à partir des écarts radiaux et est

imputée à l'objectif dont les lentilles sont supposées co-axiales. Le modèle de distorsion utilisé comporte 5 paramètres : 2 correspondant à la position du centre de distorsion dans l'image et 3 coefficients polynomiaux. La distorsion radiale dr constatée à une distance $r = \sqrt{(\xi - \xi_s)^2 + (\eta - \eta_s)^2}$ du centre de distorsion (ξ_s, η_s) est assimilée à une déformation polynomiale de degré 7 [Rivière, 2003, p. 12] :

$$dr = k_3 r^3 + k_5 r^5 + k_7 r^7 \tag{5.3}$$

La scène constituée des mires de position connue réparties dans plusieurs plans est appelée polygone de calibration. Pour cette étude, c'est le polygone de calibration situé dans le parking souterrain de l'École Nationale Supérieure de Géographie à Marne-la-Vallée qui a été utilisé. Ce polygone est constitué de 50 mires réparties dans 3 plans (voir figure E.1).

L'appareil est réglé de la même manière que lors de l'acquisition sur le terrain, notamment avec la mise au point sur l'infini. On acquiert suffisamment de couples (un minimum de trois en pratique) de manière à ce que les mires soient présentes dans la plus grande partie de l'espace image (notamment dans les coins). Les paramètres du modèle de distorsion radiale et de l'orientation interne sont finalement calculés de manière à minimiser les résidus des modèles stéréoscopiques sur ces points de mesure.

5.2.2 Orientation externe d'un couple stéréoscopique

Il est possible de mettre en oeuvre une approche couple par couple pour calculer les paramètres de l'acquisition, soit les 6 paramètres $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ de chaque image. Dans notre cas, les paramètres d'orientation interne et externe ont été estimés avec les logiciels Etalonnage et Poivilliers E, développés dans un but pédagogique par M. Yves EGELS, professeur à l'ENSG. Le Poivilliers E, ainsi baptisé en hommage au concepteur des stéréorestituteurs analogiques Poivilliers A à D, propose notamment un stéréorestituteur numérique fonctionnant sans configuration matérielle particulière et donc utilisable sur un ordinateur de bureau [Egels, 2000].

Le logiciel intègre des fonctionnalités de calcul de la géométrie de prise de vue avec prise en compte d'un modèle de distorsion radiale pour l'appareil, ainsi qu'un outil d'aide à la saisie par corrélation automatique. Il est accompagné du programme Etalonnage.exe, qui permet de calculer les paramètres d'orientation interne ainsi que de

modéliser la distorsion de l'objectif par un polynôme radial comme décrit plus haut.

Ces informations d'orientation interne et de distorsion de l'objectif sont prises en compte par le biais d'un fichier caméra (voir E.1.2). Le calcul commence par une orientation relative puis, dès que le nombre de points terrain saisis est suffisant, se poursuit par une compensation globale par faisceaux [Egels, 1999] (voir la section 5.2.3 pour la description de l'orientation par faisceaux). Le logiciel inclut de plus une stratégie d'élimination automatique des points faux lors de l'orientation globale.

5.2.3 Compensation en bloc par faisceaux avec autocalibration

On se place dans le cas où l'on dispose de plus de 3 points de calage par image. On a donc un système sur-déterminé et l'on peut effectuer une *compensation* par moindres carrés pour déterminer globalement les paramètres d'orientation externe de chacune des images. Cette technique permet de diminuer l'influence des erreurs aléatoires comme les erreurs de positionnement des points de contrôle - sur le terrain ou dans l'image.

Un des intérêts de cette méthode est la possibilité de l'ajout de paramètres permettant de modéliser les erreurs systématiques résiduelles. De plus, d'un point de vue opérationnel, la compensation en bloc par faisceaux permet de limiter le nombre de points de contrôle au sol et même de constituer un bloc en survolant des zones dépourvues de points de référence terrain.

La compensation en bloc par faisceaux est une technique d'orientation d'un ensemble de clichés. Le terme *bloc* désigne cet ensemble d'images. On s'assure en général du recouvrement des images de telle manière à ce que l'on dispose de points par lesquels passe tout un *faisceau* de rayons lumineux (figure 5.2).

Le plus souvent, on cherche à répartir les images du bloc suivant un quadrillage régulier. On constitue ainsi un ensemble d'images comportant un recouvrement longitudinal d'environ 60% (images successives d'une même bande) et un recouvrement latéral d'environ 20% (entre deux bandes d'images). Ceci permet d'avoir jusqu'à 6 points image pour un seul point sol (un même point sol peut en effet apparaître dans trois images successives, et ce, pour deux bandes d'images parrallèles). On assure ainsi la cohérence entre les images du bloc et on limite le nombre de points terrain nécessaires. La méthode de compensation par faisceaux établit directement la relation entre les coor-

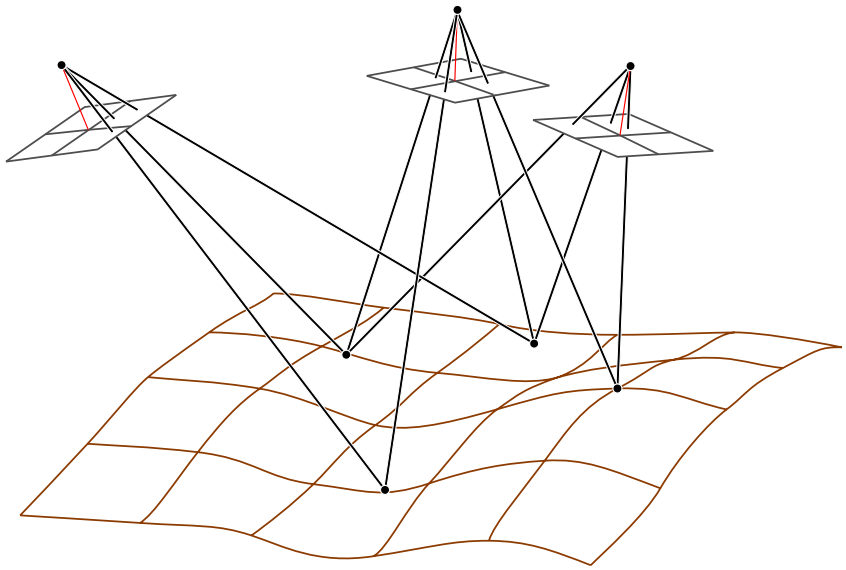


FIG. 5.2 - 4 *faisceaux comportant* 2 *ou* 3 *rayons*

données image et les coordonnées terrain.

En revanche, dans le cas de l'ajustement de paramètres supplémentaires, le modèle a un plus grand nombre de degrés de liberté. Un plus grand nombre de points est donc nécessaire pour s'assurer de la convergence du calcul. La bonne estimation de ces paramètres assurera la réduction des erreurs systématiques. Ces erreurs systématiques sont dues pour partie à la distorsion de l'objectif ou de manière générale à une mauvaise connaissance de la géométrie interne. La modélisation de ces distorsions par cette approche s'appelle l'*autocalibration*. Cette méthode est très utile lorsqu'on utilise des appareils non métriques [Krauss et Waldhäusl, 1998, p. 283].

5.3 Stéreorestitution

Comme on l'a vu dans la section 5.1.3, la stéréorestitution correspond au calcul de la position (X, Y, Z) des points terrain à partir de leur position dans deux images au moins dont la géométrie de prise de vue est connue. Un des problèmes principaux de la stéréorestitution réside donc dans l'identification de points homologues, images d'un même objet de la scène. On utilise donc pour cela des méthodes d'appariement de points.

5.3.1 Appariement par corrélation automatique

L'utilisation d'images numériques en photogrammétrie a permis le développement de nouvelles solutions pour la restitution du relief. Ainsi la formation de modèles numériques de terrain intègre couramment la corrélation automatique des images. Une telle méthode présente plusieurs avantages : rapidité du calcul (et donc possibilité d'une grande densité de mesures), reproductibilité du calcul et enfin précision. La corrélation automatique peut en revanche souffrir d'un manque de fiabilité, notamment sur les zones présentant des textures périodiques, des radiométries faibles (ombres) ou encore sur des zones où la projection de la scène dans l'espace image amène des discontinuités (occlusions dans les zones à fort relief).

En effet le problème d'appariement de points fait partie de la famille des problèmes mathématiques mal posés : l'existence et l'unicité de leur solution n'est pas garantie, du fait de la perte d'information par projection de l'espace objet 3D dans l'espace image 2D. En pratique, pour résoudre ce problème, on a recours à plusieurs solutions. On effectue notamment une corrélation qui s'appuie sur un voisinage. On peut aussi imposer des contraintes de régularité aux solutions. Il découle de ces deux stratégies une possibilité non négligeable de fausses corrélations, si les critères de ressemblance au voisinage du point et/ou de régularité de la solution sont satisfaits. Le traitement des cas de fausse corrélation pose donc un nouveau problème. Les critères de ressemblance (coefficient de corrélation) ou de régularité seuls ne sont pas totalement discriminants. Par exemple, deux objets physiquement différents mais radiométriquement localement très semblables peuvent avoir un coefficient de corrélation très élevé conduisant à la détermination de solutions erronées.

Il s'agit de la fonctionnalité proposée par les logiciels de photogrammétrie du commerce. Dans notre cas, le bloc d'image a été traité avec la suite photogrammétrique de Leica notamment le module LPS. Ce module utilise différents outils pour le calcul de corrélation : une détection et un appariement de points d'intérêts, ainsi qu'un calcul de corrélation de fenêtre, exploitant la géométrie épipolaire dans les multiples échelles d'une pyramide d'images [Leica, 2003, p.69-73]. En revanche, la documentation fournie avec le logiciel ne donne pas suffisamment de détails pour savoir si les calculs de corrélation se font dans une géométrie épipolaire ré-échantillonée, ou encore si la corrélation inclut une corrélation de formes ou d'objets. La nature et la signification des paramètres dont la valeur peut être modifiée par l'utilisateur laisse supposer qu'il s'agit d'une corrélation de surface.

5.3.2 Restitution manuelle

Il existe une autre méthode, celle qui était utilisée initialement en photogrammétrie analogique : la stéréorestitution effectuée par un opérateur. Il s'agit de méthodes de restitution où les positions image sont mesurées de manière manuelle, par le biais par exemple de comparateurs ou de stereorestituteurs analogiques. On détaille ici l'utilisation des stéréorestituteurs analogiques ou analytiques, car le stéréorestituteur numérique utilisé pour ce travail est basé sur les mêmes principes. On forme, pour chaque oeil, une image d'un cliché (respectivement le gauche et le droit). Les clichés sont orientés de manière à annuler les parallaxes. Dans le cas idéal, seule subsiste la parallaxe suivant l'axe de vol. Cette parallaxe est orientée suivant l'axe passant par les yeux de l'opérateur pour assurer l'effet stéréoscopique. L'opérateur perçoit donc une surface tridimensionnelle appelée stéréomodèle ou modèle plastique.

On fournit par ailleurs à chaque oeil l'image d'un objet, *l'index de pointé* aussi appelé *ballonnet*. L'ajustement tridimensionnel en chaque point de la position du ballonnet à la surface du modèle stéréoscopique permet de déterminer la parallaxe en ce point et donc les coordonnées terrain et notamment l'altitude de ce point.

L'utilisation de telles méthodes permet de diminuer le risque de faux appariement de points en faisant appel au contrôle externe et à l'expertise humaine[3]. En revanche, on est limité par la saisie manuelle et les fortes densités de points mesurés s'obtiennent au prix d'heures de main d'oeuvre. D'un autre côté, la perception du relief par effet stéréoscopique permet des opérations différentes, du fait de la photointerprétation. Elle est par exemple utilisée de manière opérationnelle pour la restitution de courbes de niveau.

Pour résumer, cette méthode est fastidieuse, mais fiable et opérationnelle. Cette technique n'a pas été utilisée dans notre travail. La description de son principe et l'introduction du vocabulaire associé est cependant intéressante pour les explications développées dans la section suivante.

[3] ce risque subsiste néanmoins dans les zones très homogènes des images, où l'image plastique des objets photographiés est plus difficilement perceptible

5.3.3 Corrélation supervisée par vision stéréoscopique

Il est en effet possible d'effectuer la stéréorestitution de manière mixte, par un opérateur assisté d'un outil de corrélation automatique. On peut espérer de cette manière tirer parti à la fois de (i) la fiabilité de la mesure, et (ii) de la précision, rapidité et reproductibilité du calcul de corrélation pour le pointage. La densité de restitution peut être dans ce cas optimisée selon les zones de la scène observée. Cette méthode peut être mise en oeuvre avec le logiciel Poivilliers E, où le processus de restitution est là aussi basé sur l'effet stéréoscopique et l'utilisation d'un ballonnet - ou index de pointé - numérique cette fois [Egels, 2000].

En pratique, le logiciel affiche alternativement les images gauche et droite d'un couple avec une fréquence suffisamment élevée pour que le scintillement soit invisible à l'œil nu. Un signal de synchronisation sort sur le port parallèle. En synchronisant par exemple l'obturation d'une paire de lunettes à cristaux liquides à cette sortie, on fournit une image différente à chaque œil et on obtient l'impression de relief. L'opérateur positionne ensuite le ballonnet sur la surface du modèle de manière à effectuer la restitution de l'altitude du point courant.

La différence avec une stéréorestiution intégralement manuelle est la suivante : le format numérique des images permet d'utiliser un outil de corrélation automatique. Le protocole peut alors être le suivant : l'opérateur positionne tout d'abord le ballonnet à proximité d'un point de la surface virtuelle. On lance ensuite un calcul de corrélation qui détermine l'altitude du ballonnet pour laquelle le coefficient de corrélation est maximum à la position (X, Y) courante. L'opérateur choisit ensuite de valider ou non le point corrélé selon sa sensation visuelle d'attachement du ballonnet au stéréomodèle.

Une bonne partie des fausses corrélations, c'est à dire, une nouvelle fois, les cas de forte corrélation entre deux points image correspondant à deux points terrain différents, est ainsi éliminée. On profite de plus de la précision du calcul subpixellaire du corrélateur numérique.

5.3.4 Intérêt de l'utilisation des deux méthodes avec corrélation numérique

L'objectif de ce travail n'étant pas de développer de nouvelles techniques de corrélation, les deux techniques présentées ci-dessus (la corrélation automatique et la corrélation supervisée par vision stéréoscopique) ont été utilisées telles quelles. La méthode de corrélation automatique avec un logiciel du commerce a été utilisée tout d'abord pour donner une idée de la densité de mesure que l'on peut obtenir dans un cadre opérationnel. En revanche, on manque de données dans ce cas pour évaluer l'influence de la corrélation sur la qualité de la restitution. La donnée seule du coefficient de corrélation ne permet en effet pas de déterminer a priori si l'appariement est exact ou non.

Ensuite, dans le cadre du développement puis de l'évaluation de la méthode de calcul du relief immergé avec correction de la réfraction, c'est la stéréorestitution avec calcul de corrélation supervisé par un opérateur qui a été mise en oeuvre. Cette technique a deux intérêts : (i) on diminue le biais de mesure dû aux fausses corrélations ; (ii) on peut adapter l'effort de restitution en l'accentuant sur les zones présentant les plus forts gradients et/ou sur les zones où la densité de points mesurés par corrélation automatique de surface sera la plus faible. Celle-ci peut en effet être difficile selon les conditions expérimentales (turbidité, masquage du fond par des reflets). Ce seront donc principalement les mesures issues de stéréorestitution assistée qui serviront à *évaluer le potentiel de la méthode* en conditions réelles.

5.4 Précision de la mesure du relief en photogrammétrie numérique

Il est possible de trouver un développement de la théorie des erreurs de stéréorestitution dans des cas simplifiés. [Krauss et Waldhäusl, 1998] se situent dans le cas normal (visée verticale pour chaque cliché), avec l'hypothèse supplémentaire qu'il n'y a pas d'erreur sur la focale (élément de l'orientation interne) ni sur la base (issue de l'orientation externe). En effet, dans ce cas, les équations se simplifient et aboutissent à la formule suivante pour le calcul de la précision σ_Z de la mesure en Z :

$$\sigma_z = \frac{Z}{c}\frac{Z}{B}\sigma_{p_\xi} \tag{5.4}$$

où Z est la hauteur de vol, c la focale en pixels, B la base et σ_{p_ξ} la précision d'appariement des points ou précision de pointé (écart-type de la parallaxe mesurée). Cette

formule, exacte dans le cas normal (visées verticales) permet de donner une idée d'un ordre de grandeur pour le cas général.

Cette formule fait intervenir trois facteurs : (i) le rapport Z/c correspond au *facteur d'échelle*, noté m_b par [Krauss et Waldhäusl, 1998] ; (ii) le rapport B/Z, en français *rapport base sur éloignement* ; (iii) la précision de détermination de la parallaxe.

En pratique, la meilleure précision sera obtenue pour la résolution au sol la plus fine, avec un rapport base sur éloignement élevé, et une bonne précision de détermination des points homologues.

Dans le cas du calcul de la parallaxe par corrélation automatique, on peut s'intéresser à la précision intrinsèque de corrélation. [Kasser et Egels, 2001] évaluent cette précision. Plusieurs cas idéaux sont simulés, pour lesquels les points homologues sont superposables par de simples translations. L'erreur systématique est étudiée pour différentes valeurs de la partie fractionnaire de la translation (de 0 à 1 pixel). Avec différentes fonctions d'interpolation utilisées pour la corrélation, un biais maximal de 0.25 pixel est constaté : la précision de corrélation subpixellaire est donc considérée comme étant d'un quart de pixel.

Chapitre 6

Acquisition d'images pour la photogrammétrie par drone ou ULM

Comme annoncé dans le chapitre 4, l'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel d'une méthode de restitution du relief immergé de la rivière à partir d'images acquises par des capteurs non-métriques embarqués sur des plates-formes légères. On utilise indifféremment dans tout le chapitre le vocabulaire *plate-forme* ou *vecteur* pour désigner le drone ou l'ULM, c'est à dire l'appareil sur lequel est embarqué le capteur. Ce chapitre est en effet centré sur l'étude d'une acquisition d'images pour une mission photogrammétrique avec de tels vecteurs.

On détaillera dans une première section les contraintes spécifiques liées à notre application. Ce sont en effet ces contraintes qui ont déterminé d'une part les choix des technologies utilisées (plate-forme et capteur), et d'autre part le protocole terrain. Enfin on exposera de manière résumée les caractéristiques, en terme de potentiels et limitations, d'acquisitions réalisées dans ces conditions.

6.1 Paramètres imposés et variables à optimiser

6.1.1 Cahier des charges pour l'acquisition des images

Comme on l'a vu dans l'introduction à cette partie, la méthode de mesure du relief immergé par stéréophotogrammétrie à travers l'eau a des *conditions d'application*

a priori *très restrictives* et spécifiques. Entre la constatation sur le terrain de bonnes conditions expérimentales - turbidité, météo - et la prise de vue, *le temps de réaction doit être court*. On met donc en oeuvre un protocole expérimental adapté, prenant en compte en plus de ces contraintes le *critère du coût*, à comparer avec celui d'un relevé terrain (figure A en annexe).

L'*utilisation de drones*, ou encore d'ULM, semble donc adaptée [Zafrir et al., 1993, Asseline et al., 1999, Ambrosia et al., 2003, Chaponnière, 2004, Sugiura et al., 2005, Hardin et Jackson, 2005, Labbé et al., 2007, Lejot et al., 2007]. Ces solutions technologiques ont une conséquence sur le choix des instruments embarqués. Ces derniers doivent être peu encombrants, légers, et relativement bon marché (risque lié à l'embarquement sur une plate-forme légère) [Tomlins, 1983, Labbé et al., 2007]. On fixe ainsi un certain nombre de paramètres de l'acquisition comme le domaine des altitudes et des vitesses de vol, ou les caractéristiques de l'équipement embarqué (poids, performance).

On optimisera cependant les variables de l'acquisition à l'intérieur des domaines proposés par les plates-formes et les capteurs disponibles. On vise ainsi à constituer un jeu de données exploitable en stéréo.

6.1.2 Utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques

Nous avons testé différents protocoles, mettant en jeu des plates-formes légères (drone, ULM). Un premier test a été réalisé avec le drone paramoteur Pixy (figure 6.1), disponible à la Maison de la Télédétection de Montpellier. Le test a montré que ce type de plate-forme permettait l'acquisition de couples stéréoscopiques [Arrighi, 2004], mais d'une manière ponctuelle et sporadique, du fait principalement de sa sensibilité au vent et aux turbulences.

En revanche l'utilisation de drones permet beaucoup de souplesse dans la logistique d'acquisition. De plus, avec des solutions technologiques différentes, notamment des vecteurs plus stables (avions, hélicoptères), équipés de systèmes d'aide au pilotage ou même de pilotes automatiques, leur potentiel est extrêmement prometteur.

A la suite de cette expérience, il a été décidé d'embarquer à bord d'un ULM des capteurs utilisables sur un drone. On peut ainsi mettre en place la méthode qui pourra

FIG. 6.1 - *Le drone Pixy en phase de décollage court au bord de la Durance*

être appliquée ensuite avec des drones - en cours de développement - pour lesquels la stabilité et le contrôle du vol sont meilleurs qu'avec le Pixy. L'engin utilisé est un Ballerit HM-1000 (figure 6.2). Cet aéronef, qui peut être remorqué sur son train principal, avec une voilure repliable au gabarit routier, est plus connu sous nom de "Pou du ciel" [Mignet, 2001]. Cet appareil est diponible en biplace et permet donc à un pilote

FIG. 6.2 - *Un Balerit HM 1000 (Photo Peter Vercruijsse)*

d'emmener un photographe. Ce dernier manipule le capteur à l'aide d'une plate-forme tenue à la main (figure 6.3(b)). La charge utile du modèle biplace est de 200 kilos. La vitesse minimale de sustentation par vent calme avec carénage est de 55 km/h avec un moteur 582 Rotax de 64 chevaux [Mignet, 2001]. La vitesse de vol minimale opération-

nelle acceptée par les pilotes est en générale un peu supérieure.

Le capteur utilisé est un Sony DSC-F828 (figure 6.3(a)). Cet appareil numérique petit format permet d'acquérir des images utiles de 3264 par 2448 pixels. Il dispose d'un objectif dont la focale peut varier entre 28 et 80 milimètres (focales équivalentes). Il pèse moins d'un kilo (955 grammes avec accessoires) [Sony, 2003]. Ce type d'appareil peut donc aussi bien être embarqué sur le drone Pixy, dont la charge utile est comprise entre 500 grammes et 3.3 kilos selon la voile [Asseline et al., 1999], ou encore à bord du drone avion de l'Avion Jaune (figure 6.4), dont la charge utile est de 2 kilos [Labbé et al., 2007].

(a) Capteur [Sony, 2003]

(b) Mise en oeuvre. Extrait de [Labbé et al., 2007]

FIG. 6.3 - *Matériel et protocole pour l'acquisition ULM*

FIG. 6.4 - *Drone conçu par l'Avion Jaune, en test sur la Durance*

Les choix de plate-forme et de capteur ont fixé plusieurs paramètres pour l'acquisition des images. Il reste néanmoins un certain nombre de variables à optimiser de manière à former un jeu de données exploitable en stéréo pour une application thématique en hydrobiologie ou en hydraulique (table 6.1). Ces variables seront à optimiser

Paramètres	valeur imposée	à optimiser	plage imposée
couverture stéréo	100%	-	-
recouvrement	60%	-	-
taille de la matrice	3264x2448	-	-
B/Z	-	oui	-
résolution au sol	-	oui	-
focale c	-	oui	28 à 80 mm
vitesse	-	oui	$>$ 70 km/h
temps d'obturation	-	oui	$>1/2000^{\text{eme}}$s
altitude moyenne Z	-	oui	-
temps entre deux vues	-	oui	$>$ 4 s

TAB. 6.1 - *Caractéristiques de l'acquisition*

suivant les contraintes détaillées dans la section 6.2.1.

6.2 Protocole d'acquisition des images

Afin d'acquérir un jeu de données exploitable en stéréo, il faut élaborer un protocole d'acquisition spécifique : (i) du terrain ; (ii) des technologies utilisées. On expose donc dans une première section les contraintes spécifiques de notre expérimentation. On détaillera ensuite les choix effectués, puis le travail sur le terrain faisant partie du protocole. Enfin on donnera quelques informations sur la mise en oeuvre pratique de l'acquisition.

6.2.1 Contraintes

Pour la formation d'un jeu de données exploitable en stéréo les points suivants doivent être examinés : exposition correcte de l'ensemble de l'image (partie émergée et immergée), limitation de l'effet de filé, couverture stéréo à 100% de la partie immergée, couverture des berges permettant le positionnement sur le terrain et la présence dans l'image de points de contrôle au sol (mires), optimisation de la précision de la mesure

en X, Y et Z (résolution au sol et B/Z).

L'exposition correcte est assurée d'une part en utilisant un filtre polarisant, dont le but et de limiter au maximum les réflexions spéculaires [Mount, 2005], et d'autre part en sous-exposant globalement l'image, de manière à ne pas saturer les zones émergées. Ces dernières ont en effet une radiométrie très forte (cailloux clairs, fort éclairement) et les mires doivent pouvoir y être repérées.

Le filé réel perceptible se calcule à partir de l'équation suivante [Krauss et Waldhäusl, 1998] :

$$\text{filé} = \frac{1}{2}\ v\ t_{obt} \cdot \frac{c}{Z} \tag{6.1}$$

où v est la vitesse de la plateforme et t_{obt} le temps d'obturation.

À vitesse de vol v et temps d'obturation t_{obt} fixés, le filé est inversement proportionnel au facteur d'échelle Z/c. Cela correspond au fait qu'en pratique, les prises de vue à très haute résolution spatiale doivent être réalisées à partir de plates-formes lentes. L'utilisation du Sony DSC-F828 à bord de l'ULM impose une limite inférieure à la résolution des images.

La couverture stéréo à 100% de la zone immergée est assurée en fixant le recouvrement des images à 60%. On obtient en conséquence - figure 6.5 - une relation de proportionnalité inverse entre B/Z et focale c qui peut se calculer par la formule :

$$\frac{B}{Z} = \frac{(1 - R_p) \cdot L_{matrice}}{c}, \text{ avec } R_p = \frac{R}{B + R} \tag{6.2}$$

où R est le recouvrement longitudinal, B la base des prises de vue, $L_{matrice}$ la longueur de la matrice en pixels et c la longueur focale (ou distance principale) en pixels. En pratique, le recouvrement longitudinal est commandé par l'intervalle de temps minimum permis par l'appareil photo entre deux prises de vues, la vitesse de la plateforme - constante - étant connue. Ce temps dépend du mode de prise de vue de l'appareil (RAW (brut), TIFF non compressé, JPEG). Le format brut conserve les données telles qu'enregistrées sur la matrice CCD et nécessite un long temps de transfert (plus d'une dizaine de secondes en pleine résolution) ; l'acquisition au format non compressé est elle aussi plus lente que l'acquisition en mode prise de vue normale [Sony, 2003]. Le mode de prise de vue normale effectue une compression des images.

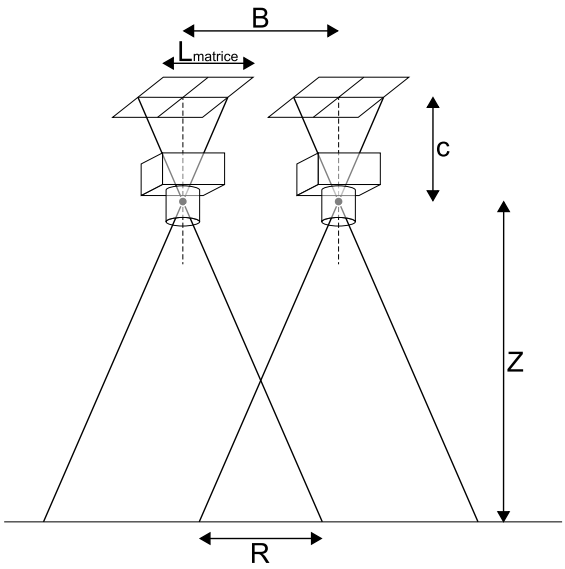


FIG. 6.5 - *Notations utilisées dans l'équation 6.2. Cette équation met en évidence la relation de proportionnalité inverse entre le rapport B/Z et la distance focale c pour un recouvrement donné.*

La couverture des berges et la résolution au sol sont liées par la formule suivante, qui correspond au calcul de l'emprise latérale des images :

$$\text{emprise latérale} = l_{matrice} \cdot \frac{Z}{c} \tag{6.3}$$

où $l_{matrice}$ est la largeur de la matrice en pixels et $\frac{Z}{c}$ le facteur d'échelle ou taille d'un pixel au sol (la focale c est donnée en pixels). Une couverture des berges donnée impose une borne inférieure à la résolution au sol. En pratique, du fait de la sinuosité de la rivière et de la plate-forme, on utilisera une marge de sécurité sur l'emprise latérale de manière à s'assurer de la présence de mires sur les deux berges.

La précision de la mesure en Z est liée à la résolution au sol, au rapport B/Z et au facteur d'échelle Z/c (cf. équation 5.4). Pour un capteur de longueur de matrice $L_{matrice}$ et un taux de recouvrement R_p fixés, on a, d'après l'équation 6.2 :

$$\sigma_z = \frac{Z}{(1 - R_p) \cdot L_{matrice}} \sigma_{p_\xi}, \text{ avec } R_p = \frac{R}{B + R} \tag{6.4}$$

La précision de la mesure en z est donc indépendante de la focale c, mais directement proportionnelle à l'altitude Z et à la précision du pointé σ_{p_ξ}. Pour un capteur et un recouvrement donnés, la précision est maximale pour une altitude minimale.

6.2.2 Choix effectués - réglage du capteur, plan de vol

La première variable à optimiser est l'altitude Z, de manière à obtenir la meilleure précision de mesure en z (équation 6.4). Cette altitude Z doit donc être minimale. D'autre part, afin d'assurer la couverture de berges, on fixe l'emprise latérale à un peu plus de 180 mètres. Afin d'obtenir cette valeur avec une altitude Z minimale, il faut aussi choisir la focale c la plus petite disponible (équation 6.3).

Pour le Sony DSC-F828, la plus petite focale est un équivalent 28 mm. En conséquence, l'altitude Z doit être supérieure ou égale 200 mètres. Le pixel au sol correspondant à cette altitude est d'environ 0.08 mètres. La focale à 28 mm détermine de plus les angles maximaux en sortie d'objectif (45 $^\circ$ environ), ainsi que le B/Z maximal (0.48, selon l'équation 6.2).

Finalement, afin de limiter au maximum les effets de filé dans les limites possibles avec le Ballerit HM-1000, on fixe la vitesse de vol à 70 km/h. À cette vitesse, à l'altitude et avec la focale choisies, l'intervalle de temps entre deux prises de vues permettant d'assurer le recouvrement de 60% est de 5 secondes environ. L'appareil est réglé en mode JPEG afin de pouvoir effectuer des prises de vues selon cet intervalle de temps. Cela correspond à une base de 100 mètres environ.

A la vitesse de 70 km/h, avec un temps d'obturation $1/1000^{\text{eme}}$ de seconde, la focale de 28 mm et une altitude de 200 mètres, le filé résultant est inférieur au $1/8^{\text{eme}}$ de pixel.

6.2.3 Travail sur le terrain associé

Le travail sur le terrain associé à l'acquisition des images à partir d'ULM ou de drone, vise essentiellement à fournir une référence spatiale pour les images. On positionne donc des mires sur le terrain. Ces mires doivent être *contrastées par rapport au terrain*, de manière a être facilement repérées dans les images. L'idéal pour la plupart des terrains est l'utilisation de blanc sur fond noir. Sur le terrain particulier d'une rivière à galets, les ombres des galets étant très sombres (proches du noir) et les galets très clairs (proches du blanc), il peut être indiqué d'utiliser d'autres couleurs, comme le rouge. Des mires temporaires peuvent de plus être créées en utilisant les galets présents sur le terrain et de la peinture. Cette technique présente l'avantage de mobiliser peu de matériel et donc de pouvoir disposer d'un grand nombre de mires. Un tel matériel est de plus mobilisable de manière réaliste dans des conditions terrain parfois difficiles

(traversée de la rivière, franchissement de chablis, de falaises...)

Les mires doivent avoir une taille suffisante pour pouvoir être détectées et caractérisées (positionnement du centre) dans les images. Elle doivent donc couvrir un minimum de 5 pixels, soit dans notre cas plus de 40 centimètres. Pour faciliter le positionnement du centre, on peut donner une forme spécifique comportant des symétries axiales ou centrale (croix, carré).

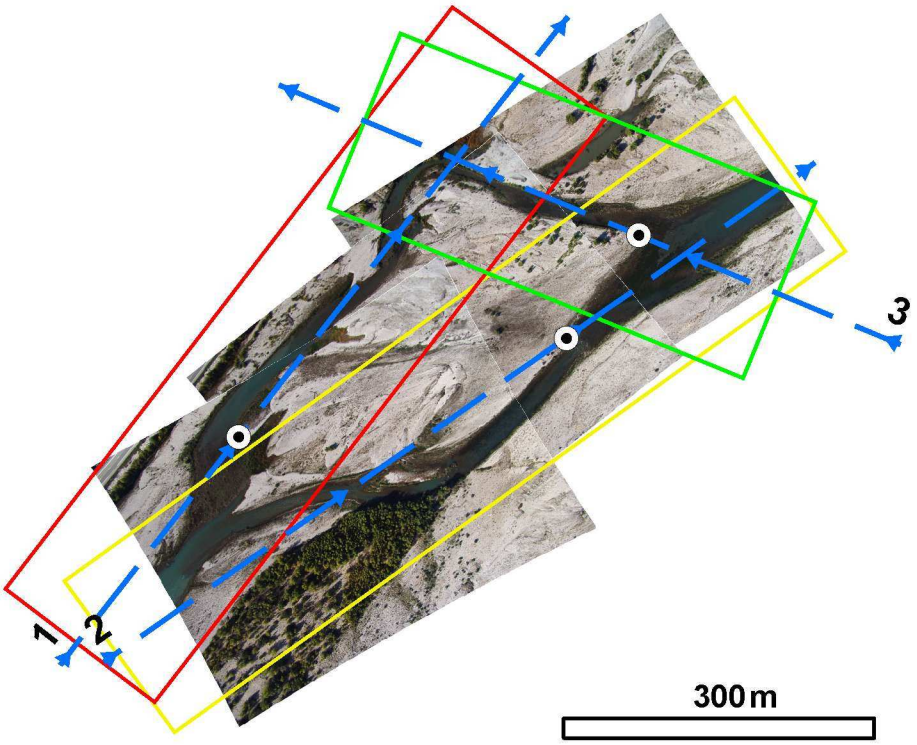
6.2.4 Mise en oeuvre opérationnelle du plan de vol

De manière à effectuer une acquisition suivant les paramètres choisis, un plan de vol a été fourni au photographe et au pilote. Celui-ci est illustré sur la figure 6.6 ; les axes de vols sont déterminés par des points remarquables au sol ainsi que des caps compas. L'altitude, la vitesse de vol approximatives sont déterminées et données en consigne au pilote. L'intervalle de temps séparant 2 prises de vues consécutives est donné au photographe.

Ces contraintes doivent permettre d'obtenir des clichés avec un recouvrement le plus proche possible des 60% nominaux, une couverture des berges, ainsi qu'une échelle homogène d'une photographie à l'autre (altitude, visée verticale). De plus, l'appareil étant fixé sur une plate-forme manipulable à la main à l'extérieur de l'aéronef (figure 6.3(b)) l'ajustement en temps réel de l'orientation de l'appareil (visée verticale) ainsi que du filtre polarisant est possible pour chaque axe de vol.

6.3 Limites et potentiels d'une acquisition d'images suivant ce mode opératoire

Ce mode d'acquisition, spécifique car adapté au cahier des charges de la mesure du relief immergé de rivière par stéréophotogrammétrie, est caractérisé par ses limites et ses potentiels, décrits dans les sections suivantes.



axe	longitude	latitude	cap compas
1	5.932 °	44.006 °	47
2	5.930 °	44.005 °	38
3	5.937 °	44.008 °	-67

FIG. 6.6 - *Préparation du plan de vol. Points noir et blanc : points remarquables au sol. Flèches pointillées : axes de vol. Rectangles : emprises totales au sol prévues pour les trois axes de vol. Les unités des valeurs de la table sont des degrés*

6.3.1 Limites

Absence de mesure et de contrôle de la position de l'appareil

Le montage utilisé ne comporte pas de plate-forme inertielle ni de GPS couplé à l'appareil. La géométrie de prise de vue est donc entièrement déterminée à partir des informations images. L'initialisation de ce calcul passe donc par une intervention de l'opérateur.

De plus, en l'absence de contrôle de la position et de l'attitude de l'appareil le respect du plan de vol et la bonne couverture stéréo de la zone d'intérêt dépend beaucoup de l'expérience et de la bonne coordination du pilote et du photographe.

Vitesse de la plate-forme

Un ULM possède une vitesse minimale relative en dessous de laquelle se produit le décrochage. Le Ballerit HM 1000 a une vitesse de sustentation minimale de 55km/h [Mignet, 2001]. Pour des raisons de sécurité évidentes, le pilote ajoute une certaine marge à cette vitesse en vol. La vitesse de l'ULM reste donc supérieure à 70km/h environ ($\approx 20m.s^{-1}$).

Or la vitesse a une importance sur plusieurs paramètres de l'acquisition. D'une part elle joue sur les intervalles temporels entre deux déclenchements. Elle est donc un paramètre d'autant plus limitant qu'elle est élevée pour un capteur donné. De plus, la prise de vue doit être effectuée à une altitude minimale afin d'avoir accès à des résolutions spatiales les plus fines possibles et à la meilleure précision de stéréorestitution. Or le filé est d'autant plus important que la vitesse de la plateforme est grande et que l'altitude est basse. Là encore la mise en oeuvre d'un plateforme lente, telle que certains drones, permettrait de respecter plus facilement les contraintes de l'acquisition.

Capteur petit format

Comme on l'a vu au travers des équations 6.2 et 6.4, le B/Z maximal est borné à 0.5 pour le capteur utilisé. En revanche, l'utilisation d'un capteur plus grand format peut permettre la prise de vue, à résolution et recouvrement constants, avec un B/Z plus grand, conduisant à une meilleure précision stéréoscopique.

6.3.2 Potentiels

Coût

Si l'on dispose d'un photographe expérimenté, l'acquisition du capteur étant très peu onéreuse (quelques centaines d'euros pour un bon appareil numérique), les coûts relatifs à chaque acquisition sont limités à la prestation de service du pilote (quelques centaines d'euros pour une matinée), et à l'achat des consommables, principalement pour la disposition des mires sur le terrain. On est donc dans un tout autre ordre de grandeur par rapport à un relevé de topographie par tachéomètre (cf. figure A en annexe).

Accès à la très haute résolution spatiale

L'un des premiers avantages de telles méthodes d'acquisition est l'accès à la très haute résolution spatiale avec des capteurs bon marché. En effet, l'utilisation d'ULM, et plus encore de drones, du fait de leur plus faible vitesse en vol, permet le survol à très basse altitude des zones d'intérêt, et ce, même si le voisinage immédiat est très accidenté (vallées encaissés ou rideaux d'arbres, par exemple). Cela permet d'accéder, par télédétection, à des échelles de travail plus locales, notamment l'échelle des micro-habitats pour l'étude de la rivière.

Flexibilité des acquisitions

De plus, et là encore cela est d'autant plus vrai avec l'utilisation de drones, l'acquisition d'images avec de telles technologies est très flexible. En dessous de 150 mètres d'altitude, ces derniers sont en effet soumis à la réglementation des modèles réduits. Exemple concret : l'élaboration et la communication d'un plan de vol aux autorités aériennes civiles n'est pas nécessaire. Il est donc possible de préparer une mission en avance, puis de décider et d'effectuer une acquisition en quelques heures.

Chapitre 7

Que voit-on en stéréo à travers l'eau ?

L'objectif de ce chapitre est le suivant : déterminer l'influence de la traversée de l'interface air/eau (ou miroir) sur la mesure par stéréophotogrammérie, voire sur la possibilité même de cette mesure en rivière.

L'idée de la mesure du relief par photogrammétrie à travers l'eau n'est pas nouvelle [Tewinkel, 1963, Rinner, 1969, *non exhaustif*] et l'expression "photogrammétrie à deux milieux" apparaît dès 1948 [Zaar, 1948, Rinner, 1948]. Cependant cette littérature spécialisée est adaptée aux applications en milieu marin et donne une vision partielle du problème pour les autres applications. On ne prétend pas bien sûr apporter ici une meilleure réponse sur ce vaste sujet, mais plutôt une approche complémentaire permettant de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans le cas de la stéréorestitution du relief immergé de la rivière. À cette fin, on s'appuiera sur une modélisation des phénomènes physiques concernés.

Pour cela, on s'attache tout d'abord dans ce chapitre à exposer le cadre théorique des modèles développés, notamment, l'utilisation des lois de l'optique géométrique et la définition et justification de la *notion de point apparent*. Ensuite, à partir de l'étude qualitative d'un cas réel, ainsi que de la résolution analytique d'un cas simplifié, on décrit l'approche choisie, notamment les méthodes de modélisation et les approximations utilisées. On détermine ainsi l'effet de la réfraction par une interface localement plane sur la mesure stéréophotogrammétrique. La validité de cette approximation "surface localement plane" est discutée. Finalement, on évalue la faisabilité de la correction de la réfraction et la qualité potentielle de la mesure obtenue.

7.1 Cadre théorique

La restitution du relief par stéréophotogrammétrie repose sur des considérations géométriques selon lesquelles les objets et leur points image sont reliés par des rayons lumineux (voir section 5.1). On étudie dans ce chapitre l'influence de la réfraction sur la géométrie même du problème de la stéréorestitution (validité des modèles utilisés en photogrammétrie, notamment la géométrie perspective - voir section 5.1.1). On se place donc toujours dans le cadre de l'optique géométrique, faisant appel à la notion de rayon lumineux. On n'abordera pas ici les phénomènes de diffusion (par les particules en suspension par exemple), qui font sortir le problème du cadre d'application de l'optique géométrique et donc de celui de la photogrammétrie.

On parle habituellement en photogrammétrie de la réfraction due à la traversée de l'atmosphère. Il peut en effet être nécessaire de prendre en compte ce phénomène pour des prises de vue à haute altitude mais celui-ci peut être négligeable pour des prises de vue à basse altitude[1] [Krauss et Waldhäusl, 1998]. Dans l'ensemble du document, on réservera l'emploi du terme "réfraction" pour la réfraction à l'interface entre air et eau.

On étudie tout d'abord le phénomène de réfraction, puis le lien avec les équations de la photogrammétrie. On discute ensuite de la faisabilité de la stéréorestitution à travers l'eau. Celle-ci passe par la définition et la justification de la notion de point apparent.

7.1.1 Réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux

La propagation de la lumière suit le Principe de Fermat, selon lequel le trajet des rayons lumineux correspond à un chemin optique minimal[2] [Fermat, 1896]. Le chemin optique se définit comme la distance qu'aurait parcouru, pendant la même durée, le rayon lumineux s'il se propageait dans le vide. Il est donc dépendant de la vitesse de la lumière dans le milieu. On utilise la notion d'indice de réfraction relatif du milieu, qui est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

[1] pour une prise de vue à 200m d'altitude, le déplacement en bord de champ dû à la réfraction atmosphérique est estimé à 0.037 pixels.

[2] plus exactement, extrémal

A la traversée d'un dioptre - surface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents, le trajet correspondant au chemin optique minimal n'est pas la ligne droite : la lumière est déviée, il y a réfraction. Ce phénomène est décrit par la loi de Snell-Descartes :

$$\begin{cases} \text{le rayon incident et le rayon réfracté sont coplanaires} \\ n_1 sin\,(i) = n_2 sin\,(r) \end{cases} \tag{7.1}$$

avec n_1, l'indice de réfraction du milieu 1 ;
i, l'angle entre la normale à l'interface et le rayon incident ;
n_2, l'indice de réfraction du milieu 2 ;
r, l'angle entre la normale à l'interface et le rayon refracté ;

Cette équation est valable quelle que soit la forme de l'interface entre les deux milieux. On l'appliquera en particulier au dioptre plan (section 7.3), ainsi qu'à un modèle sinusoïdal de la surface de l'eau (section 7.5.1). Il faut noter qu'elle est valable pour des milieux homogènes, et que l'indice de réfraction de l'eau peut varier selon différents paramètres. Il convient donc de vérifier que l'indice de réfraction de l'eau varie peu selon les conditions du milieu.

D'après [Jerlov, 1976, p.2], cité par [Fryer, 1983b] et [Westaway et al., 2001], la valeur de l'indice de réfraction de l'eau varie de moins de 0.53% pour des températures comprises entre 0 et 30 degrés Celsius et des salinités comprises entre 0 et 40 000 parties par million. Par ailleurs, pour l'eau pure, avec des longueurs d'onde variant entre 400 et 800 nanomètres - domaine du visible - et des températures comprises entre 19 et 24 degrés Celsius, la valeur de l'indice varie de moins de 0.56% [Daimon et Masumura, 2007]. Rapporté à la mesure de profondeur, l'ensemble de ces variations possibles correspond à une erreur inférieure à 0.75% pour des rayons ayant une incidence maximale de 45 degrés. Il est ainsi possible d'utiliser une valeur constante de l'indice ; le plus souvent on utilise 1.34 en milieu marin [Fryer, 1983b] ; on utilisera 1.33 pour l'eau douce.

7.1.2 Réfraction et effet stéréoscopique - notion de point apparent

Dans la littérature concernant l'utilisation de photogrammétrie à travers l'eau, de nombreux problèmes, concentrés autour des applications en milieu marin côtier et de

leur spécificités sont abordés. Les point d'intérêt sont : l'influence des vagues de grande longueur d'onde - et de leur propagation - sur la mesure [Fryer, 1985a, Fryer, 1985b, Okamoto, 1982] ; le calcul et la correction des profondeurs pour une position moyenne de la surface de la mer [Fryer, 1983a, Fryer, 1983b, Fryer, 1984, Karara, 1989, Buchroithner, 1991] ; le développement de méthodes spécifiques pour le calcul de l'orientation externe à partir de points immergés [Karara, 1989, Tan, 1989, Shan, 1994].

Du fait, le plus souvent, des conditions expérimentales correspondant à ces applications en milieu marin (profondeur négligeable devant l'altitude de prise de vue, vagues de faible amplitude devant leur longueur d'onde), la faisabilité même de la stéréorestitution n'est que rarement discutée. L'effet de la réfraction dans le plan horizontal (déplacements apparents horizontaux, variation de l'effet de la réfraction selon la position du point dans la zone stéréo) n'est que peu évoqué [Tewinkel, 1963]. Il convient, pour une application en rivière, d'étudier ces aspects et de vérifier le potentiel de la mise en oeuvre d'une méthode de stéréorestitution dans ce milieu spécifique.

On définit les rayons apparents - ou virtuels - comme les rayons rectilignes qui se superposent aux rayons lumineux réels *dans leur partie aérienne.*

On appellera ainsi *position apparente* la position du point vue par le système des deux capteurs et restituée sans prendre en compte l'effet de la réfraction. On parlera de *déplacement apparent* pour désigner la différence entre position apparente et position réelle.

Lorsque l'on effectue la stéréorestitution de points immergés, ce sont sur les rayons apparents que l'on s'appuie. Or, si les rayons réels s'intersectent par nature (ils proviennent du même objet !), ce n'est pas le cas en général pour les rayons apparents (cf. figure 7.1). Ceci n'est relaté que par une partie de références [Tewinkel, 1963, Rinner, 1969, Fryer, 1983b, Fryer, 1985a], les trois dernières se concentrant sur la distance entre les points d'intersection de chaque rayon avec la droite verticale passant par le point du fond considéré[3].

La divergence des rayons apparents dans le cas général est probablement passée sous silence dans la plupart des autres références du fait de l'utilisation de stéréorestituteurs analogiques et/ou analytiques aux dates auxquelles ont été écrits ces travaux. L'opérateur qui restitue la position d'un point immergé détermine en effet naturelle-

[3] cette intersection n'existe d'ailleurs rigoureusement que pour le cas d'une surface plane horizontale, pour laquelle toutes les normales sont verticales

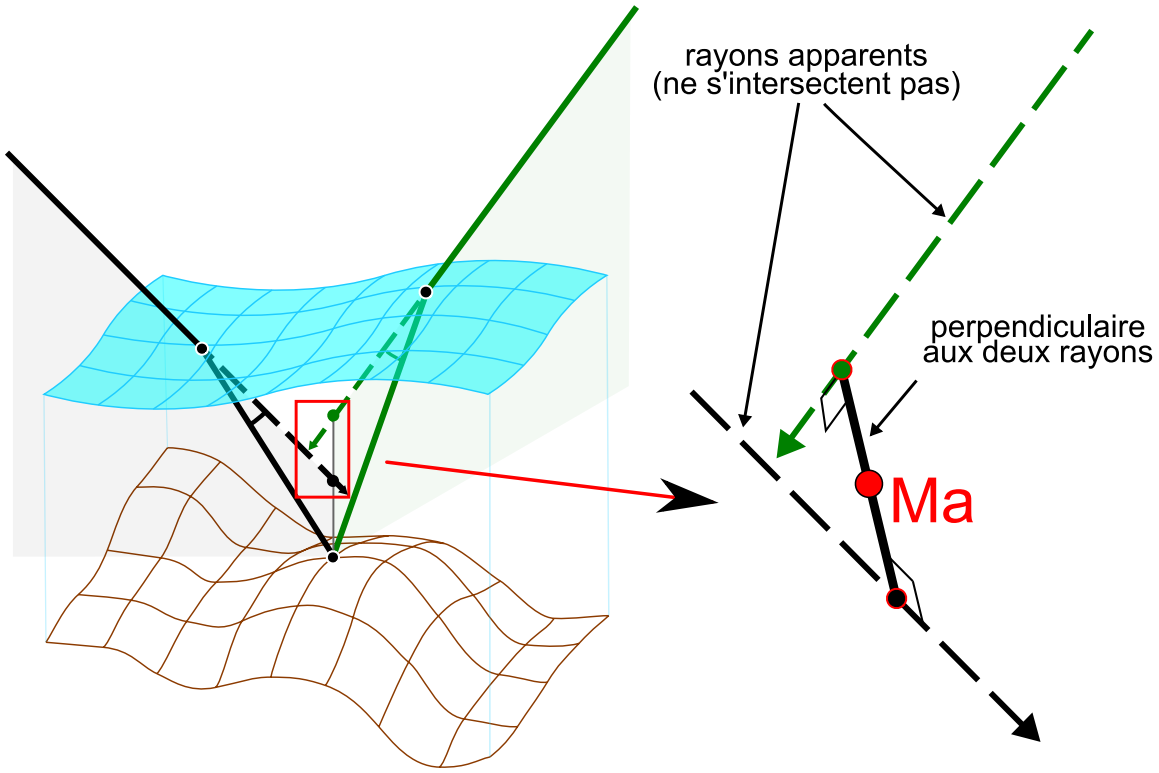


FIG. 7.1 - *Mise en évidence de la divergence des rayons apparents dans le cas général. Définition du point apparent Ma comme le point le plus proche des deux rayons apparents, c'est à dire le milieu du segment porté par la droite perpendiculaire aux rayons apparents.*

ment la position d'un "point de moindre confusion" [Tewinkel, 1963, Fryer, 1985a]. En vision humaine ou animale, le relief peut être perçu malgré l'effet de la réfraction : les yeux effectuent des petits mouvements correctifs permettant d'obtenir une convergence binoculaire et ainsi la perception du relief [Horvath et al., 2003, Barta et Horvath, 2003].

