HAL
open science

Épaisseur d'eau minimale mesurable en rivière sur fronts d'ondes lidar simulés

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

To cite this version:

Audrey Lesaignoux, Jean-Stéphane Bailly, Tristan Allouis, Denis Feurer. Épaisseur d'eau minimale mesurable en rivière sur fronts d'ondes lidar simulés. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2007. hal-01780741

HAL Id: hal-01780741

https://hal.science/hal-01780741v1

Submitted on 27 Apr 2018

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

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

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 LiDAR[1] Bathymétrique 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 $\mathbf{H_{inf}}$, 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 $\mathbf{H_{inf}}$, 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 $\mathbf{H_{inf}}$ 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 (Télémétrie laser). Sa particularité est l'utilisation d'impulsions dans deux longueurs d'onde : une impulsion dans l'infrarouge (1064 nm) réfléchie par la surface de l'eau, et une impulsion dans le vert (532 nm) qui pénètre la surface de l'eau puis est réfléchie 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 [Tulldahl 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 $\mathbf{H_{inf}}$, 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 $\mathbf{H_{inf}}$, est proposée.

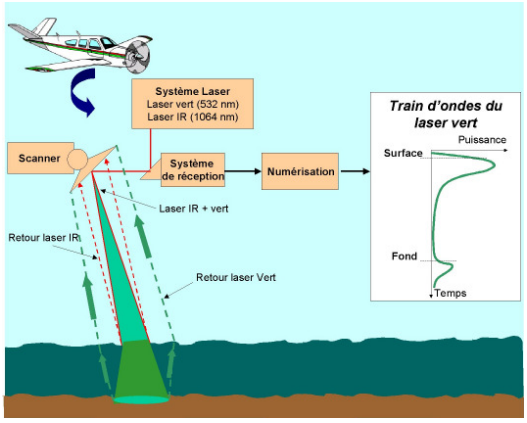

Figure 1 : Principe du LiDAR bathymétrique et cheminement du train d'ondes LiDAR vert (532 nm) et infrarouge (1064 nm)

2. Méthodologie

L'estimation de $\mathbf{H_{inf}}$, 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 $\mathbf{H_{inf}}$ à partir d'un ensemble de TOLV approximés ;

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 :

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

où :
- ρ est la réflectance à l'interface air/eau
- $P_T(t)$ est le pulse transmis par le laser vert (W)
- T^2_{atm} 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 :

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

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 ??????
- $N(s, \varpi, \theta_0)$ est un facteur d'étirement 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'algue 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.

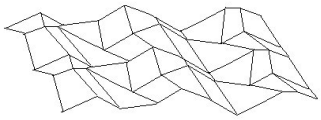

Figure 2 : Modèle microfacettes de Cook-Torrance.

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

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

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.

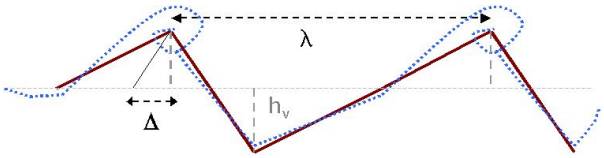

Figure 3 : Modèle microfacettes (m=4) de Cook-Torrance de la surface de l'eau (coupe longitudinale).

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

Une procédure d'estimation de la bathymétrie **Ĥ** 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 **Ĥ** 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 $\mathbf{H_{inf}}$ a été établi en deux étapes successives (figure 7) :
1- On génère des couples **(Ĥ, 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 **E=Ĥ-H,** on estime, pour chaque valeur de **H**, l'écart-type de **E,** σ_E (**?????**La limite inférieure de détection H_{inf}, est alors la valeur maximale de **H** (profondeur réelle) à partir de laquelle on obtient σ_E n'est ce pas « inférieur » ? à un seuil donné.Phrase à remodeler pour éviter de mélanger des « inférieurs et des « supérieurs ». Par ex :
La limite de détection H_{inf}, est alors la valeur de **H** (profondeur réelle) à partir de laquelle on obtient σ_E inférieur à un seuil donné.

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 : $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2},\ldots, \hat{H}_{infn}$
La valeur retenue, notée $\overline{H}_{inf}$ à partir de l'échantillon $(\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2},\ldots, \hat{H}_{infn})$ est la moyenne arithmétique :

$$\overline{H}_{inf} = \frac{1}{n}\sum_{n=i} \hat{H}_{inf\,i}$$

A partir de la distribution empirique obtenue : $\hat{H}_{inf1}, \hat{H}_{inf2},\ldots, \hat{H}_{infn}$, 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 en français SVP ? 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 (*FWHM*) 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 (*FOV*) (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 *r* et avec la pente générale *P*	0.07
	Rugosité *r*	**0.2**
	Pente générale *P* en %	**2.7**
	Demi hauteur des vaguelettes h_v 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.

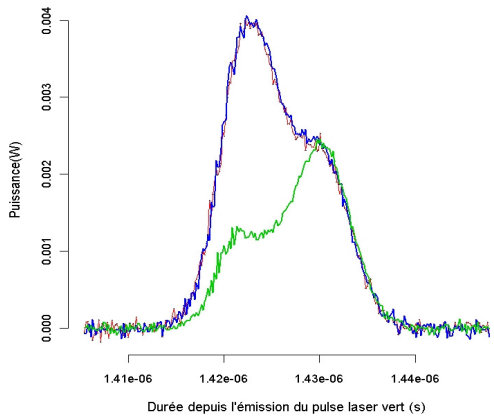

Figure 4 : Exemples de TOLV pour une profondeur **H** = 80 cm. Ligne verte : *r =0* et *P=0* ; Ligne bleue : *r=0.2* et *P=0* ; Ligne rouge : *r=0.2* et *P=2.7%*.

