

LE LIDAR AEROPORTE TOPO-BATHYMETRIQUE POUR LA CARACTERISATION ET LE SUIVI DES CORRIDORS FLUVIAUX

D. LAGUE¹, P. LAUNEAU², C. MICHON³, E. GOURAUD³, W. GENTILE³, A. CRAVE¹, F. MOATAR⁴, L. HUBERT-MOY⁵

1 : Geosciences Rennes/OSUR, CNRS/Université Rennes 1 (dimitri.lague@univ-rennes1.fr)
2 : LPG/OSUNA, Université Nantes/CNRS. 3 : Fit-Conseil, Nantes. 4 : GÉHCO, Université F. Rabelais, Tours. 5 : LETG COSTEL/OSUR, Université Rennes 2.

Résumé

Les techniques lidar aéroportées, terrestre et les approches par photogrammétrie/Structure from Motion ont introduit un nouveau paradigme dans l'analyse et le suivi des corridors fluviaux en passant d'une donnée à faible résolution et peu précise, à une donnée très riche (topographie, végétation, infrastructure), synoptique et à très haute définition. Cependant, une limite majeure de ces techniques est l'absence d'information précise sur la bathymétrie des zones inondées. De nouveaux instruments, appelés lidar topo-bathymétriques, permettent une mesure simultanée de la topographie et la bathymétrie fluviale peu profonde, à très haute résolution (> 20 pts/m²) et précision (+- 10 cm). Ces données offrent des perspectives uniques pour la caractérisation et le suivi des environnements fluviaux.

Nous présentons les premiers résultats obtenus lors du déploiement d'un lidar de dernière génération (Teledyne-Optech Titan) acquis en 2015 par les Universités de Nantes et Rennes et déployés sur différents corridors fluviaux et environnements aquatiques (étangs, domaine côtier). La profondeur de pénétration maximale varie de 1 à 6 m en fonction de la clarté de l'eau, de la réflectance du fond et peut-être améliorée par un traitement plus poussé du signal lidar. La présence de végétation aquatique et d'une ripisylve dense impacte négativement la mesure bathymétrique, ce qui impose d'optimiser la période d'acquisition. Nous présentons les avantages et les limites de cette technique par rapport aux méthodes existantes dans le contexte des corridors fluviaux, et soulignons son caractère unique et novateur pour le suivi des grands linéaires de rivière (> 5 km). Les instruments étant mature technologiquement, l'amélioration du caractère opérationnel se situe désormais au niveau d'une meilleure prédiction de la profondeur de pénétration dans différents cours d'eau, et du post-traitement automatique des données massives obtenues en lien avec les besoins des utilisateurs finaux.

Mots-clés : lidar aéroporté, bathymétrie, géomorphologie fluviale, ripisylve, big data

Abstract

Airborne, terrestrial lidar and Structure From Motion have dramatically changed our approach to monitoring fluvial environments, from low density/precision data, to a wealth of synoptic data (topography, vegetation, infrastructures) at very high definition. Yet, an important limitation is the inability of these techniques to penetrate water and measure bathymetry. New lidar instruments, called topo-bathymetric lidar, allow a simultaneous measurement of topography and shallow fluvial bathymetry at very high resolution (> 10 pts/m²) and precision (+- 10 cm). These data offer unique opportunities for characterizing and monitoring fluvial environments. We report on the first results obtained with a state of the art system (Teledyne-Optech Titan dual-wavelength lidar 1064 nm + 532 nm) acquired in 2015 by the Universities of Nantes and Rennes. The instrument has been deployed over several fluvial and lacustrine environments in France. The penetration depth varies from 0.5 to 6 m as a function of water clarity, bottom reflectance and lidar signal post-processing. We discuss the advantages and limitations of this technique and compare it to existing survey methods. The approach is closed to being operational, but require a better understanding of the depth measurable in various aquatic environments, and the development of automated processing methods in relation with the need of end-users.

Key-words: airborne lidar, bathymetry, fluvial geomorphology, riparian vegetation, big data

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE DE LA BATHYMETRIE FLUVIALE