Les rayons apparents ne s'intersectant pas dans le cas général - et n'étant pas parallèles - ils ne sont en particulier pas coplanaires. La condition "classique" de coplanarité n'est donc pas satisfaite pour les rayons apparents, qui sont les rayons déterminés par la position du capteur et des points homologues dans les images.

Il existe un cas particulier pour lequel les rayons apparents possède une intersection dans l'hypothèse d'une interface plane horizontale. Celui-ci se produit pour les points situés dans deux régions particulières de l'espace : (i) le plan vertical situé à égale distance des deux centres de projection [Fryer, 1985a] ; (ii) le plan vertical contenant les deux centres de projection. Ces deux plans sont perpendiculaires.

En dehors de ces deux plans, la stéréorestitution des rayons virtuels nécessite donc une approximation. L'approximation qui a été choisie pour les modélisations présentées dans la suite s'inspire du mécanisme de la fusion stéréoscopique en vision binoculaire [Horvath et al., 2003] : on définit le "point apparent" comme le point le plus proche des deux rayons virtuels. Il s'agit du milieu du segment porté par la droite perpendiculaire aux deux rayons virtuels (cf. figure 7.1 partie droite).

7.1.3 Existence du "point apparent" - validité de l'approximation utilisée pour la stéréorestitution à travers l'eau

Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, il n'y a pas à proprement parler de "point apparent", qui serait l'intersection des rayons lumineux tels que vus par un individu ou par deux capteurs.

Pour la stéréorestitution - détermination de la position (X, Y, Z) des points du terrain à partir de la position de ces points dans deux images - il convient de se poser la question de la validité de l'approximation proposée au paragraphe précédent. L'erreur commise en effectuant une telle approximation peut être déterminée de la manière suivante.

Étant donnés la position d'un point terrain, les paramètres de prise de vue en stéréo, et la position de l'interface air/eau (miroir) :

1. on détermine la position du point apparent tel que défini ci-dessus (figure 7.1) ;
2. on utilise les droites passant par le point apparent et les capteurs comme *estimations* des rayons apparents ;
3. on effectue le calcul de la réfraction de ces rayons ;
4. on détermine l'intersection de ces rayons réfractés : on obtient ainsi une estimation de la position du point réel ;
5. finalement, on calcule la différence entre la position réelle du point terrain et sa position estimée.

Plusieurs simulations ont été effectuées, pour différentes conditions de prise de vue stéréo - altitudes, B/Z - et rivières théoriques idéales de profondeurs constantes. Les angles incidents maximaux simulés (45 degrés) sont ceux de prises de vue verticales effectuées avec le capteur décrit à la section 6.1.2 avec la focale équivalente de 28 millimètres. On a ensuite divisé les écarts calculés par la profondeur.

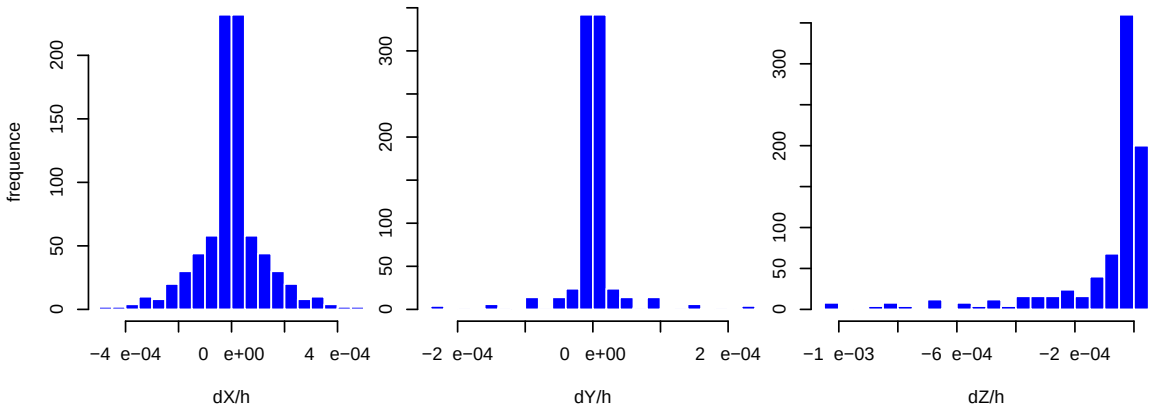


FIG. 7.2 - *Distribution des erreurs relatives sur la position (X, Y, Z) des points immergés due à l'approximation "point apparent". Les erreurs absolues ont été divisées par la profondeur. Ces données sont le résultat de simulations effectuées pour différents paramètres de prise de vue et différentes profondeurs.*

Les erreurs dues à l'hypothèse "point apparent" sont inférieures au millième de la hauteur d'eau (voir figure 7.2).

L'hypothèse de l'existence du point apparent semble donc justifiée. On utilisera l'approximation correspondante dans les paragraphes suivants.

7.1.4 Équations de la photogrammétrie à deux milieux

Les équations de la photogrammétrie sont basées sur un modèle de formation des images selon une géométrie *perspective* (voir section 5.1.1). Elles sont valables pour des rayons lumineux rectilignes. Or, dans le cas de la photogrammétrie à deux milieux, du fait de la réfraction, les rayons lumineux réels sont des lignes brisées.

Afin de pouvoir mettre en oeuvre les équations classiques, on s'appuie sur la notion de *rayon apparent*, défini comme le rayon rectiligne qui se superpose au rayon lumineux réel dans sa partie aérienne[4]. La section précédente a permis de valider l'existence du point apparent et de conclure que ce point apparent M_a se situe approximativement sur ce rayon (cf. figure 7.3).

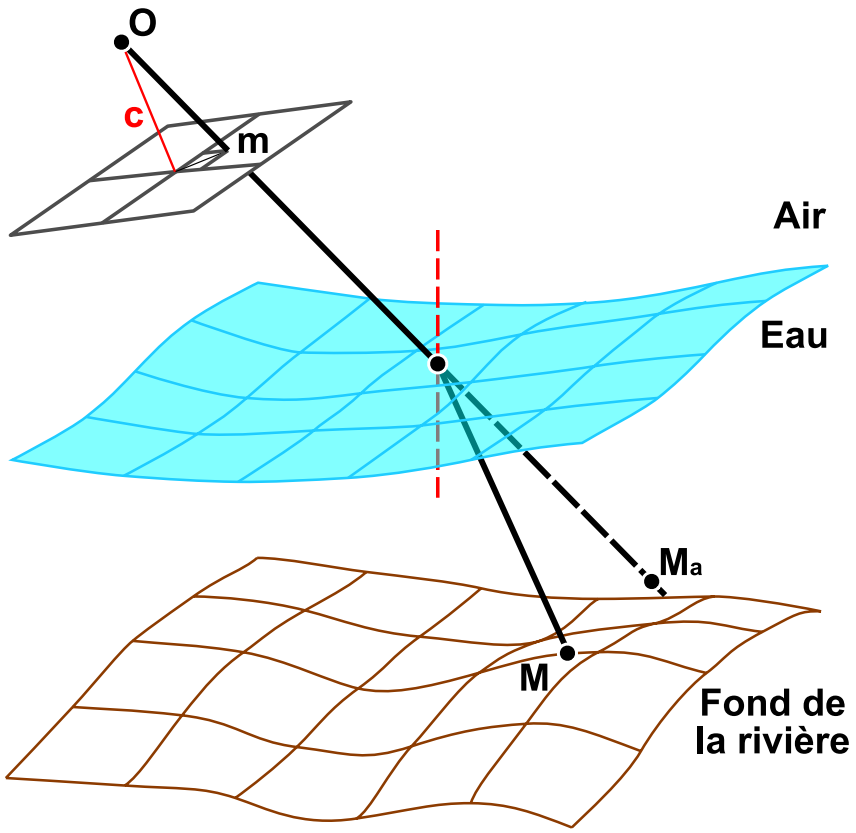


FIG. 7.3 - *Photogrammétrie à deux milieux - Notations*

On établit la relation entre coordonnées images et coordonnées terrain d'un point *apparent* selon la condition de colinéarité appliquée aux rayons apparents [Krauss et

[4]dit autrement, il s'agit du rayon virtuel du dioptre air/eau

Waldhäusl, 1998, Kasser et Egels, 2001] :

$$\begin{cases} X_a = X_0 + (Z_a - Z_0)\dfrac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y_a = Y_0 + (Z_a - Z_0)\dfrac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{cases} \tag{7.2}$$

En résumé, les équations classiques de la photogrammétrie ne sont plus valables pour les points réels mais restent valables pour les points apparents tels que définis dans la section 7.1.2. On peut donc utiliser les méthodes classiques de la photogrammétrie, notamment la stéréorestitution, pour calculer la position *apparente* des points immergés. Il faudra ensuite corriger l'effet de la réfraction pour estimer leur position réelle.

7.2 Études préliminaires - présentation de l'approche

Dans cette partie, on détermine les caractéristiques de l'effet de la réfraction sur la mesure du relief immergé par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Ceci permet de déterminer l'approche à utiliser pour modéliser cette réfraction.

On évalue dans un premier temps le déplacement apparent des points immergés dans un cas simplifié (surface plane, 2D) permettant une résolution analytique. On dégage de cette analyse les grandes caractéristiques de l'effet de la réfraction "au premier ordre". On observe ensuite les autres effets de la réfraction, notamment ceux dus à une forte rugosité relative de la surface (occlusion de certains points immergés, déformation des objets, images multiples).

On rappelle que l'on parle de *position apparente* pour désigner la position du point vue par le système des deux capteurs et restituée sans prendre en compte l'effet de la réfraction.

On parle de *déplacement apparent* pour désigner la différence entre position apparente et position réelle.

Les *rayons apparents* sont les rayons virtuels du dioptre air/eau, soit les rayons rectilignes qui se superposent aux rayons lumineux réels dans leur partie aérienne.

7.2.1 Résolution d'un cas simplifié

Comme on l'a vu dans la section 7.1.2, le cas du plan vertical contenant les deux centres de projections est particulier : il y a intersection rigoureuse des rayons apparents. On peut de plus calculer cette intersection de manière analytique en exprimant les relations trigonométriques dans les quatre triangles rectangles de la figure 7.4 (voir le détail des calculs en annexe C.2). Avec les notations présentées sur la figure 7.4, on a donc :

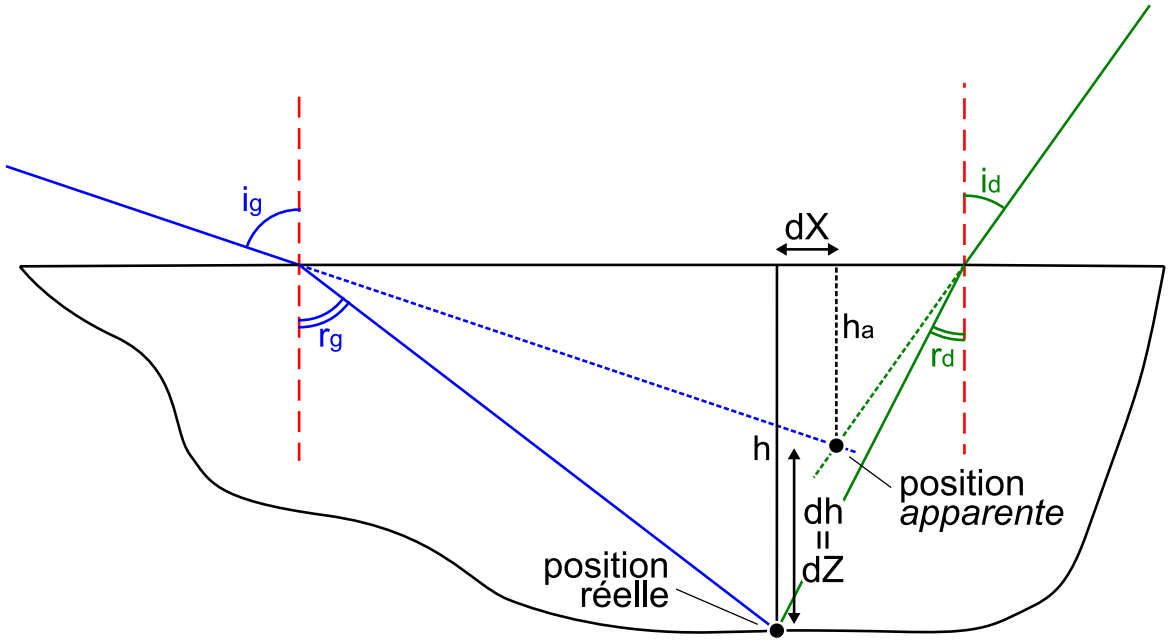


FIG. 7.4 - *Calcul de l'influence de la réfraction dans le cas d'un plan vertical*

$$\frac{h}{h_a} = \frac{\tan(i_g) + \tan(i_d)}{\tan(r_g) + \tan(r_d)} \tag{7.3}$$

ou encore

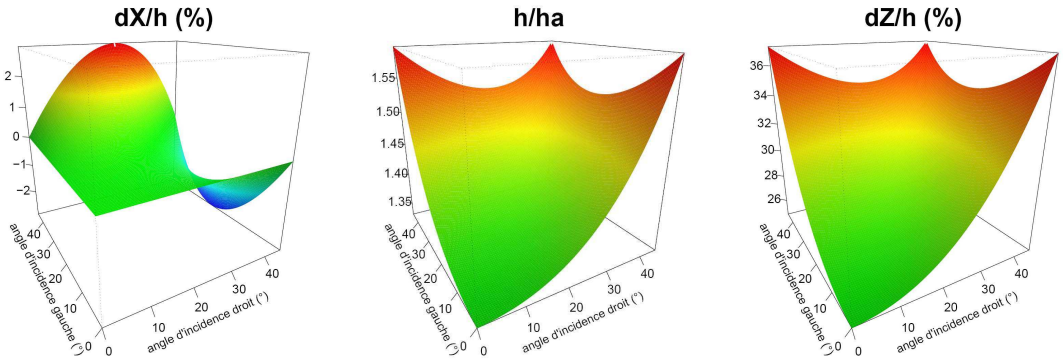
$$dZ = dh = h\left(\frac{\tan(r_g) + \tan(r_d)}{\tan(i_g) + \tan(i_d)} - 1\right) \tag{7.4}$$

Ce résultat (équation 7.4) permet de vérifier l'hypothèse empirique selon laquelle les déplacements apparents dus à la réfraction sont dépendants des angles incidents et proportionnels à l'épaisseur de la lame d'eau traversée. Pour une position dans l'espace donnée (angles d'incidence fixés), le déplacement vertical est proportionnel à la profondeur h. Pour une rivière dont la profondeur h serait constante, l'effet de la réfraction varie en fonction des angles d'incidence, c'est à dire en fonction de la position du point dans la zone stéréo.

Il est de plus possible de calculer les déplacements horizontaux avec les mêmes notations :

$$\frac{dx}{h} = \tan(r_g) - \frac{h_a}{h}\tan(i_g) \tag{7.5}$$

Application numérique et représentation graphique



(a) Déplacement horizontal (b) Profondeurs (c) Déplacement vertical

FIG. 7.5 - *Déplacements du point apparent en fonction des angles incidents gauche et droit. Ces figures sont reprises en pleine largeur page 245*

Pour des angles incidents compris entre 0 et 45 degrés, les valeurs des déplacements apparents horizontaux varient entre -2.9% et +2.9% de la profondeur (valeurs extrêmes de la fonction représentée sur la figure 7.5(a)).

Pour la même plage de variation angulaire, le rapport h/h_a varie entre 1.33 et 1.59 (figure 7.5(b)). Exprimé en déplacements relatifs, cela correspond à un déplacement vertical apparent variant entre +24.8% et +37.2% de la profondeur (figure 7.5(c)).

Si l'on effectue le rapport entre déplacements apparents horizontaux et verticaux, on constate que les déplacements apparents horizontaux représentent moins de 8% des déplacements verticaux. On peut donc dire que les déplacements dûs à la réfraction se situent principalement suivant la verticale.

Les résultats obtenus lors de cette étude préliminaire permettent de formuler les hypothèses suivantes pour le cas général : (i) les hauteurs apparentes sont obtenues en divisant les hauteurs réelles par un facteur correctif variable selon les angles d'incidence gauche et droit ; (ii) la valeur minimale de ce facteur correctif correspond à l'indice relatif de réfraction de l'eau ; (iii) les déplacements horizontaux sont très inférieurs aux déplacements verticaux.

On vérifiera ces hypothèses par les simulations présentées dans les sections suivantes. Selon ces hypothèses, il est possible d'effectuer un étude adimensionnelle de l'effet de la réfraction. Cela permet d'utiliser un modèle de rivière simplifié (altitude du fond et profondeur constantes). Les paramètres d'intérêt seront :

- *les déplacements apparents dX/h et dY/h, à comparer à la valeur 0* ;
- *le rapport h/h_a à comparer à la valeur 1.33, indice de réfraction de l'eau.*

7.2.2 Cas réel : images doubles, occlusions

Le cas réel - surface non plane - requiert une modélisation plus complexe. En effet, pour une interface quelconque, il n'y a pas de solution analytique. De plus, avec une surface ondulée, plusieurs cas de figure peuvent se produire. Selon les paramètres de cette surface, et les positions relatives du capteur, de la surface, et de l'objet immergé, il est possible, (i) qu'il n'y ait aucun rayon lumineux de chemin optique minimal reliant l'objet au capteur ; (ii) que plusieurs chemins optiques minimaux existent [Fryer, 1984] ; (iii) ou encore qu'il n'existe qu'un unique rayon.

Pour exemple, on propose une illustration remarquablement pédagogique figure 7.6. Il s'agit d'une image en vue oblique, à incidence rasante, d'une nageuse[5] et du carrelage d'une piscine à travers l'eau. Ce cas présente une large gamme d'angles d'incidence, jusqu'à de très fortes valeurs au dernier plan, ainsi qu'un rapport hauteur d'eau sur hauteur de prise de vue très grand, ce qui permet d'exagérer les déformations dues à la surface relativement plane.

On voit que les déformations dépendent de la configuration locale de la surface ainsi que de l'angle de vue. On constate ainsi que l'identification des croisements des lignes est possible au premier plan (angles d'incidence relativement faibles) et de plus en plus difficile avec l'augmentation des angles d'incidence vers l'arrière plan. On observe de plus que les objets dont la taille est grosse relativement aux vagues restent identifiables. On peut donc imaginer que l'utilisation de résolutions spatiales grossières peut agir comme un lissage et donc diminuer l'influence des vagues. On remarque finalement le phénomène de dédoublement de l'image d'un point à travers le dioptre non plan : le sommet de la tête de la nageuse possède deux images.

[5] il s'agit plus exactement d'une hockeyeuse - se référer à http://www.hockeysub.com ou http://hockeysub.ffessm.fr pour des renseignements sur la pratique de ce sport en France

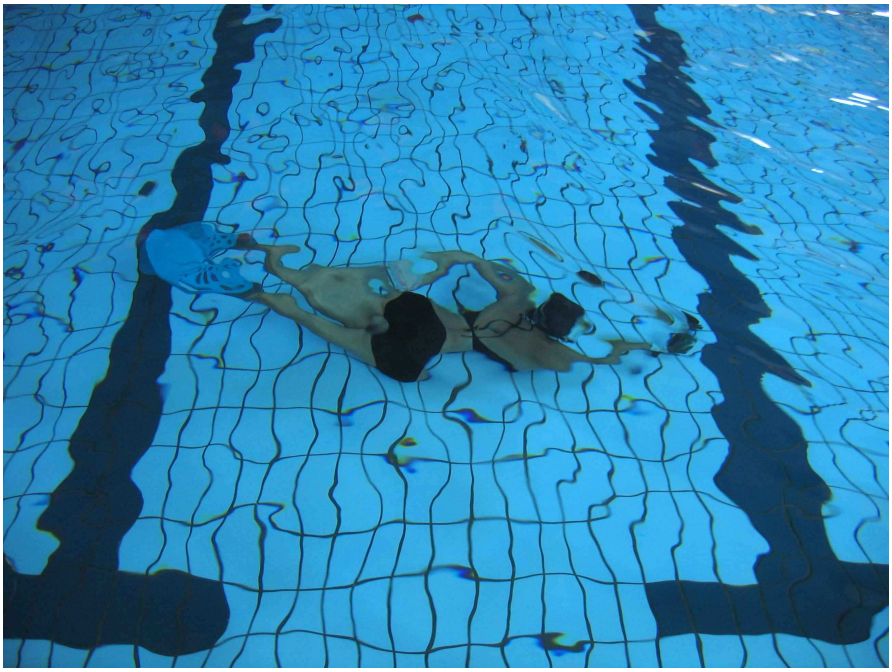


FIG. 7.6 - *Déformations induites par un dioptre non plan pour des incidences fortes (relativement à la rugosité de surface de l'eau). Photo Bruno Roux*

Cette dernière observation expérimentale prouve que le problème de la modélisation de la réfraction à la traversée d'une surface non plane fait partie de la famille des problèmes mal posés (l'existence et l'unicité de la solution ne sont pas garanties). Par ailleurs, l'étude du cas 2D permet de simplifier les simulations tout en modélisant la réalité de manière satisfaisante. Par exemple, une simulation 2D suffit à mettre en évidence les phénomènes de dédoublement d'image (voir figure 7.7).

On effectuera donc les modélisations pour le cas d'une surface localement non plane dans ce cas simplificateur.

7.2.3 Approche choisie : méthode inverse

Les problèmes posés par la restitution du relief immergé à partir de stéréorestituteur analogiques ou analytiques ont conduit dans la littérature à mettre en place des méthodes de correction des *profondeurs* apparentes [Rinner, 1969]. La méthode reprise par la majorité des publications consiste donc à appliquer un facteur correctif variable aux profondeurs apparentes restituées. La valeur de ce facteur dépend de la distance horizontale entre le centre optique et le point d'intersection du rayon avec la surface. On calcule donc deux profondeurs corrigées - à partir des deux rayons - dont on fait la

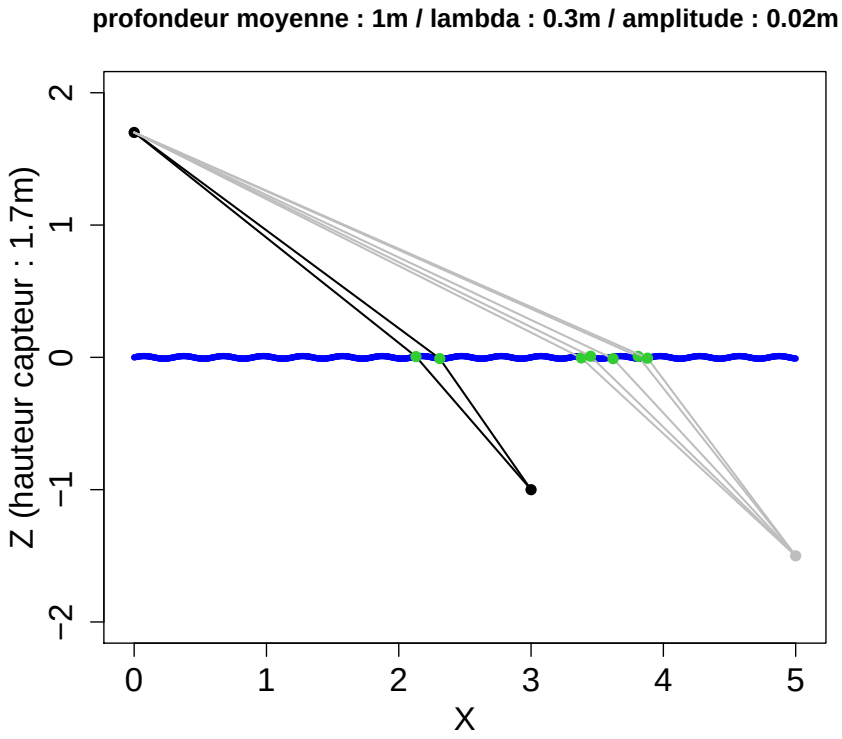


FIG. 7.7 - *Surface non plane - mise en évidence de la possibilité d'images multiples. Les paramètres utilisés ont été choisis de manière à modéliser de manière grossière les conditions expérimentales de la figure 7.6. La simulation a été effectuée pour un point correspondant au sommet de la tête de la nageuse (en noir) ainsi que pour un point correspondant à un joint de carrelage situé en arrière-plan (en gris).*

moyenne [Fryer, 1983b].

Ces méthodes de correction des profondeurs apparentes présentent plusieurs caractéristiques. D'une part, elles sont adaptées au milieu marin, pour lequel on n'a pas d'effet de pente pour la position moyenne de la surface de l'eau. D'autre part, la géométrie réelle de l'intersection des rayons en 3D est sous-exploitée. L'étude des erreurs commises sur l'estimation des profondeurs a mis en lumière une distribution des erreurs bimodale [Okamoto, 1982, Fryer, 1984, Fryer, 1985a]. Celle-ci, d'autant plus forte que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle, est imputée à la présence des vagues [Fryer, 1984].

La modélisation que nous proposons s'appuie sur la considération de l'intersection approchée des rayons apparents en 3D, utilisant la notion de point apparent introduite plus haut. En ce sens notre travail est beaucoup plus proche des travaux réalisées en biologie physique [Horvath et al., 2003, Barta et Horvath, 2003]. Les modélisations effectuées permettront (i) d'une part de déterminer les caractéristiques 3D de l'effet de réfraction en évaluant l'importance des déplacements apparents horizontaux, ainsi que celle des déplacements verticaux ; (ii) d'autre part de corriger l'effet de la réfraction en calculant l'intersection des rayons refractés à partir de la position apparente restituée et de la position de l'interface.

Dans le cas d'une surface localement plane, on est assuré de l'existence et de l'unicité des trajets des rayons lumineux entre l'objet et les capteurs (cf. calculs en annexe D.3). On se situe donc tout d'abord dans ce cadre, de manière à mettre en oeuvre une méthode inverse (figure 7.8) :

1. on suppose le terrain, les caractéristiques de la surface de l'eau et la géométrie de prise de vue connus.
2. on détermine le trajet d'un rayon lumineux entre l'objet et le capteur selon la loi de Snell-Descartes (cf. équation 7.1)
3. on calcule les positions des points d'intersection de ces rayons avec la surface
4. on détermine les coordonnées images de ces points
5. on calcule finalement la position du point apparent, par stéreorestitution classique.

L'étape "critique" de cette approche est le calcul de la position du point d'intersection avec l'interface. En effet c'est par ce moyen que l'on peut déterminer le trajet

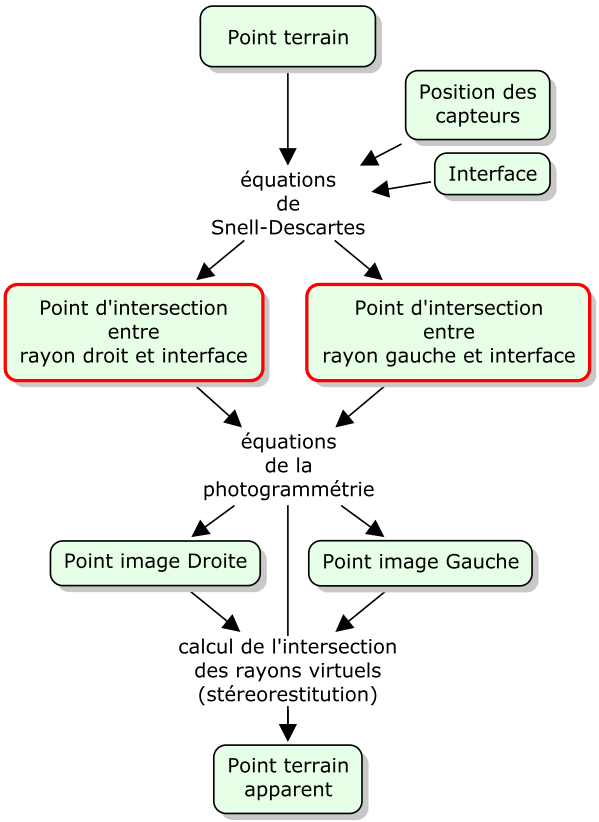


FIG. 7.8 - *Méthode inverse pour l'étude de l'influence de la réfraction sur la restitution des points immergés : on part de la connaissance de la position des points terrain, des capteurs et de l'interface pour calculer la position apparente d'un point. Les étapes entourées en gras sont détaillées dans la suite*

du rayon lumineux réel. Dans le cas d'une surface localement plane, on est assuré de l'existence et de l'unicité de la solution (annexe D.3). On peut donc effectuer des simulations en 3D pour l'ensemble de la zone stéréo. En revanche, ce cas correspond à une approximation de la réalité.

De manière à évaluer l'effet de cette approximation, on effectuera des simulations pour le cas d'une surface non plane localement dans la section 7.5. On étudiera l'effet de la présence de vagues ou encore l'effet d'une erreur sur la position moyenne de l'interface.

7.3 Stéréo à travers une surface localement plane

Comme on l'a vu dans la section précédente, la méthode la plus couramment retenue pour la correction de l'effet de réfraction est l'application d'un facteur correctif aux profondeurs. La valeur de ce facteur correctif est au minimum égale à l'indice de correction de réfraction [Fryer, 1983b].

Dans le cas de nos modélisations, ayant pour objectif une application sur des eaux douces, nous avons choisi la valeur de 1.33. Cette valeur pourra être comparée aux valeurs déterminées pour les déplacements apparents verticaux.

De plus, la méthode proposée dans la section précédente (modélisation en 3D) permet d'évaluer les déplacements apparents horizontaux et ainsi de les comparer aux déplacements apparents verticaux.

7.3.1 Modélisation en 3D de l'effet de la réfraction pour le cas d'une surface plane

Pour des positions données d'un point immergé, d'une interface plane, et du centre de projection d'un capteur, il existe un et un seul rayon lumineux "brisé" pour lequel le chemin optique est minimal (cf. calculs en annexe D.3). On effectue le calcul du trajet du rayon lumineux pour différentes conditions de terrain et de prise de vue stéréo. On évalue ainsi l'influence relative de la réfraction en stéréo selon différents paramètres.

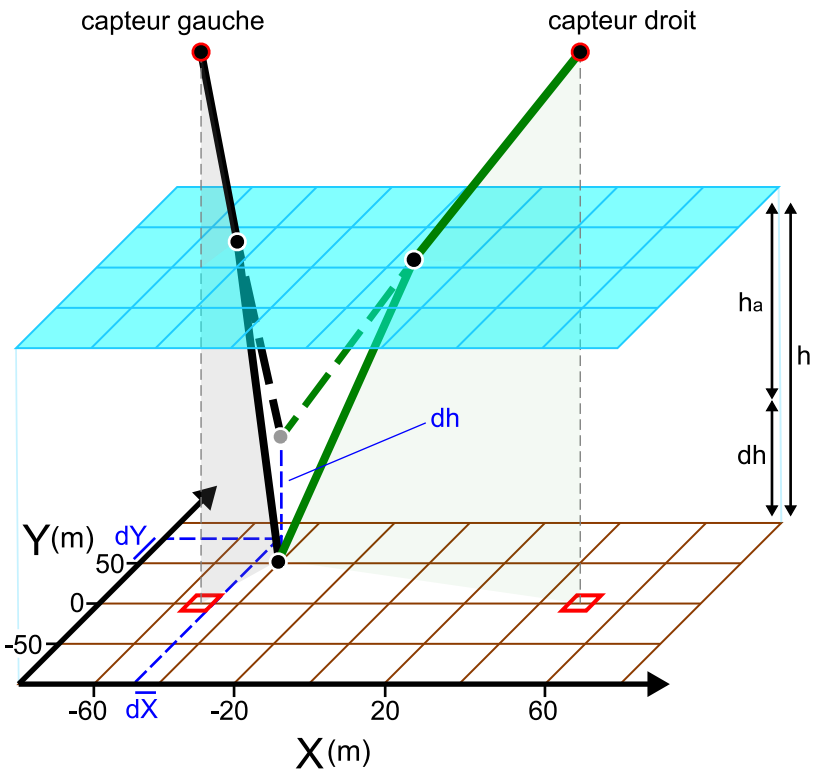


FIG. 7.9 - *Notations et modèle de la rivière utilisés pour les simulations réalisées dans cette section. La base stéréoscopique est suivant l'axe des X. Les carrés représentent la projection au sol de la position des capteurs*

D'après la section 7.2.1, il est possible d'effectuer une étude adimensionnelle des déplacements apparents. En particulier, on étudie les variations de ce rapport en utilisant un modèle de rivière simplifié : lame d'eau d'épaisseur constante et fond d'altitude constante (figure 7.9). On examinera les valeurs des rapports dX/h, dY/h et h/h_a en fonction de différents paramètres, notamment la position (X, Y) dans la zone stéréo et la configuration de la prise de vue. On détermine ainsi la répartition spatiale des effets de la réfraction en planimétrie et en altimétrie pour différentes configurations stéréoscopiques.

Les simulations ont été effectuées de la manière suivante : on part d'une grille régulière (X, Y) de points terrains, d'une position de l'interface, et des positions de 2 capteurs ; leur projection dans le plan (X, Y) est représentée par des carrés dans la figure 7.9. On calcule la distance entre position réelle et position apparente du point (déplacement apparent). Ceci permet de caractériser la répartition spatiale de ces déplacements apparents selon la position du point immergé dans le plan (X, Y). On évaluera enfin les valeurs de ces déplacements apparents en fonction des paramètres de prise de vue.

7.3.2 Résultats

7.3.2.a Caractéristiques spatiales de l'effet de la réfraction en stéréo

On se place dans le cas normal, c'est-à-dire le cas de prises de vue verticales. Le centre du stéréomodèle est en $(0, 0)$. L'axe de vol est confondu avec l'axe des X. La parallaxe et la base stéréoscopique sont donc suivant l'axe des X, et il y a symétrie de la prise de vue par rapport aux deux axes des X et des Y. On constate la même symétrie sur les figures de réfraction (figure 7.10).

Comme précisé plus haut, les déplacements apparents dûs à la réfraction sont exprimés en pourcentage de la hauteur d'eau pour les déplacements horizontaux ; les déplacements apparents verticaux sont évalués par le rapport h/h_a, dont la valeur est à comparer à 1.33, indice de réfraction relatif de l'eau.

On retrouve le résultat de la section 7.2.1 : la réfraction induit principalement des déplacements apparents suivant l'axe vertical. Les déplacements apparents horizontaux

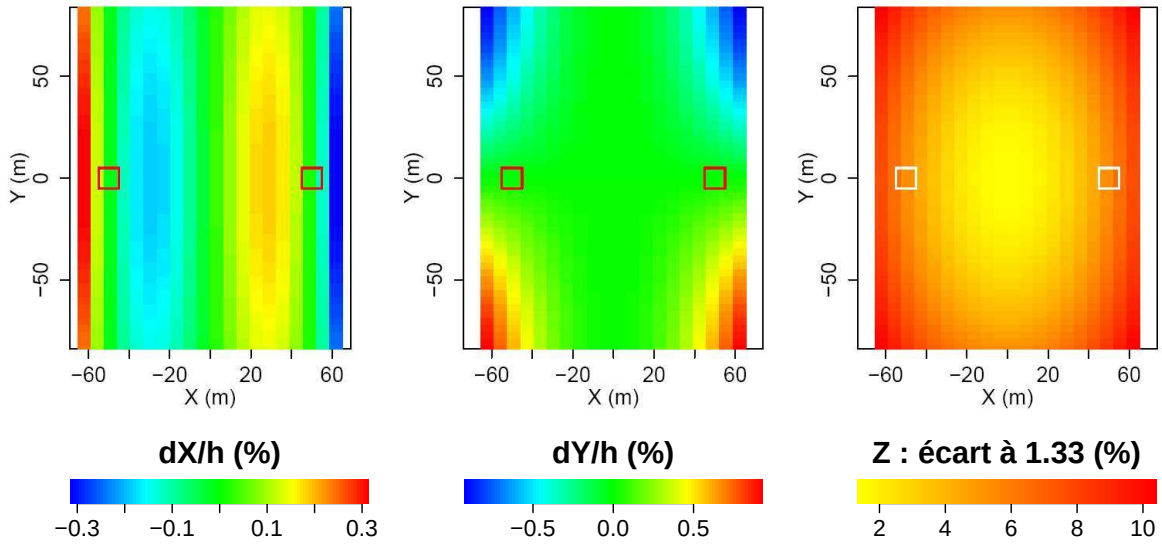


FIG. 7.10 - *Déplacement apparent relatifs dX/h, dY/h et verticaux en Z selon les coordonnées terrain (X, Y), en mètres, du point immergé. Les valeurs numériques correspondent à des pourcentages de la hauteur d'eau pour les déplacements horizontaux. Pour les déplacements verticaux, on compare la valeur du quotient h/h_a à 1.33. Les carrés représentent la projection de la position des capteurs, situés à une altitude de 200 mètres. Cette figure présente les résultats pour un cas normal, avec un B/Z de 0.5 et h/Z de 0.005 (soit une profondeur de 1m pour des images aériennes prises à 200m)*

sont en effet inférieurs à 2% de la hauteur d'eau alors que la profondeur apparente correspond à la profondeur réelle divisée par plus de 1.33.

On constate de plus que le déplacement apparent en Z est d'autant plus éloigné de la valeur 1.33 que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle (jusqu'à plus de 10%, donc 10% d'erreur sur la profondeur). Un modèle de réfraction utilisant un coefficient correctif multiplicateur constant pour toute la zone stéréo est donc d'autant plus faux que l'on s'éloigne de ce centre.

Cette première simulation a permis de déterminer les caractéristiques spatiales de l'effet de la réfraction. On a de plus montré que l'influence de la réfraction était très supérieure suivant l'axe vertical par rapport à l'influence de la réfraction dans le plan horizontal. On cherche par la suite à vérifier cette constatation pour différents paramètres de prise de vue. Les caractéristiques spatiales des déplacements apparents ayant été déterminée, on concentre la suite de notre étude sur l'amplitude (min et max) de ces déplacements.

7.3.2.b Influence de la focale

Pour un recouvrement et une zone étudiée fixés, on évalue l'influence de la distance focale sur la réfraction. Intuitivement, pour une même zone couverte au sol, une plus courte focale correspondra à des angles d'incidence plus grands et donc un effet de réfraction plus important.

On vérifie (figure 7.11) que pour des longues focales, les déplacements en X et en Y deviennent très faibles (moins de 0.1% de la profondeur) et que les déplacements suivant Z varient moins (moins de 2% d'écart à la valeur 1.33). Dans ce cas, une correction de la réfraction approchée, utilisant un facteur correctif h/h_a constant, peut devenir acceptable. Si ce cas permet une prise en compte de l'effet de la réfraction plus simple, il est cependant moins favorable pour la précision de l'estimation des altitudes par stéréo car il correspond à des B/Z plus faibles.

7.3.2.c Influence du B/Z

Le rapport B/Z ou rapport base sur éloignement, est un paramètre caractérisant pour partie la précision de la stéréorestitution. cette précision est d'autant meilleure que le B/Z est grand (points de vue différents).

Pour étudier l'influence de ce rapport B/Z, on se place à altitude constante, sur un plan d'eau de profondeur constante, avec une configuration capteur fixée. On fait donc varier la base stéréoscopique et ainsi le B/Z. Dans ce cas les angles d'incidence maximaux de la zone stéréo sont constants, et seules les combinaisons (angle incident droit ; angle incident gauche) varient en fonction du B/Z. Les résultats des simulations effectuées sur l'ensemble de la zone stéréo pour 3 configurations (B/Z) sont présentés sur la figure 7.12.

On constate que pour des B/Z croissants, on s'écarte de plus en plus du coefficient 1.33. En revanche, la variabilité de ce coefficient semble diminuer. Cela est probablement dû à la diminution de la surface de la zone stéréo et donc la diminution de la variabilité des combinaisons (angle incident gauche ; angle incident droit). Il serait donc envisageable, pour des B/Z très grands, d'utiliser un coefficient correctif constant ; cela pose en revanche des problèmes de mise en oeuvre opérationnelle, notamment au niveau de la couverture stéréo. La prise de vue à travers l'eau avec de grands B/Z peut aussi poser des problèmes de visibilité du fond selon la rugosité de surface (voir section 7.5.2.a).

7.3.2.d Influence du h/Z

Le rapport h/Z représente l'épaisseur relative de la lame d'eau par rapport à la hauteur de vol. Il est très fort pour des prises de vue à basse altitude (depuis un pont par exemple) ; il est très faible pour des prises de vue à haute altitude - moins de un pour-cent pour les prises de vues effectuées sur la Durance (section 9.3.1).

En pratique, ce facteur joue sur l'angle d'incidence réel sous lequel est vu un point immergé à cause de l'effet de la réfraction. Si l'on se donne une position du capteur et d'un point, et que l'on fait varier la position de l'interface entre ces deux points, on obtient différentes valeurs de h/Z, comme représenté par les graphiques de gauche et de droite de la figure 7.13. Un point est vu à une incidence plus forte lorsque le rapport

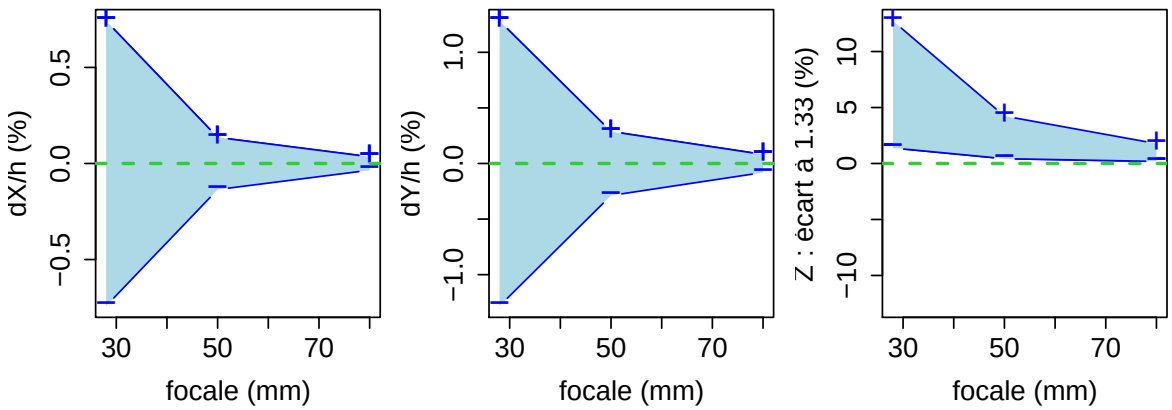


FIG. 7.11 - *Réfraction - influence de la focale c. Enveloppes des déplacements apparents horizontaux relatifs (à gauche et au milieu). Enveloppe de l'écart par rapport au coefficient 1.33 pour les déplacements apparents verticaux (à droite). Toutes les valeurs sont des pourcentages*

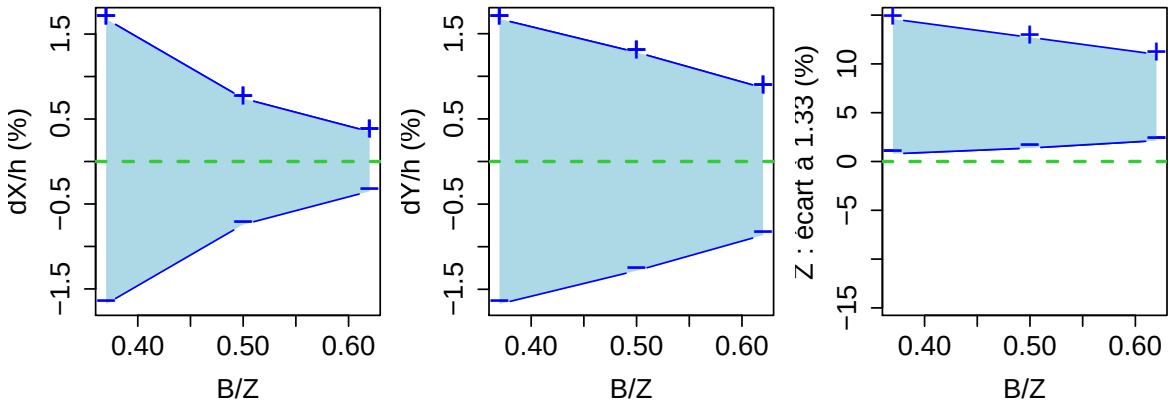


FIG. 7.12 - *Réfraction - influence du B/Z. Enveloppes des déplacements apparents horizontaux relatifs (à gauche et au milieu). Enveloppe de l'écart par rapport au coefficient 1.33 pour les déplacements apparents verticaux (à droite). Toutes les valeurs sont des pourcentages*

h/Z est fort (à droite).

Pour se donner une idée de l'importance de ce phénomène, on a donc simulé l'effet de la réfraction pour différentes positions de l'interface, les positions du capteur et d'un point étant données. Les simulations ont été effectuées pour le cas où l'angle d'incidence en l'absence d'eau est de 45 °. Cet angle est du même ordre de grandeur que l'angle maximal des rayons en bord de champ (section 6.2.2) pour des prises de vue en conditions normales (angles par rapport à la verticale inférieurs à 5 °).

On peut donc quantifier cet effet "loupe", c'est à dire la diminution du champ de vue de la zone immergée en fonction du h/Z. En effet pour des valeurs élevées de ce rapport, l'emprise au sol des images en zone immergée est moins forte que l'emprise théorique en l'absence d'eau. Cela a une influence sur le recouvrement des images dans les zones immergées. Avec les conditions de prise de vue déterminées (Z=200m) sur le site d'application ($h \approx 1$ m), cet effet est négligeable.

7.3.3 Bilan

On a montré que, dans le cas 3D surface plane, il était possible de déterminer la géométrie des rayons, réels et apparents. Les simulations effectuées ont montré que :

1. l'effet de la réfraction est dépendant de la position dans le stéréomodèle, notamment de la combinaison des angles d'incidence gauche et droit,
2. l'effet de la réfraction est d'autant plus fort que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle (effet de l'incidence),
3. les déplacements apparents en Z sont très supérieurs aux déplacements apparents en X et Y, et ce, quelles que soient les conditions de prise de vue.

On peut ainsi calculer un coefficient de correction de l'effet de la réfraction en tout point de la zone stéréo. *Dans le cas d'une prise de vue sur une rivière dont la surface peut être considérée comme localement plane l'effet de la réfraction pourra être corrigé*, à condition de connaître la position de la surface ainsi que les paramètres d'orientation externe.

7.4 Influence d'une erreur sur la position moyenne de la surface

Selon les résultats présentés plus haut, on peut, pour un couple donné, effectuer un calcul de la correction de la réfraction en chaque point à condition de connaître la position de l'interface au dessus de chaque point. Dans la littérature [Fryer, 1983b, Westaway et al., 2001] la méthode de correction de la réfraction est basée sur l'application d'un coefficient correcteur aux profondeurs. L'inconvénient d'une telle approche est le découplage des parties émergées et immergées des rayons. Or le calcul de la profondeur n'est possible qu'une fois la position de l'interface estimée [Westaway et al., 2001].

Une approche 3D telle que celle proposée dans la section précédente permet de conserver le lien entre partie émergée et partie immergée des rayons lumineux. Ce lien est matérialisé par l'interface air/eau. La qualité de l'estimation de la position de cet interface a une relation directe avec la qualité des profondeurs (ou de la topographie) estimées. Cependant l'étude de l'effet d'une erreur d'estimation de la position de l'interface sur la mesure du relief immergé n'apparaît pas dans la littérature. Il convient donc d'examiner ce point. Le cas 2D, représenté sur la figure 7.14, permet de se donner une bonne idée du problème.

Plusieurs modélisations ont été effectuées. On a choisi d'utiliser des paramètres représentatifs d'une mission terrain réellement effectuée sur la Durance, c'est à dire une altitude de vol de 200 mètres environ pour une résolution au sol inférieure à 0.1 mètre, avec un appareil au grand angle (28mm). La figure 7.15 montre l'influence d'une méconnaissance de la position de l'interface de 0.05, 0.10 ou 0.15 mètres, en positif et en négatif.

On constate qu'avec ces conditions de prise de vue (notamment un rapport de hauteur d'eau sur hauteur de prise de vue très faible), la conséquence de la méconnaissance de la position de l'interface est un biais et une dispersion de la mesure (ne dépendant pas de la profondeur du point). On retrouve donc, avec des modèles géométriques, des résultats comparables à ceux obtenus par le biais de modèles statistiques [Brown et Majumdar, 1992, Luchinin, 1996]. Il est donc primordial de connaître l'altitude de l'interface de la manière la plus précise et la moins biaisée possible.

