



HAL
open science

Analyse et traitement de trains d'ondes retour de LiDAR bathymétrique : application aux lames d'eau de faibles épaisseur.

T. Allouis

► **To cite this version:**

T. Allouis. Analyse et traitement de trains d'ondes retour de LiDAR bathymétrique : application aux lames d'eau de faibles épaisseur.. Sciences de l'environnement. 2007. hal-02590104

HAL Id: hal-02590104

<https://hal.inrae.fr/hal-02590104>

Submitted on 15 May 2020

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.



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

esiea

Analyse et traitement de trains d'ondes retour de LiDAR bathymétrique : application aux lames d'eau de faibles épaisseurs

Bathymetric LiDAR full waveform analysis and process:
an application to shallow waters

Tristan ALLOUIS

Soutenu le 20 décembre 2007

Jury :

<i>Maitre de stage</i>	<i>Président de jury</i>	<i>Tuteur pédagogique</i>
Jean-Stéphane BAILLY	Laurent BEAUDOIN	Guy DELAPORTE

Cemagref / UMR TETIS – Territoires, Environnement,
Téledétection et Information Spatiale

Maison de la Téledétection
500 rue Jean François BRETON
34093 Montpellier Cedex 5



Résumé

La connaissance de la bathymétrie et de la topographie des surfaces immergées est primordiale en vue d'une gestion durable des milieux aquatiques littoraux et continentaux. Par sa rapidité d'exécution, le LIDAR bathymétrique apparaît comme une technique particulièrement adaptée à la mesure de rivières. Cependant, s'il existe de nombreuses références sur la précision de cette technique sur les zones littorales, peu existent sur les eaux continentales.

L'étude présentée dans ce rapport a pris place au Cemagref, dans un contexte de gestion durable de eaux continentales, afin concilier conservation du patrimoine biologique et prise en compte des différents usages. Elle a pour objectif de se pencher sur un éventuel transfert de la technologie LIDAR vers les rivières. Elle est composée de quatre parties.

Dans la première, je présente mon travail sur la finalisation d'un outil de modélisation de trains d'ondes LIDAR bathymétrique. Cet outil, développé sous le logiciel R a permis d'estimer à 42 cm la profondeur d'eau minimale détectable par le LIDAR, et de montrer l'existence d'une rugosité de surface optimale pour la qualité de la mesure.

Dans la seconde je présente mon travail sur le développement d'outils de visualisation de données et trains d'ondes LIDAR bathymétrique dans le cadre d'un contrat avec le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). Ces données ont été acquises en 2005 sur le Golfe du Morbihan avec un capteur SHOALS et représentent pour nous une première approche de la mesure par LIDAR bathymétrique.

Dans la troisième, je me penche sur l'analyse du signal LIDAR que j'ai effectuée. Pour cela j'ai développé des algorithmes de traitement avec pour objectif de ré-estimer des profondeurs non détectées par les algorithmes du prestataire. Bien que les zones faiblement profondes n'étaient pas la priorité du levé, mes algorithmes améliorent de 80 cm la limite minimale détectée, avec la même précision de mesure.

Enfin, je présente les résultats de l'essai LIDAR que nous avons effectué sur 2 km du Gardon à l'aide du capteur suédois HawkEye. Ils font ressortir une capacité du système à cartographier le lit de la rivière avec une précision de 32,1 cm et une profondeur minimale détectable aux alentours de 40 cm.

Abstract

The knowledge of immerged surfaces bathymetry and topography is a crucial point for sustainable management of seashore and continental aquatic areas. Bathymetric LiDAR appears as an adapted technology for river measurement. Nevertheless, evenif it exists some references on this technique's precision on costal areas, few exist on continental waters.

This study took place in Cemagref, in a sustainable management of continental water context, in order to make compatible biodiversity conservation and human use. Its objective is to look forward a transfert of LiDAR technology to rivers. The study is parsed in four stages.

The first one is the finalisation of a bathymetric LiDAR waveforms modeling tool developed in the R software. With this tool, we deduced a minimum depth detectable by LiDAR at 42 cm, and bring to the light the existance of an optimal water surface roughness in terms of measure quality.

In a second time, I present my work on visualisation tools développement for bathymetric LiDAR data and waveforms in a contract framework with the French national hydrographic service (SHOM). Data were gathered in 2005 on the Golfe du Morbihan with a SHOALS system. It represents for us a first approach of bathymetric LiDAR measurement.

Third, I present my work on signal processing. I developed algorithms in order to re-estimate non detected depths. Whereas shallow waters detection was not the main objective of the Morbihan gathered, my algorithms enhanced the minimum depth detection limit of 80 cm, without reducing precision.

Then, we I introduce the LiDAR test we did on 2 km of Gardon river with an HawkEye system. It shows the LiDAR ability to map the river with a precision of 32,1 cm and a minimum detectable depth around 40 cm.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Jean-Stéphane Bailly, pour sa grande compétence scientifique et technique ainsi que pour sa sympathie. Grâce à lui mon stage s'est déroulé dans de très bonnes conditions.

Un merci particulier à Yann Le Coarer et à Pascal Languille de l'unité de Recherche Hydrobiologie du Cemagref d'Aix en Provence. Leur aide a été précieuse dans l'acquisition et l'exploitation des données de référence sur le Gardon.

Merci aussi à Guy Delaporte d'avoir accepté de parrainer mon stage et de m'avoir conseillé dans l'élaboration de ma soutenance.

Table des matières

I	Introduction	11
1	La structure d'accueil	13
1.1	La Maison de la Télédétection	13
1.2	L'UMR TETIS	14
1.3	Le Cemagref	14
2	Le projet	17
2.1	Cadre général	17
2.2	Le contrat BALAFF	18
2.3	Les objectifs de mes travaux	18
II	État de l'art	21
3	Généralités	23
3.1	La télédétection	23
3.2	La bathymétrie de rivières	23
4	Le LiDAR	27
4.1	Principe de fonctionnement	27
4.2	Spécificités du LiDAR bathymétrique	28
4.2.1	Parcours des faisceaux laser	29
4.2.2	Déduction de la profondeur	29
4.2.3	Géolocalisation des cibles	30
4.3	Les différents systèmes bathymétriques	30
4.4	Les applications	32
4.4.1	En zones côtières	32
4.4.2	Sur les lacs	32
4.4.3	Sur des rivières	32
III	Les dimensions techniques du travail du stagiaire	35
5	État des lieux	37
5.1	Déroulement	37
5.2	R-project	37
5.3	ESRI ArcGIS	38
5.4	Langage C	38

TABLE DES MATIÈRES

5.5	Le GPS différentiel (DGPS)	38
6	Modélisation de trains d’ondes	41
6.1	Réorganisation du programme	41
6.2	Utilisation de l’outil	43
6.2.1	Détermination de la profondeur minimale détectable	43
6.2.2	Influence de la rugosité de surface	43
7	Visualisation des données Morbihan	47
7.1	Présentation des données	47
7.2	Démarche	48
7.3	Détails de la démarche	49
7.3.1	Formatage de départ	49
7.3.2	Visualisation et extraction des points sous ArcGIS	51
7.3.3	Extraction des signaux correspondants aux points exportés	51
7.3.4	Visualisation du transect avec les signaux	52
7.4	Choix des transects	52
8	Traitement du signal	55
8.1	Méthode par combinaison	55
8.1.1	Déroulement de l’algorithme	55
8.1.2	Résultats	56
8.2	Méthode par approximations gaussiennes	58
8.2.1	Déroulement de l’algorithme	58
8.2.2	Résultats	59
8.3	Performances du traitement livré	60
8.4	Limites du traitement	60
8.5	Récapitulatif des résultats des traitements	60
8.6	Influence de la turbidité sur le signal	62
9	Levés sur le Gardon	65
9.1	Choix du site d’étude	65
9.2	Travail préliminaire	66
9.3	Position de la surface de l’eau	66
9.4	Topographie du fond	67
9.5	Analyse des données	68
9.5.1	Aspect général	68
9.5.2	Densité de points	68
9.5.3	Répartition de l’erreur	68
IV	Les dimensions humaines et managériales internes à l’organisme d’accueil	75
10	L’organisation de la recherche publique	77
10.1	Composition d’une unité de recherche	77
10.2	Affiliation de l’unité	77
10.3	Financement de l’unité	78
10.4	Valorisation des travaux de recherche	78
10.5	Évaluation de la recherche	78

11 Le positionnement stratégique du Cemagref	79
11.1 Contexte	79
11.2 Partenariats	80
11.3 Production et diffusion de connaissances	80
11.4 Ressources humaines	80
11.5 Avenir	81
V Conclusion	83
Bibliographie	87
VI Annexes	89
A Manuel de l’outil de simulation	91
B Article soumis à la revue de la SFPT	101
C Poster présenté au 2nd <i>space for hydrology workshop</i>	109
D Article soumis au 2nd <i>space for hydrology workshop</i>	111
E Manuel de l’outil de visualisation	121
F Rapport sur la qualité des données LiDAR Morbihan	131

Première partie
Introduction

Chapitre 1

La structure d'accueil

J'ai effectué mon stage à la Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon au sein d'une unité de recherche pour le compte du Cemagref¹.

1.1 La Maison de la Télédétection



Ce bâtiment a été créé en 1994 avec l'aide de l'Union Européenne sur une volonté de l'État et de la Région de regrouper géographiquement des équipes de recherche en géomatique. La Maison de la Télédétection abrite aujourd'hui plusieurs équipes issues de quatre organismes de recherche : le Cemagref, l'ENGREF², le CIRAD³ et l'IRD⁴. Cela constitue une cinquantaine de personnes permanentes et une vingtaine de personnes en séjour de moyenne ou longue durée.

La Maison de la Télédétection a un double objectif :

1. Développer des méthodes et des outils utilisant des informations géographiques afin d'apporter un meilleur appui aux politiques publiques et aux grandes conventions internationales.
2. Devenir un pôle d'excellence de recherche appliquée en télédétection et systèmes d'informations géographiques de dimension européenne et internationale, et attirer ainsi de nouvelles compétences dans ce domaine.

¹Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

²École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

³Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

⁴Institut de Recherche pour le Développement

1.2 L'UMR TETIS



Mon stage donc s'est déroulé à la Maison de la Télédétection au sein d'une unité mixte de recherche (UMR) : l'UMR TETIS⁵. Cette unité rassemble 60 agents permanents issus de différentes équipes du Cemagref, de l'ENGREF, et du CIRAD, ainsi qu'une vingtaine de doctorants et une dizaine d'agents sous contrats.

Les recherches de l'UMR TETIS s'organisent autour de quatre axes :

- *Structures spatiales et dynamiques des systèmes agri-environnementaux et territoriaux* dont l'objectif est de développer des méthodes d'analyse et de modélisation afin d'étudier spatialement et temporellement des systèmes agricoles, environnementaux et territoriaux.
- *Télédétection, Acquisition et traitement de données spatialisées sur les systèmes agro-environnementaux et les territoires* dont l'objectif est de développer les méthodes d'acquisition de données par télédétection satellitale ainsi que par des capteurs embarqués, et d'élaborer des méthodes de construction d'informations agronomiques à partir de ces données.
- *Ingénierie des Systèmes d'Information* dont l'objectif est concevoir et développer des systèmes d'information pour des acteurs sur des problématiques de gestion environnementale et territoriale.
- *Accompagnement du Développement territorial et place des Systèmes d'Information* dont l'objectif est de développer des concepts et des méthodes d'utilisation de données afin de diagnostiquer le développement territorial ou la gestion environnementale, et analyser l'impact de ces méthodes sur les acteurs et leurs modes de gestion.

1.3 Le Cemagref



Mon stage a été financé par le Cemagref. C'est un établissement public à caractère scientifique et technologique, sous la double tutelle des ministères en charges de la Recherche et de l'Agriculture dont le budget 2007 est de 88,9 M€.

Ses compétences se situent dans la gestion des eaux et des territoires dont les 28 équipes de recherche se répartissent en 5 départements scientifiques :

- Ressources en eau, usages et risques;

⁵TETIS : Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

- Milieux aquatiques, qualité et rejets;
- Gestion des territoires;
- Écotechnologies et agrosystèmes;
- Méthodes pour la recherche sur les systèmes environnementaux (Direction scientifique).

Les objectifs de chaque département sont les mêmes, à savoir de produire des connaissances nouvelles et des innovations techniques à destination des gestionnaires, des décideurs et des entreprises pour apporter une expertise en gestion des ressources, en aménagement et en utilisation de l'espace (cf. FIG. 1.1). Les 1 350 employés sont répartis sur 9 sites (cf. FIG. 1.2) et une antenne en Martinique, chaque site pouvant travailler dans plusieurs départements scientifiques.



FIG. 1.1 – Les missions du Cemagref.
 Source : <http://www.cemagref.fr>

Plus particulièrement, le site de Montpellier compte 100 personnes permanentes dont 60 ingénieurs et chercheurs, ainsi qu'une vingtaine de doctorants et une cinquantaine de stagiaires chaque année.

Ses activités se décomposent selon 5 unités de recherche, dans les départements :

- Ressources en eau, usages et risques;
- Milieux aquatiques, qualité et rejets;
- Écotechnologies et agrosystèmes;
- Méthodes pour la recherche sur les systèmes environnementaux.

Dans ces axes d'action, le Cemagref de Montpellier apporte ses compétences aux entreprises, aux bureaux d'études et d'ingénierie, ainsi qu'aux administrations et aux collectivités territoriales. Son objectif est de les aider à répondre aux problématiques de la zone méditerranéenne, à savoir la gestion de l'eau, la gestion agricole et forestière, et la protection des territoires fragilisés par la pression humaine.



FIG. 1.2 – Les différents sites du Cemagref.
Source : <http://www.cemagref.fr>

Chapitre 2

Le projet

Durant mes cinq années d'études à l'**esiea**, j'ai cherché à appliquer mes compétences informatiques à un domaine proche de l'agriculture ou de l'environnement. Les stages que j'ai effectués (stage ouvrier, stage technique et mission à l'étranger) ont donc naturellement pris place dans le domaine agricole. Ainsi, ces stages puis ma spécialisation de cinquième année en traitement du signal et de l'image m'ont progressivement ouvert des portes.

Ce stage au Cemagref se situe dans la lignée de ce que je cherchais : un secteur lié à l'agriculture et l'environnement et une thématique intéressante de recherche sur une technologie nouvelle et prometteuse qu'est le LIDAR (cf. chapitre 4, page 27). L'objectif du stage était d'analyser et traiter des données issues de levés LIDAR bathymétrique¹.

2.1 Cadre général

Mon stage s'est déroulé dans le cadre du programme national de télédétection spatiale (PNTS), co-financé en partie par le CNRS et l'IGN. L'objectif de ce programme est de développer l'utilisation de la télédétection spatiale pour l'étude de la Terre en soutenant :

- des études exploratoires pour des instruments qui pourraient être placés en orbite dans le futur ;
- des études de physique de la mesure, y compris la modélisation du bilan énergétique des sols, de la végétation, de l'océan ou de l'atmosphère ;
- le développement de nouvelles méthodes de traitement pour des instruments déjà lancés ;
- la caractérisation données satellitaires par comparaison avec des données terrestres ;
- une utilisation particulièrement originale de l'observation spatiale pour une application thématique.

Au sein de ce programme national a émergé le projet *Bathymétrie et topographie des surfaces continentales et littorales immergées par télédétection aéroportée* mené à l'UMR TETIS pour une durée de 3 ans s'étalant de décembre 2004 à janvier 2007. L'idée de ce projet est d'étudier les différentes techniques

¹Qui mesure des hauteurs d'eau

pouvant permettre une amélioration de la connaissance des milieux aquatiques littoraux et continentaux. En effet, les techniques actuelles présentent plusieurs limitations en terme de couverture spatiale, de facilité de mise en oeuvre selon l'accessibilité des différents milieux, de coût, et de temps.

Concrètement, ce projet s'intéresse à plusieurs techniques (Images multi- et hyperspectrales, photogrammétrie, LiDAR bathymétrique) permettant de cartographier des rivières de faible profondeur (cf. section 3.2, page 23). Ces rivières ne pouvant ni être sondées à l'aide de la technique SONAR² à cause de leur caractère non-navigable, ni mesurées à la main en raison de la charge des campagnes de terrains.

L'intérêt d'une caractérisation complète d'un milieu est d'apporter de la précision dans la modélisation des écosystèmes et des hydrosystèmes, ainsi que dans la cartographie en vue d'études approfondies.

2.2 Le contrat BALAFF

Dans le cadre du PNTS et du projet *Bathymétrie et topographie des surfaces continentales et littorales immergées par télédétection aéroportée* un contrat de recherche a été signé avec le SHOM³ : le contrat *Bathymétrie Laser par faibles fonds* (BALAFF).

La finalité du contrat BALAFF, issu de problématiques communes aux deux signataires, est de déduire des stratégies de levés par laser bathymétrique. Pour cela, le contrat prévoit une analyse comparative des données LiDAR et SONAR ainsi qu'une quantification des erreurs de mesure dues à différents facteurs que sont des faibles fonds, des eaux turbides, ou des forts courants.

Pour mener à bien cette étude, le SHOM a fourni des jeux de données LiDAR acquis sur le Golfe du Morbihan à des dates et sur des sites représentatifs de nos problématiques. Bien que le Cemagref s'intéresse essentiellement aux zones immergées continentales, ces données représentent une très bonne base de travail.

2.3 Les objectifs de mes travaux

Mes travaux se sont articulés autour du projet PNTS (cf. section 2.1, page 17). La majorité a pris place dans le cadre du contrat BALAFF, mais j'ai aussi travaillé sur la bathymétrie de rivières avec l'opportunité que nous avons eu d'obtenir nos propres données LiDAR.

Dans le cadre du contrat BALAFF, je devais participer à la qualification des données ainsi qu'au développement d'outils de visualisation des trains d'ondes. Pour le levé LiDAR sur rivières, j'ai été responsable de la mission. Mon rôle a été de coordonner l'acquisition LiDAR effectuées par une entreprise suédoise, et d'organiser les levés de terrain nécessaires à l'acquisition de données de référence. Enfin, pour répondre au devoir de communication sur mes travaux, j'ai participé

²Un Sonar (acronyme de sound navigation and ranging) est un appareil utilisant les propriétés particulières de la propagation du son dans l'eau pour détecter et situer les objets sous l'eau. Il peut être embarqué sur un bateau.

³Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

à l'élaboration de deux communications pour un congrès ainsi qu'à un article pour une revue sur la modélisation d'un train d'ondes LiDAR.

Deuxième partie

État de l'art

Chapitre 3

Généralités

3.1 La télédétection

La télédétection désigne la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. On peut par exemple utiliser un avion, un satellite, un engin spatial ou encore un bateau avec divers instruments permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement. Parmi les instruments les plus courants, dont la distance au sol varie de quelques mètres à 40 000 km d'altitude, on peut citer les appareils photographiques, les radars, les sonars ainsi que les lasers.

On distingue deux grandes familles de capteurs :

- **Les capteurs passifs** qui reçoivent de l'énergie sans en avoir émis, tels les appareils photographiques. Ils captent l'énergie réfléchie ou émise par la terre, dans une bande allant de l'ultraviolet (de longueur d'onde d'1 nm) jusqu'à l'infrarouge (100 μm). (cf. FIG. 3.1)
- **Les capteurs actifs** qui émettent de l'énergie dans une bande de fréquence donnée et la récupèrent après qu'elle se soit réfléchie sur la cible. On peut citer comme exemple le RADAR (1 mm à 1 m) et le LIDAR (entre 0.3 μm et 10 μm).

L'acquisition de données par télédétection a pour objectif la production de cartes ou de modèles numériques de terrain en vue d'étudier la topographie, la météorologie ou la nature d'un milieu, ainsi que leur évolution dans le temps. Les applications les plus courantes de la télédétection sont la météorologie et le suivi de la végétation ou de l'urbanisme.

3.2 La bathymétrie de rivières

L'établissement de cartes de la bathymétrie est primordial pour la navigation en milieu littoral. C'est une des raisons pour lesquelles le SHOM s'intéresse au LIDAR bathymétrique (cf. section 2.2, page 18). Le Cemagref s'intéresse quant

à lui aux eaux continentales pour plusieurs raisons.

En rivières, la connaissance du fond est un des paramètres essentiels pour les calculs de flux hydrauliques et les mesures de débits. En la couplant à un modèle hydraulique (vitesses, pentes, matières en suspension), elle permet de définir des zones d'habitats d'invertébrés aquatiques et de poissons. Ces zones vont alors permettre aux hydro-écologues d'identifier et de préciser les liens entre l'habitat physique et l'expression biologique des peuplements. Ces connaissances sont nécessaires à une gestion équilibrée des milieux et des espèces afin de concilier conservation du patrimoine biologique et prise en compte des différents usages.

La connaissance du fond de la rivière est d'autre part importante afin de mettre en valeur des changements géomorphologiques, tel le suivi temporel des flux sédimentaires et des mécanismes d'érosion, pour appuyer une démarche de gestion durable de la rivière et des activités qui y sont implantées.

Dans le cas d'une rivière non accessible aux sonars, les mesures de profondeur par sondage manuel sont longues, coûteuses en matériel et en effectifs, voire parfois dangereuses. La télédétection apporterait une mesure quasi immédiate de la géométrie du lit du cours d'eau. Plusieurs techniques sont étudiées comme l'imagerie multi- et hyperspectrale [Lyon *et al.*, 1992], la photogrammétrie [Feurer *et al.*, 2007] et le LIDAR bathymétrique [Hildale et Raff, 2007] [Kinzel *et al.*, 2007].

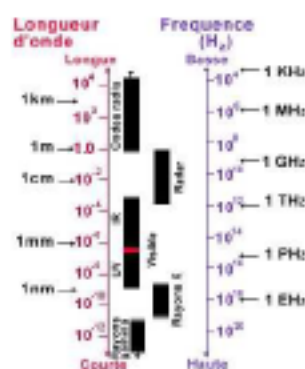


FIG. 3.1 – Le spectre électromagnétique.

Source : Wikipedia / commons.wikimedia.org

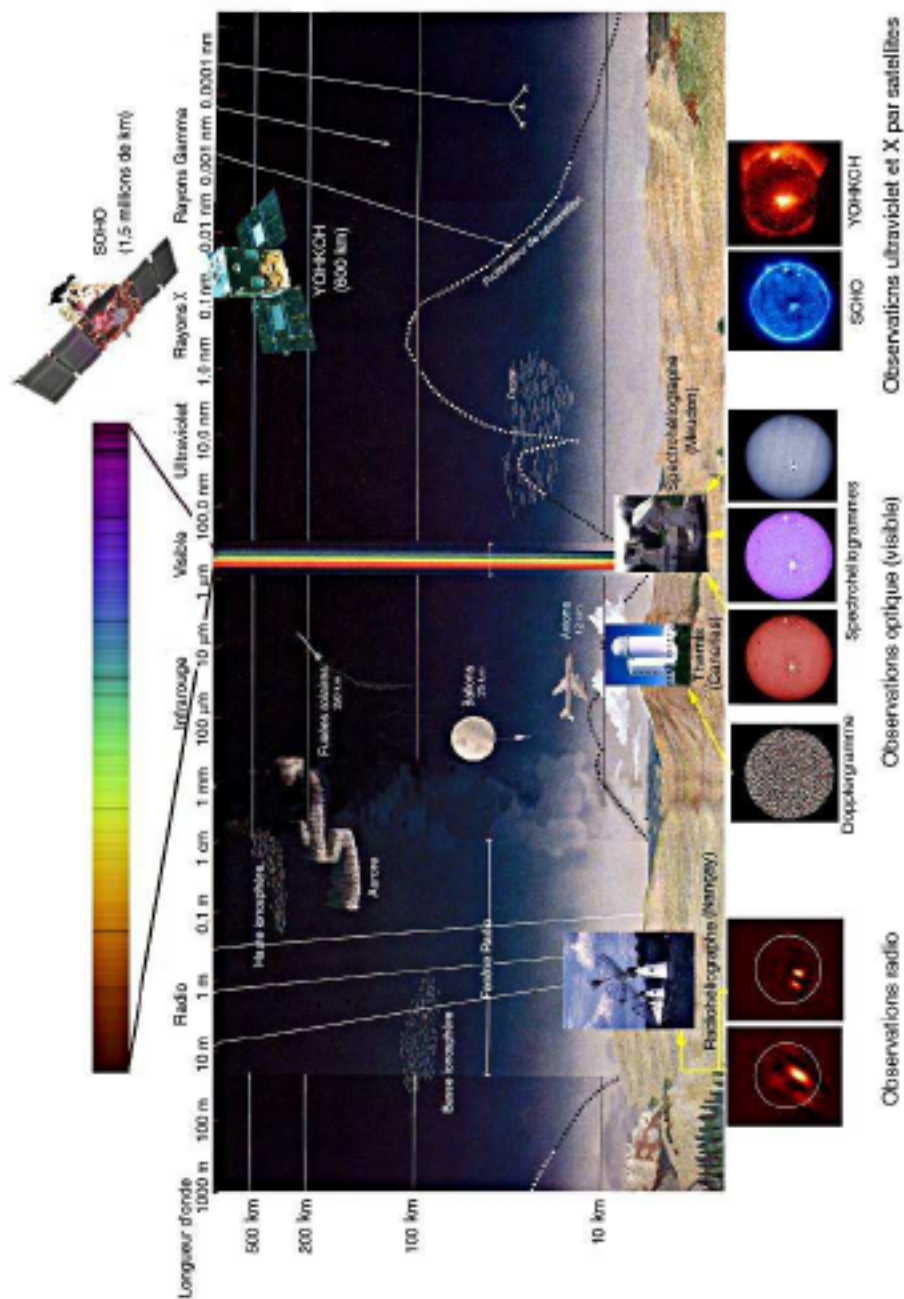


FIG. 3.2 – Exemples de longueurs d'ondes et d'altitude de travail.

Source : <http://www.lesat.org/fr>

Chapitre 4

Le LiDAR

Le LiDAR, acronyme de *ligh detection and ranging* est un système actif (cf. section 3.1, page 23) qui fonctionne sur le principe d'une émission/reception d'impulsions lumineuses. Apparu dans les années 70, il opère dans le domaine spectral du visible, ultraviolet et infrarouge (cf. FIG. 3.1).

4.1 Principe de fonctionnement

Le LiDAR est un système composé d'une diode chargée d'émettre une onde laser, d'un télescope qui collecte l'onde rétrodiffusée et d'une chaîne de traitement qui quantifie le signal reçu (cf. FIG. 4.1).

Pouvant être aéroportés — traditionnellement les LiDAR topographiques et bathymétriques —, terrestres ou embarqués sur des satellites le LiDAR permet de déduire diverses informations selon le récepteur utilisé et l'analyse du signal effectuée :

- Les LiDAR télémètres mesurent la distance entre l'émetteur et la cible ;
- Les LiDAR à absorption différentielle (DIAL) mesurent des concentrations chimiques (ozone, vapeur d'eau et polluants notamment) dans l'atmosphère ;
- Les LiDAR à effet Doppler qui permettent de déduire la vitesse d'une cible.

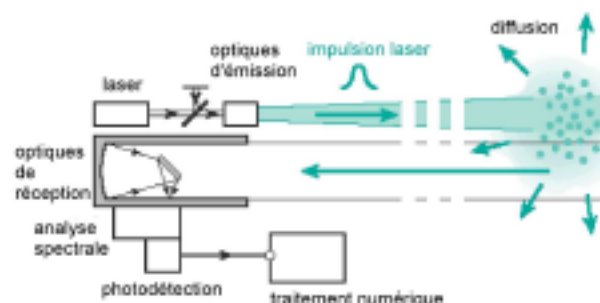


FIG. 4.1 – Principe du LiDAR.

Source : [10], p. 117, sous licence CC BY-SA

Il existe trois grandes familles LiDAR :

Les LiDAR atmosphériques. Ils fonctionnent avec de puissantes impulsions (de l'ordre de 100 à 400 mJ), émises depuis et sol ou un satellite.

Ils utilisent plusieurs longueurs d'ondes — par exemple 1.06 μm , 351 nm et 532 nm pour le AT LiDAR (cf. FIG. 4.2) — selon la nature des gaz ou particules que l'on cherche à étudier.

Les LiDAR topographiques. Ils fonctionnent avec des impulsions de faible puissance (de l'ordre de quelques mJ) et permettent de mesurer leur distance par rapport à leur cible.

De longueur d'onde située dans l'infrarouge (1064 nm), ils ne sont pas dangereux pour l'œil humain insensible à cette longueur d'onde. Ils sont aussi moins réactifs au bruit car la réflexion du rayonnement solaire dans ce domaine est réduite.

Enfin, la forte réactivité de la végétation à l'infrarouge permet au LiDAR topographique d'être très utilisé en aménagement et planification du territoire, en géomorphologie et géologie ainsi que dans l'étude de couvert forestier.

Les LiDAR bathymétriques. Leur fonctionnement est détaillé dans la section 4.2.

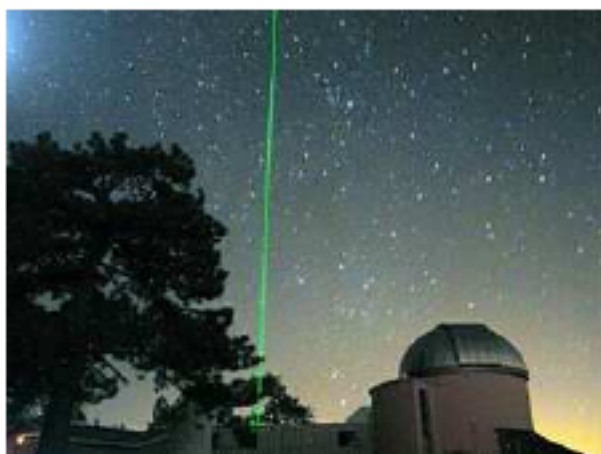


FIG. 4.2 – Le LiDAR atmosphérique *Aerosol and Temperature Lidar* (AT Lidar) de la NASA sur le site de Table Mountain Facility, Canada.

Source : <http://photojournal.nasa.gov>

4.2 Spécificités du LiDAR bathymétrique

Le LiDAR bathymétrique permet de positionner la surface et le fond de l'eau. Pour cela, il émet à une puissance d'environ 5 mJ deux faisceaux laser à partir d'une même impulsion : un faisceau vert de longueur d'onde de 532 nm et faisceau infrarouge à 1064 nm.

4.2.1 Parcours des faisceaux laser

La particularité du faisceau vert est sa capacité à traverser l'eau. En effet, cette dernière dispose d'une fenêtre de transparence pour des longueurs d'ondes situées autour de 500 nm.

Lors de la rencontre avec la surface une partie du signal vert se réfléchit et l'autre pénètre donc dans l'eau. Tout au long du parcours dans la colonne d'eau le laser se diffuse puis se réfléchit sur le fond et effectue le trajet inverse jusqu'au récepteur. Ce dernier reçoit donc deux pics d'énergie, l'un correspondant à la réflexion sur la surface et l'autre à celle sur le fond, ainsi qu'une composante issue de la diffusion le long de la colonne d'eau (cf. FIG. 4.3).

Au passage du signal vert dans la colonne d'eau une faible partie de l'énergie est aussi rétrodiffusée en changeant de longueur d'onde. C'est le phénomène Raman dû à des interactions de la lumière avec certaines molécules présentes dans l'eau. Il a pour résultat la diffusion de lumière dans le rouge (647 nm) [Pe'eri et Philpot, 2007].

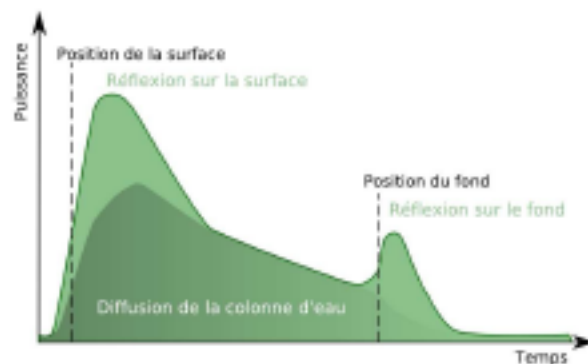


FIG. 4.3 – Signal retour de l'impulsion laser verte.

Modélisation - Travaux - Alliance

Le faisceau infrarouge permet quant à lui une caractérisation précise de la position de la surface car il s'y réfléchit presque intégralement. Au niveau du récepteur, on obtient donc un seul pic d'énergie.

4.2.2 Déduction de la profondeur

On déduit les distances en multipliant le temps de parcours de l'onde jusqu'à sa réflexion par la vitesse de la lumière. En calculant la différence temporelle entre les positions des différents pics, on obtient donc la profondeur de l'eau par la formule :

$$p = \frac{(t_f - t_s) \times c}{2}$$

Où :

- c est la vitesse de la lumière dans l'eau ;
- t_f est la position temporelle du fond ;

- \mathbf{t}_s est la position temporelle de la surface.

4.2.3 Géolocalisation des cibles

Embarqué en avion en hélicoptère, le LiDAR opère un balayage à angle d'environ 20° de la zone à étudier. En effet, cet angle permet de conserver une distance constante entre l'appareil et sa cible.

En couplant le LiDAR à un GPS et à une centrale inertielle, on peut donner précisément la position géographique de la mesure (cf. FIG. 4.4). Pour obtenir une précision centimétrique, on utilise un GPS différentiel permettant d'amputer les imprécisions (cf. section 5.5, page 38).