1.1 La révolution des données topographiques haute résolution

La caractérisation et le suivi de l'évolution des corridors fluviaux connaissent une transformation profonde au travers de l'avènement de nombreuses méthodes de suivi de la topographie à très haute résolution. Ces méthodes incluent le lidar aéroporté topographique, le lidar terrestre, et les techniques de stéréophotogrammétrie ou de vision par ordinateur de type Structure From Motion. Une revue récente de ces techniques dans le contexte du suivi et de la caractérisation de l'environnement est disponible dans [Passalacqua et al., 2015]. Ces techniques fournissent directement des **données en 3D** permettant d'aborder des questions comme la prédiction des zones inondables ou la caractérisation précise de la hauteur de la ripisylve que les approches 2D n'incluant pas la dimension verticale ne permettaient pas d'aborder. Elles sont aussi caractérisées par une **très haute résolution** avec un échantillonnage variant entre 1 et 1000 pts/m², et **une grande précision** (variant entre 1 mm et 10 cm selon les techniques, [Passalacqua et al., 2015]). Ces caractéristiques permettent une caractérisation fine des milieux à différentes échelles [Brodu and Lague, 2012], tout en permettant la détection de changements très fins (e.g., érosion des berges sub-centimétrique, [Lague et al., 2013]). Enfin, elles présentent un **caractère synoptique** en offrant une couverture pluri-kilométrique d'un corridor fluvial offrant pour la première fois une véritable archive 3D d'un site. Il est possible de réaliser des mesures traditionnelles (e.g., profils topographiques) et de convertir ces données en informations cartographiques (e.g., modèle numérique de terrain), mais aussi d'extraire des informations impossibles à obtenir avec des méthodes traditionnelles (e.g., caractérisation fine des zones inondables variations de géométrie des berges, densité et hauteur de la ripisylve). Le caractère synoptique est une propriété essentielle pour le suivi temporel des corridors fluviaux dans le contexte d'opérations de restauration afin d'écarter le problème de représentativité des mesures ponctuelles traditionnelles.

Alors que l'utilisation de ces techniques croît exponentiellement, elles ne permettent cependant pas de caractériser la bathymétrie des zones inondées. C'est une limite sévère dans le contexte de l'étude des corridors fluviaux ou par définition les zones submergées constituent l'objet central d'intérêt. Les lidars aéroportés et terrestres utilisent des lasers fonctionnant dans le proche ($\lambda=1064$ nm) ou lointain ($\lambda=1550$ nm) infrarouge qui ne pénètrent pas l'eau et permettent tout au plus de mesurer la position de la surface de l'eau. Les techniques basées sur l'imagerie passive (photogrammétrie, SFM) nécessitent une correction de la réfraction qui est complexe et reste pour l'instant peu opérationnelle, même si de récents développements permettent d'envisager la mesure de la bathymétrie en domaine très peu profond à partir d'imagerie par drone dans un futur proche [Woodget et al., 2015]. Il résulte de cette incapacité à mesurer la bathymétrie en même temps que la topographie, la nécessité d'utiliser des méthodes traditionnelles (e.g., levés GPS) qui ajoutent un surcoût à l'acquisition des données topographiques. Ces données n'ont pas une résolution spatiale, une étendue et une précision comparable aux données topographiques à haute résolution et ne permettent de mesurer de manière exhaustive l'étendue et les caractéristiques des zones immergées et leur connectivité au cours d'eau principal.

1.2 Techniques existantes de mesure synoptique et haute résolution de la bathymétrie

La mesure synoptique de la bathymétrie (et nous insistons ici sur le caractère synoptique et haute résolution) a progressé nettement moins rapidement que les techniques de mesure de la topographie. Trois grandes techniques ont été expérimentées pour la bathymétrie fluviale, toutes initialement développées pour la bathymétrie côtière (tableau 1) :

- (i) le sonar multi-faisceau n'est mobilisable que pour les cours d'eau navigables et profonds (> 5 m), et ne permet pas de caractériser précisément les berges et la ripisylve sauf à coupler la mesure avec un lidar terrestre mobile ce qui reste rare.

- (ii) Les méthodes spectrales utilisent la différence d'absorption des différentes longueurs d'onde de la lumière visible pour estimer la profondeur d'eau à partir d'images aériennes ou satellitaires multispectrales (voire hyperspectrales) [Legleiter et al., 2009]. Les précisions verticales sont de l'ordre de 10 à 20 % de la profondeur. Les profondeurs atteintes sont directement liées à la clarté de l'eau et nécessitent un fond parfaitement visible. L'approche requiert généralement une calibration in situ et est très sensible aux effets d'ombrage directs (i.e., écrantage) ou indirects (i.e., variations d'intensité lumineuse). Enfin, elle ne permet pas de mesurer la topographie et la végétation.
- (iii) Les lidar bathymétriques côtiers existent depuis de nombreuses années. Ils utilisent un puissant laser vert ($\lambda=532$ nm) qui permet de mesurer des profondeurs jusqu'à 40 m dans des eaux et des fonds très clairs. Leur utilisation dans le contexte du suivi des corridors fluviaux reste cependant anecdotique [e.g., Bailly et al., 2010] pour 3 raisons : (i) leur coût d'utilisation est très élevé (> 1000 €/km²) ; (ii) l'empreinte laser est de 1 à 2 m de diamètre, ce qui couplé à une densité de points faible (0.1-1 pts/m²), se traduit par une résolution trop faible pour les cours d'eau de taille moyenne; (iii) la détection des faibles profondeurs (< 0.5 m) et la performances strictement-topographique sont médiocres.