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-Newton[1] (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)**.

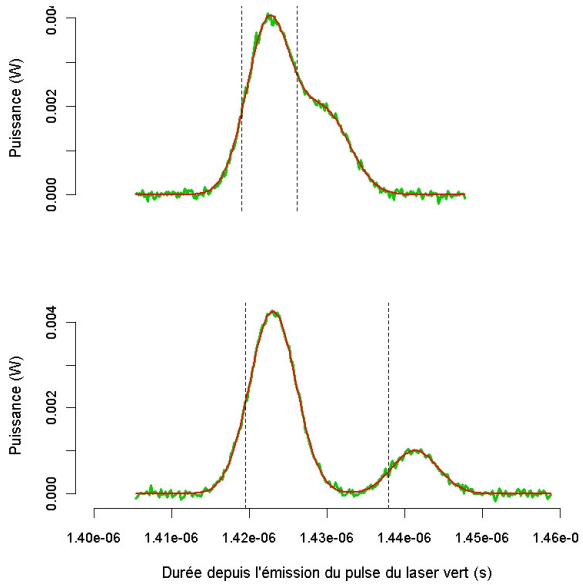

Figure 5 : Exemples de TOLV (vert) pour une profondeur de 80 cm (haut) et de 2 m (bas) avec *r=0.2* et *P=0*. Ligne rouge : approximations. Pointillés : positions du fond de l'eau et de la surface.

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

A partir d'un échantillon **($\hat{H}_{inf1}$, $\hat{H}_{inf2}$,…, $\hat{H}_{infn}$)** obtenu par **n** répétitions de cette procédure, la valeur estimée de la limite inférieure théorique est $\overline{H}_{inf}$ **= 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 différentes 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.

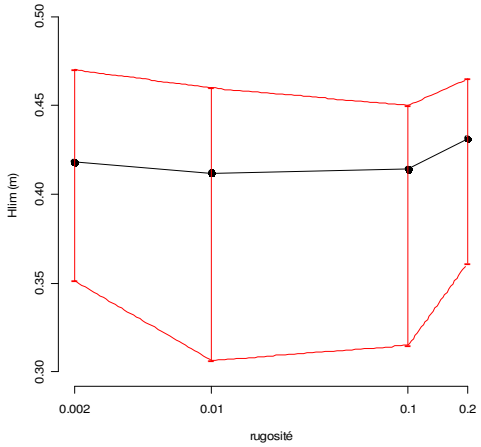

Figure 7 : Comparaison de H_{inf} en fonction de la rugosité de la surface (4 valeurs). Noir : ligne moyenne, Rouge : enveloppe de confiance à 95 %.

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

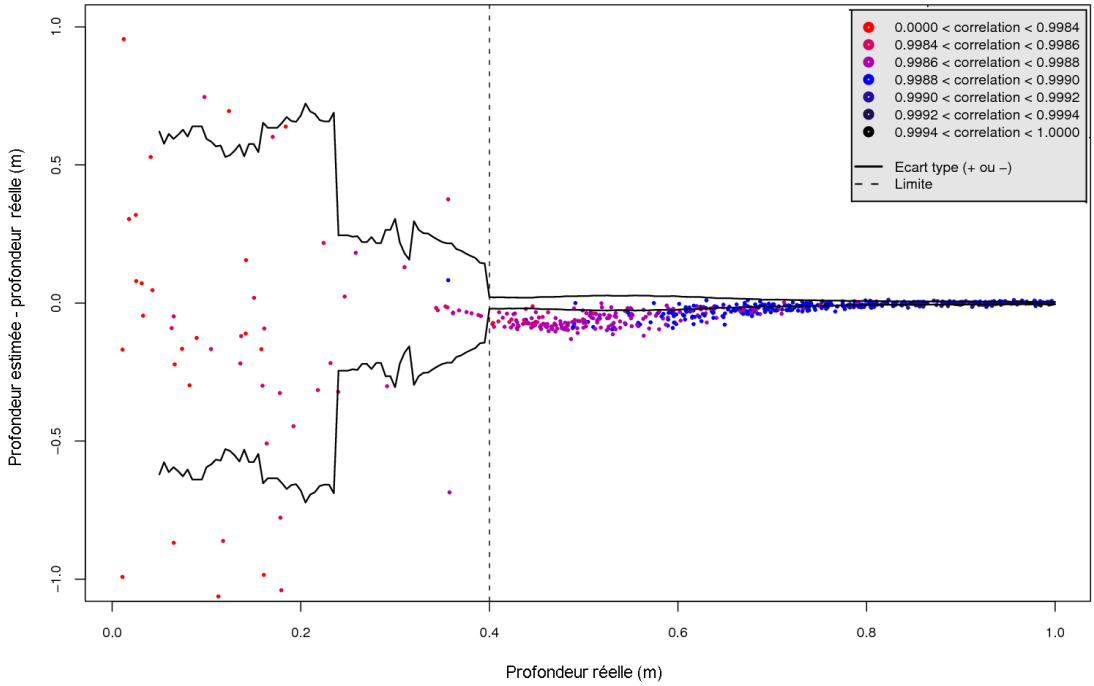

Figure 6 : Exemple d'estimation de $\hat{H}_{inf}$ (ligne verticale en pointillé) à partir du nuage de points **(E, H)**. Les codes couleurs sont relatifs à la corrélation de l'approximation et les lignes noires représentent $+\text{-}\sigma_E$

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 LAser 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 réfléctance 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