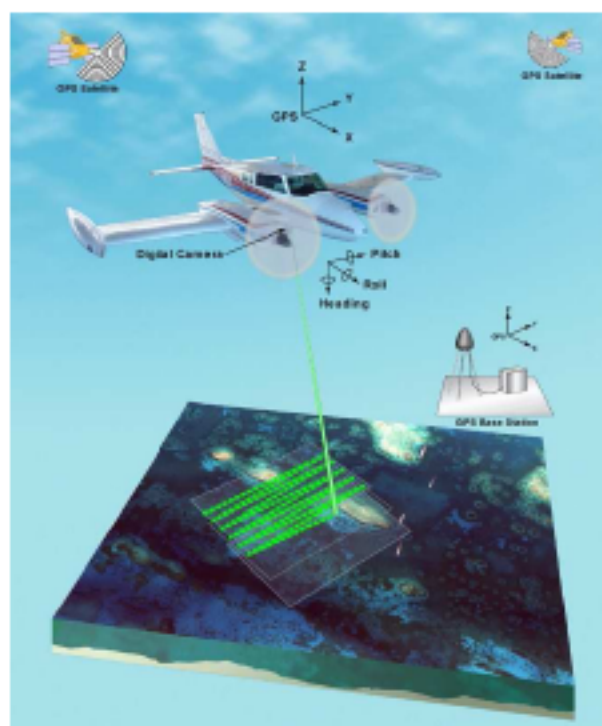


FIG. 4.4 – Fonctionnement du système LiDAR.

Source : <http://www.gallatin.org/gps/>

4.3 Les différents systèmes bathymétriques

Il existe actuellement quatre grands systèmes de LiDAR bathymétriques :

- *SHOALS 1000T*. Le *Scanner Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey* a été conçu par la société canadienne Optech¹. Il est principalement utilisé par l'entreprise étasunienne Fugro Pelagos² et la Joint Air-

¹<http://www.optech.ca/>

²<http://www.fugro-pelagos.com/>

borne Lidar Bathymetry Technical Center Of Expertise (JALBTCX) qui s'occupe de recherche et développement sur le système. Ces deux entités travaillent avec des ingénieurs et des chercheurs de la US Army Corps of Engineers (USACE), de la US Naval Meteorology and Oceanography Command, et de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). L'avantage de ce système est d'être équipé d'un capteur du signal Raman permettant d'obtenir des informations complémentaires sur la colonne d'eau.

- *HAWK EYE II* (cf. FIG. 4.5). Ce système est issu de la recherche et développement de l'entreprise suédoise SAAB. Il est utilisé par société Blom Environmental and Coastal Surveys AB³ et continue d'être développé par la Airborne Hydrography AB⁴ (AHAB). L'avantage de ce système est d'effectuer conjointement un levé hydrographique et un levé topographique.
- *LADS Mk II*. Le *Laser Airborne Depth Sounder* est un système conçu, développé et utilisé par la société australienne Tenix LADS Corporation⁵. La particularité de ce système semble être sa capacité à atteindre de grandes profondeurs.
- *EAARL*. Le *Experimental Advanced Airborne Research Lidar* est un système appartenant et développé à la NASA⁶. La particularité de ce système est d'utiliser une très faible puissance (70 μ J) permettant une meilleure discrimination des zones faiblement profondes.

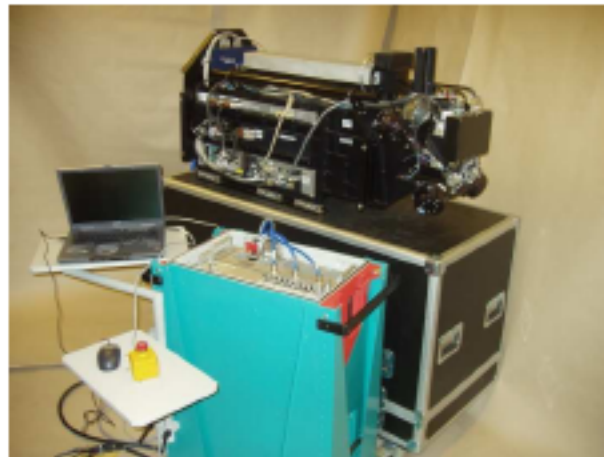


FIG. 4.5 – Le LIDAR HAWK EYE II.

Source : 2012 - <http://www.airbornehydro.com/>

³<http://www.hlo.nasa.com/hecs>

⁴<http://www.airbornehydro.com/>

⁵<http://www.tenix.com/Main.asp?ID=30>

⁶<http://inst.wff.nasa.gov/eaarl/>

4.4 Les applications

Initialement issu de la recherche militaire — c'est par exemple le cas d'HAWK EYE qui fut développé pour détecter des sous-marins en temps réel —, le LiDAR a aujourd'hui beaucoup d'applications dans le domaine civil.

4.4.1 En zones côtières

La télédétection en zones côtières est le domaine de prédilection du LiDAR bathymétrique. Elle permet de préciser les cartes marines dans les zones de faible profondeur ainsi que d'étudier l'érosion côtière. De nombreux relevés sont effectués, la plupart pour des services hydrographiques nationaux :

- Les relevés topographiques et bathymétriques du Golfe du Morbihan réalisés pour le SHOM en Juin 2005, constituent une expérience en zone côtière opérée avec le système SHOALS 1000T. Ce jeu de données constitue la base de mes travaux (cf. FIG. 4.6).
- Le relevé des Abers (Finistère) réalisé pour l'IFREMER en 2005 ainsi que celui entre Sète et La Grande Motte (Hérault) pour le compte de l'Entente Interdépartementale pour la Démoustification du littoral méditerranéen (EID Méditerranée) en 2007 ont été opérés avec le système HAWK EYE II.
- De nombreux relevés ont été effectués par la Tenix LADS Corporation avec leur capteur LADS Mk II. On peut par exemple citer le relevé de la mer Norvégienne pour le compte du Norwegian Hydrographic Service (NHS).
- Enfin, EAARL est beaucoup utilisé par le U.S. Geological Survey (USGS) et l'USACE pour l'évaluation des dégâts après le passage d'ouragans.

4.4.2 Sur les lacs

Il est intéressant de cartographier les lacs pour étudier les mouvements et dépôts de sédiments :

- Le système SHOALS 1000T est utilisé pour cartographier les parties peu profondes des lacs. Citons comme exemples ceux des lac Michigan et lac Tahoe aux États-Unis. Ces deux levés ont servi de base de travail pour la recherche dans l'amélioration de la discrimination des très faibles profondeurs [Pe'eri et Philpot, 2007].

4.4.3 Sur des rivières

Les travaux sur les rivières commencent à apparaître. La connaissance du fond des rivières est utile pour les modélisations hydrodynamiques, et pour obtenir des informations géomorphologiques :

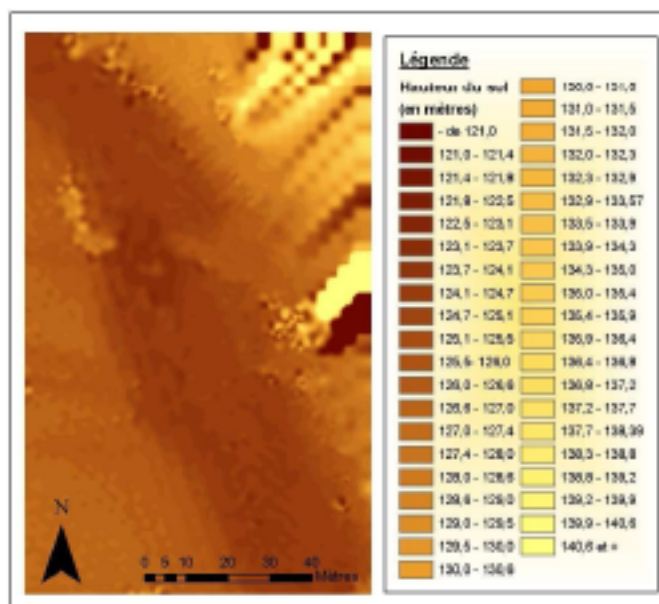


FIG. 4.7 – Carte de l'élévation du sol issue du levé HAWK EYE sur le Gardon.
 Résolution : TriCore Alliance

Troisième partie

Les dimensions techniques du
travail du stagiaire

Chapitre 5

État des lieux

A l'occasion de ce stage j'ai mené différents projets. Ils m'ont fait mettre en œuvre et développer différentes compétences, telles la programmation, une certaine démarche scientifique, l'utilisation de nouveaux logiciels ainsi que l'acquisition de données terrain.

Dans ce chapitre j'expose d'une manière générale mes travaux que je détaillerai par la suite. Aussi, je présente succinctement les principaux outils mis en œuvre dans le cadre de ce stage.

5.1 Déroulement

A mon arrivée, j'ai repris le travail de la stagiaire précédente sur la modélisation théorique d'un train d'ondes retour de LIDAR bathymétrique [Lesaignoux, 2006]. Il nécessitait une mise en forme afin d'être finalisé.

Par la suite, mes réalisations se sont articulées autour des données fournies par le SHOM (cf. section 2.2, page 18). Une des applications de ce stage a été de développer des méthodes et des outils de visualisation de ces données.

Dans un troisième temps, je me suis concentré sur le traitement du signal afin d'en ré-extraire l'information de profondeur et de la comparer avec l'extraction fournie par le prestataire.

Parallèlement, j'ai coordonné le levé LIDAR test sur le Gardon ainsi que les campagnes d'acquisition de données de référence sur le terrain.

5.2 R-project



R est un langage interprété et un environnement pour l'analyse statistique, regroupés sous la forme d'un unique logiciel qui permet la manipulation de données, les calculs et la représentation graphique.

Le langage R est de syntaxe relativement simple et doté d'opérateurs permettant la manipulation de tableaux et listes de données. Il existe de nombreuses fonctions de base, mais l'utilisateur a la possibilité d'en créer et mettre à disposition de nouvelles. Pour de nombreuses fonctions il fait appel à des routines C. Le point fort de R est son mode de distribution libre sous GPL (General Public Licence). Cela lui permet d'être en perpétuelle évolution, au grès des besoins spécifiques de chacun, tant dans la quantité de bibliothèques de fonctions que dans ses applications. De nombreuses fonctionnalités nouvelles apparaissent régulièrement sous forme de paquets — contenant les fonctions et la documentation correspondante — disponibles sur le *Comprehensive R Archive Network*¹ (CRAN).

5.3 ESRI ArcGIS



ArcGIS est une suite bureautique de logiciels destinés à manipuler les données relatives aux systèmes d'informations géographiques (SIG). Cela comprend des images et des données vectorielles géoréférencées ainsi que des bases de données sémantiques.

ArcGIS permet donc de travailler des données géographiquement positionnées, relatives à différents objets de l'espace (routes, pentes, cours d'eau, frontières, élévation de terrain).

5.4 Langage C

Le C est un langage de programmation informatique créé dans les années 70. Sa principale qualité qui m'a intéressé ici est sa rapidité d'exécution. Elle est due au fait que C est proche du langage machine et génère des programmes exécutables. Aussi, par son mode de lecture et de parcours des fichiers il est particulièrement efficace dans ces tâches.

5.5 Le GPS différentiel (DGPS)

Le *global positioning system* est une technique de localisation par satellite utilisant la triangulation de mesures.

Les signaux émis par les satellites sont aléatoirement brouillés par le propriétaire du système — l'armée étatsunienne — dans le but de dégrader la précision pour une utilisation civile. Avant 2000, la précision pouvait atteindre 100 m. Aujourd'hui la précision a été augmentée à ± 20 m en horizontal et ± 30 m en vertical.

Ce manque de précision ne pose pas vraiment de problème pour une utilisation courante contrairement à une utilisation scientifique, notamment en

¹<http://cran.r-project.org>

topographie, qui nécessite une très grande précision.

Pour obtenir une précision centimétrique, il est nécessaire d'utiliser une technique complémentaire : le GPS différentiel (DGPS en anglais). Pour cette technique, on utilise deux capteurs GPS. Un est fixe — le pivot (cf. FIG. 5.1a) — et l'autre se déplace — le mobile (cf. FIG. 5.1b) — pour mesurer la position des points désirés. Les deux récepteurs mesurent leur position par rapport au satellite par décalage de phase du signal. La simultanéité des deux mesures permet de corriger les décalages d'horloge. On obtient alors un vecteur entre la position du pivot et celle du mobile, appelé ligne de base, mais sa position n'est précise qu'à quelques mètres.

Parallèlement, le pivot enregistre les fluctuations de sa position dues au brouillage aléatoire du signal. Il en déduit et enregistre les corrections à appliquer à la position de la ligne de base. Par post-traitement ou en temps réel, on recalcule les positions du mobile en appliquant à la ligne de base les corrections enregistrées. Pour une plus grande précision encore, on peut récupérer les informations de corrections enregistrées par une station de référence du Réseau GPS Permanent (stations RGP de positions connues). Ces dernières corrections amoindrissent les effets de la troposphère sur le signal GPS. On obtient alors une précision centimétrique de notre mesure.

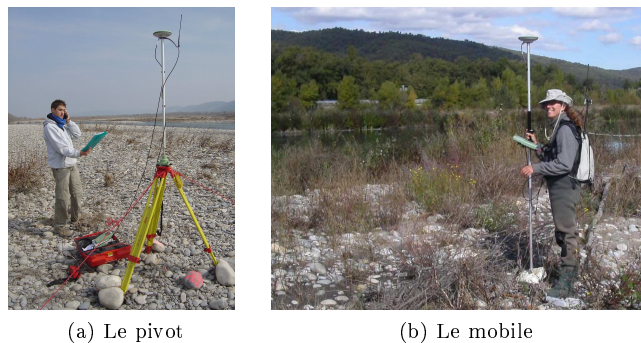


FIG. 5.1 – Les éléments du GPS différentiel

Chapitre 6

Modélisation de trains d'ondes

Durant le premier mois de mon stage, je me suis intéressé à la modélisation de trains d'ondes LiDAR. J'ai donc pris en main le logiciel R (cf. section 5.2, page 37) avec lequel la modélisation du signal avait été programmée par la stagiaire précédente [Lesaigroux, 2006]. Après avoir réorganisé et documenté le programme, je m'en suis servi pour simuler un levé.

6.1 Réorganisation du programme

L'objectif de cette réorganisation était de mettre à disposition le programme sur internet. Pour cela il fallait qu'il respecte l'architecture des paquets R sous forme de fonctions.

Le programme permet de simuler la forme d'une onde LiDAR retour, à partir de paramètres initiaux caractérisant la rivière, le capteur et l'atmosphère., ainsi que des équations caractérisant les relations entre ces paramètres. J'ai donc fait le choix de séparer les paramètres initiaux et de distinguer quatre fonctions :

1. Simulation d'une onde retour pour des paramètres donnés ;
2. Visualisation de cette onde retour (cf. FIG. 6.1) ;
3. Approximation de l'onde retour simulée pour approximer certains paramètres de départ ;
4. Visualisation de l'approximation (cf. FIG. 6.2).

Les paramètres initiaux (Profondeur, rugosité de surface, rugosité du fond, pente, etc.) se trouvent dans des fichiers texte contenant des valeurs par défaut. Il est cependant possible de modifier ces paramètres en le spécifiant lors de l'appel de la fonction de simulation.

La visualisation (cf. FIG. 6.1) est elle aussi paramétrable si l'on souhaite se concentrer sur une décomposition spécifique de l'onde — on peut vouloir uniquement visualiser de retour de la surface ou du fond —.

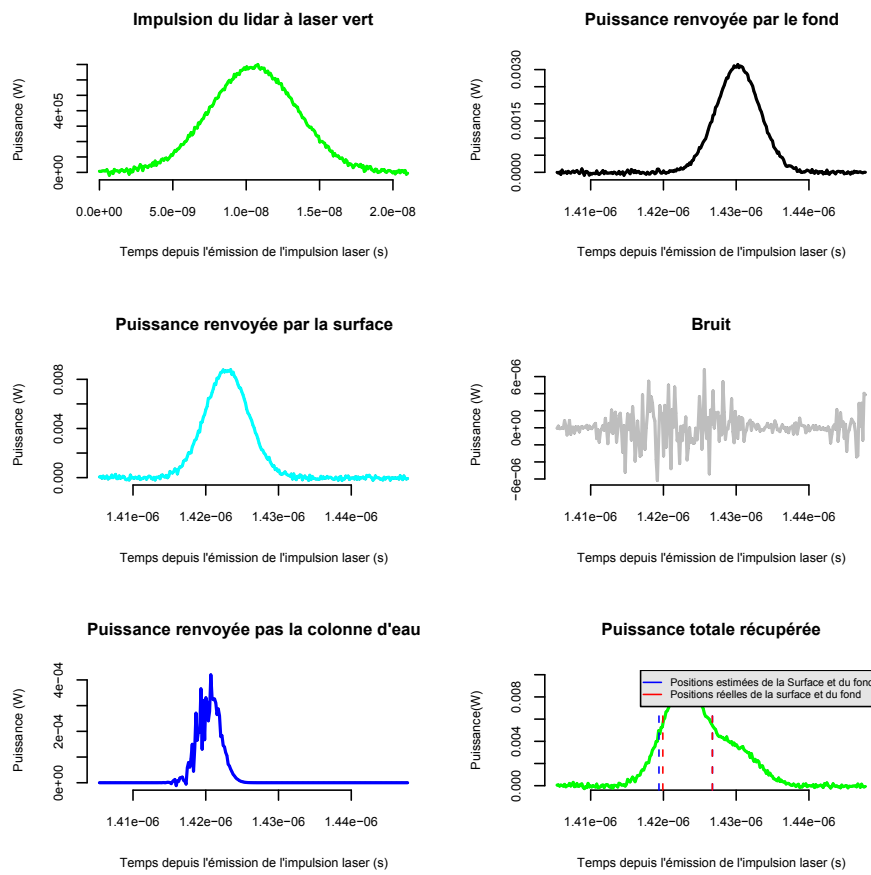


FIG. 6.1 – Visualisation d'une onde simulée.

La fonction d'approximation essaye d'approcher la forme simulée par un ajustement de deux gaussiennes ou d'une gaussienne et d'une log-normale. Cet ajustement est calculé grâce à une fonction basée sur une méthode des moindres carrés (cf. FIG. 6.2).

J'ai documenté les fonctions par un manuel au format pdf détaillant la manière de les utiliser (cf. annexe A, page 91). L'ensemble de fichiers (paramètres, fonctions et manuel) a été mis en ligne sur le site de la Maison de la Télédétection¹.

6.2 Utilisation de l'outil

Dans le cadre d'un article soumis à la revue de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection² (SFPT) dans lequel nous présentons cet outil de simulation, nous avons besoin de quantifier plusieurs paramètres, comme la profondeur d'eau minimale détectable par le LIDAR sur les rivières ainsi que l'influence de la rugosité de surface sur la qualité de la mesure (cf. annexe B, page 101). J'ai aussi utilisé ces résultats pour confectionner un poster présenté au *2nd space for hydrology workshop*³ organisé par l'agence spatiale européenne (esa) (cf. annexe C, page 109). J'ai aussi soumis à cette conférence une traduction en anglais de l'article SFPT (cf. annexe D, page 111).

6.2.1 Détermination de la profondeur minimale détectable

J'ai donc créé un programme sous R qui compare le paramètre de profondeur H d'une simulation d'onde avec l'erreur E induite par l'estimation de ce même paramètre par la fonction d'approximation. Le programme effectue cette comparaison 1 000 fois pour des profondeurs aléatoirement choisies.

En plaçant les résultats sur un graphique, on obtient un nuage de point duquel on peut déduire une profondeur minimale détectable H_{inf} . Cette profondeur minimale correspond au point d'inflexion de la courbe d'écart type de l'erreur (cf. FIG. 6.3). En répétant cette estimation une centaine de fois, on obtient une population suffisante pour en déduire une moyenne.

Nous avons donc estimé une profondeur moyenne détectable de 0,41 m avec un intervalle de confiance à 95 % de **[0,31 ; 0.45]**.

6.2.2 Influence de la rugosité de surface

Le second intérêt de posséder un outil de simulation est d'étudier l'influence de certains paramètres sur la profondeur minimale détectable. Nous nous sommes par exemple intéressés à l'impact de la rugosité de surface.

Pour cela, j'ai répété plusieurs fois l'algorithme décrit dans la section 6.2.1 en faisant varier la rugosité de surface (cf. FIG. 6.4). On déduit de cette simulation que les conditions optimales de rugosité se situent entre 0,005 et 0,1 (faibles rugosité) selon la répartition des microfacettes de Cook-Torrance [Gaston, 2003]. Dans ces conditions, la profondeur minimale détectable est 0,41 m.

¹http://www.teledetection.fr/component?option=com_docman/task/doc_download/gid,147/

²<http://www.sfpt.fr>

³<http://www.congrex.nl/07M19/>

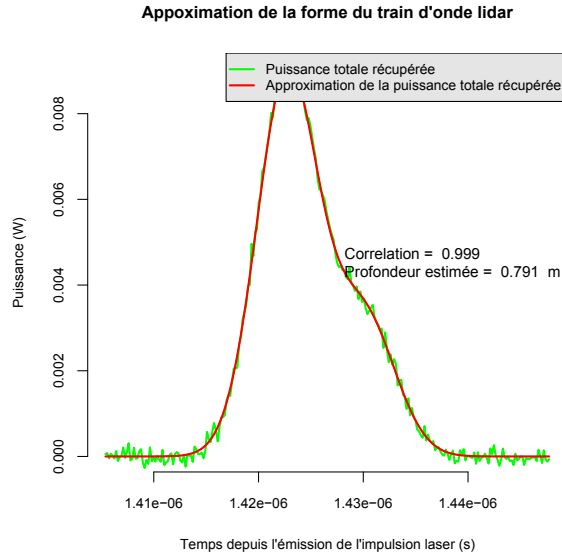


FIG. 6.2 – Visualisation de l'approximation d'une onde simulée.

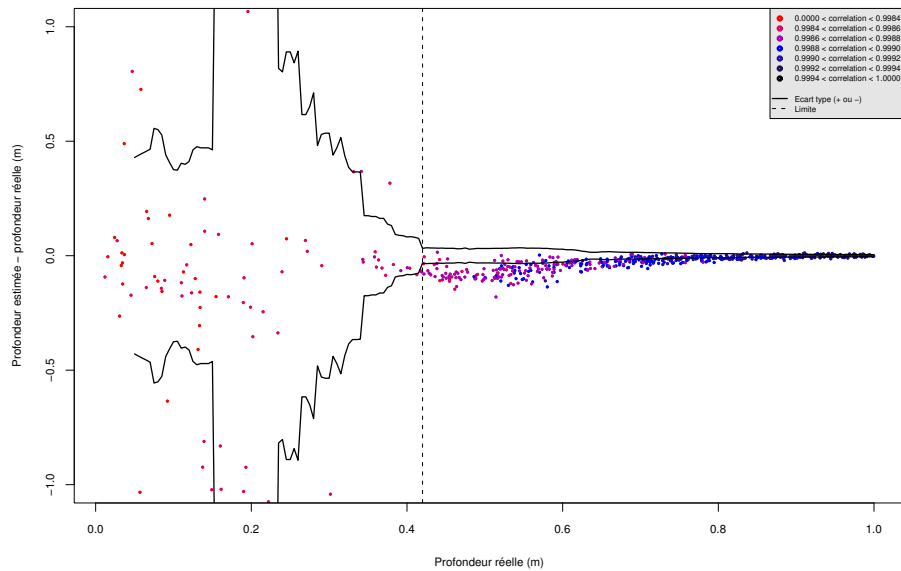


FIG. 6.3 – Exemple d'estimation de \hat{H}_{inf} (ligne verticale en pointillés) à partir du nuage de points (E, H) . Les codes couleurs sont relatifs à la corrélation de l'approximation et les lignes noires représentent $\pm\sigma_E$.

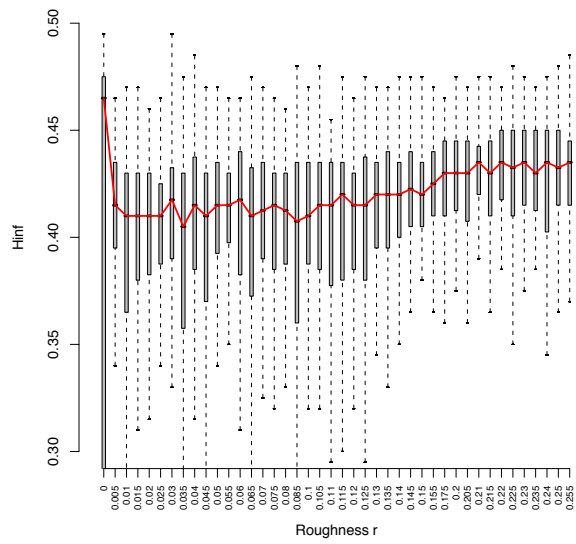


FIG. 6.4 – Distribution des boîtes à moustaches de \hat{H}_{inf} pour une rugosité de surface croissante

Chapitre 7

Visualisation des données Morbihan

Dans la deuxième partie du stage, je me suis penché sur les données fournies par le SHOM. Avant toute analyse, il fallait préalablement penser à un mode de représentation de ces données, présentées pour le moment au format texte. Après avoir pris connaissance de l'ensemble des données, je me suis donc occupé de développer des outils associant la géolocalisation des points avec les signaux correspondants.

7.1 Présentation des données

Les données ont été fournies par le SHOM sur cassette LTO puis transférées sur disque dur. Elles représentent 246 Go d'espace contenus dans 5 118 fichiers. Elles sont issues des levés LiDAR bathymétrique (à marée haute) et topographique (à marée basse) acquis sur le Golfe du Morbihan en 2005. Parmi elles, on trouve :

- les points LiDAR bathymétrique bruts avec les trains d'ondes associés au format ASCII;
- les points LiDAR topographique bruts au format ASCII;
- les mêmes points LiDAR (bathymétrique et topographique), nettoyés des erreurs ou des indéterminations;
- des produits dérivés, tels des modèles numériques d'élévation (mne);
- les orthophotos prises depuis l'avion pendant le levé (cf. FIG. 7.1).

Les points LiDAR sont caractérisés par une latitude, une longitude, la position de la surface, celle du sol, la date et l'heure de la mesure, ainsi que diverses informations complémentaires sur la qualité de la donnée (cf. FIG. 7.2).

Les signaux quant à eux sont sous la forme de 2 colonnes. La première est le temps et la seconde la puissance. Pour un points LiDAR on a 989 lignes contenant les valeurs les signaux :

- PMT : signal vert, amplifié pour détecter les grandes profondeurs;
- GAPD : signal vert, amplifié pour détecter les faibles profondeurs;
- IR : signal infrarouge ;

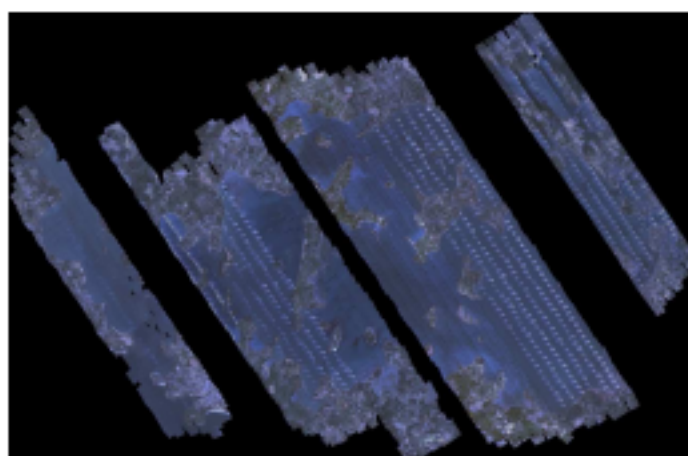


FIG. 7.1 – Mosaïque rectifiée et géoréférencée des photos prises depuis l'avion durant les levés LiDAR.

– RAMAN : signal Raman.

L'ensemble de ces données est contenu dans 109 fichiers points et 109 fichiers signaux correspondants pouvant parfois atteindre la taille d'1 Go.

L'objectif de l'outil de visualisation était donc de proposer une solution rapide capable de récupérer les trains d'ondes correspondants aux points désirés et de les afficher.

```

07_00400001 -3.02000004 47.00 48.00 07 08-14-2008 21:20:48.040000 0 2
07_00400010 -3.02000070 47.00 48.00 07 08-14-2008 21:20:48.047000 0 2
07_00400020 -3.02000070 47.00 48.00 07 08-14-2008 21:20:48.048000 0 2
...
07_00400070 -3.02000000 48.70 -00.00 70 08-14-2008 21:21:08.001000 0 1
07_00400201 -3.02000020 48.74 48.00 70 08-14-2008 21:21:08.002000 0 1
07_00400000 -3.02000020 -00.00 48.00 27 08-14-2008 21:21:08.002000 1 2
    
```

FIG. 7.2 – Exemple de trame LiDAR

7.2 Démarche

La démarche générale du système que j'ai imaginé pour répondre à cette problématique consiste en trois grandes phases (cf. FIG. 7.4) :

1. Visualisation et extraction des points LiDAR choisis sous un logiciel SIG (ArcGIS par exemple) ;
2. Récupération des signaux correspondants grâce à un programme développé en C par mes soins ;
3. Affichage du résultat au format pdf à l'aide au logiciel R.

```

PPT 118794648031008
1 77
...
000 00

0000 118794648031008
1 10
...
000 0

10 118794648031008
1 12
...
000 00

00000 118794648031008
1 12
...
00 10

PPT 118794648031008
1 84
...
    
```

FIG. 7.3 – Extrait d'un fichier contenant le signal LIDAR.



FIG. 7.4 – Démarche générale du système

7.3 Détails de la démarche

Après avoir présenté la démarche générale, je vais exposer les détails de la manipulation des données. Cet exposé reste néanmoins simplifié. Dans le manuel d'utilisation des outils de visualisation livré au SHOM (cf. Annexes page 121), je détaille plus précisément encore les manipulations.

7.3.1 Formatage de départ

L'objectif de cette étape est de formater les données présentes au format ASCII pour les rendre exploitables par un logiciel SIG.

Assemblage des points

Les données de départ étant conséquentes et très segmentées (109 fichiers points), il m'a semblé judicieux dans un premier temps de les rassembler pour faciliter leur manipulation sous ArcGIS. J'ai donc créé un programme en C

permettant de combiner plusieurs des fichiers de départ en un seul (cf. FIG. 7.5). Pour des raisons techniques, j'ai dû rassembler les 109 fichiers en 2 fichiers.

Le C m'est apparu comme le langage le plus dédié à ce genre de manipulations, par sa rapidité, sa facilité de programmation, et ses fonctions de lecture/écriture préexistantes. Pour ce programme, je n'ai pas cherché à développer d'interface graphique. En effet, son utilisation étant dédiée au formatage des données, il nécessita de n'être exécuté une seule fois. Bien que son utilisation s'effectue dans un invite de commandes Windows, j'ai cherché à la rendre la plus conviviale possible, car le programme sera probablement utilisé par le SHOM.

```

Microsoft Windows [Version 5.00.2195]
(C) Copyright 1985-2000 Microsoft Corp.

H:\>H:\Documents\morbihan\Livrables\assembleage\assembleageHYDROBRUT.exe

** Bienvenue dans assembleageHydro.exe **

Veuillez entrer le chemin du fichier de destination :
D:\HYDROBRUT-1.tab

Veuillez spécifier le chemin du 1er fichier à assembler et appuyer sur entrée
-OU- tapez OK puis entrée pour finir :
G:\donneesMorbihan\BATHV_GM\DONNEES\GLOBAL\ASCII_BRUT\HYDRO\LIGNES_PRINCIPALES\
POINTS\HU_ALL_GB01_02-1.txt

Veuillez spécifier le chemin du 2ème fichier à assembler et appuyer sur entrée
-OU- tapez OK puis entrée pour finir :
G:\donneesMorbihan\BATHV_GM\DONNEES\GLOBAL\ASCII_BRUT\HYDRO\LIGNES_PRINCIPALES\
POINTS\HU_ALL_GB01_03-1.txt

Veuillez spécifier le chemin du 3ème fichier à assembler et appuyer sur entrée
-OU- tapez OK puis entrée pour finir :
OK

Lecture et écriture...
HU_ALL_GB01_02-1.txt...Ok
HU_ALL_GB01_03-1.txt...Ok
Lecture et écriture... Ok
Fermeture des fichiers... Ok

** Fermeture de assembleageHydro.exe **

H:\>
    
```

FIG. 7.5 – Exemple de l'exécution du programme `assembleageHYDROBRUT.exe` dans l'Invite de commandes pour combiner deux fichiers.

Traduction en .shp

Dans un deuxième temps, il fallait transcrire les deux fichiers résultants — qui sont au format `txt` —, exploitables par ArcGIS. Pour cela il fallait les convertir en fichiers d'entités `.shp` contenant chacun des points géolocalisés. Cette manipulation s'effectue assez simplement sous ArcGIS si les données `.txt` d'entrée sont correctement formatées (champs séparés par des tabulations, nom des colonnes), ce dont se charge aussi mon programme C. Le fichier `.shp` créé est un nuage de points ordonné selon la latitude et la longitude, et contenant les autres informations sémantiques dans une table d'attributs.

À la fin de ce formatage, on dispose de deux fichiers `.shp` contenant l'ensemble des points LiDAR exploitables sous ArcGIS.

7.3.2 Visualisation et extraction des points sous ArcGIS

ArcGIS nous permet d’afficher des images et des vecteurs géoréférencés et d’effectuer sur eux diverses opérations. Je me suis donc servi d’ArcGIS pour visualiser la position géographique des points LiDAR (les fichiers .shp) ainsi que les orthophotos (cf. FIG. 7.6).

Pour sélectionner des points, on trace un vecteur sous ArcGIS, puis on opère une sélection des points LiDAR qui intersectent ce vecteur. On exporte ensuite les données attributaires des points sélectionnés hors d’ArcGIS. On obtient donc un fichier de la même forme que celui de la figure 7.2, ne contenant que les points sélectionnés.