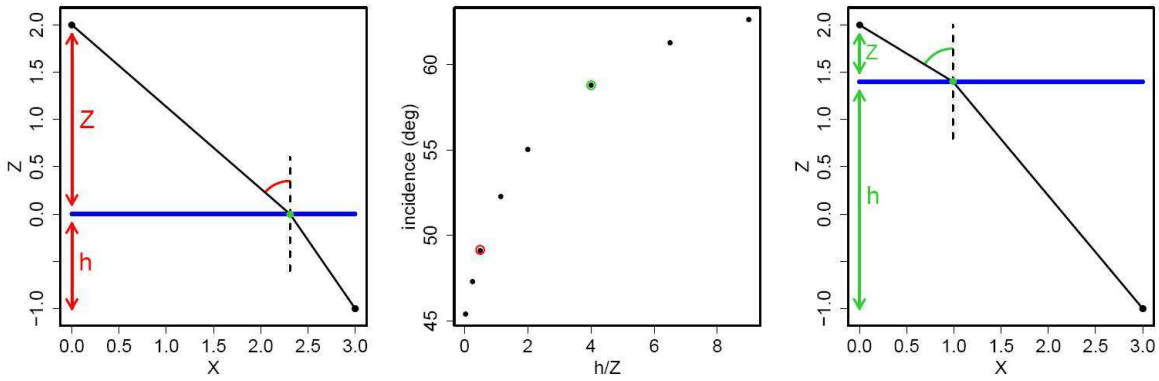


FIG. 7.13 - *Réfraction - influence du rapport h/Z. À gauche : prise de vue avec $h/Z = 0.5$. Au milieu : angle d'incidence en fonction de h/Z. Les points correspondant aux cas illustrés sont entourés. À droite : prise de vue avec $h/Z = 4$*

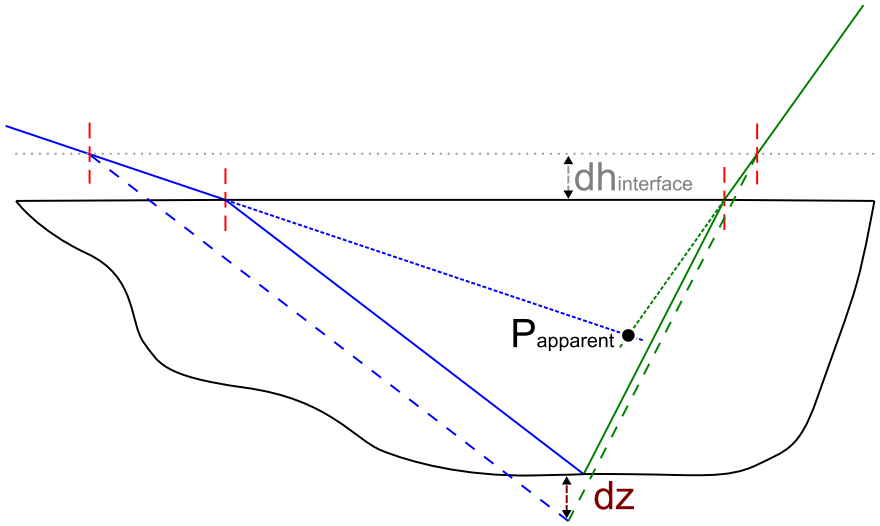


FIG. 7.14 - *Réfraction - influence d'une méconnaissance de l'interface*

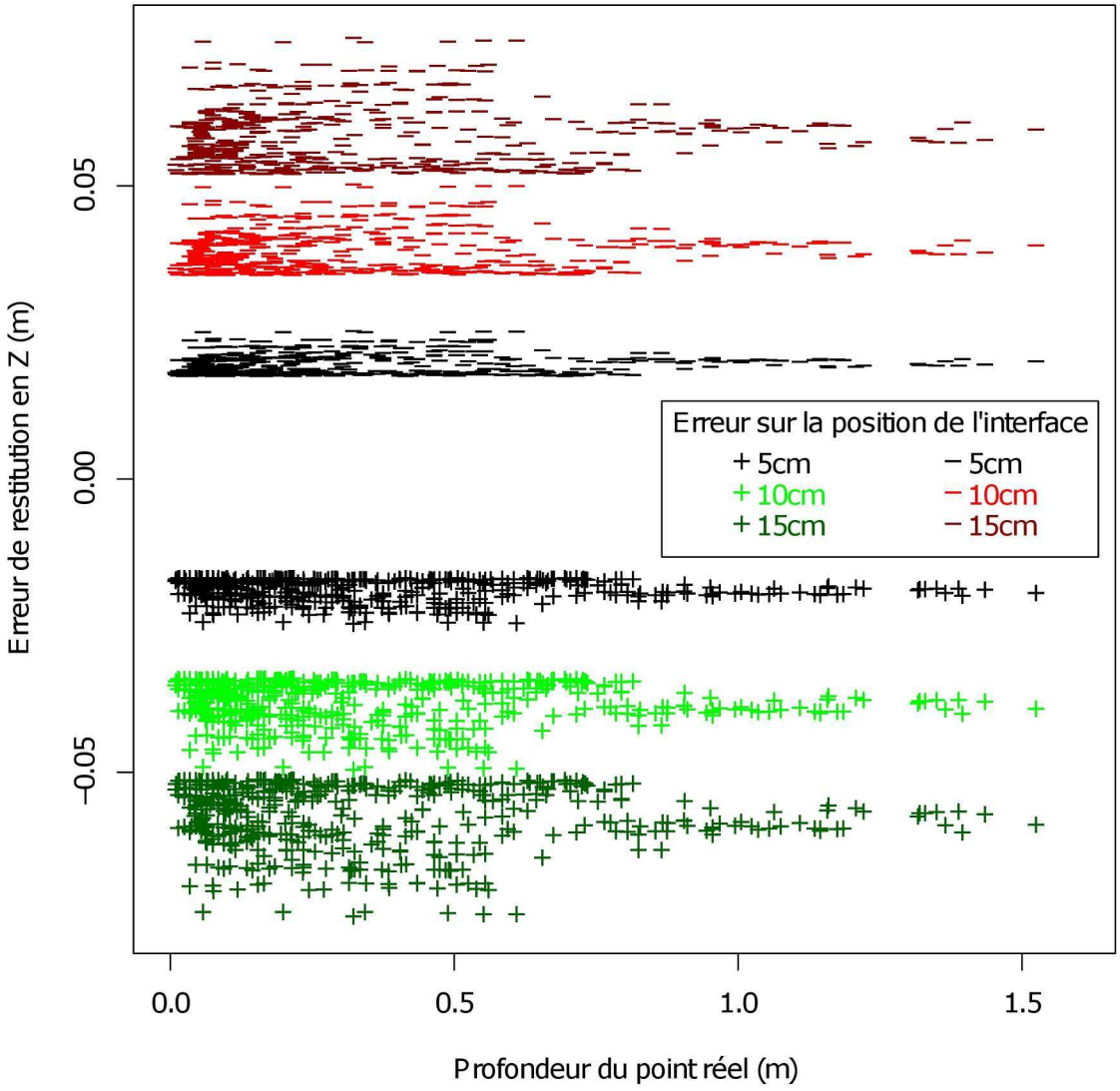


FIG. 7.15 - *Influence d'une méconnaissance de l'interface, effet de la profondeur. Cette figure présente une simulation effectuée avec les paramètres d'un cas terrain réel : un couple de photos pris sur la Durance. La hauteur de vol est 220m, le B/Z vaut 0.48, les angles maximaux de l'objectif équivalent à un 28mm sont de 45 ° environ, et le pixel au sol mesure 9cm environ*

7.5 Influence des vagues

Les simulations des sections précédentes sont basées sur l'hypothèse d'une approximation locale de la surface par un plan. On prend donc en compte l'effet de la position moyenne de la surface, en considérant la normale locale à la surface comme verticale. La qualité de cette approximation dépend directement des paramètres caractérisant la surface réelle et l'influence des vagues ou de la rugosité de surface, doit être examinée.

Une référence propose une solution au problème des vagues en milieu côtier en évaluant l'intérêt de l'utilisation d'une plaque de plexiglas afin d'aplanir la surface de l'eau [Fryer, 1983a, Fryer, 1983b]. Dans la littérature, les travaux de [Okamoto, 1982], dont les résultats sont repris par [Fryer, 1984, Fryer, 1985a], ont visé à quantifier l'erreur due aux vagues en milieu marin, en modélisant des vagues de grande longueur d'onde ainsi que leur propagation. Dans ces travaux, une partie des erreurs est à attribuer à l'orientation externe, réalisée à partir de points immergés.

De plus, les paramètres simulés permettent difficilement une transposition aux problématiques rencontrées pour des acquisitions en rivière (longueurs d'onde des vagues (houle) représentatives du milieu marin - comprises entre 25 et 92 mètres, profondeurs pouvant atteindre 20 mètres, altitude de vol supérieure à 500 mètres).

Ensuite, du fait probablement de la plage de variation de paramètres pour ces travaux (longues vagues, altitudes fortes), l'importance relative de la rugosité de surface en fonction des paramètres de prise de vue n'est pas discutée.

Enfin, comme on l'a dit plus haut, probablement à nouveau en raison des conditions expérimentales, la faisabilité même de la mesure est très peu abordée.

On effectue donc dans cette section des modélisations permettant d'évaluer l'influence de l'approximation "surface localement plane" dans le cas d'une acquisition réalisée sur une rivière (paramètres des vagues, paramètres de prise de vue). On utilisera pour cela de nouvelles simulations, présentées dans la section 7.5.1. Les résultats de ces simulations figurent dans la section 7.5.2.

7.5.1 Influence de la rugosité de surface - modélisation en 2D

Comme spécifié plus haut, le cas d'une surface non localement plane ne permet pas de résolution analytique dans le cas général. On prend donc des hypothèses simplificatrices permettant de modéliser ces phénomènes. Ces hypothèses et l'approche de modélisation sont décrites ci-dessous.

On cherche à évaluer l'influence des différents paramètres physiques caractérisant la surface d'un cours d'eau. On s'intéresse principalement aux paramètres pour lesquels on peut - sur le terrain - au minimum évaluer un ordre de grandeur, voire mesurer une valeur. Ces paramètres peuvent être utilisés pour définir des mésohabitats. Ceux-ci sont caractérisés selon une méthode combinant les typologies de [Borsányi et al., 2004] et [Malavoi et Souchon, 2002] à partir des valeurs de hauteur, vitesse, pente et rugosité de surface (vagues). Les figures 7.16 et 7.17 décrivent les critères utilisés pour l'identification de ces mésohabitats.

Sur le terrain, dans les zones de forte pente, on constate l'impossibilité de distinguer les objets à travers la surface. On se limitera donc les variables d'études à la hauteur moyenne de la lame d'eau (la profondeur h) et la rugosité de surface, caractérisée par l'amplitude moyenne A et la longueur d'onde moyenne λ de ces vaguelettes.

Ces paramètres décrivent une surface de type "tôle ondulée", dont la modélisation peut être effectuée en 2D dans le plan vertical (X, Z) (figure 7.18). La projection de la surface dans ce plan permet en effet de décrire l'influence de ces paramètres tout en s'affranchissant de la résolution de la condition de coplanarité des rayons incidents et refractés. On supprime de ce fait une variable et une équation. Les vagues sont modélisées par des sinusoïdes. La projection de la surface dans le plan vertical a pour équation :

$$z = h + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - x_0)\right) \tag{7.6}$$

avec λ la longueur d'onde, A l'amplitude, h la hauteur moyenne et x_0 la phase (figure 7.18).

De plus, il a été décidé de se limiter aux rayons pour lesquels il n'y a qu'une traversée de l'interface entre le point objet et le capteur. Les traversées multiples de l'interface ne sont pas calculées. On évaluera tout de même leur fréquence d'occurrence en fonction

Surface de l'eau	Pente	Vitesse	Profondeur	Code
Lisse ondulée h < 5cm	> 0.4% forte	> 30 cm/s	> 60 cm	A
		< 30 cm/s		
	< 0.4% faible	> 30 cm/s	> 60 cm	B1
			< 60 cm	B2
		< 30 cm/s	> 60 cm	C
			< 60 cm	D
présence de vagues h > 5cm	> 0.4% forte	> 30 cm/s	> 60 cm	E
			< 60 cm	F
		< 30 cm/s		
	< 0.4% faible	> 30 cm/s	> 60 cm	G1
			< 60 cm	G2
		< 30 cm/s	> 60 cm	
			< 60 cm	H

FIG. 7.16 - *Grille des critères physiques utilisés pour l'identification des mésohabitats et leur codification (extrait de [Le Coarer et al., 2005]).*

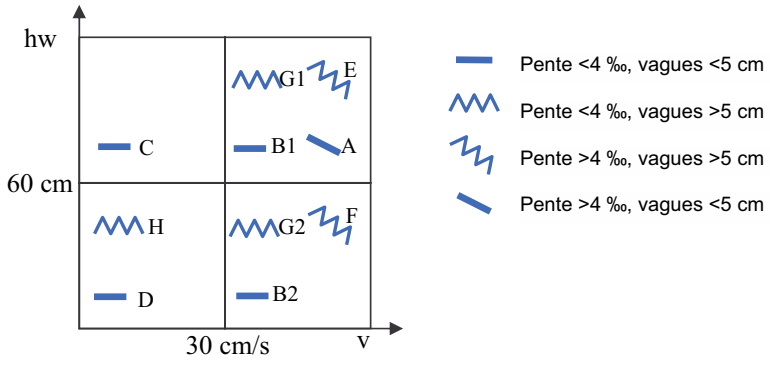


FIG. 7.17 - *Représentation schématique de la codification des mésohabitats dans le plan vitesse/profondeur (extrait de [Le Coarer et al., 2005]).*

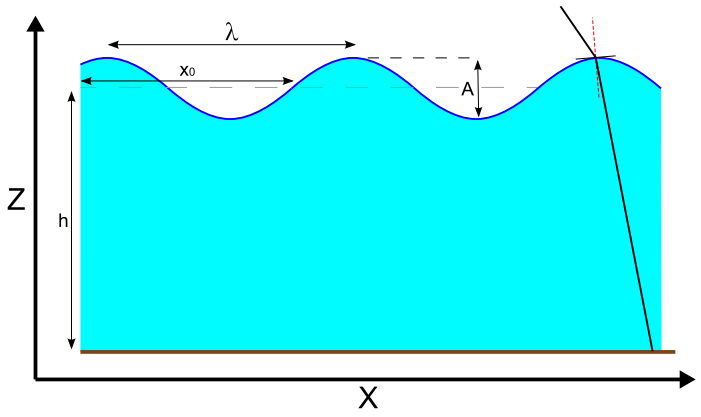


FIG. 7.18 - *Paramètres physiques caractérisant la surface sinusoïdale*

des paramètres de la surface et de prise de vue.

Pour évaluer l'influence de la réfraction à travers une surface sinusoïdale, l'approche est similaire à celle utilisée dans la section précédente (voir figure 7.8) : on s'appuie sur la notion de point apparent. Il faut donc encore une fois déterminer le point de passage du rayon lumineux à travers l'interface. Ce point vérifie les deux propriétés suivantes : (i) il appartient à la surface ; (ii) en ce point, le rapport des sinus des angles entre les rayons et la normale à l'interface est égal au rapport des coefficients de réfraction (équation de Snell-Descartes, voir 7.1). La mise en équation de ces contraintes dans le cas d'une surface sinusoïdale est détaillée dans l'annexe D.4.

Il faut noter que l'ensemble des solutions vérifiant les deux hypothèses énoncées ci-dessus n'est pas rigoureusement identique à l'ensemble réel des solutions. En effet, pour des prises de vue rasantes, plusieurs phénomènes peuvent se produire, notamment (i) du point de vue du capteur, le sommet d'une vague peut "cacher" une partie de la surface ; (ii) un rayon lumineux peut subir plusieurs réfractions dans son trajet de l'objet au capteur.

Le cas de chemins optiques minimaux entre l'objet et le capteur présentant des traversées et/ou réflexions multiples est écarté. En d'autres termes, on effectue le calcul pour les rayons qui sont formés de 2 segments. On n'effectue pas le calcul des rayons composés de 3 segments ou plus. Pour cela, on élimine les zones de la surface non visibles directement depuis le capteur (occlusion) ainsi que les solutions trouvées pour lesquelles une partie rectiligne d'un rayon lumineux traverse plusieurs milieux (traversées multiples).

7.5.2 Influence de la rugosité de surface - résultats de simulations

Il est possible, selon la configuration de la surface et selon la configuration de prise de vue, qu'un objet situé sous cette surface soit *invisible* depuis le capteur. Pour étudier la faisabilité de la mesure de la profondeur de rivière par stéréophotogrammétrie dans le cas général, *il faut dans un premier temps déterminer dans quels cas les points du fond de la rivière sont visibles*. On effectue donc des simulations en faisant varier les paramètres de prise de vue et de la surface. L'objectif est de déterminer un critère permettant de prévoir la visibilité du fond selon les conditions expérimentales.

Dans un deuxième temps, on évaluera quantitativement les déplacements apparents dûs à une surface sinusoïdale. L'intérêt majeur de telles modélisations est de *déterminer l'erreur commise lorsque l'on effectue les corrections de la réfraction avec une hypothèse de surface localement plane*.

7.5.2.a Visibilité du fond de la rivière à travers une surface sinusoïdale

Les modélisations effectuées sont les suivantes : pour une position de capteur donnée, on détermine le trajet du ou des rayons lumineux de chemins optiques minimaux entre l'objet et le capteur. Les paramètres variables sont les suivants : position du point, altitude moyenne de l'interface, amplitude des vagues, longueur d'onde des vagues, phase des vagues. Les solutions recherchées concernent : l'existence ainsi que, le cas échéant, le trajet du rayon lumineux joignant l'objet au capteur. Les calculs effectués pour ces modélisations sont détaillés dans l'annexe D.4.

De manière à évaluer l'influence de ces différents paramètres de façon synthétique, on introduit l'indice suivant :

$$\text{indice de rugosité relative de surface} = \frac{\pi A}{\lambda} \cdot \frac{|X_{capteur} - X_{point}|}{Z_{capteur} - Z_{eau}} \tag{7.7}$$

Cet indice a une valeur nulle pour un surface plane ($A = 0$ et/ou $\lambda = \infty$). Il a des valeurs très grandes :

- pour des vagues de forte amplitude ;
- pour des vagues de faible longueur d'onde ;
- lorsque le capteur est très proche de l'eau ;

– lorsque le capteur est très éloigné de la verticale de l'objet (incidences rasantes). De plus, d'après la section 7.3.2.d, pour les prises de vues aériennes sur une rivière peu profonde (h/Z faible), l'expression de l'indice peut se simplifier en :

$$\text{indice de rugosité relative de surface} = \frac{\pi A \tan(i)}{\lambda} \tag{7.8}$$

avec i l'angle d'incidence du rayon lumineux.

La figure 7.19 montre les résultats des modélisations effectuées : on représente le nombre de rayons lumineux (ou réfractions) possibles en fonction des valeurs de l'indice de rugosité relative de surface.

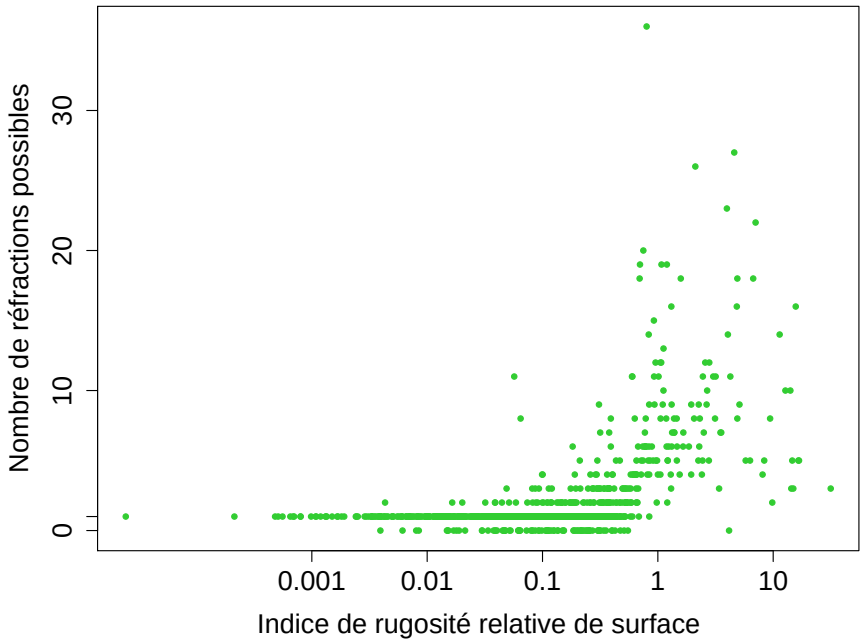


FIG. 7.19 - *Surface non plane - nombre de trajets lumineux possibles entre un objet et le capteur.*

Le nuage de points présente une asymptote vers une solution unique pour les indices très faibles, ce qui correspond au cas des surfaces quasi-planes et permet de retrouver le cas d'existence et d'unicité de la solution pour les surfaces horizontales (voir section 7.3.1 et annexe D.3). Ensuite, pour des valeurs de l'indice proches de 1, deux cas sont possibles : (i) pas de solution ; (ii) plusieurs solutions, avec une valeur moyenne et une dispersion du nombre de solutions qui augmente avec la valeur de l'indice. Enfin, le nombre de simulations conduisant à de fortes valeurs de l'indice n'est pas suffisant pour tirer une conclusion significative.

7.5.2.b Influence des vaguelettes sur la mesure

On l'a vu dans la section précédente, pour des valeurs trop fortes de l'indice de rugosité relative, un même point peut avoir plusieurs images. La formation de l'image d'un objet - composé d'un ensemble cohérent de points - semble donc extrêmement difficile pour de telles valeurs de l'indice. La mesure de la position d'un objet en stéréo passant par l'identification d'un même objet dans deux images, on se placera pour la section courante dans le cas de valeurs de l'indice assez faibles (inférieures à 1).

Les phénomènes étudiés sont les deux suivants :

Tout d'abord, la présence des vagues ou vaguelettes peut empêcher l'identification de points homologues d'une image à l'autre si la déformation des objets est trop forte. Cet aspect est étudié dans un premier paragraphe.

Ensuite, dans le cas où l'on peut identifier des points homologues, les vagues auront une influence sur la mesure elle-même. En effet, si l'on effectue la correction de la réfraction en prenant l'hypothèse d'une surface plane, on introduit une erreur qui dépend de la configuration locale de la surface. On cherche donc dans le deuxième paragraphe à caractériser cette erreur.

Faisabilité - Déformation des objets : De manière à obtenir une quantification de la déformation des objets, 600 modélisations ont été effectuées, avec des paramètres correspondant à ceux que l'on peut rencontrer lors de l'acquisition d'images sur une rivière type Durance. Les hauteurs d'eau sont inférieures à 1 mètre, la hauteur de prise de vue est de 200 mètres environ, les angles d'incidence maximaux inférieurs à 40 degrés, pour des vagues d'amplitude maximale de 10 centimètres et de longueur d'onde minimale de 1 mètre[6].

Pour chaque jeu de paramètres (prise de vue, caractéristiques des vagues, épaisseur de la lame d'eau), on a effectué 50 simulations en faisant varier la phase x_0 de la vague. Les résultats de ces modélisations sont synthétisés sur la figure D.3 en annexe et sur la figure 7.20.

[6]Pour des raisons de stabilité numérique et de temps de calcul, le cas de valeurs très fortes de l'indice (petites longueurs d'onde, grande amplitude, relativement à la position de prise de vue) a été traité avec des valeurs de la longueur d'onde supérieures à 1 mètre. On a ainsi exploité les propriétés adimensionnelles de l'indice en ajustant les valeurs des paramètres de prise de vue et de l'amplitude moyenne pour obtenir les valeurs souhaitées de l'indice

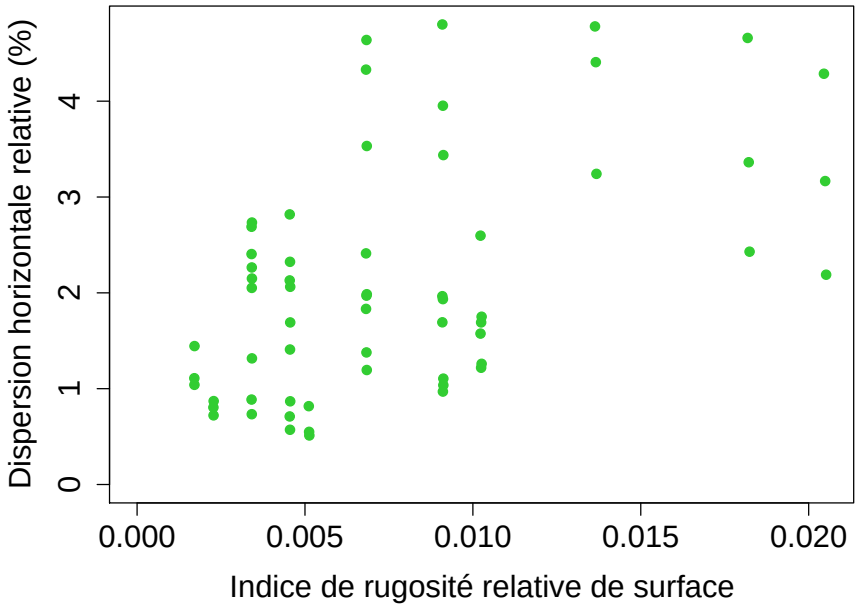


FIG. 7.20 - *Déformations planes dues aux vagues, en pourcentage de la hauteur d'eau. On représente la dispersion horizontale de la mesure en fonction de la rugosité relative de surface (equation 7.7). Cette dispersion est exprimée en pourcentage de la hauteur d'eau*

On constate (figure D.3, en annexe) qu'il n'y a probablement aucune relation linéaire entre valeur du déplacement et valeur de l'indice (probabilité que les deux variables soient linéairement indépendantes : 0.31). La valeur moyenne du déplacement horizontal pour toutes les simulations effectuées est négligeable (3.10^{-4} mètres). En d'autre termes, *la présence de vagues n'introduit pas de biais planimétrique sur les positions.* En revanche (figure 7.20), la dispersion planimétrique est d'autant plus importante que l'indice de rugosité est grand ($R^2 = 0.25$, p-value : 2.37×10^{-5}).

En pratique cette dispersion se traduit par une déformation des objets immergés. Cette déformation est proportionnelle à la profondeur et dépend de la rugosité relative de surface. Si cette déformation est supérieure à la taille de l'objet, l'identification de ce dernier devient impossible. Si cette déformation est légèrement inférieure à la taille de l'objet, ce dernier est identifiable, mais sa forme est modifiée.

On a donc montré que pour des vagues de moins de 10 centimètres d'amplitude, de longueur d'onde supérieure à 1 mètre, et pour des angles incidents maximaux de 40 degrés, la déformation (X, Y) des objets est inférieure à 5% de la profondeur (figure 7.20). Pour ce type de vagues, sur la Durance (profondeurs le plus souvent inférieures à 1 mètre), les déformations seront donc inférieures à 5 centimètres. Cette valeur est inférieure à la taille du pixel (section 6.2.2).

Erreur sur l'altitude et dispersion de la mesure due aux vagues : A partir des mêmes simulations que celles présentées dans le paragraphe précédent, on détermine le biais dû à l'approximation "surface localement plane", en fonction de la rugosité relative de la surface (voir figure D.4 en annexe). On constate là encore l'absence probable de relation linéaire entre biais de mesure et rugosité relative de surface (probabilité : 0.96).

En revanche, la dispersion relative de la mesure due à l'approximation "surface localement plane" est fortement corrélée à la rugosité relative de surface ($R^2 = 0.43$, p-value : 5.22×10^{-9}). La figure 7.21 montre le résultat des simulations. Celle ci représente la dispersion relative de la mesure (écart-type de l'erreur divisé par l'épaisseur de la lame d'eau) en fonction des valeurs de l'indice de rugosité relative de surface.

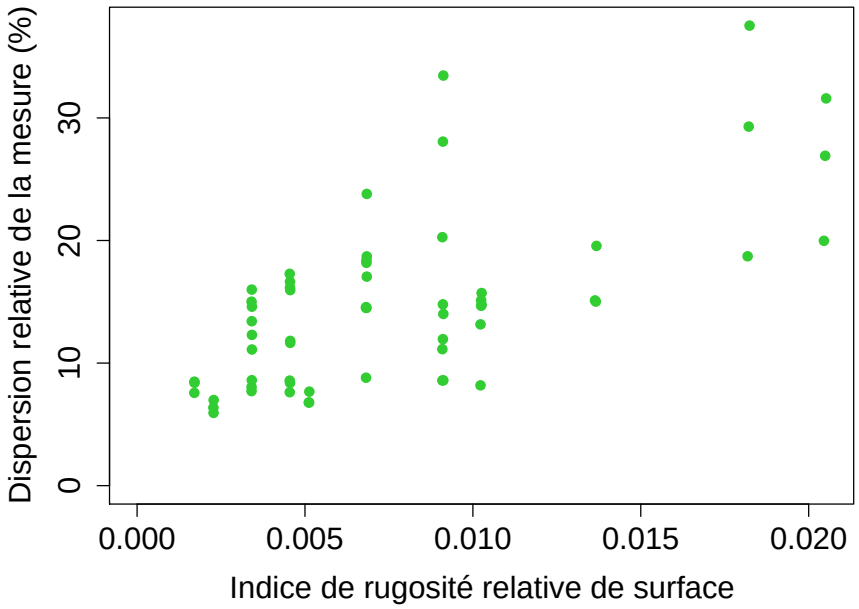


FIG. 7.21 - *Influence des vagues sur le Z restitué. On représente l'écart-type de l'erreur sur la mesure en Z causée par l'approximation surface plane. Cet écart-type est exprimé en pourcentage de la profondeur. On étudie ses variations en fonction de la rugosité relative de l'interface (equation 7.7)*

7.6 Discussion et conclusions

7.6.1 Effet de la réfraction en stéréo

Ce chapitre a permis de montrer que, si les rayons apparents n'ont pas d'intersection en théorie, il est tout de même possible - pour une rugosité relative de surface faible - d'effectuer une stéréorestitution basée sur la position apparente des points.

La réfraction induit des déplacements apparents des points restitués qui ont surtout lieu en altimétrie dans le cas de prises de vue verticales. Les déplacements en planimétrie sont très inférieurs et seront donc négligés dans le cas général. L'effet de la réfraction est proportionnel à la profondeur. Pour une profondeur donnée, il dépend de la position du point dans la zone stéréo, c'est à dire de la combinaison des angles incidents gauche et droit.

7.6.2 Prise en compte de cet effet - approximations possibles - bruit de mesure intrinsèque résultant

Il est possible de corriger l'effet de la réfraction. En effet, si l'on considère la surface comme localement plane, il est possible de calculer le rapport h/h_a en tout point de la zone stéréo (section 7.3.1). On peut ainsi corriger les positions apparentes des points restitués.

De manière à pouvoir calculer le coefficient correcteur en chaque point, il faut qu'il y ait un et un seul rayon lumineux joignant l'objet au capteur. Ce cas correspond aux surfaces peu rugueuses relativement aux conditions de prises de vue. On a donc introduit un indice de rugosité relative de surface (équation 7.7) qui possède une expression simplifiée dans le cas où l'altitude est grande devant la profondeur (équation 7.8). La stéréorestitution à travers l'eau et la correction de l'effet de réfraction est possible pour des valeurs faibles de cet indice.

La présence de vaguelettes apporte cependant un bruit sur la mesure de la position des points immergés (section 7.5.2.b). Cette dispersion provient de l'approximation de l'interface par une surface localement plane ; cette approximation est nécessaire pour que l'effet de la réfraction soit modélisé puis corrigé. Les positions des points immergés corrigées de la réfraction comporteront donc un bruit de mesure intrinsèque.

7.6.3 Influence des vagues - faisabilité de la mesure

Tout d'abord, dans certaines conditions (section 7.5.2.a), les points immergés peuvent être invisibles à travers l'interface. Pour évaluer cet effet, on a introduit un indice de rugosité relative de surface (équations 7.7 et 7.8). Pour les valeurs de cet indice très inférieures à 1, l'interface se comporte comme une interface plane, c'est à dire que l'on est assuré de l'existence (et de l'unicité) d'un rayon lumineux issu d'un point immergé atteignant le capteur. En d'autre termes, à chaque point immergé correspond un point dans l'image. En revanche, pour des valeurs de l'indice proches de 1 ou supérieures à 1, il peut y avoir une multiplicité ou une absence de rayons lumineux joignant un point immergé au capteur. L'image de certains points immergés ne peut pas, dans ce cas, être définie avec les équations de la photogrammétrie présentées dans la section 7.1.4.

D'autre part, il est possible que les objets soient déformés au point de ne plus être identifiables. Dans ce cas l'appariement de points homologues nécessaire à la stéréorestitution peut échouer. Afin d'évaluer les conditions de réalisation de ce phénomène, il est possible de se fonder sur les résultats obtenus au niveau ponctuel (rayon par rayon, voir section 7.5.2.b) pour en tirer des conclusions au niveau des objets.

En première approximation on peut considérer que la déformation est proportionnelle à la rugosité relative de surface et à la profondeur. En notant d la déformation et o la taille caractéristique des objets immergés, il faut, pour qu'un objet reste identifiable à travers une surface non plane, que le rapport d/o soit le plus petit possible. En considérant, d'après les résultats de la section 7.5.2.b, que la déformation est proportionnelle à l'indice de rugosité relative de profondeur et à la profondeur, il faut donc que la quantité $\frac{h}{o} \cdot \frac{A\tan(i)}{\lambda}$ soit la plus petite possible.

Il existe un rapport entre taille de l'objet/profondeur/rugosité relative de surface/taille du pixel tel qu'un objet puisse être pointé dans l'image et donc utilisé comme point homologue pour la restitution du relief immergé. En d'autres termes, il faut que les objets ou leur texture aient une taille caractéristique suffisamment grande relativement à la profondeur de l'eau et à la rugosité relative de surface, selon l'échantillonnage spatial des images.

Dans le cas où ces critères sont respectés, comme on l'a montré dans la section 7.5.2.b, l'influence des vagues se traduit par une dispersion de la mesure.

7.6.4 Importance de l'altitude de l'interface

Par ailleurs, une erreur de la connaissance de la position moyenne de la surface se traduit en un biais et une dispersion de la mesure (section 7.4). S'il n'est pas possible avec les techniques utilisées d'estimer l'ensemble des paramètres physiques caractérisant la surface (position et normale en tout point), on peut cependant en estimer une position moyenne. Cette estimation doit donc être la plus précise et la moins biaisée possible afin de limiter le biais et la dispersion sur les mesures corrigées de la réfraction.

Le développement d'une technique d'estimation de la position de l'interface pour la correction de la réfraction et l'estimation de la position réelle des points immergés est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 8

Détermination de la position de l'interface air/eau pour la correction de la réfraction - Intégration de contraintes hydrauliques

Les chapitres précédents ont mis en évidence les principaux points d'intérêt de la chaîne méthodologique d'acquisition d'information relative au relief par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. On a ainsi vu comment *la mesure de la géométrie 3D du terrain immergé est soumise à la bonne connaissance de la géométrie de l'interface*, et ce - au même titre que la connaissance de la géométrie d'acquisition - afin d'établir le lien entre mesures images et mesures terrain.

Par l'utilisation de moyens "légers" (plateforme, capteurs), on se place dans un cas où la configuration de prise de vue est plus difficile à maîtriser a priori. En revanche, *la géométrie des objets observés est soumise à des lois physiques connues a priori*. Notre choix est de tirer parti de la connaissance a priori de ces lois. Celles-ci imposent en effet des contraintes sur la géométrie que l'on cherche à mesurer. On se concentre en particulier sur la détermination de la position de l'interface air/eau, indispensable pour la correction de la réfraction sans biais.

On passe donc par un algorithme de mise en cohérence hydraulique, qui repose sur des propriétés spécifiques du jeu de mesures que l'on cherche à mettre en cohérence. Ces hypothèses, ainsi que l'objectif de l'algorithme, sont exposées dans une première section. Ensuite, on introduit un certain nombre de concepts, notations et jeux de données

supplémentaires utilisés par l'algorithme. Après ces sections préliminaires, le principe et la mise en place de l'algorithme sont présentés. On détaille ensuite l'implémentation de l'algorithme ; finalement, on présente la correction de l'estimation brute du relief immergé puis le post-traitement du relief corrigé de l'effet de réfraction.

8.1 Cadre et objectif de l'algorithme

Les altitudes "brutes" des points de bordure de lit mouillé sont déterminées par stéréorestitution. Ces altitudes sont donc issues des images. La détection de ligne de bordure de lit mouilé peut être effectuée de plusieurs manières. Selon les caractéristiques radiométriques des images et la densité de couverture végétale de la bordure de lit mouillé, on utilisera des filtres de détection de contour [Westaway et al., 2001] ou l'on s'appuiera sur une photo-interprétation des images.

Quelle que soit la manière d'obtenir ces données, celles-ci présentent des mesures aberrantes (fausse corrélation, mauvaise détection de contour, restitution locale de sommets de végétation ou de points d'un pont) et une dispersion intrinsèque (précision de la stéréorestitution, voir section 5.4).

8.1.1 Hypothèses de travail

En considérant l'écoulement permanent et sans frottement d'un liquide incompressible, on peut appliquer le théorème de Bernoulli selon lequel la somme des énergies potentielle, de pression et cinétique d'un liquide est constante [Bernoulli, 1738] :

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = C \tag{8.1}$$

avec z, l'altitude du liquide
P, la pression à laquelle est soumise le liquide
ρ, la masse volumique du liquide
g, l'accélération de la pesanteur
V, la vitesse du liquide

Cette constante C s'appelle la charge hydraulique et s'exprime en mètres. Dans le cas d'une rivière, où l'approximation *sans frottement* n'est plus valable, on a, avec s

l'abscisse curviligne :

$$\frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{P}{\rho g}\right) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{V^2}{2g}\right) \leq 0 \tag{8.2}$$

Dans le cas de la ligne de rive d'une rivière, le liquide n'est soumis qu'à la pression atmosphérique constante. La masse volumique et l'accélération de la pesanteur sont aussi des constantes. En conséquence, le terme correspondant à la dérivée de l'énergie de pression est nul. De plus, en considérant la vitesse comme constante, le terme correspondant à l'énergie cinétique s'annule lui aussi et l'équation se simplifie finalement en :

$$\frac{\partial z}{\partial s} \leq 0 \tag{8.3}$$

Cette approximation (vitesse très faible ou considérée comme constante) peut être prise avec une très bonne validité pour les plats et les mouilles, définis par des vitesses faibles (voir figure 9.5 section 9.2). Cette approximation induira les erreurs les plus fortes sur les zones de radiers. Finalement, *on choisit d'imposer une décroissance de l'altitude des points de bordure de lit mouillé de l'amont vers l'aval*[1].

On prend ensuite des hypothèses sur les altitudes des points de bordure de lit mouillé mesurées en effectuant la stéréorestitution des lignes de rive à partir des couples stéréoscopiques : (i) la majorité des altitudes mesurées correspond à l'altitude de la ligne de rive réelle ; (ii) l'amplitude de l'erreur commise au niveau des mesures aberrantes est supérieure à l'imprécision de la mesure.

8.1.2 Objectif de l'algorithme

L'algorithme repose sur la résolution d'un système sous contraintes.

Connaissant la précision *a priori* de l'altitude des points de rive (section 5.4), on a, pour chacun de ces points, un intervalle dans lequel la mesure réelle peut se trouver. L'algorithme vise à déterminer à partir de cette suite d'intervalles une nouvelle suite d'intervalles de largeur plus faible et hydrauliquement globalement cohérente.

En imposant une contrainte de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval, on régularise les lignes de rives mesurées et on améliore la précision de l'estimation des

[1] il est possible de revenir au cas général en considérant la décroissance de l'*énergie hydraulique totale* de l'amont vers l'aval

altitudes (voir démonstration ci-dessous). On peut de plus détecter et éliminer les intervalles correspondant à des points aberrants.

On obtiendra finalement un ensemble d'altitudes des points de bordure de lit mouillé estimées avec une meilleure précision en Z et correspondant à une ligne de rive régularisée, hydrauliquement cohérente.

8.2 Concepts et notations

Il est nécessaire d'ordonner les ensembles d'altitudes. C'est une convention d'ordre de l'amont vers l'aval qui est choisie pour ce document.

On utilise ci-dessous la notation mathématique des suites ordonnées de nombres réels sous la forme $(u_i)_{i\in[1;n]}$. Ces suites sont indicées par un entier i qui est croissant de l'amont ($i = 1$) vers l'aval ($i = n$).

On note $(z_i)_{i\in[1;n]}$ la suite décroissante des valeurs réelles des altitudes des points de la ligne de bordure de lit mouillé ordonnées de l'amont vers l'aval.

Les altitudes restituées à partir des couples stéréoscopiques sont des estimations de ces valeurs. On note donc $(\hat{z}_i)_{i\in[1;n]}$ la suite des altitudes mesurées par télédétection, ou mesures image, ordonnées de l'amont vers l'aval elles aussi.

L'écart-type de l'erreur de la mesure d'altitude est noté σ_z. Il est considéré comme constant pour un ensemble de couples stéréo ayant été acquis avec des paramètres de prise de vue semblables.

8.2.1 Minorants et majorants locaux

De manière à prendre en compte l'imprécision de la mesure $\hat{z}_i$, on introduit deux jeux de données supplémentaires : un jeu de minorants, et un jeu de majorants. On prend l'hypothèse que les erreurs ont une distribution gaussienne. On utilise l'intervalle de confiance à 99.7% ($\pm 3\sigma$).

On définit ainsi la suite des majorants $(M_i)_{i\in[1;n]}$ aux mesures réelles z_i par $M_i = \hat{z}_i + 3\sigma_z$ et la suite des minorants $(m_i)_{i\in[1;n]}$ par $m_i = \hat{z}_i - 3\sigma_z$.

L'intervalle $[m_i; M_i]$ est l'ensemble des mesures possibles.

On peut trouver une représentation des minorants et majorants locaux sur la figure 8.1. Les minorants locaux y sont représentés par des signes "-". Les majorants locaux sont représentés par des signes "+".

8.2.2 Cohérence, compatibilité, et conflits hydrauliques

On se situe en un point donné de la bordure de lit mouillé. On étudie les relations entre la mesure $\hat{z}_i$ (mesure amont) et la mesure $\hat{z}_{i+1}$ (mesure aval). On rappelle que, par convention, on utilise des indices i croissants de l'amont vers l'aval. Selon la terminologie utilisée par [Raclot, 2003], trois cas de figures peuvent apparaître lors de l'examen de ces deux mesures d'un point de vue hydraulique (figure 8.1) :

1. cohérence hydraulique
2. compatibilité hydraulique
3. conflit hydraulique

Sous forme mathématique, ces cas s'écrivent de la manière suivante :

$$\hat{z}_i \geq \hat{z}_{i+1} \tag{8.4}$$

$$\hat{z}_i < \hat{z}_{i+1} \text{ et } m_i \leq M_{i+1} \text{ et } m_{i+1} \leq M_i \tag{8.5}$$

$$M_i < m_{i+1} \tag{8.6}$$

Ces propositions mathématiques peuvent être transcrites en français par les expressions suivantes : il y a *cohérence hydraulique* en un point donné si la mesure amont est supérieure à la mesure aval (equation 8.4) ; il y a *compatibilité hydraulique* en un point donné s'il existe un chemin décroissant entre l'ensemble des mesures possibles amont et l'ensemble des mesures possibles aval (equation 8.5) ; il y a *conflit hydraulique* en un point donné si toutes les altitudes de l'ensemble des mesures possibles amont sont inférieures à toutes les altitudes de l'ensemble des mesures possibles aval. Cette dernière proposition est équivalente à la suivante : "le majorant amont est inférieur au minorant aval" (équation 8.6).

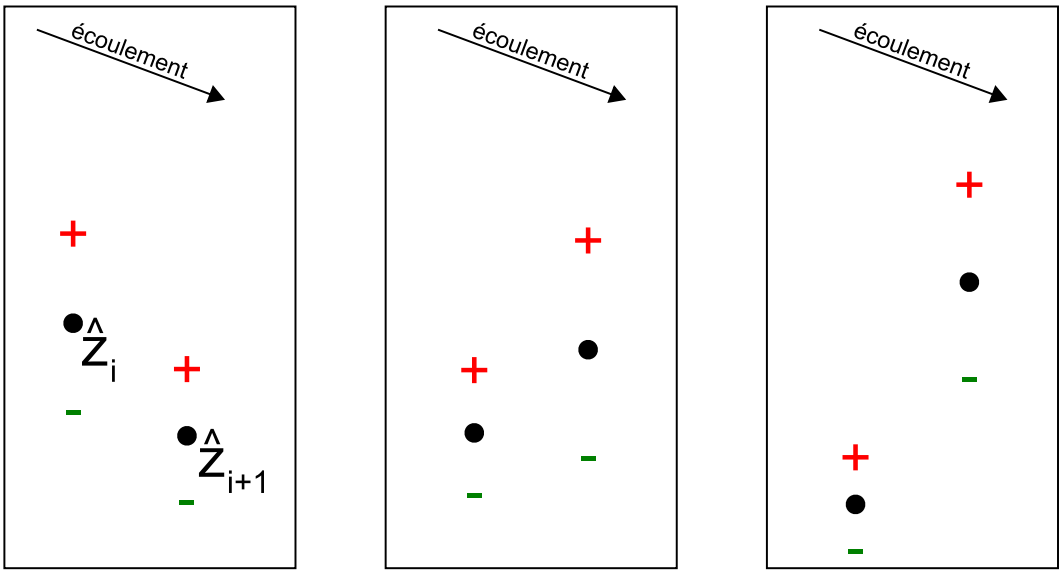


FIG. 8.1 - *Illustration des cas de : cohérence hydraulique (à gauche) ; compatibilité hydraulique (au milieu) ; conflit hydraulique (à droite). Les "+" représentent les majorants locaux, les "-" les minorants locaux.*

Cohérence locale et globale : Selon cette nomenclature, les altitudes estimées des points de rive sont globalement hydrauliquement compatibles si, en chaque point, on n'a pas de conflit hydraulique. Or, pour un jeu de données vérifiant les hypothèses présentées dans la section 8.1.1, il ne peut y avoir de conflit hydraulique qu'en cas de mesures aberrantes.

Par ailleurs, s'il est possible de détecter localement un conflit, la comparaison locale de deux mesures ne suffit pas à déterminer celle des deux qui est correcte. Il est donc nécessaire d'introduire un nouvel ensemble de points rendant compte de la compatibilité hydraulique globale.

8.2.3 Enveloppes MIN et MAX : minorants et majorants globaux

On introduit deux jeux de données supplémentaires de minorants et majorants *globaux*. On parlera d'enveloppes MIN et MAX des points mesurés. Ce sont ces enveloppes qui, par construction, intègrent les contraintes de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval (ou croissance de l'aval vers l'amont). L'enveloppe MAX et constituée en

chaque point du *plus grand réel* satisfaisant aux contraintes suivantes :

$$\text{les majorants globaux sont décroissants de l'amont vers l'aval} \tag{8.7}$$
$$\text{les majorants globaux sont inférieurs ou égaux aux majorants locaux} \tag{8.8}$$

L'enveloppe MIN et constituée en chaque point du *plus petit réel* satisfaisant aux contraintes suivantes :

$$\text{les minorants globaux sont croissants de l'aval vers l'amont} \tag{8.9}$$
$$\text{les minorants globaux sont supérieurs ou égaux aux minorants locaux} \tag{8.10}$$

Les notations utilisées sont les suivantes : $(MAX_i)_{i\in[1;n]}$ pour la suite des majorants globaux et $(MIN_i)_{i\in[1;n]}$ pour la suite des minorants globaux.

On peut trouver une représentation des enveloppes MIN et MAX sur la figure 8.2.

8.3 Principe et mise en place de l'algorithme - Démonstrations

Le principe de l'algorithme est donc de mettre en place un calcul d'enveloppes MIN et MAX des altitudes des points de rive par l'imposition de contraintes de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval. La contrainte de sortie de l'algorithme est la suivante : l'enveloppe MIN doit être située sous l'enveloppe MAX en tout point.

8.3.1 Calcul des enveloppes MIN et MAX - régularisation des lignes de rives

Le calcul des enveloppes MIN et MAX est effectué selon les propositions formulées au paragraphe 8.2.3. Ainsi, pour l'enveloppe MAX, de manière à satisfaire les contraintes (8.7) et (8.8), la valeur maximum en chaque point est la valeur de l'enveloppe MAX au point situé immédiatement à l'amont (le point MAX_{i-1}) et la valeur minimum est la valeur du majorant local M_i. La suite décroissante $(MAX_i)_{i\in[1;n]}$ est donc définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} MAX_1 = M_1 \\ MAX_i = Min(M_i, MAX_{i-1}) \quad \text{pour } i \in]1;n] \end{cases} \tag{8.11}$$

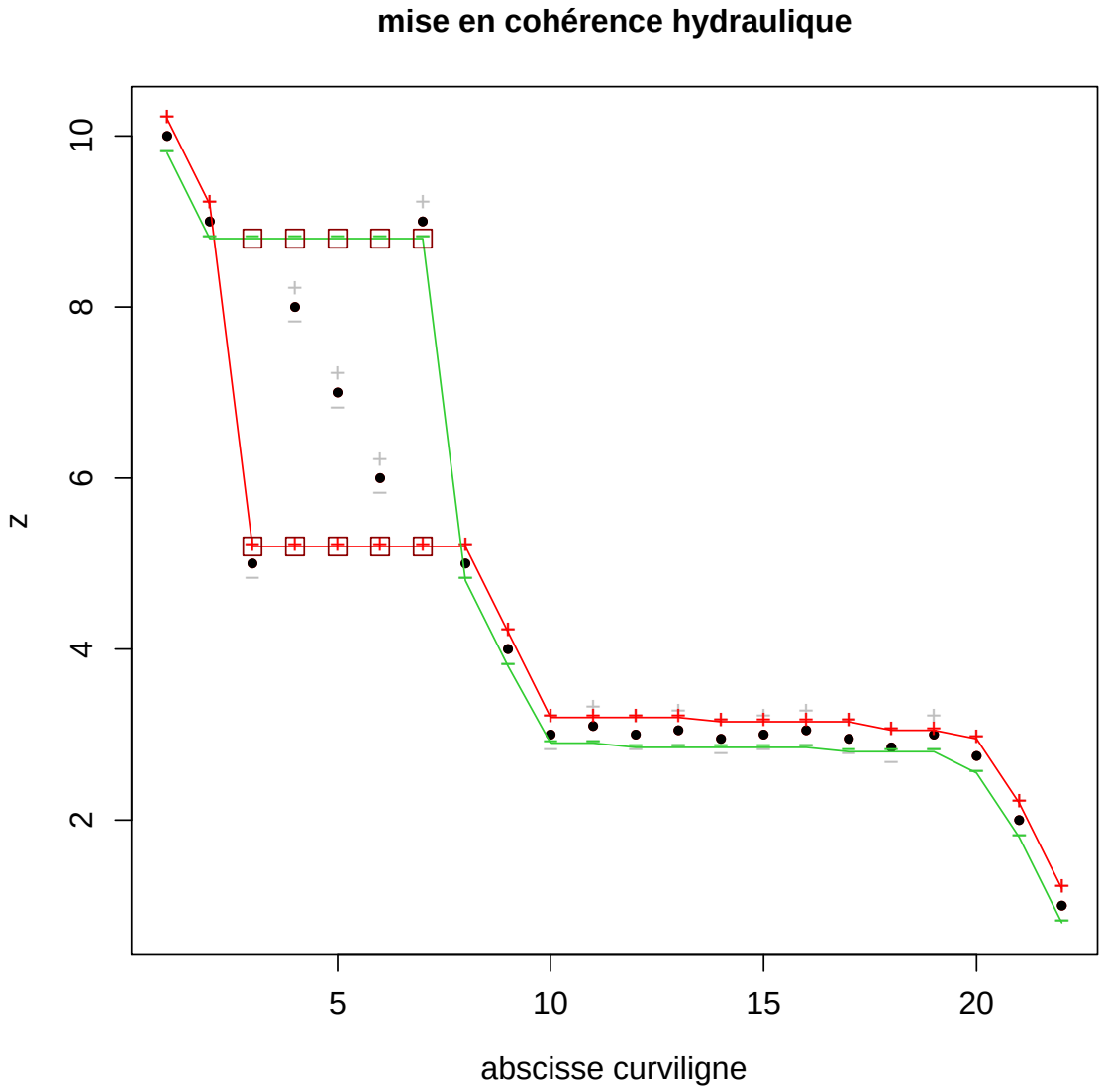


FIG. 8.2 - *Représentation d'une étape de mise en cohérence hydraulique. Les minorants et majorants locaux sont représentés par des signes "+" et "-" en gris. L'enveloppe MAX est en rouge et l'enveloppe MIN en vert. Le conflit de plus grande amplitude est repéré par des carrés entourant les mesures concernées.*

De la même manière, on définit l'enveloppe MIN par la suite décroissante $(MIN_i)_{i\in[1;n]}$ qui respecte les contraintes (8.9) et (8.10) :

$$\begin{cases} MIN_n = m_n \\ MIN_i = Max(m_i, MIN_{i+1}) \quad \text{pour } i \in [1;n[\end{cases} \tag{8.12}$$

Par construction même, les enveloppes MIN et MAX correspondent chacune à un ensemble de mesures régularisées (décroissance amont-aval).

8.3.2 Propriétés des enveloppes MIN et MAX : amélioration de la précision - détection des conflits

Supposons que la contrainte suivante : "l'enveloppe MAX est supérieure à l'enveloppe MIN en tout point" soit satisfaite (c'est le cas pour un ensemble d'altitudes ne présentant pas de conflit hydraulique). On a, pour tout $i \in [1;n[$:

$$MIN_i \leq MAX_i$$

D'autre part, d'après 8.11 et 8.12, on a pour tout $i \in [1;n[$:

$$\begin{cases} MIN_i \geq m_i \\ MAX_i \leq M_i \end{cases}$$

D'où finalement, pour tout $i \in [1;n[$:

$$[MIN_i; MAX_i] \subset [m_i; M_i], \text{ soit } (MAX_i - MIN_i) \leq (M_i - m_i) \tag{8.13}$$

Le calcul de l'enveloppe MAX d'un ensemble d'altitudes hydrauliquement compatible permet donc de réduire en chaque point l'intervalle correspondant à l'ensemble des mesures possibles, c'est à dire d'améliorer la précision de l'estimation de l'altitude en tout point (figure 8.2).

