

LES ACTES

Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux

Actes de la journée technique
Paris, 10 juin 2016

Correspondants

AFB

Laurent Breton, Direction de l'appui aux politiques publiques,
laurent.breton@afbiodiversite.fr

Gabriel Melun, Direction de la recherche, de l'expertise et du développement des compétences,
gabriel.melun@afbiodiversite.fr

Anne Vivier, Direction de la recherche, de l'expertise et du développement des compétences,
anne.vivier@afbiodiversite.fr

Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES)

Stéphane Grivel, Direction de l'eau et de la biodiversité,
stephane.grivel@developpement-durable.gouv.fr

Droits d'usage :	Public
Couverture géographique :	International
Niveau de lecture :	Professionnel
Langue :	Français
Diffuseur :	Agence française pour la biodiversité (AFB)



Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux

Actes de la journée technique Paris, 10 juin 2016

Imagerie satellitaire, lidar aéroporté, capteurs in situ... La télédétection pourrait ouvrir un vaste champ d'applications pour la gestion et le suivi de l'hydromorphologie des cours d'eau. Confrontant les attentes du terrain aux solutions disponibles, la journée technique du 10 juin dernier a dressé un premier panorama des apports possibles de la télédétection fluviale appliquée aux différentes échelles de gestion : de la planification nationale au suivi local d'opérations de restauration.

Sommaire

Introductions

■ Enjeux et objectifs de la journée technique	4
■ La télédétection fluviale. De quoi parle-t-on ? Pourquoi aujourd'hui ?	9
■ Carte de localisation des projets présentés	13
■ Programme de la journée technique	14

Session A Mobilisation de la télédétection en appui aux politiques de l'eau

■ Une méthodologie automatisée et multi-scalaire pour la caractérisation hydromorphologique à l'échelle régionale [résumé]	16
■ La télédétection 3D pour le monitoring régional des cours d'eau et des bandes riveraines associées en Wallonie (Belgique)	18
■ Le Système d'information des évolutions du lit de la Loire et de ses affluents (SIEL)	28
■ Adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données lidar topo-bathymétriques	34

Session B **Caractérisation des corridors fluviaux par l'imagerie spatiale et terrestre**

■ Caractérisation des ripisylves sur de grands territoires à partir de données à très haute résolution spatiale en France métropolitaine	42
■ Caractérisation des durées d'inondation en milieux prairial par télédétection satellitaire radar	50
■ Suivi morphodynamique d'une annexe hydraulique rhénane restaurée par combinaison de méthodes d'imagerie terrestre	57

Session C **Apports des différentes techniques lidar**

■ Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux	68
■ Apports des données lidar pour la délimitation et la caractérisation des zones humides de fond de vallées alluviales [résumé]	78
■ Caractérisation des coulées torrentielles survenues en 2010 dans le torrent du Prêcheur (Martinique) : apport des données lidar et AFM	79

Session D **Applications opérationnelles des techniques d'imagerie**

■ Projet d'outil de suivi hydromorphologique par la photogrammétrie	88
■ Utilisation d'images drone pour caractériser la mosaïque sédimentaire d'une rivière en tresses (Vénéon, massif des Écrins)	94
■ Utilisation de données lidar pour la délimitation du domaine public fluvial de la Dordogne	103

Posters

■ Avantages et limites des méthodes photogrammétriques pour l'étude de la végétation riveraine	112
■ Vers une méthode de suivi du marnage des plans d'eau par imagerie	113
■ Télédétection infrarouge thermique des cours d'eau : retour d'expérience de cinq années de recherche dans les bassins du Rhône et de la Loire	114
■ Apport de l'imagerie drone pour le suivi à haute fréquence temporelle de la végétation alluviale : exemple du suivi de la restauration de la continuité écologique de la Sélune [résumé]	116

Conclusion

Conclusion de la journée technique par Philippe Dupont, directeur de la recherche, de l'expertise et du développement des compétences à l'AFB.....	118
--	-----

Introductions

- Enjeux et objectifs de la journée technique
- La télédétection fluviale. De quoi parle-t-on ? Pourquoi aujourd'hui ?
- Carte de localisation des projets présentés
- Programme de la journée technique





Enjeux et objectifs de la journée technique

Laurent **Breton**

Agence française pour la biodiversité - Direction de l'appui aux politiques publiques

Stéphane **Grivel**

Ministère de la Transition écologique et solidaire – Direction de l'eau et de la biodiversité

Gabriel **Melun** et Anne **Vivier**

Agence française pour la biodiversité - Direction recherche, expertise et développement des compétences

Le ministère en charge de l'environnement et l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema, intégré à l'Agence française pour la biodiversité depuis le 1^{er} janvier 2017) ont organisé le 10 juin 2016, à Paris, une journée d'échanges sur les avancées techniques et scientifiques et leurs applications opérationnelles offertes par la télédétection fluviale et l'imagerie à haute résolution.

La caractérisation de l'hydromorphologie et des habitats, l'identification des altérations, l'évaluation de la qualité des milieux aquatiques ou le suivi des opérations de restauration ne pourraient-ils pas bénéficier des avancées et des apports de la télédétection ?

Répondre aux enjeux nationaux de planification et de gestion

Pour comprendre les enjeux de la journée et les attentes, les organisateurs rappellent les principes de la directive cadre sur l'eau (DCE) de 2000 et ses objectifs environnementaux à atteindre notamment le bon état des eaux. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006 (LEMA) a confirmé les objectifs de résultats et de planification de la DCE dans la réglementation française.

Dans ce cadre normatif, l'hydromorphologie a pris une place incontournable :

- en tant que composante indispensable à la détermination du très bon état écologique ;
- en tant que soutien à la biologie, dans les états des lieux préalables à la construction des plans de gestion et programmes de mesures à mettre en œuvre dans un cycle de six ans ;
- pour la détermination et l'évaluation des masses d'eau fortement modifiées (MEFM) dont l'objectif est l'atteinte du bon potentiel écologique.

Enfin, la restauration physique et écologique des cours d'eau constitue un important levier d'action opérationnel.

Afin d'atteindre l'objectif de résultat fixé par la DCE, d'illustrer la dynamique fluviale et d'appuyer le fonctionnement des habitats, le régime hydrologique, la continuité du cours d'eau, et les conditions morphologiques constituent des éléments de qualité hydromorphologique DCE à surveiller en complément des éléments de qualité biologique et physico-chimique. La continuité sédimentaire, la ripisylve, les berges, la granulométrie, la mobilité latérale, la géométrie du lit sont autant de paramètres à surveiller et à mesurer. S'il était encore nécessaire de le rappeler, l'application de la DCE repose sur un indispensable socle de connaissances, de référentiels géographiques, de mesures physiques et de données d'observation.

Ce rappel du cadre de la surveillance DCE est important car il détermine les types de mesures à effectuer sur les cours d'eau et peut orienter le choix d'application des méthodes issues de la télédétection.

Pour bien connaître les milieux aquatiques à préserver, les mesurer, les évaluer et les suivre, des dispositifs de surveillance sont élaborés et donnent une bonne idée du dimensionnement spatial de la mise en œuvre et de la pertinence d'explorer les méthodes de la télédétection [figure 1]. Le déploiement se réalise aux seins des six grands bassins de gestion (545 000 km² environ) et les cinq départements d'outre-mer.

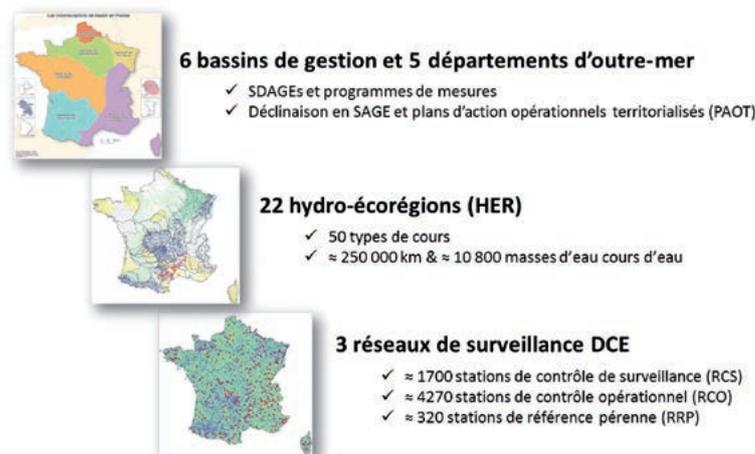


Figure 1. Dimensionnement de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau en France.

La complexité de la mise en œuvre et de l'harmonisation des méthodes réside dans la grande diversité des hydro-écorégions (HER) et des types de cours d'eau. Le réseau de surveillance (RCS et RRP) inclue les éléments de qualité hydromorphologiques et a vocation à évaluer l'évolution de l'état quantitatif et qualitatif des eaux de surface à travers des échantillons de masses d'eau représentatifs de la diversité de ces caractéristiques naturelles et des pressions anthropiques. Le réseau de contrôle opérationnel (RCO), qui peut être hydromorphologique, permet d'évaluer les masses d'eau risquant de ne pas atteindre les objectifs environnementaux et de suivre leur évolution à partir des actions mises en œuvre dans les programmes de mesures.

L'existence de ces réseaux n'est pas sans poser de difficulté dans le choix de la bonne échelle spatiale de représentativité du fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau et de ses altérations. Par ailleurs, il reste encore à définir des indicateurs de qualité physique des milieux aquatiques à travers les éléments de qualité DCE, l'état hydromorphologique n'existant pas.

La DCE a donc engagé la France sur des objectifs environnementaux à atteindre. Au sein du ministère en charge de l'environnement, avec l'appui de l'AFB, il s'agit de planifier et de coordonner les engagements. Pour l'hydromorphologie, le schéma de cette planification [figure 2] repose sur une organisation nationale composée de groupes de travail avec les principales instances de gestion et scientifiques, les DREAL, l'AFB, les six agences de l'eau et leurs référents en hydromorphologie, les organismes de recherche (Irstea, Cerema, CNRS). La restauration est accompagnée principalement par l'AFB via le centre national de restauration des rivières (CNRR¹) et les sites de démonstration, vitrines françaises de la restauration des milieux aquatiques. Le CNRR créé en décembre 2016 vise à mobiliser un réseau d'acteurs et d'échanges, en France et en Europe, autour de la restauration physique des cours d'eau. Ses objectifs sont de capitaliser les expériences et de les valoriser tout en permettant de faire évoluer conjointement avancées scientifiques et pratiques d'intervention.

1 - <http://www.onema.fr/le-centre-national-pour-la-restauration-des-rivieres>

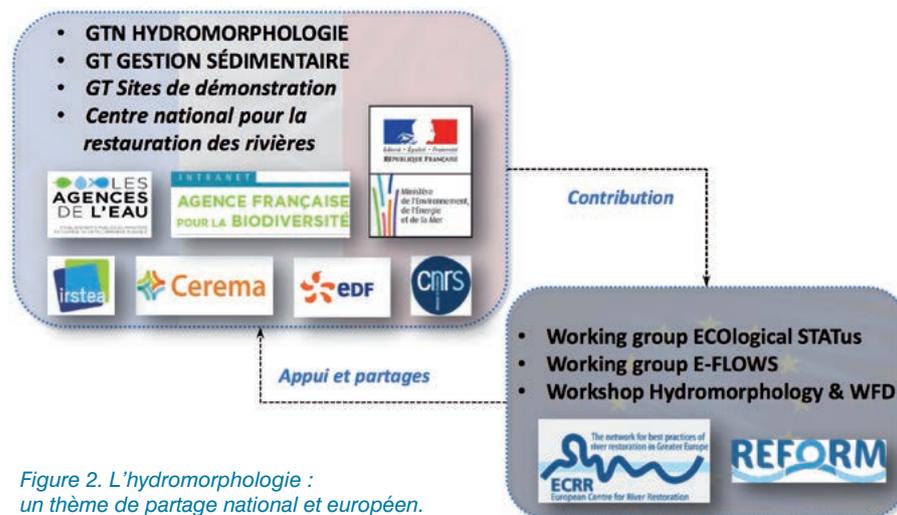


Figure 2. L'hydromorphologie : un thème de partage national et européen.

La France est présente également dans les groupes de travail européens de mise en œuvre de la DCE [figure 2]. Et à ce sujet, l'hydromorphologie qui a toujours constitué un fonds précieux de discussions dans les *working groups*, prend une place prépondérante. Elle mobilise la communauté scientifique et les États membres sur des sujets complexes : les débits écologiques (Groupe *Ecological flows* 2013-2015), les méthodes d'évaluation du bon potentiel écologique pour les MEFM (2016-2018), les liens entre la biologie et l'hydromorphologie (2018-...), les méthodes d'évaluation des altérations hydromorphologiques et les méthodes de caractérisation physique (normes européennes CEN en cours de révision avec les experts français).