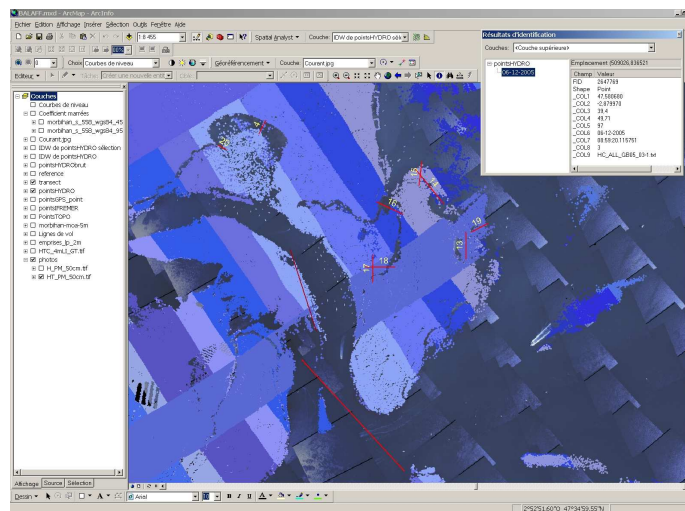


FIG. 7.6 – Visualisation des points LiDAR sous ArcGIS (en bleus selon la ligne de vol) avec l’orthophoto en fond de carte et les vecteur de sélection en rouge.

7.3.3 Extraction des signaux correspondants aux points exportés

Cette opération s’effectue grâce au programme *Extracteur de signal LiDAR* que j’ai développé en C. Il recherche dans les fichiers points LiDAR de départ les points sélectionnés lors de la manipulation 7.3.2 en parcourant parallèlement les fichier signaux correspondants. Dès qu’il trouve un des points, le programme extrait ses signaux dans un fichier de sortie.

J’ai développé ce programme en C pour les mêmes raisons que le programme d’assemblage (cf. section 7.3.1, page 49). Je l’ai cette fois doté d’une interface graphique (cf. FIG. 7.7) car il est amené à être utilisé de nombreuses fois. Une utilisation conviviale est alors appréciée. Mon choix s’est porté sur la bibliothèque GTK+ pour son caractère libre, sa portabilité et son rendu agréable.

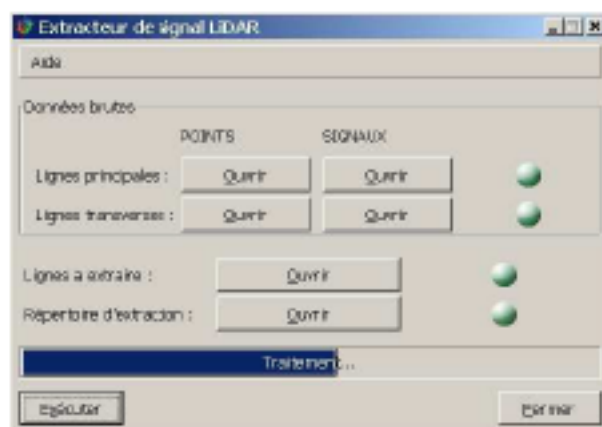


FIG. 7.7 – Le programme *Extracteur de signal LiDAR* et son interface graphique en GTK+.

Extracteur de signal LiDAR admet en entrée un fichier `.txt` contenant les points LiDAR désirés. Il crée en sortie 4 fichiers contenant les signaux correspondants au format texte séparés par canaux (PMT, GAPD, IR et RAMAN).

7.3.4 Visualisation du transect avec les signaux

Cette opération s'effectue sous R. Elle permet l'affichage des points LiDAR selon leur position géographique tout en associant à chacun des points ses signaux correspondants.

Facilement paramétrable, nativement dotée d'une interface graphique, et capable de manipuler de grandes quantités de données, R s'est présentée comme la solution la plus efficace pour l'opération de visualisation.

Cette opération s'effectue grâce à l'appel d'une routine R que j'ai développée. Elle produit un fichier `.pdf` qu'il est facile d'animer en faisant défiler les pages. En effet, à chaque point correspond une page qui contient ses informations (cf. FIG. 7.8). Aussi, une variante de cette routine permet d'inclure dans l'affichage des données de référence collectées au GPS sur le terrain.

7.4 Choix des transects

Afin d'analyser précisément les données LiDAR, j'avais besoin de données de référence. C'est pourquoi, nous avons réalisé un levé de points au GPS différentiel (cf. section 5.5, page 38) dans le Golfe du Morbihan. Ce levé a suivi un plan établi selon des transects préalablement choisis, en raison de leur situation géographique et de la densité de points LiDAR.

Le choix des transects s'est donc fait de manière localisée pour des raisons d'optimisation du temps sur le terrain, accessible uniquement à marée basse. En

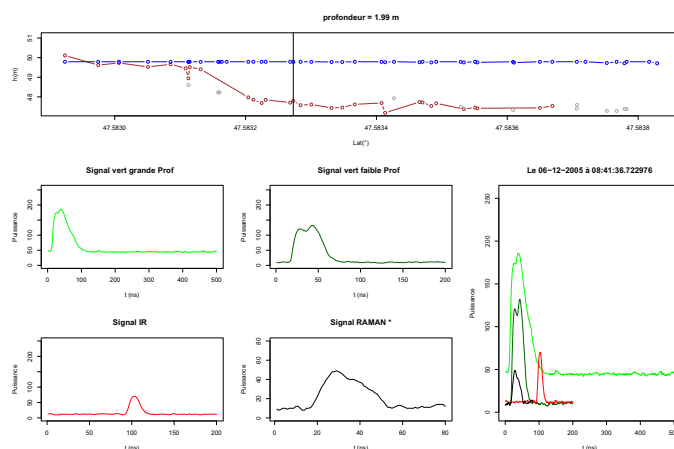


FIG. 7.8 – Exemple d'une page du fichier pdf de visualisation.

effet, le GPS nécessitant une initialisation minimale de deux heures en un point fixe, la hauteur d'eau minimale à marée basse s'étalant sur une durée relativement restreinte, et la portée de communication entre les deux GPS étant limitée, nous devons choisir nos zones de relevés assez proches les unes des autres. Cependant, je les ai choisis les plus diverses possibles : rocheuses, sableuses, avec ou sans algues, pentues ou plates.

Notre zone d'étude s'est située autour de l'île de Berder où j'avais choisi 9 transects (cf. FIG. 7.9). Nous avons disposé le GPS fixe à l'abri sur une propriété privée. Au total nous avons relevé près de 2 900 points à différents pas d'échantillonnage, certains très serrés de l'ordre du centimètre et d'autres plus espacés afin d'évaluer la rugosité locale du terrain.

Grâce à ces points nous sommes en mesure de quantifier précisément les écarts de mesure du LiDAR et de remplacer les données manquantes. Cela a été réalisé dans un document réalisé pour le SHOM (cf. annexe F, page 131). Grâce à l'outil de visualisation présenté précédemment, on peut afficher les transects en coupe, en incluant les données relevées sur le terrain (cf. FIG. 7.10).

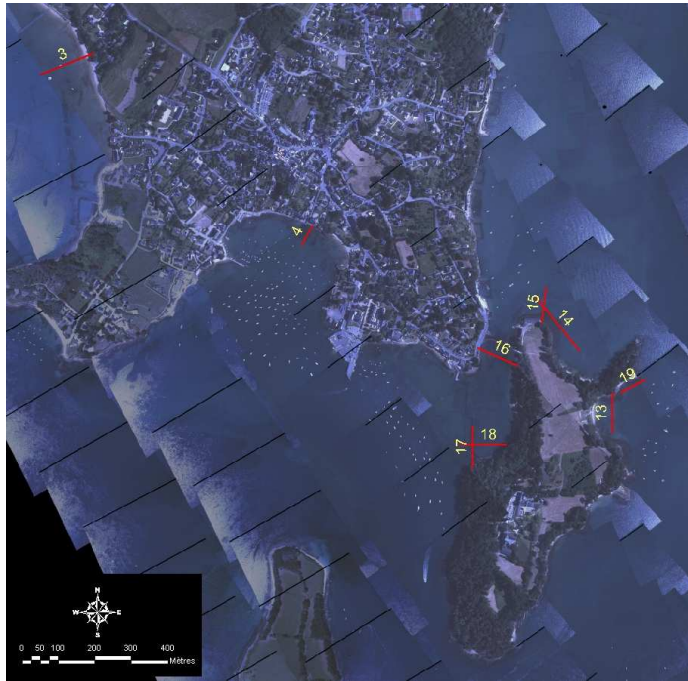


FIG. 7.9 – Disposition des transects sur la zone d'étude.

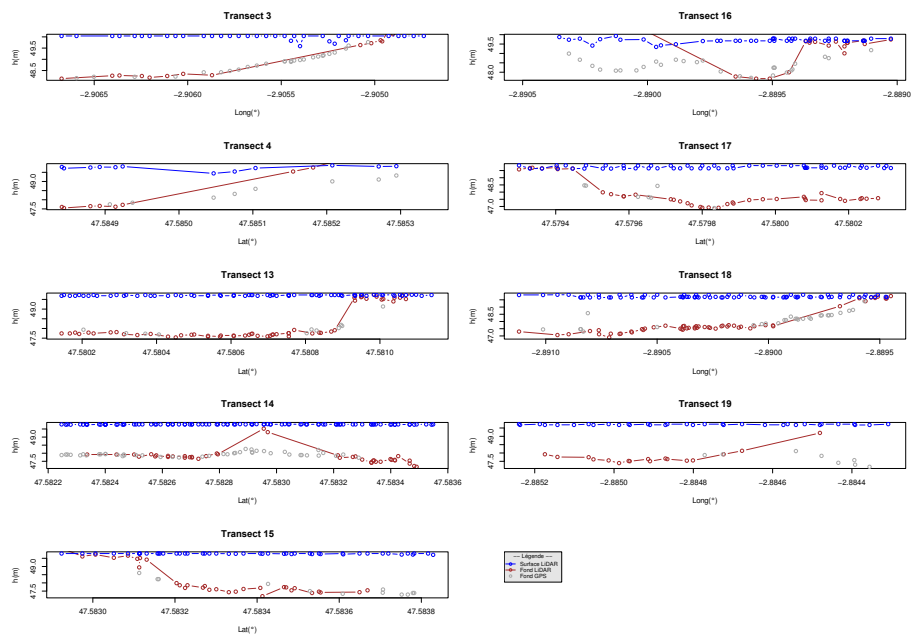


FIG. 7.10 – Vue en coupe des différents transects.

Chapitre 8

Traitement du signal

Le traitement du signal a représenté une partie importante de mon travail. Nous avons voulu bénéficier de l'avantage de disposer des signaux LiDAR pour effectuer quelques traitements. L'idée était de valider le modèle théorique développé précédemment (cf. chapitre 6, page 41) et de vérifier si un retraitement des données ne pouvait pas nous permettre de repousser les limites de la mesure. D'autre part, nous avons profité des données pour étudier l'influence de certains paramètres sur la forme du signal.

J'ai développé parallèlement plusieurs méthodes de traitement, mais je ne présente ici que les deux plus concluantes. Pour ces deux méthodes, l'objectif était d'extraire les pics de surface et de fond, la difficulté résidant bien entendu à les distinguer lorsqu'ils sont presque confondus. Pour mes traitements, je me suis inspiré des travaux de [Wong et Antoniou, 1991], [Wong et Antoniou, 1994] et de [Guenther et Messick, 1988].

8.1 Méthode par combinaison

Pour cette méthode, j'ai choisi de supprimer le pic de surface du signal GAPD afin d'extraire le pic du fond. Pour cela, j'ai fait l'hypothèse que la forme du signal IR correspondait à celle du pic de surface GAPD (cf. section 4.2, page 28), à un coefficient multiplicateur, une translation en temps et une translation en puissance près. En effet, on peut supposer que la puissance et l'étalement du laser IR et du laser GAPD ne sont pas forcément les mêmes. Aussi, des raisons matérielles font que le pic du signal IR est décalé dans le temps par rapport au signal GAPD.

8.1.1 Déroulement de l'algorithme

L'algorithme de la méthode par combinaison se déroule donc selon les étapes suivantes (vous pouvez aussi vous référer à la figure 8.1) :

1. *Annulation du décalage en puissance du signal GAPD par rapport à 0* par suppression de la composante médiane de la fin de signal ;
2. *Annulation du décalage en puissance du signal IR par rapport à 0* par suppression de la composante médiane de la fin de signal ;

3. *Annulation du décalage temporel du signal IR par rapport au signal GAPD* par synchronisation des points d'inflexion à l'aide des dérivées secondes ;
4. *Dilatation du signal IR pour faire correspondre sa puissance à celle du signal GAPD* par régression sur les signaux IR et GAPD entre les points d'inflexion et les demi-amplitudes (le coefficient directeur de la droite de régression donne le rapport d'amplification) ;
5. *Soustraction du signal IR au signal GAPD* ;
6. *Détection des positions temporelles du pic IR (surface) et du pic GAPD résultant (fond)* par recherches des maximas ;
7. *Déduction de la profondeur.*

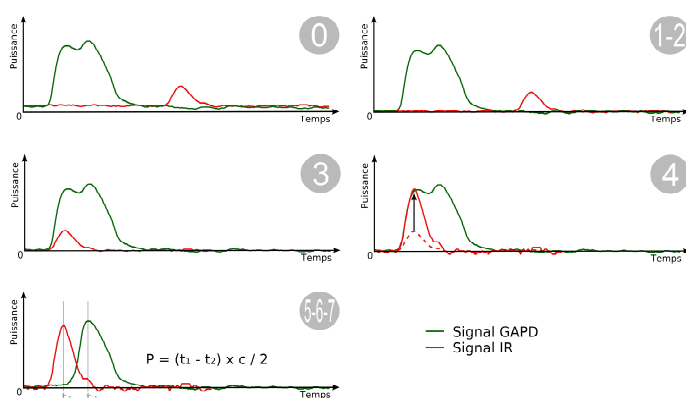


FIG. 8.1 – Les étapes de l'algorithme par combinaison.

8.1.2 Résultats

Le caractère bruité du résultat (cf. FIG. 8.2) s'explique en partie par la discrétisation opérée lors du traitement. Cette discrétisation est le résultat du fonctionnement de l'algorithme et du pas d'échantillonnage du signal livré. En effet, ce dernier est à la nanoseconde, ce qui nous donne en terme de distance un pas de 11,3 cm. Aussi, le fonctionnement de l'algorithme ne permet pas d'avoir une précision de plus de 5,7 cm.

La forme du nuage de points de la figure 8.3 nous fait part de la grande dispersion de l'erreur en fonction de la profondeur. La droite de régression met en évidence un léger biais inversement proportionnel à la profondeur, mais la pente de cette droite est faussée par l'importante sous-estimation de la profondeur par l'algorithme pour les hauteurs d'eau inférieures à 1 m.

L'erreur moyenne entre les résultats de ce traitement et la référence GPS est de $-16,7$ cm avec un écart-type de $58,7$ cm et un taux d'échec du traitement de $2,58$ %.

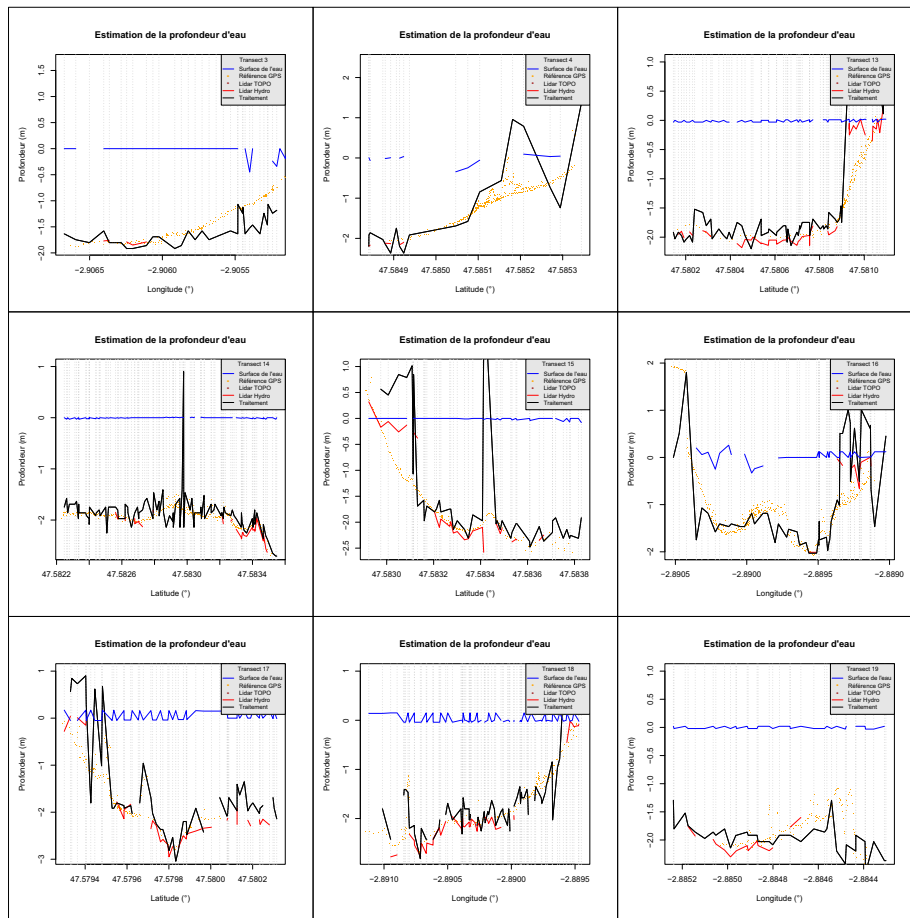


FIG. 8.2 – Résultats transect par transect de l’algorithme par combinaison.

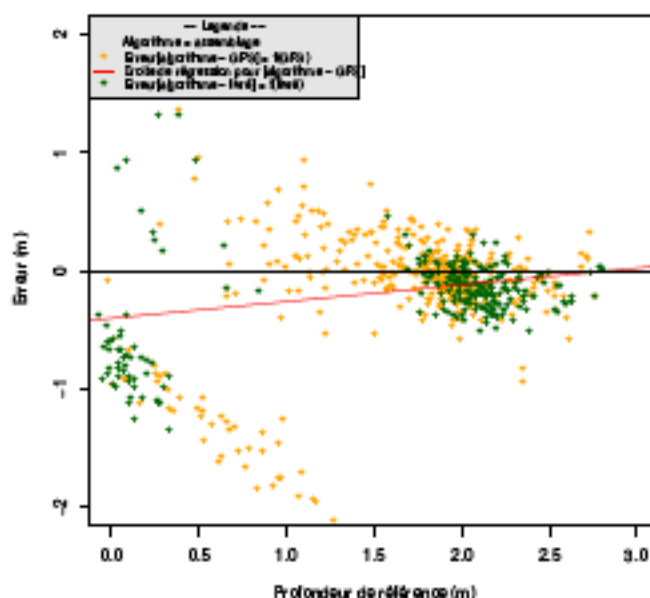


FIG. 8.3 – Les erreurs de l'algorithme par combinaison sur l'ensemble des transects.

8.2 Méthode par approximations gaussiennes

Pour cette méthode, j'ai choisi d'ajuster deux gaussiennes sur le signal GAPD, comme pour l'inversion de modèle théorique présenté en chapitre 6 [Lesaignoux, 2006]. Par ce choix, on introduit inévitablement un biais car on néglige le retour de la colonne d'eau. On observe en effet un biais croissant avec la profondeur à partir de 2,5 m. Cependant, comme nous nous intéressons ici aux faibles profondeurs, nous pouvons négliger cet effet.

8.2.1 Déroulement de l'algorithme

L'algorithme de la méthode par approximations gaussiennes se déroule donc selon les étapes suivantes (vous pouvez aussi vous référer à la figure 8.4) :

1. *Annulation du décalage en puissance du signal GAPD par rapport à 0* par suppression de la composante médiane de la fin de signal ;
2. *Annulation du décalage en puissance du signal IR par rapport à 0* par suppression de la composante médiane de la fin de signal ;
3. *Annulation du décalage temporel du signal IR par rapport au signal GAPD* par synchronisation des points d'inflexion à l'aide des dérivées secondes ;
4. *Dilatation du signal IR pour faire correspondre sa puissance à celle du signal GAPD* par régression sur les signaux IR et GAPD entre les points

d'inflexion et les demi-amplitudes (le coefficient directeur de la droite de régression donne le rapport d'amplification) ;

5. *Ajustement deux deux gaussiennes par les moindres-carrés non linéaire* en initialisant les positions des pic sur les positions données par à la soustraction du signal IR au signal GAPD ;
6. *Récupération des paramètres des gaussiennes ajustées ;*
7. *Déduction de la profondeur.*

Le cœur de cet algorithme se trouve donc à l'étape 5. Elle utilise une fonction existante de R, *nls()*, qui se charge de l'ajustement d'un modèle analytique sur des données discrètes en faisant varier les paramètres de ce modèle. *nls()* est elle-même paramétrable, ce qui nous permet de choisir la fonction d'approximation utilisée. J'ai observé que la convergence et la précision des résultats dépendent principalement de cette fonction d'approximation. *nls()* accepte aussi, selon la fonction d'approximation utilisée, des contraintes sur les paramètres à ajuster comme le pas de variation, le nombre d'itération ainsi que les valeurs minimales et maximales de chaque paramètre. Ici, avec la fonction d'approximation *nl2sol* du paquet *port* [Fox et AT&T, 1984], on fixe les bornes supérieures des différents paramètres pour éviter la production de valeurs aberrantes. Par exemple, on interdit au pic de surface de se situer après 40 ns et au pic du fond après 65 ns. D'autre part on fixe des largeurs maximales pour les gaussiennes afin de ne pas laisser l'algorithme en ajuster une seule large sur le signal.

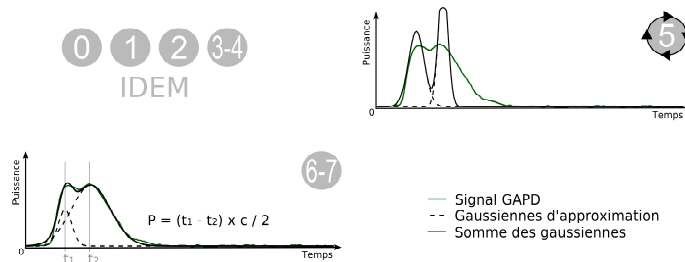


FIG. 8.4 – Les étapes de l'algorithme par approximations gaussiennes.

8.2.2 Résultats

La fonction d'approximation *port* a fourni le plus grand pourcentage de convergence, avec le moins d'erreur. En effet, les autres algorithmes n'arrivent pas à faire converger le résultat sur certains trains d'ondes. Il en résulte donc un échec du traitement. Les profils de profondeurs détectés sont moins bruités que pour la méthode par combinaison. Cependant, on observe un lissage qui a pour effet de ne pas rendre compte de certaines variations du sol (cf. FIG. 8.5). La droite de régression de l'erreur du traitement en fonction de la profondeur met en évidence un biais des résultats proportionnel à la profondeur (cf. FIG. 8.6). Ce biais est d'environ 50 cm par mètre de profondeur : elle est sous-estimée pour les profondeurs allant de 0 à 1,75 m, puis surestimée au delà.

D'après les figures 8.5 et 8.6, on a déduit que l'algorithme par ajustement est capable de détecter des profondeurs jusqu'à 1 m, alors que les données livrées

s'arrêtent à environ 1,8 m. On récupère donc environ 80 cm. L'erreur moyenne entre les résultats de ce traitement et la référence GPS est de $-1,3$ cm avec un écart-type de $37,7$ cm et un taux d'échec du traitement $4,96$ %.

8.3 Performances du traitement livré

Bien que l'objectif lors du levé LIDAR n'était pas spécialement de détecter des profondeurs d'eau les plus faibles possibles — la campagne se composait aussi d'un levé LIDAR topographique à marée basse permettant de cartographier des zones d'estran —, il est intéressant de comparer les résultats de mes traitements avec ceux des données livrées.

L'erreur moyenne entre les données livrées et la référence GPS est de $-7,6$ cm avec un écart-type de $37,4$ cm et un taux d'échec du traitement (absence de mesure) de $45,04$ %. Une description plus détaillée de la qualité des données livrées est disponible dans le document *QUALITE DU LEVE TOPOGRAPHIQUE LASER SHOALS 2005 - GOLFE DU MORBIHAN* (cf. annexe F, page 131).

8.4 Limites du traitement

Tout au long du développement de ces méthodes de traitement, je me suis heurté à l'absence d'informations sur le capteur LIDAR. En effet, nous savons que les signaux fournis ne sont pas les signaux bruts : ils ont subi une amplification et un double échantillonnage.

Pour des raisons de secret industriel, nous n'avons pas eu accès à ces paramètres, en particulier nous n'avons pas pu obtenir le type de l'échelle de puissance du signal reçu. Celle-ci n'étant pas forcément décimale, j'introduisais une source d'erreur de plus au moment d'ajuster les deux gaussiennes. Aussi, nous n'avons pas eu accès à la puissance et à la durée de l'impulsion émise, ni à la fonction d'amplification du signal reçu, ce qui nous a empêché de valider notre modèle théorique.

Aussi, nous avons longtemps cherché — sans succès — une fonction de distribution continue sur \mathbb{R} pour caractériser le retour de la colonne d'eau dans l'ajustement, car la fonction $nsl()$ n'admet que des fonctions continues sur \mathbb{R} . Nous n'avons alors que deux solutions : soit négliger le retour de la colonne d'eau et introduire par la même occasion une source d'erreur, soit utiliser la fonction d'ajustement $optim()$ qui pouvait inclure dans son traitement des données non-continues, mais les premiers essais réalisés se sont révélés beaucoup moins performants qu'avec $nsl()$.

8.5 Récapitulatif des résultats des traitements

Voici un tableau récapitulant les résultats obtenus :

Type de traitement	\overline{erreur} (cm)	σ_{erreur} (cm)	% non détecté
Combinaison	$-16,7$	$58,7$	$2,58$
Approximations gaussiennes	$-1,3$	$37,7$	$4,96$
Livré	$-7,6$	$37,4$	$45,04$

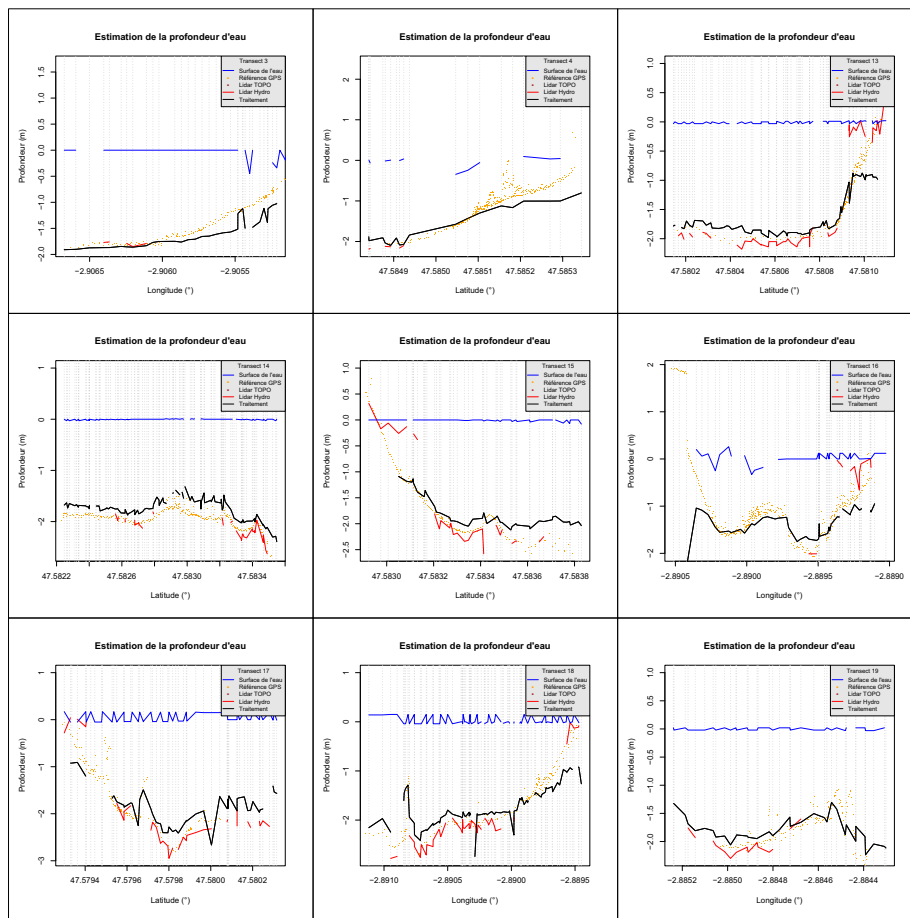


FIG. 8.5 – Résultats transect par transect que l’algorithme par approximations gaussiennes.

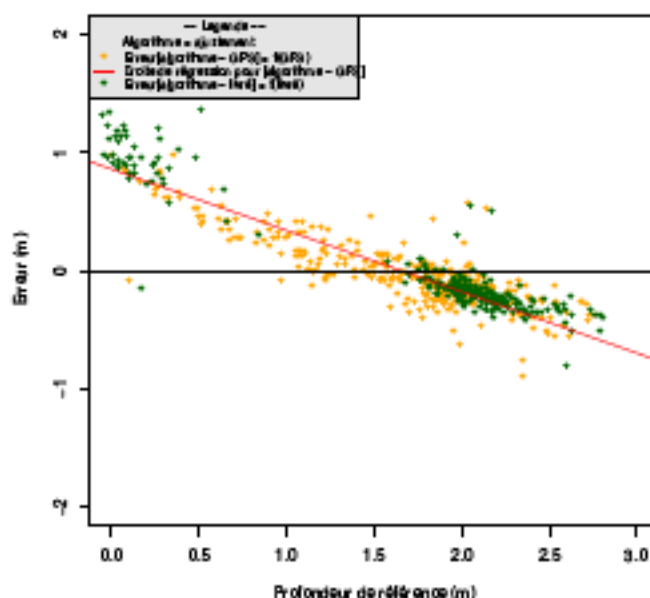


FIG. 8.6 – Les erreurs de l’algorithme par approximations gaussiennes sur l’ensemble des transects.

8.6 Influence de la turbidité sur le signal

Comme on peut facilement l’imaginer, la turbidité de l’eau a une grande influence sur la capacité du laser à s’y propager. En effet, plus l’eau est chargée en particules, plus il y aura de réflexions du laser sur ces particules. Ainsi, le LiDAR ne sera pas capable de cartographier les fonds de zones trop turbides.

Durant le vol LiDAR, une partie du Golfe du Morbihan se trouvait en dragage. Les eaux de cette zone se sont donc trouvées fortement turbides. La densité de points correctement traités s’est donc retrouvée très faible, voire inexistante dans certaines parties de cette zone.

J’ai donc profité de cet événement pour observer l’effet de la turbidité du signal. Je me suis appuyé sur les orthophotographies du vol pour déterminer un transect selon une turbidité croissante (cf. FIG. 8.7) en conservant une même profondeur. Aussi, les passages du LiDAR à plusieurs jours d’intervalle sur cette zone m’ont aidé à construire une échelle de turbidité. Les résultats font part d’une atténuation du pic du fond proportionnel à la turbidité. Aussi, pour les signaux en condition de turbidité très forte, le laser est totalement atténué dans la colonne d’eau : on ne distingue pas de pic de fond (cf. FIG. 8.8).

Ces résultats sont à titre indicatif, car faute de disposer de mesures de terrain il n’est pas possible de donner une valeur de turbidité à chaque partie de la zone. Les résultats sont donc à considérer entre eux de façon relative.

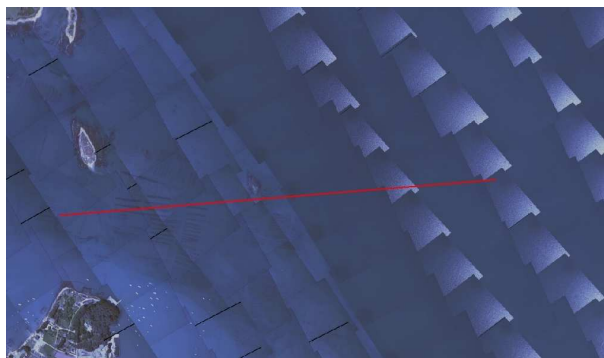


FIG. 8.7 – Vue du transect de turbidité croissante de gauche à droite.