1.3 L'avènement du lidar aéroporté topo-bathymétrique

Le besoin d'une solution permettant une mesure synoptique de la bathymétrie et de la topographie des corridors fluviaux a motivé le développement d'instruments lidar adaptés à ce type d'environnements peu profonds. Après un premier prototype de la NASA qui a démontré l'intérêt de cette approche pour la cartographie des habitats aquatiques [McKean et al., 2009], les principaux constructeurs de lidar aéroporté (Optech, Leica/Ahab, Riegl) développent depuis quelques années des lidar topo-bathymétriques offrant une empreinte laser réduite (tache laser inférieure à 50 cm), une fréquence d'acquisition élevée (densité de points > 2 pts/m²), ainsi qu'un coût d'acquisition réduit. Ces instruments restent assez confidentiels, mais la technologie topo-bathymétrique comble une lacune importante par rapport aux techniques existantes (tableau 1). Elle a aussi acquis une maturité suffisante et un coût abordable pour être déployée plus systématiquement pour la caractérisation et le suivi de longs corridors fluviaux.

Conscient du potentiel scientifique et applicatif de ce type d'instrument (qui va au-delà de la topo-bathymétrie fluviale), les Universités de Nantes et Rennes se sont associées en 2015 pour acquérir le premier lidar topo-bathymétrique en France. Cette communication résume les premiers résultats obtenus lors du déploiement sur différentes rivières françaises.

Table 1 : comparaison des différentes méthodes existantes de mesure synoptique de la bathymétrie. Type de mesure o : impossible, + : possible mais données limitées, ++ : parfaitement adapté.

	Topographie	Végétation	Bathymétrie	Linéaire mesurable
Lidar topo	++	++	o	> 10 km
Photo/SFM drone	++	+	+ (en cours de développement)	< 10 km
Méthode spectrale	o	o	+	1 – 100 km
Lidar topo-bathy	++	++	++	> 10 km

2. METHODES, DONNEES ET MATERIELS

2.1 Caractéristiques de l'instrument Titan

L'instrument Titan DW (Dual Wavelength) développé par la société Teledyne-Optech en 2015, utilise 2 longueurs d'onde laser : $\lambda=1064$ nm et $\lambda=532$ nm (Figure 1). L'instrument peut fonctionner comme un lidar topographique en volant jusqu'à 1900 m au-dessus du sol. En mode topo-bathymétrique, la hauteur de vol doit être inférieure à 500 m pour concentrer fortement le laser vert. Cela réduit la fauchée latérale de l'instrument (typiquement 150 à 200 m de large) et augmente le coût d'acquisition des données. En partant d'une hauteur de vol de 350 m, d'une vitesse de vol de 200 km/h, et d'une fréquence de tir de 200 khz sur chaque canal, les densités de

points sont de l'ordre 36 pts/m² sur les parties émergées (532 nm + 1064 nm), et 18 pts/m² sur les parties ennoyées (532 nm). En bathymétrie, la densité diminue avec la profondeur lorsque l'on atteint les limites de pénétration de l'instrument. L'empreinte du laser vert ayant un diamètre de 25 cm, les éléments du fond de rivière de taille inférieure ne pourront pas être pleinement résolus. L'erreur de positionnement d'un point topographique mesuré sur une surface plane est inférieure à 5 cm en vertical et horizontal (1 écart-type). En mode bathymétrique, nos comparaisons réalisées avec des levés par sondeur mono-faisceau indiquent une précision verticale inférieure à 10 cm. Cette précision ne semble pas se dégrader avec la profondeur. Elle est meilleure que les valeurs obtenues avec d'autres instruments [Pan et al., 2015] même si la caractérisation de la précision des données bathymétriques reste délicate car il existe peu de données ayant une précision nettement supérieure pouvant servir de référence. L'instrument dispose d'une caméra de contrôle permettant de générer des orthophotos de la zone survolée avec une taille de pixel de 15 cm.