Les résultats du programme *REstoring rivers FOR effective catchment Management* (REFORM²) 2011-2015, programme financé par le 7^e programme-cadre pour la recherche et le développement technologique (FP7) et les conclusions du *workshop* « *Hydromorphology & WFD Implementation* » organisé par la Commission européenne les 12 et 13 octobre 2015 à Oslo (Norvège) ont montré le fort potentiel offert par les données issues de la télédétection et de l'imagerie pour évaluer l'hydromorphologie à différentes échelles spatiales et temporelles. Sous l'impulsion de la DCE, les États membres de l'Union européenne sont ainsi amenés à développer des méthodes d'évaluation permettant de caractériser les conditions hydromorphologiques. La France a consacré beaucoup d'effort sur le sujet et sert souvent de référence pour les bonnes pratiques et les retours d'expériences au sein de l'espace communautaire, pouvant aider certains États membres à améliorer leurs pratiques. C'est dans ce cadre d'application de la DCE, de la planification des objectifs environnementaux et de la mise en œuvre des programmes de mesures que le ministère chargé de l'environnement et l'AFB engagent les échanges et les développements méthodologiques liés à la télédétection fluviale.

Expression des limites actuelles et des besoins

En France, différents protocoles, méthodes et outils [figure 3] ont été développés en matière de caractérisation et de surveillance de l'hydromorphologie. Ceux-ci diffèrent selon leurs approches, leurs échelles d'analyse et leurs objectifs. À titre d'exemple, le protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau (Carhyce) est mis en œuvre une fois tous les six ans à chaque station du réseau de surveillance DCE. Cependant, si son déploiement constitue en soi une avancée dans la connaissance et le suivi des cours d'eau français, ce protocole ne peut s'appliquer qu'aux cours d'eau prospectables à pieds excluant de ce fait près d'un tiers des

2 - <http://www.reformrivers.eu/>

stations situées en cours d'eau profonds, larges ou inaccessibles avec du matériel de mesure. Les solutions ne pourraient-elles donc pas venir des techniques de mesure à distance sans contact direct avec les objets fluviaux ?

Par ailleurs, malgré l'exhaustivité des méthodes actuelles, certaines limites ont pu être mises en évidence (Belletti *et al.*, 2015³) et relèvent notamment du manque de prise en compte d'une

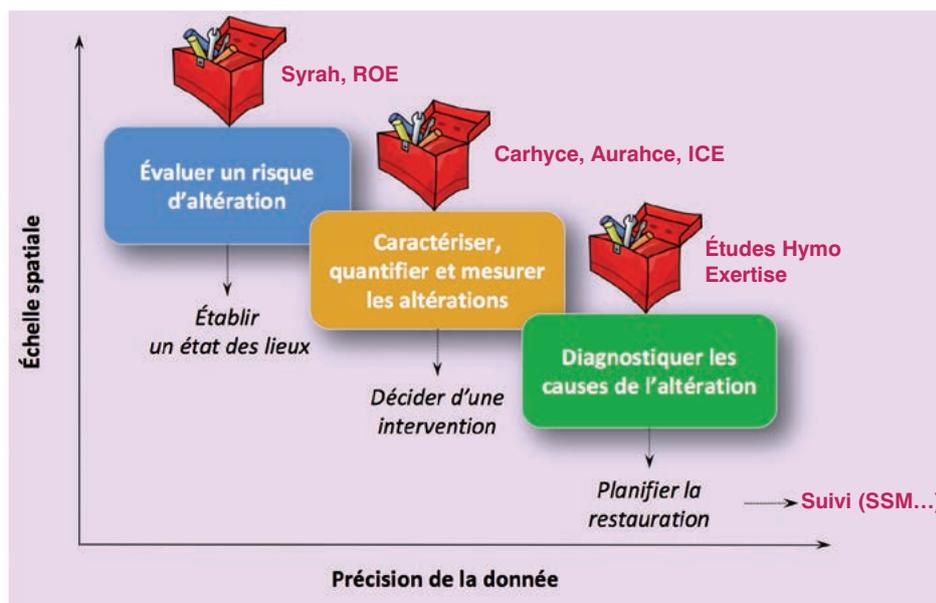


Figure 3. Outils de caractérisation et de surveillance de l'hydromorphologie en France (d'après F. Gob, 2014).

part de la dynamique des processus physiques et d'autre part de l'évolution temporelle des hydrosystèmes. Afin de mieux répondre aux enjeux de caractérisation et de surveillance imposés par la DCE, des pistes de réflexion émergent grâce au développement et à la généralisation des techniques de télédétection [figure 4].

Ces technologies permettent par leur résolution temporelle (reproductibilité) et spatiale une meilleure prise en compte de la dynamique des processus par l'étude, à l'échelle globale, de l'évolution de la forme en plan ou, à l'échelle plus locale, de la mosaïque sédimentaire par exemple.

L'objectif 9 du contrat d'objectifs 2013-2018 de l'Onema, proposait d'« adapter la stratégie de connaissance aux nouveaux enjeux ». Ainsi une réflexion, à l'interface recherche et gestion, doit être menée sur l'utilisation de ces techniques pour la caractérisation des corridors fluviaux. Ces réflexions doivent notamment porter sur les modalités opérationnelles de conception, de production et de diffusion de ces données. Elles doivent par ailleurs aborder les questions de coût d'acquisition (par exemple campagne de prise de vue aérienne), de traitement, de stockage, et de diffusion.

Les communications retenues pour la journée technique ont mis en avant des pistes de développement et d'amélioration, étudient les possibilités d'une mise en œuvre nationale, à des coûts raisonnables, en appui aux politiques de l'eau en métropole et dans les DOM : surveillance DCE, réglementations nationales, SDAGE, programmes de mesures, sites de restauration... Cette journée est donc utile pour tous, pour les avancées scientifiques, pour les aspects techniques et opérationnels, pour partager les expériences et surtout avancer sur les limites actuelles de la caractérisation, de la surveillance et de l'évaluation de la qualité physique des

3 - Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E. (2015). A review of assessment methods for river hydromorphology. Environmental Earth Sciences 73: 2079–2100

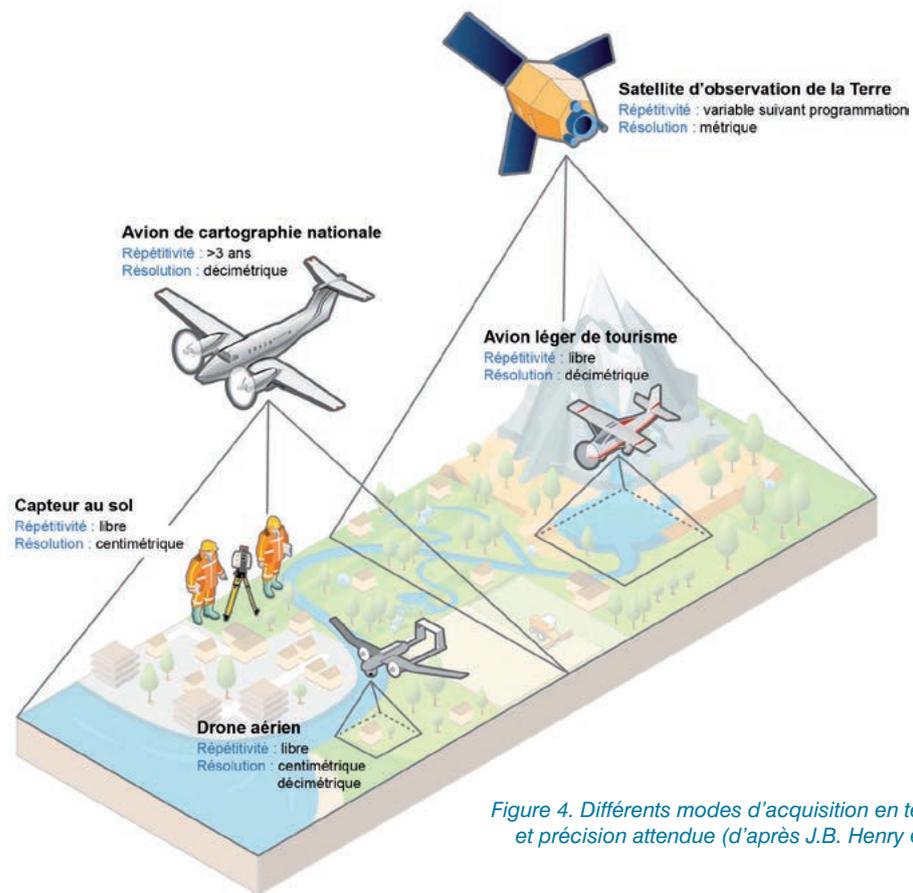


Figure 4. Différents modes d'acquisition en télédétection et précision attendue (d'après J.B. Henry et al., 2002).

milieus aquatiques. À la date de publication des actes, quelques orientations de développement se dessinent déjà en s'inscrivant dans des projets nationaux : Plan d'applications satellitaires 2018 -2022, lancement d'appel à manifestation d'intérêt (AMI 2017 et 2018 ⁴), feuille de route de l'AFB. Cet ouvrage retranscrit l'essentiel des contributions de la journée ⁵.

4 - <http://www.onema.fr/appeel-manifestations-d-interet-besoins-de-developpements-en-appui-la-surveillance-et-l-evaluation-de>

5 - Également disponible sur Internet : <http://www.onema.fr/avancees-apports-et-perspectives-de-la-teledection-pour-la-caracterisation-physique-des-corridors>



La télédétection fluviale

De quoi parle-t-on ?

Pourquoi aujourd'hui ?

Hervé Piégay

Université de Lyon, UMR 5600 EVS, site ENS de Lyon, 15 parvis René-Descartes, 69362 Lyon cedex 07

L'atteinte du bon état écologique des eaux, telle qu'elle est préconisée par la directive cadre sur l'eau (DCE) de 2000, repose notamment sur la mise en œuvre d'actions de restauration hydromorphologique. Cette politique étant ambitieuse et innovante, son évaluation est un enjeu important car toute action dite hydromorphologique ne conduit pas *in fine* aux résultats attendus. Identifier les situations d'échec ou de moindre succès est donc nécessaire pour prendre en compte ces éléments de connaissance afin de corriger ou ajuster les interventions et atteindre les objectifs des politiques publiques engagées. La démarche s'inscrit ainsi dans une logique adaptative. Par ailleurs, beaucoup d'actions de restauration sont également engagées localement sans qu'elles puissent être priorisées dans la planification d'une démarche à l'échelle régionale ou nationale ni fondées sur des éléments de connaissance robustes.

Depuis plus de cinquante ans, les connaissances en hydromorphologie ont été principalement acquises lors de campagnes de terrain, à partir de mesures *in situ* associées à des observations, et dans certains cas à des expérimentations. Depuis quelques années, ce champ scientifique est en pleine évolution et la tradition du terrain profondément ancrée dans les pratiques cède un peu le pas à d'autres démarches d'acquisition. Dans ce contexte, la télédétection fluviale devient un champ scientifique et technique de plus en plus stratégique. Elle peut se définir comme une démarche d'acquisition de l'information, *via* un instrument, que l'on appelle un *capteur*, qui est sans contact avec l'objet d'étude, qui correspond à l'environnement fluvial et ses différents attributs. On parle de détection passive lorsque le capteur enregistre le rayonnement naturel du soleil qui se réfléchit sur une surface ou est absorbé par cette surface et retransmis ensuite. Certains capteurs, comme l'appareil photographique de tout un chacun, peuvent enregistrer le rayonnement dans le visible mais d'autres peuvent également enregistrer le rayonnement dans le proche infrarouge ou encore dans l'infrarouge thermique. Dans le cas de la télédétection active, le capteur émet lui-même un rayonnement qui est réfléchi par la surface d'intérêt ; le rayonnement réfléchi étant alors mesuré par le capteur. C'est notamment le cas de la technologie lidar (*Light Detection And Ranging*) qui est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour déterminer l'altitude des surfaces, qu'elles soient émergées ou immergées, ou du radar également pour déterminer les zones humides, les zones inondées ou encore les masses d'eau permanentes.

Généralement, le capteur est embarqué sur un vecteur. Ce vecteur peut être un satellite et de plus en plus, il est aussi aérien. Une télédétection de terrain existe également, les capteurs étant installés sur des trépieds, sur des mâts fixes, parfois sur des véhicules, voire même sur des individus. Certains lidar sont parfois embarqués sur un satellite (capteur GLAS sur le satellite ICESat) ou plus communément sur des avions, hélicoptères ou même des drones. Ils sont aussi utilisés sur le terrain (télémètres laser à balayage).