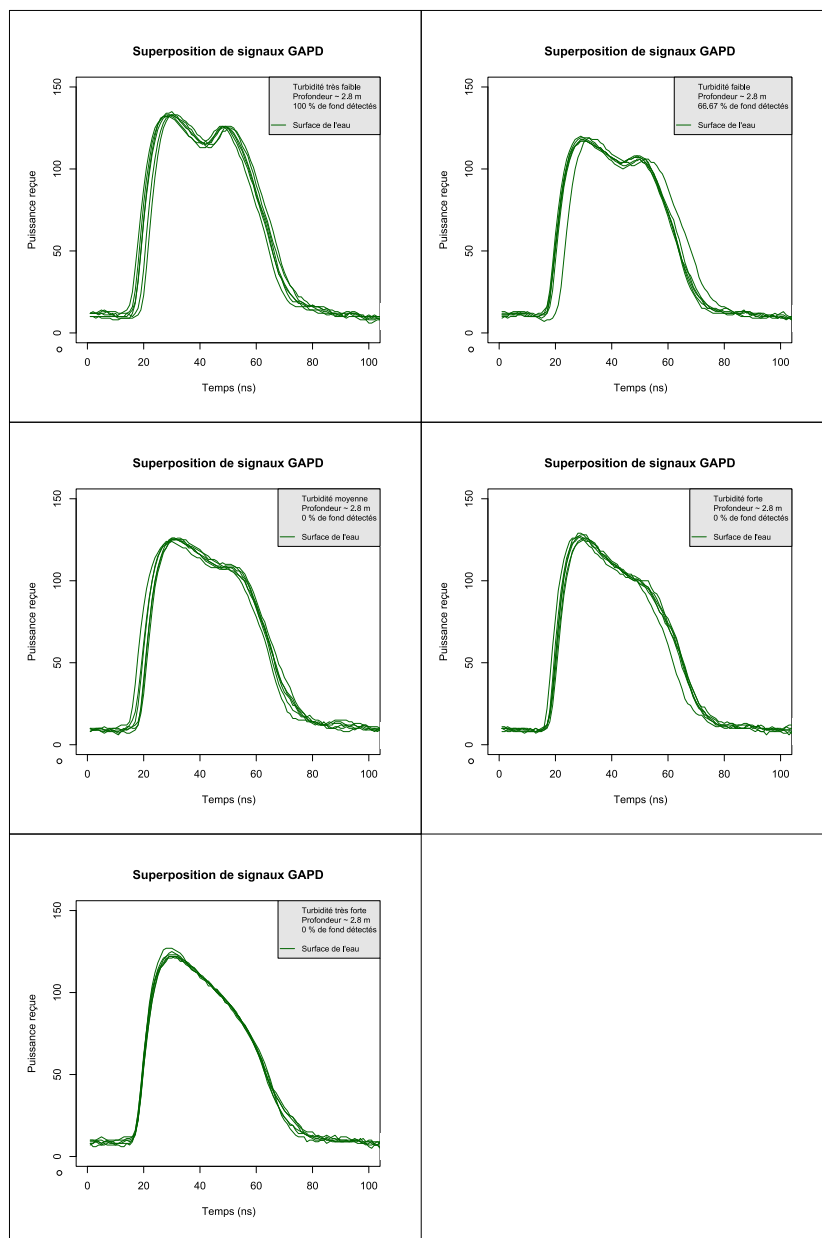


FIG. 8.8 – Influence de la turbidité sur la forme du signal.

Chapitre 9

Levés sur le Gardon

Par son caractère peu profond et par l'implantation d'activités hydroélectriques le long de son cours, la Durance intéresse particulièrement les chercheurs du Cemagref. C'est pourquoi en 2006 un contrat a été passé avec la société suédoise Blom Environment & Coastal Surveys (cf. section 4.3, page 30) pour un essai de levé LiDAR sur rivière. L'opération, nouvelle pour Blom, ne fût pas concluante à cause d'un problème de calibration du LiDAR — le signal était saturé —.

Durant mon stage, alors qu'elle était dans la région de Montpellier pour effectuer un levé sur la côte, Blom nous a proposé un nouvel essai. Je me suis donc chargé avec grand intérêt de l'organisation des levés de terrain et de leur coordination avec le levé LiDAR.

Je présente dans ce chapitre les différentes manipulations effectuées sur le terrain, et donne un aperçu des premiers résultats. Ces derniers ne concernent que la mesure de la position du fond de la rivière, car nous ne disposons pas encore des données sur la position de la surface.

9.1 Choix du site d'étude

Pour des raisons de coût, Blom nous avait demandé de choisir une zone proche de Montpellier. Nous avons retenu une partie du Gardon de 2 km de long (cf. FIG. 9.2) à proximité du village de Boucoiran (30), très similaire à la Durance tant par sa forme que son environnement. Ces deux rivières appartiennent toutes deux à la famille des rivières à fond de galets (cf. FIG. 9.1).



FIG. 9.1 – Vue du Gardon.

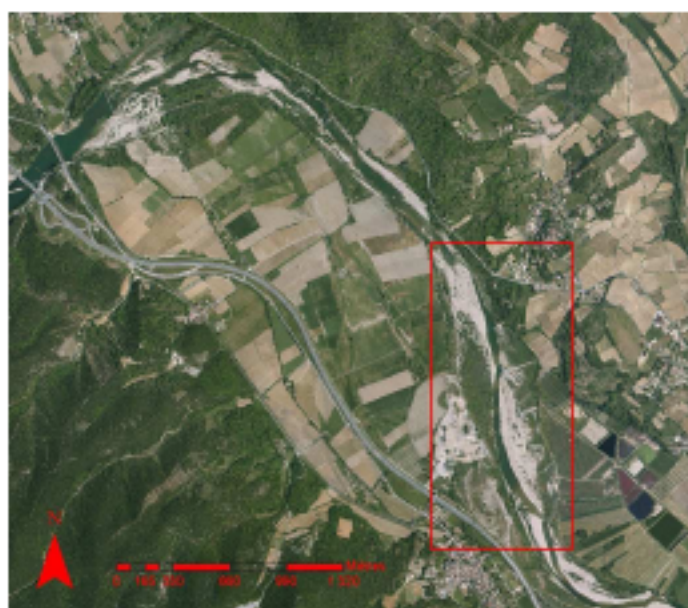


FIG. 9.2 – Localisation de la zone d'étude du Gardon.

9.2 Travail préliminaire

Les premières mesures effectuées furent le relevé de la turbidité et la détermination de la profondeur moyenne. Ces informations intéressaient particulièrement les ingénieurs de Blom car elles apportaient les informations nécessaires à la calibration a priori du capteur. En effet, on peut alors calculer l'atténuation du laser, et ajuster sa puissance en conséquence.

La mesure de turbidité s'effectue avec un disque de Secchi. C'est un instrument de 20 cm de diamètre, peint par quart alternativement en noir et blanc. Lesté et rattaché à une corde, on le plonge dans l'eau jusqu'à ce qu'on ne puisse plus distinguer les différences de nuance (cf. FIG. 9.2). On mesure alors la profondeur du disque qui correspond à la profondeur de Secchi, indicateur de la turbidité.

Sur la zone retenue du Gardon, j'ai mesuré une profondeur de Secchi d'environ 1,8 m et une profondeur moyenne d'environ 1,5 m.

9.3 Position de la surface de l'eau

Le jour du vol LiDAR, nous nous sommes rendus sur le terrain avec une équipe d'hydrologues du Cemagref d'Aix-en-Provence pour effectuer le relevé de la position de la surface en mesurant les limites du lit mouillé. D'autre part nous avons besoin de faire fonctionner le GPS différentiel (cf. section 5.5, page 38) durant le vol pour permettre à Blom d'effectuer des corrections précises sur le géoréférencement de leurs points LiDAR.

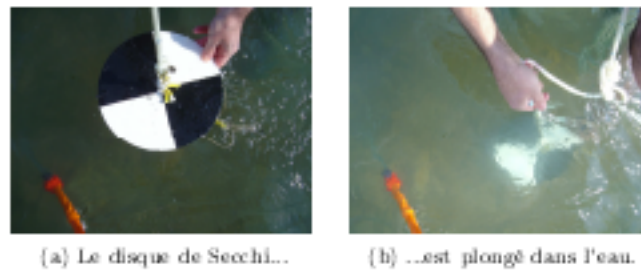


FIG. 9.3 – Manipulation d'un disque de Secchi pour la mesure de turbidité.

Le relevé de la position surface avait pour objectif de nous apporter des informations de référence en vue de les comparer aux données acquises par le LIDAR. Ces mesures ont été effectuées au tachéomètre qui permet de mesurer des angles horizontaux et verticaux — pour mesurer des directions — ainsi que des distances.

Pour mesurer la position d'un point au sol, on utilise un prisme (cf. FIG. 9.4a), monté sur une perche de hauteur connue que l'on tient strictement verticale. Le tachéomètre enregistre les angles et la distance au prisme après visée de celui-ci (cf. FIG. 9.4b). Cet appareil permet des relevés précis de l'ordre de quelques millimètres.

Tous les 10 m, nous avons relevé la position du bord de lit mouillé, ce qui équivaut à relever la position de la surface de l'eau. Par un maillage des points, on peut ainsi reconstruire la surface de l'eau en 3 dimensions.

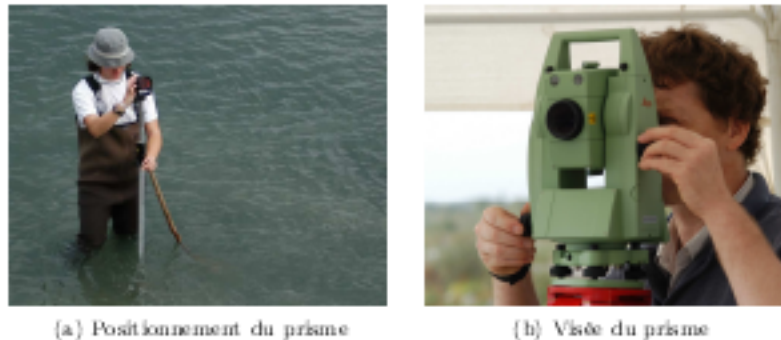


FIG. 9.4 – Mesure au tachéomètre de la position d'un point situé dans l'eau.

9.4 Topographie du fond

Les relevés topographiques du fond ont été effectués en deux fois. Dans un premier temps nous avons relevé le maximum points au DGPS, en effectuant les traversées d'une rive à l'autre tout les 15 m. Le GPS mobile se portant dans un sac à dos, nous n'avons pu opérer que sur les zones dont la profondeur n'excédait

pas 1,20 m pour ne pas submerger l'appareil. Ces relevés ont duré une journée de travail à trois personnes.

Afin de compléter les mesures sur les zones plus profondes, nous avons une nouvelle fois fait appel aux deux ingénieurs du Cemagref d'Aix-en-Provence disposant du matériel adéquat. Nous avons donc utilisé le tachéomètre et la nage pour relever les zones inférieures à 1,8 m. Enfin, les zones les plus profondes — jusqu'à 3 m — ont été mesurées depuis une petite embarcation à l'aide d'un décimètre plombé visé par le tachéomètre. Ces relevés nous ont pris une journée de travail à six personnes.

9.5 Analyse des données

Afin de qualifier la performance du LIDAR, nous avons effectué divers traitements sur les données. Ces résultats donneront lieu à une publication à la conférence *Remote Sensing of Rivers : Methods, Applications, and Theory* de la European Geosciences Union (EGU), à Vienne en Autriche au mois d'avril.

9.5.1 Aspect général

Dans un premier temps, on a interpolé en grille régulière les données LIDAR et les données terrain. Cette technique nous permet de comparer les formes du lit de la rivière issues des deux sources de données. Les résultats font part d'une grande ressemblance entre les deux cartes (cf. FIG. 9.5) ; la carte issue des données LIDAR ayant été corrigée du biais moyen. En effet, les données livrées étaient décalées d'en moyenne 79,4 cm vers le bas.

En visualisant les profils LIDAR et terrain de la rivière, on confirme les ressemblances. On remarque aussi un léger bruit de mesure du LIDAR au niveau des profondeurs très faibles ainsi qu'une exagération des zones des plus profondes (cf. FIG. 9.6). On observe aussi quelques points entre 75 et 82 m probablement issus de la présence de végétation dans le champ de mesure sur les bords du lit de la rivière.

9.5.2 Densité de points

La densité des points LIDAR en fonction de la profondeur est également une caractéristique de la qualité des données. Elle est supérieure à 0,4 point/m² jusqu'à 2,5 m de profondeur. Elle diminue ensuite pour atteindre 0,2 point/m² à 4 m (cf. FIG. 9.7). La présence d'une cuvette entre 0 et 0,5 m est en grande partie due aux effets de bords car la mesure LIDAR s'arrête souvent non loin de la bordure du lit mouillé. On manque donc de points pour calculer la densité sur 5 m en ces bords.

La forme du nuage dépend certainement de la calibration du système LIDAR. Il avait ici été calibré pour cartographier des zones profondes de 0 à 2 m. On observe donc une densité optimale aux environ d'1 m de profondeur.

9.5.3 Répartition de l'erreur

Il est important d'étudier la répartition de l'erreur de mesure pour différentes classes de hauteurs d'eau ainsi que sa structure spatiale. Cette étude a

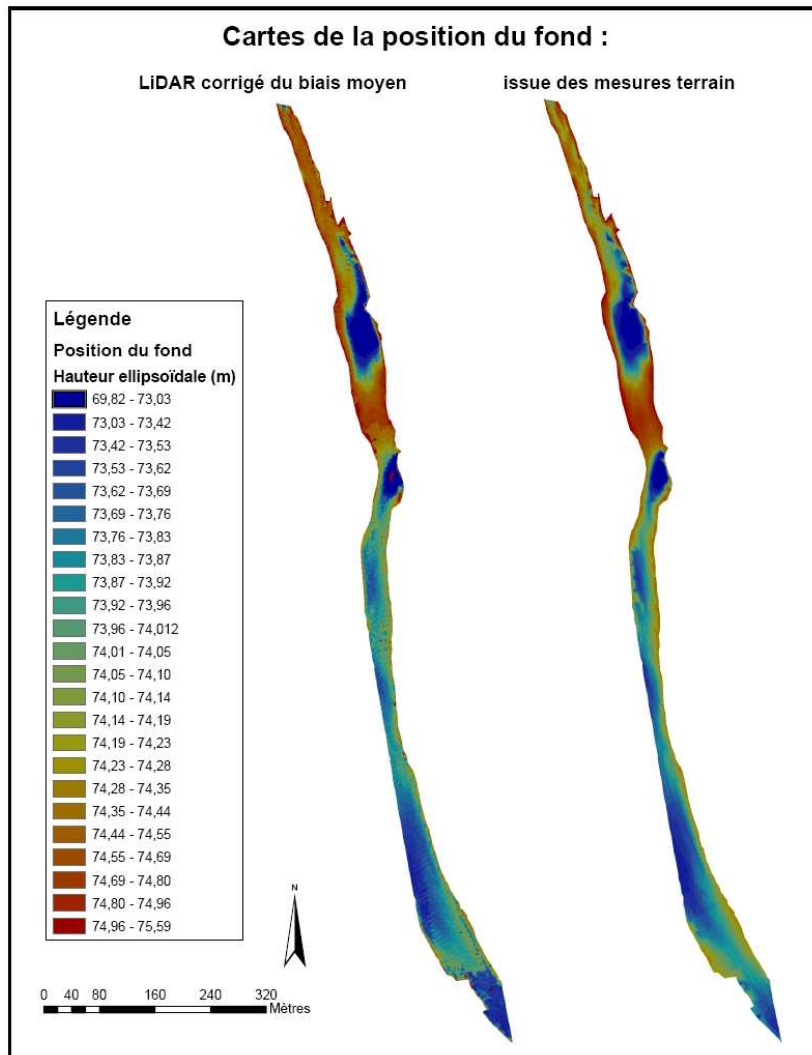


FIG. 9.5 – Cartes des profondeurs en grilles régulières de 50 cm de côté.

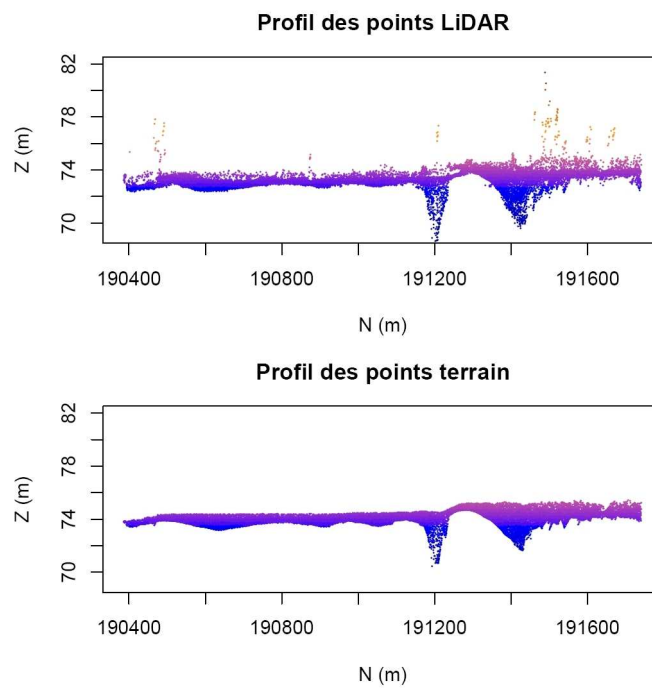


FIG. 9.6 – Profils de la rivière selon les deux sources de données, dans le sens aval/amont suivant N croissant.

été effectuée en interpolant les points terrain sur l'ensemble de la zone pour comparer chaque point LiDAR à une référence. La technique utilisée ne tient dans un premier temps pas compte des différences de résolution entre les points terrain et les empreintes LiDAR.

On observe un biais variable en fonction de la profondeur (cf. FIG. 9.8). Ce biais est compris entre 0,65 m et 1,80 m (cf. TAB. 9.5.3). Il peut s'expliquer par :

- des décalages de positionnement global entre le GPS avion et les GPS terrain utilisés, dus par exemple à une différence de grille de géoïde utilisée.
- une mauvaise calibration à posteriori. En effet, une calibration est effectuée avec quelques points terrain car de nombreuses caractéristiques non connues de l'eau influent sur la mesure de distance à travers l'eau. Seuls des points de faibles profondeurs ont été utilisés par Blom.

Bien que l'on obtienne un certain nombre de valeurs aberrantes, la dispersion moyenne de l'erreur est de 32,1 cm. Elle est cependant plus faible pour les hauteurs comprises entre 0,2 m et 1 m, et plus forte pour les très faibles profondeurs (<0,2 m) et pour des celles supérieures à 1 m.

Sur le tableau 9.5.3 peut aussi voir qu'en deçà d'environ 40 cm, la dispersion est du même ordre de grandeur que la profondeur recherchée. La mesure n'est donc plus fiable.

En observant la répartition géographique de l'erreur, on confirme bien qu'elle est plus importante dans les zones les plus profondes (cf. FIG. 9.9). Aussi, on remarque une sous-estimation de la profondeur dans les zones où la structure du fond de l'eau est plus chaotique (au nord de la carte).

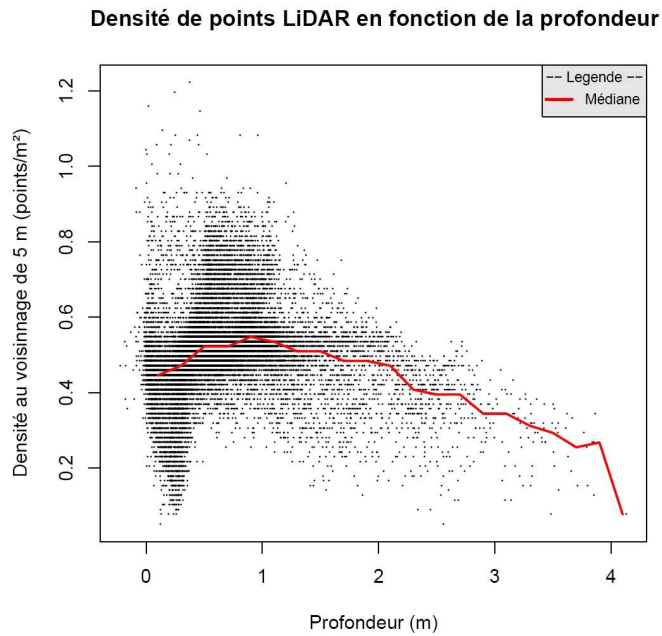


FIG. 9.7 – Densité de points LiDAR selon la profondeur de la rivière.

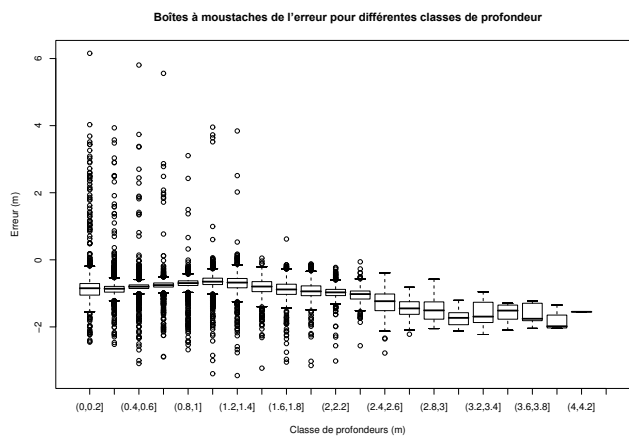


FIG. 9.8 – Répartition de l'erreur pour différentes classes de profondeur.

Profondeur (m)	Biais	Dispersion
]0 ; 0,2]	-0,821	0,502
]0,2 ; 0,4]	-0,868	0,278
]0,4 ; 0,6]	-0,801	0,224
]0,6 ; 0,8]	-0,754	0,219
]0,8 ; 1]	-0,705	0,206
]1 ; 1,2]	-0,655	0,329
]1,2 ; 1,4]	-0,717	0,451
]1,4 ; 1,6]	-0,839	0,375
]1,6 ; 1,8]	-0,914	0,440
]1,8 ; 2]	-0,926	0,425
]2 ; 2,2]	-0,996	0,360
]2,2 ; 2,4]	-1,054	0,311
]2,4 ; 2,6]	-1,286	0,374
]2,6 ; 2,8]	-1,448	0,319
]2,8 ; 3]	-1,469	0,378
]3 ; 3,2]	-1,708	0,267
]3,2 ; 3,4]	-1,584	0,375
]3,4 ; 3,6]	-1,581	0,240
]3,6 ; 3,8]	-1,610	0,319
]3,8 ; 4]	-1,839	0,330
]0 ; 4]	-0,794	0,321

TAB. 9.1 – Valeurs du biais (\bar{E}) et de la dispersion (σ_E) de l'erreur (E) par classe de profondeurs.

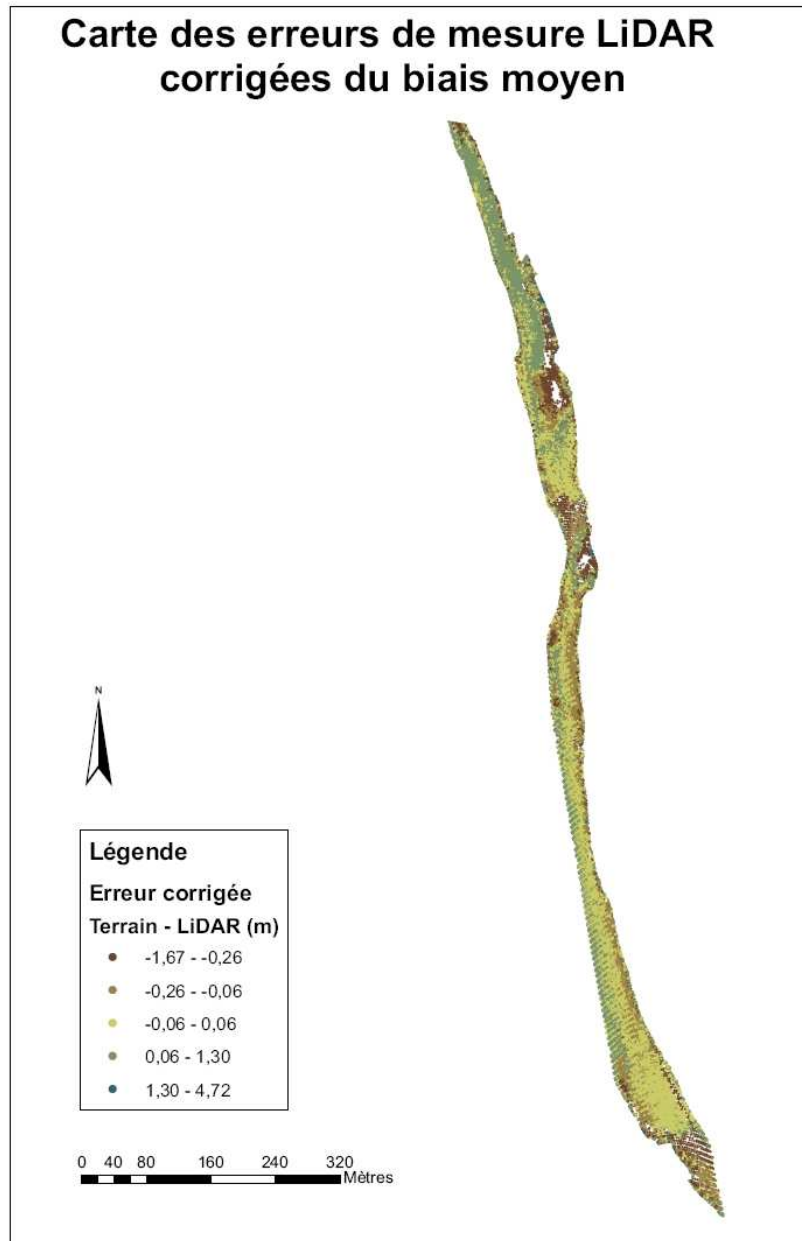


FIG. 9.9 – Carte des erreurs de mesure du LiDAR.

Quatrième partie

Les dimensions humaines et managériales internes à l'organisme d'accueil

Chapitre 10

L'organisation de la recherche publique

L'organisation de la recherche publique est très différente de celle d'une entreprise privée. L'entité de recherche la plus simple est le laboratoire, appelé aussi unité de recherche (UR), qui peut être rattaché à un organisme de recherche ou à une université. Son fonctionnement est régi par certaines règles en vigueur dans le métier.

10.1 Composition d'une unité de recherche

Une unité de recherche est une entité destinée à fournir le cadre nécessaire au bon déroulement de la recherche. On y trouve :

Des chercheurs qui peuvent être enseignants-chercheurs rattachés à un établissement d'enseignement supérieur, chercheurs titulaires ou contractuels, doctorants sous contrat avec une université ou un organisme de recherche, ou bien stagiaires de type Master recherche.

Des ingénieurs et des techniciens qui ont en charge la gestion des dispositifs expérimentaux. Ils peuvent être titulaires, contractuels ou stagiaires.

Des personnels administratifs qui ont en charge la gestion des démarches administratives pour fournir un soutien aux chercheurs.

10.2 Affiliation de l'unité

Une unité de recherche peut être rattachée à un ou plusieurs établissements de recherche ou d'enseignement supérieur appelés organismes de tutelle. L'organisme de tutelle est en général le propriétaire ou le gérant des locaux, le responsable légal des unités, le titulaire des comptes bancaires, ainsi que l'employeur de la majorité du personnel.

Lorsqu'une unité de recherche est sous tutelle de plusieurs organismes, elle devient une unité mixte de recherche (UMR).

10.3 Financement de l'unité

Pour son financement, une unité de recherche a deux solutions. La première est son subventionnement par de l'argent public. La seconde est la recherche de contrats qu'elle peut passer avec diverses entités comme des entreprises privées, des collectivités ou bien d'autres organismes de recherche.

10.4 Valorisation des travaux de recherche

Les chercheurs, regroupés en équipes, doivent présenter leurs travaux à d'autres chercheurs ou industriels soit lors de séminaires scientifiques, soit par l'intermédiaire de publications dans des revues scientifiques.

Les réalisations issues de contrats soumis au secret industriel ne sont bien sûr pas présentées en détail, mais la majorité des travaux font l'objet d'une communication. Une bonne communication doit s'appuyer sur les sources et références déjà existantes d'autres chercheurs avant d'être soumise à une revue qui choisit ou non de publier l'article. Il existe évidemment des revues plus prestigieuses que d'autres, classées selon leur facteur d'impact. Ce facteur est un indice calculé chaque année par l'Institute for Scientific Information (ISI) pour chaque revue indexée. Pour une revue X, il est égal au quotient de la fréquence de citation d'article de X dans d'autres revues sur le nombre total d'articles de X.

10.5 Évaluation de la recherche

Une unité de recherche est évaluée tous les quatre ans. Cette évaluation s'effectue individuellement au niveau des chercheurs puis est reportée au niveau de l'unité. Elle prend en compte le nombre de publications scientifiques, leur positionnement dans des revues à facteur d'impact, la participation à des séminaires, les formations reçues ou dispensées, la participation à des actions d'animation scientifique ou de vulgarisation. Chaque projet est aussi évalué, soit par le client pour les contrats bilatéraux, soit par un comité d'évaluation composé de chercheurs extérieurs pour les projets plus complexes. De ces évaluations dépend la subvention attribuée à l'unité, ses contrats futurs mais aussi l'évolution de la carrière d'un chercheur au sein de son unité.

Chapitre 11

Le positionnement stratégique du Cemagref

Le Cemagref est un organisme public de recherche appliquée. Ses compétences en sciences pour l'ingénierie de la gestion durable des eaux et des territoires sont reconnues tant au niveau national qu'europpéen. Sa légitimité est appuyée par l'orientation des politiques vers une gestion durable de l'environnement. Aussi, elle lui permet de conclure de nombreux partenariats, tant avec des collectivités que d'autre organismes publics ou privés.

11.1 Contexte

L'avenir de la société est conditionné par sa capacité à modifier ses pratiques pour les rendre durables. Le Cemagref aide donc les décideurs à orienter correctement leurs politiques, que ce soit dans la gestion de l'eau, de l'agriculture et de l'aménagement.

Dans le domaine de l'eau, le Cemagref propose de répondre aux nouveaux besoins de recherche et d'expertise liés aux directives européennes sur le traitement des eaux usées, une irrigation efficiente, une prévision de la sécheresse ou des crues.

Pour ce qui est de l'agriculture et de l'aménagement dans les campagnes, qui perdent leur spécificité agricole en même temps qu'elles gagnent un solde migratoire positif, le Cemagref travaille sur la manière de faire coexister la production de biens agricoles et forestiers avec les attentes des populations. Aussi, le Cemagref se charge de comprendre les phénomènes et d'analyser les vulnérabilités afin de sensibiliser sur les effets des polluants sur la santé et sur les risques liés à l'utilisation des technologies.

Afin de mener à bien ses projets, le Cemagref a besoin de s'associer pour développer des compétences complémentaires et traiter de questions multidisciplinaires.

11.2 Partenariats

Pour construire ses projets de recherche, le Cemagref lie des partenariats qui peuvent prendre place dans un contexte de proximité géographique mais aussi national, européen, et international. L'ensemble des ressources contractuelles en 2007 s'élève à 18,2 M€, ce qui représente 20,5 % du montant total du budget (88,9 M€). L'État est le principal partenaire, mais les partenariats avec des entreprises et des bureaux d'études est la seconde source de revenus contractuels (cf. FIG. 11.1).



FIG. 11.1 – Les ressources contractuelles du Cemagref

À côté de ces partenariats financiers, il existe une grande collaboration entre le Cemagref et les établissements d'enseignement supérieur. En effet, les travaux de recherche sont menés par de nombreux doctorants et stagiaires de niveau Master issus d'écoles doctorales et d'universités partenaires, dans certaines desquelles il participe à l'enseignement.

En 2006, 202 stagiaires de niveau Master 2 ont été encadrés au Cemagref, et 203 doctorants réalisaient une thèse.

11.3 Production et diffusion de connaissances

Les produits du Cemagref sont de différentes nature, car ils sont adaptés aux utilisateurs auxquels ils sont destinés. Ainsi, on peut citer les 41 brevets et les 16 marques déposés, ainsi que les 10 logiciels commercialisés.

Aussi, le Cemagref diffuse beaucoup de ces travaux sous la forme de 900 publications/an et 620 communications/an à des colloques.

Parmi les autres produits, on trouve 709 mois-ingénieurs/an destinés à l'expertise et au conseil des services publics, ainsi que les 10 % du temps annuel des ingénieurs et des chercheurs destinés à l'enseignement supérieur dans plus de 50 universités et écoles.

11.4 Ressources humaines

Les personnels titulaires du Cemagref sont soumis au statut général de la fonction publique de l'État, régit par des lois et des décrets. Les personnels sont

donc recrutés par concours selon leur branche d'activité et leur niveau d'étude, et leur carrière est régie de façon très stricte selon des grilles d'évolution.

Le Cemagref distingue trois corps de métiers :

1. *Corps de la catégorie A de la fonction publique :*
 - Ingénieurs de recherche, recrutés à bac+5/bac+8 ;
 - Ingénieurs d'études, recrutés à bac+3/bac+5 ;
 - Assistants ingénieurs, recrutés à bac+2.
2. *Corps de la catégorie B de la fonction publique :*
 - Techniciens de la recherche, recrutés à bac/bac+2.
3. *Corps de la catégorie C de la fonction publique :*
 - Adjointes techniques de la recherche, recrutés à BEP ;
 - Agents techniques de la recherche, recrutés à CAP.

L'ingénieur d'étude a pour mission de travailler à l'élaboration et au développement de techniques scientifiques nouvelles, et à l'amélioration de leur résultats. Il est responsable de la communication et de la valorisation de ces résultats. Par son statut, il peut participer à l'encadrement du personnel du service auquel il est affecté, qu'ils soient assistants ingénieurs ou personnels techniques et administratifs. Enfin, il peut se voir confier des missions de coopération internationale, d'enseignement ou d'administration de la recherche.

Sa carrière est divisée en trois grades (2^e classe, 1^{er} classe et hors classe) qu'il peut gravir selon ses résultats et son ancienneté. Ces grades, découpés en échelons ont un effet sur le salaire mensuel attribué. Il débute à 1 677,68 € pour finir à 3 550,34 €.

L'ingénieur de recherche, quant à lui, a pour mission d'orienter et de coordonner les activités de recherche. Il peut être responsable de l'encadrement de l'ensemble des personnels ingénieurs, techniques ou administratifs de l'unité de recherche ou du service auquel il est rattaché. Enfin, comme l'ingénieur d'études, il peut se voir confier des missions de coopération internationale, d'enseignement ou d'administration de la recherche.