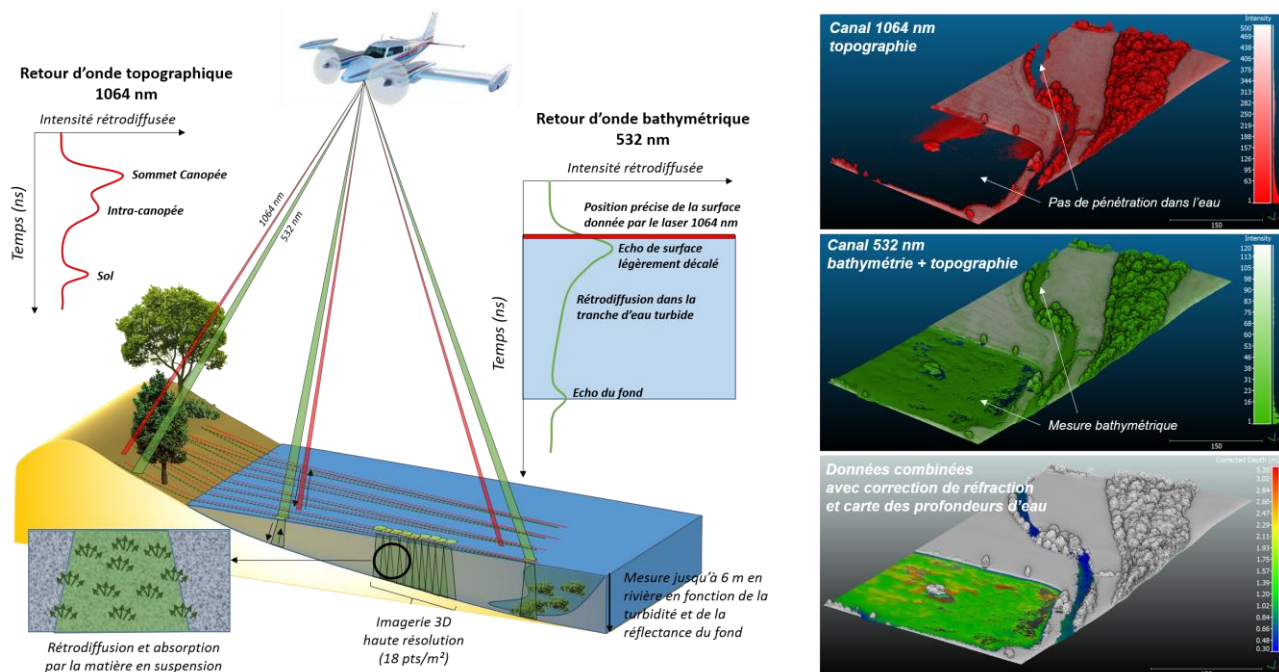


Figure 1 : Gauche : principe de fonctionnement du lidar topo-bathymétrique bi-spectral. Le numériseur installé avec le Titan peut enregistrer le retour d'onde complet de chaque tir pour un post-traitement avancé. Droite : données obtenues sur une zone d'étang et de petit cours d'eau près de Gisors, et carte topo-bathymétrique résultante. Les profondeurs maximales sont de 0.5 m dans le cours d'eau m, et 3.2 m dans l'étang. La mesure bathymétrique est complète.

Comme tout lidar aéroporté, le Titan détecte en vol les pics principaux du signal réémis par les cibles illuminées par le laser (figure 1). Lorsque le couvert végétal n'est pas trop dense, une fraction du signal atteint le sol et permet donc de **mesurer la topographie sous la végétation**. Cette capacité de mesure sous la végétation est un avantage fondamental des techniques lidar par rapport aux techniques d'imagerie passive basée sur de la photographie qui ne peuvent pénétrer le couvert végétal. L'instrument de Nantes et Rennes dispose en sus d'un numériseur permettant d'enregistrer pour chaque tir l'intégralité du signal laser retour afin de l'analyser plus finement après le vol. Ce retour d'onde complet permet en particulier l'analyse d'échos profonds faibles.

2.2 Facteurs contrôlant la profondeur maximale de détection du fond

Plusieurs facteurs vont contrôler la quantité d'énergie lumineuse réfléchi par le fond de la rivière et qui permettra à l'instrument de détecter le fond. Ces facteurs peuvent se comprendre en étudiant un retour d'onde bathymétrique (fig. 1) composé de 3 éléments :

- 1 Un écho de surface dont le pic est souvent décalé en profondeur de plusieurs dizaines de centimètres par rapport à la vraie surface de l'eau en raison d'interactions optiques complexes. Le canal 1064 nm ne pénétrant pas l'eau donne par contre une excellente mesure de la position de la surface d'eau (+- 5 cm). **Tout couvert végétal en surface de l'eau (e.g., renoncules) ou au-dessus de l'eau (ripisylve) va limiter l'énergie transmise dans la colonne d'eau et les capacités bathymétriques.**