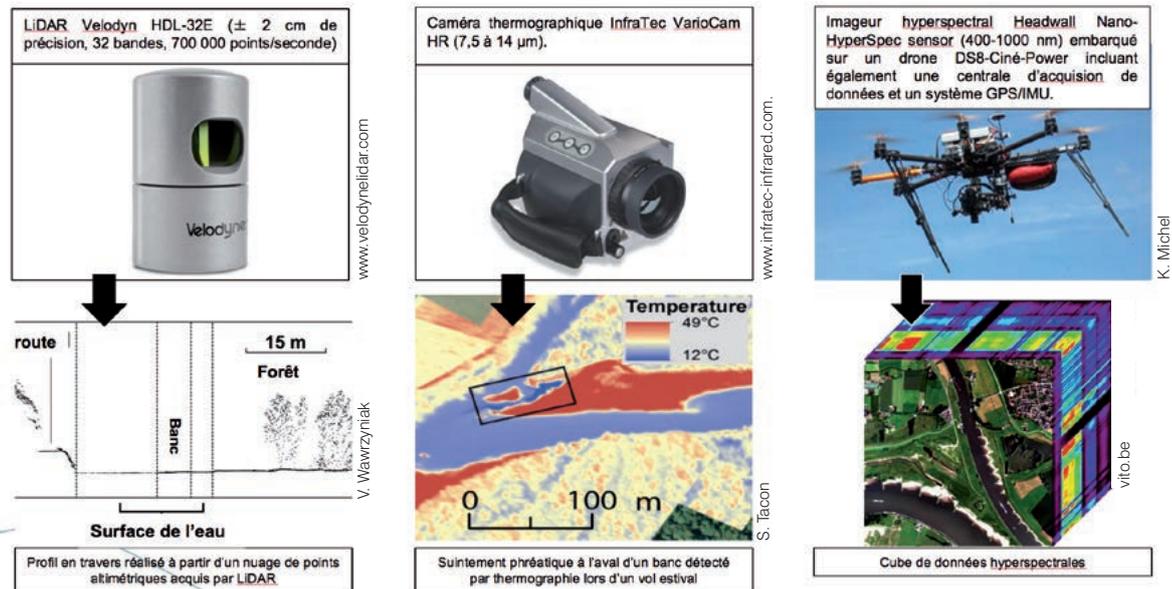


Figure 1 : Quelques exemples de capteurs embarqués sur des plateformes aériennes légères et illustration des données produites.

Si la télédétection fluviale existe depuis la fin des années 1970 avec l'émergence des premiers satellites, elle a enregistré une très forte croissance au cours de la dernière décennie dans la mesure où les capteurs embarqués gagnent en résolution à la fois spatiale, radiométrique, spectrale et temporelle. Cette amélioration des résolutions s'accompagne également d'une multiplication des plateformes et notamment l'émergence des drones qui permet de démocratiser largement l'acquisition d'images à très haute résolution. Leur technologie évolue sans cesse, et les offres commerciales proposent souvent avec le vecteur des interfaces de traitement de l'information de plus en plus conviviales. Les offres satellites évoluent également même si les coûts de ces vecteurs et les traitements d'image associés ne sont pas toujours à la portée de tous les opérateurs. Les satellites présentent aujourd'hui des résolutions spatiales et temporelles de plus en plus intéressantes pour la caractérisation des corridors fluviaux. Ikonos, actif entre 1999 et 2015, présentait déjà une résolution spatiale de 0,8 m en mode panchromatique. Le couple de satellites Pléiades mis en service en 2011-2012 possède une résolution spatiale de 0,7 m en mode panchromatique et de 2,8 m en multi-bande et couvre une surface de territoire tous les trois à quatre jours. Pléiades peut offrir également une acquisition stéréoscopique à partir de laquelle il est possible de restituer la topographie avec une résolution de l'ordre du mètre. Le satellite Sentinel-2 mis en service en 2015 propose des images avec treize bandes spectrales en lumière visible et proche infrarouge, une résolution spatiale comprise entre dix et soixante mètres et une fauchée de près de 290 km.

Des progrès ont également été observés au niveau des outils de traitement de l'information. L'orthorectification des images est une procédure de plus en plus facile à mettre en œuvre. La photogrammétrie, qui était il y a quelque temps encore réservée à des spécialistes, devient également accessible à un plus grand nombre d'opérateurs avec le développement de la nouvelle photogrammétrie SfM (*Structure from Motion*, Structure par le mouvement) qui s'appuie sur une série de photographies sub-verticales voire même obliques prises de différents points de vue et avec des recouvrements qui peuvent être très variables. Ces outils permettent de ré-explore par exemple des archives photographiques qui avaient été sous-exploitées pour réaliser notamment des modèles numériques de surface et analyser alors les changements morphologiques. Depuis peu, des capteurs miniaturisés apparaissent également sur le marché notamment des lidar à courte portée ou des imageurs hyperspectraux qui sont destinés à être embarqués sur des drones. Les changements environnementaux sur des pas de temps très courts ou s'exprimant

à des moments clés, comme par exemple lors d'une crue, font désormais l'objet de suivis à partir de capteurs installés directement en milieu naturel. Leur atout n'est pas forcément la fauchée ou la taille de la zone couverte, ou encore la résolution spectrale, mais bien la résolution temporelle, les acquisitions à la seconde ou à la dizaine de seconde étant alors possibles. On pense notamment à des appareils photo qui acquièrent par exemple des clichés tous les quarts d'heure, toutes les heures, voire tous les jours à heure fixe. On pense également au suivi vidéo qui permet aujourd'hui de mesurer les vitesses de surface et *in fine* le débit de l'eau ou encore le flux de flottants. La question est alors de savoir quand le phénomène se manifeste, au-delà de quel débit-seuil, sur quelle période et quel volume cela implique.

L'analyse de la littérature scientifique montre ainsi que c'est au cours des années 2000 que les travaux s'appuyant sur ces nouveaux capteurs pour caractériser l'hydromorphologie des cours d'eau se multiplient. C'est le cas du lidar, c'est également le cas du radar et de l'imagerie infrarouge thermique. Au sein du corridor fluvial, la télédétection permet de cartographier les différents compartiments ou les différentes unités physiologiques du corridor (les zones en eau, les bancs de galets, les différentes unités de végétation), de déterminer certains de leurs caractères et de calculer différents indicateurs d'état ou d'évolution. Au sein de la masse d'eau, il est possible aujourd'hui de déterminer les profondeurs, les séquences de faciès (les alternances radiers-mouilles par exemple), la température, la concentration en matières en suspension, les vitesses de surface et donc le débit, les flux de flottants... Il est possible également d'envisager une caractérisation topographique fine d'un compartiment fluvial, d'évaluer les changements verticaux et planimétriques du lit, voire d'estimer des budgets sédimentaires lorsque l'on dispose de plusieurs dates et des données altimétriques, dans certains cas la granulométrie des bancs, voire même du chenal en eau. Le couplage d'un MNT (modèle numérique de terrain) et d'un MNS (modèle numérique de surface) permet de déterminer la hauteur de la végétation riveraine. Ces couches d'information permettent par ailleurs d'obtenir également l'altitude relative des unités à la ligne d'eau et la densité du couvert végétal. D'autres couches d'information permettent encore de déterminer les principaux taxons ou encore la croissance végétale si l'opérateur dispose de plusieurs dates ou de mesures complémentaires *in situ*.

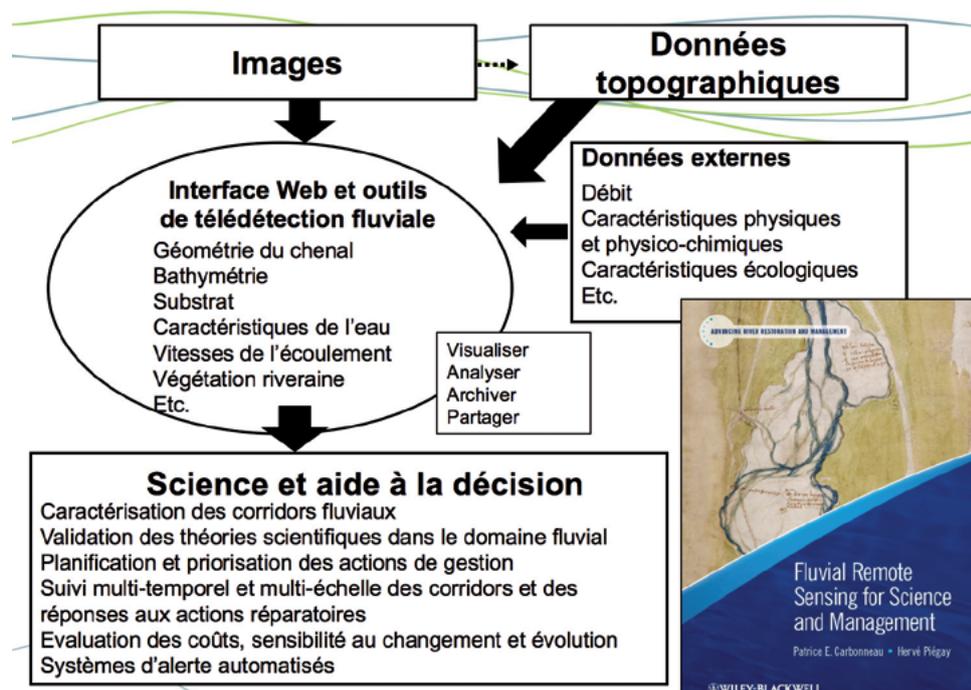


Figure 2 : La télédétection fluviale, un champ en voie de structuration pour répondre aux enjeux opérationnels et aux nouveaux défis scientifiques (traduit de l'ouvrage *Fluvial Remote sensing for Science and Management*, 2012, fig. 19.1 p. 433).

Les principales caractéristiques des peuplements forestiers et de leur environnement peuvent ainsi être identifiées par télédétection. La télédétection offre de nombreuses possibilités mais toujours dans des contextes géographiques et des fenêtres temporelles bien définis, ce qui fait que chaque approche n'est pas systématiquement applicable partout.

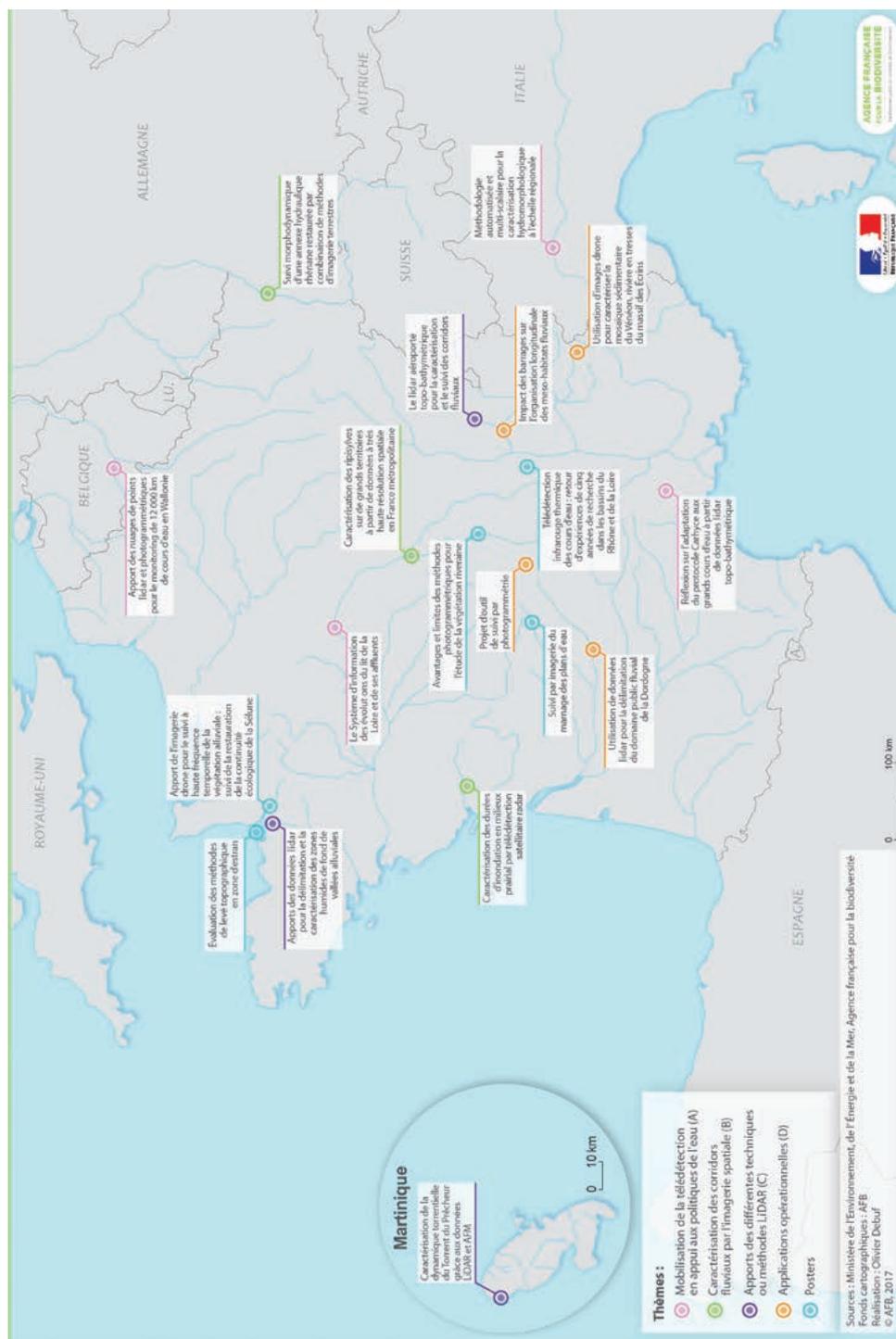
Ces technologies renouvellent le questionnement scientifique et permettent de caractériser des systèmes fluviaux de plus en plus petits et avec une résolution temporelle de plus en plus fine, permettant d'apprécier dans certains cas les phénomènes eux-mêmes à l'échelle de l'événement critique (l'érosion d'une berge ou un glissement de terrain). Ces technologies présentent maintenant un intérêt opérationnel tout à fait évident tant pour caractériser l'état des corridors fluviaux que leur évolution, venant en appui au diagnostic, à la définition et à la planification des actions dans le domaine de l'eau. Des capteurs équipant des drones ou installés *in situ* permettent aujourd'hui de réaliser des suivis locaux afin de déterminer la réponse d'un tronçon à une intervention. Il est également possible de les utiliser pour établir des diagnostics sur des tronçons de plusieurs dizaines de kilomètres. Ils sont alors embarqués sur des plateformes de type ULM, hélicoptère ou avion. C'est à cette échelle également que les archives et notamment les archives photographiques peuvent faire l'objet d'une utilisation pertinente pour établir un diagnostic diachronique de l'évolution du corridor fluvial ou de certains de ses compartiments. Ces outils peuvent aussi être utilisés à l'échelle régionale, cette fois-ci sur des réseaux hydrographiques de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres de long afin de produire des indicateurs d'état ou servant de support à différentes formes de modélisation permettant de planifier les interventions dans le domaine de l'eau.