Par ailleurs, supposons que l'on a un conflit hydraulique entre la mesure $\hat{z}_i$ et la mesure $\hat{z}_{i+1}$. On a donc, par définition d'après (8.6) :

$$M_i < m_{i+1}$$

Or, d'après (8.11) et (8.12) :

$$MAX_i \leq M_i \text{ et } m_{i+1} \leq MIN_{i+1} \text{ et } MIN_{i+1} \leq MIN_i$$

D'où finalement :

$$MAX_i < MIN_i$$

Les conflits sont donc situés au niveau d'un croisement des enveloppes MIN et MAX. On choisit de résoudre en priorité les conflits les plus forts, c'est à dire les conflits pour lesquels la quantité $(MIN_i - MAX_i)$ est la plus grande. Si le conflit concerne toute une série de mesures (ce qui se traduit par des paliers d'enveloppes MIN et MAX en conflit, voir figure 8.2), on détermine si le point le plus amont du palier et/ou le point le plus aval du palier provoquent des conflits hydrauliques locaux à l'extérieur du palier. On élimine le ou les points concernés le cas échéant. Si aucun des points ne provoque de conflit hydraulique local à l'extérieur du palier, on élimine les deux points extrêmes du palier.

8.4 Implémentation et résultat de l'algorithme

L'implémentation de l'algorithme est itérative.

On initialise l'algorithme en effectuant le calcul des enveloppes MIN et MAX de l'ensemble des données (section 8.3.1). On effectue la comparaison entre MIN_i et MAX_i en tout point. En cas de conflit hydraulique $(MIN_i > MAX_i)$, on entre dans la boucle suivante :

1. on détermine le ou les points où l'amplitude de conflit est maximale ;
2. si c'est un point isolé, on l'élimine - s'il s'agit de paliers, on élimine la ou les extrémités du ou des paliers présentant un conflit local ;
3. on calcule les enveloppes MIN et MAX du nouvel ensemble d'altitudes (section 8.3.1) ;
4. s'il subsiste des conflits (points où $MIN_i > MAX_i$), on repart en début de boucle (étape 1).

A la sortie de la boucle, on a des enveloppes MIN et MAX telles que toute suite décroissante inclue dans les intervalles successifs $[MIN_i; MAX_i]$ est solution. On peut par exemple choisir la suite décroissante

$$\left(\frac{MIN_i + MAX_i}{2}\right)_{i \in [1;n']}, \; n' \leq n \tag{8.14}$$

Résultat de l'algorithme : La solution déterminée obéit aux contraintes imposées en 8.1.1 et 8.2.3. De plus, comme démontré dans la section 8.3.2, les intervalles de

confiance des mesures sont réduits (équation 8.13). On obtient ainsi une *estimation plus précise et régularisée des altitudes de la ligne de rive*, comme on peut le constater sur l'exemple de la figure 8.2. De plus l'algorithme permet de détecter les conflits hydrauliques et ainsi de supprimer les points aberrants.

8.5 Correction de l'effet de la réfraction et régularisation spatiale

Comme on l'a vu dans le chapitre 7, la réfraction a une influence selon deux composantes : elle introduit un biais si l'on fait une erreur sur la position de l'interface. Si l'on fait une erreur sur la rugosité locale, en prenant par exemple l'hypothèse simplificatrice d'une surface localement plane, on introduit une dispersion sur la mesure, telle que décrite dans le paragraphe 7.5.2.b. Pour s'assurer de l'*exactitude* de la mesure, on doit donc avant tout s'assurer de l'exactitude de la *position* de l'interface.

La mise en cohérence hydraulique des bordures de lit mouillé permet justement d'accéder à une mesure de la géométrie de l'interface plus précise et moins biaisée, grâce à l'intégration de contraintes hydrauliques dans l'estimation des altitudes de lignes de rives.

La connaissance de la géométrie de l'interface permettra ensuite de calculer la position réelle du point à partir de sa position apparente (réfractée).

8.5.1 Estimation de la position de la surface de l'eau

On applique l'algorithme de mise en cohérence hydraulique à toutes les bordures de lit mouillé. Ceci peut se faire, selon les cas de figure et les données disponibles, soit rive par rive, soit globalement sur le jeu de mesures entier. Il faut disposer en entrée des mesures ordonnées de l'amont vers l'aval.

Une solution consiste à se baser sur les altitudes restituées des bordures de lit mouillé, en travaillant rive par rive. On effectue la mise en cohérence hydraulique de chaque rive indépendamment. On obtient donc un jeu de mesures hydrauliquement cohérentes par lignes de rive. On calcule ensuite la position de la surface en tout point par interpolation linéaire des altitudes entre les rives. On obtient une estimation de

l'altitude de l'interface au dessus de chaque point apparent, nécessaire à la correction de la réfraction utilisant l'approximation de surface localement plane.

8.5.2 Estimation de la position réelle du point : correction de la réfraction et filtrage spatial

Pour chaque couple, on a estimé les paramètres de la géométrie de prise de vue. On a en chaque point de la rivière une estimation de la position de la surface. On a mesuré la position du point apparent (par stéréorestitution). Il est donc possible de calculer le point d'intersection des rayons perspectifs gauche et droit avec la surface de l'eau. On calcule ensuite le trajet des rayons réfractés et finalement l'intersection des rayons lumineux réfractés.

Le calcul de cette intersection est effectué suivant la même succession d'étapes que celles détaillées dans la section 7.1.3. Ce calcul permet d'obtenir une estimation brute, point à point, de la position corrigée de l'effet de réfraction.

Or, comme on l'a vu dans la section 7.5.2.b, l'influence des vagues se traduit par une dispersion intrinsèque de la mesure de la position "apparente" des points immergés. Si la correction de l'effet de réfraction permet d'obtenir une estimation de la position réelle des points immergés avec un biais plus faible, la dispersion de la mesure subsiste[2].

Par ailleurs, la mesure spatiale issue de la mise en correspondance d'image donne une vision quasi continue de la surface du lit de la rivière. La densité de la mesure de l'altitude obtenue par la méthode proposée peut être localement très forte et doit pouvoir facilement dépasser la dizaine de points par mètre carré pour un pixel au sol d'un dizaine de centimètres. D'autre part, les altitudes des points immergés, ainsi que la source de la dispersion de la mesure - la rugosité de la surface - présentent de la corrélation spatiale [Bailly et al., 2006]. Il est donc utile, de même que pour l'estimation des altitudes des rives, de mettre en place un filtrage spatial du nuage de points afin de réduire le bruit de mesure.

L'utilisation en première approche d'un filtre médian, doit permettre de diminuer la dispersion de la mesure tout en réduisant l'influence des mesures aberrantes résiduelles. Le choix des paramètres du filtre (rayon, nombre de points) est à optimiser en fonction

[2]elle est même amplifiée du fait de la géométrie de la réfraction : au premier ordre, les profondeurs et donc la dispersion sur l'estimation de ces profondeurs sont multipliées par un facteur de 1.33

de la densité du nuage de points obtenus après stéréorestitution, la résolution spatiale et la dipersion recherchées pour la mesure filtrée.

Ce processus permet, au détriment de la résolution spatiale, de réduire la dispersion de la mesure et d'obtenir une représentation du fond de la rivière cohérente avec la réalité.

Bilan de la deuxième partie

Les résultats obtenus au cours de cette partie ont mis en lumière les points suivants :

- nécessité de maîtriser la géométrie de prise de vue (points 1 et 2 de la figure 8.3)
- stéréo possible à travers l'eau pour des surfaces peu "rugueuses" mais nécessité d'une approche 3D (point 3)
  - les vagues apportent une dispersion sans biais...
  - ... si la position de l'interface air/eau est elle-même estimée sans biais
  - la position de l'interface sera estimée avec un algorithme de mise en cohérence hydraulique

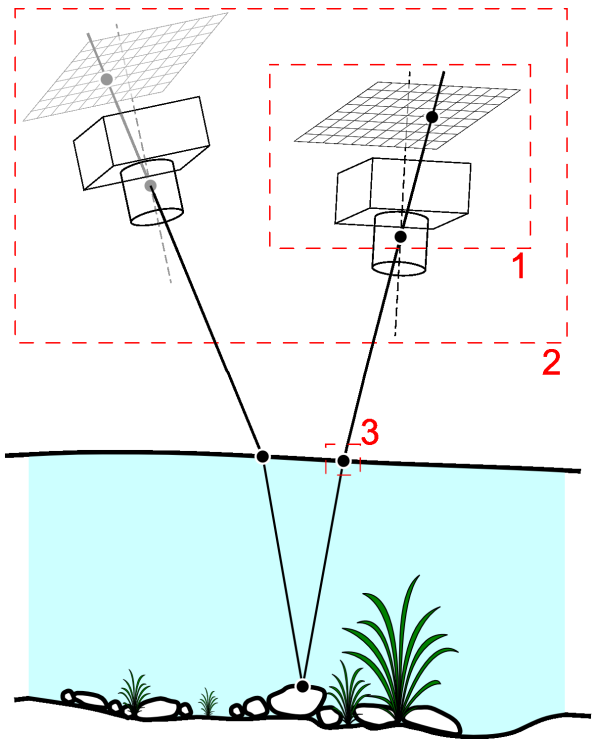


FIG. 8.3 - *Paramètres à estimer pour mesurer le relief par stéréophotogrammétrie à travers l'eau : 1 - géométrie du capteur ; 2 - géométrie d'acquisition des images ; 3 - position de l'interface.*

La maîtrise de la géométrie de la prise de vue comprend deux éléments : maîtrise de la géométrie interne et maîtrise de la géométrie externe. Pour la géométrie interne, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage de l'appareil utilisé, selon la méthode présentée dans la section 5.2.1. Pour la géométrie externe, il faut en premier lieu s'approcher au mieux des conditions normales lors de l'acquisition. Pour cela, nous avons proposé un protocole spécifique d'acquisition photogrammétrique pour l'estimation du relief immergé de rivière dans le chapitre 6. Il faut de plus mettre en oeuvre les méthodes permettant de déduire les paramètres de la prise de vue à partir de positions de mires et des informations contenues dans les images (sections 5.2.2 et 5.2.3).

La prise en compte des effets dûs à la traversée de l'interface air/eau par les rayons lumineux a été étudiée dans le chapitre 7. On a ainsi montré que l'altitude des points immergée pouvait être estimée sans biais avec une méthode de correction de la réfraction sous la condition que la position de l'interface soit elle-même estimée sans biais.

On a en conséquence proposé une méthode d'estimation de la position de l'interface à partir des informations contenues dans les images (chapitre 8) avec intégration de contraintes physiques. Les altitudes "brutes" estimées par stéréorestitution sont en effet corrigées par mise en cohérence hydraulique.

Les résultats des expérimentations et des études théoriques présentés dans cette partie permettent de proposer une méthode d'acquisition et de traitement d'images pour l'estimation du relief immergé de rivière. Cette méthode est synthétisée par la figure 8.4. Cette méthode a été appliquée en conditions opérationnelles. La partie suivante présente les résultats obtenus et les discute.

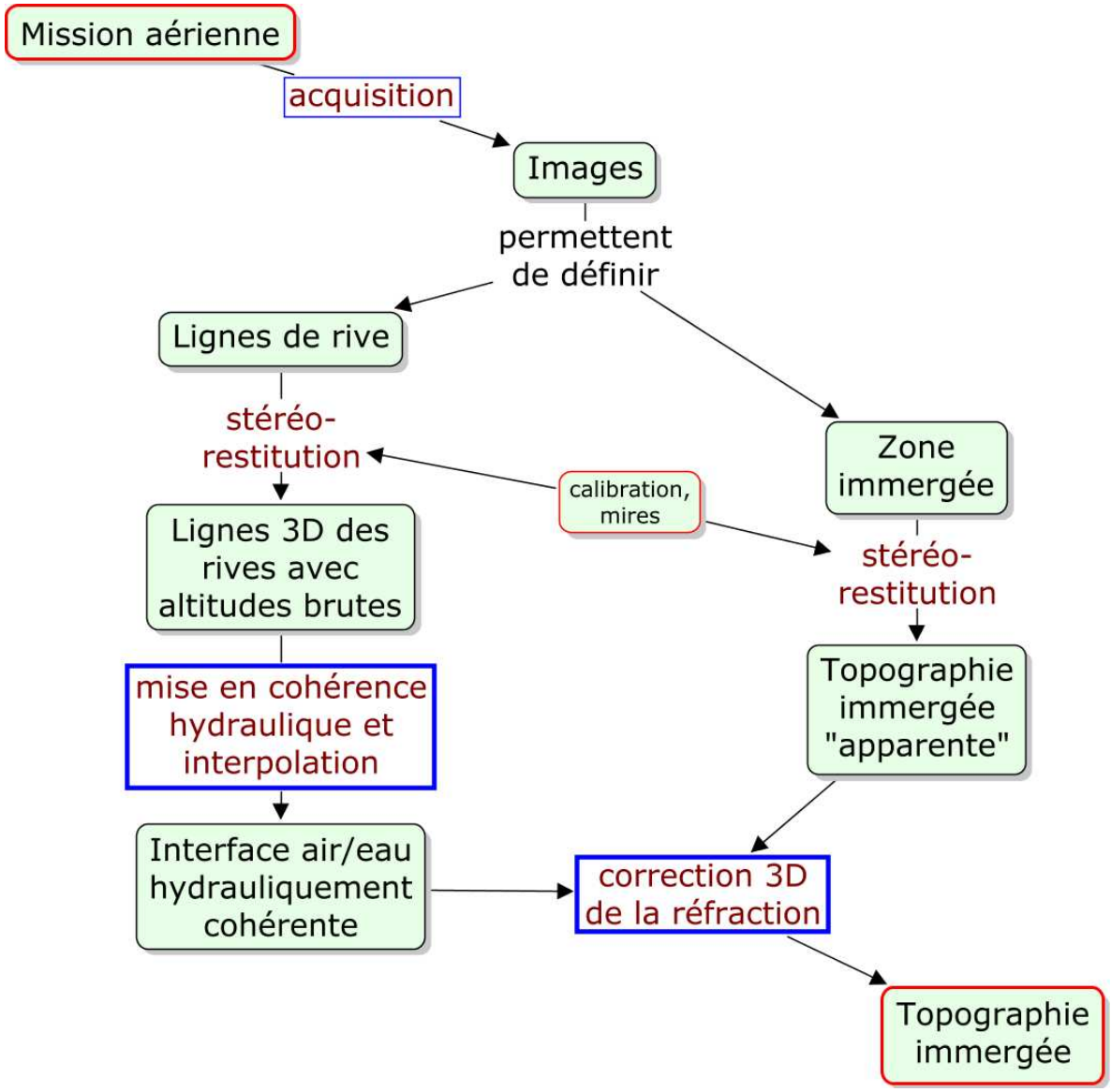


FIG. 8.4 - *Diagramme synthétique de la méthode développée*

Troisième partie

Applications

Introduction à la troisième partie

Cette partie présente l'application en conditions opérationnelles de la méthode développée dans la partie précédente. On choisit d'y présenter en détail deux sites d'études, situés sur le Gardon d'Anduze et la Durance, puis les résultats d'application de la méthode sur ces sites, et enfin une discussion de ces résultats.

La Durance est le terrain d'expérimentation principal de la thèse et comporte 4 stations (voir figure 9.4) sur lesquelles on dispose d'un important jeu de données terrain. Le retour d'expérience d'acquisitions réalisées en début de thèse sur l'une de ces stations a permis d'élaborer le protocole d'acquisition d'images présenté dans le chapitre 6. L'acquisition d'images selon ce protocole et la mise en oeuvre en conditions opérationnelles de la méthode a ensuite été réalisée sur une autre station, présentée dans la section 9.3.3. En complément, on présente le Gardon d'Anduze, sur lequel a été réalisée une expérimentation "en conditions idéales", pour laquelle il n'a pas été fait appel à un vecteur aérien. Cette expérimentation visait surtout à démontrer la faisabilité et la qualité potentielle d'une mesure du relief immergé de rivière par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Le premier chapitre présente ces deux sites d'étude et les données qui leurs sont associées. Ce premier chapitre permet aussi de valider le protocole d'acquisition proposé dans le chapitre 6 en comparant les acquisitions réalisées en 2005 avec l'acquisition réalisée en 2004.

Le chapitre suivant présente les résultats de ces deux expérimentations ; faisabilité et qualité potentielle de la mesure du relief immergé de rivière sur le Gardon, puis mise en oeuvre opérationelle de la méthode sur la Durance. L'expérimentation sur la Durance a permis tout d'abord d'évaluer l'apport du protocole d'acquisition développé et ensuite de détailler étape par étape les résultats de l'application de la méthode proposée. On valide finalement la méthode par comparaison des données estimées par celle-ci avec les données observées sur le terrain.

Enfin, un dernier chapitre discute du potentiel de la méthode développée, en détaillant ses points forts mais aussi ses limites, ce qui permettra de présenter les perspectives dégagées par ce travail de thèse.

Chapitre 9

Sites d'étude et données

Deux sites d'études ont été utilisés pour effectuer des acquisitions d'images, tester et développer la méthode.

Le site principal est situé sur la partie médiane de la Durance. En effet, du fait de la présence de nombreux équipements hydrauliques, du canal "usinier" de dérivation, mais aussi des apports naturels résiduels des affluents tels que la Bléone ou l'Asse, la section de la Durance située entre le barrage de l'Escale et celui de Cadarache représente un terrain expérimental idéal au niveau hydrobiologie. De plus, on dispose de données de terrain de validation de grande qualité pour quatre stations situées sur cette partie de la Durance. C'est l'une de ces stations qui constitue le site d'application opérationnelle de la méthode.

Un autre site d'étude, situé sur le Gardon d'Anduze, a permis de tester le potentiel de la méthode en conditions maîtrisées.

9.1 Site d'expérimentation en conditions maîtrisées sur le Gardon d'Anduze

Une expérimentation a été réalisée sur le Gardon d'Anduze, à Saint-Jean-du-Gard (30) en octobre 2006. L'objectif de cette expérimentation est de tester de manière qualitative le potentiel de la stéréorestitution à travers l'eau, en terme de représentation du micro-relief ainsi que de pénétration dans l'eau pour des eaux relativement profondes

et claires.

Un autre intérêt dans cette acquisition est la constitution d'un jeu de données pour lequel on maitrise l'ensemble des éléments de prise de vue. Ainsi, on aura contrôlé les deux aspects suivants : (i) la géométrie d'acquisition - la constance de l'échelle et la verticalité des clichés sont garanties en effectuant les prises de vues en conditions maitrisées ; (ii) la géométrie de l'interface - le site test présente une rugosité relative de surface négligeable (voir figure 9.1). De plus, le rapport d'échelle entre les conditions de prise de vue et les grandeurs mesurées est très favorable. La taille du pixel au sol sera en effet très inférieure à la taille des objets ainsi qu'à l'épaisseur moyenne de la lame d'eau.

9.1.1 Présentation du site

La figure 9.1 présente une vue générale du site. Celui-ci est constitué par un bras du Gardon passant sous l'une des arches du pont vieux à Saint-Jean du Gard. Du fait du régime d'écoulement à cet endroit et au moment de la prise de vue, la surface de l'eau est assimilable à un plan. Les profondeurs varient de zéro à près de un mètre quatre-vingt. Le substrat est varié, constitué de sable, de galets et de quelques blocs grossiers. L'eau au moment de la prise de vue était claire, permettant de discerner les objets situés au fond aux plus grandes profondeurs (voir figure 9.3).

9.1.2 Données de terrain sur le Gardon

Un ensemble de 257 points topographiques a été relevé sur une surface de plus de 1200 mètres carrés. Ces points ont été positionnés à l'aide d'un tachéomètre dans un repère local. Parmi ces points, 122 correspondent à des mires placées sur les berges de manière à obtenir une référence spatiale pour les images ; ces mires ont été créées sur le terrain en utilisant de la peinture en bombe blanche et noire. Quelques autres points correspondent à la position de repères sur le pont utilisés pour la prise de vue.

Les 110 autres points sont des points immergés, utilisés pour la validation des mesures de topographie obtenues par stéréo. Le porte prisme utilisé a de plus été muni de graduations centimétriques. Le porte-prisme est manipulé par un opérateur à pied dans la rivière. La profondeur maximum mesurée est ainsi limitée, dans notre cas à un

FIG. 9.1 - *Vue générale du site test sur le Gardon d'Anduze (Vieux pont de Saint-Jean-du-Gard)*

mètre soixante. La précision de la mesure de la profondeur, estimée pour contrôle sur un transect, est de quelques centimètres. Au vu de l'échelle de prise de vue des photographies, on sait donc que la mesure de profondeur sera d'une précision moins bonne que la précision théorique des mesures image.

FIG. 9.2 - *Protocole de prise de vue sur le Gardon.*

9.1.3 Données image acquises sur le Gardon

Les images ont été prises à partir du pont, en utilisant une perche afin que les piles du pont ne soient pas dans le champ de l'appareil (voir figure 9.2). La perche a été munie d'une marque ainsi que d'un double système d'équerre et de niveau à bulle. Ce montage a permis d'effectuer les prises de vues dans des conditions d'angle (nadir) et de distance par rapport au pont les plus homogènes possibles.

Les images ont été prises tous les deux mètres, de manière à pouvoir former des couples stéréoscopiques avec différents recouvrements et B/Z. Le mode retardateur à dix secondes a été utilisé ainsi que, pour une partie du jeu de données, un filtre polarisant. L'exposition - demandant un compromis entre bonne exposition des berges (mires) et du fond - a pu être contrôlée en direct.

L'échelle de prise de vue est relativement constante, avec des hauteurs de parapet comprises entre 10.1 et 10.6 mètres pour la première arche, ce qui donne un pixel au sol d'environ 4 millimètres au niveau de la surface de l'eau. L'appareil est le même que

celui utilisé sur la Durance, avec la même focale (28mm).

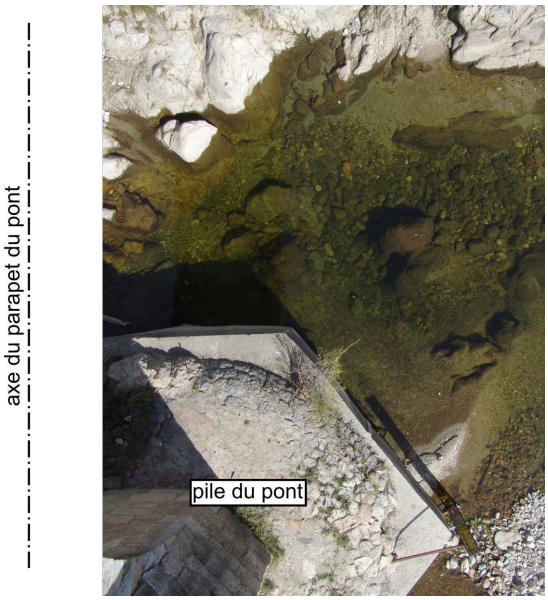


FIG. 9.3 - *Exemple d'une des images du jeu de données du Gardon. Le pixel au sol est d'environ 4mm au niveau de la surface de l'eau. Une pile du pont occupe la partie inférieure gauche de l'image*

9.2 Zone d'étude : la moyenne Durance - description, stations d'intérêt

La zone d'étude est constitué par les tronçons de la Moyenne Durance situés entre les barrages de l'Escale en amont, et Cadarache en aval (voir figure 9.4). Cette zone concentre l'essentiel de la problématique d'optimisation des débits réservés [Balland et al., 2002], premier levier sur lequel il est possible d'agir à court et moyen terme.

Dans la situation présente, les essartements et les crues exceptionnelles "nettoient" le lit actif de sa végétation. Ainsi, la ripisylve est assez limitée et les berges de la rivière sont le plus souvent dépourvues d'arbres. Comme on l'a vu, le débit, régulé, est constant la plupart de l'année, et les apports des affluents sont limités. Ainsi, hors évènements météorologiques violents, l'eau de la Durance dans cette section est claire et peu profonde la majeure partie de l'année. Cette section apparaît donc comme un site d'étude possible pour l'expérimentation des méthodes de télédétection nécessitant une bonne

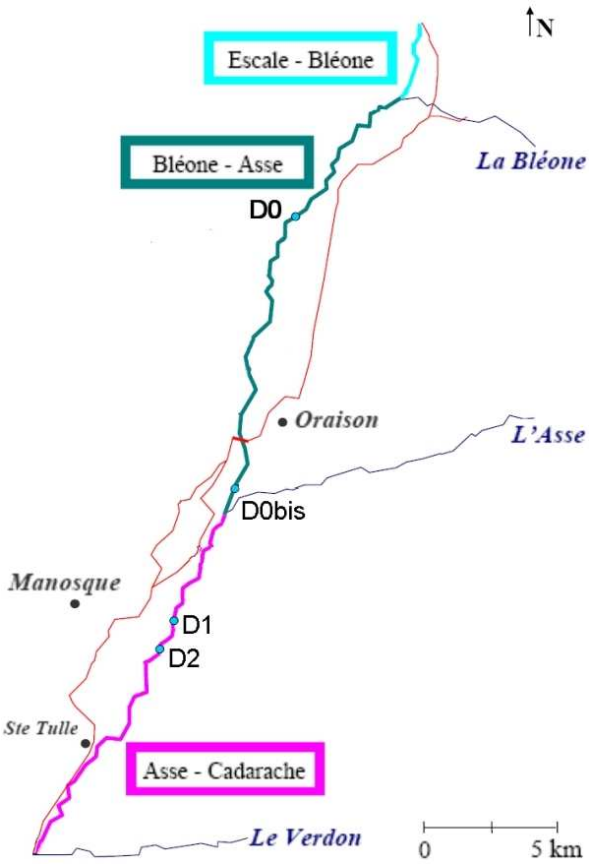


FIG. 9.4 - *Site d'étude : le tronçon de la Moyenne Durance entre les barrages de l'Escale et Cadarache avec les quatre stations D0, D0bis, D1 et D2. Extrait de [Le Coarer et al., 2005]*

visibilité (i) de la rivière ; et (ii) de son fond à travers la lame d'eau.

Dans le cadre du renouvellement de la concession pour l'usine de Sainte-Tulle 1, située dans ce tronçon, des études pour déterminer un état écologique de référence et un état cible ont eu lieu [Le Coarer et al., 2005]. Quatre stations d'environ 1 kilomètre de long ont été déterminées pour effectuer des travaux à une échelle plus précise. Ces stations ont été choisies de manière à être les plus représentatives possibles de la section entière. Elles sont repérées sur la figure 9.4 par les codes D0, D0bis, D1 et D2. Deux stations présentent un lit avec deux chenaux (D0, D2) et deux stations (D0bis, D1) un lit avec chenal unique.

Sur l'ensemble du tronçon, la profondeur moyenne de la Durance à cette date est de 30 centimètres, la profondeur maximum rencontrée sur les transects est de 3 mètres 20. Le débit moyen[1] est de 7 m^3/s. La largeur des chenaux est comprise entre 5 et 50 mètres. La pente moyenne est de 3 ‰. La rivière présente une succession de radiers, et de plats/mouilles (cf. figure 9.5). Les radiers sont des zones à pente forte, à forte vitesse et le plus souvent de faible profondeur ; les plats sont des zones à pente plus faible ; les mouilles sont des zones pouvant présenter des profondeurs plus grandes et des vitesses plus faibles.

9.3 Données image acquises sur la Durance

Plusieurs campagnes d'acquisition ont été réalisées. Dans cette section, on présente tout d'abord la campagne et le jeu de données constitué avant la thèse lors de tests préliminaires. Ensuite on présente la campagne et les données utilisées pour la mise en place et la validation de la méthode décrite dans le chapitre 8.

9.3.1 Plusieurs campagnes d'acquisition d'images

Les premiers travaux de l'équipe concernant l'utilisation d'images aériennes à très haute résolution pour la mesure de la bathymétrie de rivière ont été réalisés à partir d'images prises par des appareils argentiques. C'est avec cette technologie que la pre-

[1] En 2007, ce débit a été augmenté de manière temporaire afin de tester l'effet sur le milieu d'une augmentation du débit réservé

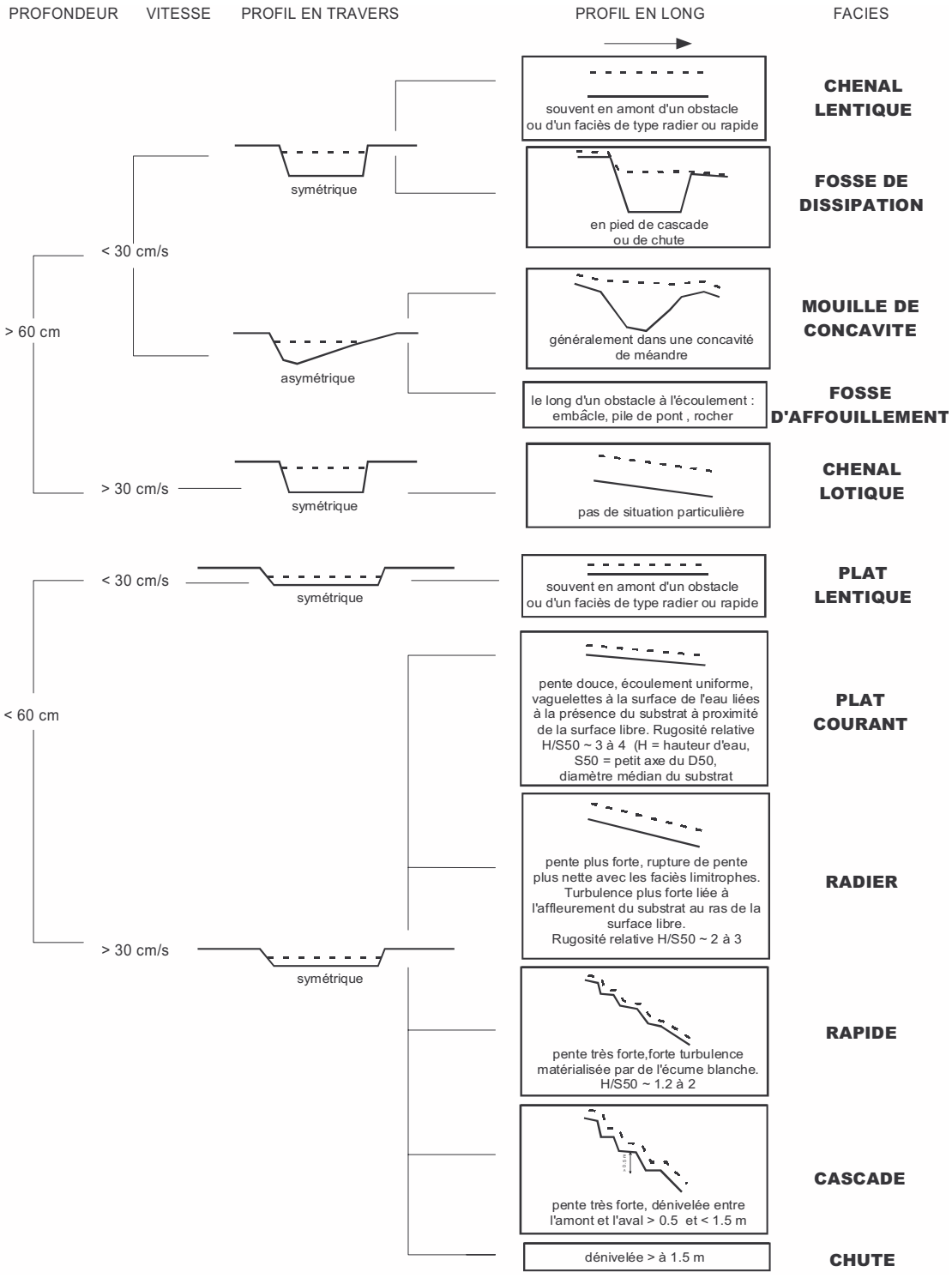


FIG. 9.5 - *Définition des radiers, plats et mouilles. Extrait de [Malavoi et Souchon, 2002]*

mière campagne d'acquisition a été réalisée, en septembre 2004 sur la station référencée D1 (voir figure 9.4). Cette campagne a visé à établir un jeu de données test, permettant d'évaluer le potentiel et les conditions d'exploitation en stéréo d'images aériennes à très haute résolution acquises par des moyens légers.

Sur la station D1, la Durance ne possède qu'un chenal. Le vol a été effectué selon un seul axe. Les images ont été acquises avec un Nikon F501 et un objectif de 35mmm de focale, à 300 mètres d'altitude environ. Au total, la partie de la pellicule permettant d'envisager une exploitation en stéréo à l'échelle de la station est constituée de 6 images. La taille moyenne du pixel au sol est de 12 centimètres environ.

C'est le retour d'expérience d'une première exploitation de ces données qui a permis d'établir et de préciser le cahier des charges dont le détail est donné dans la section 6.1.1. En particulier, l'utilisation d'appareils numériques et l'établissement d'un plan de vol détaillé, permettant de mieux maîtriser *a priori* la géométrie de la prise de vue, ont été décidés suite à ces expérimentations préliminaires.

Pour la deuxième campagne d'acquisition (septembre 2005), dont la finalité est l'exploitation des images en stéréophotogrammétrie, ce sont des appareils numériques - petit format - qui ont été utilisés. Du fait des fortes turbidités résiduelles constatées sur les stations D1 et D2 situées à l'aval de la confluence avec l'Asse, l'acquisition ayant pour objectif l'application et le test de la méthode de stéréorestitution à travers l'eau a été restreinte aux deux stations amont D0 et D0bis. On mis en oeuvre le protocole d'acquisition détaillé dans la section 6.2 sur ces deux sites.

La prise de vue a été effectuée le 29 septembre 2005 entre 15h40 et 15h45 sur D0bis (2 axes de vol) et entre 16h15 et 16h30 sur D0 (3 axes de vol), à une altitude prévue de 200 mètres. Du fait des technologies utilisées, les paramètres de vol et de l'acquisition n'ont pas été observés en temps réel. Il n'y a en effet ni centrale inertielle ni GPS couplés au capteur.

Cette acquisition a permis de constituer un jeu de données de 30 photos à très haute résolution spatiale (pixel inférieur à 10 centimètres) sur 5 axes (tableau 9.1). Ces photos couvrent une surface totale de rivière (zone immergée) de plus de 6 hectares (deuxième et troisième ligne du tableau 9.2).

Site	date	axe	nombre
D0bis	sept. 2005	n° 1	10
D0bis	sept. 2005	n° 2	4
		total	14
D0	sept. 2005	n° 1	6
D0	sept. 2005	n° 2	6
D0	sept. 2005	n° 3	4
		total	16

TAB. 9.1 - *Données images acquises en 2005 sur la Durance*

9.3.2 Apport du protocole d'acquisition - caractéristiques des données

9.3.2.a Couverture stéréo - mires

La couverture stéréo de la zone d'intérêt et la répartition des mires sont les premiers paramètres qui ont été optimisés à la suite du retour d'expérience de l'acquisition de 2004. On a ainsi obtenu pour les acquisitions de 2005 une couverture stéréo de la zone immergée meilleure que pour les acquisitions de 2004 (figure 9.6 et le tableau 9.2). Le protocole proposé dans la section 6.2 a donc permis d'améliorer ce point, résultant notamment en une couverture stéréo sans lacune du bras gauche de la rivière pour le site D0 (en bas sur la figure 9.6). Les données détaillées des recouvrements des couples de cette mission (D0 axe2, soit le bras gauche de la station D0) figure dans le tableau 9.3. Cette bande d'images est constituée de 6 images numérotées de 89 à 94. En revanche, les axes de vol couvrant la plus grande partie de D0bis et le bras droit de la rivière sur le site D0 n'ont pas été réalisés selon le plan de vol. Il sont en effet décalés sur la rive droite et la couverture en stéréo est incomplète.

En ce qui concerne les points de contrôle au sol - les mires - le retour d'expérience de la campagne de 2004 a permis d'améliorer leur répartition et d'optimiser leur nombre (figure 9.6 : les mires sont représentées par les symboles $\odot$). Pour la campagne de 2004, les mires, bien que très nombreuses (369 sur l'ensemble du site pour une surface totale couverte par les images d'une vingtaine d'hectares), sont concentrées le long de la rivière : ce ne sont pas les conditions optimales pour le calcul de l'orientation externe.

Pour les campagnes de 2005, le nombre de mires total pour chaque station est inférieur (103 et 162, pour des surfaces totales couvertes respectivement d'une vingtaine

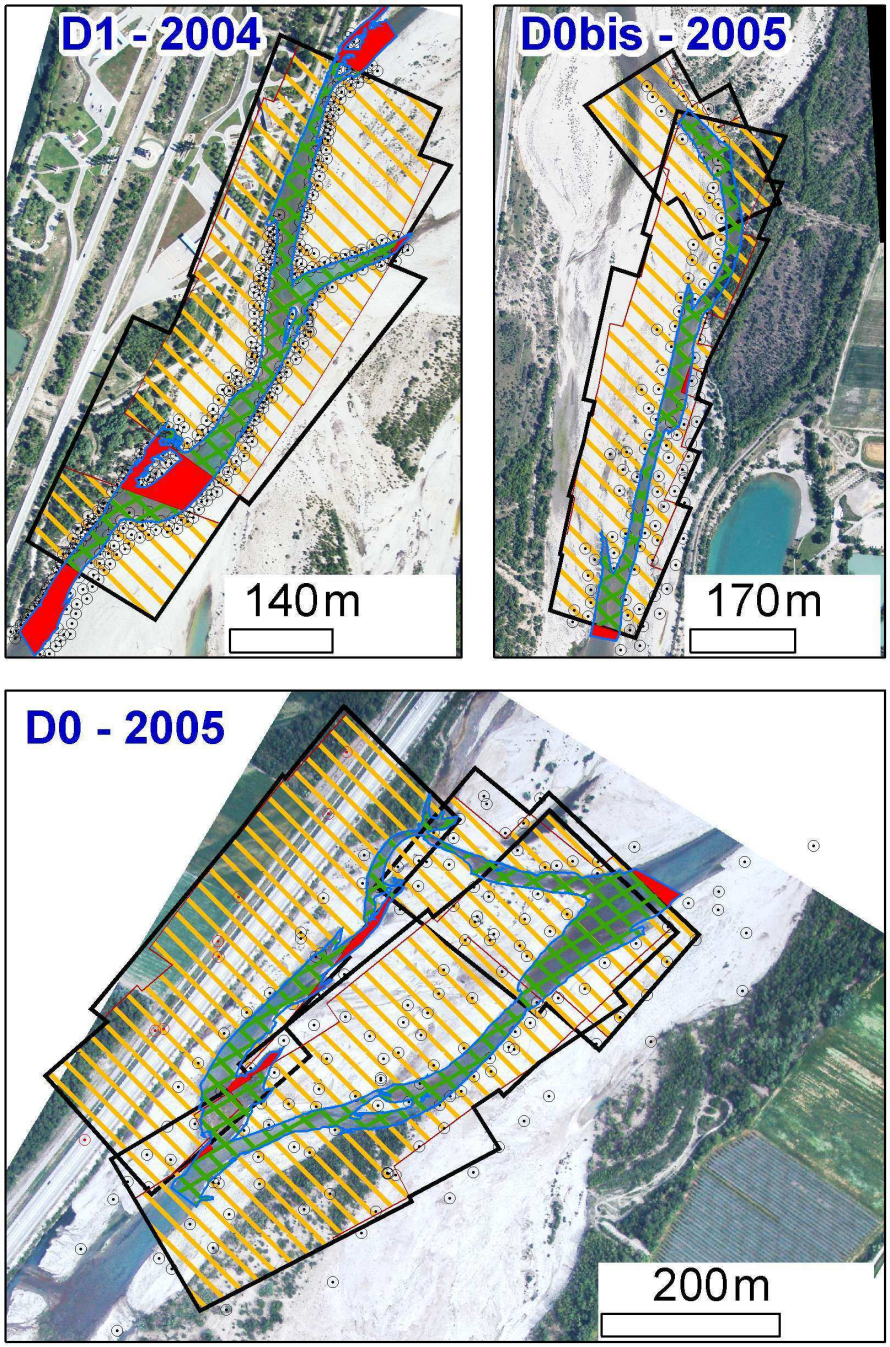


FIG. 9.6 - *Comparaison des acquisitions de 2004 et de 2005 : couverture stéréo et répartition des mires. Traits forts : limites des zones couvertes par les images participant à au moins 2 couples (zone stéréo théorique maximale). Surfaces hachurées : zones couvertes par au moins 2 images (zone stéréo effective). Surfaces doublement hachurées : zone de la rivière couverte en stéréo. Surfaces pleines : zones de la rivière non couvertes en stéréo.* ⊙ *: mires*

et d'un peu plus d'une trentaine d'hectares). De plus la répartition ainsi que le ratio entre nombre de mires et nombre d'images varie beaucoup d'une bande d'images à l'autre (tableau 9.4). C'est finalement le chenal gauche de D0 (axe 2, acquis en 2005) qui semble présenter la meilleure répartition et densité de mires. Pour cette bande, on dispose en moyenne de plus de 35 mires par images (tableau 9.5).

9.3.2.b Stabilité du vol - homogénéité des conditions de prise de vue

La figure 9.7 représente la variabilité du facteur d'échelle, de l'angle de prise de vue des clichés, ainsi que celle des bases des couples stéréoscopiques de chacune des 6 bandes d'images acquises (ou missions). La première mission correspond à l'acquisition de 2004. Les cinq suivantes sont les missions réalisées en 2005 selon le protocole décrit en 6.2.

Quelles que soient les missions, le facteur d'échelle des clichés varie de moins de 5% par rapport à sa valeur moyenne pour la bande (figure 9.7(a)). En revanche, en ce qui concerne la base des couples stéréoscopiques et l'angle de visée des clichés, les missions présentent des caractéristiques très différentes.

La mission réalisée en 2004 est caractérisée par les conditions d'acquisition les plus hétérogènes, avec des angles de vue s'écartant de plus de 15 ° par rapport à la verticale pour certains couples (figure 9.7(b)) et des bases pouvant varier de plus ou moins 20% par rapport à la moyenne sur une bande (figure 9.7(c)).

Pour les missions réalisées en 2005, les bases des différents couples sont significativement[2] moins variables. C'est l'un des facteurs qui a permis de limiter les lacunes dans la couverture stéréo (section 9.3.2.a). De plus, pour les prises de vue effectuées sur les deux derniers axes de la dernière station, on se trouve dans des conditions normales (angle de prise de vue à moins de 5 ° de la verticale). Le protocole établi (section 6.2) a donc permis d'améliorer significativement les conditions de prise de vue d'une bande d'images.

[2] p-value du test de Fisher (probabilité d'égalité des variances) : 0.0001889

Site	Surfaces		
	zone immergée	couverte en stéréo	proportion
D1 (sept. 2004)	4.1 ha	2.8 ha	68%
D0bis (sept. 2005)	2.7 ha	2.6 ha	96%
D0 (sept. 2005)	3.6 ha	3.4 ha	94%

TAB. 9.2 - *Couvertures stéréo des missions de 2004 et 2005 : données chiffrées*

(a) couples avec B/Z de 0.5 environ

couple	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94	moyenne
recouvrement	61%	56%	56%	66%	53%	58.44%

(b) couples avec B/Z supérieurs à 0.5

couple	89/91	90/92	91/93	92/94	moyenne
recouvrement	25%	21%	23%	22%	23.02%

TAB. 9.3 - *Données détaillées : recouvrements des couples formés par les images 89 à 94 couvrant l'axe 2 de D0 (bande acquise en rive gauche de D0 en 2005)*

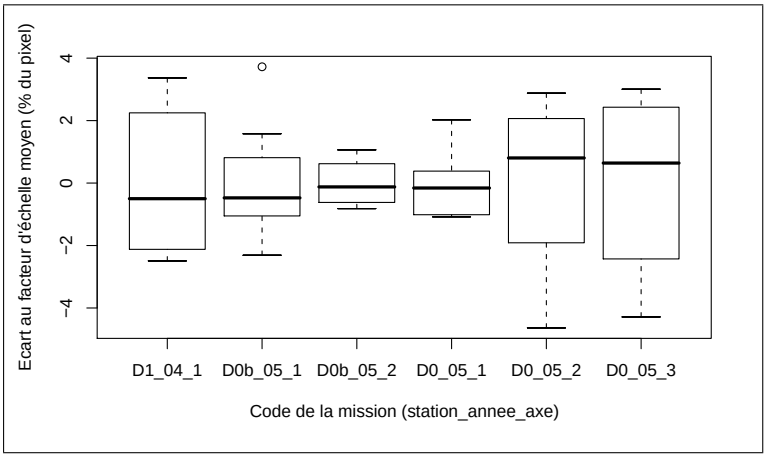
Missions	nombre de		ratio
	mires	images	
D1 (2004) axe 1	369	6	61.5
D0bis (2005) axe 1	89	10	8.9
D0bis (2005) axe 2	23	4	5.8
D0 (2005) axe 1	29+10[a]	6	6.5
D0 (2005) axe 2	96	6	16.0
D0 (2005) axe 3	54	4	13.5

TAB. 9.4 - *Couvertures en mires pour chaque mission*

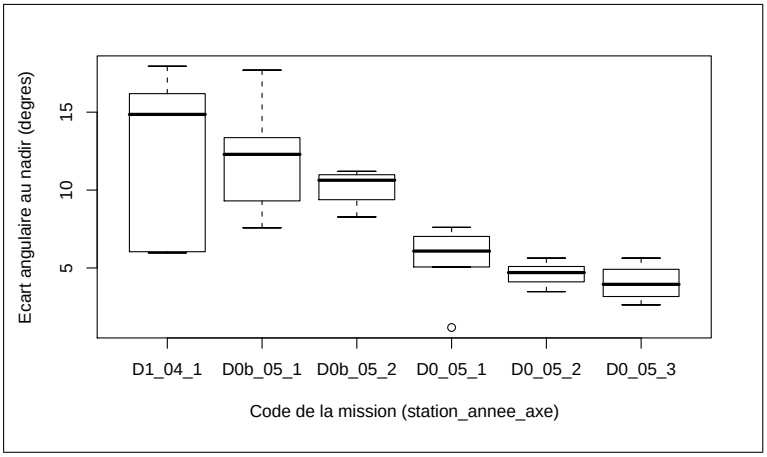
[a]Les 10 mires supplémentaires sont des points remarquables dont la position a été relevée après l'acquisition des images

Image	n° 89	n° 90	n° 91	n° 92	n° 93	n° 94	moyenne
Nombre de points	33	38	39	44	38	21	35.5

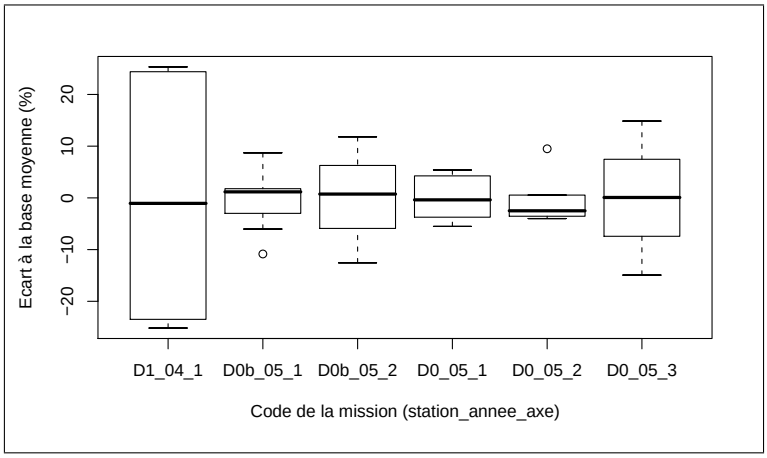
TAB. 9.5 - *Nombre de mires par image pour l'axe 2 de D0 (chenal gauche, 2005). Les mires figurent dans plusieurs images du fait du recouvrement longitudinal*



(a) Variabilité du facteur d'échelle (=taille du pixel)



(b) Variabilité de l'angle de prise de vue (nadir=vue verticale)



(c) Variabilité de la base (écart entre deux positions de prise de vue)

FIG. 9.7 - *Caractérisation des conditions de prise de vue des différentes missions d'acquisition d'images effectuées sur la Durance.*

9.3.3 Choix du site d'application de la méthode : Les Mées (D0)

En fonction des caractéristiques réelles du jeu de données image - déterminées après le vol - et du fait des fortes turbidités résiduelles constatées sur les stations D1 et D2 situées à l'aval de la confluence avec l'Asse, on a choisi la partie du jeu de données couvrant le bras gauche de la station D0 pour l'application de la méthode et sa validation. La figure 9.8 présente une vue en contexte la station D0, la station la plus en amont du tronçon, située près des Mées. Cette station comporte 2 chenaux, pour lesquels le débit

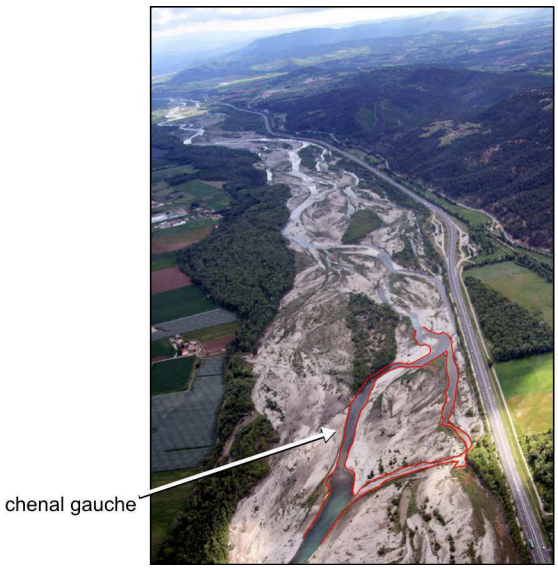


FIG. 9.8 - *Vue de la station D0 le 2 mai 2007. L'amont est à l'avant-plan, l'aval à l'arrière-plan. On voit que le chenal en rive droite n'est pratiquement plus actif à cette date. Photo http://www.lavionjaune.fr.*

se répartit comme suit : 0.35 m^3/s en rive gauche et 5.87 m^3/s en rive droite (jaugeage du 25 mai 2005, cf. figure 9.9). La mise en place de la méthode a été effectuée sur le chenal situé à gauche sur la photo 9.8.

Dans ce chenal, les profondeurs sont comprises entre 0 et 1 mètre 60, avec 95% des profondeurs mesurées inférieures à 72 centimètres (cf. figure 9.12). Ce site présente une ripisylve assez limitée (6% du linéaire des rives). Les pierres fines (Ø de 6.4 à 12.8cm) à grossières (Ø de 12.8 à 25.6 cm) constitutent la granulométrie dominante sur plus de 80% du chenal. Le limon est tout de même présent sur plus du tiers du chenal (épaisseurs non relevées) et la rivière est de manière générale assez colmatée (le limon est présent sur plus de 70% de la surface et dominant sur plus de 30% de la station). Les algues

sont très couvrantes[3] sur près de la moitié du chenal (chiffres extraits de [Le Coarer et al., 2005]).

9.4 Données de terrain acquises sur le site d'application

Le jeu de données terrain doit répondre à deux objectifs distincts : (i) nécessité d'avoir une vérité terrain indépendante qui sera utilisée pour valider les mesures obtenues par télédétection ; (ii) nécessité de connaître les coordonnées terrain des points de contrôle au sol. Ces dernières permettent de faire le lien entre coordonnées image et coordonnées terrain, notamment dans la phase d'orientation des clichés (voir section 6.2.3).