- 2 Une atténuation quasi-exponentielle du signal dans la colonne d'eau qui correspond à l'absorption dans l'eau et la dispersion par les particules en suspension. Comme toute mesure optique, **plus l'eau sera turbide, moins le laser sera capable de « voir » le fond.** Cet effet est caractérisé par le coefficient d'atténuation diffuse K_d pour la longueur d'onde 532 nm. Sa mesure précise in situ nécessite la mise en œuvre d'instruments assez complexes. Des relations empiriques existent avec la mesure de clarté obtenue par disque de Secchi, mais restent très peu étudiées pour les rivières.
- 3 L'écho du fond de rivière qui dépend au premier ordre de la réflectance de la cible à 532 nm. Par exemple, la réflectance d'un sable clair sera de l'ordre de 60 à 80 %, alors que celle d'une plante aquatique pourra être très inférieure à 10 %. En conséquence les fonds sableux pourront être mesurés jusqu'à des profondeurs 6 à 8 fois plus grandes que les zones végétalisées. **La réflectance du fond doit donc être prise en compte dans la planification d'une mission, mais est malheureusement très difficile à estimer in situ.**

Lors d'une campagne d'acquisition topo-bathymétrique on visera à optimiser la transmission et la réflexion du signal par le fond en choisissant la saison de vol et le niveau d'eau. Les périodes propices correspondent aux niveaux d'étiage (faible hauteur d'eau et turbidité, conditions d'été), un couvert végétal aérien et aquatique faible (hiver/début printemps) et des fenêtres météorologiques de vol favorables (été). Ces conditions ne correspondant pas à une même saison, il faudra choisir la période de vol en fonction de la profondeur du cours d'eau, du régime hydrologique de la rivière (périodes de crue), de la densité de végétation, et de la météorologie locale.

2.3 Acquisition des données et post-traitement

L'instrument est mis en œuvre sur de petits bi-moteurs. Les corridors fluviaux sont généralement sinueux, la largeur des bandes de vol faible (150-200 m) obligeant à concevoir des plans de vol plus ou moins complexes pour minimiser le temps de vol. A titre d'exemple, les 50 km de linéaire de l'Ain et sa plaine d'inondation entre le barrage de Poncin et le Rhône ont été acquis en l'équivalent d'une journée (8h de vol), ce qui correspond à plus de 12 milliards de points. D'autres rivières ont aussi été survolées : la Sélune, le Vieux Rhin, la Conie ainsi que différents étangs et fossés avec des temps d'acquisition sur site variant de 30 minutes à 11 heures.

Au-delà du post-traitement standard de données lidar aéroportées, la mesure bathymétrique impose une correction des points bathymétriques liée à la réfraction du laser à l'interface air/eau. En pratique, les points bathymétriques apparaissent plus bas et plus éloignés de la source du tir laser qu'ils ne le sont en réalité. Il est donc essentiel de corriger précisément de ces effets. **La difficulté principale dans un corridor fluvial consiste à savoir quels sont les points qui doivent être corrigés.** Il faut donc identifier les zones inondées de manière automatique sur de très gros volumes de données et reconstruire précisément la surface d'eau. Les techniques existantes sont dédiées aux environnements côtiers et lacs et sont peu adaptés aux corridors fluviaux complexes comprenant de petites annexes hydrauliques, des étangs, des fossés (dont certains sont situés sous la végétation) et de nombreuses infrastructures (seuils, ponts). Nous avons donc développé une nouvelle chaîne de traitement automatique fonctionnant sur de très gros volumes de données (figure 2). Il s'agit à notre connaissance de la seule solution de traitement automatique pour les corridors fluviaux disponible à ce jour.

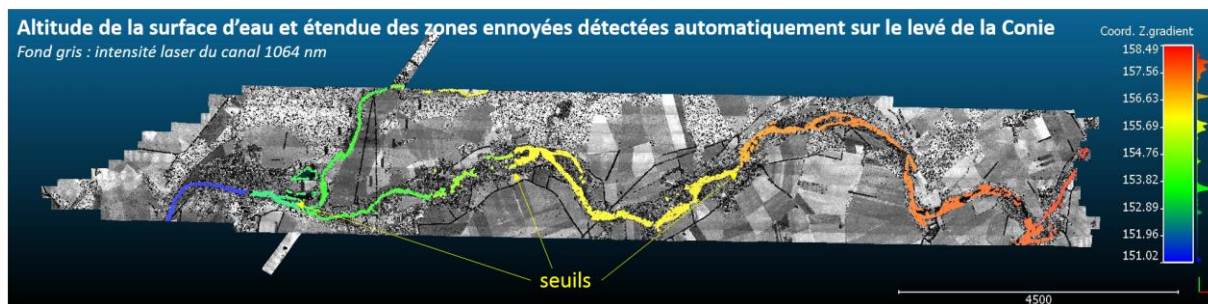


Figure 2 : Levé de la Conie (affluent du Loir) et cartographie des zones inondées. Les variations rapides d'altitude de la surface d'eau indiquent la présence d'un seuil. Les 25 km de linéaire de rivière ont été acquis en 3.5 heures de vol.