D'ici cinq à dix ans, ces informations seront progressivement intégrées dans des plateformes cartographiques, de manière à ce que les opérateurs locaux puissent accéder directement depuis leur poste à ces informations en ligne. Il est également fort probable que les outils de géotraitement se multiplient de manière à ce que ces opérateurs puissent aussi réaliser en ligne différentes analyses alimentant leur diagnostic, des actions participatives ou des séances d'information et de communication avec les élus ou les acteurs locaux. Ces plateformes vont promouvoir également des démarches plus collaboratives, voire communautaires, où les informations remonteront et descendront entre les différents niveaux de la gestion territoriale, alimentant simultanément les questionnements nationaux, régionaux et locaux. Nous sommes fréquemment confrontés non plus à un manque de résolution (au moins spatiale) mais à des résolutions parfois trop élevées qu'il convient de dégrader pour réduire la taille des données à traiter et répondre à certaines problématiques. Si le terrain est encore une source d'information clé, certaines données n'étant pas accessibles ou visibles depuis le haut, l'extraction d'informations nécessitant des calibrations et une validation qui reposent sur des mesures *in situ*, la télédétection vient renforcer les capacités d'acquisition de l'opérateur dont le capteur visuel n'œuvre que dans le visible et avec une surface journalière couverte et une fauchée bien limitées, celui-ci étant immergé dans l'environnement qu'il doit comprendre. Prendre du recul, de la hauteur, permet ainsi à l'opérateur de « faire parler le terrain » selon d'autres perspectives et de renouveler la vision qu'il en a.



Carte de localisation

des projets présentés lors de la journée technique « Avancée, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux »





Programme

de la journée technique « Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux »

09:00 – 09:30	<i>Accueil des participants</i>	
09:30 – 10:00	Introduction de la journée technique	L. Breton, G. Melun, A. Vivier (AFB), S. Grivel (MTES), H. Piégay (ENS/CNRS)
10:00 – 11:30	THEME A MOBILISATION DE LA TÉLÉDETECTION EN APPUI AUX POLITIQUES DE L'EAU	Animateur : S. Grivel
10:00 – 10:15	Une méthodologie automatisée et multi-scalaire pour la caractérisation de l'hydromorphologie à l'échelle régionale	L. Demarchi (JRC)
10:15 – 10:30	Apport des nuages de points lidar et photogrammétriques pour le monitoring de 12 000 km de cours d'eau en Wallonie (Belgique)	A. Michez (Université de Liège)
10:30 – 10:45	Le Système d'information des évolutions du lit de la Loire et de ses affluents (SIEL)	A. Dionis du Séjour (DREAL Centre - Val-de-Loire)
10:45 – 11:00	Éléments de réflexion pour l'adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données lidar topo-bathymétriques	N. Thommeret (CNAM-ESGT)
11:00 – 11:30	<i>Discussions et questions sur le thème</i>	
11:30 – 11:45	<i>Pause</i>	
11:45 – 13:00	THEME B CARACTÉRISATION DES CORRIDORS FLUVIAUX PAR L'IMAGERIE SPATIALE	Animatrice : A. Vivier
11:45 – 12:00	Caractérisation des ripisylves sur les grands territoires à partir de données à très haute résolution spatiale en France métropolitaine	T. Tormos (AFB)
12:00 – 12:15	Caractérisation des durées d'inondation en milieux prairial par la télédétection satellitaire radar	C. Cazals (IGN/UPEM)
12:15 – 12:30	Suivi morphodynamique d'une annexe hydraulique rhénane restaurée par combinaison des méthodes d'imagerie terrestres	M. Koehl (Icub TRIO/INSA)
12:30 – 13:00	<i>Discussions et questions sur le thème</i>	
13:00 – 14:00	<i>Déjeuner</i>	
14:00 – 15:15	THEME C APPORTS DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES LIDAR	Animateur : L. Breton
14:00 – 14:15	Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux : premiers résultats et perspectives	D. Lague (CNRS - Géosciences)
14:15 – 14:30	Apports des données lidar pour la délimitation et la caractérisation des zones humides de fond de vallées alluviales	S. Rapinel (CNRS - Ecobio)
14:30 – 14:45	Caractérisation de la dynamique torrentielle du torrent du Prêcheur grâce aux données lidar et AFM	A. Ville (CNRS - LGP)
14:45 – 15:15	<i>Discussions et questions sur le thème</i>	
15:15 – 15:45	<i>Pause</i>	
15:45 – 17:15	THEME D APPLICATIONS OPÉRATIONNELLES DES TECHNIQUES D'IMAGERIE	Animateur : G. Melun
15:45 – 16:00	Projet d'outil de suivi hydromorphologique par la photogrammétrie	B. Le Chevillier, W. Sremski (AFB)
16:00 – 16:15	Impact des barrages sur l'organisation longitudinale des meso-habitats fluviaux	M. Spitoni (CNRS - EVS)
16:15 – 16:30	Utilisation d'images drone pour caractériser la mosaïque sédimentaire d'une rivière en tresses (Vénéon, massif des Écrins)	D. Vázquez-Tarrio (IRSTEA)
16:30 – 17:15	<i>Discussions et questions sur le thème</i>	
17:15 – 17:30	Conclusions et perspectives	
		G. Pustelnik (EPIDOR) P. Dupont (AFB)

Session A

Mobilisation de la télédétection en appui aux politiques de l'eau

- Une méthodologie automatisée et multi-scalaire pour la caractérisation de l'hydromorphologie à l'échelle régionale *[résumé]*
- La télédétection 3D pour le monitoring régional des cours d'eau et des bandes riveraines associées en Wallonie (Belgique)
- Le Système d'information des évolutions du lit de la Loire et de ses affluents (SIEL)
- Éléments de réflexion pour l'adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données lidar topo-bathymétriques





Une méthodologie automatisée et multiscalaire pour la caractérisation hydromorphologique à l'échelle régionale

Luca **Demarchi** et Simone **Bizzi**

European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Water Resources Unit

Hervé **Piégay**

UMR 5600 CNRS EVS, ISIG platform

Contact : demarchi.luca.ld@gmail.com

Résumé

Les données produites par la télédétection offrent des opportunités importantes pour avancer dans la compréhension des processus fluviaux et pour, ainsi, caractériser leurs conditions hydromorphologiques. La résolution spatiale commence tout juste aujourd'hui à être suffisante pour permettre une exploitation à grande échelle de ces données et répondre à ces enjeux. En 2009, la région du Piémont (Italie) a commissionné l'acquisition aéroportée d'images à très haute résolution (40 cm) et lidar (*light detection and ranging*) à basse résolution (0,4 points par m²). Dans cette étude, on présente un exemple concret d'utilisation de ces données, en montrant en particulier comment l'information 3D et 2D peut être intégrée pour identifier les unités fluviales à l'échelle régionale. Une approche orientée objets a été développée pour automatiser la procédure de classification, et construire une base de données hydromorphologiques des 1 700 km² que couvrent les principales unités caractérisant les corridors fluviaux de dix-huit rivières de la région du Piémont. Ce type d'information ouvre de nouvelles perspectives d'analyse des processus physiques, de caractérisation hydromorphologique et de suivi des changements fluviaux. À l'aide de méthodes statistiques, il est possible d'identifier des types de rivières similaires en termes de style fluvial, d'étudier leur caractéristique topographique et, éventuellement, lors de futures acquisitions, de suivre l'évolution de leurs caractères. La base de données permet aussi une analyse locale de ces caractéristiques en intégrant les informations que peuvent par exemple déjà détenir les gestionnaires locaux (tracés historiques du lit, évolutions altimétriques...). Ce nouveau type de caractérisation hydromorphologique permet de planifier des stratégies de gestion fluviale au niveau régional et en même temps, de formuler des diagnostics géomorphologiques au niveau local. C'est ainsi un outil très important pour la planification des travaux de restauration des cours d'eau. La méthode proposée a donc beaucoup de potentiel pour être appliquée dans un contexte opérationnel à grande échelle où des acquisitions aéroportées similaires sont disponibles.

Mots clés : Piémont, Italie, lidar, méthode orientée objets, statistiques, hydromorphologie, gestion

Abstract

Remote sensing offer important opportunities for advancing understanding of river processes and characterizing their hydromorphological conditions. In 2009, images with very-high resolution (40 cm) and low resolution lidar (0.4 points/mq) are acquired by the administration of Piedmont Region (Italy). In this study, 3D and 2D information is integrated to identify river units at a regional scale. An object-oriented approach has been developed to automate the classification procedure and build hydromorphological database with the main units characterizing the river corridors of 18 rivers in the Piedmont Region (1,700 km²). This type of information opens new perspectives for the analysis of physical processes, hydromorphological characterization and monitoring of river changes. Using statistical methods, it is possible to identify similar river types in terms of fluvial style, to study their topographical characteristics, and to follow the evolution of their characteristics. The database also allows a local analysis of these characteristics by integrating the information that can already be held by the local managers (historical riverbed, topographical changes, etc.). This new type of hydromorphological characterization makes it possible to plan river management strategies at the regional level and, at the same time, to formulate geomorphological diagnoses at the local level.

Keywords: Piedmont Region, Italy, lidar, objects-oriented method, statistics, hydromorphology, river management

Références bibliographiques

- Demarchi, L., Bizzi, S., Piégay, H., (submitted). « Regional hydromorphological characterization with continuous and automated remote sensing analysis based on VHR imagery and low-resolution lidar data », ESPL special issue.
- Demarchi, L., Bizzi, S., Piégay, H., 2016, « Hierarchical object-based mapping of riverscape units and instream mesohabitats using lidar and VHR imagery », Remote Sensing, 8, p. 97.



La télédétection 3D pour le monitoring régional des cours d'eau et des bandes riveraines associées en Wallonie (Belgique)

Adrien **Michez**, Philippe **Lejeune**, Hugues **Claessens**

Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech - *Biosystem Engineering department* - Gestion des ressources forestières, 2 passage des Déportés, 5030 Gembloux (Belgique)

Hervé **Piégay**

Université de Lyon, UMR 5600 CNRS EVS, Site ENS, 15 parvis R. Descartes, 69362 Lyon Cedex 07, BP 7000 (France)

Olivier **Desteucq**

Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle 3, Département de la ruralité et des cours d'eau, Direction des cours d'eau non navigables, avenue Prince de Liège, 7, 5100 Jambes (Belgique)

Résumé

Sous l'impulsion de son administration, la Wallonie a entamé un processus de révision des modalités de gestion de ses cours d'eau publics, notamment à travers le projet des Programmes d'actions sur les rivières par une approche intégrée et sectorisée (PARIS). Les PARIS ont pour but d'intégrer dans le temps et dans l'espace l'ensemble des mesures de gestion spécifiques au linéaire des cours d'eau en fonction d'enjeux prioritaires identifiés à l'échelle d'unités de gestion homogènes : les secteurs (6 185 secteurs de gestion de 2 km de long en moyenne). La mise en place et le suivi de ces plans de gestion impliquent de facto le développement d'outils de suivi efficaces, permettant d'établir les états des lieux pour la planification des actes de gestion et à terme, d'évaluer l'efficacité desdits plans de gestion. Ces opérations doivent se réaliser sur près de 12 000 km de cours d'eau et de bandes riveraines associées sur une base objective et commune à l'ensemble des gestionnaires des cours d'eau publics. Des données fines de télédétection sont disponibles et acquises de manière régulière par l'administration wallonne ; des solutions dérivées de ces sources de données permettront de répondre partiellement aux besoins réguliers en information des plans de gestion PARIS à un coût réduit.

Pour atteindre cet objectif, un protocole a été établi à partir de nuages de points lidar (*light detection and ranging* ; densité ≈ 1 point « sol » par m²) complétés par des nuages de points photogrammétriques. Ces données ont été utilisées afin de caractériser la structure spatiale des bandes riveraines du réseau hydrographique public wallon à partir de six paramètres. Ces paramètres peuvent être d'ordre hydromorphologique (hauteur des berges, largeur et sinuosité du lit mineur), ou décrire la structure des forêts riveraines (hauteur moyenne et continuité longitudinale des peuplements arborés et ombrage du lit mineur). Différentes formes de visualisations de l'information peuvent appuyer le processus décisionnel des gestionnaires, de l'échelle locale (secteurs d'une masse d'eau DCE (directive cadre sur l'eau) à l'échelle régionale (354 masses d'eau DCE). Les paramètres extraits dans le cadre de ce projet seront prochainement intégrés au sein d'une plateforme informatique permettant leur visualisation à différentes échelles ainsi que l'encodage des actions par les gestionnaires.