Sa carrière est elle aussi divisée en trois grades (2^e classe, 1^{er} classe et hors classe) qu'il peut gravir selon ses résultats et son ancienneté. Ces grades, découpés en échelons ont un effet sur le salaire attribué. Il débute à 1 868,13 € pour finir à 3 722,64 €.

11.5 Avenir

La volonté du Cemagref est de devenir la référence en sciences pour l'ingénierie de la gestion durable des eaux et des territoires. L'organisation de ses unités de recherche donc été découpée pour répondre à des problématiques précises en termes de besoins socio-économiques et de politiques publiques. Les partenariats, l'animation scientifique et l'accueil des chercheurs issus d'horizons divers sont les moteurs de cette expertise.

Cinquième partie

Conclusion

Conclusion

Grâce à la signature du contrat avec le SHOM nous avons obtenu de premières données LIDAR bathymétriques. Par des analyses statistiques de ces données par rapport à des données de référence que nous avons collecté, nous avons pu étudier la performance de la mesure, plus particulièrement dans les zones faiblement profondes (< 2 m). Il en est ressorti une précision de 37,4 cm dans les zones d'études avec une profondeur minimale détectable se situant aux alentours de 1,8 m.

Par un retraitement des formes d'ondes, je suis arrivé à améliorer la profondeur minimale détectable en la ramenant aux alentours de 1 m, avec une précision quasiment identique de 37,7 cm.

En comparaison avec nos travaux de modélisation, nous estimons que la profondeur minimale détectable peut encore être améliorée d'environ 60 cm. Les résultats de ces travaux ont d'ailleurs été confirmés par l'analyse des données LIDAR acquises sur le Gardon avec le capteur HawkEye. Il en ressort une précision de 32,1 cm avec une profondeur minimale détectable aux alentours de 40 cm.

Cependant, nous avons rencontré de nombreux problèmes dans la validation de notre modèle et dans le développement des méthodes de traitement du signal. Ces problèmes sont dus à l'absence d'informations protégées par le secret industriel relatives aux paramètres matériel utilisés, comme la puissance du signal, l'échelle d'échantillonnage et la valeur du décalage temporel des signaux. C'est pourquoi, nous n'avons finalement pas pu valider notre modèle théorique de trains d'ondes retour. Aussi, bien que nos résultats soient concluants, nous avons introduit des erreurs dans les traitements par la non-connaissance de certains paramètres.

D'après les résultats obtenus sur le Gardon, le LIDAR semble adapté à la cartographie de lits de rivière et les très faibles profondeurs (< 40 cm) semblent aujourd'hui être le principal facteur d'amélioration pour les différents constructeurs de LIDAR bathymétrique. Les recherches dans ce domaine sont donc actives, et on voit apparaître de plus en plus d'essais sur des rivières, comme l'attestent les travaux récemment publiés ainsi que notre levé sur le Gardon [McKean *et al.*, 2006] [Kinzel *et al.*, 2007] [Hilldale et Raff, 2007].

Aujourd'hui, le CNES constitue un groupe de réflexion sur le lancement de missions LIDAR sur satellites pour des applications topographiques et bathymétriques. Le SHOM et le Cemagref seront partenaires de ce groupe de réflexion suite en partie aux études présentées dans ce mémoire.

Bibliographie

- [Feurer *et al.*, 2007] FEURER, D., PUECH, C., VIAU, A., BAILLY, J. et LE COARRER, Y. (2007). River depth measurement with through-water photogrammetry using non-metric cameras : error sources analysis. In *IGARSS, Barcelona, Spain*.
- [Fox et AT&T, 1984] FOX, P. A. et AT&T, B. T. L. I. (1984). The port mathematical subroutine library. <http://www.bell-labs.com/project/PORT/>.
- [Gaston, 2003] GASTON, G. (2003). Etude comparative de fonctions de réflectance bidirectionnelle calculées par méthode de monte-carlo et de leurs modèles théoriques. Mémoire de D.E.A., ENSMA. Laboratoire IRCOM-SIC.
- [Guenther et Messick, 1988] GUENTHER, G. C. et MESSICK, H. C. (1988). Automated lidar waveform processing. *U.S. hydrographic conference '88 3rd biennial, National ocean service international hydrographic, conference April 12-15, 1988 Baltimore, Maryland*, 21:52-59.
- [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*, 9999(9999):n/a.
- [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.
- [Lesaignoux, 2006] LESAIGNOUX, A. (2006). Modélisation et simulations de trains d'ondes lidar vert : application à la détection de faibles lames d'eau en rivière. Mémoire de D.E.A., Master Professionnel Physique Informatique de l'Université de Montpellier II.
- [Lyon *et al.*, 1992] LYON, J., LUNETTA, R. et WILLIAMS, D. (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*, 58:951-956.
- [McKean *et al.*, 2006] MCKEAN, J., WRIGHT, W. et ISAAK, D. (2006). Mapping channel morphology and stream habitat with a full waveform water-penetrating green lidar. In *Geophysical Research Abstracts*, volume Vol.8.
- [Pe'eri et Philpot, 2007] PE'ERI, S. et PHILPOT, W. (2007). Increasing the existence of very shallow-water lidar measurements using the red-channel waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5):1217-1223.

BIBLIOGRAPHIE

- [Wong et Antoniou, 1991] WONG, H. et ANTONIOU, A. (1991). Characterization and decomposition of waveforms for larsen 500 airborne system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(6):912–921. Cited By (since 1996) : 5.
- [Wong et Antoniou, 1994] WONG, H. et ANTONIOU, A. (1994). One-dimensional signal processing techniques for airborne laser bathymetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(1):35–46. Cited By (since 1996) : 6.

Sixième partie

Annexes

Annexe A

Manuel de l'outil de simulation

Manuel d'utilisation du package R
"SimulLidarBathy"

Audrey LESAIGNOUX Jean-Stéphane BAILLY
Tristan ALLOUIS

21 mars 2007

UMR TETIS
"Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale"
Cemagref-CIRAD-ENGREF
Maison de la Télédétection
500 rue Jean François BRETON - 34093 Montpellier Cedex 5

`simule.onde`

Simule un train d'onde Lidar

Description

`simule.onde` permet de simuler un train d'onde lidar à partir de paramètres du système lidar et de la cible immergée (rivière). Cette fonction simule l'impulsion d'origine ainsi que les retours d'ondes issus de la surface de l'eau, de la colonne d'eau, du fond ainsi que le bruit lié au détecteur. Pour personnaliser les paramètres, vous pouvez modifier directement les fichiers de données ou utiliser le paramètre `modifications` de la fonction.

Utilisation

`simule.onde(paramRiviere, paramSysteme, paramAtmosphere, modifications)`

Arguments

- `paramRiviere` Le fichier contenant les paramètres de la rivière :
`param/paramRiviere.dat` (voir section Exemples).

- `paramSysteme` Le fichier contenant les paramètres du système lidar :
`param/paramSysteme.dat` (voir section Exemples).

- `paramAtmosphere` Le fichier contenant les paramètres de l'atmosphère :
`param/paramAtmosphere.dat` (voir section Exemples).

- `modifications` Une liste facultative contenant les paramètres à modifier. Utilisez `R1...R24` pour modifier les paramètres de la rivière, `S1...S9` pour modifier les paramètres du système lidar, `A1...A7` pour modifier les paramètres de l'atmosphère. Voir la section Détails pour plus de précisions.

Détails

`paramRiviere.dat` Le fichier est organisé de la manière suivante :

```
#####
## Surface simulation ##
#####
###Surface slope in rad (1)
0
###Microfacet slope in rad (2)
0.26
###Surface rough m (3)
0.2
###Diffuse coefficient surface [0,1]:
```

```

###0 absorption-1 total reflexion (4)
0.5
###Specular coefficient surface [0,1]:
###0 absorption-1 total reflexion(5)
0.5

#####
## Water ##
#####
###Laser spot e-1/2 minor axis
###on the water surface in meter (6)
1
###Celerity on water (7)
2.25e+8
###Single scattering albedo (8)
0.7
###Volume scattering function at pi,
###beta(pi) (9)
0.0014
###Reflectance r (10)
0.02
###Transmittance t (11)
0.98
###Attenuation coefficient c (12)
0.5
###Scattering coefficient b (13)
0.35
###First cosine moment cos(tetasc) (14)
0.9404
###Attenuation coefficient K (15)
0.17
###Bottom reflectance (16)
0.1
###Field of view loss factor (17)
1
###WATER DEPTH in meter (18)
0.8

#####
## Bottom simulation ##
#####
###Refraction index of bottom (19)
1.2
###Bottom slope in rad (20)
0
###Microfacet slope in rad (21)
0.26
###Bottom rough m (22)
0.06
###Diffuse coefficient bottom (23)

```

```

0.5
###Specular coefficient bottom(24)
0.5

paramSysteme.dat  Le fichier est organisé de la manière suivante :

#####
## Laser system ##
#####
###Pulse energy E0 in joule (1)
3e-3
###Beam off-nadir angle tet0 in rad (2)
0.35
###Flight altitude H in meter(3)
200
###Pulse lenght FWHM t0 in seconde (4)
7e-9
###Optical efficiency etaT (5)
0.9

#####
## Receiver system ##
#####
###Aperture area Ar in meter^2 (6)
0.025
###Field of view FOV in rad (7)
5e-3
###Optical efficiency etaR (8)
0.5
###Bandwidth of the optical filter
###deltalam in meter (9)
1e-9

paramAtmosphere.dat  Le fichier est organisé de la manière suivante :

#####
## Atmosphere & Air ##
#####
###Two-way atmospheric loss Tatm (1)
0.9
###Solar radiance Ls (2)
0.02e-9
###Celerity on air (3)
3e+8

#####
## Detector Noise ##
#####
###Electron charge (4)
1.602e-19

```



```

###Detector response (5)
2.8e-9
###Excess noise factor (6)
1
###Responsivities (7)
0.04
    
```

Retour

`simule.onde` retourne une liste contenant les valeurs des puissances renvoyées par chaque partie de l'environnement (surface, colonne d'eau, fond) en vue de l'affichage des graphiques :

<code>t</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour la puissance transmise.
<code>T</code>	Vecteur contenant les puissances transmises.
<code>ts</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour la puissances reçue de la surface de l'eau.
<code>Ps</code>	Vecteur contenant les puissances reçues de la surface de l'eau.
<code>tc</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour la puissance reçue de la colonne d'eau.
<code>Pbsc</code>	Vecteur contenant les puissances reçues de la colonne d'eau.
<code>tb</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour la puissance reçue du fond de l'eau.
<code>Pb</code>	Vecteur contenant les puissances reçues du fond de l'eau.
<code>Pn</code>	Vecteur contenant les puissances issues du bruit lié au détecteur.
<code>tf</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour la puissance totale reçue.
<code>Ptot</code>	Vecteur contenant les puissances totales reçues.
<code>surfreal</code>	Position réelle de la surface.
<code>fondreal</code>	Position réelle du fond.
<code>...</code>	Quelques données issues des fichiers de paramètres telles la célérité de l'eau ou la profondeur réelle.

Références

LESAINOUX A., *Modélisation 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, 2006

Exemples

```

#Appel de la fonction avec les paramètres contenus exclusivement
# dans les fichiers .dat
res = simule.onde("param/paramRiviere.dat", "param/paramSysteme.dat",
"param/paramAtmosphere.dat")
    
```

```
#Appel de la fonction avec les paramètres contenus dans les fichiers .dat
#mais en modifiant la hauteur d'eau et la rugosité de la surface.
res = simule.onde("param/paramRiviere.dat", "param/paramSysteme.dat",
"param/paramAtmosphere.dat", list(R18=0.7, R3=0.02))
```

`affiche.simulation`

Affiche un train d'onde

Description

`affiche.simulation` permet d'afficher les résultats fournis par la fonction `simule.onde`. Elle permet d'afficher 6 graphiques différents :

1. l'impulsion du laser vert
2. la puissance retournée par la surface de l'eau
3. la puissance retournée par la colonne d'eau
4. la puissance retournée par le fond de l'eau
5. le bruit du détecteur
6. la puissance totale retournée

Utilisation

`affiche.simulation(donnees, affichage)`

Arguments

donnees La liste contenant les données à afficher. Elle est retournée par la fonction `simule.onde`.

affichage Un vecteur facultatif spécifiant les graphiques désirés. Par défaut la fonction affiche les 6 graphiques.

Exemples

```
#Affiche les 6 graphiques des données fournies par simule.onde
#dans res
affiche.simulation(res)
```

```
#Affiche les graphiques 1, 2, 4 et 6 des données fournies par
#simule.onde dans res
affiche.simulation(res, c(1,2,4,6))
```

`approxime.onde`

Approxime un train d'onde

Description

`approxime.onde` permet d'approximer un train d'onde retour, dont les paramètres réels sont inconnus, en vue d'estimer la bathymétrie correspondante. Cette fonction utilise deux modèles d'approximation. Le premier est basé sur une combinaison de deux gaussiennes et la seconde sur une combinaison d'une gaussienne et d'une log-normale. Ces deux modèles sont optimisés par la méthode de Gauss-Newton.

Utilisation

`approxime.onde(donnees, type)`

Arguments

donnees La liste contenant les données à afficher. Elle est retournée par la fonction `simule.onde`.

type Une valeur spécifiant le modèle d'approximation à utiliser. 1 pour les deux gaussiennes, 2 pour la gaussienne et la log-normale.

Détails

- Le premier modèle d'approximation est préférable pour les profondeurs inférieures à 1 mètre.
- Le second est préférable pour des profondeurs supérieures à 1 mètre.

La fonction s'arrête automatiquement si aucune approximation n'a pu être déterminée après 50 itérations.

Retour

`approxime.onde` retourne les paramètres de l'onde ainsi que ceux de l'onde estimée en vue de l'affichage des graphiques :

<code>ok</code>	Booléen informant sur la validité des données.
<code>x</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour l'approximation de l'onde reçue.
<code>f</code>	Vecteur contenant l'approximation des valeurs de l'onde reçue
<code>tf</code>	Vecteur contenant l'échelle de temps pour l'onde reçue.
<code>Ptot</code>	Vecteur contenant les valeurs de l'onde reçue.

`coefCorrel` Valeur du coefficient de corrélation entre l'approximation de l'onde et la valeur réelle.
`profondeur` Valeur de la profondeur estimée.

Références

LESAINOUX A., *Modélisation 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, 2006

Exemples

```
#Approxime selon le modèle 1 l'onde fournie par simule.onde dans res  
res2 = approxime.onde(res, 1)
```

`affiche.approximation` *Affiche l'approximation d'un train d'onde*

Description

`affiche.approximation` permet d'afficher les résultats fournis par la fonction `approxime.onde`. Elle permet d'afficher l'onde reçue ainsi que sont approximation.

Utilisation

```
affiche.approximation(donnees)
```

Arguments

`donnees` La liste contenant les données à afficher. Elle est retournée par la fonction `approxime.onde`.

Exemples

```
#Affiche le graphique des données fournies par approxime.onde  
#dans res  
affiche.approximation(res2)
```


Annexe B

Article soumis à la revue de
la SFPT

EPAISSEUR D'EAU MINIMALE MESURABLE EN RIVIERE SUR FRONTS D'ONDES LIDAR SIMULES

Audrey Lesaignoux, Jean-Stéphane Bailly, Tristan Allouis, Denis Feurer

UMR Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
Cemagref-Engref-Cirad

500 rue J.F. Breton

34 093 Montpellier Cedex 5, France

E-mails : audrey.lesaignoux@wanadoo.fr / {bailly/allouis/feurer}@teledetection.fr

Article soumis le jour mois 2007 et accepté le jour mois 2007. Version finale reçue le jour mois 2007.

Résumé

La connaissance de la bathymétrie et de la topographie des surfaces continentales immergées est limitée par les techniques actuelles en terme de couverture spatiale, pour des problèmes d'accessibilité et de plage de mesures. Ces limites ont des conséquences directes sur les possibilités d'études hydrauliques et écologiques aux échelles de gestion des eaux continentales. Pour cartographier la bathymétrie sur de grands linéaires de rivières, le LiDAR¹ Bathymétrie peut apparaître une technique de télédétection prometteuse. Cependant, s'il existe des références sur la précision et les limites des mesures par cette technique dans le cadre des zones littorales, peu de références existent sur les eaux continentales. Afin de juger de l'utilité du LiDAR bathymétrique sur rivière, cette étude cherche à estimer la profondeur d'eau minimale H_{inf} , que l'on peut théoriquement détecter par LIDAR en fonction de caractéristiques de la rivière, notamment de la surface de l'eau (rugosité, pente longitudinale). Pour ce faire, un modèle de train d'ondes LiDAR vert, à partir de paramètres du système LiDAR et de la rivière, a été développé. Un ensemble de trains d'ondes a été simulé suivant ce modèle et une méthodologie d'estimation de la limite recherchée H_{inf} est proposée. Pour un premier jeu de paramètres de référence (pente nulle et rugosité moyenne de la surface de l'eau), l'épaisseur d'eau minimale théoriquement mesurable est $H_{inf} = 0.41$ m avec pour intervalle à 95 % [0.31, 0.45]. D'autres valeurs de rugosité ont été testées et laissent apparaître un optimum de rugosité peu significatif. La méthodologie développée, une fois validée sur des données expérimentales, pourrait être étendue pour étudier la sensibilité de H_{inf} et de la mesure bathymétrique à une gamme plus large de paramètres de la surface de l'eau et du système LIDAR.

Mots Clés : Métrologie ; LIDAR Bathymétrique ; rivières ; Modélisation de front d'onde ; Rivières ; Rugosité ; BDRF.

Abstract

Bathymetry on continental hydrographic networks is up to now limited to small areas. This hampers exhaustive hydrological or ecological studies on hydrographic networks at management scales. To enlarge rivers bathymetry surveys, bathymetric, i.e. green LiDAR appears as an interesting tool. But if this technique has been widely used for coastal surveys, very few studies focus on water depth measurement quality and limits, in particular for rivers. We aimed here to assess the utility of LiDAR for bathymetry on rivers, in particular the minimum water depth H_{inf} we can theoretically measure with LiDAR, depending on LiDAR system and surface water characteristics. To do so, we developed a model depending on LiDAR parameters and introducing specificities for rivers (roughness and longitudinal slope for water surface). Then, we assessed from a set of simulated full waveforms the inferior limit H_{inf} . In case of mean rough and no longitudinal slope for water surface, a minimum water depth of $H_{inf} = 0.41$ m has been found with the 95 % confidence interval [0.31, 0.45]. Some additional tests using different rugosity values show that a lowly significant rugosity optimum exists. These first results have to be experimentally validated then it could be extended to study the minimum water depth or depth measure quality sensitivities to LiDAR system and water surface parameters.

Keywords : Measure; Bathymetric LiDAR; rivers ; full waveform model; rivers; rugosity, BDRF.

1. Introduction

La connaissance de la profondeur ou de la topographie des surfaces immergées est un point d'entrée incontournable pour l'amélioration de la connaissance des milieux aquatiques littoraux et continentaux. Actuellement, le SONAR multi-faisceaux est la

technique de bathymétrie (mesure de la profondeur) principalement utilisée sur les surfaces immergées continentales. Cette technique présente plusieurs limitations : extension spatiale limitée, difficulté de mise en œuvre sur des rivières peu navigables ou accessibles, profondeur d'eau mesurable supérieure à 1.5 m. Ces limitations ont des conséquences sur les

¹ Light Detection And Ranging

possibilités d'études hydrauliques et écologiques des eaux continentales, notamment pour les rivières à forte évolution et haut potentiel écologique, qui présentent généralement des eaux courantes (faible navigabilité) et des faibles profondeurs. Pour cartographier la bathymétrie sur de grands linéaires de rivières, le LiDAR bathymétrique ou "hydrographique" (LiDAR « vert ») apparaît une technique de télédétection potentiellement adaptée, complémentaire du SONAR [Feurer et al., 2006].

Le LiDAR bathymétrique, développé initialement pour les relevés en zone littorale, a pour principe l'émission-réception d'impulsions lasers intenses (plusieurs mégawatts), à fréquence régulière, dont la durée de cheminement est transformée en distance (Téléométrie laser). Sa particularité est l'utilisation d'impulsions dans deux longueurs d'onde : une impulsion dans l'infrarouge (1064 nm) réfléchi par la surface de l'eau, et une impulsion dans le vert (532 nm) qui pénètre la surface de l'eau puis est réfléchi par le fond de l'eau (figure 1). Du point de vue des autres composantes du système LiDAR (système de balayage, centrales inertielles, D-GPS, ...), il n'y a pas de particularité sur les systèmes LiDAR bathymétriques par rapport aux systèmes LiDAR terrestres [Tuldahl et al., 2004].

Actuellement, on peut relever dans la littérature quelques références sur la précision et les limites de ce type de mesure de bathymétrie dans le cadre des zones littorales. En revanche, aucune référence de revues n'existe à ce jour sur la précision et les limites observées sur des eaux continentales. Seules quelques expériences ont été réalisées sur des lacs et rivières avec un système LiDAR bathymétrique [Millar et al., 2005], [Mc Kean, 2006].

Afin de juger de l'utilité du LiDAR bathymétrique sur rivière, notamment pour les rivières à faible profondeur et à eaux courantes, il apparaît nécessaire d'estimer la profondeur d'eau minimale que l'on peut espérer détecter, voire mesurer, avec cette technique. Cette estimation pourrait s'envisager expérimentalement, mais pour une question de coût on peut l'estimer théoriquement dans un premier temps.

L'objectif de cette étude est d'estimer la profondeur d'eau minimale théoriquement mesurable par LiDAR bathymétrique, notée H_{inf} , en fonction de caractéristiques de la rivière : pente longitudinale, aspects de la surface de l'eau.

Pour répondre à cet objectif, cette étude s'est déroulée en deux phases : 1- Un modèle spécifique de simulation de données LiDAR bathymétrique a été développé. Ce modèle simule des Trains d'Ondes LiDAR Vert (TOLV), à partir de paramètres du système LiDAR et de la rivière ; 2- A partir d'un ensemble de trains d'ondes simulés, et pour quelques jeux de paramètres « rivière », une méthodologie d'estimation de la limite recherchée H_{inf} est proposée.

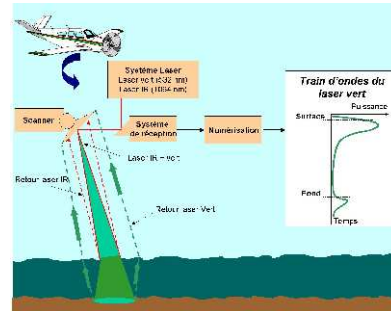


Figure 1 : Principe du LiDAR bathymétrique et cheminement du train d'ondes LiDAR vert (532 nm) et infrarouge (1064 nm)

2. Méthodologie

L'estimation de H_{inf} , se décompose en 4 points successifs :

- 1- Modélisation de TOLV pour un jeu de paramètres donné (système LiDAR, rivière) ;
- 2- Estimation de la bathymétrie sur un TOLV simulé suivant une méthode d'approximation ;
- 3- Détermination de la limite inférieure H_{inf} à partir d'un ensemble de TOLV approximatifs ;
- 4- Calcul de l'intervalle de confiance de l'estimation de cette limite par une approche de type Monte-Carlo.

2.1. Modélisation et simulation de Trains d'Ondes LiDAR Vert (TOLV)

La première phase consiste à développer un modèle de TOLV, lorsque la cible du LiDAR bathymétrique est située sur des eaux de rivière. Ce modèle de train d'ondes est basé en grande partie sur les équations développées pour le milieu côtier [Guenther, 1985]. Le train d'ondes représenté par une puissance en fonction du temps, s'écrit comme la somme de plusieurs puissances retour du laser :

$$P(t) = P_s(t) + P_{bsc}(t) + P_b(t) + P_{bg}(t) + P_N(t)$$

où $P(t)$ est la puissance du retour laser reçue sur le détecteur, et $P_s(t)$, $P_{bsc}(t)$, $P_b(t)$, $P_{bg}(t)$, $P_N(t)$ sont les puissances reçues respectivement de la surface de l'eau, de la colonne d'eau, du fond de l'eau, de la colonne d'air et la puissance liée au bruit du détecteur. Nous spécifierons par la suite uniquement, celle correspondant au retour de la surface de l'eau et du fond. Les autres formulations des puissances reçues peuvent se trouver dans [Lesaignoux, 2006].

2.1.1. Puissances reçues de la surface et du fond de l'eau

La puissance reçue de la surface de l'eau a pour équation :

$$P_s(t) = \frac{\rho P_T(t) T_{atm}^2 \eta_t \eta_r A_r \cos^2(\theta_0)}{\pi L^2}$$

où :

- ρ est la réflectance à l'interface air/eau
- $P_T(t)$ est le pulse transmis par le laser vert (W)
- T_{atm}^2 est le coefficient de transmission de l'atmosphère
- η_t et η_r sont les efficacités optiques en transmission et en réception
- A_r est l'aire du récepteur (m^2)
- θ_0 est l'angle d'incidence nadir du laser (rad)
- L est la hauteur de vol du capteur par rapport à la surface de l'eau (m)

La puissance reçue du fond de l'eau a pour équation :

$$P_o(t) = \frac{(1 - \rho)^2 P_T(t) T_{atm}^2 \eta_t \eta_r q f \rho_b \cos(\theta_0)}{\pi (n_w L + H)^2} \times \exp\left(-\frac{2N(s, \varpi, \theta_0) KH}{\cos(\theta_w)}\right)$$

où :

- H est l'épaisseur d'eau (m)
- q est un facteur empirique qui tient compte de l'atténuation due à l'air et au système LiDAR
- f est un facteur de perte dû au champ de vue du télescope
- ρ_b est la réflectance du fond de l'eau
- n_w et θ_w sont respectivement l'indice de réfraction de l'eau et l'angle de réfraction à l'interface air/eau
- ϖ est l'albédo du fond de l'eau
- s est le coefficient de diffusion de la colonne d'eau
- $N(s, \varpi, \theta_0)$ est un facteur d'étiement du pulse qui dépend du coefficient de diffusion, de l'albédo et de l'angle d'incidence nadir du laser

2.1.2. Adaptation au milieu rivière : modélisation de la réflectance de la surface de l'eau

Afin d'élaborer un modèle de train d'ondes adaptées aux rivières, des hypothèses et éléments supplémentaires ont été introduits : une pente longitudinale non nulle de la surface de l'eau, une homogénéité de la turbidité sans présence d'algues dans la colonne d'eau, et une rugosité de la surface de l'eau dans les zones à forte pente (radiers) suivant des lois géométriques simples.

La rugosité de la surface de l'eau provoque une modification de la valeur de la réflectance par rapport à une surface plane. Par conséquent, pour adapter le modèle à la géométrie de la surface de l'eau d'une rivière, une nouvelle expression de la réflectance a été introduite suivant une Fonction de Distribution de Réflectance Bidirectionnelle (BDRF). Cette fonction est calculée sur le modèle de Cook-Torrance [Gaston, 2003] qui correspond à un modèle microfacettes (figure 2) suivant trois paramètres: 1- la fonction de Fresnel qui

décrit la réflexion de la lumière sur chacune des microfacettes 2- le facteur d'atténuation décrivant l'auto-ombrage des facettes les unes par rapport aux autres; 3- la fonction de distribution des microfacettes qui modélise la rugosité et qui est décrite par la fonction de distribution de Beckmann.



Figure 2 : Modèle microfacettes de Cook-Torrance.

Le modèle de Cook-Torrance (figure 3), a pour expression :

$$r = \sqrt{\frac{|h_v - \sqrt{h_v + \Delta}|^2}{m - 1}}$$

où r est la rugosité et avec $\Delta = \frac{\lambda h_v}{2m}$ où λ est la longueur d'ondes des vaguelettes, h_v est la demi-hauteur de vagues et m est le nombre de microfacettes que l'on considère dans le rayon du spot laser à la surface de l'eau.

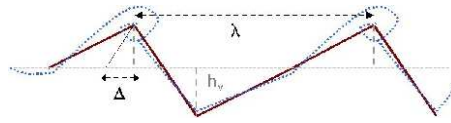


Figure 3 : Modèle microfacettes ($m=4$) de Cook-Torrance de la surface de l'eau (coupe longitudinale).

2.2. Estimation de la bathymétrie sur un Train d'Ondes LiDAR Vert (TOLV) simulé

Une procédure d'estimation de la bathymétrie \hat{H} à partir de la détection des pics de surface et de fond sur un TOLV simulé (voir exemples en figure 4) a été développée suivant une méthode d'approximation. Cette approximation s'effectue classiquement suivant un mélange de lois Gaussiennes optimisé par un algorithme itératif de moindres carrés (figure 6). Ainsi, on peut, pour un train d'ondes simulé à partir d'une profondeur H réelle, estimer une profondeur d'eau \hat{H} suivant cette procédure (celle généralement utilisée sur les systèmes LiDAR full waveform [Zwally et al., 2002]).

2.3. Détermination de la limite inférieure H_{inf}

Le processus d'estimation de la limite inférieure H_{inf} a été établi en deux étapes successives (figure 7) :

- 1- On génère des couples (\hat{H}, H) , à partir de TOLV simulés ayant pour paramètre de profondeur réelle H une valeur prise aléatoirement dans un intervalle $[0, 1]$ mètre, les autres paramètres de rivière étant fixés.

2- Sur le nuage de points (**E**, **H**) obtenu, avec $\mathbf{E}=\hat{\mathbf{H}}-\mathbf{H}$, on estime, pour chaque valeur de **H**, l'écart-type de **E**, σ_E . La limite de détection H_{inf} , est alors la valeur de **H** (profondeur réelle) à partir de laquelle on obtient σ_E plus grand qu'un seuil donné (trop grande dispersion des valeurs estimées \hat{H}).

2.4. Intervalle de confiance de la limite inférieure H_{inf} mesurable

Afin de stabiliser cette estimation de H_{inf} et de lui associer un intervalle de confiance, on répète **n** fois le processus précédent (**n** nuages de points). On obtient ainsi **n** estimations de la limite inférieure de profondeur d'eau mesurable que l'on note : $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$. La valeur retenue, notée \bar{H}_{inf} à partir de l'échantillon ($\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$) est la moyenne arithmétique :

$$\bar{H}_{inf} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{H}_{inf i}$$

A partir de la distribution empirique obtenue : $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$, on construit un intervalle de confiance IC_{95%} à 95% à partir des quantiles 2.5 % et 97.5 % [Glivenko-Cantelli].

2.5. Comparaison des valeurs de H_{inf} en fonction de paramètres de surface de la rivière

L'évolution de la valeur de H_{inf} peut être étudiée en fonction de paramètres de surface de l'eau. Pour ce faire, la méthodologie précédente peut par exemple être appliquée pour différentes valeurs de rugosité *r* et de pentes longitudinales *P* de la surface de l'eau, et les distributions obtenues comparées.

2.6. Outil

Le modèle de train d'ondes et la méthode d'approximation exposés précédemment ont été réalisés sur le programme R (GNU). Ils font l'objet d'un module spécifique, documenté et en accès libre sur <http://www.teledetection.fr>.

3. Résultats

3.1. Paramètres

Les simulations de Trains d'Ondes LiDAR Vert (TOLV) ont été effectuées avec les paramètres du système LiDAR bathymétrique Hawk Eye II [Tulldahl et al., 2004] présentés dans le tableau 1.

Énergie du pulse du laser vert (mJ)	3
La largeur du profil de coupe à mi-hauteur (<i>FWHM</i>) du pulse du laser vert (ns)	7
Rayon du spot laser à la surface de l'eau (m)	1
Altitude de vol (m)	200
Angle de vue (<i>FOV</i>) (mrad)	17
Aire du récepteur (m ²)	0.025

Tableau 1 : Paramètres du LiDAR bathymétrique Hawkeye II utilisés pour les simulations de TOLV.

Dans un premier temps, des simulations de TOLV ont été effectuées avec des paramètres pour l'eau correspondant à des eaux faiblement turbides et homogènes, sans rugosité de surface et sans pente longitudinales (surface plane) (tableau 2) [Guenther, 1985]. Ces premiers TOLV ont été simulés afin de les comparer aux TOLV prenant en compte une géométrie particulière de la surface.

Dans un second temps, une rugosité *r* et une pente *P* générale de la surface de l'eau ont été introduits (tableau 2). Ces paramètres de géométrie de rivière, proviennent d'observations effectuées sur la rivière Durance (France) [Le Coarer, 2006].

	Paramètre	Valeur
CAS1	Réflectance de la surface de l'eau sans rugosité et sans pente	0.02
	Coefficient d'atténuation	0.17
	Coefficient de diffusion	0.35
CAS2	Réflectance de la surface de l'eau avec la rugosité <i>r</i> et avec la pente générale <i>P</i>	0.07
	Rugosité <i>r</i>	0.2
	Pente générale <i>P</i> en %	2.7
	Demi hauteur des vaguelettes <i>h_v</i> , en m	0.05
	Longueur d'ondes entre 2 vaguelettes (m)	1
	Nombre de microfacettes associées	2

Tableau 2 : Paramètres de la rivière utilisés pour les simulations de TOLV pour différentes géométries de surface.

3.2. Simulations de Trains d'Ondes LiDAR Vert (TOLV)

En examinant qualitativement les TOLV simulés en figure 4, on observe que :

- 1- la présence de la rugosité (*r*=0.2) à la surface de l'eau conduit à une augmentation de la valeur du pic de puissance de la surface par rapport à celui du fond ;
- 2- la pente générale (*P*=2.7%) de la surface, ne modifie quasiment pas la forme du TOLV ;
- 3- il devient de plus en plus difficile de distinguer qualitativement les deux pics de puissance lorsque la profondeur devient inférieure à 80 cm.