3. RESULTATS

3.1 Profondeurs atteintes et couverture bathymétrique

Pour l'Ain, rivière à fond clair et faible densité de végétation aquatique, volé à 330 m d'altitude, la profondeur maximale atteinte a été de 4 m, avec une diminution forte de la densité de points à partir de 3.2 m de profondeur. Le traitement du retour d'onde complet a permis un gain d'environ 25 % de profondeur par rapport aux échos enregistrés en vol. Avec cette profondeur de mesure, 95 % de la bathymétrie de la rivière a pu être acquise (fig. 3). Pour cette rivière profonde et large la stratégie suivie a été de voler en été durant les débits d'étiages les plus faibles.

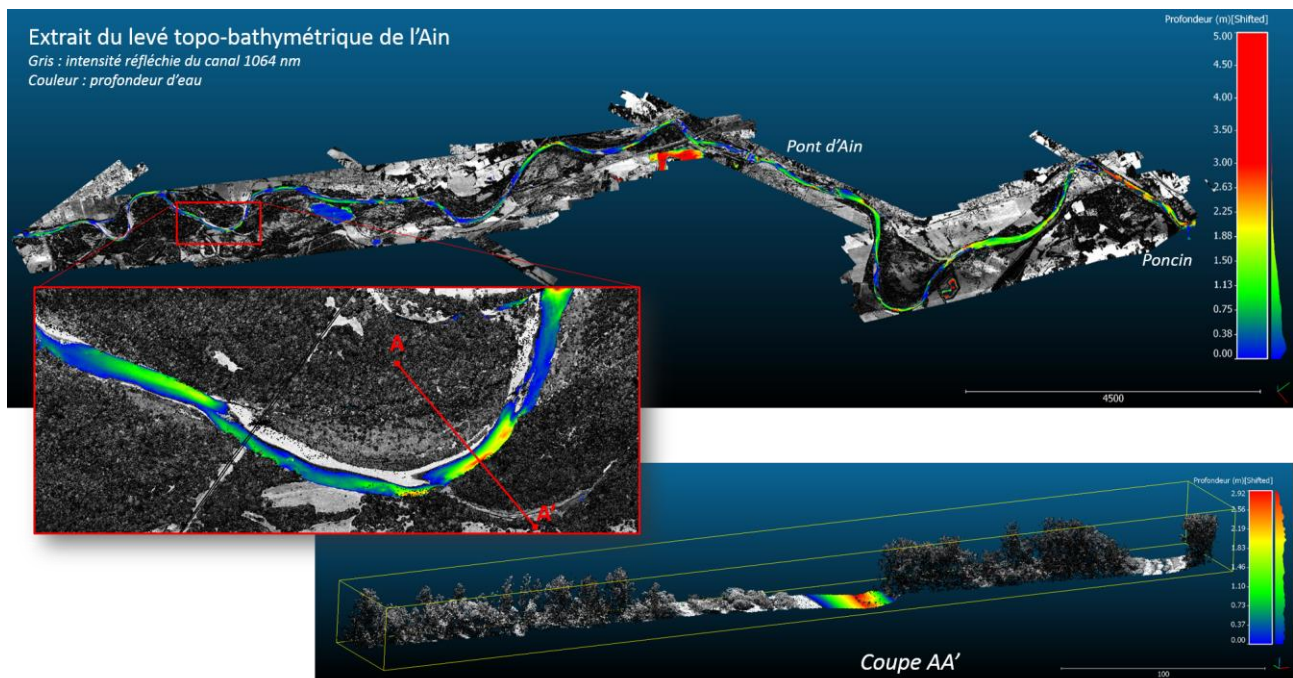


Figure 3 : extrait des données acquises sur l'Ain. On note une parfaite continuité entre les données topographiques et bathymétriques.

Pour la Conie (fig. 2), rivière peu énergétique à fort couvert végétal, acquise à 400 m à la fin du printemps, la profondeur maximale atteinte a été d'environ 1.5 m soit la profondeur maximale de la rivière. La couverture bathymétrique n'a pas été complète pour deux raisons : (i) la ripisylve très développée a bloqué une large partie du signal laser incident près des berges réduisant d'autant l'énergie disponible dans la tranche d'eau, (ii) la couverture dense de végétation aquatique et de renoncules en surface d'eau a fortement limité la mesure bathymétrique. L'enseignement de ce vol, réalisé durant les phases de test de l'instrument, est que ce type de cours d'eau doit impérativement être mesuré en hiver pour maximiser les chances d'une couverture topo-bathymétrique complète. Le traitement des données avec la méthode automatique de détection des zones ennoyées a cependant mis en évidence un réseau d'annexes hydrauliques sous la canopée, fortement connecté à la rivière principale qu'il n'aurait pas été possible de caractériser avec une autre technique (fig. 4).