Mots clés : monitoring des cours d'eau, bandes riveraines, lidar, photogrammétrie, approche régionale

Abstract

The Walloon administration has initiated a process of reform of river management policies, notably through the project PARIS action programs. The PARIS programs aim the integration in time and space of all specific management measures regarding public waterways based on priority issues identified at the level of homogeneous management units (6185 units, with mean length of 2 km). The implementation and monitoring of these management plans involve the development of effective monitoring tools to establish the initial state, planning acts of management and evaluating the effectiveness of such management plans. These operations must be carried out on nearly 12,000 km of streams and associated riparian area. This task must be realized on an objective and common basis for all of public waterways managers. Fine remote sensing data's are available and regularly acquired by the Walloon administration. Derived solutions of these data sources will partially meet the information needs of PARIS management plans at reduced cost.

To achieve this goal, a protocol has been established based on lidar point clouds (density ≈ 1 point «soil»/m²) completed by photogrammetric points clouds. These data were used to characterize the spatial structure of riparian areas associated with all of the Walloon public water system (>12,000 km) through six parameters. These parameters can be hydromorphological (height of banks, width, and sinuosity of the riverbed), or describe the structure of riparian forests (average height, longitudinal continuity, and shading of the riverbed). Different types of visualizations can support management decision-making to the local level (single river management unit) to regional (354 waterbodies of the water framework directive). Through various visualizations at different scales, the extracted parameters by the project will be integrated into a webGIS platform used by the river managers to report and plan their management actions.

Keywords: monitoring of rivers, riparian area, lidar, photogrammetry, regional approach

Introduction

La Wallonie a entamé un processus de révision des modalités de gestion de ses cours d'eau et des milieux riverains associés, qui s'appuie notamment sur le projet des Programmes d'actions sur les rivières par une approche intégrée et sectorisée (PARIS), validé par le Gouvernement wallon en 2012. Les PARIS ont pour but l'intégration dans le temps et dans l'espace, de l'ensemble des mesures de gestion spécifiques du linéaire de cours d'eau en fonction d'enjeux prioritaires identifiés à l'échelle d'unités de gestion homogènes (« secteurs »). La bonne marche des programmes PARIS nécessite des outils de suivi multi-échelles, permettant de fournir une information objective et quantitative quant aux objectifs de gestion, voire de restauration des écosystèmes. Du fait de leur organisation linéaire en réseau, les suivis sur le terrain des cours d'eau et des bandes riveraines nécessitent de nombreux (et coûteux) déplacements qui, selon la configuration des berges, peuvent parfois représenter un danger non négligeable pour les opérateurs de terrain. La télédétection à très haute résolution (< 1 m) peut constituer une solution de qualité permettant de construire des approches « wall-to-wall », c'est-à-dire fournissant une caractérisation de l'ensemble d'un territoire donné (pays/région) et donc *a fortiori* de l'ensemble de ses bandes riveraines.

La télédétection s'est longtemps cantonnée à une caractérisation relativement grossière des ressources environnementales à l'échelle de pays entiers, voire de régions. En imagerie aérienne et satellite, les années 2000 ont vu l'émergence de données de résolution métrique, voire submétrique, permettant de décrire plus finement la ressource environnementale. Leur

accessibilité croissante facilite le développement d'outils d'acquisition toujours plus précis et dont les coûts se réduisent de manière constante. Dans le cadre des suivis des aides liées à la politique agricole commune (PAC), la plupart des pays européens mènent des campagnes régulières d'acquisition aérienne d'imagerie optique de résolution toujours plus fine (≤ 50 cm). De manière concomitante à cette plus grande accessibilité de données optiques à très haute résolution, l'avènement des données de type lidar permet de combiner à cette information optique une vue en trois dimensions des surfaces analysées. En plus d'apporter une information très fine sur la topographie (modèle numérique de terrain, MNT) et ce, même sous couvert forestier, les nuages de points lidar permettent également de reconstruire la canopée forestière sous forme de modèles numériques de canopée/hauteur (MNH). L'émergence récente des technologies de la photogrammétrie dite « légère », à opposer à la photogrammétrie traditionnelle, a permis la création de chaînes de traitements facilitant grandement la génération de données 3D à partir d'images acquises avec recouvrement. Lorsqu'une couverture lidar est disponible, l'utilisation de ces données permet de générer et d'actualiser à frais réduits les MNH générés à partir de la donnée lidar seule, en réalisant le postulat que la surface du sol (MNT) est restée la même.

1. Enjeux et objectifs

La mise en place et le suivi de ces nouvelles modalités de gestion des cours d'eau et des bandes riveraines à l'aide de la télédétection impliquent *de facto* le développement d'outils de suivi efficaces, permettant d'établir et d'actualiser les états des lieux nécessaires à la planification des actes de gestion et, à terme, d'évaluer l'efficacité desdites politiques. À l'échelle de la Wallonie, la mise en place des plans PARIS se traduit par le besoin d'une caractérisation fine sur plus de 12 000 km de cours d'eau et de bandes riveraines associées, sur une base objective, reproductible et commune à l'ensemble des gestionnaires publics. Des données fines de télédétection étant disponibles et acquises de manière régulière par l'administration, le principal objectif de cette recherche est l'évaluation du potentiel des solutions dérivées de ces sources de données quant aux besoins en information des programmes PARIS.

De manière plus spécifique, ce potentiel est évalué à partir de six paramètres [cf. tableau 1]. Les patrons spatiaux sont décrits en lien avec les caractéristiques des territoires (occupation du sol, régions naturelles). Cette recherche ouvre également une réflexion quant aux différentes formes de visualisation de l'information pouvant servir à appuyer le processus décisionnel des gestionnaires à des échelles variées.

2. Matériels et méthodes

2.1 Zone d'étude

La Wallonie représente une superficie de 16 902 km² (≈ 55 % du territoire belge), pour un réseau hydrographique géré publiquement de 12 581 km (rivières avec un bassin versant > 1 km²) situé au sein de contextes environnementaux variés. Les bassins hydrographiques de l'Escaut et de la Meuse occupent la majorité du territoire. Ce dernier peut être divisé en cinq régions naturelles qui reflètent bien la diversité des configurations des paysages [figure 1, page suivante]. Du nord au sud, on distingue :

- **la région limoneuse** qui est un bas plateau essentiellement agricole recouvert d'une épaisse couche de limon présentant le climat le plus doux de Wallonie ;
- **le Condroz** est un plateau au relief plus marqué où alternent cultures et forêts. Il est fortement incisé par de grandes rivières (Meuse, Sambre, basses vallées de leurs affluents) autour desquelles sont installées les trois villes les plus peuplées du territoire (Charleroi, Liège et Namur) ;
- **la Famenne** (dénommée **Fagne** à l'ouest de la botte de Givet) est une large dépression fortement boisée (38 %) au sol argilo-schisteux, imperméable et peu profond ;
- **l'Ardenne** est la région qui présente à la fois la plus faible densité de population (44 hab/km²) et les plus forts taux de boisement (57 %), en raison de sols pauvres et d'un climat à tendance submontagnard très arrosé (> 1 000 mm) ;
- **la Lorraine belge**, prolongement de la Lorraine française, possède un taux de boisement de 38 % sur substrat majoritairement calcaire ou marneux pour une faible densité de population (107 hab/km²).

2.2 Données et capteurs

La principale source de données utilisée dans le cadre de cette étude régionale correspond à une couverture lidar du territoire. L'acquisition a été réalisée durant les hivers 2012-2013 et 2013-2014, avec une densité moyenne d'un point « sol »/m². La donnée lidar est principalement valorisée à travers un MNT, un MNH ainsi que différentes variables dérivées de la structure du nuage de points, telles que la densité de points classés « sol ». Lorsque la densité du nuage de points lidar est trop faible, celui-ci est localement complété par un nuage de points photogrammétrique.

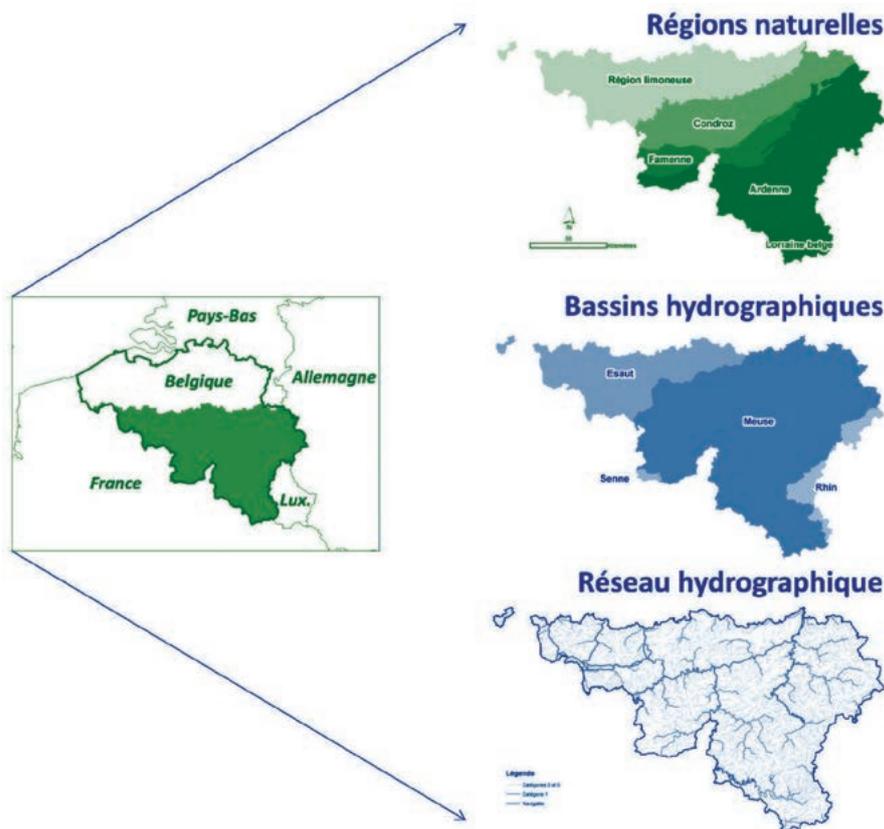


Figure 1. Régions naturelles, bassins hydrographiques et réseau hydrographique de la Wallonie. Le réseau hydrographique wallon représente près de 12 581 km de cours d'eau gérés par le pouvoir public. 6 185 secteurs homogènes de gestion (longueur moyenne de 2 km) ont été identifiés.

Le MNT est majoritairement utilisé pour l'extraction de paramètres strictement physiques des cours d'eau et des bandes riveraines, tandis que le MNH est, quant à lui, utilisé pour une description de la forêt riveraine.

2.3 Extraction des paramètres descripteurs

2.3.1 Échelle d'analyse

L'extraction des paramètres descripteurs [tableau 1] est basée sur un processus de désagrégation/agrégation [Alber et Piégay, 2011]. Les paramètres sont initialement calculés à l'échelle de linéaires élémentaires de 50 m le long des plaines alluviales considérées, avant d'être ré-agrégés à différentes échelles, allant du secteur de gestion à la région entière, en passant par les masses d'eau DCE et les régions naturelles.

Les secteurs de gestion correspondent à des tronçons considérés comme homogènes sur la base de différentes informations (hydromorphologie, occupation des sols, régions naturelles...). L'ensemble du réseau a été divisé en près de 6 185 secteurs de gestion, d'une longueur moyenne de $2 \pm 2,6$ km et ce pour l'ensemble du linéaire de cours d'eau géré par les institutions publiques ($> 12\ 000$ km). Lorsque leur structure spatiale le permet, les paramètres sont calculés à différentes distances du lit mineur (enveloppes + 6 m et + 12 m). Les paramètres sont évalués sur deux réseaux hydrographiques se superposant. Ceux-ci correspondent d'une part à l'ensemble du réseau hydrographique de gestion publique (bassin versant, BV > 1 km²) et d'autre part, au réseau hydrographique associé aux principales rivières de la région (BV > 50 km²).

Tableau 1 : Paramètres évalués à l'échelle régionale sur base d'un réseau hydrographique reprenant les cours d'eau de plus de 50 km² (2 307 km) et sur l'ensemble du réseau hydrographique classé (12 054 km).