La vérité terrain utilisée correspond à la partie "topo" de la campagne de mesures de terrain réalisée par le Cemagref d'Aix-en-Provence et l'Avion Jaune dans le cadre de l'étude menée par EDF pour le renouvellement de la concession pour l'usine hydroélectrique de Sainte-Tulle 1 [Le Coarer et al., 2005].

Le jeu de données utilisé dans ce travail n'est donc qu'une *petite* partie du jeu de données global constitué pour l'étude citée plus haut. Cette dernière contient en effet des données à l'échelle du tronçon, ainsi qu'à l'échelle de chacune des 4 stations. Elles comportent, en plus de la topographie immergée, des mesures de granulométrie, de rugosité, et de vitesse.

9.4.1 Données de référence spatiale

De manière à constituer une référence spatiale pour le jeu de données image, permettant la mise en relation des coordonnées image avec les coordonnées terrain, on a placé des mires au sol comme représenté sur la figure 9.10. Il a été choisi de donner à ces mires une forme de croix de manière à repérer plus facilement leur centre dans les images. On a disposé ces mires dans une zone plus large que la zone de couverture

[3] classe 4 sur 5 : présence d'algues sur plus de 90% de la surface du fond

FIG. 9.9 - *Positions et valeurs des jaugeages de la station D0 au 25 mai 2005 (extrait de [Le Coarer et al., 2005])*

FIG. 9.10 - *Une mire sur le terrain. Chaque galet fait une quinzaine de centimètres de long.*

prévue des images afin de ménager une marge de sécurité.

Les points ont été espacés d'une cinquantaine de mètres environ, ce qui a conduit à la mise en place de 162 mires sur l'ensemble de la zone, soit une moyenne de 35 mires par image (cf. tableau 9.4). Ces points de contrôle au sol ont été relevés à l'aide d'un GPS différentiel Leica 1200 en mode RTK (Real Time Kinematic). La précision de positionnement obtenue avec cet instrument est centimétrique.

9.4.2 Données de validation : topographie immergée

9.4.2.a Protocole de mesure

La topographie a été réalisée selon une méthode développée spécifiquement pour ce type d'application [Le Coarer et Dumont, 1995b]. Cette méthode est basée sur l'utilisation de prismes dont la position est repérée par un tachéomètre. L'appareil utilisé dans le cadre de la thèse est une station totale Leica TCRA 1102. Les pieds des porte-prismes sont des disques d'une dizaine de centimètres de diamètre. Les manches des porte-prisme comportent des graduations centimètriques de manière à pouvoir mesurer la hauteur d'eau à la verticale de chaque point.

Sur le terrain, le porte-prisme est positionné au pied ou au travers des massifs algaux. Les blocs isolés ne sont pas relevés. Ce protocole, ainsi que la présence du disque sur le pied du porte-prisme font que *la mesure de terrain représente une position moyenne du fond de la rivière* (voir figure 9.11). Cette mesure est à comparer à la mesure par télédétection. En effet *la mesure image caractérise l'enveloppe externe de la scène observée* (traits pointillés bleus sur la figure 9.11). On a donc, en plus du problème classique de la différence entre modèle numérique de surface et modèle numérique de terrain, un protocole terrain qui "lisse" la surface réelle du lit de la rivière. Les écarts entre le fond de la rivière ainsi modélisé et le sommet de l'enveloppe du fond peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de la vingtaine de centimètres.

Dans certaines zones où la profondeur et la vitesse ne permettent pas de progresser à pied dans le lit de la rivière, 2 autres techniques ont été utilisées. La première met en oeuvre les mêmes équipements, manipulés par un opérateur situé dans une petite embarcation. Cette dernière est maintenue en position de mesure depuis les rives à

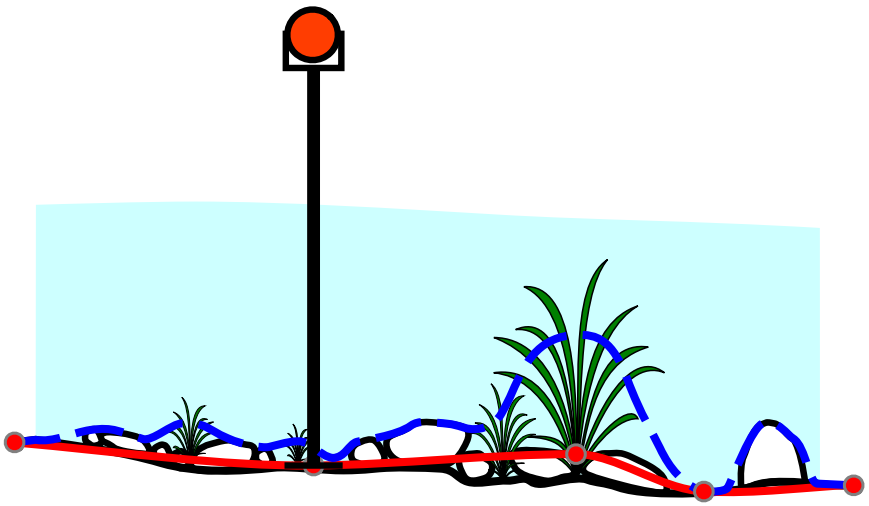


FIG. 9.11 - *Mise en évidence de la différence entre la mesure terrain (au porte-prisme, en traits pleins) et la mesure image (en traits pointillés)*

l'aide de cordes. La deuxième technique utilise un appareil de mesure Doppler de profondeurs et de vitesses : QLiner de Nortek. Cet appareil est en liaison radio BlueTooth avec un ordinateur de terrain pour le stockage des données. Le QLiner est équipé d'un prisme 360 ° qui permet de positionner les mesures (paragraphe adapté de [Le Coarer et al., 2005]).

9.4.2.b Données topographiques récoltées

Au total, 2764 points de topographie immergée ont été relevés sur la station D0. La mesure de la hauteur de l'eau a été effectuée sur 1969 de ces points et reconstituée sur le restant. Dans la zone couverte par les images, on dispose ainsi de 1559 points de validation indépendants. Ces données sont reprises dans le tableau 9.6 et représentées sur la figure 9.12.

Total	avec profondeur	dans les images
2764	1969	1559

TAB. 9.6 - *Nombre de points terrain mesurés dans le chenal gauche de D0*

Dans le cas où la hauteur d'eau est reconstituée, la position de la surface est extrapolée à partir des bordures de lit mouillé. Cette procédure est utilisée dans les zones de pente faible pour lesquelles la surface est assimilable à un plan s'appuyant sur les

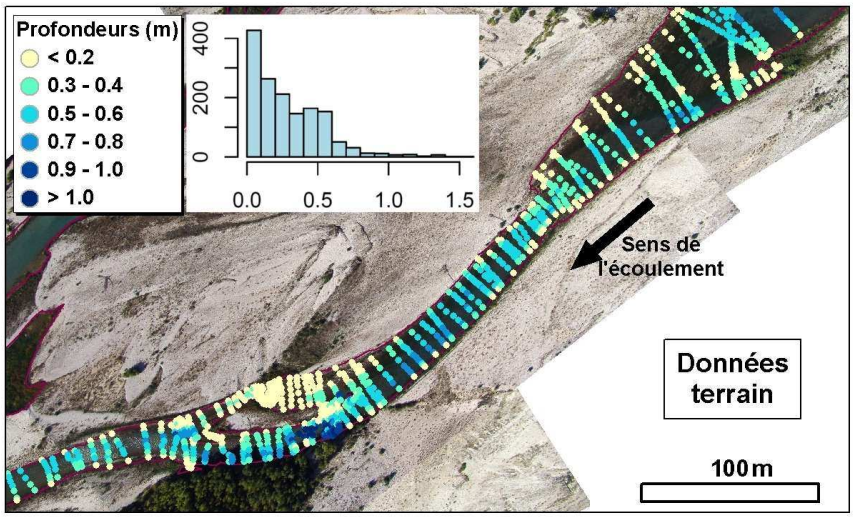


FIG. 9.12 - *Le chenal rive gauche de D0 avec les profondeurs mesurées sur le terrain, superposées aux vues aériennes. L'histogramme en haut à gauche représente la distribution des profondeurs sur ce chenal. Photo http://www.lavionjaune.fr*

bordures de lit mouillé.

Ce jeu de données a été constitué avec un échantillonnage adaptatif spécifique à la rivière et aux applications postérieures (modélisations hydrobiologiques et hydrauliques). Dans le sens longitudinal, il est constitué de transects. Ces transects peuvent être croisés pour les zones de jonction ou de séparation entre branches. Ils sont espacés d'une dizaine de mètres en moyenne. Cet intervalle est réduit dans les zones de forte variation.

Dans le sens latéral, les points sont espacés de 1 à 2 mètres. Encore une fois, cet échantillonnage est ajusté en fonction des caractéristiques locales.

Il est à noter que mise à part la topographie immergée du lit, un grand nombre de mesures a été effectué, incluant des jaugeages - le 25 mai 2005 pour D0 (cf. figure 9.9), une caractérisation du substrat, des mesures de granulométrie, ainsi que des pêches électriques. On dispose de plus, à une échelle plus globale, de données spatialisées décrivant les mésohabitats (voir description dans la section 7.5.1).

Ce chapitre ayant permis de présenter les sites d'étude et les données acquises sur ces sites, il est maintenant possible de passer à l'application et la validation de la méthode en conditions opérationnelles et contrôlées.

Site	date	type	nombre
D1	sept. 2004	images	6
D1	sept. 2004	topographie	5216
D0bis	juin 2005	topographie	3642
D0bis	sept. 2005	images	14
D0	juin 2005	topographie	3851
D0	sept. 2005	images	16
Gardon	oct. 2006	topographie	257
Gardon	oct. 2006	images	6

TAB. 9.7 - *Tableau récapitulatif des données acquises et utilisées durant la thèse*

Chapitre 10

La mesure du relief immergé de rivière : résultats et validation de la méthode

Ce chapitre présente les résultats détaillés de l'application de la méthode décrite dans la partie précédente. On a ainsi effectué l'estimation du relief immergé sur deux sites : le Gardon d'Anduze, pour lequel les conditions de prises de vues sont maitrisées (plateforme fixe, turbidité négligeable, interface air/eau assimilable à un plan) ; ainsi que la Durance, permettant de tester la mise en oeuvre de la méthode dans des conditions opérationnelles. Le site test principal est la station D0 sur la Durance.

Tout d'abord, on présente les résultats de l'expérimentation réalisée sur le Gardon d'Anduze. L'objectif de ce test est de démontrer le potentiel de la méthode dans les conditions d'application "idéales". On présente ensuite les résultats obtenus sur la Durance [Feurer et al., 2008].

Pour la partie concernant l'application de la méthode en conditions opérationnelles sur la Durance, les premiers résultats portent sur l'acquisition d'images par moyens légers à des fins d'exploitation en photogrammétrie. On évaluera la possibilité de mise en oeuvre d'un plan de vol avec de telles technologies et surtout la qualité du respect d'un cahier des charges tel que celui décrit dans la section 6.1.1. L'acquisition doit en effet permettre de constituer un jeu de données exploitable *en stéréo*, couvrant l'intégralité de la zone d'intérêt. On détermine ainsi le jeu de données test pour l'application de la méthode complète, soit le chenal gauche de D0.

On évalue ensuite la qualité du calcul de la géométrie d'acquisition en vol. En l'absence de données de validation pour les paramètres d'orientation, on effectuera une évaluation relative de la qualité de leur estimation en comparant les différents résultats obtenus par des méthodes et des calculs indépendants.

Une autre section détaille les résultats de la stéréorestitution réalisée sur le bras gauche de D0 selon les deux méthodes de corrélation mises en oeuvre, automatique et automatique supervisée. En effet, de la qualité de la mise en correspondance dépend directement la densité de mesure ainsi que la qualité de la restitution altimétrique. On discutera aussi de l'influence de la turbidité et de la présence des vagues dans cette étape.

La cinquième section présente les résultats du calcul de la position de l'interface air/eau (miroir) du bras gauche de D0, mettant en jeu une mise en cohérence hydraulique des altitudes de la ligne de berge. On détaillera le gain en précision sur la mesure de l'altitude du miroir et la diminution du biais dus aux mesures aberrantes.

On présente enfin le résultat de l'estimation de l'altitude des points immergés intégrant les résultats des étapes précédentes. La validation des résultats obtenus sur ce jeu de données test (chenal gauche de D0) est réalisée par comparaison avec des données de terrain indépendantes.

10.1 Résultats obtenus avec des images acquises en conditions maîtrisées et en vue rapprochée

L'objectif principal du test effectué sur le Gardon est d'acquérir un jeu de données image en conditions de terrain "idéales" du point de vue de la turbidité et de la simplicité de la géométrie du miroir. De plus, l'acquisition réalisée depuis un pont permet de s'assurer de la stabilité de la géométrie de prise de vue (facteur d'échelle, angle par rapport à la verticale) et d'un recouvrement en stéréo complet. On peut ainsi obtenir une idée du potentiel et de la faisabilité d'une mesure du relief immergé de rivière par stéréo à travers l'eau. On présente de plus (figure 10.1) un résultat obtenu avec le logiciel MicMac [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006], logiciel de mise en correspondance d'images avec lequel des tests ont été effectués en fin de thèse.

Le test a été réalisé avec un couple dont le B/Z moyen est de 0.19, avec un pixel au

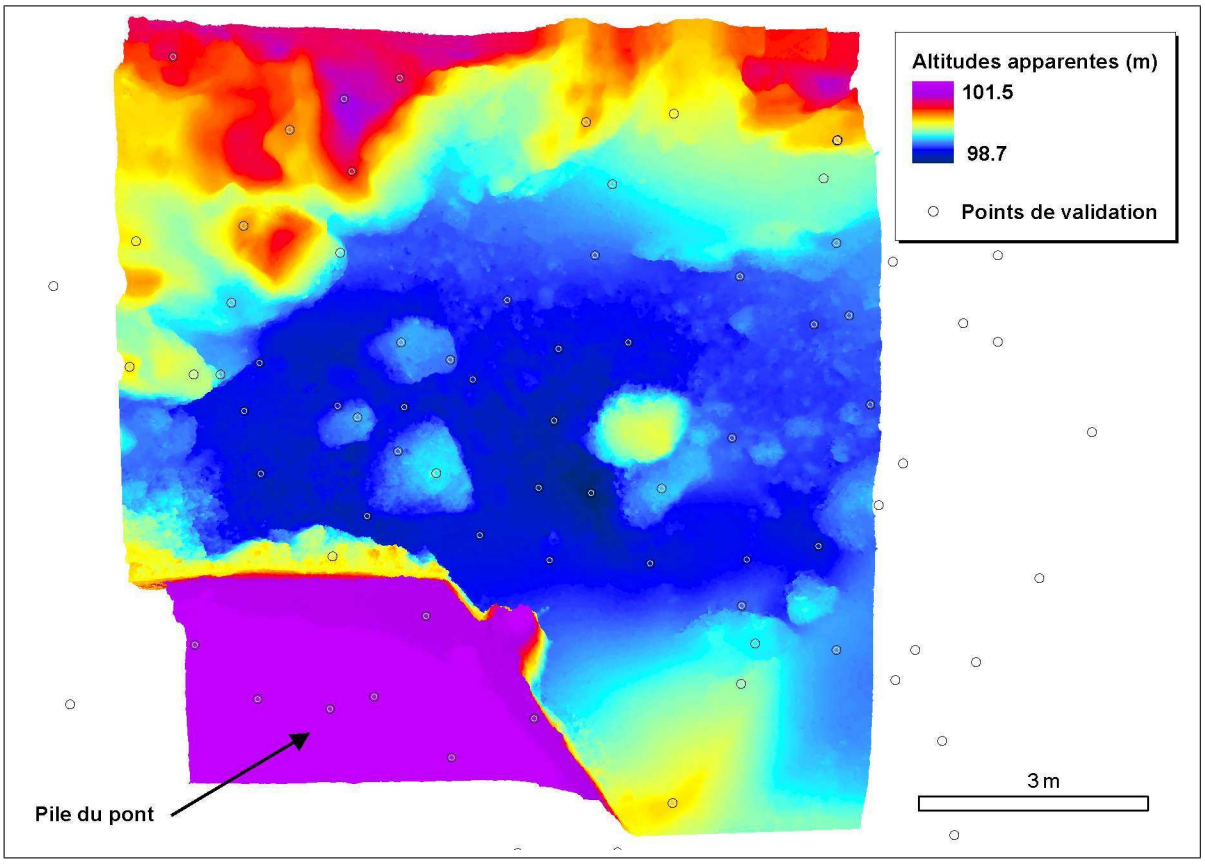


FIG. 10.1 - *Carte des altitudes apparentes estimées avec le logiciel MicMac. Les points correspondent aux positions des mesures de validation. La zone en violet correspond à une pile du pont*

sol moyen de 3.8 millimètres. La précision théorique maximale de la restitution altimétrique avec une hypothèse de précision de corrélation au quart de pixel est donc de 4.9 millimètres. On dispose dans la zone couverte par ce couple de 18 points de validation situés hors de l'eau et de 39 points sous l'eau. La position de ces points a été relevée au tachéomètre avec un porte-prisme muni d'une pointe ; la précision et l'exactitude de ces mesures par rapport à la surface réelle est de l'ordre du centimètre.

La comparaison avec les 18 points de terrain de validation donne un biais moyen de -0.9 centimètres pour les points émergés. La dispersion de l'écart entre mesure de terrain et mesure image (précision de la mesure altimétrique) est de 1.4 centimètres sur ces points émergés. Au vu de la précision théorique de restitution altimétrique, on peut supposer qu'une part de cette dispersion correspond à la dispersion de la mesure de terrain elle-même.

Pour les points immergés, on a mis en oeuvre une méthode de correction de la réfraction avec un modèle de surface plane. La validation de l'estimation de l'altitude des points immergés est effectuée par comparaison avec les mesures de terrain.

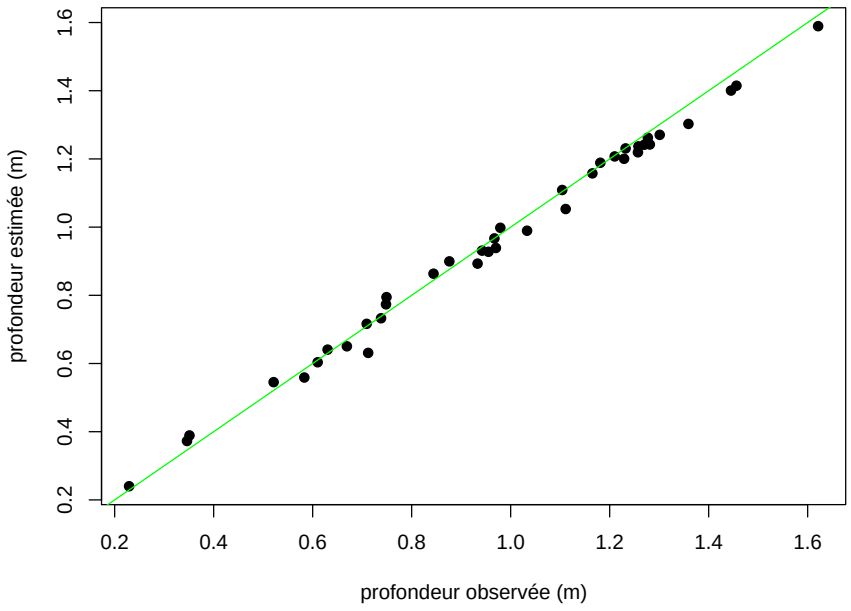


FIG. 10.2 - *Comparaison entre profondeurs estimées et profondeurs terrain*

La comparaison avec les 39 points de terrain de validation donne un biais moyen de 1.2 centimètres pour les points immergés corrigés de la réfraction. La dispersion de

points	erreur		nombre
	moyenne	écart-type	
émergés	-0.009m	0.014m	18
immergés	0.012m	0.029m	39

TAB. 10.1 - *Qualité de la restitution de l'altitude des points sur le Gardon*

l'écart entre mesure de terrain et mesure image (précision de la mesure altimétrique) est de 2.9 centimètres sur ces points immergés (figure10.2). On constate d'une part une sur-estimation de l'altitude des points immergés et d'autre part une augmentation de la dispersion de l'écart. Cette dispersion est très probablement due à la traversée de l'interface air/eau, ce qui est cohérent avec les résultats de modélisation. Ces résultats (section 7.5) indiquent en effet que la mesure de l'altitude des points immergés par stéréorestitution à travers l'eau selon la méthode proposée contient une dispersion intrinsèque due à l'approximation réalisée (interface air/eau localement horizontale) ; cette dispersion doit être réduite, par exemple par filtrage spatial (section 8.5.2.

En conclusion de ce test, nous avons montré que la mesure de la topographie immergée de rivière est possible en conditions maîtrisées pour des vues rapprochées. En effet, avec des clichés dont le facteur d'échelle est important (pixels au sol très fins) des bandes d'images dont la géométrie est homogène, et des conditions expérimentales "idéales" (turbidité, surface de l'eau), la qualité de la mesure (biais de 1.2 centimètres, dispersion de 2.9 centimètres) est très supérieure à la qualité requise en entrée de certaines modèles thématiques, notamment les modèles habitats-poisson s'appuyant sur le calcul d'hydrosignatures de la rivière selon - entre autres - des classes de profondeur de 20 centimètres.

10.2 Acquisition des images pour l'application de la méthode en conditions opérationnelles sur la Durance

Cette section constitue un retour d'expérience et évalue la qualité du jeu de données acquis selon le protocole développé en 6.2. La comparaison des jeux de données acquis en 2004 et en 2005 selon des protocoles différents permet en effet l'évaluation de l'apport constitué par l'utilisation de ce protocole. De plus, les critères du choix de la bande d'images utilisée pour l'application de la méthode sont détaillés point à point dans les

sections suivantes.

10.2.1 Conditions expérimentales et mise en oeuvre opérationnelle

La campagne de terrain a eu lieu en mai-juin 2005. Un vol d'acquisition était prévu sur l'ensemble des stations à la suite de ces campagnes terrain. Des orages précoces, ainsi que des mauvaises conditions météorologiques en juillet ont conduit à des multiples reports de l'acquisition [Murphy, 1949]. Finalement, du fait de la forte probabilité de survenue de crues morphogènes à l'automne, il a été décidé que l'acquisition ne pouvait être retardée au delà de fin septembre. Le débit de la rivière n'ayant pas dépassé le seuil de mobilisation, il est raisonnable de considérer que la topographie du lit n'a pas bougé de manière significative.

Ces conditions expérimentales ont permis de tester de manière opérationnelle la flexibilité de la méthode et de vérifier concrètement la réactivité rendue possible par l'utilisation de moyens légers, notamment la décision et la réalisation d'acquisitions dès la constatation de conditions favorables. La décision et la finalisation du plan de vol ont eut lieu le 28 septembre 2005, et le vol a pu avoir lieu le lendemain 29 septembre.

La turbidité résiduelle constatée le jour de l'acquisition sur ces deux stations se caractérise par le fait que le fond est difficilement visible dans les zones supérieures à un mètre (figure 10.3). De plus, la rivière, déjà colmatée par des dépôts de limons antérieurs (voir données issues mesures de mai/juin 2005, présentées dans la section 9.3.3), a encore reçu le dépôt des matières mises en suspension après les orages. En conséquence, du fait des conditions expérimentales (turbidité, fond colmaté par endroits), la méthode n'est applicable que sur une partie de la zone d'étude.

10.2.2 Résolution au sol des images - B/Z - précision théorique en Z

Le tableau 10.2 présente la résolutions au sol moyenne des 6 images et le B/Z moyen des 5 couples acquis sur D0 en 2005. La connaissance de la résolution au sol (facteur d'échelle) ainsi que des rapports base sur éloignement B/Z permet de calculer la

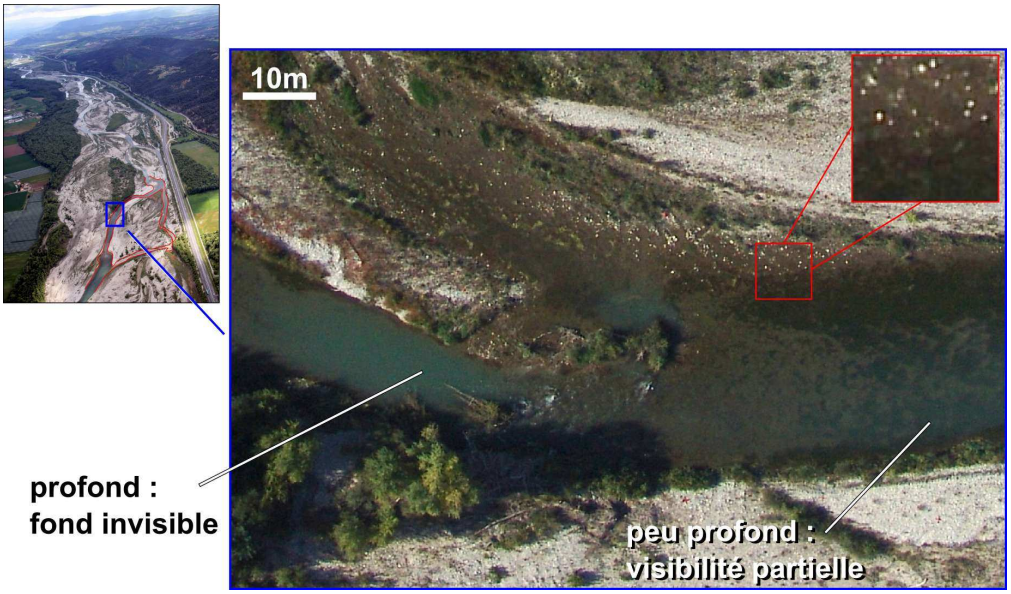


FIG. 10.3 - *Extrait d'une image du jeu de données présentant des conditions de visibilité du fond variées sur le chenal gauche de D0. On peut comparer les zones relativement homogènes où le fond de la rivière est colmaté (partie centrale de l'image) avec les zones où la présence de végétation immergée procure de la texture (partie droite de l'image)*

Valeurs moyennes sur l'axe 2 de D0		
pixel sol	B/Z	précision en Z
0.08 m	0.47	0.04 m

TAB. 10.2 - *Résolution au sol, B/Z, et précision altimétrique théorique (valeurs moyennes)*

précision altimétrique théorique de la stéréorestitution (voir équation dans la section 5.4, avec l'hypothèse d'une précision d'appariement dans les images au quart de pixel).

La précision altimétrique *théorique maximale* de la stéréorestitution pour cette mission est de l'ordre de 4 centimètres. Cette valeur théorique - valable dans le cas de prises de vues verticales pour lesquelles il n'y a pas d'incertitude sur la focale ni sur les paramètres d'orientation - de la précision ne prend en effet en compte ni la dispersion de la mesure due à la rugosité du miroir ni la dispersion de la mesure due à l'appariement des points.

10.3 Calcul de la géométrie de prise de vue

On présente dans cette section les résultats de l'estimation des paramètres d'orientation interne et externe. On ne dispose pour aucun de ces paramètres de données de validation indépendantes. On effectuera cependant pour les paramètres d'orientation externe une comparaison relative des résultats obtenus par différents calculs ou différentes méthodes.

10.3.1 Étalonnage de l'appareil (orientation interne)

On cherche à estimer la position du point principal, la focale, ainsi que la distorsion - par un modèle radial. Quatre couples stéréoscopiques ont été acquis sur le polygone de l'ENSG à Marne-La-Vallée le 4 février 2005. Ce polygone est constitué de 46 mires, situées dans 3 plans verticaux, dont la position est connue avec une très bonne précision et exactitude (voir détails dans la section 5.2.1 et dans l'annexe E). Les quatre stéréomodèles formés à partir de ces couples ont fourni un total de 330 points de mesure monoscopique.

La première étape d'ajustement des paramètres d'orientation interne sans modèle de distorsion conduit à une erreur quadratique moyenne ou RMSE (Root Mean Square Error) de 5 pixels (figure E.2 en annexe). La seconde étape vise à ajuster le modèle de distorsion radiale en fonction des résidus. L'écart quadratique moyen des modèles stéréoscopiques une fois le modèle de distorsion radiale pris en compte est réduit à 0.23 pixels (figure E.3 en annexe). Le résultat global de l'étalonnage est résumé dans le tableau 10.3. On représente la distorsion, qui atteint près de 100 pixels en bord de

champ, sur la figure 10.4.

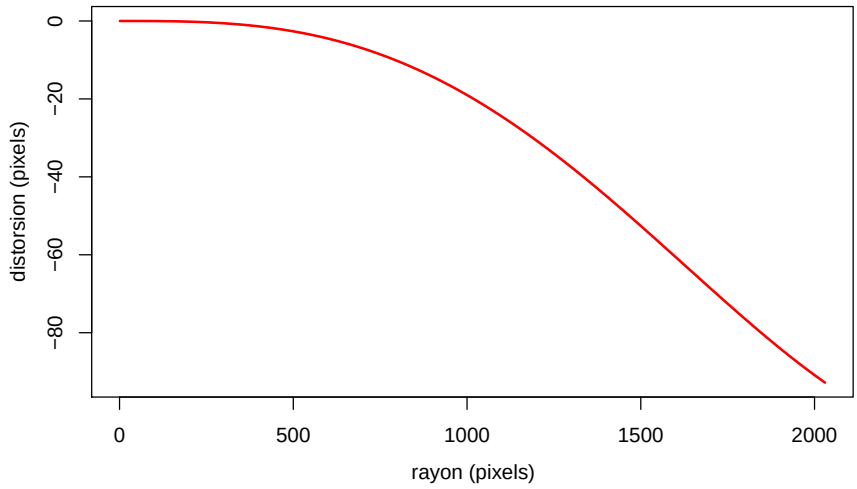


FIG. 10.4 - *Résultat d'étalonnage : distorsion radiale de l'objectif*

Nombre de mesures	330
RMSE avant	5 pixels
RMSE après	0.23 pixel
point principal	(1616.2 ; 1205.9)
focale (pixels)	2729.0
centre de symétrie	(1616.7 ; 1226.6)
$r^3/r^5/r^7$ (voir p.75)	$-2.2 \cdot 10^{-8}/3.1 \cdot 10^{-15}/-1.1 \cdot 10^{-22}$

TAB. 10.3 - *Résultats de l'étalonnage*

Il semble d'après la forme des résidus (figure E.3 en annexe) qu'il subsiste des erreurs systématiques après correction. Le modèle utilisé ne prend en effet compte que les distorsions radiales. Il n'inclut pas d'autres types de distorsion, comme les distorsions tangentielles [Brown, 1966]. Le modèle radial permet cependant de corriger la majeure partie de la distorsion. On gagne en effet plusieurs ordres de grandeur, en diminuant l'écart quadratique moyen d'un facteur 20.

On s'intéresse ensuite aux résultats de l'orientation externe sur la bande couvrant le bras gauche de D0. Celle-ci a été réalisée avec deux logiciels utilisant des méthodes différentes. Pour chacun de ces logiciels, Leica et Poivilliers E, on a utilisé les données d'étalonnage obtenues ci-dessus (tableau 10.3).

10.3.2 Orientation externe réalisée avec le Poivilliers E

Pour un couple donné, il est possible de calculer la différence entre les coordonnées des points de contrôle mesurées sur le terrain et ces mêmes coordonnées *compensées* - c'est à dire calculées à partir des coordonnées images par le modèle ajusté. La distribution statistique de ces écarts est représentée par les boîtes à moustache à gauche de la figure 10.5(a). Les écarts types (notés σ_{dX}, σ_{dY}, σ_{dZ}) et les valeurs moyennes (notées dX_{moy}, dY_{moy}, dZ_{moy}) des écarts pour chaque couple figurent dans le tableau 10.5(b).

L'erreur moyenne commise sur les coordonnées des points de contrôle par les modèles ajustés (moyenne des résidus) est toujours inférieure au quinzième de pixel. À l'exception des résidus en altimétrie pour le couple 9192, les écarts types des résidus sont inférieurs au pixel en X, en Y et en Z .

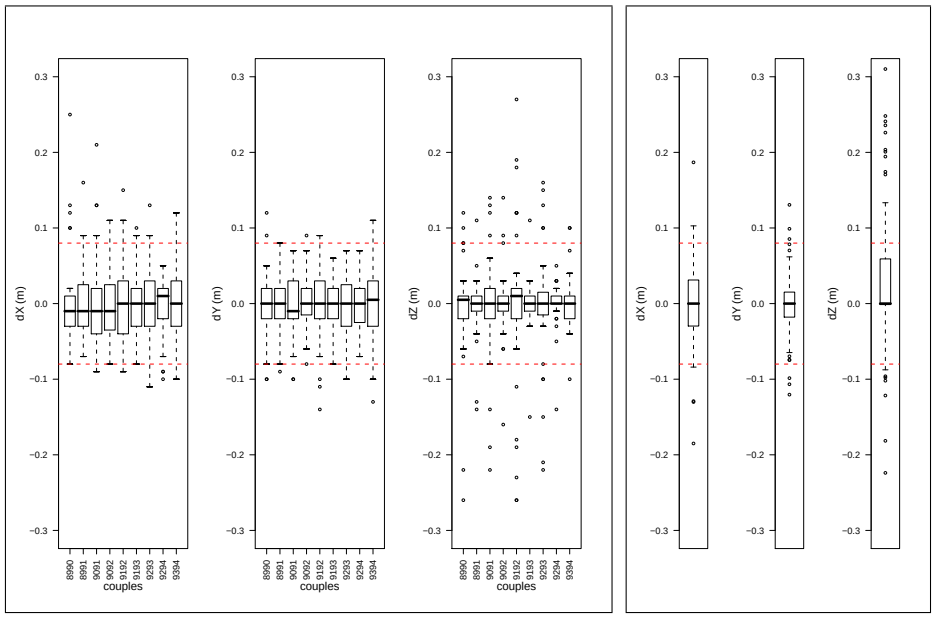
10.3.3 Résultats de la compensation par faisceaux avec autocalibration

Le calcul des paramètres d'orientation externe du bloc a été réalisé avec le logiciel LPS de Leica. Le nombre de points de contrôle au sol étant relativement élevé (35 mires par image environ - tableau 9.4), il a été possible d'utiliser des modèles avec un grand nombre de paramètres. Les paramètres d'orientation interne (longueur focale, position du point principal, distorsion radiale) ont été renseignés en s'appuyant sur les résultats d'étalonnage et selon la méthode présentée en annexe (E.2).

Les quatre modèles avec paramètres additionnels implémentés par Leica ont été testés. Il s'agit de modèles adaptés selon Bauer, Jacobsen, Ebner, et Brown, qui possèdent respectivement 3, 4, 12, et 14 paramètres [Leica, 2003, p. 347-348]. La qualité d'ajustement du bloc est donnée par la RMSE en unités image. Les valeurs de RSME pour chaque modèle sont rassemblées dans le tableau 10.4.

Modèle	sans	Bauer(3)	Jacobsen(4)	Ebner(12)	Brown(14)
RMSE (pixels)	0.92	0.68	0.67	0.75	0.53

TAB. 10.4 - *RMSE de la compensation en bloc par faisceaux pour les différents modèles à paramètres additionnels utilisés*



(a) Distribution statistique des résidus sur les points de contrôle au sol. La distribution est représentée pour chaque couple pour l'estimation réalisée par Poivilliers E (à gauche) et pour le bloc global pour Leica (à droite) - les pointillés sont placés à ±1 pixel

couple	n	valeurs moyennes et écarts types en mètres					
		dX_{moy}	σ_{dX}	dY_{moy}	σ_{dY}	dZ_{moy}	σ_{dZ}
8990	34	0.0035	0.066	-0.0053	0.046	-0.0050	0.073
8991	48	0.0004	0.042	-0.0044	0.034	-0.0023	0.037
9091	41	0.0027	0.062	-0.0010	0.041	-0.0027	0.068
9092	52	-0.0021	0.044	0.0008	0.032	-0.0006	0.039
9192	45	0.0009	0.050	0.0020	0.047	-0.0036	0.104
9193	51	-0.0014	0.034	0.0008	0.030	0.0002	0.030
9293	39	0.0028	0.048	0.0003	0.044	-0.0031	0.079
9294	43	-0.0028	0.038	-0.0014	0.032	-0.0014	0.027
9394	30	0.0000	0.047	-0.0030	0.052	0.0013	0.040
ensemble	383	0.0005	0.048	-0.0013	0.039	-0.0019	0.059

(b) Poivilliers E : nombre de points utilisés pour le calcul, médianes et écarts-types des résidus en X, Y et Z

n	valeurs moyennes et écarts types en mètres					
	dX_{moy}	σ_{dX}	dY_{moy}	σ_{dY}	dZ_{moy}	σ_{dZ}
227	-0.0004	0.057	-0.0009	0.045	0.0260	0.111

(c) Leica : nombre de points utilisés pour le calcul, médianes et écarts-types des résidus en X, Y et Z

FIG. 10.5 - *Résidus sur les points de contrôle au sol (différence entre coordonnées terrain réelles et compensées)*

On constate que dans notre cas, le modèle d'Ebner, bien qu'ayant un grand nombre de paramètres, améliore moins la RMSE que les modèles de Bauer ou de Jacobsen à 3 et 4 paramètres. Ceci peut correspondre au fait que ce modèle physique utilisé ne correspond pas à la caméra utilisée. On utilisera donc le modèle avec paramètres additionnels de Brown, qui diminue de moitié l'écart quadratique moyen du modèle du bloc.

On évalue la qualité interne de cette compensation par bloc avec autocalibration en examinant les résidus du modèle sur les points de contrôle au sol. La distribution statistique des résidus sur X, Y et Z obtenus avec le modèle de Brown est représentée sur la figure 10.5(a). On peut observer que le modèle physique à 14 paramètres de D.C. Brown a permis de réduire très fortement les erreurs systématiques (moyenne des résidus). On a de plus fait figurer les biais résiduels ainsi que les écarts types des erreurs sur ces trois paramètres dans le tableau (c) de la même figure.

10.3.4 Comparaison relative des résultats : stabilité des calculs

La validation absolue des paramètres estimés est impossible par manque de valeurs observées au moment du vol. On peut cependant s'essayer à une comparaison relative des résultats obtenus par les différents calculs des deux logiciels Leica et Poivilliers E. Ceci peut donner une idée (i) des qualités relatives des modèles des deux logiciels ; (ii) de la stabilité de ces modèles.

On compare tout d'abord les écarts-types σ_{dX}, σ_{dY} et σ_{dZ} des résidus sur les points de contrôle au sol[1] des modèles ajustés par Leica et Poivilliers E. Les valeurs figurent dans les tableaux de la figure 10.5. On constate que si les écarts-types des résidus des modèles sont comparables en planimétrie, ils sont significativement[2] différents en altimétrie, en faveur du modèle utilisé par Poivilliers E.

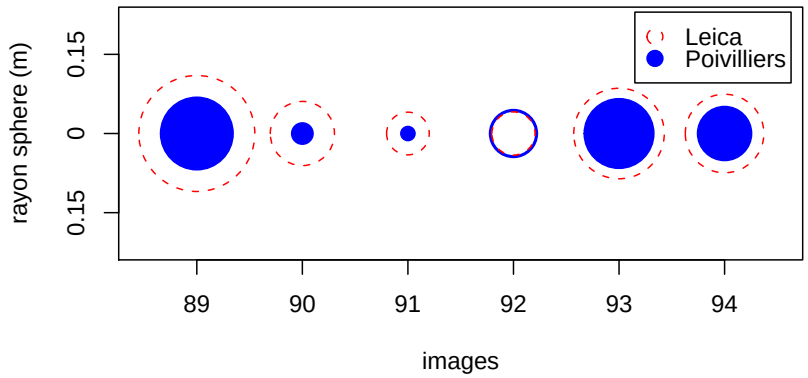
Une autre comparaison qualitative peut être réalisée en examinant les valeurs estimées des paramètres ayant un sens physique, comme la position des centres optiques des caméras.

On dispose en effet pour chaque image et chaque logiciel de plusieurs estimations de

[1] différence entre position réelle et position modélisée des points de contrôle
[2] p-value du test de Fisher d'égalité des variances : 1.301e-15

la position du centre optique. Pour Leica, on a plusieurs estimations obtenues avec des modèles distincts, utilisant des paramètres additionnels différents. Pour le Poivilliers E, chaque image participant à plusieurs couples, on a là aussi plusieurs estimations de la position des centres optiques.

On calcule pour chaque image et pour chaque logiciel le rayon de la sphère contenant l'ensemble des positions estimées. Ces résultats sont représentés sur la figure 10.6(a).



(a) Rayons des sphères contenant les différentes estimations des positions des centres optiques par Poivilliers E et Leica

image	n° 89	n° 90	n° 91	n° 92	n° 93	n° 94	$\bar{x}$
Leica	0.11	0.06	0.04	0.04	0.09	0.07	0.07
Poivilliers	0.07	0.02	0.01	0.05	0.07	0.05	0.04

(b) Valeurs numériques

FIG. 10.6 - *Comparaison de la stabilité des estimations des positions des centres optiques par les deux logiciels*

Les modèles utlisés par le Poivilliers E sont en moyenne légèrement plus stables, même si la différence est peu significative[3].

[3]p-value du test de Student d'égalité des moyennes : 0.1223

10.4 Restitution de la position "apparente" des points immergés

La stéréorestitution a été effectuée avec deux logiciels, encore une fois LPS de Leica et Poivilliers E.

Pour la corrélation automatique réalisée par LPS, au vu du faible relief (rivière à faible pente, profondeur maximum sur la section de 1.56 mètres) et de la configuration du terrain, c'est une stratégie de corrélation pour milieu ouvert et terrain plat qui a été choisie. La fenêtre de corrélation est un carré de 13 pixels de côté et la recherche de points homologues est effectuée dans une fenêtre de 21 pixels par 3 pixels[4], avec un seuil de corrélation à 0.60 [Leica, 2003]. Le résultat de la restitution est un nuage de points non filtrés.

Avec Poivilliers E, la corrélation a été calculée dans une fenêtre de même taille (13 par 13 pixels), avec un seuil de corrélation minimal de 0.60. Lors de la stéréorestitution, le ballonnet est positionné à proximité de la surface plastique (impression formée par effet stéréoscopique), afin de s'assurer que la fenêtre de recherche (déterminée par un nombre de pas altimétriques) contienne cette surface.

10.4.1 Nombre de points - densité de mesure

Les deux méthodes utilisées ont permis d'obtenir chacune plus de 20 000 points de mesure du relief immergé apparent, ce qui fait une densité moyenne de 1 point par mètre carré (tableau 10.5).

Méthode	points (nombre)	densité (pts/m^2)	
		moyenne	max.
automatique (Leica)	20 930	0.9	28.8
supervisée (Poivilliers)	21 710	1	28.6

TAB. 10.5 - *Nombre de points et densité moyenne pour les deux méthodes de corrélation utilisées*

[4] s'il s'agit de géométrie épipolaire, cela correspond à 3 pixels de parallaxe transverse et 21 pixels de parallaxe horizontale

Cependant le nombre de points et la densité de mesure obtenus par les deux méthodes ne sont pas directement comparables en tout point de l'espace, car dans le cas de la corrélation supervisée par vision stéréoscopique, le nombre de points dépend de l'effort de l'opérateur (en terme de temps passé). Il faut donc effectuer une comparaison relative des densités en examinant leur répartition spatiale (figure 10.7).

En premier lieu, on constate une forte variabilité spatiale de la densité : il existe des zones de très forte densité ainsi que des zones pour lesquelles aucune des deux méthodes utilisées n'a fourni de points de mesure. Ces dernières sont des zones pour lesquelles la profondeur et/ou la rugosité relative des vagues sont importantes. En effet, pour les zones de profondeur supérieure à un mètre, dans les conditions de turbidité du jour de l'acquisition, le fond n'est plus visible. Pour les zones au niveau desquelles la rugosité relative de surface est importante, la mesure n'est pas possible pour les raisons résumées dans la section 7.6.3.

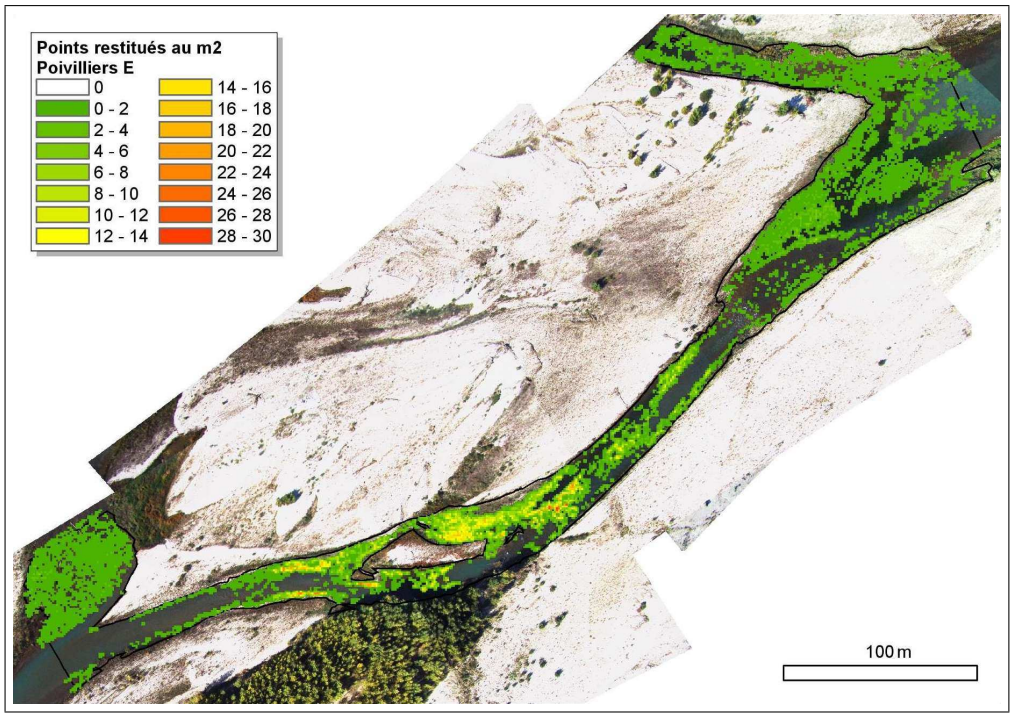
Ensuite, on constate une forte densité de points en bordure de rive, et de manière générale dans les zones peu profondes (zone à l'amont de l'île au centre de la carte), ainsi que dans les zones comportant des massifs algaux.

Il y a enfin des zones pour lesquelles la corrélation automatique a échoué mais où la stéréorestitution supervisée a permis d'obtenir des mesures. La densité de mesure dans ces zones est fortement dépendante de la méthode de corrélation. Les succès de corrélation dans ces zones pour la méthode avec supervision de l'opérateur peut s'expliquer par le fait que le ballonnet est positionné par l'opérateur près d'un maximum local de corrélation. Dans le cas d'une corrélation automatique effectuée sur une zone peu texturée, on ne dispose pas de cette initialisation et la recherche du maximum local peut échouer si les variations du coefficient de corrélation sont trop faibles.

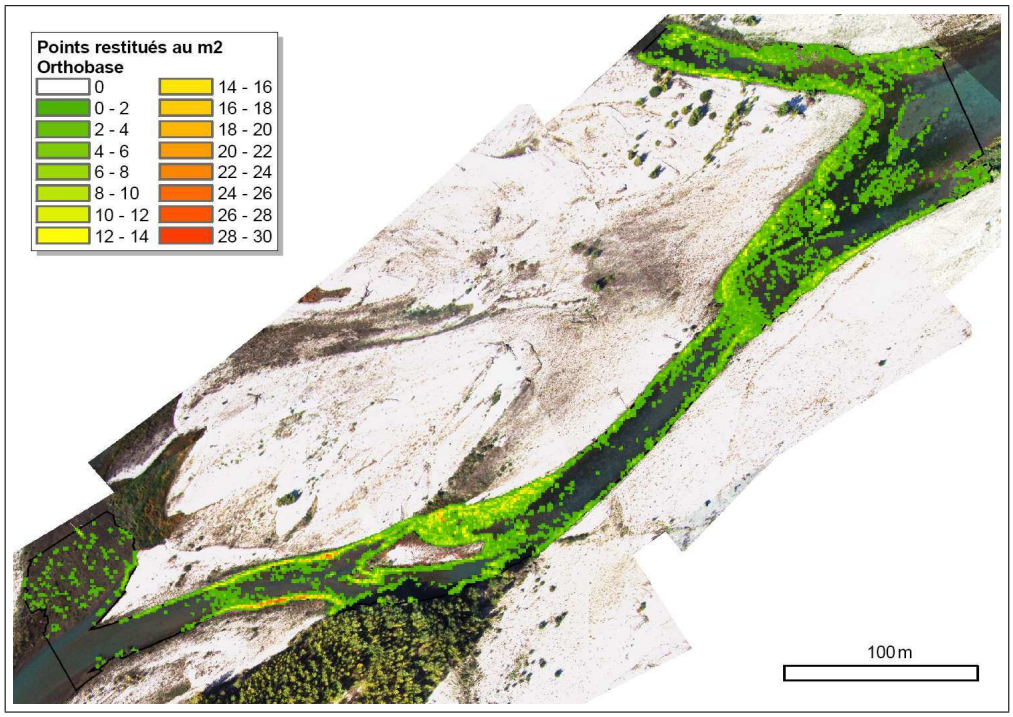
10.4.2 Faisabilité - échantillonnage spatial

On part de l'hypothèse simplificatrice[5] selon laquelle la faisabilité de la mesure par stéréorestitution à travers l'eau dépend essentiellement des paramètres physiques de la rivière (turbidité, et donc profondeur - vagues). On détermine donc des classes (hauteur ; vitesse) en se basant sur les données de terrain. On calcule ensuite dans cet espace (hauteur ; vitesse) la distribution des points (i) mesurés sur le terrain ; (ii) restitués avec Poivilliers E et (iii) restitués avec Leica.

[5] l'absence de contrastes locaux peut en effet conduire à un échec de la stéréorestitution



(a)



(b)

FIG. 10.7 - *Densité de points de mesure au mètre carré : (a) avec Poivilliers E ; (b) avec Orthobase ;*

L'étude de ces distributions (figure 10.8) permet de mettre en valeur l'échantillonnage spatial des mesures en fonction des paramètres physiques de la rivière. En d'autres termes, on analyse la faisabilité de la mesure en fonction de ces zones à contexte physique variable.

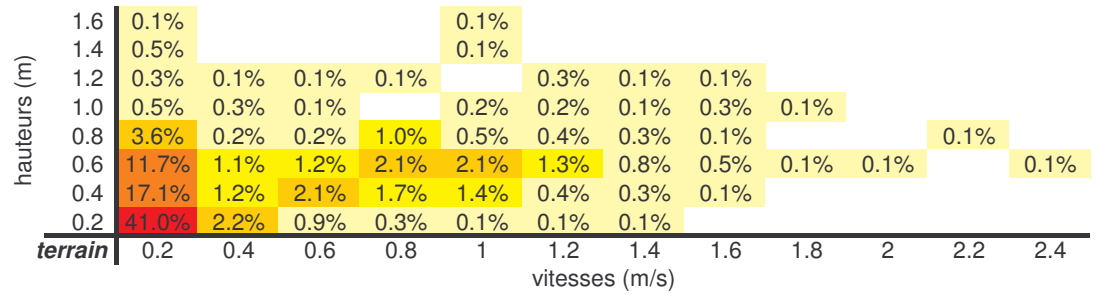
On retrouve d'une part les limites physiques de la méthode, avec un quasi-absence de points restitués pour les profondeurs supérieures à 1 mètre et les vitesses supérieures à 1.60 mètres par seconde. D'autre part, on constate que la plupart (plus de 80%) des points restitués par corrélation automatique sont situés dans les zones de très faible profondeur et vitesse (profondeur inférieure à 20 centimètres et vitesse inférieure à 20 centimètres par seconde). Ce chiffre est à comparer avec la distribution réelle : cette classe regroupe seulement 41% des points.