A titre de comparaison, le déploiement de l'instrument dans des eaux claires en zone côtière sur fond sableux a permis d'atteindre des profondeurs de pénétration de 12 m.

3.2 Avantages, limites et couts d'acquisition

Dans le cadre de la mesure synoptique de corridors fluviaux, le lidar topo-bathymétrique est actuellement le seul instrument permettant une mesure simultanée de la topographie sous la végétation, et de la bathymétrie (table 1). Les autres techniques existantes nécessitent de combiner différentes techniques (e.g., lidar topographique + méthode spectrale) et ne possèdent pas une profondeur de pénétration aussi grande étant des mesures passives. La mobilisation d'un

tel instrument ne s'entend que pour étudier un linéaire de rivière d'au moins plusieurs kilomètres, ou dans le cadre d'acquisition conjointe de différents petits sites dans une même zone géographique. Le cout final étant directement lié à la durée d'acquisition et à la distance à voler pour atteindre le site de mesure, de petites opérations proches de la base de l'avion (Rouen) peuvent être réalisées à partir de quelques milliers d'euros, mais des vols dans le sud de la France auront d'emblée un cout de mobilisation plus élevé. Dans le cas de l'Ain, le cout de revient final de l'acquisition et du post-traitement est de l'ordre de 800 €/km de rivière, avec fourniture d'orthophotos, de modèles numérique de surface d'eau et de modèle numérique de terrain topo-bathymétrique continu. Plus généralement, le cout d'acquisition est de l'ordre de 150 à 400 €/km² en fonction de la complexité du site, de la distance de la base aérienne et du niveau de post-traitement des données. A titre de comparaison, un levé lidar bathymétrique côtier dépasse 1000 €/km², alors que pour du lidar topographique, les couts varient de 40 à 100 €/km² en fonction de la densité de points recherchés. En mode strictement topographique, le lidar Titan a des couts de mobilisation similaires, voir inférieurs étant donné sa très grande fréquence de tir. Le coût apparemment élevé est à pondérer au regard de la richesse des données obtenues qui intéressent de nombreux gestionnaires de territoire en charge des corridors fluviaux ou directement dépendants de ceux-ci. Ainsi, des acquisitions coordonnées entre différents opérateurs peuvent rendre le cout final des données très compétitif par rapport aux méthodes traditionnelles impliquant un grand nombre d'heures d'acquisitions de terrain pour un résultat qui sera in fine moins complet.

Les principales limites à l'utilisation du lidar topo-bathymétrique sont de 3 ordres :

1. La difficulté à évaluer a priori la profondeur de mesure de l'instrument pour un corridor fluvial donné. Nos premiers résultats soulignent l'effet négatif de la végétation aquatique pour la mesure de profondeur et rendent la numérisation des rivières peu énergétiques délicate. A l'opposé, les grandes rivières très turbides comme la Seine ou le Rhône ne pourront pas être mesurées avec le lidar topo-bathymétrique sauf au niveau des berges (1 à 2 m de pénétration), ce qui peut présenter un intérêt pour l'inspection de digues par exemple. Des travaux sont nécessaires pour développer des méthodes permettant de garantir un niveau minimal de pénétration en fonction de la turbidité des rivières et du type de fond.
2. Le traitement automatique des données pour extraire de l'information significative dans la grande masse de données (Big Data) générée par ce type d'instrument. La détection automatique de la surface d'eau est une étape importante, mais il est nécessaire d'aller plus loin pour extraire automatiquement des informations pertinentes pour chaque type d'utilisateur final (gestionnaire, technicien, scientifique).
3. Le dernier point est lié à l'intégration de ces nouvelles données dans les méthodes de travail et de prise de décision des gestionnaires, techniciens et scientifiques. Parce que cette méthode est nouvelle, elle est encore très peu connue et son potentiel applicatif n'est pas encore complètement réalisé. Il semble en particulier que le lidar topo-bathymétrique offre un potentiel extraordinaire pour la cartographie des habitats aquatiques [McKean *et al.*, 2009; Mandlbürger *et al.*, 2015], l'analyse de la connectivité des eaux de surface, la mesure des transferts sédimentaires (par acquisitions successive de la bathymétrie), le suivi et l'inspection des berges, et le suivi à long-terme des opérations de restauration de grande envergure, tant sur le volet géomorphologique que pour la ripisylve.