Paramètres	Superficie du bassin versant		Potentiel indicatif	Intérêt pour la gestion opérationnelle
	< 50 km ²	≥ 50 km ²		
Hauteur émergée des berges	✓	✓	Altération morphologique, fréquence d'inondation, indicateur du caractère ripicole	Appui à la localisation de forêt riveraine fonctionnelle
Largeur du cours d'eau		✓	Altération morphologique, qualité de l'habitat riverain	Mise en évidence de tronçons à restaurer / à préserver Localisation de section potentiellement altérée par l'action humaine
Sinuosité	✓	✓	Altération morphologique, diversité des écoulements et des habitats aquatiques	
Continuité longitudinale de la forêt riveraine	✓	✓	Qualité des corridors écologiques pour les migrations	
Hauteur moyenne de la forêt riveraine	✓	✓	Localisation des individus matures, niveau de développement de la forêt riveraine (intérêt pour le gestionnaire)	Objectivation / planification / priorisation de la gestion des forêts riveraines
Caractère surplombant de la forêt riveraine		✓	Indicateur de la fonction d'ombrage, présence d'habitats aquatiques liés à la proximité de la forêt riveraine (sous berge, branchages, chevelus racinaires...)	

En vert, des indicateurs physiques de qualité de l'habitat ; en bleu, des indicateurs biologiques de qualité des écosystèmes aquatiques et riverains. Plus d'informations sur la construction de ces indicateurs sont disponibles au sein de Michez et al. (2017).

3. Résultats et perspectives

3.1 Validation

La validation des paramètres et des données nécessaires à leur évaluation est décrite plus en détails par Michez *et al.* (2017).

3.2 Visualisation multi-échelle des paramètres descripteurs

L'évaluation des paramètres pour les deux réseaux hydrographiques tests (2 307 et 12 054 km) peut être visualisée selon différentes modalités. La figure 2 propose une représentation des paramètres physiques sur le linéaire hydrographique mettant en évidence de manière opposée les principaux cours d'eau de la région (largeur importante, sinuosité faible) ainsi que les sections situées en amont (largeur faible, sinuosité forte).

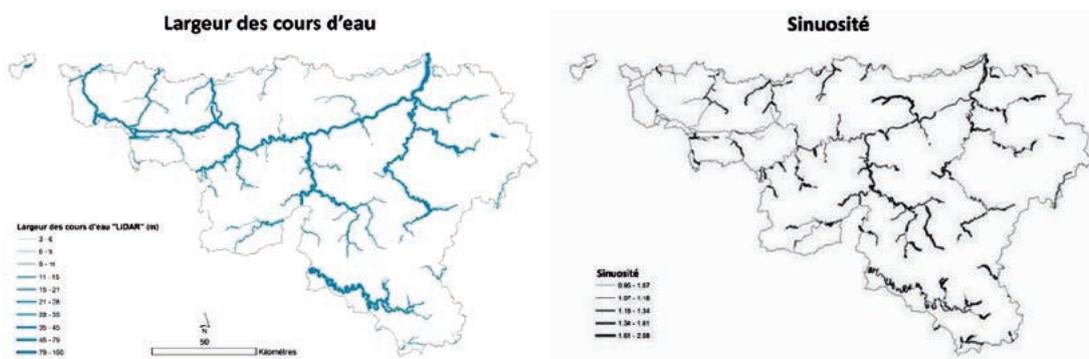


Figure 2. Cartographie de paramètres physiques à l'échelle régionale (2 307 km de cours d'eau) : cas de la largeur et de la sinuosité du lit mouillé.

À l'échelle régionale, la visualisation de paramètres issus de la télédétection peut mettre en évidence des différences pouvant être liées notamment aux activités humaines ou au contexte physiographique. La figure 3 met en évidence une autre forme de visualisation des paramètres physiques. Les boîtes à moustaches permettent ainsi d'observer la distribution des valeurs des paramètres étudiés à l'échelle des secteurs des cinq régions naturelles. Cette analyse montre que la région limonaise se distingue significativement des autres régions pour deux de ses trois paramètres physiques (largeur et hauteur émergée). Elle présente des sections fluviales plutôt

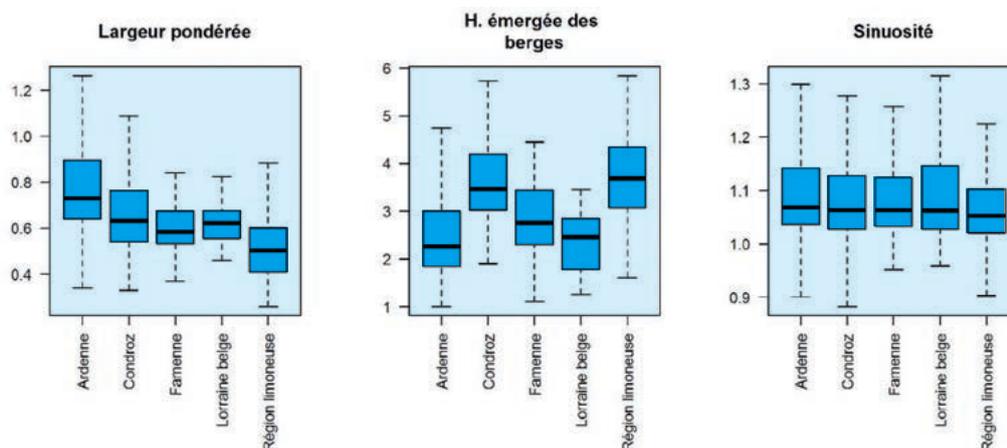


Figure 3. Distribution statistique des paramètres physiques des bandes riveraines de Wallonie agrégés par région naturelle. La pondération de la largeur et de la hauteur émergée des berges par la superficie du bassin versant limite l'impact de la taille des cours d'eau dans les comparaisons (cf. Michez *et al.*, 2017).

plus étroites et plus profondes que celles des autres régions qui peuvent résulter de berges plus cohésives. Ces différences physiographiques inter-régionales permettent de comprendre que les écarts à ces valeurs qui sont potentiellement des indicateurs d'altération doivent toujours être calculés par ensemble physiographiquement homogène.

La visualisation sous forme cartographique [figure 4] peut également être réalisée sur une base non pas linéaire, mais cette fois surfacique ; chaque polygone représentant les aires contributives spécifiques des masses d'eau identifiées par l'administration dans le cadre de la DCE. On voit alors que la continuité longitudinale des forêts riveraines présente une organisation régionale similaire à celle de la hauteur moyenne. Les masses d'eau situées dans les zones agricoles intensives (plateau herbager ardennais et région limoneuse) se démarquent par de faibles valeurs de continuité et de hauteur des boisements, à l'inverse des zones plus bocagères ou forestières des bas-plateaux mosans et des piémonts de l'Ardenne. À l'instar des paramètres physiques, une synthèse à l'échelle des régions naturelles peut être réalisée pour les paramètres forestiers [figure 5]. Cette figure confirme le constat selon lequel le développement des forêts riveraines est le plus faible dans l'ouest de la région limoneuse (Escaut-Lys et Dendre).

Outre l'identification des portions du territoire régional présentant des forêts riveraines particulièrement réduites, la base de données permet d'évaluer leur connexion potentielle à la nappe phréatique et donc indirectement le caractère ripicole de ces boisements à partir de l'étude de la hauteur émergée des berges calculée au sein de l'enveloppe des forêts riveraines [figure 6]. Le caractère perché des forêts riveraines de la région limoneuse y est mis en évidence. Ce dernier résultat pourrait en partie expliquer la très faible présence de l'aune glutineux (favorisé par une nappe phréatique proche de la surface du sol) sur les stations riveraines de cette région qui avait été mise en évidence par le suivi des bandes riveraines mené au cours des années 2000 sur le terrain [Claessens, et al., 2009 ; Debruxelles, et al., 2009].

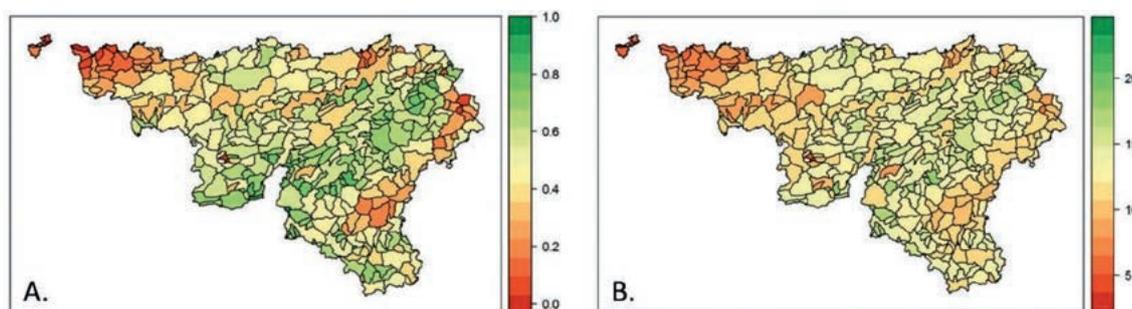


Figure 4. Continuité longitudinale (A) et hauteur moyenne (B) des forêts riveraines (lit mineur + 12 m). Information agrégée à l'échelle des masses d'eau (moyenne pondérée par la longueur des secteurs).

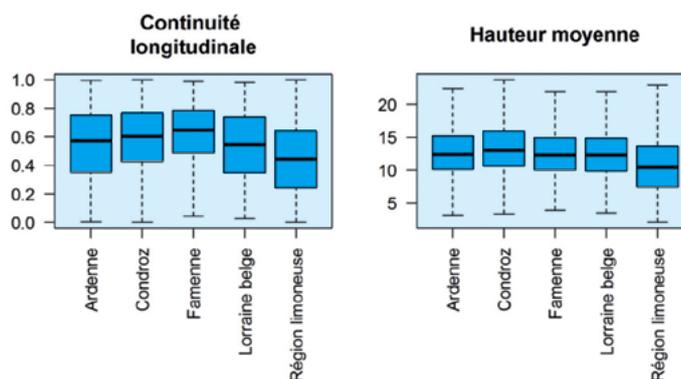


Figure 5. Continuité longitudinale et hauteur moyenne des forêts riveraines (lit mineur + 12 m) à l'échelle des régions naturelles de Wallonie.

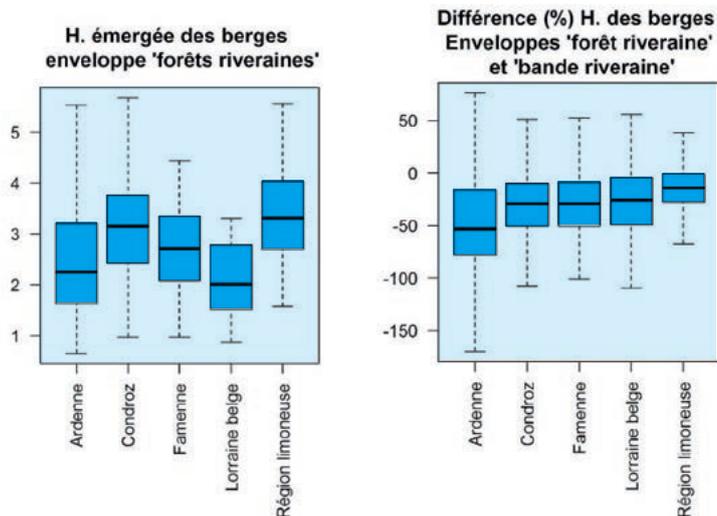


Figure 6. Hauteur émergée moyenne des berges pondérée par la sup. du bassin versant calculée pour la sous-enveloppe « forêt riveraine » et différence entre la hauteur émergée moyenne des berges calculée pour l'ensemble de l'enveloppe lit mineur +06 m et pour la sous-enveloppe « forêt riveraine ». Les observations sont relatives aux cours d'eau les plus importants du territoire (2 307 km, BV > 50 km²).

L'étude de la différence entre les valeurs de hauteur émergée moyenne des berges obtenues à l'échelle des bandes riveraines dans leur ensemble et celles obtenues pour le territoire associé aux seules forêts riveraines [figure 6] met en évidence la position plus basse des forêts riveraines dans la majorité des situations. Cette information souligne ainsi l'intérêt de mener une politique conservatoire et de restauration des bandes riveraines et des éléments relictuels de forêt riveraine associés. En effet, au-delà des bénéfices potentiels directement liés à la présence d'éléments arborés en bordure de cours d'eau (fourniture et amélioration des habitats terrestres et aquatiques, bio-filtre...), ces résultats mettent en évidence qu'à l'échelle régionale, la présence d'une forêt riveraine est associée à des portions relativement plus basses et donc potentiellement plus fonctionnelles de l'écosystème rivulaire.

3.3 De la télédétection à l'indication pour la gestion opérationnelle ?

Les paramètres descripteurs des bandes riveraines des cours d'eau à l'échelle régionale ont été choisis en raison de leur potentiel en tant qu'indicateur de l'état des bandes riveraines et des cours d'eau, tant en termes de niveau de fonctionnalité de l'écosystème qu'en termes de gestion opérationnelle. Toutefois, un travail de contextualisation et de calibration est nécessaire. La valeur absolue d'un paramètre n'a d'intérêt que lorsqu'un seuil est défini en relation avec le fonctionnement de l'écosystème et la gestion de celui-ci. À titre d'exemple, l'objectif ne peut être de maximiser la continuité de la forêt riveraine en tout point du territoire car celle-ci n'a pas le même intérêt selon le contexte socio-environnemental, ni selon certains enjeux locaux en matière de gestion (par exemple, en présence d'espèces typiques de milieux rivulaires ouverts, telles que l'hirondelle de rivage, *Riparia riparia*).