La connaissance de la distribution des points restitués selon ces paramètres physiques permet une lecture nouvelle des chiffres de densité moyenne présentés dans le tableau 10.5. Si les *valeurs moyennes* des densités de points obtenus par les deux méthodes sont semblables, ce n'est pas le cas de leur échantillonage spatial. Dans le domaine de faisabilité de la stéréorestitution, la densité de points obtenus par corrélation automatique est très forte pour les faibles vitesses et profondeurs et décroît rapidement pour les plus fortes valeurs de ces deux paramètres. Dans le domaine de faisabilité de la stéréorestitution toujours, la corrélation supervisée semble fournir un échantillonage spatial plus homogène et le chiffre moyen de 1 point par mètre carré semble représentatif.

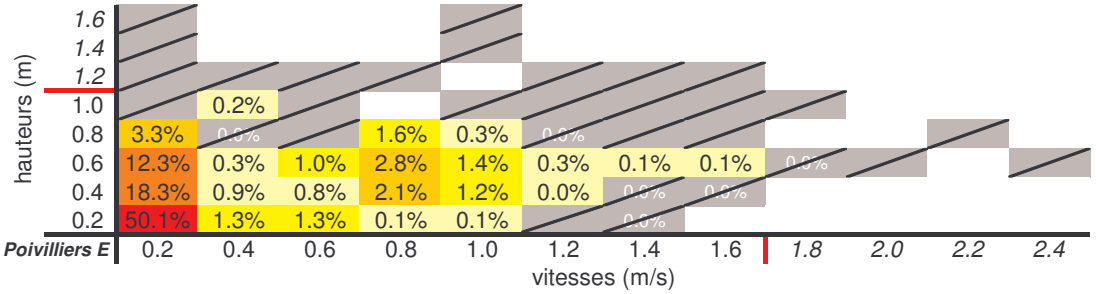
10.5 Calcul de la position de l'interface air/eau par mise en cohérence hydraulique des altitudes de ligne de rive

Le calcul de la position de l'interface air/eau (miroir) est effectué en 3 étapes : (i) restitution "brute" des altitudes des lignes de rives ; (ii) amélioration de la précision de cette mesure et élimination des mesures aberrantes par mise en cohérence intégrant des contraintes hydrauliques ; (iii) interpolation des altitudes entre les lignes de rive.

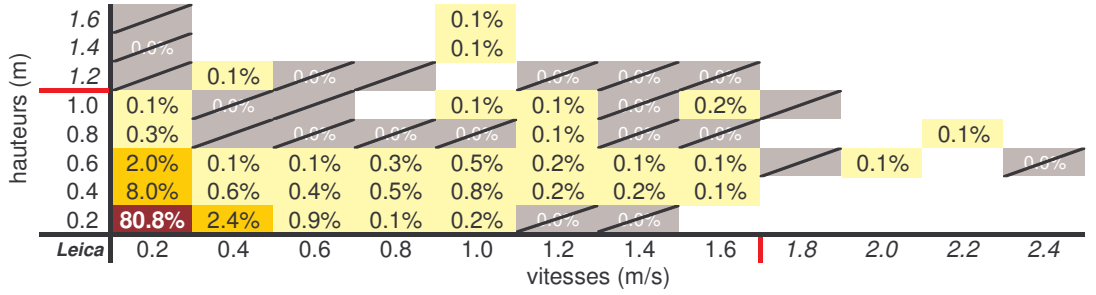
La mesure des altitudes des lignes de rive issue de la première étape est très bruitée. En effet, en plus de l'imprécision intrinsèque à la stéréorestitution (dispersion de l'ordre de 4 centimètres), une imprécision supplémentaire provient de la difficulté d'identifica-



(a) Observations de terrain



(b) Points restitués avec Poivilliers E



(c) Points restitués avec Leica

FIG. 10.8 - *Distribution des points restitués dans le plan (hauteur ; vitesse) (a) Distribution des points terrain de la section de la rivière couverte par la zone stéréo. (b) distribution des points restitués par Poivilliers E. (c) distribution des points restitués par Leica LPS/Orthobase. Cases barrées : classes qui sont représentées dans la rivière dans la zone stéréo mais pour lesquelles il y a moins de 0.1% de points restitués*

tion de la ligne de rive. De plus, la possibilité de mesures aberrantes n'est pas exclue dans les zones à faible contraste.

Afin d'améliorer la précision de la mesure des altitudes de bordure de lit mouillé, on utilise l'algorithme présenté dans la section 8.3 qui intègre des contraintes hydrauliques. La mise en cohérence hydraulique - correspondant à une nouvelle estimation des altitudes des points de rives telles que leur succession amont-aval soit en conformité avec les lois de l'hydraulique - a été effectuée pour les points restitués sur les rives (chenal gauche de D0). Ce chenal comporte une petite île (dont on voit l'extrémité amont sur la figure 10.3). On a aussi effectué un calcul de mise en cohérence hydraulique pour les points situés sur les rives de cette île. On calcule finalement l'altitude du miroir en tout point par interpolation linéaire des altitudes de lignes de rives mises en cohérence (figure 10.9).

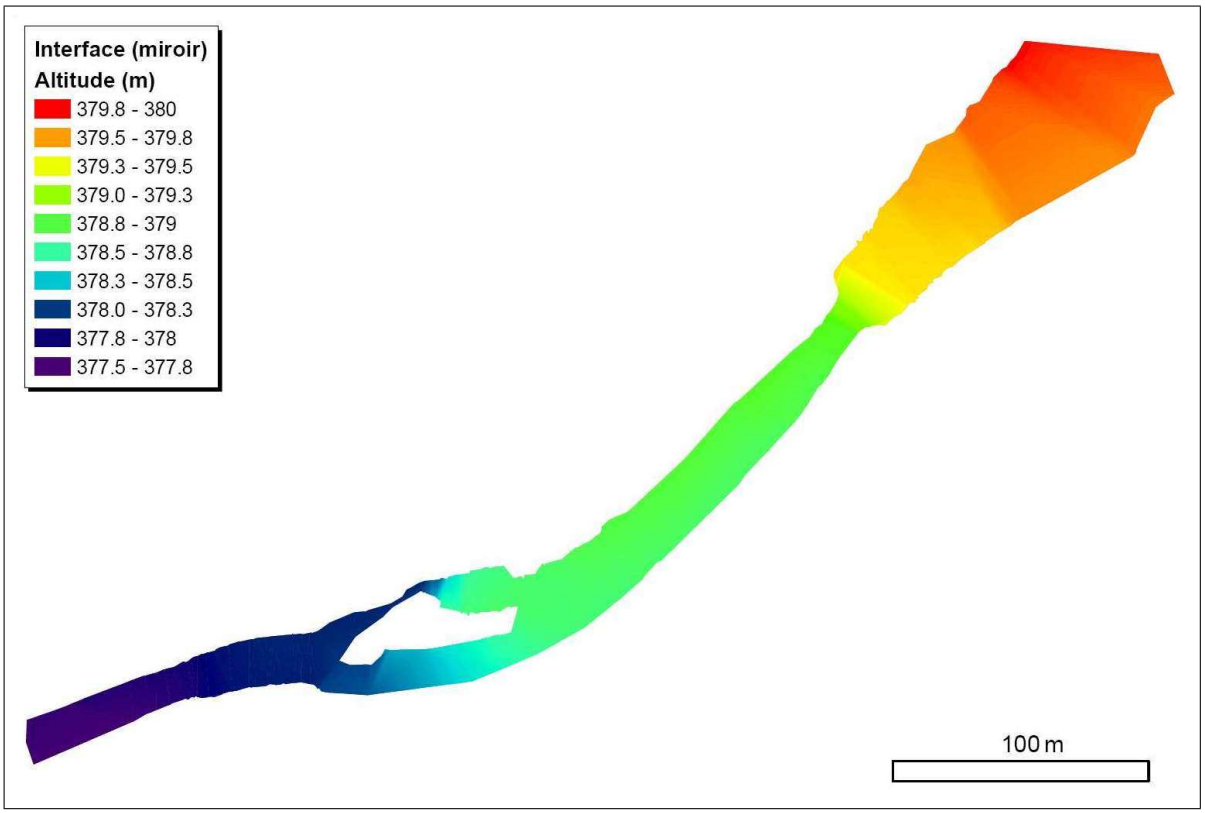


FIG. 10.9 - *Résultat de l'estimation des altitudes de l'interface air/eau (miroir) sur l'axe 2 de D0 en 2005 (bras gauche)*

La précision théorique de la stéréorestitution étant de 4 centimètres sur ce bras (section 10.2.2), les majorants et minorants locaux sont situés à plus ou moins 12 centimètres de la mesure image brute (intervalle de confiance à 99% de la mesure). La

mise en cohérence a permis d'améliorer la précision de la mesure en Z en réduisant la largeur de cet intervalle (tableau 10.6).

rive	nombre de points		demi-largeur (m)	
	total	"points faux"	avant	après
droite	330	37 (11.2%)	0.12	0.03
gauche	293	53 (18.1%)	0.12	0.04
droite de l'île	61	4 (6.6%)	0.12	0.04
gauche de l'île	64	21 (32%)	0.12	0.06

TAB. 10.6 - *Résultats de la mise en cohérence*

L'intervalle est diminué d'un facteur 2, voire d'un facteur 4 dans le cas des rives gauches et droite du chenal qui comportent un grand nombre de points de mesure.

La précision de la mesure obtenue après mise en cohérence hydraulique est très variable (figures 10.10 et 10.11).

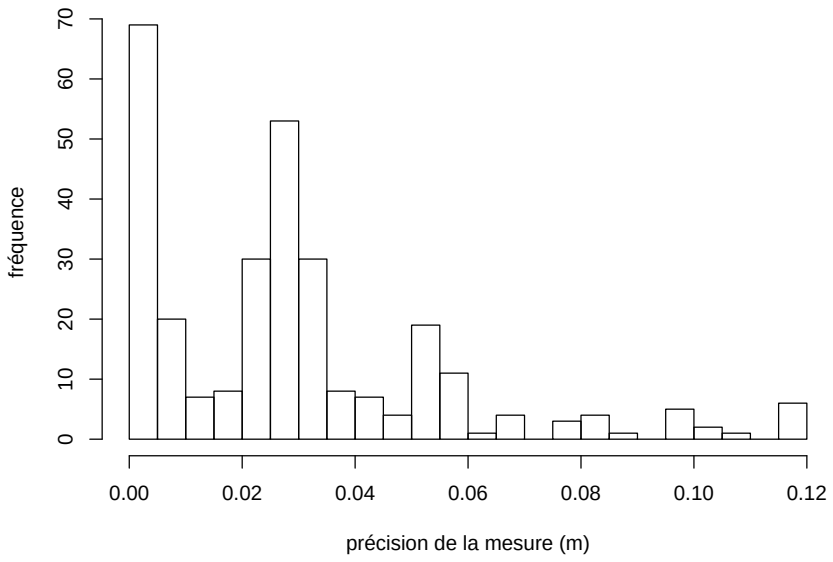


FIG. 10.10 - *Distribution des précisions de la mesure de l'altitude des points de rive après mise en cohérence hydraulique*

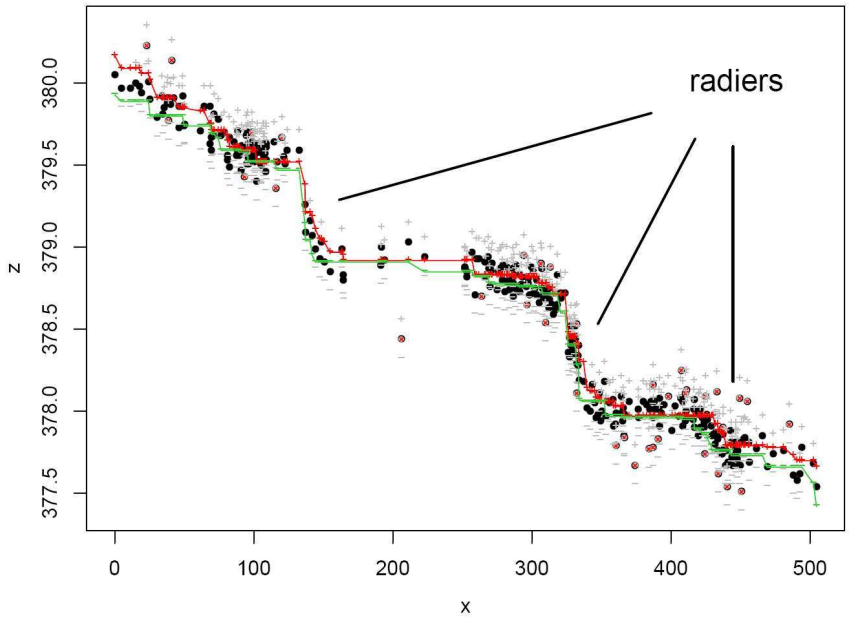


FIG. 10.11 - *Mise en cohérence des altitudes restituées de la ligne de rive droite. Les enveloppes MIN et MAX sont en traits continus. Les symboles "+" et "-" représentent les majorants et minorants locaux. Les points de mesure identifiés comme faux sont barrés par une croix* ×

D'une part, par construction, l'algorithme possède un effet de bord : les extrémités amont et aval sont soumises à des contraintes moins fortes (contraintes d'un seul côté). L'estimation de l'altitude du miroir pour ces zones sera donc moins bonne.

D'autre part, l'amélioration de la précision est d'autant meilleure que la pente est faible et que la densité de points de mesure est forte. Par exemple, les zones pour lesquelles la densité de mesures est localement relativement forte présentent un écart plus faible entre enveloppe MIN et MAX relativement aux zones voisines de pente comparable (points situés autour de l'abscisse 100 sur la figure 10.11). Pour ces zones, la précision de l'estimation de l'altitude du miroir est meilleure.

10.6 Correction de la réfraction - première estimation de la position réelle des points immergés

Les étapes précédentes de l'application de la méthode ont permis d'estimer une position "apparente" des points immergés dans le chenal gauche de D0 (axe 2 - 2005) ainsi que la position du miroir (altitudes en tout point) de ce chenal.

On utilise la modélisation de l'effet de réfraction telle qu'effectuée dans la section 7.3.1 afin d'obtenir une première estimation de la position réelle des points immergés. Avec ce modèle, la donnée de l'altitude du miroir en tout point obtenue dans la section précédente est suffisante pour effectuer la correction des positions "apparentes" des points immergés. On peut alors après cette étape effectuer une comparaison des altitudes estimées des points immergés avec les altitudes interpolées des points terrain (tableau 10.7 et figure 10.12).

	moyenne	médiane	écart-type
Erreur (m)	0.013	0.051	0.225

TAB. 10.7 - *Caractéristiques de la distribution de l'erreur d'estimation de la topographie immergée*

L'analyse de l'erreur sur les altitudes estimées permet de déterminer les caractéristiques de la mesure image brute obtenue après correction de la réfraction.

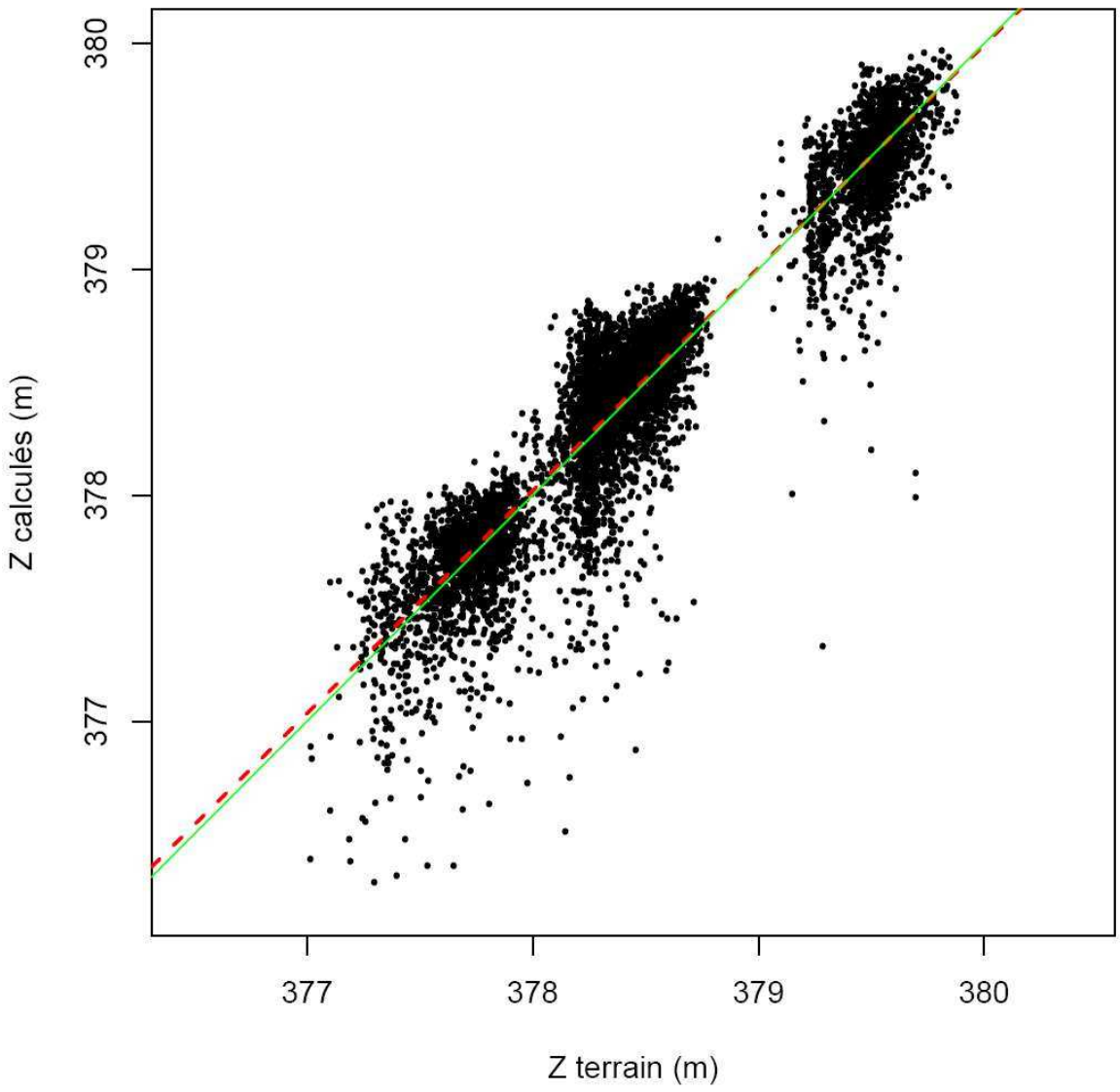


FIG. 10.12 - *Altitudes "brutes" estimées et corrigées de l'effet de la réfraction en fonction des altitudes des points immergés observées sur le terrain. La bissectrice est représentée en traits pleins, la tendance linéaire du nuage de points par la droite en traits pontillés*

D'une part, il y a une très bonne cohérence entre les altitudes estimées et les altitudes observées ($R^2 = 0.89$, p-value inférieure à 2.2×10^{-16}). L'estimation des altitudes des points du fond de la rivière présente un biais très faible (surestimation de l'altitude de 1.3 centimètres). En revanche la différence entre moyenne de l'erreur et médiane de l'erreur montre que la distribution de l'erreur n'est pas symétrique. La sur-estimation des altitudes des points immergés est donc probablement plus forte que cette valeur moyenne.

D'autre part, la dispersion moyenne de la mesure brute (écart-type de l'erreur) est de 22.5 centimètres. La restitution du relief et la correction des positions estimées par l'application sur le chenal gauche de D0 de la méthode proposée a permis d'obtenir une mesure spatialisée fiable de l'altitude des points immergés. Il subsiste cependant un bruit de mesure inhérent à la perturbation due à la présence de vaguelettes à l'interface. Ces perturbations ne sont pas prises en compte lors de la correction de la réfraction avec un modèle surface plane.

10.7 Régularisation de la surface immergée estimée et validation des résultats

La densité de la mesure de l'altitude obtenue par la méthode proposée peut être localement très forte, jusqu'à près d'une trentaine de points par mètre carré (section 10.4.1). Il est donc possible de mettre en oeuvre un filtrage spatial médian tel que proposé dans la section 8.5.2.

Dans notre cas, c'est un rayon du même ordre de grandeur que la distance moyenne latérale entre deux points terrain qui a été choisi afin de rendre la mesure "image" comparable à la mesure de terrain. On a de plus tenu compte de la densité maximum obtenue (un peu moins de 30 points par mètre carré), et de l'objectif pour la dispersion de la mesure (une dizaine de centimètres). On a ainsi effectué le filtrage dans un rayon minimum de 3.5 mètres autour du point à filtrer et sur un nombre minimal de 50 points afin de répondre à l'objectif de dispersion.

Les valeurs de l'altitude du fond ainsi estimées et filtrées présentent une bonne cohérence globale avec le jeu de données terrain (figure 10.13).

On a representé en plus du nuage de points sa tendance (graphique quantile-quantile).

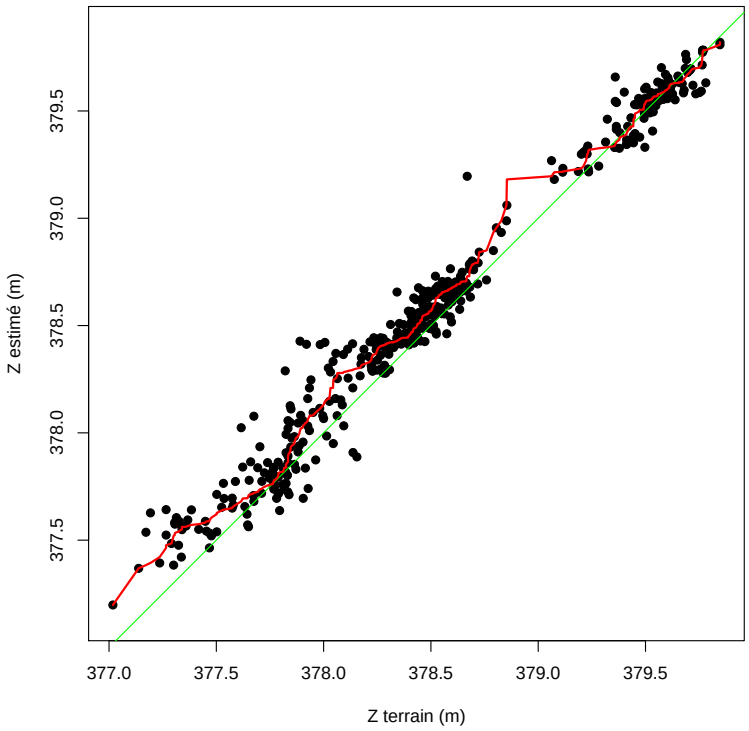


FIG. 10.13 - *Comparaison entre altitudes terrain des points immergés et altitudes estimées après filtrage spatial. La courbe quantile-quantile ainsi que la bissectrice ont été superposées au nuage de points*

On met ainsi en évidence la sur-estimation des altitudes. La moyenne de l'erreur pour les estimations filtrées est de 4.3 centimètres, avec une dispersion de 10.5 centimètres.

On présente finalement une carte des profondeurs réalisée à partir du nuage de points filtrés et interpolée (figure 10.14).

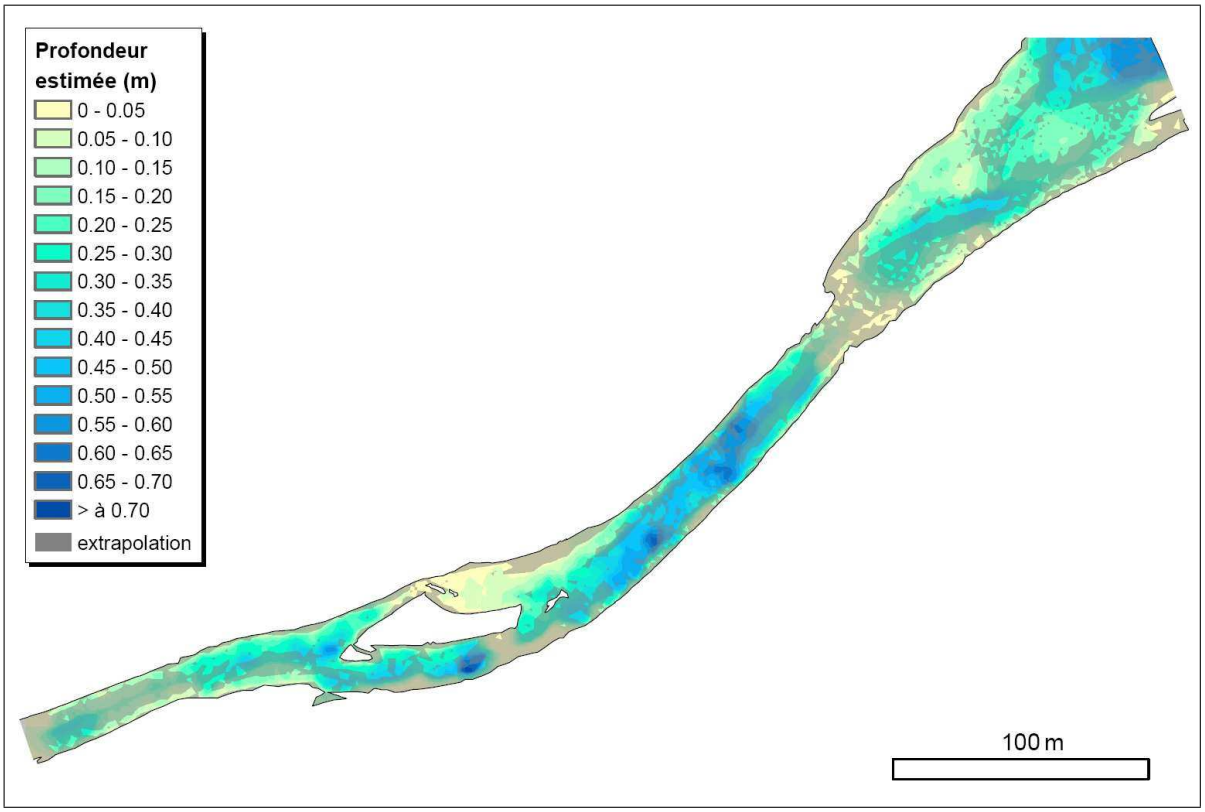


FIG. 10.14 - *Carte des profondeurs estimées par la méthode puis interpolées. Les zones grisées sont les zones pour lesquelles on n'a pas de mesure image. Leur surface représente environ 48% de la zone d'intérêt*

Il est possible d'estimer les profondeurs "terrain" en effectuant la différence entre l'altitude de la surface estimée dans la méthode et l'altitude des points observée sur le terrain. Les erreurs sur les profondeurs ont donc la même amplitude que les erreurs sur les altitudes et présentent la même dispersion (10.5 centimètres). Cette dispersion permet de répondre à l'objectif, notamment à des fins de modélisation des habitats de poissons. On peut en effet établir l'hydrosignature de la rivière avec des classes de 20 centimètres de largeur ayant un intervalle de confiance correct[6]. On représente sur la

[6] à 68% en considérant la distribution de l'erreur comme normale !

figure 10.15 la comparaison des mesures terrain et des mesures de profondeur interpolées et extrapolées (pour les zones où l'on n'a pas obtenu de mesures image).

On observe en effet un bon accord global de la carte des profondeurs avec la réalité du terrain, notamment le radier en barreau dans la partie amont, la zone de profondeur moyenne en milieu de chenal et la zone de très faible profondeur à droite de la petite île. Les zones de forte profondeur ou comportant des vagues ne sont pas cartographiées et sont donc extrapolées. Il semble de plus possible de détecter les signatures d'éléments particuliers du fond de la rivière, comme la signature probable d'un massif algal épais au milieu de la partie amont du radier en barreau. La carte des erreurs et la discussion correspondante figurent dans la section 11.1.

10.8 Conclusion

Réalisée en conditions opérationnelles sur la Durance, l'application de la méthode de stéréorestitution à travers l'eau avec intégration de contraintes hydrauliques a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tout d'abord, la mise en place d'un protocole d'acquisition (plan de vol + terrain) adapté aux moyens technologiques légers a permis de se rapprocher des conditions habituellement rencontrées pour des missions photogrammétriques opérationnelles classiques.

La couverture globale de la zone d'intérêt en stéréo est passée de moins de 70% à environ 95% ; l'homogénéité des missions - mesurée par la dispersion des paramètres de prise de vue - a été significativement améliorée, permettant ainsi d'obtenir des bandes d'images pour lesquelles les variations du facteur d'échelle sont inférieures à 5% et les angles à la verticale inférieurs à 5 ° (deux dernières mission). On s'est de plus adapté aux contraintes spécifiques du milieu "rivière" : la présence d'eau sur une surface importante de l'image et donc de "zones interdites" pour les mires.

Ensuite, plusieurs méthodes "classiques" de la photogrammétrie ont été mises en place afin de déterminer la géométrie d'acquisition. On a notamment effectué l'étalonnage du capteur "grand public" utilisé, ce qui a permis de réduire d'un facteur 20 l'erreur d'ajustement des modèles de calcul de la géométrie de prise de vue. La géométrie externe a été calculée avec des résidus sur les points de contrôle au sol inférieurs au pixel.

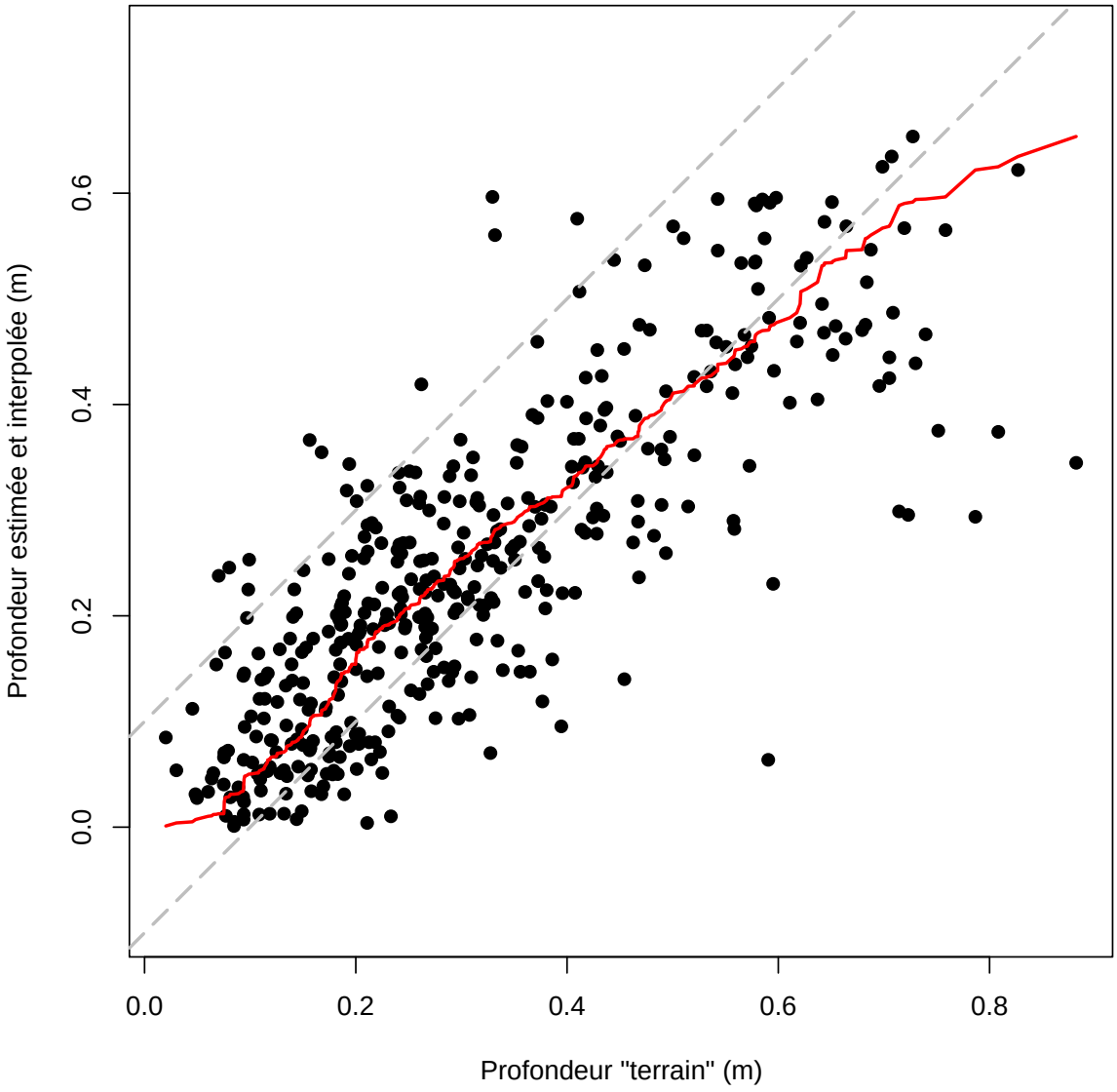


FIG. 10.15 - *Comparaison entre profondeurs "terrain" et profondeurs estimées et interpolées. La courbe quantile-quantile superposée a été calculée à partir des valeurs situées dans la zone où l'on dispose de mesures image. Les droites en traits pointillés sont positionnées à plus et moins 10 centimètres de la bissectrice*

La stéréorestitution, réalisée selon deux techniques implémentées par deux logiciels différents, a montré d'une part la faisabilité de la mesure par stéréophotogrammétrie à travers l'eau - dans les zones où le fond de la rivière est visible, les densités de mesure obtenues varient entre 1 et 30 points par mètre carré pour un pixel au sol d'environ 8 centimètres - et d'autre part les limites de certains algorithmes de corrélation automatique. Ces derniers présentent en effet un fort taux d'échec : moins de 25 000 points ont été corrélés dans une zone comprenant plus de 150 millions de pixels (près d'1.5 hectare couverts par des pixels de moins de 10 centimètres).

Enfin, une mise en cohérence hydraulique des altitudes des lignes de rives restituées a été effectuée, permettant ainsi d'améliorer la précision altimétrique de la position de l'interface air/eau (miroir) d'un facteur 2 à 4. On a de plus lors de ce traitement éliminé les mesures aberrantes (correspondant à la restitution de végétation rivulaire où à des fausses corrélations) et ainsi diminué les sources de biais sur la mesure.

Une fois estimés les paramètres d'acquisition et la position de la surface, on a pu obtenir une valeur de la topographie immergée d'après les mesures "apparentes" en corrigeant couple par couple l'effet de la réfraction. La comparaison des altitudes de points immergés estimées avec les données de validation "terrain" a montré que le biais de mesure est de l'ordre de quelques centimètres, avec une dispersion de l'ordre de la vingtaine de centimètres.

On a finalement utilisé un filtrage spatial afin d'obtenir un modèle numérique de la partie immergée de la rivière exploitable à des fins thématiques (modèles hydrauliques et/ou hydroécologiques). La dispersion de la mesure, d'une dizaine de centimètres, rend en effet envisageable l'utilisation des données de topographie immergée pour la détermination de classes de profondeur d'une vingtaine de centimètres de large. Il s'agit de l'ordre de grandeur de la largeur des classes utilisées pour le calcul d'hydrosignature et les modèles habitat/poisson.

Chapitre 11

Discussion

11.1 Potentiel de la méthode

11.1.1 Retour d'expérience

Le test effectué en conditions "idéales" sur le Gardon d'Anduze a démontré la possibilité d'obtenir une mesure spatiale du relief immergé de rivière avec une grande densité et une bonne précision. Les conditions de ce test correspondent à une turbidité négligeable, une interface air/eau assimilable à un plan sur la zone (un miroir), et une résolution spatiale très fine. Les conditions de prise de vue ont pu être maitrisées en effectuant les acquisitions depuis une plateforme fixe.

La mise en oeuvre opérationnelle de la méthode en conditions réelles à montré la nécessité de développer un protocole de mesure spécifique au milieu "rivière" et aux technologies utilisées (plateformes ultra-légères et capteurs petit format). Nous avons de plus intégré des traitements supplémentaires dans le processus d'estimation des altitudes immergées. Nous avons notamment eu recours à une méthode d'estimation fine de la position de l'interface en tout point par l'intégration de contraintes hydrauliques. Un filtrage spatial a ensuite été mis en place afin de diminuer la dispersion de la mesure. L'ensemble des étapes constituant la méthode a permis d'obtenir en bout de chaîne une estimation des altitudes immergées avec un biais faible (moins de 5 centimètres) et une dispersion acceptable (une dizaine de centimètres).

La maitrise de la géométrie de prise de vue est un paramètre très important pour la faisabilité même de la mesure. En effet, il est nécessaire avec des capteurs petit

format de voler le plus bas possible afin d'accéder à la meilleure précision possible (section 6.2.1). Cela correspond en contrepartie à une réduction de l'espace des images occupé par les berges - et donc les points de contrôle au sol. Du fait de l'utilisation de plates formes légères, des décalages angulaires ou de position par rapport au plan de vol prévu peuvent survenir lors de l'acquisition. Ceux-ci peuvent avoir pour conséquence la perte de couverture des berges et donc de mires sur un côté de l'image. Dans le cas des acquisitions réalisées sur la Durance, malgré la marge qui avait été prise concernant la couverture des berges, ce phénomène a concerné 2 images sur 30.

En résumé, l'utilisation de moyens légers a conduit à une diversification des sources d'erreur pour l'estimation des altitudes des points immergés. L'estimation finale avec une bonne précision de ces altitudes n'a été possible qu'au prix de la mise en place (i) d'un protocole de terrain spécifique et surtout de l'optimisation des variables de l'acquisition (ii) de méthodes de traitement spécifiques adaptées au milieu (notamment mise en cohérence hydraulique et correction de la réfraction).

11.1.2 Sources d'erreur

Les sources d'erreurs évoquées plus haut sont nombreuses [Feurer et al., 2007b]. Leur influence relative est difficile à déterminer au niveau du résultat final. On rappelle ici la succession des processus effectués aboutissant finalement à l'estimation de l'altitude des points immergés : estimation de la géométrie interne, estimation de la géométrie externe, appariement de points, estimation de l'altitude de l'interface, estimation de l'effet de la réfraction. A chacun de ces processus correspond une modélisation, qui introduit un biais et une imprécision. La méthode proposée a permis de limiter les biais et les imprécisions à chacune des étapes. Du fait de la corrélation spatiale des variables mises en jeu, la dispersion de la mesure a pu être réduite en effectuant un filtrage spatial.

On observe sur la carte des profondeurs obtenue (figure 11.1) quelques zones pour lesquelles il semble y avoir des erreurs systématiques. Ces zones sont constitués d'ensembles de points pour lesquels les erreurs d'estimation semblent présenter une cohérence spatiale. Les trois facteurs d'explication de ces erreurs systématiques les plus probables sont : la présence de végétation immergée, la mauvaise estimation locale de l'altitude de l'interface ou encore la restitution de points situés à la surface ou dans la colonne d'eau.

Pour les deux zones situées le plus à l'amont (zones 1 et 2), la sous-estimation des

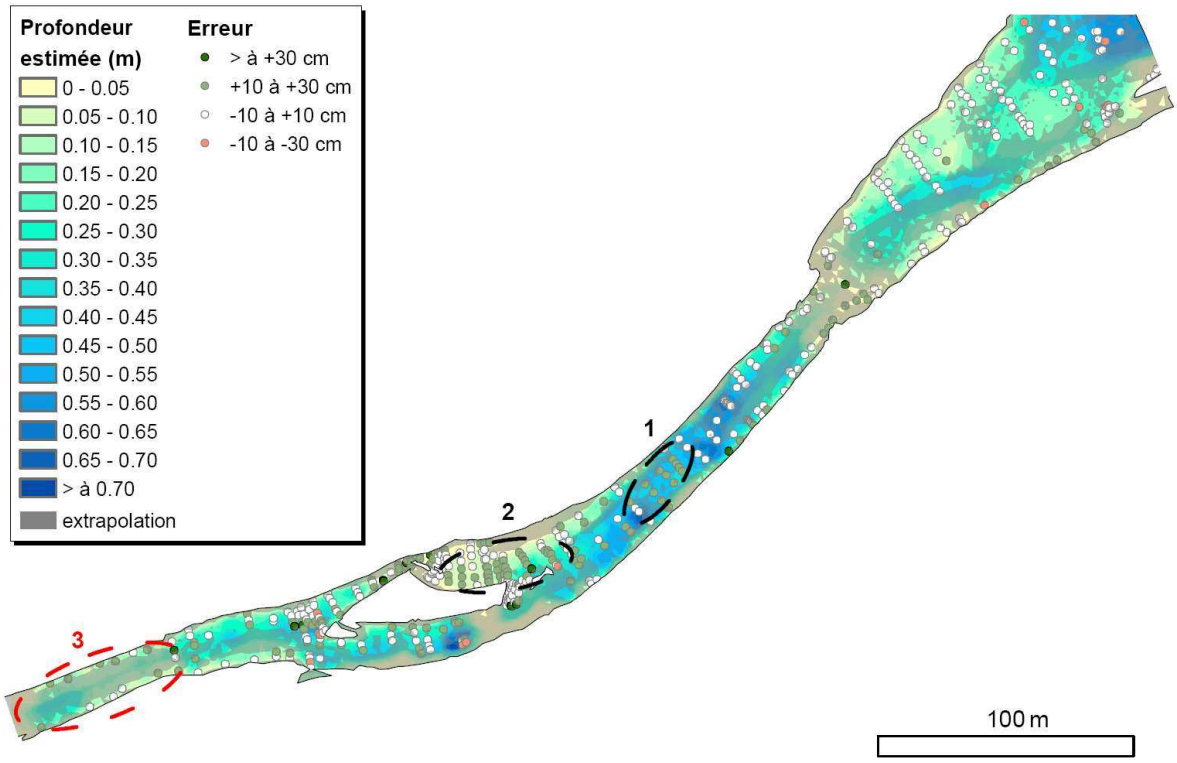


FIG. 11.1 - *Erreurs d'estimation des altitudes, superposées à la carte des profondeurs estimées. Les ovales en pointillés correspondent à des zones pour lesquelles il semble y avoir une erreur systématique*

profondeurs est expliquable par la présence de massifs algaux. Le cas de la zone 2 est particulier : il s'agit d'une zone de très faible profondeur, assez plate, comportant de nombreuses pierres isolées détectables dans les images par leur ombre portée. La sous-estimation des profondeurs peut provenir de la restitution de points situés sur le dessus des pierres. De plus, dans la zone 2, l'altitude de l'interface peut être mal estimée. D'une part, la bordure de lit mouillé en rive droite est difficile à déterminer dans les images du fait de la présence de végétation. D'autre part, en rive gauche de ce bras (rive droite de l'île), les altitudes de la bordure de lit mouillé sont mal estimées. Sur le terrain même, cette ligne est délicate à définir (relief très plat, substrat comportant des pierres isolées émergées). À cela vient s'ajouter le fait que cette portion de rive est courte. L'estimation des altitudes par la mise en cohérence hydraulique est basé sur un faible nombre de points de bordure de lit mouillé. On se trouve en limite d'application d'un tel algorithme, implémenté en 1D.

Pour la zone la plus aval (zone 3 sur la figure 11.1), il est plus difficile de proposer une hypothèse, du fait notamment du faible nombre de points concernés. Il peut s'agir d'une mauvaise estimation de la position de l'interface. Cette zone est en effet située à l'extrémité du site d'intérêt. Cette mauvaise estimation peut correspondre à l'effet de bord de l'algorithme de mise en cohérence hydraulique : l'estimation est moins bonne aux extrémités du fait de l'absence de contraintes d'un côté (ici à l'aval).

11.1.3 Points forts de la méthode

L'application de la méthode a démontré la faisabilité de la mesure sur une zone d'intérêt de plusieurs centaines de mètres avec un biais de 4.3 centimètres et une précision de 10.5 centimètres (écart-type de l'erreur). L'acquisition a été réalisée par des moyens légers permettant la réactivité à la survenue d'évènements ponctuels. La méthode donne a priori les meilleurs résultats sur des sites d'études présentant des faibles profondeurs, et des fonds hétérogènes est présente donc une très forte complémentarité avec les autres méthodes de télédétection.

D'une part avec les méthodes radiométriques, pour lesquelles les fonds doivent être homogènes, et dont les modèles simples d'atténuation présentent des limites pour les faibles profondeurs [Lyzenga, 1978]. De plus, la méthode que nous avons développée permet d'accèder à la topographie immergée (mesure absolue) alors que les modèles radiométriques permettent d'estimer la bathymétrie (mesure relative).

D'autre part avec la complémentarité est forte avec le LIDAR bathymétrique, qui

présente des limites pour les faibles profondeurs [Lesaignoux et al., 2007] et semble obtenir de meilleurs résultats pour des surfaces rugueuses [Bailly et al., 2007].

11.1.4 Limites identifiées

Les principales limites de la méthode proviennent des conditions nécessaires à son application : possibilité de restituer le relief immergé et, pour la correction de l'effet de la réfraction, la ligne de rive.

Pour cela, les rives doivent être dégagées, le fond doit être hétérogène, l'eau doit être claire et peu profonde, l'interface la plus plane possible. Les rivières peu profondes à fond de gravier sont des sites d'application possible de la méthode. D'autres méthodes doivent être mises en oeuvre dans le cas de rivières ne présentant pas ces caractéristiques [Lane, 2000].

Les autres limites concernent l'acquisition même des données et les technologies utilisées.

On a vu d'une part que l'utilisation de plateformes légères conduisait à l'acquisition de bandes d'images pour lesquelles l'application opérationnelle de la méthode pouvait être délicate (possibilité résiduelle de lacunes dans la zone stéréo notamment). Si l'expérience menée sur la Durance a prouvé qu'une telle application était possible, elle a en revanche mis en lumière les difficultés correspondant à l'établissement d'un jeu de données volumineux et sans "trou". La méthode telle quelle - avec les moyens technologiques utilisés et les choix effectués - paraît donc limitée à l'acquisition de bandes d'images cohérentes (conditions d'acquisition homogènes) sur des zones de surface (quelques dizaines d'hectares). Il serait donc préférable de fractionner l'acquisition pour la couverture de plus grandes zones.

D'autre part, l'utilisation de capteurs non-métriques petit format à bord de plates formes légères résulte en un compromis délicat (fortes contraintes) et très fragile (stabilité du vol) sur la précision de la restitution altimétrique. Celle-ci est en effet liée d'un côté (si l'on considère que les paramètres d'orientation sont connus très précisément) à la résolution au sol et au rapport base sur éloignement et de l'autre côté justement à la précision d'estimation des paramètres d'orientation (qui nécessite une bonne répartition des mires dans les images, et donc une couverture systématique des berges de part et d'autre de la rivière).

Une autre limite concerne la méthode d'appariement utilisée pour la restitution des altitudes apparentes.

En effet, on a vu que l'utilisation d'algorithmes de corrélation automatiques tels que celui implémenté par Leica conduisait à une très forte densité de points dans les zones peu profondes et à un fort taux d'échec ailleurs, résultant en un plan d'échantillonnage très irrégulier et hétérogène. Par ailleurs la méthode de corrélation automatique supervisée par vision stéréoscopique est très coûteuse en temps et nécessite la mobilisation d'un opérateur.

Enfin, une dernière limite de la méthode pourrait apparaître dans l'utilisation des mesures obtenues en entrée de modèles hydrauliques. En effet, sur une rivière telle que la Durance, dont la profondeur moyenne est faible (environ trente centimètres), un faible variation des hauteurs d'eau correspond à une forte variation des débits. Pour donner un ordre de grandeur, le débit moyen en Durance est d'environ $7\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$. Une variation de dix centimètres correspond à un doublement du débit. Il y a donc un fort intérêt à évaluer la sensibilité des modèles hydrauliques aux données obtenues par la méthode présentée.

11.2 Perspectives

L'application de la méthode et l'analyse de ses résultats a mis en lumière son potentiel et ses limites. Si certaines de ces limites concernent le domaine d'application de cette méthode, d'autres sont cependant techniques (instruments, traitements). Il semble donc possible d'améliorer la méthode et les résultats obtenus en mettant en oeuvre des technologies et des méthodes différentes.

Dans un deuxième temps, le caractère opérationnel de l'application d'une telle méthode est confronté avec les méthodes de mesure de terrain.

Enfin, et c'est probablement dans l'exploration de cette voie que les gains pourront être les plus significatifs, le couplage de la méthode avec d'autres méthodes est examiné dans la section 11.2.3.

11.2.1 Pistes d'amélioration

11.2.1.a Acquisition

En premier lieu, l'utilisation de moyens techniques différents doit permettre de rendre l'acquisition plus robuste et ainsi mieux assurer le respect du plan de vol. Dans le cas de notre expérimentation, le contrôle de la qualité du jeu de données ne pouvait être effectué qu'après l'acquisition. De plus, la marge de manoeuvre était assez réduite, du fait notamment de la vitesse de la plateforme. L'utilisation de plateformes plus lentes, avec un contrôle du vol (centrale inertielle, pilote automatique) serait une première source d'amélioration à explorer pour la constitution d'un jeu de données de meilleure qualité. On peut en effet imaginer avec de tels vecteurs effectuer des prises de vue à plus basse altitude, avec un recouvrement des berges optimisé pour une résolution au sol minimale.

Le compromis réalisé entre les différentes variables d'acquisition est très serré en raison notamment des caractéristiques du capteur utilisé. La mise en oeuvre d'un capteur avec une plus grosse matrice pourrait permettre (i) de diminuer la résolution au sol des images tout en conservant une couverture des berges suffisante et/ou (ii) d'améliorer la géométrie de prise de vue en augmentant le B/Z pour une emprise au sol donnée.

Il serait de plus intéressant de tester un autre mode d'acquisition avec des moyens technologiques le permettant (capteurs permettant l'acquisition rapide de bandes d'image ou vecteurs lents). Afin d'améliorer les conditions de prise de vue vis à vis de la réfraction, l'utilisation de plus longues focales serait en effet à tester. Il serait dans ce cas nécessaire d'effectuer les prises de vues avec un rapport base sur éloignement plus fort. Afin de pouvoir garantir la couverture stéréo complète dans ces conditions, il serait nécessaire de réaliser des bandes d'images avec un très fort recouvrement. Le relief apparent serait restitué à partir de couples formés par des images non-successives, avec un recouvrement inférieur à la moitié de l'image.

11.2.1.b Estimation de la position de l'interface

Comme on a pu le constater lors de la modélisation de l'effet de réfraction - et probablement sur les résultats finaux - la connaissance de la position de l'interface joue

fortement sur la qualité du résultat final (biais, dispersion). Afin d'avoir une estimation de cette position la meilleure possible, on peut donc envisager plusieurs améliorations.

Tout d'abord, l'algorithme de mise en cohérence utilisé est un algorithme 1D. Il ne tire donc pas partie des propriétés 3D de l'écoulement. Un première amélioration possible serait le passage au 2D, exploitant les informations de l'ensemble des lignes de rives.

Il serait de plus possible de resserrer encore le système de contraintes en y intégrant quelques données aux limites (amont ; aval) obtenues par mesure sur le terrain au moment de la prise de vue.

Remarque : Il est de plus intéressant de constater que, pour des applications au milieu marin, la détermination fine du relief de l'interface elle-même constitue un problème de recherche à part entière [Wanek et Wu, 2006]. En revanche, la technique utilisée dans la référence proposée est incompatible avec les applications recherchées pour notre problématique. La faisabilité de la méthode implique une certaine texture de la surface et empêche donc la visibilité des objets situés au fond.