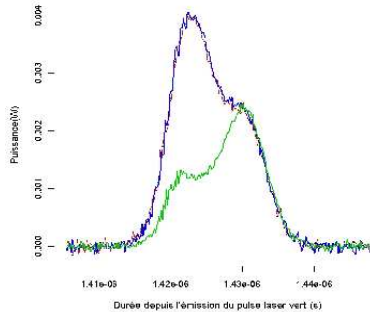


Figure 4 : Exemples de TOLV pour une profondeur $H = 80$ cm. Ligne verte : $r = 0$ et $P = 0$; Ligne bleue : $r = 0.2$ et $P = 0$; Ligne rouge : $r = 0.2$ et $P = 2.7\%$.

3.3. Estimations de bathymétrie sur Trains d'Ondes LiDAR Vert (TOLV) simulés

L'approximation des TOLV simulés par un mélange de lois gaussiennes a été optimisée par l'algorithme de Gauss-Newton¹ (figure 5). Sur les exemples d'approximations de TOLV de la figure 5, on obtient les couples suivant : ($\hat{H}=0.81$ m, $H=0.8$ m) et ($\hat{H}=1.98$ m, $H=2$ m).

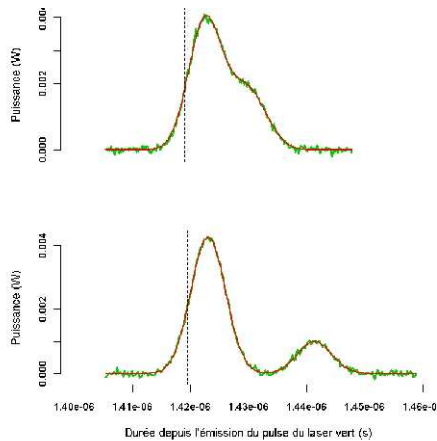


Figure 5 : Exemples de TOLV (vert) pour une profondeur de 80 cm (haut) et de 2 m (bas) avec $r = 0.2$ et $P = 0$. Ligne rouge : approximations. Pointillés : positions du fond de l'eau et de la surface.

3.4. Exemple d'estimation de limite inférieure théorique

La limite inférieure théorique de la profondeur d'eau mesurable a été estimée suivant la méthodologie présentée dans les parties 2.3 et 2.4, avec pour paramètres une rugosité $r = 0.1$ et une absence de pente

¹ D'autres algorithmes d'optimisation (Newton-Raphson) ont été testés et ne modifient pas les résultats d'approximation.

longitudinale $P = 0\%$. Une représentation de cette méthode d'estimation de \hat{H}_{inf} est située en figure 6.

A partir d'un échantillon ($\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$) obtenu par n répétitions de cette procédure, la valeur estimée de la limite inférieure théorique est $\bar{H}_{inf} = 0.41$ m avec pour intervalle de confiance à 95% $IC_{95\%} = [0.31, 0.45]$.

3.5. Comparaison de H_{inf} pour différentes géométries de la surface de la rivière

Comme précédemment, des valeurs de H_{inf} ont été estimées pour différents rugosités, i.e. des géométries de la surface de l'eau, et toujours avec une pente longitudinale nulle (tableau 3).

h_v en m	λ en m	m	Rugosité r
0.0009	0.009	222	0.002
0.005	0.05	40	0.01
0.05	0.5	4	0.1
0.085	0.85	2.35	0.2

Tableau 3 : Valeurs des différents paramètres de la surface de l'eau utilisés (et du modèle microfacettes associé).

L'évolution de H_{inf} en fonction de la rugosité de la surface en figure 7 (échelle logarithmique en x) laisse apparaître une rugosité optimale mais faiblement significative (Student). Une forte rugosité ($r = 0.2$) est préjudiciable sur la profondeur minimale détectable H_{inf} , qui apparaît significativement supérieure à celles estimées avec des rugosités plus faibles.

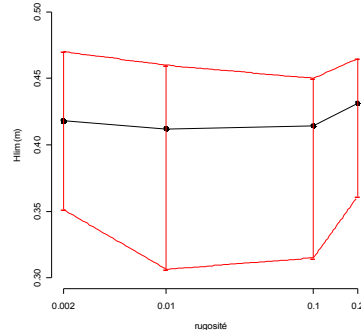


Figure 7 : Comparaison de H_{inf} en fonction de la rugosité de la surface (4 valeurs). Noir : ligne moyenne, Rouge : enveloppe de confiance à 95 %.

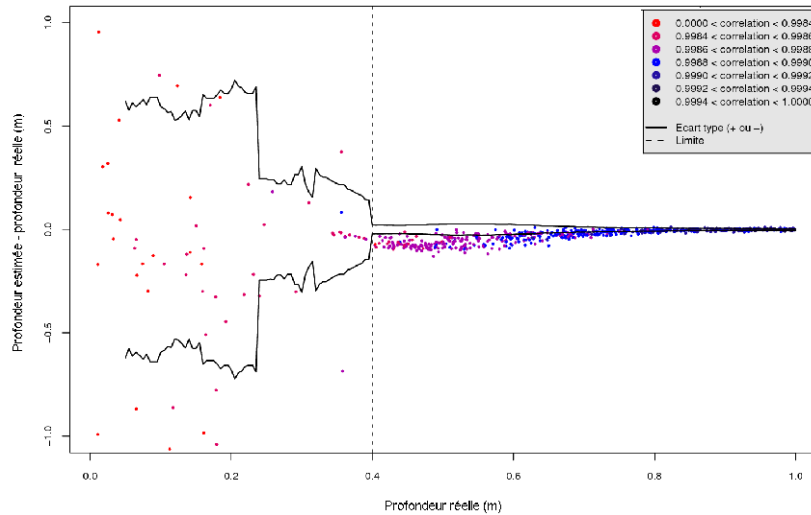


Figure 6 : Exemple d'estimation de \hat{H}_{inf} (ligne verticale en pointillé) à partir du nuage de points (E, H). Les codes couleurs sont relatifs à la corrélation de l'approximation et les lignes noires représentent $\pm\sigma_E$

4. Discussion

Dans cette étude, nous avons cherché à estimer théoriquement la profondeur d'eau minimale mesurable par un système LiDAR sur une rivière à eaux courantes dans le cas où l'on utilise uniquement le front d'onde vert. Cette estimation a été réalisée suivant une chaîne méthodologique qui repose sur un modèle du front d'onde LiDAR vert adapté pour prendre en compte une forme géométriquement définie de la surface de l'eau de la rivière. L'utilisation de ce modèle permet de générer un ensemble de fronts d'ondes qui sont ensuite analysés selon une méthode permettant d'estimer la profondeur d'eau minimale mesurable.

Les résultats pour une surface d'eau plane et moyennement « rugueuse » (cas favorable) montrent une profondeur mesurable minimale de 0.41 m. Pour des rivières telle la Durance, d'une profondeur d'eau moyenne de 0.4 m [Le Coarer et al., 2006], cette technique LiDAR semble surtout adaptée pour détecter les quelques zones d'eaux profondes (« mouilles »). D'autres techniques « complémentaires » devraient être envisagées pour les tranches d'eau inférieures à 0.4 m [Feurer et al., 2006].

Quoiqu'il en soit, il convient désormais de valider le modèle de front d'onde développé expérimentalement. Une fois cette validation effectuée, l'extension de la méthode développée pour tester plus finement la sensibilité de cette limite de mesure (et qualité) aux différents paramètres de la rivière et du système LiDAR pourra être envisagée. De même, les fronts d'onde proche infrarouge des systèmes LiDAR bathymétrique pourront également être introduits.

Remerciements

Merci au programme PNTS 2005, au SHOM d'avoir supporté cette étude s'inscrivant dans le cadre du projet BALAFF "Bathymétrie LAsar par Faibles Fonds".

Références

Feurer D., Puech C., Bailly J.S., Viau A., "Bathymetric measurement of rivers by remote sensing techniques: a review", International conference on Riverine hydroecology: advances in research applications, Stirling, GBR, Août 2006

Gaston G., "Etude comparative de réflectance bidirectionnelle calculées par méthode de Monte-Carlo et de leurs modèles théoriques", Master's Thesis, ENSMA, 2003

Guenther G.C., *Airborne laser hydrography, system design and performance factors*, NOAA Professional Paper Ser. NOS1, Rockville, 1985

Guenther G.C., Cunningham A.G., LaRocque P.E., et Reid D.J., "Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry", Proceedings of EARSel-SIG-Workshop LiDAR, Dresden/FRG, Juin 2000

Jutzi B., Stilla U., *Characteristics of the measurement unit of a full waveform laser system*

Le Coarer Y., *Rapport Etude Durance-EDF, Lot1-géomorphologie*, 2006.

Lesaignoux A., "Modélisation et simulations de trains d'ondes LiDAR "vert" : application à la détection de faibles lames d'eau en rivière", Master's Thesis, UMII, 2006

Lesaignoux A., "Small water depth detection from green LiDAR simulated full waveforms : application to gravel-bed river bathymetry", PSIP'2007 Workshop Physics in Signal and Image Processing, Jan-Fev 2007

McKean J., Wright W., Isaak D., "Mapping channel morphology and stream habitat with a full waveform water penetrating

green LiDAR", Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 031509, 2006

Millar D., Woolpert J.G. Hilldale R., "Using airborne LiDAR bathymetry to map shallow river environments", In Coastal GeoTools'05, 2005

Tulldahl H.M., Steinvall K.O., "Analytical waveform generation from small objects in LiDAR bathymetry", Appl. Opt 38, 1021-1039, 1999

Tulldahl H.M., Steinvall K.O., "Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding", Appl. Opt 42, 2462-2483, 2004

Zwally H.J. et al., "ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land", Journal of Geodynamics (34), 405-445, 2002

Annexe C

Poster présenté au *2nd space
for hydrology workshop*

Assessing water surface effects on LiDAR measurements in very shallow rivers: a theoretical study

Tristan Allouis, Jean-Stéphane Bailly, Audrey Lesaignoux, Denis Feurer

UMR TETIS, 500 Rue Jean-François Breton, 34090 Montpellier cedex 5, France.

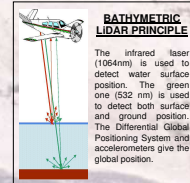


CONTEXT

Green LiDAR seems to be an interesting tool to measure river bathymetry at the catchment scale. Even if this technique has been widely used for coastal surveys, very few studies focus on water depth measurement quality and limits in continental waters, in particular for rivers having specific water surface roughness and slopes.

OBJECTIVE

To assess the effect of water surface roughness in rivers on the inferior limit H_{inf} of detectable water depth with green lidar.

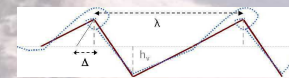


METHOD

1. Green LiDAR Full Waveform modelling and simulation for a depth H.

Based on the equation for coastal waters [2][3], with additional hypothesis:

- Water surface roughness r impacts on the Bidirectional Reflectance Distribution Function (using a microfacet model: Cook Torrance (Fig. 1)) [1].
- General longitudinal slope of the water surface.
- Homogeneous attenuation coefficient in the water column.



2. Inversion method. Fitting the simulated waveform with a mix of derivated Gaussian laws density functions [4] to estimate the depth \hat{H} .

- Optimization : Gauss Newton algorithm.
- Monte-Carlo random simulations for actual water depths H, uniformly sampled within the [0,1] meter range.
- Kernel Regression used to determine the theoretical minimum water depth detection within GLFW, from the representation of estimated depth. \hat{H} versus actual depth H
- Repetition of the above process (Monte Carlo estimator) to estimate 95% confidence band for H_{inf} .

3. Inferior limit H_{inf} assessing.

- Error given by (\hat{H}, H) pairs comparison.
- Standard deviation filtering.

RESULTS

1. Simulated GLFW

- A wavy water surface leads to a better discrimination between the two peaks (water surface and river bottom).
- Longitudinal slope of the river do not change the shape of GLFW.
- The two peaks (water surface and river bottom) are hardly distinguishable when water depth is less than 80 centimeters.

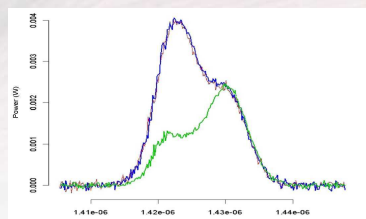


Fig. 2: Examples of GLFW for 80 cm water depth. Green line: $r=0$ and $P=0$; Blue line: $r=0.2$ and $P=0$; Red line: $r=0.2$ and $P=2.7\%$.

2. Theoretical limit for the minimum water depth detected H_{inf}

- H_{inf} is estimated from 1000 pairs (\hat{H}, H) (Fig. 3).
- Results for rough surface (waveheights = 10 cm, wavelengths = 1 m; no longitudinal slope) for $h = 0$ m to $h = 1.6$ m.

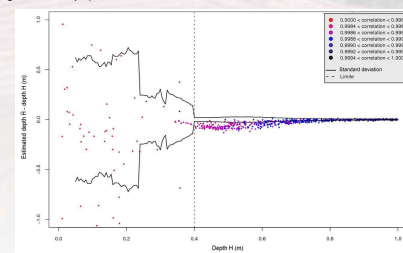


Fig. 3: H_{inf} (dotted line) estimation example from 1000 pairs (\hat{H}, H) . Colors represent approximation determination coefficients and black lines represent +/- standard deviation.

DISCUSSION

- In the best conditions ($0.005 < \text{roughness} < 0.1$) the minimum depth detectable is around 0.42 m (Fig. 4).
- In the case of very shallow rivers (usually with a mean depth of 0.4 m), only pools can be measured, so other techniques and algorithms are required to measure bathymetry inferior to 0.4 m.
- Now, a validation of this model with experiments is needed, and sensitivity tests of the results with other parameters of the river (slope) and LiDAR system (using Red-Channel) are required.

REFERENCES

- Gaston G. "Etude comparative de réflectance bidirectionnelle calculées par méthode de Monte-Carlo et de leurs modèles théoriques" Master's Thesis, ENSMA, 2003.
- Guenther G.G. Airborne Laser Hydrography, system design and performance factors, NOAA Professional Paper Ser. NOS-1, Rockville, 1995.
- Tullis H.M., Sternvall K.O., "Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding", Appl. Opt. 42: 2442-2483, 2004.
- Zwally H.J. et al., "ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land", Journal of Geodynamics(34), 405-445, 2002.

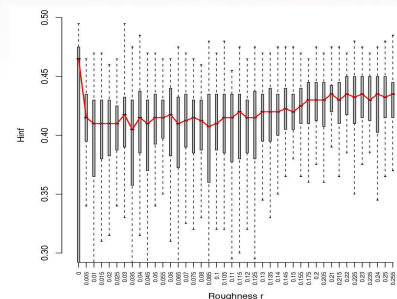


Fig. 4: Boxplots of H_{inf} distributions for a series of increasing water surface roughness coefficients.

Contact : tristan.allouis@teledetection.fr

Annexe D

Article soumis au 2nd *space*
for hydrology workshop

**Assessing water surface effects on LiDAR bathymetry measurements in very shallow rivers:
a theoretical study**

Tristan Allouis⁽¹⁾, Jean-Stéphane Bailly⁽¹⁾, Denis Feurer⁽¹⁾

*UMR Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale (TETIS)
Cemagref-Engref-Cirad
500 Rue Jean-François Breton
34090 Montpellier cedex 5, France.
Email: {allouis/bailly/feurer}@teledetection.fr*

ABSTRACT

Bathymetry on continental hydrographic networks is up to now limited to small areas. This hampers exhaustive hydrological or ecological studies on hydrographic networks at management scales. To enlarge rivers bathymetry surveys, bathymetric, i.e. green LiDAR appears as an interesting tool. But if this technique has been widely used for coastal surveys, very few studies focus on water depth measurement quality and limits, in particular for rivers and for very shallow waters. We aimed here to assess the utility of LiDAR for bathymetry on rivers, in particular the minimum water depth H_{inf} we can theoretically measure with LiDAR, depending on LiDAR system and surface water characteristics. To meet this goal, we developed a LiDAR waveform model depending on LiDAR parameters and introducing specificities for rivers (roughness and longitudinal slope for the water surface). Then, we assessed from a set of simulated full waveforms the inferior limit H_{inf} . In case of mean water surface roughness and no longitudinal slope, a minimum water depth of $H_{inf} = 0.41$ m has been found with the 95 % confidence interval [0.31, 0.45]. Some additional tests using different water surfaces rugosities show that a lowly significant rugosity optimum exists. These first results have to be experimentally validated then it could be extended to study the minimum water depth or depth measure quality sensitivities to LiDAR system and water surface parameters.

Keywords: Measure; Bathymetric LiDAR; rivers ; full waveform model; rivers; surface rugosity, BDRF.

INTRODUCTION

The knowledge of immersed surfaces depth and topography is a crucial point for improving the knowledge of seashore and continental aquatic areas. Currently, the multi-beams SONAR is the main technique for bathymetry measurement on submerged continental surfaces. This technique has several limitations: a limited spatial extension, a use on navigable rivers, a minimum detectable depth around 1.5 m. These limitations have an impact on opportunities for hydraulic and ecological studies in inland waters. In particular on rapid growth and high ecological potential rivers, which are usually low depth and running water rivers. To map large linear rivers bathymetry, bathymetric (or hydrographic or green) LiDAR seems to be a suitable remote sensing technique, complementary to SONAR [1].

LiDAR sounding works with a scanning laser pulses émission-réception (some mJ) at a steady-frequency. Duration between emission and reception is converted into distance (Laser telemetry). Its specificity is the use of pulses in two wavelengths: an infrared pulse (1064 nm) reflected from the water surface, and a green pulse (532 nm) which penetrates the water surface and is reflected from the floor (Fig. 1). On other system components (scanning system, central inertial, D-GPS,...), bathymetric LiDAR has no differences compared to topographic LiDAR systems [2].

Currently, it exists literature references on accuracy and limits of bathymetric LiDAR on coastal areas. However, only a few exists on rivers and inland waters [3][4][5].

In order to assess the utility of LiDAR sounding rivers, especially for low-deep rivers and running water, it is necessary to assess the minimum water depth we can detect with this technique. This estimation can be experimental, but for cost reasons, we can estimate it first in a theoretical framework.

The objective of this study is to estimate the minimum water depth theoretically measurable by LiDAR sounding, denoted H_{inf} , depending on characteristics of the river: longitudinal slope, water « roughness » (i.e. Micro geometry).

To meet this objective, the study was conducted in two phases:

1- A specific LiDAR full wave form simulation model data has been developed. This model can simulate a green

LiDAR full waveform (GLFW) from various LiDAR system and river parameters ;
 2-From a set of simulated waveforms based on various river parameters, a methodology for the minimum depth detectable estimation H_{inf} , is proposed

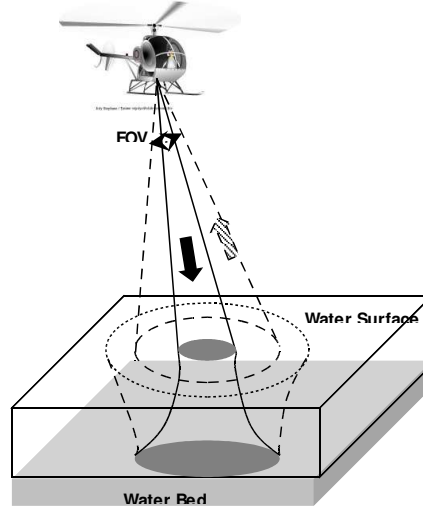


Fig 1. A scheme of the bathymetric LiDAR laser beam (green laser).

METHODOLOGY

H_{inf} assessment consists on 4 points :

- 1- Green LiDAR full waveform (GLFW) modelling for a given set of parameters (LiDAR system, river);
- 2- Bathymetry estimation from a simulated GLFW with approximation methods;
- 3- Determination of the limit H_{inf} from a set of approximated GLFW;
- 4- Confidence interval computation of H_{inf} estimation using a Monte Carlo method.

Green LiDAR full waveform (GLFW) modelling and simulation

The methods we developed were first dedicated to GLFW model when targets are on a low deep river. This model is based on equations developed for coastal waters [6]. To describe the received temporal waveforms (power, function of time) of the LiDAR system, we write the LiDAR return as the sum of multiple waves echoes:

$$P(t) = P_s(t) + P_{bsc}(t) + P_b(t) + P_{bg}(t) + P_N(t) \quad (1)$$

Where $P(t)$ is total power received; $P_s(t)$ is power returned by the water surface; $P_{bsc}(t)$ is power returned by the water column; $P_b(t)$ is power returned by the bottom; $P_{bg}(t)$ is the background power returned by the air column; $P_N(t)$ is noise power.

In this paper, we will only focus on surface and bottom returns. Other formulations of received powers can be found in [7].

Power received from surface and bottom

Equation of received power from the water surface is:

$$P_s(t) = \frac{\rho P_T(t) T_{atm}^2 \eta_r \eta_t A_r \cos^2(\theta_0)}{\pi L^2} \quad (2)$$

Where:

- ρ is the reflectance at the interface air / water
- $P_T(t)$ is the transmitted pulse by the green laser (W)

- T_{atm}^2 is the transmission coefficient of the atmosphere
- η_t et η_r are efficiencies optical transmission and reception
- A_r is the area of the receptor (m²)
- θ_0 is the incidence angle of laser (rad)
- L is flying height of the sensor in relation to the water surface (m)

Equation of received power from the bottom is:

$$P_b(t) = \frac{(1-\rho)^2 P_T(t) T_{atm}^2 \eta_t \eta_r q f \rho_b \cos(\theta_0)}{\pi(n_w L + H)^2} \times \exp\left(-\frac{2N(s, \sigma, \theta_0)KH}{\cos(\theta_w)}\right) \quad (3)$$

Where:

- H is the water depth (m), what we want to measure with bathymetric LiDAR,
- q is an empirical factor that takes into account fade air and LiDAR system
- f is a factor of loss due to the field of view of the telescope
- ρ_b is the reflectance of the bottom
- n_w et θ_w are the refractive index of water and the angle of refraction at the interface air / water
- σ is the albedo of the bottom
- s is the diffusion coefficient in the water column
- $N(s, \sigma, \theta_0)$ is a stretch factor of the pulse depending on the coefficient of diffusion, albedo and angle of incidence nadir Laser

Adaptation to river: reflectance modelling of the water surface

To develop a suitable GLFW model for rivers, hypothesis and additional elements have been introduced: a nonzero longitudinal slope of the water surface, an homogeneity of turbidity without algae in the column water, and a roughness of the water surface in areas of high gradient (radians) following simple geometric laws.

Roughness of the water surface causes a change in the value of the reflectance compared to a flat surface. Therefore, to adapt the model to the geometry of the water surface of a river, a new expression of the reflectance has been introduced following a Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). This function is calculated on Cook-Torrance model [9] which corresponds to a microfacets model (Fig. 2) following three parameters:

- 1- function that describes the Fresnel reflection of light on each microfacets;
- 2- alleviation factor describing the auto-ombrage facets in relation to each other;
- 3- microfacets distribution function that models roughness and described by the distribution function of Beckmann.



Fig. 2: Cook-Torrance microfacets model.

Equation of Cook-Torrance model (Fig. 3) is:

$$r = \sqrt{\frac{(h_v - \sqrt{h_v + \Delta})^2}{m-1}} \quad (4)$$

Where r is the roughness and with $\Delta = \frac{\lambda h_v}{2m}$ where λ is the wavelength of wavelets, h_v is the half-height of waves and m is the number of microfacets considered in the laser spot at the water surface.

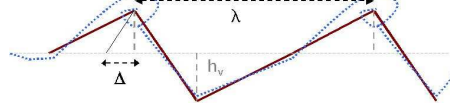


Fig. 3: Water microfacets model (m = 4) of Cook-Torrance.

Bathymetry estimation on a simulated Green LiDAR full waveform (GLFW)

A procedure for estimating the bathymetry \hat{H} from peaks detection of surface and bottom on a simulated GLFW (see examples in Fig. 4) has been developed using an approximation method. This approximation is classically based on a mixture of Gaussians laws fitted by an iterative least squares optimization algorithm. With approximation, we estimate the water depth \hat{H} from a simulated GLFW having a real depth H [8].

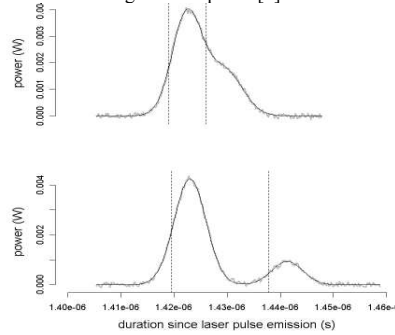


Fig. 4 Examples of a Green LiDAR Full Waveform (grey line) for 80 cm water depth (up), 2 m water depth (down) with a mean roughness and no longitudinal slope. Fitted Gaussian density functions are in black lines (up: two Gaussians; down: log-Gaussian and Gaussian). Actual surface position (left) and bottom position (right) are the vertical dotted lines.

Minimum depth H_{inf} determination

The process of minimal depth H_{inf} estimation has two steps:

- 1- Generation of pairs (\hat{H}, H) from simulated GLFW with the actual depth H randomly selected in an uniform law $[0, 1]$ meter. Other river parameters are fixed.
- 2- On the scatter plot (E, H) , with $E = \hat{H} - H$, we calculate the standard deviation σ_E of E for each H value. H_{inf} is thus the value of H (actual depth) from which we obtain σ_E larger than a given threshold (excessive dispersion of \hat{H} estimated values).

Confidence interval of the minimum depth H_{inf} detectable

To stabilize H_{inf} estimation and to associate a confidence interval, we repeat the process n times (n scatter plots). This yields n estimations of H_{inf} : $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$.

The final value, noted \bar{H}_{inf} , from the sample $(\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn})$ is the arithmetic mean:

$$\bar{H}_{inf} = \frac{1}{n} \sum_i \hat{H}_{inf i} \quad (5)$$

From the empirical distribution obtained: $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$, we computed a 95% confidence interval CI from the quantiles 2.5% and 97.5%.

Comparison of the values of H_{inf} according to surface roughness parameters

H_{inf} evolution can be studied as function of water surface parameters. To perform this goal, the above methodology has been applied to different roughness values of r and P longitudinal slopes of the water. Therefore, the obtained distributions of H_{inf} were compared.

Tools

The GLFW model and approximation method has been developed on the R software (GNU). It's subject of a specific module, documented and freely available on <http://www.teledetection.fr>.

RESULTS

Parameters

GLFW simulations were computed with the LiDAR parameters of the Hawk Eye II system [2] in Table 1.

Green laser pulse energy (mJ)	3
Green laser pulse full width at half maximum (ns)	7
Laser spot size at the water surface (m)	1
Flight altitude (m)	200
Field of view (FOV) (mrad)	17
Receptot surface (m ²)	0.025

Table 1: The Hawkeye II LiDAR system parameters used for GLFW simulations.

In a first step, GLFW simulations were computed with parameters for water corresponding to slightly turbid and homogeneous water, without water surface roughness and without longitudinal surface slope (Table 2) [6]. These first GLFW were simulated in order to compare them to GLFW witch took into account a particular water surface geometry. In a second step, we introduced a roughness r and a water surface slope P (Table 2). These geometrical parameters of river were coming from observations made on the Durance river (South of France) [10].

	Parameter	Value
Case 1	Water surface reflectance, without roughness and without slope	0.02
	Alleviation coefficient	0.17
	Diffusion coefficient	0.35
Case 2	Water surface reflectance, with roughness r and with slope P	0.07
	Roughness r	0.2
	Slope P in %	2.7
	Half height of wavelets h_v in m	0.05
	Wavelength between 2 wavelets (m)	1
	Number of microfacets	2

Table 2: River parameters used for GLFW simulations.

Green LiDAR full waveform simulations

Considering simulated GLFW in Fig. 4, we found that:

- 1 - Presence of roughness ($r = 0.2$) in the water increase the peak height of the surface return compared to the botom one;
- 2- Surface slope ($P = 2.7\%$) does not alter GLFW shape;
- 3- It becomes difficult to distinguish the two peaks when depth is smaller than 80 cm.

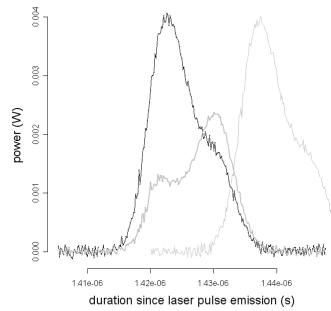


Fig. 4: Examples of simulated Green LiDAR Full Waveform for 80 cm water depth. Grey line: no roughness and no longitudinal slope; Black line: roughness and no longitudinal slope; Clear Grey line: roughness and longitudinal slope.

Bathymetry estimation on simulated Green LiDAR full waveforms

Simulated GLFW approximation by a mixture of Gaussian laws has been optimized by the Port algorithm (Fig. 5). On Fig. 5 examples of GLFW approximations, we get the following pairs: ($\hat{H} = 0.81$ m, $H = 0.8$ m) and ($\hat{H} = 1.98$ m, $H = 2$ m).

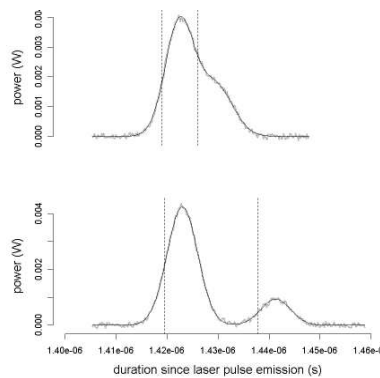


Fig. 5: Examples of a Green LiDAR Full Waveform (grey line) for 80 cm water depth (up), 2 m water depth (down) with roughness and no longitudinal slope. Fitted density functions are in black lines (up: two Gaussians; down: log-Gaussian and Gaussian). Actual surface position (left) and bed position (right) are the vertical dotted lines.

Example of H_{inf} estimation

The theoretical minimum detectable water depth was estimated in accordance with the methodology presented in above, with a $r = 0.1$ roughness parameter, and a $P = 0\%$ longitudinal slope. A representation of this method for \hat{H}_{inf} estimation takes place in Fig. 6.

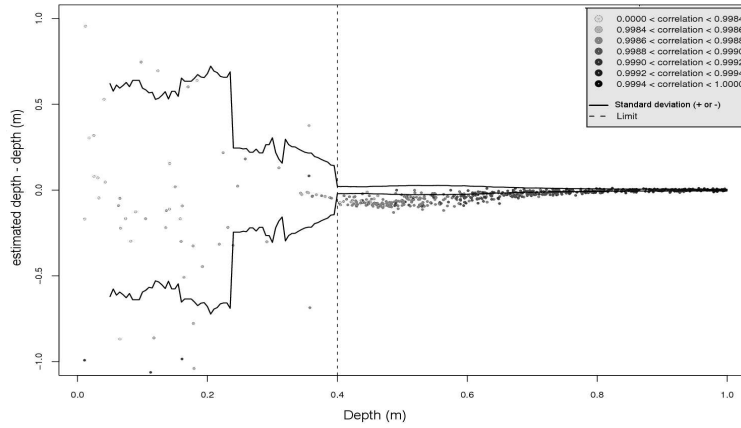


Fig. 6: \hat{H}_{inf} (dotted line) estimation example from scatter plot (E, H). Grey levels refer to correlation in the fitting and black lines represent $\pm \sigma$

From a sample ($\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2}, \dots, \hat{H}_{infn}$) obtained by n repetition of this process, the estimated value of the theoretical lower limit H_{inf} is = 0.41 m with a 95% confidence interval $CI_{95\%} = [0.31, 0.45]$.

H_{inf} comparison for different geometrical water surface parameters

As previously reported, values of H_{inf} were estimated for different roughness and always without longitudinal slope (Table 3).

h_v en m	λ en m	m	Roughness r
0.0009	0.009	222	0.002
0.005	0.05	40	0.01
0.05	0.5	4	0.1
0.085	0.85	2.35	0.2

Table 3: Values of the different water and microfacets model parameters used.

H_{inf} evolution compared to surface roughness shows a weak optimal roughness between 0.01 and 0.1 (Fig. 7).

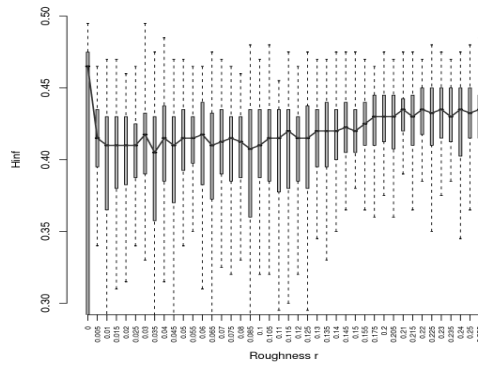


Fig. 7: Boxplots of \hat{H}_{inf} distributions for a serie of increasing water surface roughness coefficients.

DISCUSSION

In this study, we wanted to assess the minimal water depth detectable by a system LiDAR on a river in using only the green laser signal. This study was performed on a specific green lidar waveform model taking into account the geometry of the river water surface. Using this model we generated waveforms which were then analyzed using a classical approximation method of water depths, then of the minimal detectable water depth.

Results for a flat water surface and a moderate roughness show a minimal depth detectable of 0.41 m. For gravel bed rivers like the Durance in the South of France having an average water depth of 0.4 m [10], LiDAR technique seems interesting only to detect pools, i.e. deep waters. Other technical competence should be considered for water segments of less than 0.4 m [1].

Anyway, we now need an experimental validation for the waveform model. Once this validation performed, the extension of the developed methodology can be considered to test more in details the sensitivity of this measurement limit (and quality) to the various parameters of the river and LiDAR system. Similarly, infra red LiDAR waveforms may also be introduced.

ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to the 2005 PNTS program and SHOM to have supported this study in the BALAFF project framework (Laser Bathymetry by low depth."