Pour la gestion des forêts riveraines, les paramètres extraits peuvent constituer un support précieux en matière de planification et de priorisation des interventions. À titre d'exemple, la figure 7 présente une visualisation sous forme de cartes de différents paramètres liés à l'importance de la présence des forêts riveraines. Cette visualisation met l'accent sur les secteurs de gestion présentant une forte densité urbaine sur les rives des cours d'eau. La gestion des forêts riveraines y est généralement plus active en raison d'un enjeu de sécurisation plus important et une volonté de limiter les hauteurs d'eau en période de crue au sein de ces zones.

Importance de la forêt riveraine en zone bâtie (+12m)

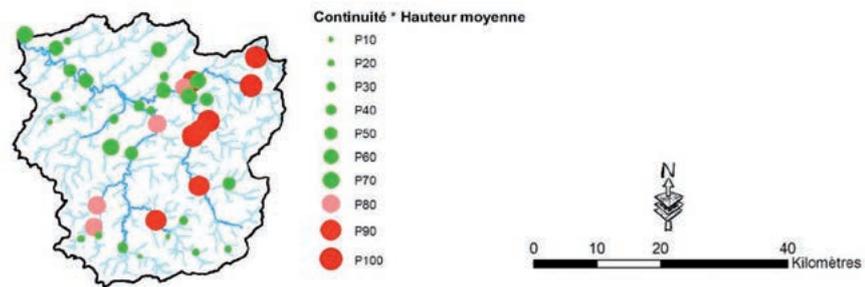


Figure 7. Exemple de spatialisation de paramètres issus de la télédétection en tant que support à la planification de la gestion : niveau de développement de la forêt riveraine (longitudinal et vertical, enveloppe lit mineur + 12 m) au sein des secteurs situés majoritairement à proximité directe d'habitations, cas de la vallée de la Lesse (366 secteurs de gestion, $\approx 1\,030$ km).

Le classement sous forme de percentile des valeurs associées à un paramètre composite (continuité longitudinale * hauteur moyenne de la forêt riveraine) permet de visualiser les secteurs où une intervention doit être planifiée en priorité parmi les 366 secteurs publics de gestion ($\approx 1\,030$ km). Les points de taille importante et de couleur rouge représentent les secteurs associés aux valeurs les plus élevées ($> 70\%$ des secteurs) des variables liées à l'importance de la présence des forêts riveraines.

Conclusion

Les outils développés à une échelle régionale ($> 12\,000$ km) présentent un niveau d'application qui permet d'envisager leur utilisation en routine pour définir des stratégies d'évaluation des plans de gestion des cours d'eau et prioriser les interventions. Pour assurer une plus grande transférabilité, les paramètres descripteurs développés sont exclusivement basés sur des données d'ores et déjà récoltées (cas des indicateurs dérivés de nuages de points photogrammétriques), ou sur le point d'être récoltées (cas des données lidar) de manière régulière par l'administration. Une première exploration de ces indicateurs à l'échelle régionale a été réalisée et a permis d'obtenir une caractérisation fine des bandes riveraines ainsi que des espaces forestiers associés. Cette caractérisation est centrée sur la description de la structure tridimensionnelle obtenue à partir des nuages de points lidar et photogrammétriques. Lors d'agrégations permettant des visualisations à l'échelle régionale, les résultats obtenus reflètent la connaissance a priori des cordons rivulaires et sont conformes aux descriptions réalisées dans le cadre des différents suivis des bandes riveraines [Claessens et al., 2009]. À l'échelle locale, les indicateurs peuvent permettre de détecter l'effet de certaines pressions anthropiques tant au niveau des caractères des forêts riveraines qu'au niveau de la morphologie du cours d'eau et des milieux riverains.

L'intégration de ces données et de ces procédures de calcul d'indicateurs dans le suivi régional des bandes riveraines nécessitera des mises à jour répétées en phase avec les cycles des programmes PARIS. Si la mise à jour régulière des indicateurs relatifs aux forêts riveraines est garantie par l'acquisition annuelle des couvertures ortho du territoire, la mise à jour de la couverture lidar n'est actuellement pas planifiée et sa fréquence de renouvellement n'est pas définie. Une fréquence de mise à jour de la couverture régionale lidar devrait donc idéalement être calquée sur la périodicité des PARIS (six années). L'acquisition d'une couverture lidar selon ces modalités permettrait une mise à jour des paramètres physiques liés à l'hydromorphologie des cours d'eau tous les six ans tandis que les paramètres liés aux forêts riveraines pourraient être mis à jour à mi-parcours selon une périodicité inférieure en utilisant des modèles numériques de hauteurs mixtes (lidar / photogrammétrie) construits à partir des campagnes ortho annuelles.

Références bibliographiques

- **Alber, A., Piégay, H.**, 2011. « *Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France)* », *Geomorphology*, 125, pp. 343-360. doi:10.1016/j.geomorph.2010.09.009.
- **Claessens, H., Rondeux, J., Debruxelles, N., Burton, C., Lejeune, P.**, 2009, « *Le suivi des bandes riveraines des cours d'eau de Wallonie* », *Revue Forestière Française*, 61(6), pp. 595-610.
- **Décamps, H., Fortuné, M., Gazelle, F., Pautou, G.**, 1988, « *Historical influence of man on the riparian dynamics of a fluvial landscape* », *Landscape Ecol* 1, pp. 163-173. doi:10.1007/BF00162742.
- **Michez, A., Piégay, H., Lejeune, P., Claessens, H.**, 2017, « *Multi-temporal monitoring of a regional riparian buffer network (>12,000 km) with lidar and photogrammetric point clouds* ». *Journal of Environmental Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.034>.
- **Naiman, R., Décamps, H., McClain, M.E.**, 2005, *Riparia: Ecology, Conservation, And Management Of Streamside Communities*. Academic Press.
- **Naiman, R., Decamps, H., Pollock, M.**, 1993, « *The Role of Riparian Corridors in Maintaining Regional Biodiversity* », *Ecological Applications*, 3, pp. 209-212. doi:10.2307/1941822.
- **Tockner, K., Stanford, J.A.**, 2002, « *Riverine flood plains: Present state and future trends* », *Environmental Conservation*, 29, pp. 308-330. doi:10.1017/S037689290200022X.



Le Système d'information des évolutions du lit de la Loire et de ses affluents (SIEL)

Antoine **Dionis du Séjour**

DREAL, Centre - Val-de-Loire de bassin Loire-Bretagne

Résumé

Face aux altérations du lit de la Loire (incision, déficit sédimentaire, végétalisation active causée par la chenalisation et extractions massives du granulat), le Plan Loire grandeur nature définit en 1994 plusieurs objectifs prioritaires : restauration et entretien régulier du fleuve, réhabilitation des annexes hydrauliques, contrôle de la végétation alluviale. Ces objectifs nécessitent la mise en place d'outils d'analyse et de suivi : c'est la naissance du SIEL. Initié sur la Loire moyenne, il s'étend aujourd'hui à l'Allier, au Cher, à la Vienne et à la Creuse. Le SIEL a pour objectif la capitalisation d'informations en s'inscrivant dans la durée pour permettre l'observation des évolutions de la morphologie des cours d'eau. Plusieurs informations sont ainsi collectées chaque année : lignes d'eau, à l'étiage ou en crue ; mosaïques aériennes à partir de marchés dédiés de prises de vues régulières à l'étiage ; cartes de végétation et de morphologie produites à partir des mosaïques aériennes et de relevés terrain. D'autres types d'information sont aussi capitalisés de manière plus ponctuelle comme, par exemple, des données topographiques (profils bathymétriques) ou des modèles numériques de terrain (MNT). Enfin, des données historiques (photographies aériennes ou cartes anciennes) sont également implémentées au sein du SIEL. L'ensemble de ces données sont disponibles via une plateforme web (<http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/systeme-d-information-des-evolutions-du-lit-de-la-r104.html>).

Mots clés : Loire, orthophotographies, MNT, hydromorphologie, évolutions

Abstract

With the alteration of the Loire River (incision, sedimentary deficit, active vegetalization) caused by channelization and massive gravel extraction, the "Plan Loire Grandeur Nature" sets several objectives since 1994: restoration of the riverbed, rehabilitation of ancient channels, control of the alluvial vegetation. These objectives require the establishment of analytical and monitoring tools: Information System for the Evolutions of Loire River and its tributaries (SIEL) has been created. Initiated on the middle Loire River, it extends to the Allier River, the Cher River, the Vienne River and the Creuse River. SIEL aims to analyse the evolutions of riverbed. Several data are collected each year: water level (low discharge, flood); aerial mosaics; vegetation and morphology maps produced from aerial mosaics and field surveys. Other types of data are also used such as topographic data (bathymetry), digital elevation models (DEM) or historical data (aerial photographs and old maps). All these data are available in a web platform (<http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/systeme-d-information-des-evolutions-du-lit-de-la-r104.html>).

Keywords: Loire River, aerial photographs, DEM, hydromorphology, evolutions

Introduction

Depuis le XIX^e siècle, la Loire connaît une dégradation progressive. L'extraction massive de granulats entre 1950 et 1994 (jusqu'à douze millions de tonnes extraites chaque année) ainsi que la chenalisation du lit pour la navigation provoquent l'enfoncement de son lit mineur. Ce dernier entraîne de nombreux effets néfastes : déstabilisation des fondations d'ouvrages, diminution de la ressource en eau par l'enfoncement de la nappe alluviale, érosion de la biodiversité par la disparition de frayères situées dans les boires et les bras secondaires ou encore développement excessif d'une végétation banale ne correspondant pas aux particularités du milieu alluvial. De plus, cette végétation qui se développe dans le lit mineur agit comme obstacle aux écoulements en crue, aggravant les niveaux d'eau maximum.

Face à ce constat, le Plan *Loire grandeur nature* inscrit en 1994 parmi les priorités : la restauration et l'entretien régulier du fleuve, la réhabilitation des annexes hydrauliques et le contrôle du développement de la végétation alluviale. Compte tenu de la complexité de la dynamique fluviale, ces priorités nécessitent la mise en place d'outils d'analyse et de suivi à court et à long termes : c'est la naissance du SIEL. Initié sur la Loire moyenne, il s'étend aujourd'hui à l'Allier, au Cher, à la Vienne et à la Creuse. Ce système permet de capitaliser l'information et d'inscrire l'observation de l'évolution du fleuve dans la durée, les phénomènes en jeu relevant d'une dynamique mesurable à l'échelle de plusieurs années ou décennies. Plusieurs informations sont ainsi collectées chaque année pour alimenter le SIEL. Le SIEL est ainsi une des missions de l'Unité information Loire (UTIL) du service de bassin Loire-Bretagne à la DREAL Centre - Val-de-Loire.

1. Les produits du SIEL

Le SIEL propose en téléchargement libre un certain nombre de données [figure 1] :

- données antérieures au SIEL (des cartes anciennes comme celles de 1850 dites de Coumes, ou des images aériennes) ;
- données topographiques ponctuelles en lits mineur et majeur : profils bathymétriques, profils en travers, profils en long et semis de points ;
- données sur l'hydrologie des cours d'eau : lignes d'eau (mesures régulières à l'étiage ou selon les besoins du service de prévision des crues) ;
- modèles numériques de terrain ;
- mosaïques aériennes ;
- cartes de végétation : elles sont élaborées à partir de l'interprétation de photographies aériennes récentes validée par une visite de terrain. Elles représentent la végétation dominante du lit mineur. Les surfaces sont déterminées en fonction de groupements-types définis dans la typologie simplifiée des communautés végétales du lit endigué de la Loire [Cornier, 1998] ;
- cartes de morphologie : elles représentent la morphologie du lit mineur et en définissent les grandes unités fonctionnelles (chenal principal, bras secondaires en eau et hors d'eau, îles, francs bords, bancs, etc.). Des cartes d'évolution de la végétation et de la morphologie sont en phase de réflexion après qu'un premier essai a été conduit sur l'Allier en 2013 [figure 2].

Ces données sont téléchargeables sous différents formats (.pdf, .shp, Grid ASCII, .XYZ, etc.) à l'adresse suivante : <http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/systeme-d-information-des-evolutions-du-lit-de-la-r104.html>



Figure 1. Les différents types de données du SIEL sous l'interface WebSIG.