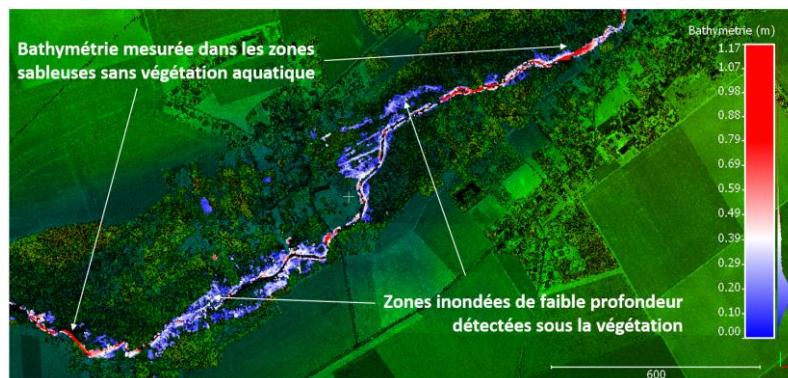


Figure 4 : Détail de la Conie montrant la présence de zones ennoyées de faible profondeur sous la canopée étroitement connectées au cours d'eau principal

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les premiers résultats obtenus sur différentes rivières françaises montrent que la mesure topobathymétrique par lidar aéroporté est proche d'être une technique opérationnelle de caractérisation et suivi des corridors fluviaux, permettant d'atteindre des profondeurs jusqu'à 4 m sur fond clair. La réussite de l'acquisition des données sur l'Ain et les progrès réalisés sur le post-traitement des données rendent la fourniture de données synoptiques et continues de la topographie et de la bathymétrie possible sur de très grands linéaires de rivière. La présence d'un instrument de dernière génération en France et d'une plateforme ouverte de recherche portée par Nantes et Rennes (www.lidar-nantes-rennes.eu) offre des opportunités d'acquisition de données pour les scientifiques et les gestionnaires de territoire.

Les instruments étant mature technologiquement, l'amélioration du caractère opérationnel se situe désormais au niveau d'une meilleure prédiction de la profondeur de pénétration dans différents cours d'eau, et du post-traitement automatique des données massives obtenues en lien avec les besoins des utilisateurs finaux. Le développement de nouvelles méthodes d'analyse du retour d'onde complet offre des perspectives intéressantes pour caractériser la turbidité de l'eau, cartographier les habitats et améliorer la capacité de détection des échos très faibles.

REMERCIEMENTS

Les données de l'Ain ont été acquises pour le compte et en collaboration avec Electricité de France. L'instrument Titan a été financé par les régions Pays de la Loire, Bretagne et grâce au soutien du Fonds Européen de Développement Régional.

Références bibliographiques

- Bailly, J.-S., Y. Le Coarer, P. Languille, C.-J. Stigermark, and T. Allouis (2010), Geostatistical estimations of bathymetric LiDAR errors on rivers, *Earth Surf. Process. Landforms*, 35(10), 1199–1210, doi:10.1002/esp.1991.
- Brodu, N., and D. Lague (2012), 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 68(2), 121–134, doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.
- Lague, D., N. Brodu, and J. Leroux (2013), Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 82, 10–26, doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
- Legleiter, C. J., D. A. Roberts, and R. L. Lawrence (2009), Spectrally based remote sensing of river bathymetry, *Earth Surf. Process. Landforms*, 1059(March), 1039–1059.
- Mandlburger, G., C. Hauer, M. Wieser, and N. Pfeifer (2015), Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats-A case study at the Pielach River, *Remote Sens.*, 7(5), 6160–6195, doi:10.3390/rs70506160.
- McKean, J., D. Nagel, D. Tonina, P. Bailey, C. W. Wright, C. Bohn, and A. Nayegandhi (2009), Remote sensing of channels and riparian zones with a narrow-beam aquatic-terrestrial LIDAR, *Remote Sens.*, 1(4), 1065–1096, doi:10.3390/rs1041065.
- Pan, Z., C. Glennie, P. Hartzell, J. Fernandez-Diaz, C. Legleiter, and B. Overstreet (2015), Performance Assessment of High Resolution Airborne Full Waveform LiDAR for Shallow River Bathymetry, *Remote Sens.*, 7(5), 5133–5159, doi:10.3390/rs70505133.
- Passalacqua, P. et al. (2015), Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review, *Earth-Science Rev.*, doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.012.
- Woodget, A. S., P. E. Carbonneau, F. Visser, and I. P. Maddock (2015), Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry, *Earth Surf. Process. Landforms*, 40(1), 47–64, doi:10.1002/esp.3613.