REFERENCES

- [1] Feurer D., Puech C., Bailly J.S., Viau A., "Bathymetric measurement of rivers by remote sensing techniques: a review", International conference on Riverine hydroecology: advances in research applications, Stirling, GBR, Août 2006
- [2] Tuldahl H.M., Steinvall K.O., "Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding", Appl. Opt 42, 2462-2483, 2004
- [3] Hilldale, R. C. & Raff, D. Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry Earth Surface Processes and Landforms, 2007, Vol. 9999, p. n/a
- [4] Kinzel, P. J.; Wright, C. W.; Nelson, J. M. & Burman, A. R. Evaluation of an experimental LiDAR for surveying a shallow, braided, sand-bedded river Journal of Hydraulic Engineering, 2007, Vol. 133, p. 838-842
- [5] McKean, J.; Wright, W. & Isaak, D. Mapping channel morphology and stream habitat with a full waveform water-penetrating green lidar Geophysical Research Abstracts, 2006, Vol. Vol.8
- [6] Guenther G.C., Airborne laser hydrography, system design and performance factors, NOAA Professional Paper Ser. NOS1, Rockville, 1985
- [7] Lesaignoux A., "Modélisation et simulations de trains d'ondes LiDAR "vert" : application à la détection de faibles lames d'eau en rivière", Master's Thesis, UMII, 2006\$
- [8] Zwally H.J. et al., "ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land", Journal of Geodynamics (34), 405-445, 2002
- [9] Gaston G., "Etude comparative de réflectance bidirectionnelle calculées par méthode de Monte-Carlo et de leurs modèles théoriques", Master's Thesis, ENSMA, 2003
- [10] Le Coarer Y., Rapport Etude Durance-EDF, Lot1- géomorphologie, 2006.

Annexe E

Manuel de l'outil de visualisation

Manuel d'utilisation des outils de visualisation de signal LiDAR

Tristan Allouis, Cemagref
<tristan.allouis@teledetection.fr >

Version 1.0

Ce document présente la démarche à suivre pour visualiser les données LiDAR bathymétrique acquises par le SHOM en 2005 sur le Golfe du Morbihan. Afin d'effectuer en un temps raisonnable certaines des tâches décrites dans ce document, il est nécessaire de disposer d'un ordinateur puissant.

1 État des lieux

Les données LiDAR qui nous intéressent sont ici les données ASCII BRUT HYDRO POINT ALL et les données ASCII BRUT HYDRO SIGNAL ALL correspondantes (cf. Rapport d'indexation des fichiers numériques, Actimar). Ces données se trouvent dans le répertoire BATHY_QH/DONNEES/GLOBAL/ASCII_BRUT/HYDRO. Il est ainsi possible de faire toutes les manipulations décrites dans ce manuel sur les données situées dans BATHY_QH/DONNEES/PLAGEAGE/PRODUITS_POST_TRAITEMENT.

2 Démarche

La démarche simplifiée du système consiste en trois grandes phases (cf. FIG. 1) :

1. Visualisation et extraction des points LiDAR choisis sous un logiciel SIG (ArcGIS par exemple),
2. Récupération des signaux correspondants grâce à l'outil `ExtracteurDeSignal.exe`,
3. Affichage du résultat au format pdf grâce au logiciel R.

Cette démarche donne un point de vue général de la méthode à utiliser. Il est cependant nécessaire d'effectuer des manipulations complémentaires :

1. Les données importées sous ArcGIS ne sont pas directement les données ASCII BRUT HYDRO POINT ALL. Il est nécessaire de les modifier avec le programme `assemblageHYDROBRUT.exe`. Ce formatage permettra par la suite une extraction plus efficace des signaux correspondants.

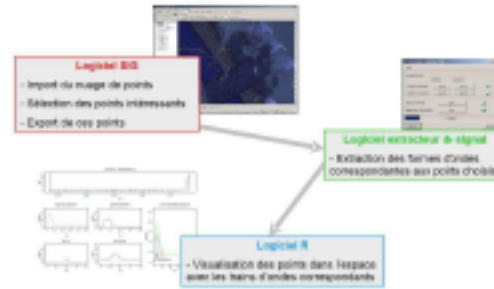


FIG. 1 - Démarche générale du système

2. Le passage d'ArcGIS à ExtracteurDeSignal.exe nécessite l'exécution d'une routine R. Elle traduit le fichier .def exporté d'ArcGIS en .tat lisible par ExtracteurDeSignal.exe.

3 Détail des manipulations, étape par étape

3.1 Préparation des données

La meilleure méthode est d'utiliser les données présentes dans le répertoire ./donnees. Ces données sont déjà formatées et optimisées. Vous pouvez alors directement passer à l'étape 3.1.3. Cependant, je détaille ci-dessous l'étape qui permet de mettre les données dans un format qui les rendra exploitables par la suite. Elle est lourde en temps de calcul pour l'ordinateur mais ne nécessite d'être effectuée qu'une seule fois si l'on prend soin de conserver les fichiers générés.

3.1.1 Formatage des données de départ

L'objectif de cette étape est de rassembler les données ASCII BRUT HYDRO POINT ALL séparées par lignes de vol (100 fichiers entre les lignes principales et les lignes transverses) en un nombre restreint de fichiers pour en faciliter la manipulation. L'idéal serait de rassembler les données dans un ou deux fichiers. Cependant, les limitations techniques d'ArcGIS dans la création de données nous contraignent de les rassembler en 11 fichiers. Le deuxième objectif de cette étape est de formater les données en séparant les champs par des tabulations (à la place d'espaces) pour assurer une meilleure

compatibilité avec ArcGIS.

Enfin, à chaque point LiDAR, nous ajoutons une colonne précisant le nom du fichier (parmis les 109) dans lequel ce point était à l'origine contenu.

Toutes ces opérations sont effectuées par le programme `assemblageHYDROBRUT.exe` situé dans le dossier `./assemblage`. Ci-dessous son mode d'emploi. Vous pouvez aussi vous référer à la figure 2 :

Lancez l'application `assemblageHYDROBRUT.exe`.

Le programme vous souhaite la bienvenue puis vous demande d'entrer le chemin du fichier à générer. Pour des raisons de compatibilité avec ArcGIS, il est préférable de faire porter au fichier l'extension `.tab`. Validez par `[Entrée]`.

Le programme vous demande ensuite d'entrer le chemin d'un des fichiers assembler. Vous pouvez procéder par glisser/déposer, puis validez par `[Entrée]`. Le programme répétera sa demande jusqu'à ce que vous lui précisez que vous avez terminé en tapant OK puis `[Entrée]`.

```

E:\Invite de commandes
Microsoft Windows [Version 5.00.2195]
(C) Copyright 1985-2000 Microsoft Corp.

H:\>H:\Documents\morbihan\Livrables\assemblage\assemblageHYDROBRUT.exe

** Bienvenue dans assemblageHydro.exe **

Veuillez entrer le chemin du fichier de destination :
D:\HYDROBRUT-1.tab

Veuillez spécifier le chemin du 1er fichier à assembler et appuyer sur entrée
-Ou- tapez OK puis entrée pour finir :
G:\donneesMorbihan\BATHV_GM\DONNEES\GLOBAL\ASCII_BRUT\HYDRO\LIGNES_PRINCIPALES\
OINTS\HU_ALL_GB01_02-1.txt

Veuillez spécifier le chemin du 2ème fichier à assembler et appuyer sur entrée
-Ou- tapez OK puis entrée pour finir :
G:\donneesMorbihan\BATHV_GM\DONNEES\GLOBAL\ASCII_BRUT\HYDRO\LIGNES_PRINCIPALES\
OINTS\HU_ALL_GB01_03-1.txt

Veuillez spécifier le chemin du 3ème fichier à assembler et appuyer sur entrée
-Ou- tapez OK puis entrée pour finir :
OK

Lecture et écriture...
HU_ALL_GB01_02-1.txt...Ok
HU_ALL_GB01_03-1.txt...Ok
Lecture et écriture... Ok
Fermeture des fichiers... Ok

** Fermeture de assemblageHydro.exe **

H:\>
    
```

FIG. 2 – Exemple de l'exécution du programme `assemblageHYDROBRUT.exe` dans l'Invite de commandes pour combiner deux fichiers.

La meilleure répartition est de rassembler les fichiers par boîte, les noms de fichiers se composent de la manière suivante :
`HU_ALL_GBx_y.txt`

Avec :

- x : Numéro de boîte allant de 01 à X
- y : Numéro de ligne de vol.

À la fin de cette étape, nous disposons donc de 11 fichiers `.tab` contenant l'ensemble des données ASCII BRUT HYDRO POINT ALL formatées pour un import facilité sous ArcGIS.

3.1.2 Création de fichiers d'entités sous ArcGIS

L'objectif de cette étape est de créer un fichier d'entités `.shp` dont chaque point sera sélectionnable sous ArcGIS. En effet, l'import des données `.tab` directement sous ArcMap n'autorise pas la sélection des points.

Je détaille ci-dessous les manipulations à effectuer pour créer un fichier `.shp` sous ArcCatalog mais cette opération peut aussi être effectuée sous ArcMap. Cette étape peut prendre un certain temps de traitement à l'ordinateur et doit être effectuée pour chacun des fichiers `.tab`.

Lancez ArcCatalog et placez vous dans le répertoire contenant les fichiers `.tab` créés lors de l'étape 3.1.1.

Par un clic-droit sur un des fichiers sélectionnez **Créer une classe d'entités** -> **A partir d'une table XY...** comme l'illustre la figure 3a.

Définissez les options comme l'illustre la figure 3b en spécifiant LONG pour Champ X, LAT pour Champ Y, <Aucun> pour Champ Z.

Définissez WGS84 comme système de coordonnées géographiques en le spécifiant à **Référence spatiale des coordonnées en entrée...** -> **Système de coordonnées** -> **Sélection**.

Enfin, vous pouvez spécifier l'emplacement du fichier qui sera créé.


Réitérez l'opération pour chacun des 11 fichiers `.tab`.

À la fin de cette étape, nous disposons donc de 11 fichiers `.shp` (en réalité, ce qu'on appelle fichier `.shp` est un ensemble de cinq fichiers de même nom portant des extensions différentes) directement importables sous ArcMap.

Il est important de conserver ces fichiers `.shp` car ils constituent la base de fonctionnement des outils de visualisation. Ainsi, l'étape 3.1 nécessitera de n'être réalisée qu'une seule fois.

3.1.3 Import des fichiers `.shp` sous ArcGIS

L'objectif de cette étape est de créer un projet ArcGIS contenant les différentes couches nécessaires.

Pour cela, lancez ArcMap puis ajoutez les 11 (ou 2 si vous utilisez ceux du répertoire `./donnees` fichiers `.shp` en appuyant simplement sur le bouton  du logiciel. Vous pouvez aussi ajouter les orthophotos disponibles dans le répertoire BATHY_GM/DONNEES/GLOBAL/PHOTO.

Les fichiers `.shp` étant lourd, il est coûteux en temps de vouloir les afficher.

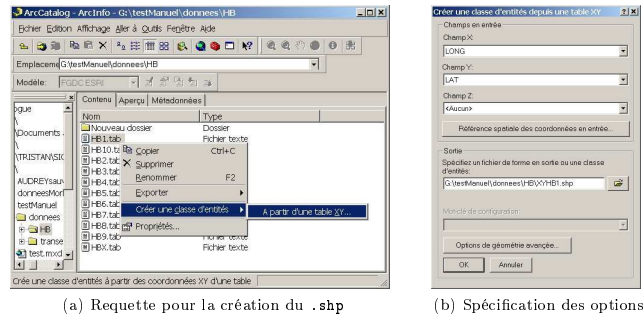


FIG. 3 – Exemple de création d'un fichier .shp sous ArcCatalog


Vous pouvez donc désactiver leur affichage en décochant la case située devant leur nom dans la fenêtre **Affichage** d'ArcMap.
 Vérifiez que les fichiers .shp ont bien WGS84 comme système de coordonnées, par un clic-droit sur le nom de la couche, en choisissant **Propriétés...** -> onglet **Source**. Si WGS84 n'est pas défini, le définir grâce à **ArcToolBox** -> **Data management tools** -> **Projections et transformations** -> **Définir une projection**.
 Vous pouvez enfin sauvegarder le projet pour des utilisations ultérieures.

3.2 Export des points selon un transect

3.2.1 Création d'un transect sous ArcGIS

L'objectif de cette étape est de créer un support (une ligne au format .shp) permettant de sélectionner les points LiDAR qui intersectent ce support.

Choisissez **Fichier** -> **Nouveau** -> **Fichier de forme...** dans ArcCatalog.
 Entrez le nom que vous voulez donner — par exemple **transect1** —, choisissez **Polyline** dans **Type d'entités**, puis définissez le type de coordonnées géographiques de la même façon que dans l'étape 3.1.2.
 Ajoutez ensuite la couche vide ainsi créée dans votre projet ArcMap.

Pour tracer le transect, placez vous dans ArcMap. Dans l'outil éditeur (**Affichage** -> **Barre d'outils** -> **Editeur** s'il n'apparaît pas dans votre barre d'outils), choisissez **Editeur** -> **Ouvrir une session de mise à jour**. Sélectionnez le répertoire contenant votre fichier .shp. Utilisez ensuite d'outil  avec **Créer une nouvelle entité** pour l'option **Tâche** et **votre_couche_de_forme** pour l'option **Cible**. Dessinez votre transect par des clics successifs et terminez la construction par un double-clic. Enfin, quittez la session de mise à jour par **Editeur** -> **Quitter la session de mise à jour** en enregistrant les mises

à jour.

Votre transect est créé. Vous pouvez enregistrer les modifications apportées à votre projet ArcMap.

3.2.2 Sélection des points LiDAR selon un transect sous ArcGIS

L'objectif de cette étape est sélectionner les points LiDAR d'un transect puis de les exporter en dehors d'ArcGIS.

Dans ArcMap, choisissez menu Sélection -> Sélectionner par entité... puis précisez que vous voulez Sélectionner les entités dans : *vos_couches_de_points* / qui : *intersectent* / les entités de la couche : *vos_transect*. Les empreintes LiDAR ayant un diamètre d'environ 2 mètres, vous pouvez aussi préciser que vous voulez Appliquer une zone tampon de 1,8 mètres (cf. FIG. 4).

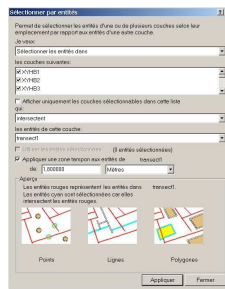


FIG. 4 – Exemple de sélection de points LiDAR selon un transect.

A l'issue de cette manipulation, même si vous ne le voyez pas à l'écran, certains points sont sélectionnés dans les différentes couches. Pour exporter ces points sélectionnés, placez vous dans la fenêtre Affichage, clic-droit sur le nom d'une des couches de points, et choisissez Ouvrir la table attributaire. Si des enregistrements sont sélectionnés, cliquez sur Options -> Exporter... Choisissez Exporter : Les enregistrements sélectionnés, placez puis nommez le fichier d'export en lui donnant le format dBASE (cf. FIG. 5). Répétez l'opération pour chacune des couches contenant des éléments sélectionnés en leur donnant un nom différent.

À la fin de cette opération nous disposons donc d'un certain nombre de fichiers d'export .dbf pour un transect donné.

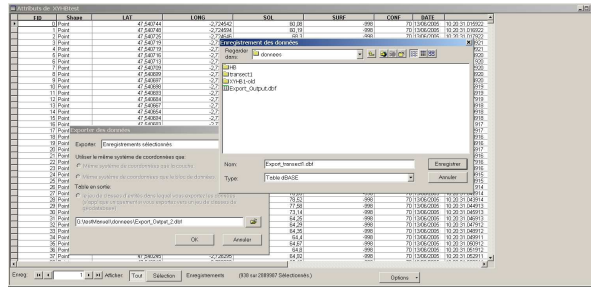


FIG. 5 – Exemple d'export de points LiDAR sélectionnés selon un transect.

3.3 Extraction des signaux correspondants

L'objectif de cette étape est d'extraire les signaux correspondants aux points sélectionnés préalablement dans ArcGIS (cf. 3.2). Les points extraits au format .dbf nécessitent un assemblage et une traduction vers le format .txt grâce à une routine R. Le fichier ainsi créé permettra ensuite d'extraire les signaux correspondants.

3.3.1 Traduction de .dbf dans R

Lancez R (téléchargeable gratuitement sur <http://www.r-project.org/>). Placez-vous dans le répertoire contenant vos fichiers d'extraits .dbf en sélectionnant Fichier -> Changer le répertoire courant... Choisissez ensuite Fichier -> Sourcer du code R... et sélectionnez visualisation.R situé à la racine des documents fournis. Ce fichier contient la fonction de traduction.

Vous pouvez maintenant appeler cette fonction de la manière suivante :

```
genere.transect.txt(c("exportTransect1-1.dbf", ..., "exportTransect1-n.dbf"),
"transect1-points.txt")
```

En remplaçant le contenu de c() par les noms de vos fichiers d'export séparés par des virgules et validez par **Entrée** (cf. FIG. 6). La fonction crée un unique fichier .txt dans le répertoire courant contenant l'ensemble des points à extraire.

3.3.2 Utilisation d'extracteur de signal

Lancez le logiciel Extracteur de signal LiDAR situé dans le répertoire ./extracteurDeSignal. Consultez le fichier Lisez-moi.txt situé au même en-

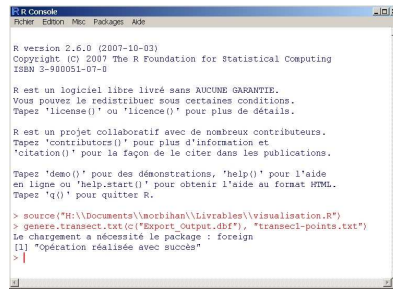


FIG. 6 – Exemple de traduction des fichier d'export vers un unique .txt sous R.

droit pour les détails d'installation.

Précisez l'emplacement des différents répertoires contenant les données d'origine. Pour le bon fonctionnement de la suite, veillez à extraire les signaux dans le même répertoire que le fichier .txt contenant les points à extraire. Pressez le bouton **Exécuter** (cf. FIG. 7).

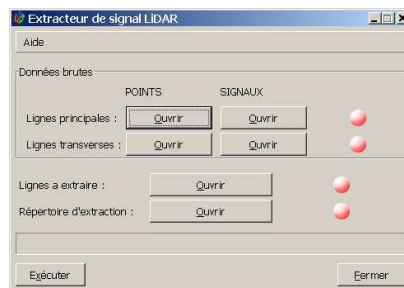


FIG. 7 – Vue du logiciel Extracteur de signal LiDAR

Le logiciel crée, dans le répertoire choisi, les fichiers contenant les signaux correspondants aux points sélectionnés.

3.4 Affichage des points et des signaux

Cette dernière étape permet de visualiser les points sélectionnés ainsi que les trains d'ondes correspondants.



3.4.1 Générer l'affichage sous R

Lancez R, placez vous dans le répertoire contenant le fichier points (.txt) et les fichiers signaux (.dat) générés avec *Extracteur de signal LiDAR* et chargez *visualisation.R* si ce n'est pas déjà fait (cf. 3.3.1).

Appelez la fonction :

```
exporte.signaux.pdf("transect", ordre=2)
```

en remplaçant *transect* par le nom de votre fichier .txt sans cette extension. *ordre* précise dans quelle direction afficher le transect : 1 pour latitude ; 2 pour longitude. Cet ordre dépend de la dominante de votre transect.

Cette fonction génère un fichier .pdf. Placez le en mode plein écran et déplacez-vous avec  et .

Pour tout problème ou pour toute question, n'hésitez pas à contactez Tristan Allouis <tristan.allouis@teledetection.fr>.

Annexe F

Rapport sur la qualité des données LiDAR Morbihan

PROJET BALAFF
BAthymetrie **L**Aser Faible Fonds
PNTS-**S**HOM

UMR TETIS
CEMAGREF
MONTPELLIER



QUALITE DU LEVE TOPOGRAPHIQUE LASER
SHOALS 2005 – GOLFE DU MORBIHAN

Application aux zones faiblement immergées (< 3 m)

Rapport intermédiaire

Tristan ALLOUIS
Jean-Stéphane BAILLY
Adermus JOSEPH

Octobre 2007

Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

GLOSSAIRE

GPS	: Global positioning system
DGPS	: Differential global positioning system
LiDAR	: Light detection and ranging
RMSE	: Root mean square error
EQM	: Erreur quadratique moyenne
RGP	: Réseau géodésique permanent
RTK	: Real time kinematic
MNT	: Modèle numérique de terrain
TIN	: Triangulated Irregular Network
KB	: Krigeage par Blocs
PIR	: Proche Infra-Rouge

Sommaire

1. Objectifs et contexte.....	5
2. Rappel sur la nature des données LIDAR étudiées.....	6
<i>Figure 1 : Principe du LiDAR bathymétrique et cheminement du train d'ondes LiDAR vert (532 nm) et infrarouge (1064 nm).....</i>	<i>6</i>
3. Acquisition des données de référence de terrain.....	7
3.1 Matériel utilisé (Protocole DGPS).....	7
3.2 Méthode de mesure GPS	7
<i>Tableau 4 : Caractéristiques des mesures GPS de terrain.....</i>	<i>7</i>
3.3 Choix des levés par transects et méthode d'échantillonnage GPS.....	8
<i>Tableau 3 : Caractéristiques des transects.....</i>	<i>10</i>
4. Méthodes d'évaluation :.....	11
4.1 Estimation des densités de mesures et d'échecs.....	11
<i>Figure 3 : Taux de réussite et d'échec des mesures de l'altitude du sol et de la surface de l'eau pour tous les transects.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 4 : Distribution de l'indice de confiance des mesures réalisées (gauche) et distribution du type de signal (train d'onde) retenu pour détecter la surface de l'eau par tranche de profondeur d'eau.....</i>	<i>12</i>
4.2 Méthode d'estimation altimétrique par « disque »	13
4.2.1 Modélisation de la rugosité du terrain, i.e. de la variabilité de la topographie du sol sous l'eau.....	13
4.2.2 Estimation d'une valeur d'altitude sur les empreintes laser (Krigage par bloc).....	13
4.3 Statistiques sur les erreurs de mesure de l'altimétrie du fond de l'eau par LiDAR.....	14
<i>Tableau 4 : Statistiques sur les erreurs par transect</i>	<i>14</i>
<i>Figure 5 : Distribution des erreurs sur la position du fond immergé par tranche d'eau de 20 cm.....</i>	<i>15</i>
4.4 Développement d'un outil spécifique d'estimation des erreurs.....	15
<i>Figure 6 : Exemple de résultats d'analyses des erreurs de mesures LiDAR obtenus sur une zone test (transect 13) : distribution et cartographie.....</i>	<i>16</i>
5. Conclusion.....	17
ANNEXES.....	19

1. Objectifs et contexte

L'objectif de cette étude est d'évaluer la densité et la qualité des mesures altimétriques issues des vols LiDAR bathymétriques SHOALS réalisés par FUGRO-PELAGOS en juin 2005. Il s'agit également d'identifier les sources d'erreurs des mesures altimétriques et les sources d'échec de ces mesures, et ce pour les zones survolées faiblement immergées (< 3m de profondeur d'eau). Cette étude de la qualité des données bathymétriques SHOALS1000T, bien que localisée, est donc complémentaire de l'étude qualité réalisée par le SHOM sur l'ensemble de la zone par comparaison avec les données Sonar Multi-Faisceaux (SMF).

2. Rappel sur la nature des données LIDAR étudiées

Les données étudiées sont des données LiDAR bathymétriques acquises par le système SHOALS 1000T, développé par la société optech et exploité par la société FUGRO-PELAGOS. Ces données ont été acquises en juin 2005 sur l'ensemble du golfe du morbihan (56).

Le LiDAR bathymétrique, développé initialement par les services hydrographiques canadiens, australiens et suédois, a pour principe l'émission-réception d'impulsions lasers intenses (plusieurs mégawatts), à fréquence régulière, dont la durée de cheminement est transformée en distance (Téléométrie laser). Sa particularité est l'utilisation d'impulsions dans deux longueurs d'onde : une impulsion dans l'infrarouge (1064 nm) réfléchi par la surface de l'eau, et une impulsion dans le vert (532 nm) qui pénètre la surface de l'eau, est amortie par la colonne d'eau puis est réfléchi par le fond de l'eau (figure 1). Sur le système SHOALS 1000T, qui plus est, une onde dite de Raman provoquée par le laser vert dans l'eau (fluorescence) est également enregistrée et quelquefois utilisée pour détecter la position de la surface de l'eau. Du point de vue des autres composantes du système LiDAR (système de balayage, centrales inertielles, D-GPS, ...), il n'y a pas de particularité sur les systèmes LiDAR bathymétriques par rapport aux systèmes LiDAR aéroportés PIR utilisés pour la topographie terrestre.

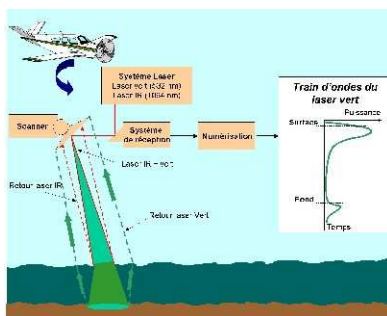


Figure 1 : Principe du LiDAR bathymétrique et cheminement du train d'ondes LIDAR vert (532 nm) et infrarouge (1064 nm)

Les données « altimétriques » issues de ce capteur sont donc triples :

- Altimétrie de la surface de l'eau
- Altimétrie du fond de l'eau
- Profondeur d'eau par différence des deux.

Seule l'altimétrie du fond de l'eau sera étudiée ici. Le système utilisé sera le WG84. L'altimétrie étudiée correspond donc à une hauteur ellipsoïdale, ne faisant intervenir de modèle de géoïde.

3. Acquisition des données de référence de terrain

3.1 Matériel utilisé (Protocole DGPS)

L'acquisition des données de référence a été réalisée au moyen de GPS différentiels (DGSP) fonctionnant sur deux phases et utilisés en post-traitement, matériel commun à l'IFR ILEE, à l'UMR TETIS, et à l'UR HYAX du Cemagref d'Aix en Provence (1 pivot ou base et 2 mobiles Leica GS1200 en liaison par radio UHF). Le logiciel de post-traitement des données GPS utilisé qui s'appuie sur le réseau de stations de référence permanente du RGP [<http://rgp.ign.fr/>] est Leica Geo-office. Cet appareillage permet dans des conditions normales d'acquisition (pas de masque de végétation, distance pivot-mobile < 10 km, distance pivot station RGP < 100 km dans les mêmes conditions troposphériques, GDOP<4) d'obtenir une topographie centimétrique.



Figure 2: Localisations 1- de la zone test sur le golfe du Morbihan (cadre rouge) et 2- de la station GPS RGP utilisée (cadre vert)

3.2 Méthode de mesure GPS

Le pivot GPS utilisé a été calculé en post-traitement sur une durée d'enregistrement de 5 h environ, post-traitée avec la station de Sarzeau située à une dizaine de kilomètres du chantier. Les détails sur la date et l'heure, le mode de positionnement du pivot, le nombre de points levés et leur qualité altimétrique en dispersion (CQZ : mesure de dispersion (écart-type) intégrant à la fois la configuration des satellites GPS et la qualité de la transmission radio) sont présentés ci-après dans le tableau 4.

Chantier du 31 mai 2007	Pivot			Station RGP utilisée	Mobile	
	Date /durée d'enregistre ment du pivot	Coordonnées (WGS84, degrés décimaux)	Méthode de mesure		Nbre de mobiles et CQZ moyen	Nombre de points levés
Larmor- Baden	4h40 : 8h46à13h26	W=2.89481991 N=47.58561373 hauteur= 58.67	REF RGP	Sarzeau Fichier 24h à 30 s	2 mobiles 0,0103 m	2880

Tableau 4 : Caractéristiques des mesures GPS de terrain

Toutes les données GPS initialement ont été acquises en WGS84 et n'ont donc pas été transformées.

3.3 Choix des levés par transects et méthode d'échantillonnage GPS

Dans la littérature, on peut relever que les facteurs qui influent sur la précision des mesures altimétriques des données LiDAR bathymétrique sont de deux ordres : les facteurs internes [Bretar 2006 ; Gachet 2005] ou externes au système LiDAR . Les facteurs internes sont eux-mêmes suivant 2 niveaux :

- Interne au capteur LiDAR (émission et réception laser + balayage).
- Interne à la plate-forme aéroportée et aux caractéristiques de navigation (DGPS, centrale inertielle).

Dans le cadre de ce projet Morbihan, nous nous intéressons essentiellement aux facteurs externes, à savoir :

- l'épaisseur d'eau,
- le type de fond et notamment sa « rugosité » (micro relief) et sa réflectivité (albedo),
- les caractéristiques de la surface de l'eau (rugosité, vitesse), (+ présence de bateaux...),
- les caractéristiques de la colonne d'eau, principalement, turbidité et présence d'algues (algues dite à « flotteurs » sur ce site).

Ainsi, un site à proximité de Larmor-Baden a été sélectionné afin, sur un petit périmètre, de réaliser des chantiers dans des contextes de fond de l'eau différents (sols sableux, vaseux, rocheux).

Dix « transects » ont été ainsi réalisés à partir de deux mobiles DGPS en parallèles, suivant des pas d'échantillonnage variables qui permettent de mesurer la rugosité du fond de l'eau à différentes échelles spatiales. L'ensemble des transects ont été réalisés à marée basse et montante, ce qui a permis de lever à pied d'homme des zones où les profondeurs d'eau allaient lors du vol jusqu'à environ 3 mètres. Seules la qualité d'estimation de l'altimétrie du fond de l'eau (dénommé sol par la suite) avec des hauteurs d'eau faibles (< 3 m) a donc été réalisée.

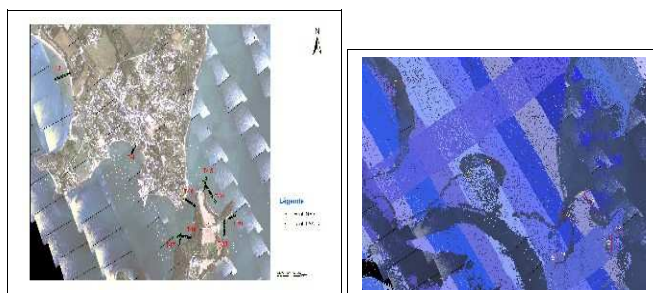








Figure 2 : Droite : Localisation des différents transects tests réalisés sur le chantier Morbihan le 31 mai 2007 (Larmor-Baden) – Gauche : même image avec les points laser « hydro » réalisés par axe de vol (chaque axe est représenté suivant un niveau de bleu différent).

Ces transects permettent, dans la mesure du possible, d'analyser la qualité des mesures laser suivant différentes conditions (nature du terrain, axes de vol se recoupant). Une description de chacun des chantiers tests est donnée dans le tableau 3 ci-après.

Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

3		Longueur	160 m
		Algues	non
		« rugosité », nature du fond	Lisse, sableux
4		Longueur	70 m
		Algues	Oui aux faible profondeurs
		« rugosité », nature du fond	Sables + blocs rocheux
13		Longueur	116 m
		Algues	Présence sur roche au nord
		« rugosité », nature du fond	Roche puis sable au sud
14		Longueur	190 m
		Algues	Oui mais de type « laitue »
		« rugosité », nature du fond	Vase et sable lisse
15		Longueur	103 m
		Algues	Oui mais de type laitue
		« rugosité », nature du fond	Vase et sable lisse puis roche au sud
16		Longueur	125 m
		Algues	Oui à flotteurs
		« rugosité », nature	Très rugueux rocheux

Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan



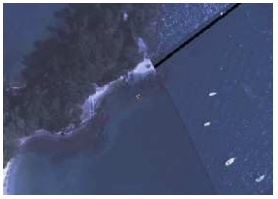

		du fond	
17		Longueur	113 m
		Algues	Oui, proche des digues
		« rugosité », nature du fond	Rugueux avec blocs
18		Longueur	122 m
		Algues	peu
		« rugosité », nature du fond	Rugueux type galets
19		Longueur	80 m
		Algues	Oui à flotteurs
		« rugosité », nature du fond	Mélange sable + roche et blocs vers l'est
20		Longueur	38 m
		Algues	non
		« rugosité », nature du fond	Lisse roche (mise à l'eau)

Tableau 3 : Caractéristiques des transects

4. Méthodes d'évaluation :

4.1 Estimation des densités de mesures et d'échecs

Pour chaque transect, et à partir des fichiers de points (ou empreintes) LiDAR non triés dits « bruts », on associe à chaque empreinte une altitude du sol, si elle n'est pas mesurée, par interpolation de type plus proche voisin à partir de l'ensemble des points mesurés par GPS et une altitude de la surface de l'eau, si elle n'est pas mesurée, par affectation de la valeur médiane des points du transect, suivant une hypothèse de constance de la hauteur d'eau à l'échelle des transects (longueur maximum de 160 m par transect).

A partir de ces ensembles d'empreintes par transect, ont été estimés :

- la densité des empreintes par m² (non triées),
- par tranche de hauteur d'eau de 20 cm, la part des empreintes laser pour lesquelles les traitements effectués (FUGRO-PELAGOS) ont mesurés une hauteur pour le sol et la surface de l'eau et donc pour lesquelles, une **mesure bathymétrique** est réalisée (points « triés »).
- suivant les mêmes tranches de hauteur d'eau de 20 cm, la part des empreintes laser pour lesquelles les traitements effectués (FUGRO-PELAGOS) ont mesurés une hauteur pour le sol mais pas pour la surface.
- de même, la part des empreintes laser pour lesquelles les traitements effectués (FUGRO-PELAGOS) ont mesurés une hauteur pour la surface mais pas pour le sol.
- Et enfin, de même, la part des empreintes laser pour lesquelles les traitements effectués (FUGRO-PELAGOS) n'ont rien mesuré.