11.2.1.c Techniques de corrélation

Enfin, des techniques de corrélation différentes doivent être testées. Comme on l'a vu, d'une part l'appariement des points n'est pas facilité par la traversée de l'eau, et d'autre part la mesure du relief immergé contient un bruit intrinsèque lié à la traversée d'une interface non plane. Ces deux facteurs conduisent à une mesure brute du relief immergé lacunaire et intrinsèquement bruitée.

Or, si l'aspect spatial de la variable estimée a été intégré dans plusieurs étapes de la méthode proposée, ce n'est pas le cas pour l'étape de mise en correspondance des images. Des techniques d'appariement intégrant dans le processus de confection du modèle numérique du terrain des contraintes de régularité pour la surface restituée pourraient permettre de tirer parti de la dimension spatiale des informations issues des images [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006, Pierrot-Deseilligny, 2007]. Quelques tests réalisés en fin de thèse semblent confirmer le fort potentiel de l'intégration de ces techniques dans la méthode développée. Le résultat présenté sur la figure 11.2 est un modèle numérique de surface "apparente" brut. Il est globalement cohérent avec la réalité observée (structures des bancs de galets émergés, ripisylve en rive gauche). Pour la partie immergée, mise à part la partie située au sud de l'île, correspondant à des eaux

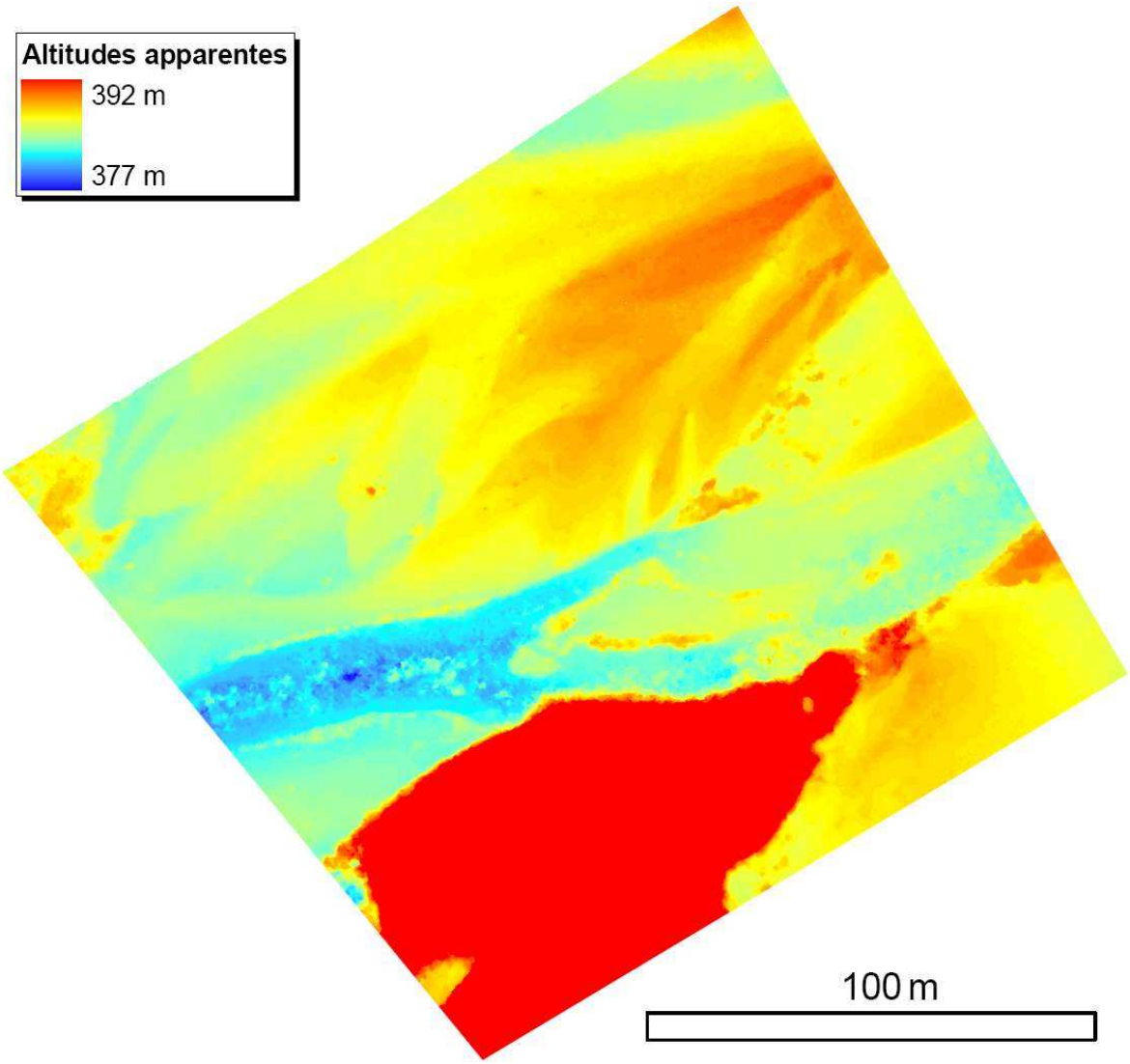


FIG. 11.2 - *Modèle numérique de terrain brut réalisé avec le logiciel MicMac [Pierrot-Deseilligny, 2007]*

très turbides, la forme générale paraît réaliste. On détecte l'effet des reflets spéculaires à l'aval - à gauche - de l'île par la présence de "moutons". En revanche, entre ces zones de mesures aberrantes, la surface restituée semble correspondre au fond de la rivière (bleu profond). La mise en oeuvre de ce type de techniques de corrélation semble donc très prometteuse.

11.2.2 Caractère opérationnel

Un aspect essentiel de l'application de la méthode sur la Durance est son caractère opérationnel.

D'une part on a vu que la technologie utilisée restreignait par elle-même le domaine d'application opérationnel (rivières claires). En revanche, l'acquisition en conditions opérationnelles réalisée sur la Durance a démontré la flexibilité de la méthode et la possibilité de forte réactivité à des conditions de terrain favorables. Sur des rivières à fond graveleux et à faible profondeur, la méthode paraît donc applicable de manière opérationnelle. Comme on l'a dit plus haut, la couverture de grandes surfaces peut nécessiter le fractionnement de l'acquisition afin de garantir la formation de bandes d'images utilisables.

Par ailleurs, il est possible de s'essayer à un chiffrage grossier de la mesure de topographie immergée de rivière avec la méthode proposée, en supposant que les procédés de traitement soient rationalisés.

On a vu que l'acquisition des bandes de données image sur les deux sites de la Durance (total d'une cinquantaine d'hectares) nécessitait environ deux journées de travail de technicien (selon l'accessibilité du site et les données disponibles a priori), pour la préparation du plan de vol, l'équipement des sites en mires et finalement l'acquisition des images. Une fois la méthode développée, on peut compter de manière large une semaine de travail (moitié technicien - moitié scientifique) pour l'établissement des modèles numériques de terrain. Ce chiffrage horaire grossier, exprimé en numéraire[1], conduit à une enveloppe approximative d'environ 2000 euros au kilomètre linéaire (une station). Ce prix peut être doublé si l'on fait appel à un prestataire externe pour l'acquisition (avec un cahier des charges serré). Ce chiffre est à comparer avec l'enveloppe d'environ 20000 euros correspondant au coût au kilomètre linéaire des mesures de terrain actuelles.

[1] en s'appuyant sur les chiffres du devis présenté page 240

11.2.3 Couplage avec d'autres méthodes

Le potentiel de la méthode d'estimation de la topographie immergée par stéréophotogrammétrie et les spécificités de ses conditions d'application permettent d'envisager de fortes complémentarités avec d'autres méthodes de télédétection.

11.2.3.a Méthodes radiométriques

Comme il a été présenté dans l'étude bibliographique, deux des principales limites des méthodes établissant un rapport entre couleur de l'eau et épaisseur de la lame d'eau sont (i) le besoin de données de calage (ii) la nature même de la mesure : c'est une profondeur et non la topographie immergée.

La synergie entre cette méthode et la méthode présentée dans ce document paraît très forte, notamment dans le cas de l'utilisation d'images satellite à très haute résolution spatiale, type IKONOS ou QUICKBIRD. Une acquisition conjointe de données satellitaires sur l'ensemble de la zone d'étude et de données aériennes sur un site de calibration doit pouvoir permettre d'établir des modèles radiométriques à partir des mesures obtenues par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Le site de calibration peut être choisi de manière à (i) être représentatif de l'ensemble de la zone ; (ii) optimiser les conditions d'application de la méthode par stéréo à travers l'eau. On peut ainsi envisager d'extrapoler les mesures effectuées sur le site de calibration à l'ensemble de l'image et ainsi obtenir une carte bathymétrique de l'ensemble du tronçon.

De plus, ces méthodes, basées sur un modèle simplifié d'atténuation logarithmique de l'énergie lumineuse, semblent limitées pour les très faibles profondeurs, pour lesquelles les phénomènes de diffusion et d'interaction à la surface ne sont plus négligeables [Lyzenga, 1978]. On a là encore une forte complémentarité avec la méthode par stéréophotogrammétrie à travers l'eau, pour laquelle les faibles profondeurs représentent des conditions d'application favorables.

Dans les autres cas (notamment turbidité forte) où la méthode radiométrique n'est pas applicable, il est possible d'utiliser les informations spectrales et des approches "objet" pour tirer des informations sur le substrat [Church et al., 1998], la végétation immergée [Puech et al., 2005], les unités hydromorphologiques [Wright et al., 2000,Puech et al., 2008] et/ou les habitats de la rivière [Marcus, 2002].

11.2.3.b Le LIDAR bathymétrique

Le lidar bathymétrique paraît être l'une des techniques les plus prometteuses pour la mesure des paramètres physiques de rivière, notamment du fait que : (i) elle est moins sensible à la turbidité que les techniques passives ; (ii) elle ne requiert pas de points de contrôle au sol. Elle n'est cependant pas opérationnelle pour ces milieux spécifiques qui posent des problèmes différents des milieux marins côtiers, par leur caractéristiques spatiales (étendue, continuité de la surface) et leur profondeur. Les surfaces immergées sont en effet en général plus faibles, ce qui peut poser des problèmes pour le réglage des gains d'amplification du signal reçu. Ces réglages sont nécessaires à la bonne détection du pic correspondant au fond de la rivière. De plus, la technique n'est pour l'instant pas validée pour les très faibles profondeurs (identification du pic dans l'infrarouge correspondant à la surface, discrimination des deux pics dans le vert, ajustement du retour de volume correspondant à la diffusion Raman dans le rouge).

Afin d'accéder à une mesure de toutes les unités de la rivière, il apparaît donc tout à fait pertinent de mettre en oeuvre une application couplée lidar/stéréo. Le plus souvent, des images avec un recouvrement de 60% sont déjà acquises lors des levés lidar. L'exploitation en stéréo de la bande d'image peut être réalisée afin de compléter les lacunes du nuage de points lidar pour les faibles profondeurs. Ces zones de la rivière correspondent aux zones pour lesquelles la densité de points obtenue avec la méthode développée est la plus importante (section 10.4.1). Les deux méthodes sont donc fortement complémentaires.

11.2.4 Suivi temporel - morphodynamique de la rivière

Le travail présenté et la méthode développée sont surtout centrés sur l'aspect spatial des données de télédétection et conséquemment sur les possibilités d'utilisation et de traitement des informations obtenues à partir de telles techniques.

Cependant, la mise au point d'une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière à partir d'images aériennes laisse entrevoir la possibilité d'effectuer le suivi temporel de la morphologie de la rivière. En effet d'une part le coût de la mesure est diminué par rapport aux campagnes terrain ; d'autre part, il est possible de répéter les acquisitions, au prix d'un ré-équipement du site en points de contrôle dans le cas où des crues ont modifié leur position ou les ont détruites.

La technique mise au point doit ainsi permettre le suivi de l'évolution de la topographie immergée et émergée afin d'accéder à la compréhension de la morphodynamique de la rivière. On peut de plus envisager d'utiliser la méthode développée comme source de données de base pour des études locales de risque (innondations) ou encore pour des études d'impact (mesure d'un état de référence, mesure de la topographie de la rivière après aménagement).

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de proposer une réponse à la question de la mesure de la géométrie de la rivière par télédétection. La réponse apportée est le développement, l'application, et la validation d'une méthode de mesure du relief immergé de la rivière par stéréo à travers l'eau à partir de capteurs petit format et de plateformes légères.

L'originalité du travail présenté réside, du point de vue technologique, dans la mise en oeuvre de matériel bon marché et de plateformes permettant une réactivité rapide pour l'acquisition ; du point de vue méthodologique, dans l'association des techniques de photogrammétrie avec des méthodes intégrant des contraintes spatiales géométriques (réfraction) et hydrauliques (logique d'écoulement) correspondant aux propriétés physiques des objets étudiés.

Une méthode de mesure du relief immergé de rivières

La technique d'estimation de la topographie de la rivière développée comprend plusieurs étapes, permettant d'une part d'estimer de manière fine la géométrie de la prise de vue, et d'autre part de prendre en compte et de corriger les effets géométriques dûs à la présence d'eau sur le parcours des rayons lumineux.

Tout d'abord, l'utilisation de moyens légers (capteurs petit format non métriques, ultra légers motorisés, voire drones) présente l'avantage de permettre une grande réactivité, une souplesse d'utilisation sur le terrain, pour un coût modéré. Il est ainsi possible d'effectuer des acquisitions avec un échantillonnage temporel adapté aux phénomènes d'intérêt, ou encore d'ajuster les acquisitions aux conditions expérimentales en temps réel.

Par ailleurs, l'utilisation de telles technologies rend difficile la maitrise de la géométrie de prise de vue a priori. Cela a des conséquences non seulement sur la faisabilité de la mesure sur l'ensemble de la zone d'intérêt, mais aussi sur la qualité de cette mesure du fait de l'imprécision de l'estimation des paramètres d'acquisition.

La méthode met donc en oeuvre un ensemble de technologies sur lequel il y a peu de contraintes a priori. Il y a donc un effort a posteriori dans l'estimation des paramètres géométriques afin de diminuer l'imprécision de la mesure finale. La méthode a donc intégré un ensemble de contraintes, liées notamment aux propriétés des phénomènes physiques mis en jeu : continuité des rayons pour la réfraction, logique d'écoulement pour le calcul du miroir, cohérence spatiale pour la topographie immergée.

La géométrie particulière du couple de rayons lumineux issus d'un point immergé et traversant l'interface eau/air (ou miroir) a nécessité le développement d'une méthode de correction de l'effet de la réfraction sur la restitution du relief par stéréophotogrammétrie. Un paramètre crucial pour la correction de cet effet est la connaissance fine de l'altitude du miroir en tout point. Afin d'accéder à celle-ci, une méthode d'estimation par intégration de contraintes hydrauliques a été mise en oeuvre. À partir des points de bordure de lit mouillé déterminés par stéréorestitution, une mise en cohérence hydraulique des altitudes a été effectuée. La mise en cohérence hydraulique vise à obtenir une suite amont-aval d'altitudes estimées qui suive une logique compatible avec la physique de l'écoulement. Cette opération permet de réduire l'imprécision de l'estimation de ces altitude et de régulariser les lignes de rives. Le miroir déterminé à partir des lignes de rives mises en cohérence est donc estimé de manière plus précise, permettant une meilleure estimation - par correction de l'effet de la réfraction - de la position réelle des points.

L'étude de l'effet de la traversée de la surface de l'eau sur la stéréorestitution et sa faisabilité a constitué un sujet d'intérêt à part entière et a été particulièrement développée. Un ensemble de modèles, adapté au milieu "rivière", a donc été mis en place, à partir desquels des simulations ont été effectuées. Les résultats de ces simulations ont permis de mieux comprendre le phénomènes de la réfraction *en stéréo*, de déterminer les conditions expérimentales pour lesquelles une mesure par stéréophotogrammétrie à travers l'eau est possible, ainsi que d'évaluer l'influence des caractéristiques physiques de la surface sur la formation d'images à travers l'eau. La finalité de ces études était de déterminer l'influence de la réfraction sur la mesure de la position apparente des points immergés pour différentes conditions d'acquisition. On a ainsi pu établir le modèle de correction de la réfraction en stéréo mais aussi évaluer les conditions pour lesquelles un

modèle simple de correction pourrait être utilisé.

Du modèle numérique de la rivière à la compréhension de l'hydrosystème

La mise en oeuvre de la méthode sur deux rivières (le Gardon et la Durance) a permis de démontrer la faisabilité de la méthode et la validité des mesures obtenues. La réalisation de plusieurs campagnes de prise de vue dans des conditions différentes et leur exploitation a permis d'une part le développement même de cette méthode et d'autre part l'exploitation de jeu de données image pour la mesure de la topographie immergée.

Hormis les limites technologiques et méthodologiques, la méthode développée présente une limite intrinsèque liés à la présence de l'eau entre l'objet observé et le capteur. En conséquence, la méthode n'est pas applicable sur les rivières dont le fond est sans contrastes locaux ou invisible du fait de la turbidité ou des vagues.

L'application opérationnelle de la méthode sur des rivières à lit de gravier a permis d'obtenir des modèles numériques de terrain de la partie immergée de la rivière. Les caractéristiques de ces rivières, peu profondes, aux eaux claires, et aux berges dégagées, en font en effet un terrain favorable pour la mesure par stéréorestitution à travers l'eau.

La validation du modèle numérique de terrain obtenu par comparaison avec des données de terrain indépendantes a montré que dans le cas d'acquisitions aériennes avec un pixel inférieur à dix centimètres, le biais moyen sur un chenal d'un demi kilomètre était inférieur à cinq centimètres, la dispersion de la mesure d'environ dix centimètres ; l'échantillonnage spatial de la mesure est inférieur à dix centimètres, la résolution effective de la mesure après filtrage est de trois mètres cinquante.

La qualité de la mesure obtenue est finalement tout à fait compatible avec les exigences de précision en entrée de modèles thématiques (hydraulique, hydroécologie) notamment en ce qui concerne l'approche habitat-poisson basée sur le calcul d'hydrosignatures qui utilisent des classes de profondeur de plusieurs dizaines de centimètres d'amplitude. La méthode développée peut ainsi fournir un modèle numérique de la rivière qui, par exemple, utilisé conjointement avec des données de terrain concernant

la présence et l'abondance de poissons, permettra d'accèder à la connaissance de la relation entre le milieu physiques et la dynamique de la population d'une espèce. De la même manière, cette mesure de la topographie immergée de la rivière peut être utilisée en entrée modèles hydrauliques afin de comprendre voire de prévoir l'évolution du lit.

On a donc pu, en apportant une réponse méthodologique au problème de mesure initial, apporter les éléments nécessaires à la compréhension de l'hydrosystème : mesure spatialisée, effectuée selon une méthode au coût modéré, reproductible et permettant ainsi un suivi temporel des phénomènes d'interêt.

Aller plus loin

Plusieurs voies, afin d'améliorer la méthode, de proposer des développements à cette méthode, mais surtout d'utiliser les résultats des mesures obtenues pour la compréhension des hydroécosystèmes doivent être explorées.

Tout d'abord, il semble possible pour un investissement modéré d'améliorer la méthode proposée en intégrant des technologies et des méthodes plus avancées, au niveau de l'acquisition des images (drones, capteurs grand format), de la stéréorestitution (mise en correspondance intégrant des contraintes de régularité) et de l'intégration de contraintes hydrauliques (mise en cohérence multidimensionnelle).

Ensuite, la mesure de la topographie immergée de la rivière ou de sa profondeur peut-être améliorée par l'utilisation conjointe de méthodes de télédétection complémentaires passives (exploitant les propriétés spectrales) ou actives (télémétrie laser aéroportée).

Enfin, et c'est en ce sens que le travail présenté doit pouvoir permettre de répondre aux questions de recherche - et finalement, de la société - posées, il faut évaluer l'apport des modèles numériques de terrain obtenus par cette méthode pour l'établissement de modèles habitat-poisson ou encore pour la modélisation hydraulique de la rivière. En effet, si la mesure obtenue par télédétection peut être de moins bonne qualité que la mesure terrain actuellement utilisée en entrée de ces modèles, elle n'en présente pas moins un certains nombres d'avantages conséquents : Cette mesure peut être spatialisée avec une densité forte à l'échelle de tronçons de la rivière de plusieurs centaines de mètres, voire de plusieurs kilomètres. La méthode de mesure, de par son coût et sa

répétitivité, peut permettre un suivi temporel des phénomènes ayant lieu dans la rivière et notamment son évolution morphodynamique.

La mesure apportée par la méthode développée permet donc d'envisager l'accès à l'information et à la compréhension des mécanismes régissant la rivière à de toutes autres échelles (temporelles et spatiales). On peut notamment y voir une occasion de vérifier la représentativité à l'échelle d'un sous-système hydroécologique (la moyenne Durance) des modèles établis jusque là sur des zones limitées. On peut ainsi espérer accéder à une meilleure compréhension de ces hydrosystèmes afin d'en optimiser la gestion.

Table des matières

Avant-Propos vi

Résumés vii

Remerciements ix

Introduction générale 1

I Mise en contexte 4

1 La rivière, centre d'enjeux multiples 7
- 1.1 Cas de la Durance - Situation et histoire . . . 8
- 1.2 Hydrologie . . . 9
  - 1.2.1 Données naturelles . . . 10
  - 1.2.2 Données actuelles . . . 10
  - 1.2.3 Morphologie . . . 12
- 1.3 Biologie . . . 14
- 1.4 Les multiples usages de l'eau . . . 15
  - 1.4.1 Agriculture : irrigation . . . 15
  - 1.4.2 Production d'électricité . . . 17
  - 1.4.3 Eau potable, eau industrielle et eau agricole . . . 17
  - 1.4.4 Usages émergents . . . 17
    - 1.4.4.a L'eau en tant que milieu . . . 17
    - 1.4.4.b Usages touristiques et récréatifs . . . 18
- 1.5 Le risque d'inondation . . . 18
- 1.6 Synthèse - Enjeux - Site d'étude . . . 19

2 Une problématique : du poisson à l'image 21

2.1 Conflits d'usages et nouvelles problématiques en Durance 22
2.2 Les modèles habitat/poisson 23
2.2.1 Le concept d'hydrosignature 24
2.2.1.a Calcul de l'hydrosignature 25
2.2.1.b Intérêt et propriétés de l'hydrosignature 26
2.2.2 Le modèle 5M7 27
2.3 Un besoin de mesure 29
2.4 Apport de la télédétection 31
2.4.1 Complémentarité des mesures 31
2.4.2 Le compromis entre couverture spatiale, échantillonnage, et précision de la mesure 32
2.4.3 Critères d'intérêt de la télédétection 33

3 Revue de littérature 36

4 Objectif de la thèse 55
Développer et évaluer une méthode de mesure de la topographie immergée de la rivière 56
... avec des moyens légers 57
... par stéréophotogrammétrie à travers l'eau 57

II Méthodes 59

Introduction à la deuxième partie 60

5 Eléments de photogrammétrie 67
5.1 Cadre théorique 68
5.1.1 Bases théoriques - Vocabulaire 68
5.1.2 Équations de la photogrammétrie 69
5.1.3 Exploitation des équations de la photogrammétrie 71
5.2 Orientation de clichés 73
5.2.1 Orientation interne - étalonnage de l'appareil 74
5.2.2 Orientation externe d'un couple stéréoscopique 75
5.2.3 Compensation en bloc par faisceaux avec autocalibration 76
5.3 Stéreorestitution 77
5.3.1 Appariement par corrélation automatique 78
5.3.2 Restitution manuelle 79
5.3.3 Corrélation supervisée par vision stéréoscopique 80
5.3.4 Intérêt de l'utilisation des deux méthodes avec corrélation numérique 81
5.4 Précision en Z en photogrammétrie numérique 81

6 Acquisition d'images par drone ou ULM **83**
6.1 Paramètres imposés et variables à optimiser . . . 83
6.1.1 Cahier des charges pour l'acquisition des images . . . 83
6.1.2 Utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques 84
6.2 Protocole d'acquisition des images . . . 87
6.2.1 Contraintes . . . 87
6.2.2 Choix effectués - réglage du capteur, plan de vol . . . 90
6.2.3 Travail sur le terrain associé . . . 90
6.2.4 Mise en oeuvre opérationnelle du plan de vol . . . 91
6.3 Limites et potentiels . . . 91
6.3.1 Limites . . . 93
Connaissance de la position du vecteur . . . 93
Vitesse de la plate-forme . . . 93
Capteur petit format . . . 93
6.3.2 Potentiels . . . 94
Coût . . . 94
Très haute résolution spatiale . . . 94
Flexibilité des acquisitions . . . 94

7 Que voit-on en stéréo à travers l'eau ? **95**
7.1 Cadre théorique . . . 96
7.1.1 Réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux . . . 96
7.1.2 Réfraction et stéréo - notion de point apparent . . . 97
7.1.3 Existence du point apparent . . . 100
7.1.4 Équations de la photogrammétrie à deux milieux . . . 102
7.2 Études préliminaires - présentation de l'approche . . . 103
7.2.1 Résolution d'un cas simplifié . . . 104
Application numérique et représentation graphique . . . 105
7.2.2 Cas réel : images doubles, occlusions . . . 106
7.2.3 Approche choisie : méthode inverse . . . 107
7.3 Stéréo à travers une surface localement plane . . . 111
7.3.1 Cas d'une surface plane . . . 111
7.3.2 Résultats . . . 113
7.3.2.a Caractéristiques spatiales . . . 113
7.3.2.b Influence de la focale . . . 115
7.3.2.c Influence du B/Z . . . 116
7.3.2.d Influence du h/Z . . . 116
7.3.3 Bilan . . . 118
7.4 Influence d'une erreur sur la position de la surface . . . 119
7.5 Influence des vagues . . . 122
7.5.1 Approche de modélisation . . . 123

7.5.2 Résultats des simulations 126
7.5.2.a Visibilité du fond 126
7.5.2.b Influence des vaguelettes sur la mesure 128
Faisabilité - Déformation des objets 128
Erreur sur l'altitude 130
7.6 Discussion et conclusions 131
7.6.1 Effet de la réfraction en stéréo 131
7.6.2 Correction de la réfraction et bruit de mesure 131
7.6.3 Influence des vagues - faisabilité de la mesure 132
7.6.4 Importance de l'altitude de l'interface 133

8 Plan d'eau - contraintes hydrauliques 134
8.1 Cadre - objectif 135
8.1.1 Hypothèses de travail 135
8.1.2 Objectif de l'algorithme 136
8.2 Concepts et notations 137
8.2.1 Minorants et majorants locaux 137
8.2.2 Cohérence, compatibilité, conflits 138
8.2.3 Enveloppes MIN et MAX 139
8.3 Principe et mise en place de l'algorithme 140
8.3.1 Calcul des enveloppes MIN et MAX - régularisation 140
8.3.2 Amélioration de la précision 142
8.4 Implémentation et résultat de l'algorithme 143
8.5 Correction de la réfraction 144
8.5.1 Estimation de la position de la surface de l'eau 144
8.5.2 Estimation de la position réelle du point 145

Bilan 147

III Applications 150

Introduction à la troisième partie 151

9 Sites d'étude et données 153
9.1 Site d'expérimentation préliminaire : le Gardon 153
9.1.1 Présentation du site 154
9.1.2 Données de terrain sur le Gardon 154
9.1.3 Données image acquises sur le Gardon 156
9.2 Site principal : la moyenne Durance 157
9.3 Données image acquises sur la Durance 159
9.3.1 Plusieurs campagnes d'acquisition d'images 159

9.3.2 Apport du protocole d'acquisition - caractéristiques des données 162
9.3.2.a Couverture stéréo - mires . . . 162
9.3.2.b Stabilité du vol . . . 164
9.3.3 Choix du site d'application de la méthode : Les Mées (D0) . . . 167
9.4 Données de terrain acquises sur le site d'application . . . 168
9.4.1 Données de référence spatiale . . . 168
9.4.2 Données de validation : topographie immergée . . . 170
9.4.2.a Protocole de mesure . . . 170
9.4.2.b Données topographiques récoltées . . . 171

10 Résultats de la méthode et validation 174
10.1 Test en conditions "idéales" . . . 175
10.2 Conditions opérationnelles - acquisition . . . 178
10.2.1 Conditions expérimentales . . . 179
10.2.2 Résolution au sol des images - B/Z - précision théorique en Z . . . 179
10.3 Calcul de la géométrie de prise de vue . . . 181
10.3.1 Etalonnage de l'appareil . . . 181
10.3.2 Orientation externe réalisée avec le Poivilliers E . . . 183
10.3.3 Résultats de la compensation par faisceaux avec autocalibration 183
10.3.4 Comparaison relative des résultats . . . 185
10.4 Stéréorestitution - positions "apparentes" . . . 187
10.4.1 Nombre de points - densité de mesure . . . 187
10.4.2 Faisabilité - échantillonnage spatial . . . 188
10.5 Calcul de la position de l'interface . . . 190
10.6 Correction de la réfraction . . . 195
10.7 Régularisation et validation . . . 197
10.8 Conclusion . . . 200

11 Discussion 203
11.1 Potentiel de la méthode . . . 203
11.1.1 Retour d'expérience . . . 203
11.1.2 Sources d'erreur . . . 204
11.1.3 Points forts de la méthode . . . 206
11.1.4 Limites identifiées . . . 207
11.2 Perspectives . . . 208
11.2.1 Pistes d'amélioration . . . 209
11.2.1.a Acquisition . . . 209
11.2.1.b Estimation de la position de l'interface . . . 209
11.2.1.c Techniques de corrélation . . . 210
11.2.2 Caractère opérationnel . . . 212
11.2.3 Couplage avec d'autres méthodes . . . 213

11.2.3.a Méthodes radiométriques 213
11.2.3.b Le LIDAR bathymétrique 214
11.2.4 Suivi temporel - morphodynamique de la rivière 214

Conclusion générale **216**

Table des matières **221**

Bibliographie **227**

Annexes **239**

A Topographie de rivière - Devis **240**

B Equations de la photogrammétrie **241**
B.1 Notations 241
B.2 Equations 242

C Réfraction - cas 2D surface plane **243**
C.1 Notations 243
C.2 Calculs 244
C.3 Application numérique 244

D Trajet d'un rayon à travers un dioptre **247**
D.1 Notations 247
D.2 Cas général 247
D.3 Cas d'une interface horizontale 249
D.3.1 Existence et unicité de la solution 250
D.4 Cas d'une interface sinusoïdale 250

E Étalonnage du Sony DSC-F828 **254**
E.1 Étalonnage de l'appareil 254
E.1.1 Mode opératoire 254
E.1.2 Résultats 255
E.2 Interfaçage avec le logiciel de Leica 257

Bibliographie

[2000/60/CE, 2000] 2000/60/CE (2000). Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:FR:HTML (dernière consultation : 18 mars 2008).

[Aadland, 1993] Aadland, L. (1993). Stream habitat types : Their fish assemblages and relationship to flow. *North American Journal of Fisheries Management*, 13(4) :790–806.

[Adrian, 1984] Adrian, R. J. (1984). Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow : speckle velocimetry vs. particle image velocimetry. *Applied Optics*, 23 :1690–1691.

[AFT, 2000] AFT (2000). Lexique topographique 1991/2000. Association Française de Topographie. http://aftopo.club.fr/publications/lexique/pagelexique.htm (dernière consultation : 18 mars 2008).

[Allouis et Bailly, 2008] Allouis, T. et Bailly, J. (2008). On the use of raman, infra-red, and green waveforms in bathymetric lidar for very shallow waters. In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria.*

[Ambrosia et al., 2003] Ambrosia, V. G., Wegener, S. S., Sullivan, D. V., Buechel, S. W., Dunagan, S. E., Brass, J. A., Stoneburner, J., et Schoenung, S. M. (2003). Demonstrating UAV-acquired real-time thermal data over fires. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(4) :391–402.

[Arrighi, 2004] Arrighi, L. (2004). Stéréophotogrammétrie appliquée aux zones immergées pour la reconstitution de la topographie de lit de rivières : application à la Durance. Master's thesis, Université Louis Pasteur - Ecole nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

[Asseline et al., 1999] Asseline, J., De Noni, G., et Chaume, R. (1999). Conception et utilisation d'un drone à vol lent pour la télédétection rapprochée. *Photo interprétation*, 37(2) :3–13.

[Bailly et al., 2006] Bailly, J., Feurer, D., Le Coarer, Y., Puech, C., Chaponnière, P., et Roux, B. (2006). Gravel-bed river depth mapping with cokriging using aerial high resolution images. In *EGU 2006, 02-07 Apr., Vienna, Austria.*

[Bailly et al., 2008] Bailly, J., Le Coarer, Y., Allouis, T., Stigermark, C.J.and Languille, P., et Adermus, J. (2008). Bathymetry with lidar on gravel bed-rivers : Quality and limits. In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria.*

[Bailly et al., 2007] Bailly, J.-S., Allouis, T., Lesaignoux, A., et Feurer, D. (2007). River water surface effects on minimum water depth detection from lidar : a theoretical study on waveforms. In *IGARSS, Barcelona.*

[Balland et al., 2002] Balland, P., Huet, P., Lafont, E., Leteurtrois, J.-P., et Pierron, P. (2002). Rapport sur la Durance. Technical Report Affaire IGE/01/025, Inspection Générale de l'Environnement.

[Baras, 1992] Baras, E. (1992). Etude des stratégies d'occupation du temps et de l'espace chez le barbeau fluviatile, barbus barbus (l.). Technical report, Institut de Zoologie de l'Université de Liège, Belgique. 442 p.

[Barta et Horvath, 2003] Barta, A. S. et Horvath, G. (2003). Underwater binocular imaging of aerial objects versus the position of eyes relative to the flat water surface. *Journal Of The Optical Society Of America A-Optics Image Science And Vision*, 20(12) :2370–2377h.

[Bercher et Kosuth, 2007] Bercher, N. et Kosuth, P. (2007). Quantifying accuracy and uncertainty, and modelling noise and error of satellite radar altimetry measurement of inland water levels. In *PSIP (Physics in Signal and Image Processing) 2007 proceedings, 8p., Mulhouse (France), 31 January-2 February.*

[Bercher et al., 2006] Bercher, N., Kosuth, P., et Bruniquel, J. (2006). Characterizing the quality of river water level time series derived from satellite altimetry : Efforts towards a standardized methodology. In *Venice 2006 Symposium "15 years of progress in radar altimetry", 12p., Venice (Italy), 13-18 March.*

[Bernoulli, 1738] Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica*. Dulsecker. Consultable en ligne http://imgbase-scd-ulp.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=250&pos=0.

[Borsányi et al., 2004] Borsányi, P., Alfredsen, K., Harby, A., Ugedal, O., et Kraxner, C. (2004). A meso-scale habitat classification method for production modelling of atlantic salmon in norway. *Hydroécologie Appliquée*, 14 :119–138.

[Bovee, 1982] Bovee, K. (1982). A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, rep. no. 12. Technical report, U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services.

[Bovee, 1996] Bovee, K. D. (1996). Perspectives on two-dimensional river habitat models : the phabsim experience. In *Proceedings of Second International Symposium on Habitat Hydraulics, Quebec, Canada*, volume Volume B, pages 149–162.

[Brasington et Smart, 2003] Brasington, J. et Smart, R. M. A. (2003). Close Range Digital Photogrammetric Analysis of Experimental Drainage Basin Evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3) :231–247.

[Brown, 1966] Brown, D. (1966). Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 32(3) :444–462.

[Brown, 1971] Brown, D. (1971). Lens distortion for close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 37(8) :855–866.

[Brown et Majumdar, 1992] Brown, W. C. et Majumdar, A. K. (1992). Point-spread function associated with underwater imaging through a wavy air-water-interface - theory and laboratory tank experiment. *Applied Optics*, 31(36) :7650–7659.

[Buchroithner, 1991] Buchroithner, M. F. (1991). Three-dimensional survey of submarine sedimentary trails by means of spaceborne remote sensing. *GeoJournal*, 24(1) :93–101.

[Burnside et Marshall, 1992] Burnside, C. et Marshall, H. (1992). Experiences in calibrating small format cameras. *Photogrammetric Record*, 14(80) :323–331.

[Carbonneau et al., 2003] Carbonneau, P., Lane, S., et Bergeron, N. (2003). Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing*, 24(14) :2837–2854.

[Carbonneau et al., 2006] Carbonneau, P. E., Bergeron, N., et Lane, S. N. (2006). Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Lamdforms*, 31 :1413–1423.

[Carter et Shankar, 1997] Carter, G. S. et Shankar, U. (1997). Creating rectangular bathymetry grids for environmental numerical modelling of gravel-bed rivers. *Applied Mathematical Modelling*, 21(11) :699–708.

[Cemagref, 2004] Cemagref (2004). http://www.cemagref.fr/Informations/viescientifique/program04/tr04hydreco.htm (dernière consultation : 7 janvier 2008).

[Chandler, 2001] Chandler, J. (2001). Measuring flume surfaces fo hydraulics research using a kodak DCS460. *Photogrammetric Record*, 17(97) :39–61.

[Chandler et al., 2005] Chandler, J. H., Fryer, J. G., et Jack, A. (2005). Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *Photogrammetric Record*, 20(109) :12–26.

[Changeux et Pont, 1995] Changeux, T. et Pont, D. (1995). Ichthyogeographic regions and watershed size in the french river rhône network. *Hydrobiologia*, 300/301 :355–363.

[Chaponnière, 2004] Chaponnière, P. (2004). Télédétection et bathymétrie des rivières : application à la Durance. Master's thesis, ENSG.

[Charvet et al., 2000] Charvet, S., Statzner, B., Usseglio-Polatera, P., et Dumont, B. (2000). Traits of benthic macroinvertebrates in semi-natural french streams : an initial application to biomonitoring in europe. *Freshwater Biology*, 43(2) :277–296.

[Church et al., 1998] Church, M., Hassan, M. A., et Wolcott, J. F. (1998). Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels : field and experimental observations. *Water Resources Research*, 34(11) :3169–3179.

[Clarke et Fryer, 1998] Clarke, T. A. et Fryer, J. G. (1998). The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, 16(91) :51–66.

[Costa, 2001] Costa, J. E. (2001). Hydro21 - Update on Future Flood Measurements : Look But Do Not Touch. In *New and Evolving Concepts in Indirect Discharge Measurements*.

[Creutin, 2001] Creutin, J. (2001). Local Remote Sensing of Rivers. Technical Report 418, IIHR-Hydroscience and Engineering, The University of Iowa, Iowa City.

[Creutin et al., 2003] Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A.and Kim, S. C., et Kruger, A. (2003). River gauging using piv technique : Proof of concept experiment on the iowa river. *Journal of Hydrology*, 277 :182–194.

[Crowder et Diplas, 2000] Crowder, D. et Diplas, P. (2000). Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. *Journal of Hydrology*, 230 :172–191.

[Daimon et Masumura, 2007] Daimon, M. et Masumura, A. (2007). Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region. *Applied Optics*, 46(18) :3811–3820.

[Egels, 1999] Egels, Y. (1999). *Poivilliers E - restituteur numerique*. ENSG. Version 5.5-d.

[Egels, 2000] Egels, Y. (2000). Photogrammétrie et micro-ordinateur. *XYZ*, 82 :31–35.

[Faugeras et Toscani, 1987] Faugeras, O. D. et Toscani, G. (1987). Camera calibration for 3d computer vision. In *Proceedings IEEE on Industrial Application of Machine Vision and Machine Intelligence, Tokyo*.

[Fermat, 1896] Fermat, P. (1896). *Synthèse pour les réfractions*. Gauthier-Villars, Paris.

[Feurer et al., 2008] Feurer, D., Bailly, J., Puech, C., Le Coarer, Y., et Viau, A. (2008). Very high resolution mapping of river immersed topography by remote sensing. *Progress In Physical Geography*, 32(4) :403–419.

[Feurer et al., 2007a] Feurer, D., Bailly, J.-S., Le Coarer, Y., Puech, C., et Viau, A. A. (2007a). On the use of very high resolution optical images to map river bathymetry : Upscaling from aerial to satellite imagery. In *Second Space for Hydrology Workshop "Surface Water Storage and Runoff : Modeling, In-Situ Data and Remote Sensing", 12 - 14 November 2007, Geneva, Switzerland*.

[Feurer et al., 2006] Feurer, D., Puech, C., Bailly, J., et Viau, A. (2006). Bathymetric measurement of rivers by remote sensing techniques : a review. In *TISORS II, 14-18 Aug 2006, Stirling, Scotland*.

[Feurer et al., 2005] Feurer, D., Puech, C., Le Coarer, Y., Bailly, J., Carrel, G., et Dumont, B. (2005). Toward the use of aerial remote sensing for instream flow and fish habitat modeling. In *EGU 2005, 24-28 Apr., Vienna, Austria*.

[Feurer et al., 2007b] Feurer, D., Puech, C., Viau, A., Bailly, J., et Le Coarer, Y. (2007b). River depth measurement with through-water photogrammetry using non-metric cameras : error sources analysis. In *IGARSS, Barcelona, Spain*.

[Fryer, 1983a] Fryer, J. (1983a). Photogrammetry through shallow water. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry & Surveying*, 38 :25–38.

[Fryer, 1983b] Fryer, J. (1983b). A simple system for photogrammetric mapping in shallow water. *Photogrammetric Record*, 11(62) :203–208.

[Fryer, 1984] Fryer, J. (1984). Errors in depth determined by through-water photogrammetry. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry & Surveying*, 40 :29–39.

[Fryer, 1985a] Fryer, J. (1985a). Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 11(66) :745–753.

[Fryer, 1985b] Fryer, J. (1985b). Some strategies for improving the accuracy of depths determined by through-water photogrammetry. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry & Surveying*, 43 :45–60.

[Fujita et al., 1997] Fujita, I., Aya, S., et Deguchi, T. (1997). Surface velocity measurement of river flow using images of an oblique angle. In *Proceedings XXVIIth IAHR Conference, Theme B, Volume 1, San Fransisco, CA*, pages 227–232.

[GAAP, 2008] GAAP (2008). Hybacam. http://www.gaap.ulaval.ca/?Projets_de_recherche (dernière consultation : 22 avril 2008).

[Gilvear et al., 2004a] Gilvear, D., Tyler, A., et Davids, C. (2004a). Detection of estuarine and tidal river hydromorphology using hyper-spectral and LiDAR data : Forth estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(3) :379–392.

[Gilvear et al., 2004b] Gilvear, D. J., Davids, C., et Tyler, A. N. (2004b). The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology. River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20(7) :795–811.

[Gorman et Karr, 1978] Gorman, O. et Karr, J. (1978). Habitat structure and stream fish communities. *Ecology*, 59 :507–515.

[Hardin et Jackson, 2005] Hardin, P. J. et Jackson, M. W. (2005). An unmanned aerial vehicle for rangeland photography. *Rangeland Ecology & Management*, 58(4) :439–442.

[Hauet, 2006] Hauet, A. (2006). *Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry*. PhD thesis, INP Grenoble.

[Hilldale, 2008] Hilldale, R. (2008). Using bathymetric lidar and 2-d hydraulic modeling to map riverine aquatic habitat. In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria*.

[Hilldale et Raff, 2007] Hilldale, R. C. et Raff, D. (2007). Assessing the ability of airborne lidar to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(5) :773–783.

[Holland et al., 2001] Holland, K. T., Puelo, J. A., et Kooney, T. N. (2001). Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry. *Coastal Engineering*, 44 :65–77.

[Horvath et al., 2003] Horvath, G., Buchta, K., et Varju, D. (2003). Looking into the water with oblique head tilting : revision of the aerial binocular imaging of underwater objects. *Journal Of The Optical Society Of America A-Optics Image Science And Vision*, 20(6) :1120–1131.

[HYDRO, 2008] HYDRO (2008). http://www.hydro.eaufrance.fr/ (dernière consultation : 7 janvier 2008).

[Jerlov, 1976] Jerlov, N. (1976). *Marine Optics*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, p. 231.

[Juramy et Monfort, 1985] Juramy, S. et Monfort, I. (1985). *L'évolution des lits fluviaux : l'exemple d'une rivière aménagée : la Durance*. PhD thesis, Université Aix-Marseille, II.

[Karara, 1989] Karara, H. M., editor (1989). *Non-Topographic Photogrammetry.*, chapter 11-4 Through-Water Photogrammetry, pages 160–166. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), second edition edition.

[Kasser et Egels, 2001] Kasser, M. et Egels, Y. (2001). *Photogrammétrie numérique*. Collection ENSG-IGN. Hermès.

[Kinzel et al., 2008] Kinzel, P., Wright, C., et Nelson, J. (2008). Mapping a shallow, braided river with the experimental advanced airborne research lidar (eaarl). In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria*.

[Kinzel et al., 2007] Kinzel, P. J., Wright, C. W., Nelson, J. M., et Burman, A. R. (2007). Evaluation of an experimental lidar for surveying a shallow, braided, sand-bedded river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(7) :838–842.

[Kniest, 1990] Kniest, H. T. (1990). *Photogrammetry through an air-water interface*. PhD thesis, University of Newcastle (N.S.W.). Originally presented as the author's thesis (Ph. D.) - University of Newcastle (N.S.W.), 1990. Bibliography : p. 148-152.

[Krauss et Waldhäusl, 1998] Krauss, K. et Waldhäusl, P. (1998). *Manuel de photogrammétrie*. Hermes.

[Labbé et al., 2007] Labbé, S., Roux, B., Bégué, A., et Lebourgeois, V. (2007). An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras : Characterization and acquisition guidelines. In *ISPRS Workshop : Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems, 11-14 September 2007, Newcastle (UK)*.

[Lane, 2000] Lane, S. (2000). The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 16(96) :937–957.

[Le Coarer, 2005] Le Coarer, Y. (2005). "hydrosignature" software for hydraulic quantification. In HARBY, A. e. a., editor, *COST 626 - European Aquatic Modelling Network. Proceedings from the final meeting in Silkeborg, Denmark 19-20 May 2005.*, pages 193–203. National Environmental Research Institute, Silkeborg, Denmark.

[Le Coarer, 2007] Le Coarer, Y. (2007). Hydraulic signatures for ecological modelling at different scales. *Aquatic Ecology*, 41(3) :451–459.

[Le Coarer et al., 2005] Le Coarer, Y., Archambaud-Suard, G., Giordano, L., Scharl, A., Rabotin, M., Dumont, B., Raymond, V., Carrel, G., Rifflart, R., et Roux, B. (2005). Renouvellement de la concession de sainte tulle 1. Étude expérimentale des débits réservés en moyenne durance. lot 1 "eco-géomorphologie". campagnes de terrain 2005. Technical report, Cemagref, U.R. Hydrobiologie, Aix-en-Provence / Avion Jaune, Montpellier. 127 p.

[Le Coarer et Dumont, 1995a] Le Coarer, Y. et Dumont, B. (1995a). Modelling stream morphodynamics for research in habitat-aquatic fauna relationships. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337/339 :309–316.

[Le Coarer et Dumont, 1995b] Le Coarer, Y. et Dumont, B. (1995b). Virtual rivers for the study of aquatic fauna. *Ingénieries*, 2 :21–28.

[Leckie et al., 2005] Leckie, D., Cloney, E., Jay, C., et Paradine, D. (2005). Automated mapping of stream features with high-resolution multispectral imagery : An example of the capabilities. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(2) :145–155.

[Legifrance, 1992] Legifrance (1992). Loi n°92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau. http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006055130&dateTexte=20080318 (dernière consultation : 18 mars 2008).

[Legifrance, 2006] Legifrance (2006). Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques. http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006055130&dateTexte=20080318 (dernière consultation : 18 mars 2008).

[Legleiter, 2002] Legleiter, C. (2002). Effects of Sensor Resolution on mapping in-stream habitats. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(8) :801–807.

[Legleiter et Roberts, 2005] Legleiter, C. et Roberts, D. (2005). Effects of channel morphology and sensor spatial resolution on image-derived depth estimates. *Remote Sensing of Environment*, 95(2) :231–247.

[Legleiter et al., 2004] Legleiter, C., Roberts, D. A., Marcus, A. W., et Fonstad, M. A. (2004). Passive optical remote sensing of river channel morphology and in-stream

habitat : Physical basis and feasibility. *Remote Sensing of Environment*, 93(4) :493–510.

[Leica, 2003] Leica (2003). *Leica Photogrammetry Suite OrthoBASE & OrthoBASE Pro User's Guide*.

[Lejot et al., 2007] Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., et Allemand, P. (2007). Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11) :1705–1725.

[Lesaignoux et al., 2007] Lesaignoux, A., Bailly, J., et Feurer, D. (2007). Small water depth detection from green lidar simulated full waveforms : application to gravel-bed river bathymetry. In *PSIP 2007, Jan. 31 - Feb. 2, Mulhouse, France*.

[Luchinin, 1996] Luchinin, A. G. (1996). Basic principles of imaging the underwater objects being observed through a ruffled surface. *Izvestiya Akademii Nauk Fizika Atmosfery I Okeana*, 32(2) :296–302.

[Lyzenga, 1978] Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17 :379–383.

[Malavoi, 1989] Malavoi, J. (1989). Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 315 :189–210.

[Malavoi et Souchon, 2002] Malavoi, J. et Souchon, Y. (2002). Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365/366 :357–372.

[Marcus, 2002] Marcus, A. (2002). Mapping of stream microhabitats with high spatial resolution hyperspectral imagery. *Journal of Geographical Systems*, 4 :113–126.

[Marcus et al., 2003] Marcus, A. W., Legleiter, C. J., Aspinall, R. J., Boardman, J. W., et Crabtree, R. L. (2003). High spatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in moutain streams. *Geomorphology*, 55 :363–380.

[Marcus, 2008] Marcus, W.A. ; Fonstad, M. (2008). Creating the international network of river observatory scientists (inros). In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria*.

[Mei, 2005] Mei, C. (2005). *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html.

[Melcher et al., 2002] Melcher, N. B., Costa, J., Haeni, F., Cheng, R., Thurman, E., Buursink, M., Spicer, K., Hayes, E., Plant, W., Keller, W., et Hayes, K. (2002). River discharge measurements by using helicopter-mounted radar. *Geophysical Research Letters*, 29(22) :2084, doi :10.1029/2002GL015525,.

[Mertes, 2002] Mertes, L. A. K. (2002). Remote sensing of riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47 :799–816.

[Mignet, 2001] Mignet (2001). http://avions.mignet.free.fr/francais/Balerit.htm (dernière consultation : 29 janvier 2008).

[Millar, 2008] Millar, D. (2008). Using airborne lidar bathymetry to map shallow river environments : a successful pilot on the colorado river. In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria*.

[Mills et al., 2003] Mills, J., Schneider, D., Barber, D., et Bryan, P. (2003). Geometric assessment of the Kodak DCS Pro Back. *Photogrammetric Record*, 18(103) :193–208.

[Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, 2004] Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (2004). Pêche sportive : Des marchés prometteurs pour les entreprises québécoises. In *La faune et la nature ÇA COMPTE !* Gouvernement du Québec.

[Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs, 2002] Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs (2002). Politique nationale de l'eau. http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/politique/politique-integral.pdf (dernière consultation : 21 avril 2008).

[Mobley, 1994] Mobley, C. D. (1994). *Light and Water*. Academic Press.

[Mount, 2005] Mount, R. (2005). Acquisition of Through-water Aerial Survey Images : Surface Effects and the Prediction of Sun Glitter and Subsurface Illumination. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(12) :1407–1415.

[Muller et al., 1993] Muller, E., Decamps, H., et Dobson, M. (1993). Contribution of Space Remote-Sensing to River Studies. *Freshwater Biology*, 29(2) :301–312.