Ces différentes estimations sont globalisées dans le graphique ci-après (figure 3) sommant ou moyennant les résultats obtenus par transect.

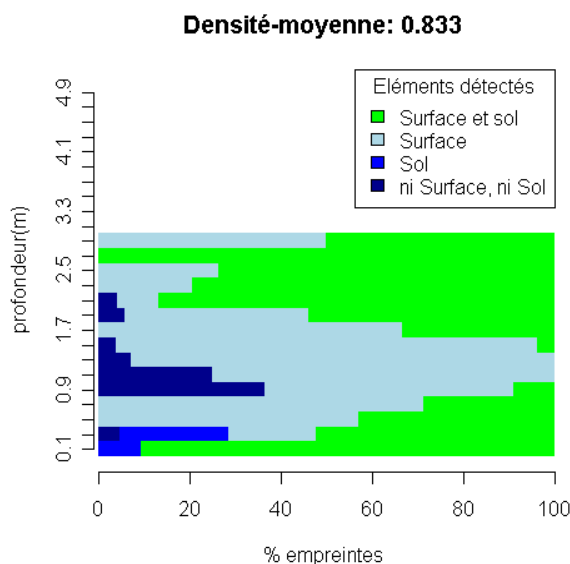


Figure 3 : Taux de réussite et d'échec des mesures de l'altitude du sol et de la surface de l'eau pour tous les transects

Les résultats par transect sont présentés en annexe A..

Ces résultats montrent :

- une densité allant de 0.42 à 1.26 empreintes laser par m² (suivant le nombre d'axes de vol recoupés par transect...) et en moyenne de **0.83**.
- des profondeurs d'eau minimales (bathymétrie) mesurées de deux ordres : **~1.8 m** ou proche de 0 m. Pour le premier cas, il s'agit de profondeurs mesurées suite à l'apparition de deux pics de puissance dans les trains d'ondes de retour laser vert. Pour le second cas, il s'agit probablement de mesures du sol sur un seul pic (dans le vert) de puissance dans les trains d'onde couplés à une interpolation de la surface de l'eau à partir des points voisins.
- Un taux de réussite maximal pour la bathymétrie pour les profondeurs de 2.7 m. Un taux d'échec de mesure de la surface de l'eau important pour les profondeurs d'eau inférieures à 0.5 m.
- Une difficulté de mesure bathymétrique pour la tranche 0.9-1.5 m due à des difficultés de mesure de la surface ou une tranche correspondant à la présence des algues à flotteurs (?), qui perturbent fortement les trains d'onde et donc la mesure d'altitude du sol.
- Un taux de réussite de mesures bathymétriques sur cette tranche de 0-3 m de **47 %**.
- Des échecs de mesures bathymétriques dues à **72 %** aux problèmes de détection du sol.

Si l'on étudie le type de signal utilisé (IR, vert, Raman) pour détecter la surface et pour chaque tranche d'eau ainsi que l'indice de confiance des mesures associé au traitement réalisé par FUGRO-PELAGOS (figures 4), on corrobore les conclusions et analyses précédentes avec un indice de confiance de la mesure qui chute nettement pour des profondeurs d'eau inférieures à 1.8 m (deux pics moins apparents sur le train d'onde vert). Par ailleurs la détection des pics de surface se fait majoritairement avec le signal raman et lorsque la profondeur décroît, seul le signal vert est utilisé.

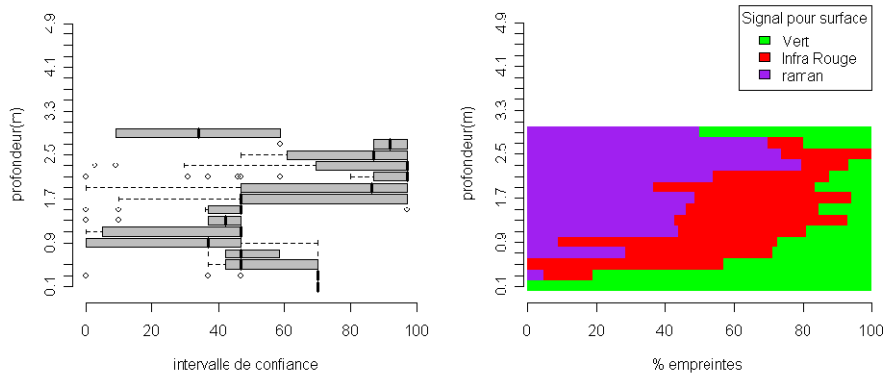


Figure 4 : Distribution de l'indice de confiance des mesures réalisées (gauche) et distribution du type de signal (train d'onde) retenu pour détecter la surface de l'eau par tranche de profondeur d'eau

Par la suite, seules les empreintes laser sur lesquelles ont été mesurées une altitude du sol sous l'eau sont analysées. Le transect 20 ne sera pas analysé car il ne contient aucune mesure bathymétrique et d'altitude du sol par LiDAR.

4.2 Méthode d'estimation altimétrique par « disque »

Pour évaluer la qualité altimétrique des données laser pour l'altitude du sol sous l'eau, un paramètre important à considérer est la taille physique de l'empreinte laser sur le sol sur laquelle a été mesurée cette l'altitude ou hauteur z , et la profondeur d'eau. La taille de cette empreinte, assimilée à un disque de diamètre D ($D \sim 2,3$ m), définit le support de la mesure laser et est un paramètre essentiel si on veut comparer la valeur de cette mesure avec d'autres mesures de résolution différente comme les mesures GPS qui sont définies chacune sur un « point ».

Une fois l'empreinte au sol du disque laser estimée, la qualité altimétrique des données se calcule par différence entre la valeur de l'altitude z mesurée par le LiDAR suivant ce disque et celle **estimée globalement** sur ce même disque à partir des points GPS levés sur le terrain voisins.

La méthode d'estimation globale par 'disque' utilisée est une méthode géostatistique dit de 'krigeage par bloc' (voir Chiles et Delfiner, 1999, p.196). Pour mettre en œuvre cette méthode, on réalise deux étapes :

- On modélise dans un premier temps la rugosité locale du terrain, par transect, suivant un modèle de variogramme ajusté sur un variogramme expérimental réalisé à partir des couples de points GPS suivant ces transects.
- A partir de ce modèle, on estime, sur les différentes empreintes laser, une valeur de l'altitude z à partir des valeurs et de la configuration spatiale des points GPS « voisins ». On associe à cette valeur un intervalle de confiance (variance d'erreur de krigeage σ''_{KB}) qui tient compte surtout de la configuration des point GPS pris en compte dans l'estimation globale.

4.2.1 Modélisation de la rugosité du terrain, i.e. de la variabilité de la topographie du sol sous l'eau

On fera l'hypothèse que localement, la rugosité du terrain conduit à des conditions de stationnarité (i.e. Stationnarité de la moyenne et de la covariance spatiale). Pour des classes de distance entre les points GPS levés sur le terrain, on calcule un variogramme empirique. On ajuste à ce variogramme empirique un modèle de variogramme (autrement dit une fonction mathématique admissible). Pour l'ensemble des 9 transects nous avons utilisé 3 modèles de variogrammes différents : exponentiel, gaussien et sphérique avec des paramètres différents rendant compte des conditions locales de rugosité.

4.2.2 Estimation d'une valeur d'altitude sur les empreintes laser (Krigeage par bloc)

A partir du modèle de variogramme ajusté, on estime numériquement une valeur sur chaque petite région définie pour chaque empreinte (intégration d'estimations ponctuelles sur l'empreinte) et on associe à cette estimation une variance d'erreur σ''_{KB} (par double intégration stochastique des covariances) (voir Chiles et Delfiner, 1999, p.196).

4.3 Statistiques sur les erreurs de mesure de l'altimétrie du fond de l'eau par LiDAR

Les erreurs de mesure altimétrique des empreintes laser sont estimées par différence entre la valeur de la mesure LiDAR et la valeur estimée sur le même support à partir des mesures GPS (points précédents). A partir de la distribution des erreurs suivant les différents transects (voir histogrammes en annexe B) pour n empreintes laser, différentes statistiques ont ensuite été calculées pour quantifier la qualité altimétrique du sol par LiDAR (cf. tableau1). Ces statistiques sont¹ :

- l'erreur moyenne ou Biais calculée par $\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{int} - Z_{gps})}{n}$
- l'écart-type d'erreur, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{int} - Z_{gps})^2}{(n - 1)}}$
- Erreur quadratique moyenne = RMSE = $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}}$

Une autre statistique a été calculée par transect. Cette statistique calculée initialement pour chaque empreinte laser est la variance d'erreur de krigeage par bloc sur chaque empreinte, notée σ_{KB}^2 . Cette variance est d'autant plus importante que la variabilité locale du terrain est importante (rugosité) et que la configuration spatiale des points GPS pris en compte pour estimer la valeur sur l'empreinte est défavorable (peu de points, points éloignés...). Dans le tableau 4, un indicateur moyen sur cette statistique est calculé correspondant à deux écart-types moyens d'erreur de krigeage par bloc : $2\sigma_{KB}$.

Cette valeur qui rend compte de l'incertitude que l'on a pour sur la valeur prise comme référence de l'altitude de chaque empreinte LiDAR peut être directement comparée aux valeurs d'erreurs de mesure 2σ présentées dans le tableau. Relativement, cette valeur 2σ n'a de sens que si elle est significativement supérieure à $2\sigma_{KB}$.

Zone	Transect	Biais (m)	2σ (m)	RMSE	$2\sigma_{KB}$ (m)
Morb	3	0,04	0,13	0,07	0,05
Morb	4	-0,08	0,72	0,33	0,37
Morb	13	-0,16	0,82	0,43	0,16
Morb	14	-0,03	0,60	0,29	0,10
Morb	15	-0,05	0,90	0,44	0,16
Morb	16	-0,33	0,70	0,47	0,28
Morb	17	-0,09	0,72	0,36	0,41
Morb	18	0,08	0,21	0,23	0,41
Morb	19	0,09	0,18	0,13	0,40

Tableau 4 : Statistiques sur les erreurs par transect

¹ On n'a pas utilisé uniquement la RMSE comme statistique globale de la qualité car la RMSE ne permet pas de distinguer le biais et la dispersion.

Ce tableau ainsi que les cartes des erreurs situées en annexe B montrent :

- un biais relativement faible par transect et globalement proche de 0 (-0.05 m en moyenne).
- une dispersion (2σ) moyenne de 0.55 m.
- une dispersion beaucoup plus forte sur les sols rugueux qui traduisent à la fois une forte variabilité de l'altitude du fond et la présence d'algues. Les grandes erreurs sont situées exclusivement sur ces zones (voir la cartographie des erreurs du transect 13 en annexe B).
- 2 transects sur 9 (les 13 et 14) pour lesquels les erreurs calculées n'ont pas grande signification ($2\sigma_{KB} > 2\sigma$) compte tenu de la forte incertitude des valeurs de référence.

Lorsque l'on étudie la distribution des erreurs sur la position du fond en fonction de la profondeur de l'eau (tranches d'eau de 20 cm, comme précédemment), on obtient la figure 5 qui montre à la fois une erreur moyenne allant vers des valeurs négatives en fonction de la profondeur et une hétérosédascité (différence de dispersion). Là encore, on voit bien que les mesures ayant une qualité « acceptable » se situent bien pour des profondeurs supérieures à 1.8 m et que les quelques points mesurés proches de la surface sont fortement entâchés d'erreurs.

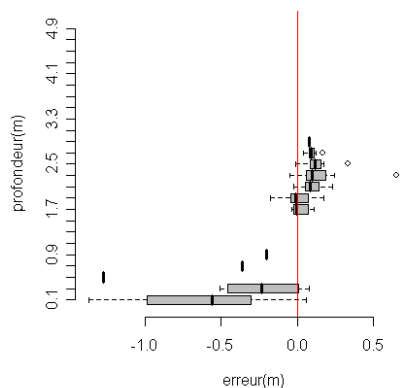


Figure 5 : Distribution des erreurs sur la position du fond immergé par tranche d'eau de 20 cm

- **A faire : Analyse plus fine des distributions d'erreurs en fonction du type de fond.**

4.4 Développement d'un outil spécifique d'estimation des erreurs

Pour réaliser les analyses précédentes, un outil spécifique pour l'évaluation de la qualité altimétrique de ces données laser a été développé sur R basé sur les packages 'Random fields'. Cet outil permet entre autre de :

- lire les point GPS et LIDAR pour les afficher dans un format bien défini ;
- modéliser et ajuster un modèle de variogramme à partir des points de référence ;

Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

- estimer une valeur d'altitude pour chaque disque LIDAR et y associer une variance d'erreur d'estimation (krigeage par bloc 'numérique');
- calculer et représenter sur des **histogrammes** et sur des **cartes** (voir figure 2.) les erreurs entre les mesures LIDAR et les mesures interpolées.

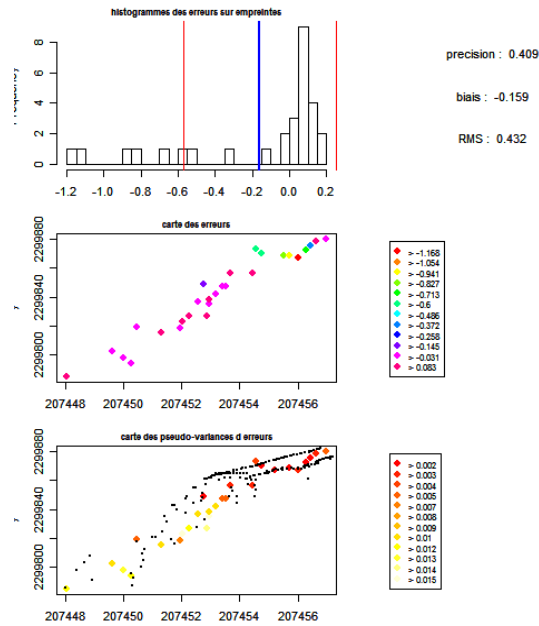


Figure 6 : Exemple de résultats d'analyses des erreurs de mesures LiDAR obtenus sur une zone test (tranché 13) : distribution et cartographie

5. Conclusion

Cette étude de la qualité des données topographiques SHOALS 1000T acquises en juin 2005 sur le golfe du Morbihan s'est focalisée sur des zones immergées de faible profondeur (<3 m) et sur une petite zone du golfe du Morbihan. L'étude s'est également attachée à décrire deux composantes de la qualité des données :

- la densité des mesures dans l'espace et notamment suivant les hauteurs d'eau d'immersion.
- la qualité de la mesure de l'altimétrie du fond en comparaison à des données de référence centimétrique mais de résolution très différente, ce qui rend leur comparaison directe délicate.

Sur le premier point, on s'aperçoit que les informations contenues dans le signal de base (des trains d'onde vert, Raman...) et les algorithmes de traitement associés ne permettent pas de discerner des hauteurs d'eau inférieures à environ 1.8 m. C'est aussi dans ces tranches d'eau que des éléments perturbateurs tels que la présence d'algues et une très forte rugosité (blocs rocheux) interviennent et perturbent fortement les mesures du sol et leur représentativité (le toit supérieur de ces objets sont ceux le plus souvent mesurés). En deça de 1.8 m, pour les très faibles hauteurs d'eau (very shallow waters), de nouveaux algorithmes doivent être définis. Cela dit, quelques points proches de la surface (caractérisés par un seul pic élevé sur les trains d'onde laser) sont également détectés et semblent plus interprétés comme des mesures LiDAR classiques de type topographique terrestre.

D'un point de vue plus quantitatif, le biais de mesure est assez faible (quelques cm) et les dispersions de mesure sur fond régulier et lisse également.

REFERENCES

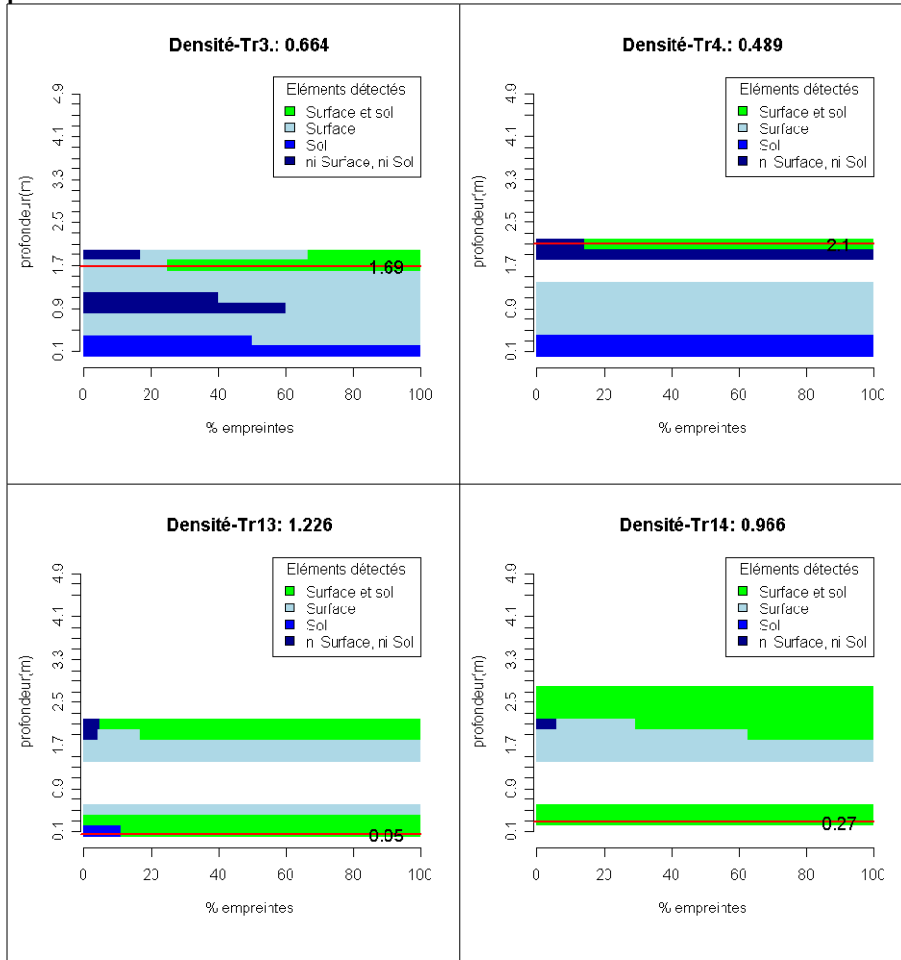
http://lidar.teledetection.fr/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=10&Itemid=2
BRETAR F., 2007, Les systèmes Lidar aéroportés: Géo-référencement et Précision, sur le site Atelier REGLIS LIDAR

http://lasig.epfl.ch/services/cours_laser/pdf/RAP_INTER_VER_1_0.pdf
GACHET G., 2005, Etude comparative de différentes méthodes d'interpolation pour générer des modèles numériques d'altitude raster à partir des points bruts LIDAR, sur le site EPLF

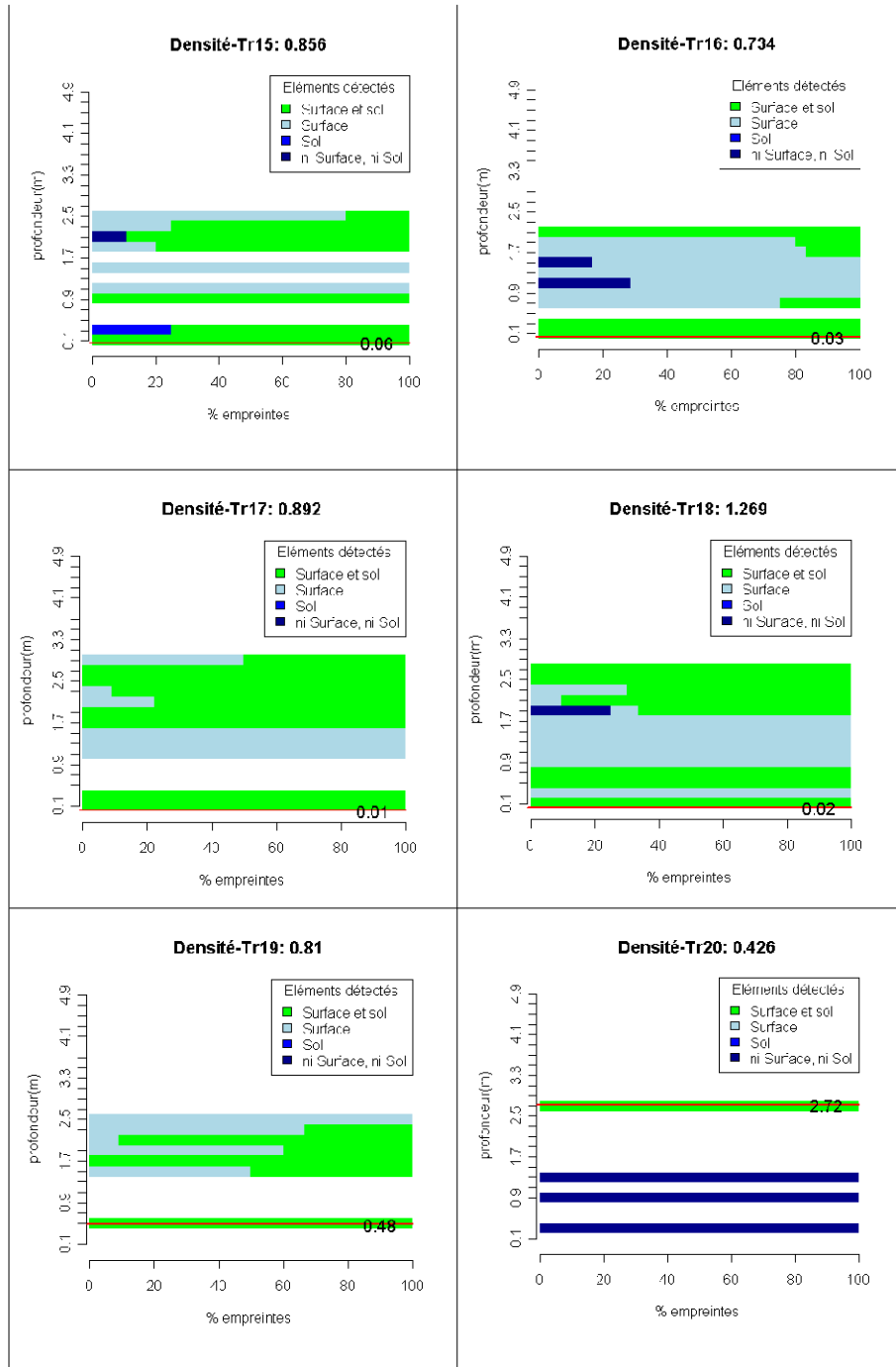
CHILES J.P, DELFINER, P, 1999, Geostatistics : Modeling spatial uncertainties, Wiley ed., 685 p.

ANNEXES

ANNEXE A : Diagrammes des types de mesures et d'échec par tranche de profondeurs d'eau asur les différents transects.

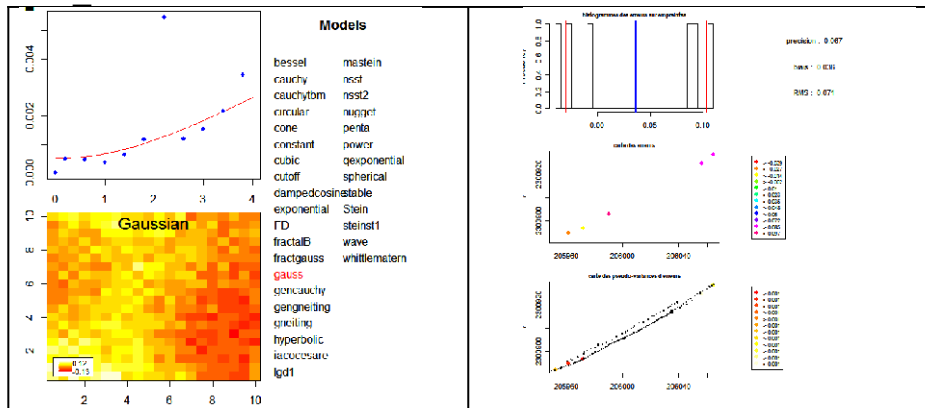


Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan



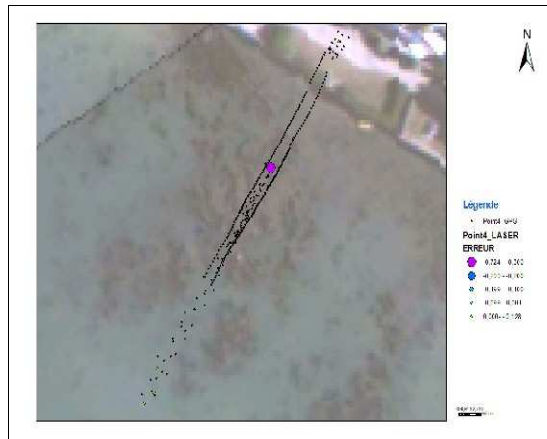
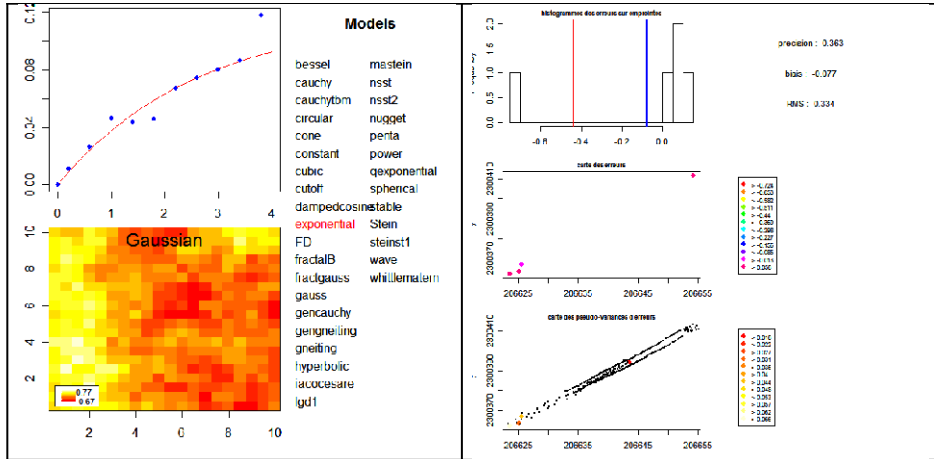
ANNEXE B : Résultats et cartographie des estimations d'erreurs de mesure de la topographie du sol sous l'eau par transect.

TR 3



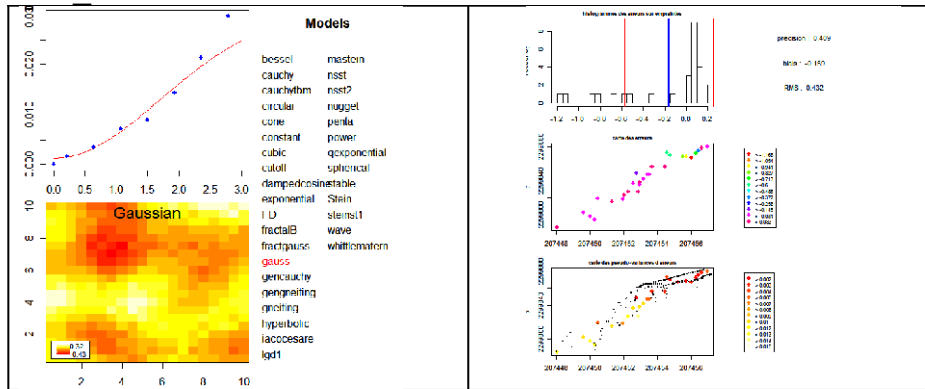
Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR-4



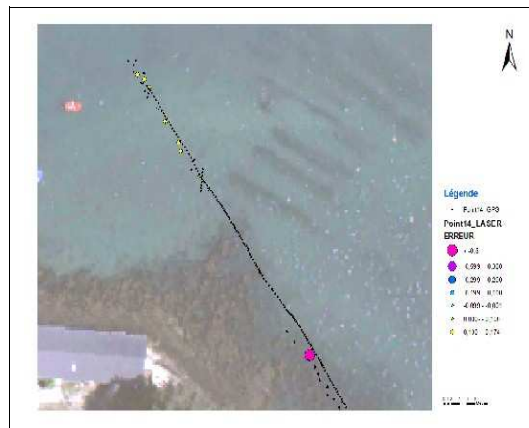
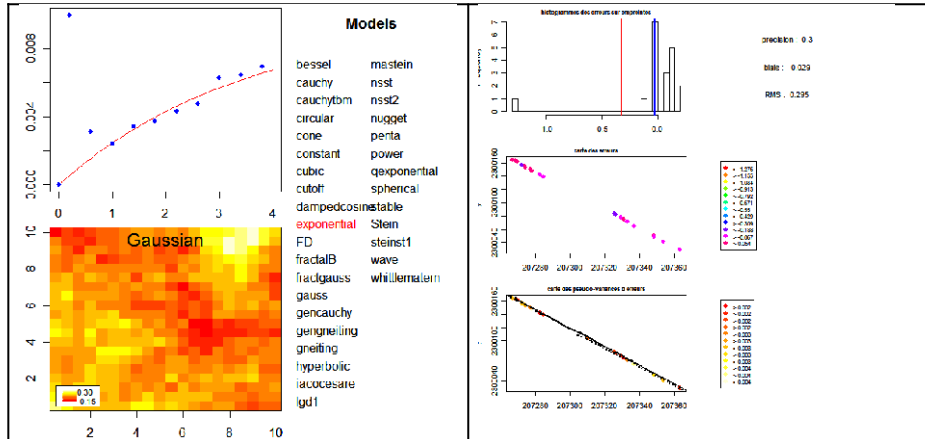
Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR 13



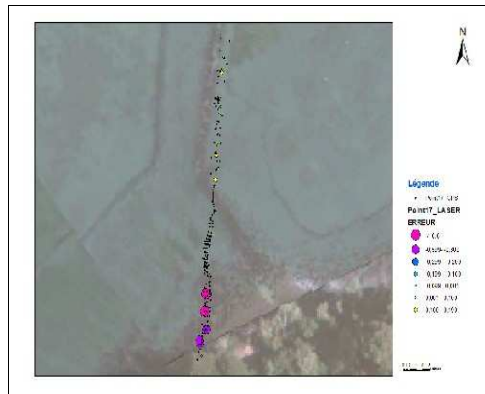
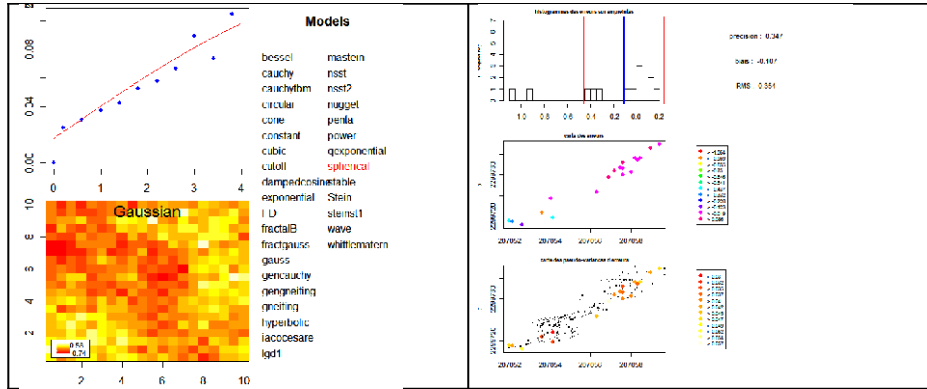
Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR-14



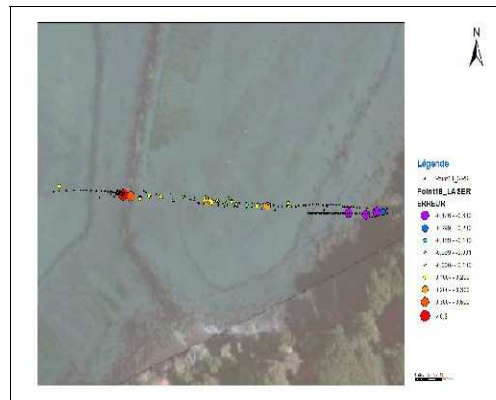
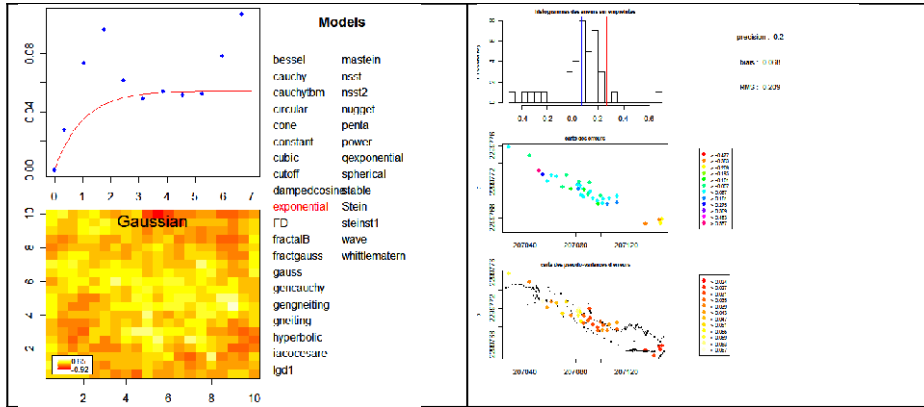
Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR-17



Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR-18



Qualité géométrique du levé SHOALS Morbihan

TR-19