[Murphy, 1949] Murphy, E. A. (1949). If anything can go wrong, it will.

[Muste et al., 2004] Muste, M., Xiong, Z., Schone, J., et Li, Z. (2004). Validation and extension of image velocimetry capabilities for flow diagnostics in hydraulic modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(3) :175–185.

[Newby, 2007] Newby, P. R. T. (2007). Technical terminology for the photogrammetric community. *The Photogrammetric Record*, 22(118) :164–179.

[Okamoto, 1982] Okamoto, A. (1982). Wave influences in two-media photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(9) :1487–1499.

[Orth, 1995] Orth, D. (1995). Food web influences on fish population responses to instream flow. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337/338/339 :317–328.

[Paquier, 2002] Paquier, A. (2002). *Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint Venant*. PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon 1.

[Perec, 1991] Perec, G. (1991). *Cantatrix sopranica L. et autres écrits scientifiques*, chapter Experimental Demonstration of the tomatotopic organization in the sprano (Cantatrix sopranica L.), page 117. Seuil.

[Pierrot-Deseilligny, 2007] Pierrot-Deseilligny, M. (2007). Micmac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique. *Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN*, 77.

[Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006] Pierrot-Deseilligny, M. et Paparoditis, N. (2006). A multiresolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from spot5-hrs stereo imagery. In *IAPRS vol XXXVI-1/W41 - ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites), Ankara, Turquie.*

[Plant et al., 2005] Plant, W. J., Keller, W. C., et Hayes, K. (2005). Measurement of river surface currents with coherent microwave systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6) :1242–1257.

[Priestnall et Aplin, 2006] Priestnall, G. et Aplin, P. (2006). Spatial and temporal remote sensing requirements for river monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 27(11) :2111–2120.

[Puech, 2000] Puech, C. (2000). *Mémoire de recherches : Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes.* PhD thesis, INPG Grenoble.

[Puech et al., 2008] Puech, C., Bailly, J., Le Coarer, Y., et Feurer, D. (2008). Morphologic segmentation of rivers from satellite high spatial resolution multi-spectral images. In *EGU 2008, 14-18 Apr., Vienna, Austria.*

[Puech et al., 2005] Puech, C., Deshayes, M., et Navarro, Y. (2005). Images, modèles et biomasse immergée. cartographie des herbiers de zostères en camargue à partir d'images spot-5. *Revue Internationale de Géomatique*, 15/2 :143–157.

[Rabaud, 2005] Rabaud, C. (2005). *Une nouvelle approche de mise en correspondance stéréoscopique dense par méthodes possibilistes.* PhD thesis, Université de Montpellier II.

[Rabotin, 2002] Rabotin, M. (2002). Base de données piscicoles du bassin versant de la durance : mise en place d'un système d'information géographique. Master's thesis, Université de Liège, Institut de Zoologie.

[Raclot, 2003] Raclot, D. (2003). *Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine.* PhD thesis, Université Montpellier II. Sciences de la Terre et de l'Eau, 286 p.

[Rinner, 1948] Rinner, K. (1948). Abbildungsgesetz und orientierungsaufgaben in der zweimedienphotogrammetrie. *Österrische Zeitschrift für Vermessungswesen*, Sonderheft 5.

[Rinner, 1969] Rinner, K. (1969). Two media photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 35(3) :275–282.

[Ritchie et Rango, 1996] Ritchie, J. et Rango, A. (1996). Remote sensing applications to hydrology - introduction. *Hydrological Sciences Journal*, 41 :429–431.

[Rivière, 2003] Rivière, J.-P. (2003). Réalisation d'une maquette virtuelle de la grotte mayenne sciences pour de la visite virtuelle 3d à travers d'un site web. Master's thesis, ESGT.

[Schmugge, 1987] Schmugge, T. (1987). Remote sensing applications in hydrology. *Review of Geophysics*, 25 :148–152.

[Schmugge et al., 2002] Schmugge, T. J., Kustas, W. P., Ritchie, J. C., Jackson, T. J., et Rango, A. (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances In Water Resources*, 25(8-12) :1367–1385.

[Schultz et Engman, 2000] Schultz, G. et Engman, E. (2000). *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Springer, Berlin, New York.

[Shan, 1994] Shan, J. (1994). Relative Orientation For 2-Media Photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 14(84) :993–999.

[Short, 1992] Short, T. (1992). The calibration of a 35mm nonmetric camera and the investigation of its potential use in photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 14(80) :313–322.

[SMAVD, 2008] SMAVD (2008). http://www.smavd.org/ (dernière consultation : 23 mai 2008).

[Sony, 2003] Sony (2003). *Digital Still Camera DSC F828*. Sony Corporation. http://www.sony.fr/view/ShowProduct.action?product=DSC-F828&site=odw_fr_FR&pageType=Overview&category=DCC+Digital+Still+Cameras (dernière consultation : 17 mars 2008).

[SpotImage, 2008] SpotImage (2008). http://www.spotimage.fr (dernière consultation : 23 mai 2008).

[Sugiura et al., 2005] Sugiura, R., Noguchi, N., et Ishii, K. (2005). Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems Engineering*, 90(4) :369–379.

[Tan, 1989] Tan, W. (1989). Positional errors in analytical through-water photogrammetry. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, 50 :73–87.

[Tewinkel, 1963] Tewinkel, G. (1963). Water depths from aerial photographs. *Photogrammetric Engineering*, 29(6) :1421–1428.

[Tomlins, 1983] Tomlins, G. F. (1983). Some Considerations in the Design of Low-Cost Remotely-Piloted Aircraft for Civil Remote-Sensing Applications. *Canadian Surveyor-Geometre Canadien*, 37(3) :157–167.

[Wanek et Wu, 2006] Wanek, J. M. et Wu, C. H. (2006). Automated trinocular stereo imaging system for three-dimensional surface wave measurements. *Ocean Engineering*, 33(5-6) :723–747.

[Warner, 2000] Warner, R. (2000). Gross channel changes along the durance river, southern france, over the last 100 years using cartographic data. *Regulated rivers : research & management*, 16 :141–157.

[Wasson, 2001] Wasson, J. (2001). Les questions de recherche posées par la directive cadre européenne sur l'eau : problématique pour les eaux de surface continentales. *Hydroécologie Appliquée*, 13(1) :1–19.

[Westaway et al., 2000] Westaway, R., Lane, S., et Hicks, D. (2000). The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(2) :209–226.

[Westaway et al., 2001] Westaway, R., Lane, S., et Hicks, D. (2001). Remote sensing of clear-water, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11) :1271–1281.

[Wildhaber et al., 2003] Wildhaber, M., Lamberson, P., et Galat, D. (2003). A comparison of measures of riverbed form for evaluating distributions of benthic fishes. *North American Journal of Fisheries Management*, 23(2) :543–557.

[Wright et al., 2000] Wright, A., Marcus, A. W., et Aspinall, R. (2000). Evaluation of multispectral, fine scale digital imagery as a tool for mapping stream morphology. *Geomorphology*, 33 :107–120.

[Zaar, 1948] Zaar, K. (1948). Zweimediaphotogrammetrie. *Österreische Zeitschrift für Vermessungswesen*, Sonderheft 4 :36.

[Zafrir et al., 1993] Zafrir, H., Pernick, A., Steinitz, G., Yaffe, U., et Grushka, A. (1993). Unmanned airborne system in real-time radiological monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*, 50(2-4) :295–299.

Annexes

Annexe A

Topographie terrain - Devis

Cemagref

Unité Hydrobiologie
Groupement d'Aix-en-Provence

Devis Morpho-hydraulique en Durance
Prix au Km linéaire

	nbr/jours	tarification horaire		total	
Terrain					
Scientifique confirmé	6	87.00 €	=	4,176.00 €	
Scientifique	6	64.00 €	=	3,072.00 €	
Technicien	21	39.00 €	=	6,552.00 €	
repas	30	15.25 €	=	3,660.00 €	

Véhicules	Nbr/Km	prix au km			
Camion	2380	0.86 €	=	2,046.80 €	
				Sous total HT	19,506.80 €

Exploitation des données
Calculs topographie morpho-hydraulique

	nbr/jours	tarification horaire			
Scientifique confirmé	7	87.00 €	=	4,872.00 €	
Scientifique	7	64.00 €	=	3,584.00 €	
Technicien	7	39.00 €	=	2,184.00 €	
				Sous total HT	10,640.00 €

TOTAL HT	30,146.80 €
TVA 19.60 %	5,908.77 €
TOTAL TTC	36,055.57 €

Tarification horaire Cemagref 2004

Annexe B

Equations de la photogrammétrie

B.1 Notations

O est le centre de projection, M_a le point terrain apparent, m un point image. c est la distance principale.

Dans le système de coordonnées terrain :

$$M_a = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix}, \quad O = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad \overrightarrow{OM_a} = \begin{pmatrix} X_a - X_0 \\ Y_a - Y_0 \\ Z_a - Z_0 \end{pmatrix}$$

Dans le système de coordonnées lié au capteur :

$$O = \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \eta_0 \\ c \end{pmatrix}, \quad m = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \overrightarrow{Om} = \begin{pmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c \end{pmatrix}$$

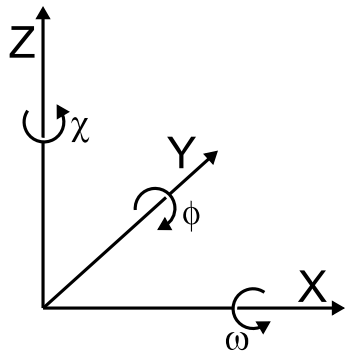


FIG. B.1 - *Définition des angles de rotation. Ordre des rotations : ω, puis ϕ, puis κ*

Matrice de passage de la base du repère capteur à la base du repère terrain (voir figure B.1) :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\phi\cos\kappa & -\cos\phi\sin\kappa & \sin\phi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\phi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\phi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\phi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\phi\sin\kappa & \cos\omega\cos\phi \end{pmatrix}$$

B.2 Equations

Dans le repère capteur, les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{OM_a}$ s'écrivent :

$$\overrightarrow{OM_a} = {}^tR \begin{pmatrix} X_a - X_0 \\ Y_a - Y_0 \\ Z_a - Z_0 \end{pmatrix} \tag{B.1}$$

La condition de colinéarité (m est l'image de $M_a \Leftrightarrow \overrightarrow{Om} = k \cdot \overrightarrow{OM_a}$)s'écrivent

$$\begin{pmatrix} \xi - \xi_0 \\ \eta - \eta_0 \\ -c \end{pmatrix} = k \cdot {}^tR \begin{pmatrix} X_a - X_0 \\ Y_a - Y_0 \\ Z_a - Z_0 \end{pmatrix}$$

soit

$$\begin{cases} \xi - \xi_0 = k\left[r_{11}(X_a - X_0) + r_{21}(Y_a - Y_0) + r_{31}(Z_a - Z_0)\right] \\ \eta - \eta_0 = k\left[r_{12}(X_a - X_0) + r_{22}(Y_a - Y_0) + r_{32}(Z_a - Z_0)\right] \\ -c = k\left[r_{13}(X_a - X_0) + r_{23}(Y_a - Y_0) + r_{33}(Z_a - Z_0)\right] \end{cases}$$

ce qui donne

$$\begin{cases} \xi = \xi_0 - c\dfrac{r_{11}(X_a - X_0) + r_{21}(Y_a - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z_a - Z_0)} \\ \eta = \eta_0 - c\dfrac{r_{12}(X_a - X_0) + r_{22}(Y_a - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z_a - Z_0)} \end{cases}$$

Annexe C

Réfraction - première approche : cas 2D surface plane

Ce cas correspond au calcul pour les points situés dans le plan vertical contenant les deux centres de projection, avec une surface d'eau horizontale. Ce cas présente l'avantage de pouvoir être résolu de manière analytique et donne une bonne idée des paramètres importants à considérer pour des simulations plus complexes.

C.1 Notations

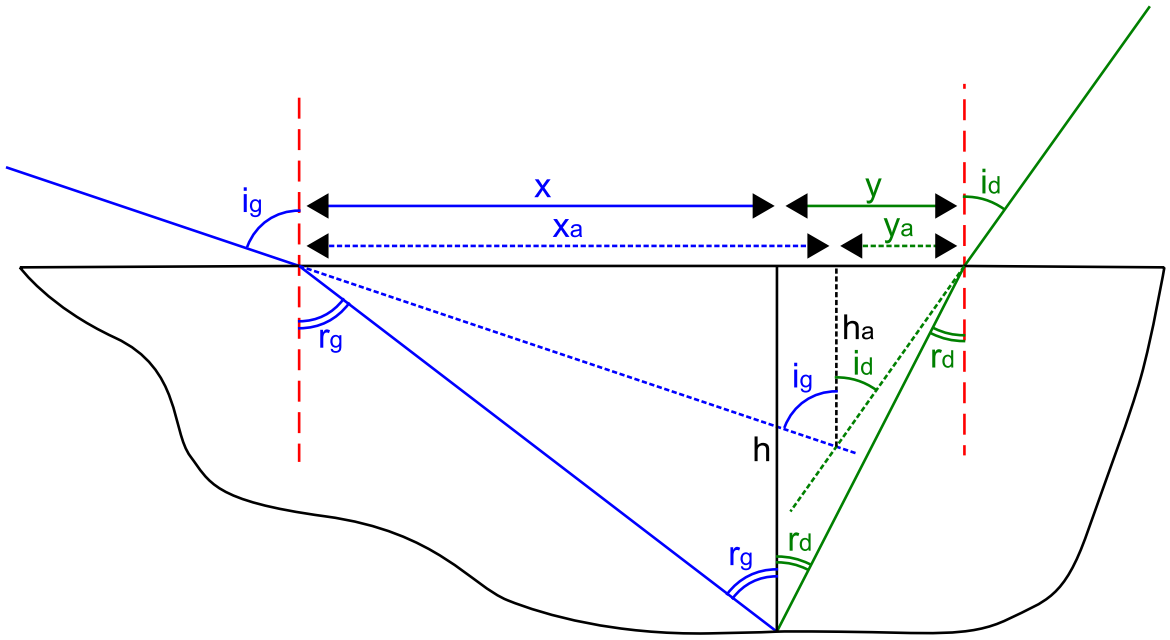


FIG. C.1 - *Notations utilisées*

C.2 Calculs

D'après les notations de la figure C.1, et selon les relations trigonométriques dans les 4 triangles rectangles dont les hypothènuses sont les parties sous-marines des rayons apparents et réels et dont les hauteurs sont les hauteurs d'eau, apparente h_a et réelle h, on a :

$$\begin{cases} x + y = x_a + y_a \\ \tan(r_g) = \dfrac{x}{h} \\ \tan(r_d) = \dfrac{y}{h} \\ \tan(i_g) = \dfrac{x_a}{h_a} \\ \tan(i_d) = \dfrac{y_a}{h_a} \end{cases}$$

Soit

$$\begin{cases} x + y = x_a + y_a \\ x = h\tan(r_g) \\ y = h\tan(r_d) \\ x_a = h_a\tan(i_g) \\ y_a = h_a\tan(i_d) \end{cases}$$

En conséquence

$$h\tan(r_g) + h\tan(r_d) = h_a\tan(i_g) + h_a\tan(i_d)$$

D'où, finalement[1] :

$$\frac{h_a}{h} = \frac{\tan(r_g) + \tan(r_d)}{\tan(i_g) + \tan(i_d)} \tag{C.1}$$

De même, on peut calculer le déplacement horizontal dx défini comme la différence $x - x_a$, que l'on ramène à la hauteur d'eau :

$$\frac{dx}{h} = \tan(r_g) - \frac{h_a}{h}\tan(i_g) \tag{C.2}$$

C.3 Application numérique

Pour des angles d'incidences compris entre 0 et 45 ° et pour un indice de réfraction relatif de l'eau par rapport à l'air de 1.33, les applications numériques des équations C.1 et C.2 donnent :

$$\frac{1}{1.59} \leq \frac{h_a}{h} \leq \frac{1}{1.33}$$
$$-0.03 \leq \frac{dx}{h} \leq 0.03$$

[1] En utilisant l'approximation d'une intersection des rayons apparents, [Tewinkel, 1963] propose un résultat de la même forme pour des points situés hors de ce plan

Une représentation graphique de ces valeurs en fonction des angles incidents gauche et droit peut être trouvée sur les figures C.2et C.3.

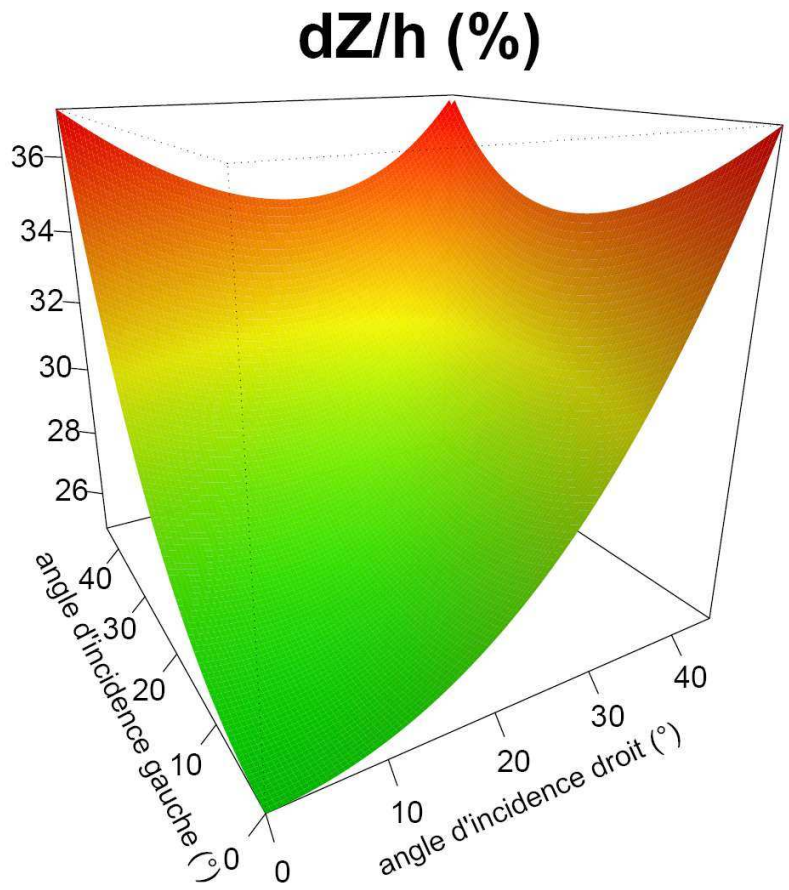


FIG. C.2 - *Déplacement altimétrique relatif dû à la réfraction en fonction des angles incidents gauche et droit*

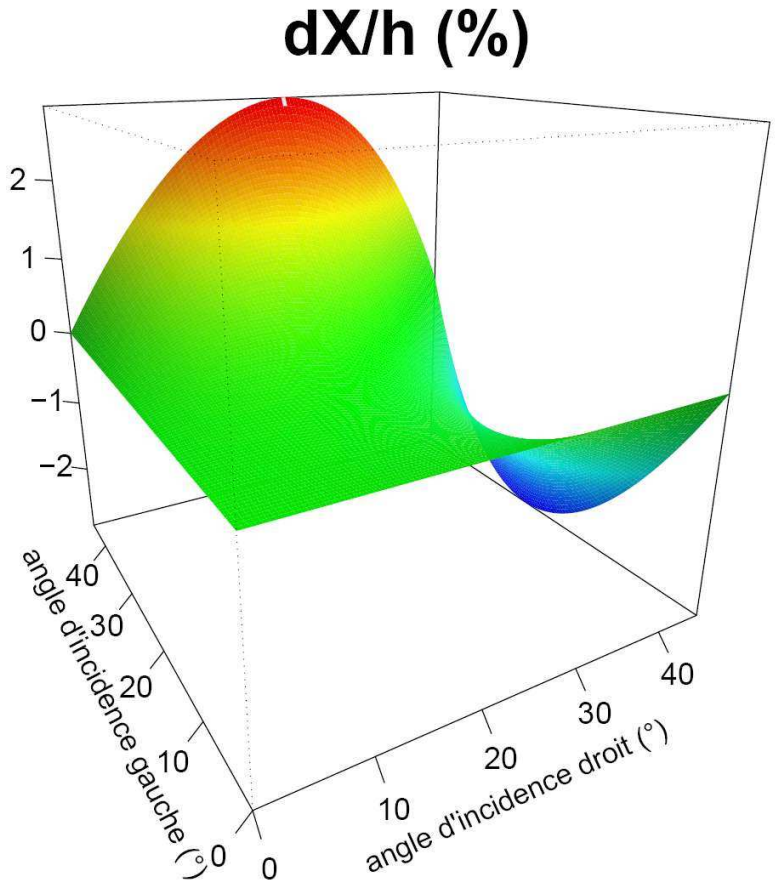


FIG. C.3 - *Déplacement planimétrique relatif dû à la réfraction en fonction des angles incidents gauche et droit*

Annexe D

Détermination du trajet d'un rayon lumineux entre deux points connus situés de part et d'autre d'un dioptre

D.1 Notations

D.2 Cas général

D'après la loi de Snell-Descartes, et selon les notations ci-dessus, on a :

$$\begin{cases} n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r) \\ (\overrightarrow{OE} \wedge \overrightarrow{EP}) \cdot \vec{N} = 0 \end{cases} \tag{D.1}$$

Il est possible de développer ces équations en utilisant la propriété des fonctions trigonométriques suivante :

$$\sin(i) = \sqrt{1 - \cos^2(i)} \text{ et } \sin(r) = \sqrt{1 - \cos^2(r)}$$

Or, comme $0 \leq i \leq \frac{\pi}{2}$ et $0 \leq r \leq \frac{\pi}{2}$, on a, par expression des produits scalaires :

$$\cos^2(i) = \frac{\left(\overrightarrow{OE} \cdot \vec{N}\right)^2}{OE^2 \left\|\vec{N}\right\|^2} \text{ et } \cos^2(r) = \frac{\left(\overrightarrow{EP} \cdot \vec{N}\right)^2}{EP^2 \left\|\vec{N}\right\|^2}$$

En combinant ces deux nouvelles équations avec la premiere (D.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} n_1 \sqrt{1 - \dfrac{\left(\overrightarrow{OE} \cdot \vec{N}\right)^2}{OE^2 \left\|\vec{N}\right\|^2}} = n_2 \sqrt{1 - \dfrac{\left(\overrightarrow{EP} \cdot \vec{N}\right)^2}{EP^2 \left\|\vec{N}\right\|^2}} \\ (\overrightarrow{OE} \wedge \overrightarrow{EP}) \cdot \vec{N} = 0 \end{cases} \tag{D.2}$$

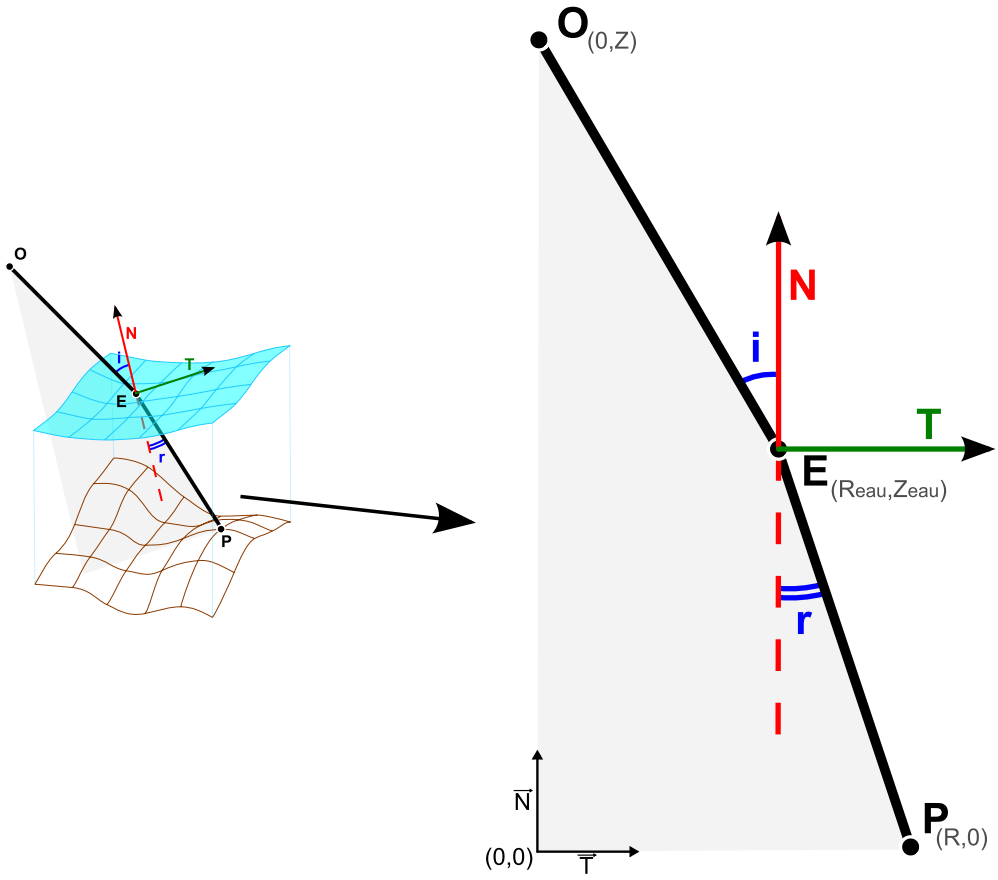


FIG. D.1 - *Notations utilisées - on se situe dans le plan de réfraction*

La détermination du trajet d'un rayon lumineux entre deux points connus situés de part et d'autre d'une interface séparant deux milieux est donc réduite à la détermination de la position du point E, de coordonnées (x, y, z). De plus, du fait de la coplanarité des rayons incidents et réfractés, le problème peut être réduit à un problème à deux dimensions par changement de repère vers le plan contenant ces deux rayons (figure D.1 à droite). D'un point de vue mathématique, il s'agit d'un système de 2 équations non linéaires à 2 inconnues $(x, y, z(x, y))$, que l'on obtient à partir du système (D.2) selon les notations suivantes :

$$E = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z(x,y) \end{pmatrix}, \vec{N} = \begin{pmatrix} -\dfrac{\partial z}{\partial x} \\ -\dfrac{\partial z}{\partial y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Dans le cas où les coordonnées de la tangente à l'interface s'expriment de manière simple, il est possible d'utiliser une autre manière d'écrire l'équation (D.1). En effet, en

utilisant les propriétés de fonctions cosinus et sinus selon lesquelles

$$\sin(i) = \cos(\frac{\pi}{2} - i) \text{ et } \sin(r) = \cos(\frac{\pi}{2} - r)$$

et l'expression du produit scalaire des vecteurs des rayons indicents et réfractés avec le vecteur tangent à la surface contenu dans le plan des rayons

$$\cos(\frac{\pi}{2} - i) = \frac{\left(\overrightarrow{OE} \cdot \vec{T}\right)}{OE\left\|\vec{T}\right\|} \text{ et } \cos(\frac{\pi}{2} - r) = \frac{\left(\overrightarrow{EP} \cdot \vec{T}\right)}{EP\left\|\vec{T}\right\|}$$

on obtient le système suivant, dont l'expression est plus compacte :

$$\begin{cases} n_1 \dfrac{\left(\overrightarrow{OE} \cdot \vec{T}\right)}{OE\left\|\vec{T}\right\|} = n_2 \dfrac{\left(\overrightarrow{EP} \cdot \vec{T}\right)}{EP\left\|\vec{T}\right\|} \\ (\overrightarrow{OE} \wedge \overrightarrow{EP}) \cdot \vec{N} = 0 \end{cases} \tag{D.3}$$

D.3 Cas d'une interface horizontale

Dans le cas d'une interface horizontale, les équations se simplifient. La coordonnée z du point E est une constante, égale à Z_{eau}. Le vecteur $\vec{N}$ est égal au vecteur $\vec{Z}$.

On effectue un changement de repère en choisissant pour origine la projection du centre optique (point O) dans le plan horizontal contenant le point terrain P. En travaillant dans le plan contenant la nouvelle origine, le centre optique et le point terrain, avec la coordonnée polaire R (figure D.1 à droite), on obtient les coordonnées suivantes :

$$O = \begin{pmatrix} 0 \\ Z \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} R_{eau} \\ Z_{eau} \end{pmatrix}, P = \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{N} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ et } \vec{T} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

La deuxième équation du système (D.3) est vérifiée (on travaille dans le plan) ; le système est donc réduit à l'équation :

$$\left(n_1(\overrightarrow{OE} \cdot \vec{T})EP\right)^2 = \left(n_2(\overrightarrow{EP} \cdot \vec{T})OE\right)^2$$

$$n_1{}^2\left((R - R_{eau})^2 + Z_{eau}{}^2\right) R_{eau}{}^2 = n_2{}^2(R_{eau}{}^2 + (Z_{eau} - Z)^2)(R - R_{eau})^2$$

En utilisant les notations $X = R_{eau}$ et $A = (Z - Z_{eau})^2$, on obtient :

$$n_1{}^2(R^2 - 2RX + X^2 + Z_{eau}{}^2)X^2 = n_2{}^2(R^2 - 2RX + X^2)^2(X^2 + A)$$

soit

$$n_1{}^2[X^4 - 2RX^3 + (R^2 + Z_{eau}{}^2)X^2] \\ = n_2{}^2[X^4 - 2RX^3 + (A + R^2)X^2 - 2ARX + AR^2] \tag{D.4}$$

d'où finalement

$$(n_1{}^2 - n_2{}^2)X^4 - 2(n_1{}^2 - n_2{}^2)RX^3 + \left[n_1{}^2(R^2 + Z_{eau}{}^2) - n_2{}^2(A + R^2)\right] X^2 + 2ARn_2{}^2X - n_2{}^2AR^2 = 0 \quad \text{(D.5)}$$

D.3.1 Existence et unicité de la solution

Si l'on pose

$$f(X) = (n_1{}^2 - n_2{}^2)X^4 - 2(n_1{}^2 - n_2{}^2)RX^3 + \left[n_1{}^2(R^2 + Z_{eau}{}^2) - n_2{}^2(A + R^2)\right] X^2 + 2ARn_2{}^2X - n_2{}^2AR^2 \quad \text{(D.6)}$$

On a

$$\begin{cases} f \text{ est polynomiale donc continue} \\ f(0) = -n_2{}^2AR^2 \leq 0 \\ f(R) = n_1{}^2R^2Z_{eau}{}^2 \geq 0 \end{cases}$$

On est donc assuré de l'existence d'une solution dans l'intervalle $[0, R]$. Un raisonnement par l'absurde, si le sens physique ne suffit pas à le faire, prouve que cette solution est unique dans le cas d'une interface horizontale placée entre l'objet (le point P) et le capteur (le point O). La seule solution valable est donc la racine positive telle que :

$$\begin{cases} \overrightarrow{OE} \cdot \vec{T} \text{ et } \overrightarrow{EP} \cdot \vec{T} \text{ sont de même signe} \\ 0 \leq X \leq R \end{cases}$$

D.4 Cas d'une interface sinusoïdale

Dans le cas d'une interface sinusoïdale, la mise en équation est basée sur les équations du cas général. On effectue la modélisation dans le plan $(\overrightarrow{R}, \overrightarrow{Z})$. On introduit de plus l'équation de la projection dans ce plan de la surface de l'eau selon les notations présentées sur la figure D.2 :

$$z = h + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - x_0)\right) \quad \text{(D.7)}$$

Avec une telle surface, on obtient pour les vecteurs $\vec{T}$ et $\vec{N}$ les coordonnées suivantes :

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix} \text{ et } \vec{N} = \begin{pmatrix} -\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

avec

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\pi A}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - x_0)\right)\right)$$

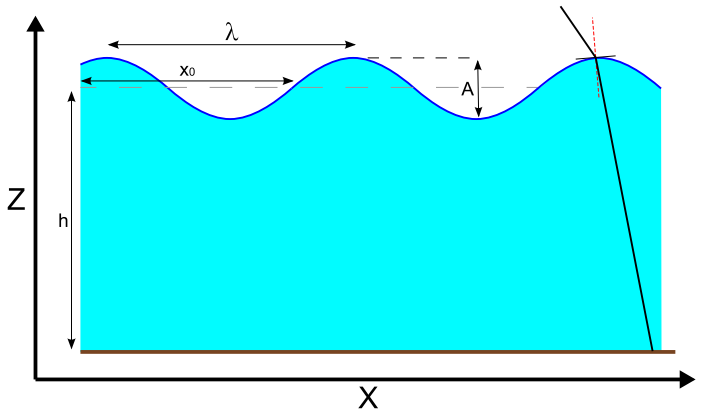


FIG. D.2 - *Paramètres physiques caractérisant la surface sinusoïdale*

Le développement du système (D.3) peut ensuite s'effectuer avec ces coordonnées. Le système conduit à la résolution d'une équation non linéaire à une inconnue. Il s'agit de trouver les racines d'une fonction de x qui s'annule pour un point (i) appartenant à la surface ; (ii) tel que les rayons lumineux passant par ce point suivent la loi de Snell-Descartes.

On fait figurer plus bas les résultats évoqués dans le texte obtenus à partir de ces modélisations.

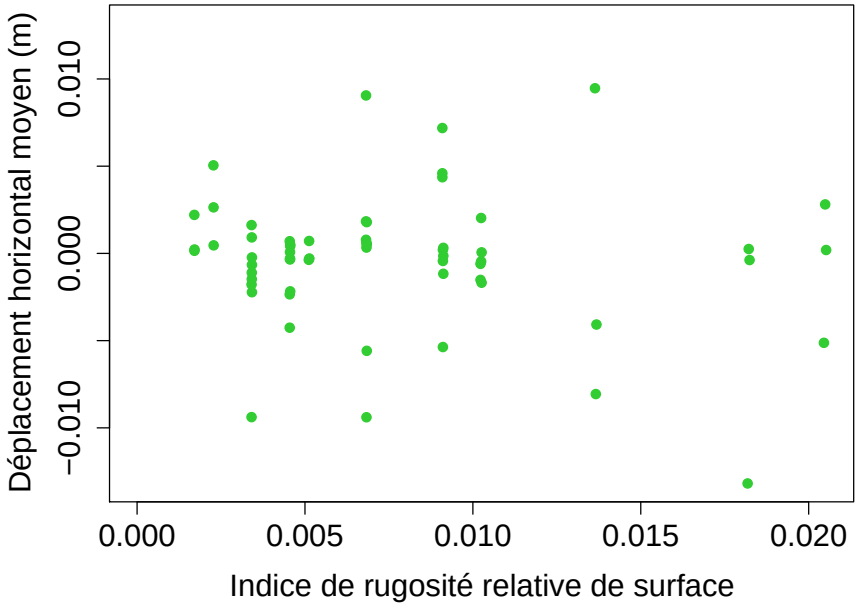


FIG. D.3 - *Déformations planes dues aux vagues. Déplacements horizontaux moyens pour chaque valeur de l'indice de rugosité de surface*

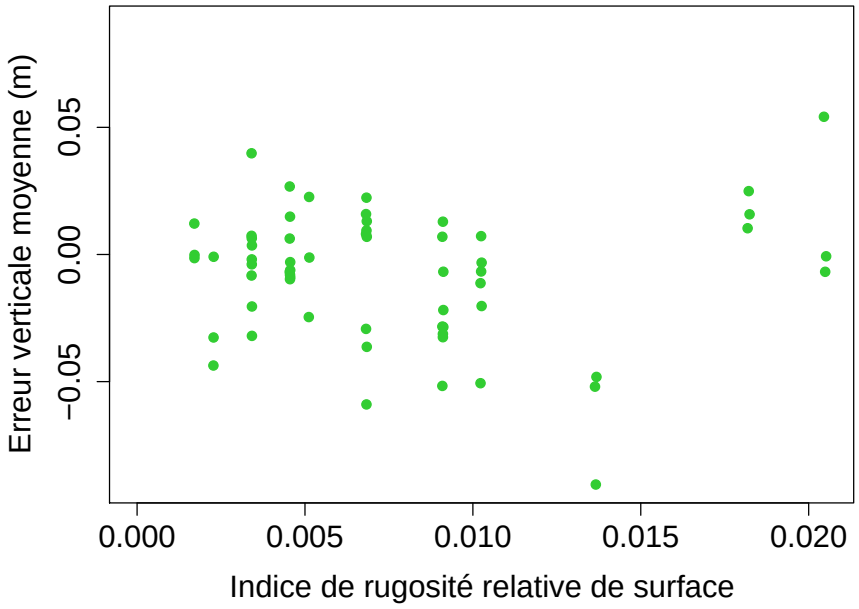


FIG. D.4 - *Influence des vagues sur le Z restitué. Erreur commise en considérant la surface comme plane.*

Calcul effectué pour la détection des traversées d'interface multiples et des occlusions pour une surface sinusoïdale

La figure D.5 illustre un cas d'occlusion d'une partie de la surface par une vague. Afin de détecter l'occurence de ces phénomènes, ainsi que des traversées multiples de l'interface, on s'intéresse à la variation de l'angle θ défini sur la figure D.5 par rapport à x. Partant de :

$$\tan\theta = \frac{x - -X_G}{z - Z_G}$$

On a

$$\frac{\partial\theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\arctan\left(\frac{x - -X_G}{z - Z_G}\right)\right)$$

Finalement,

$$\frac{\partial\theta}{\partial x} = \frac{(Z_G - z) + \frac{\partial z}{\partial x}(x - X_G)}{(Z_G - z)^2 + (x - X_G)^2}$$

Il y a occlusion lorsque $\frac{\partial\theta}{\partial x}$ est négatif. Le cas des traversées multiples peut être résolu de manière similaire en considérant le problème symétriquement par rapport à la surface de l'eau.

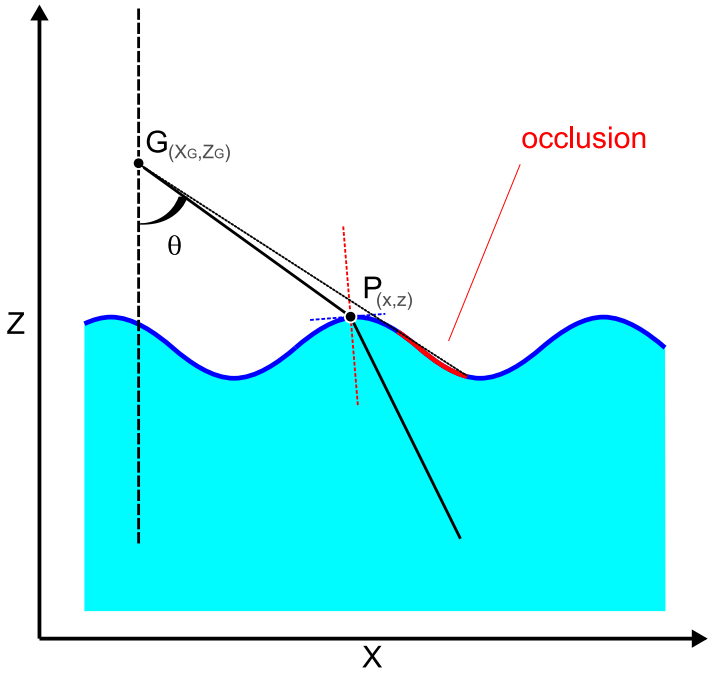


FIG. D.5 - *Phénomène d'occlusion dû à la présence de vagues*

Annexe E

Étalonnage du Sony DSC-F828

E.1 Étalonnage de l'appareil

E.1.1 Mode opératoire

On effectue des prises de vue stéréoscopique d'un polygone d'étalonnage, formé de mires dont la position est connue avec exactitude et grande précision. Le polygone utilisé dans notre cas est celui situé dans le parking souterrain de l'ENSG à Marne-La-Vallée (figure E.1). Il est constitué de 46 mires permanentes dans 3 plans (fixées sur les murs, les poteaux, et les poutres) plus 4 mires amovibles (disposées au sol).

FIG. E.1 - *Le polygone de l'ENSG à Marne-La-Vallée*

Il est recommandé d'effectuer les prises de vues de manière à couvrir l'espace image de la manière la plus homogène possible, en incluant les coins. Le nombre minimal de points de mesures stéréoscopiques est d'une centaine environ.

Nous avons utilisé 8 images formant 4 couples, pour un total de 330 points de mesures monoscopiques. L'espace image est échantillonné de manière moins dense dans les coins, ce qui aura pour conséquence un moins bon ajustement du modèle dans les diagonales de l'espace image.

E.1.2 Résultats

Les figures E.2 et E.3, citées dans la section 10.3.1, représentent graphiquement le résultat de l'étalonnage. Le certificat d'étalonnage produit par le programme Etalon.exe

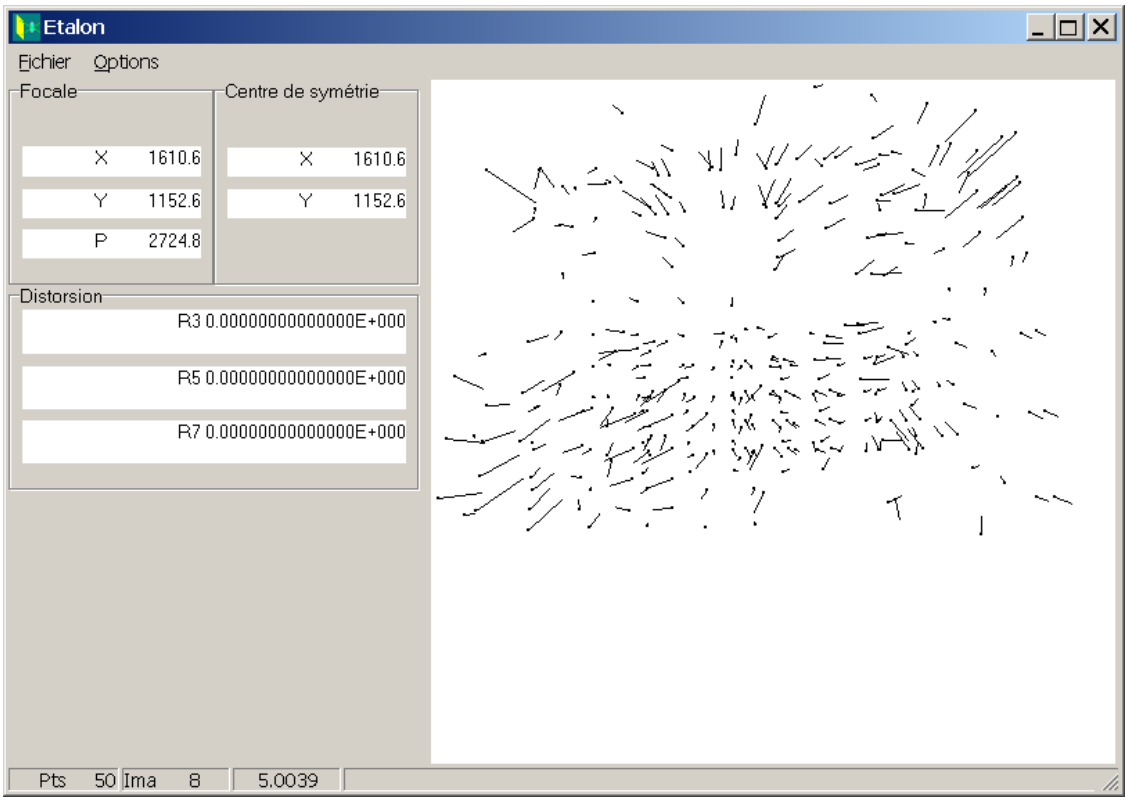


FIG. E.2 - *Résidus avant ajustement du modèle radial*

est le suivant (extrait du fichier etalonnage.lis) :

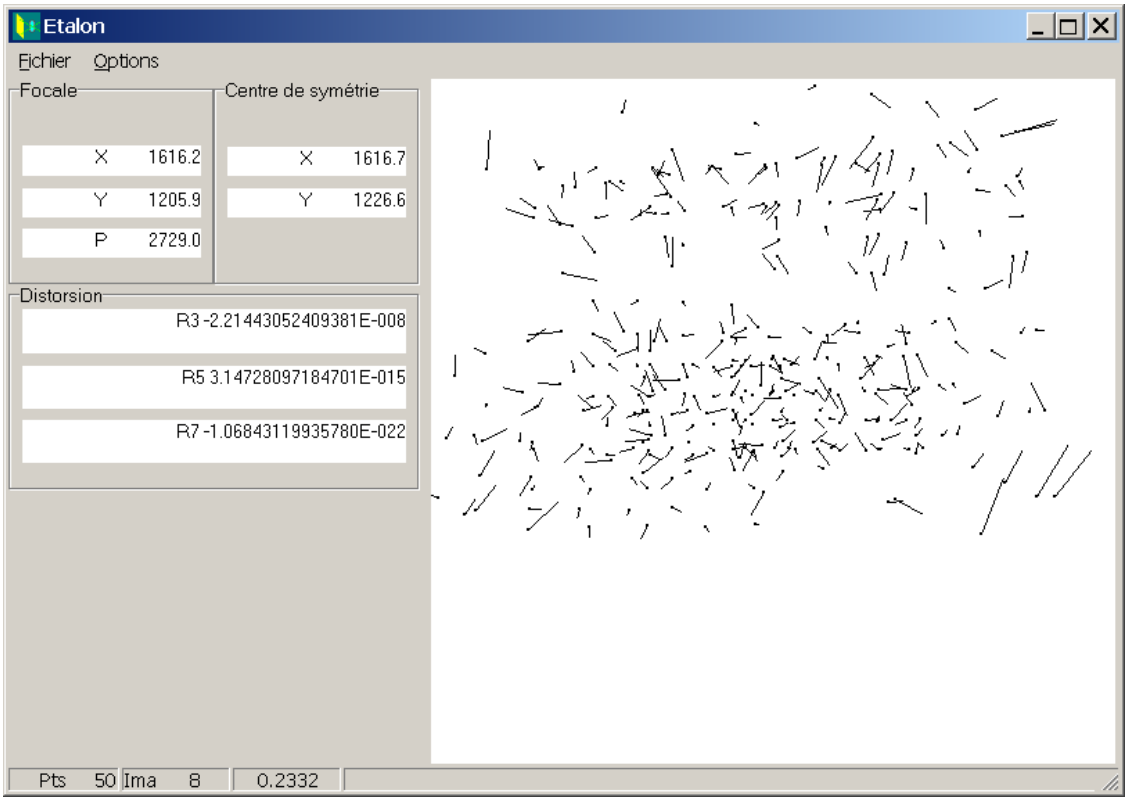


FIG. E.3 - *Résidus avec ajustement du modèle radial*

```
Focale     :
    1616.186    1205.929    2728.979
Distorsion :
-2.214431E-0008  3.147281E-0015 -1.068431E-0022
       1616.722        1226.619
EMQ        :       0.2229
\label{etalon.lis}
```

Ce certificat est fourni au Poivilliers E par l'intermédiaire d'un fichier .cam qui se présente sous la forme suivante [Egels, 1999] :

```
1616.186 1205.929 2728.979   1616.722 1226.6
-2.214432E-0008  3.147286E-0015 -1.068433E-0022
0
3264 2448
```

L'étalonnage détermine donc un modèle polynomial de la distorsion. Celle-ci représente près d'une centaine de pixels en bordure de champ. Ce modèle polynomial est représenté sur la figure E.4.

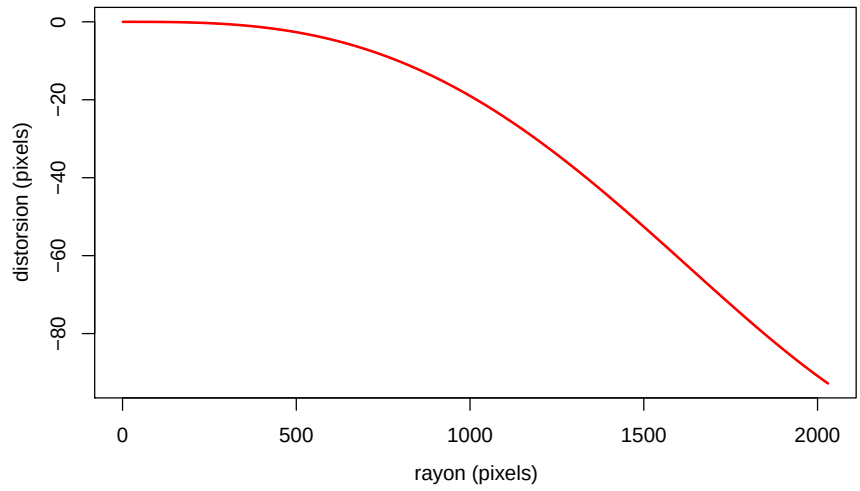


FIG. E.4 - *Résultat d'étalonnage : distorsion radiale de l'objectif*

E.2 Interfaçage avec le logiciel de Leica

Suite à l'étalonnage de l'appareil, on dispose d'un modèle polynomial radial de la distorsion, dont on connaît le centre de symétrie. Il est donc possible d'utiliser ce modèle pour simuler des mesures de distorsions radiales que l'on fournit en entrée du logiciel

de Leica.

On se fixe tout d'abord une taille arbitraire de pixel. On peut de cette manière exprimer les coordonnées du centre de distorsion dans le repère métrique utilisé par Leica. On calcule ensuite les valeurs de distorsion pour différents rayons en utilisant le modèle de distorsion déterminé auparavant. Le logiciel de Leica effectue ensuite son propre calcul (avec ses propres conventions) de modèle de distorsion radiale (voir figure E.5).

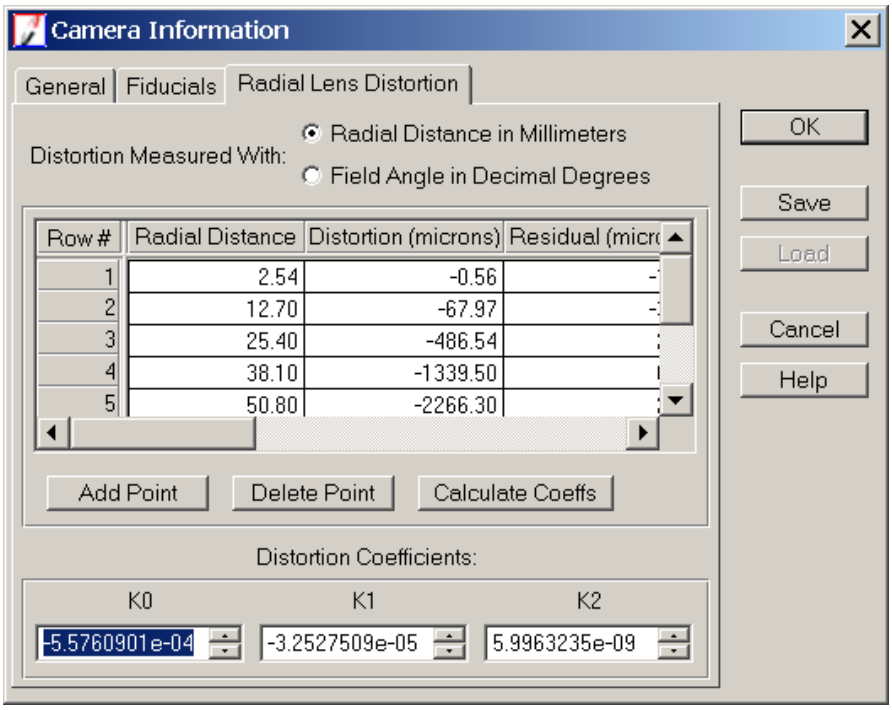


FIG. E.5 - *Entrée de mesures de distorsion radiale dans le logiciel Leica*