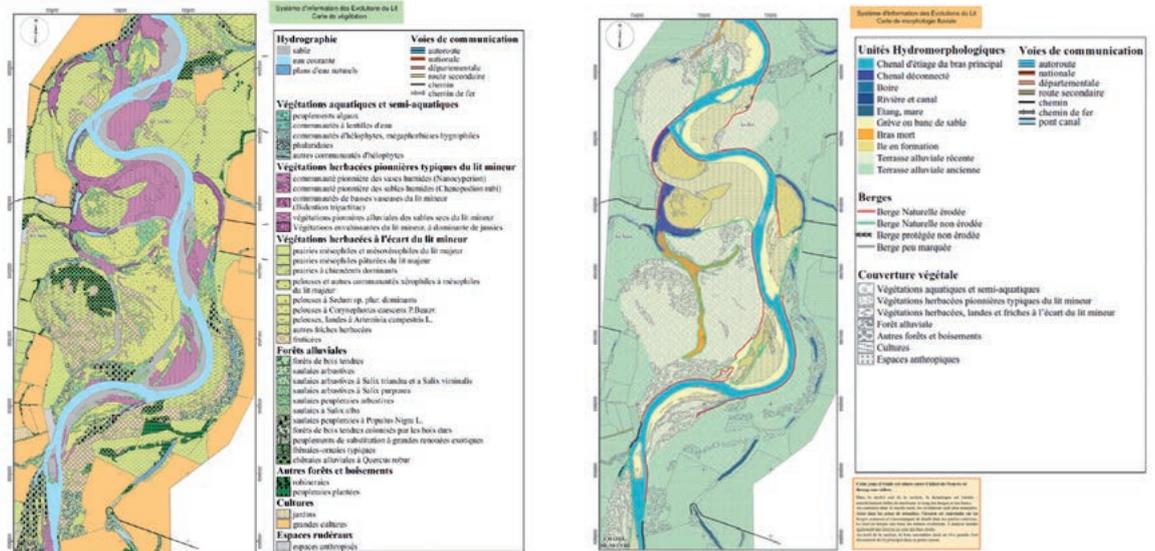


Figure 2. Cartes thématiques sur le lit fluvial (disponibles en couche SIG).

2. Focus techniques

2.1 Les photographies aériennes

Les mosaïques aériennes constituent un pilier du SIEL et reposent sur :

- un protocole de prise de vues adapté à l'analyse de l'évolution du lit, de sa morphologie et de sa végétation : prises de vues à l'étiage (débit déclenchant fixé) afin de pouvoir caractériser et comparer au mieux la morphologie des bancs de sable, des îles et des berges, couverture nuageuse nulle et vol proche du midi solaire pour réduire les ombres portées ;
- des prises de vues régulières : tous les cinq ans pour les secteurs jugés très dynamiques (Loire et Allier du Bourbonnais), tous les sept ou huit ans pour les secteurs intermédiaires (Loire moyenne), tous les dix ans pour les secteurs moins mobiles (Vienne, Cher, Loire aval) ;
- des caractéristiques techniques évolutives : la précision augmente (résolution de 25 cm sur les derniers marchés) et de nouveaux produits apparaissent (prises de vues infra-rouges sur les derniers marchés) ;

- des coûts qui ont tendance à diminuer. À titre d'exemple le marché Cher 2014 se montait à 18 657 € pour 250 km de cours d'eau, soit 75 €/km ; le marché Loire moyenne 2015 représentait 18 674 € pour 350 km de cours d'eau, soit 53 €/km.

La régularité des campagnes de prises de vues et le protocole d'acquisition sont très utiles aux gestionnaires pour établir des diagnostics hydromorphologiques et prioriser des interventions dans le lit fluvial. Les utilisations sont ainsi très diverses : entretien des cours d'eau, suivi des biotopes (disparition des zones sableuses par exemple), réduction importante de la bande active due au développement des boisements pouvant entraîner une rehausse de la ligne d'eau en crue (à croiser avec les enjeux inondation) [figure 3]. Sur la Loire et ses affluents, les préconisations d'entretien prennent systématiquement en compte les enjeux liés au risque d'inondation, les enjeux écologiques et les enjeux paysagers.

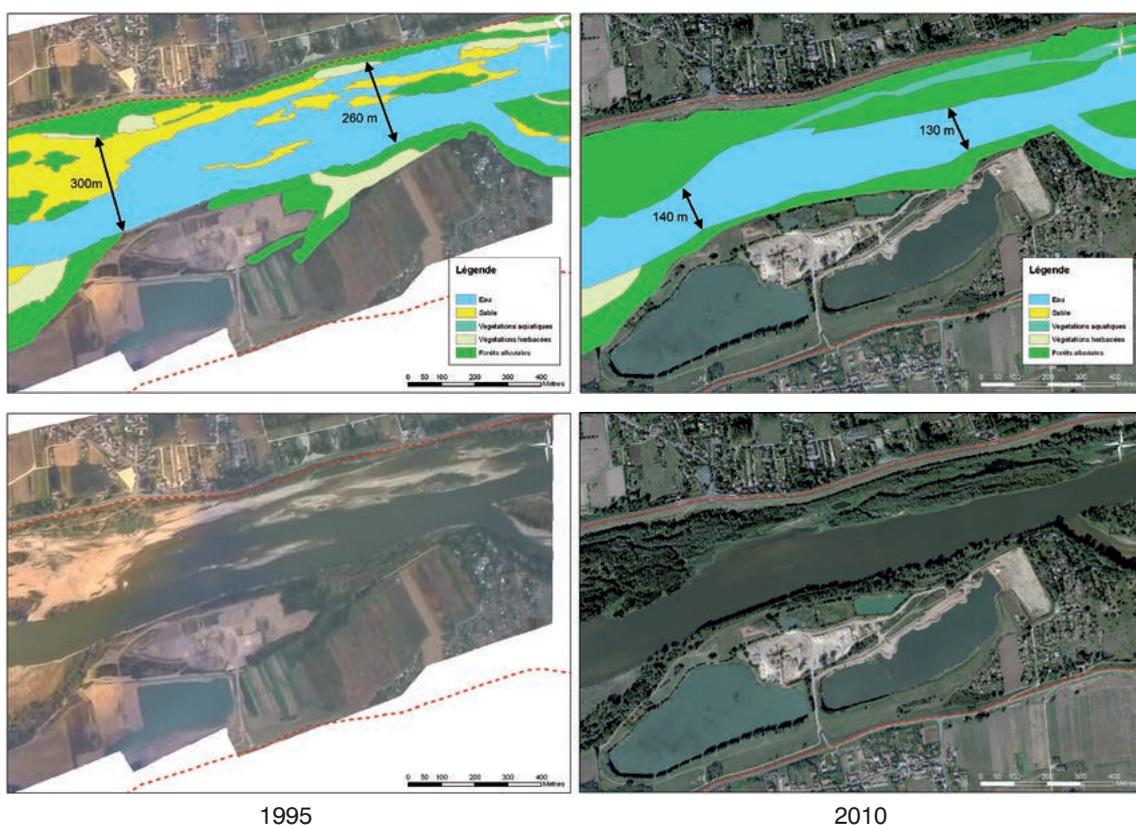


Figure 3. Évolution de la bande active en aval de Tours.

L'exploitation des photographies aériennes permet aujourd'hui de fournir des cartes thématiques directement interprétables par les gestionnaires des cours d'eau : cartes de végétation du lit, cartes de morphologie. La réalisation de ces cartes est confiée à des bureaux d'études par appel d'offres.

2.2 Les levés laser aéroportés

Nous présentons ici les caractéristiques techniques des campagnes aéroportées délivrant des données lidar et leurs utilisations opérationnelles. L'objectif de ces levés est d'obtenir un modèle altimétrique de haute résolution de la zone inondable de la Loire sur sa partie comprise entre Nevers et Nantes et partiellement de quelques affluents, soit environ 2 000 km². L'acquisition des données a été réalisée par un système de scannage par laser aéroporté en mars 2002 et en mars-avril 2003 [figure 4]. La restitution de ces données est faite sous la forme de semis de points XYZ, de modèle numérique de terrain (MNT) et de modèle numérique d'élévation (MNE).

Une campagne de prises de vues aériennes a également été réalisée pendant l'été 2002 dans le but de produire des orthophotoplans de l'ensemble de la zone.

Les principales caractéristiques techniques sont les suivantes :

- vitesse de vol de l'avion : 200 à 270 km/h ;
- altitude de vol : 1 000 à 1 600 m ;
- fréquence de scannage : 28 à 45 Hz ;
- densité minimale de points : 1 point/4 m² pour les missions les plus anciennes ;
1 point/m² pour les missions les plus récentes ;
- précision en altimétrie : < 15 cm ;
- précision en planimétrie : < 30 cm ;
- projection : Lambert 93 ;
- principaux produits disponibles : semis de points (brut, MNE, MNT, eau, bâti, végétation),
Grid ASCII (pixel de 1 m), contours vectorisés (zones en eau, bâti, végétation).

Les différentes campagnes se composent ainsi :

- levés Loire - Maine - Sarthe (2002-2003) :
surface : 2 000 km² ; coût actualisé : 1,480 M€ ; coût actualisé/km² : 740 € ;
- levés Loire - Allier (2009) :
surface : 880 km² ; coût actualisé : 300 000 € ; coût actualisé/km² : 340 € ;
- levés Indre - Cher - Yèvre - Arnon - Sauldre (2010-2011) :
surface : 705 km² ; coût actualisé : 150 000 € ; coût actualisé/km² : 213 €.

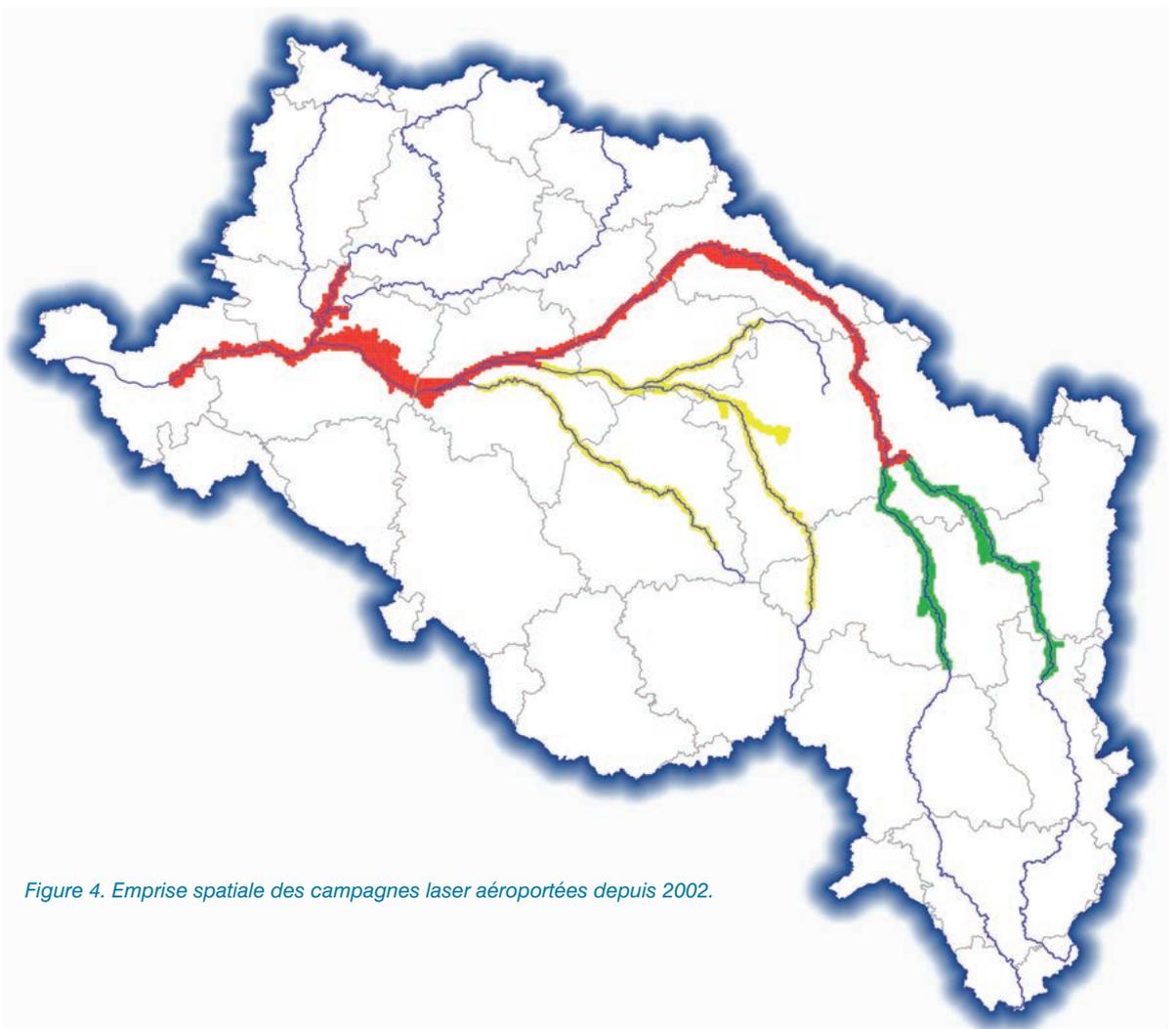


Figure 4. Emprise spatiale des campagnes laser aéroportées depuis 2002.

Ces levés laser aéroportés ont délivré des données déjà utilisées pour :

- la cartographie des zones inondables, nécessaire à la préparation de la gestion de crise et au support pour les services d'intervention. Pour la prévention du risque inondation, ces données permettent de définir des zones impactées ou de calculer des hauteurs d'eau ;
- la modélisation hydraulique : amélioration des modélisations hydrauliques existantes par une meilleure connaissance du lit majeur et la création de modèles hydrauliques 2D pour réaliser une cartographie plus fine ;
- l'identification de chenaux d'écoulements préférentiels pour la restauration de frayères ou de chenaux de crue peu visibles sur les orthophotographies [figure 5].

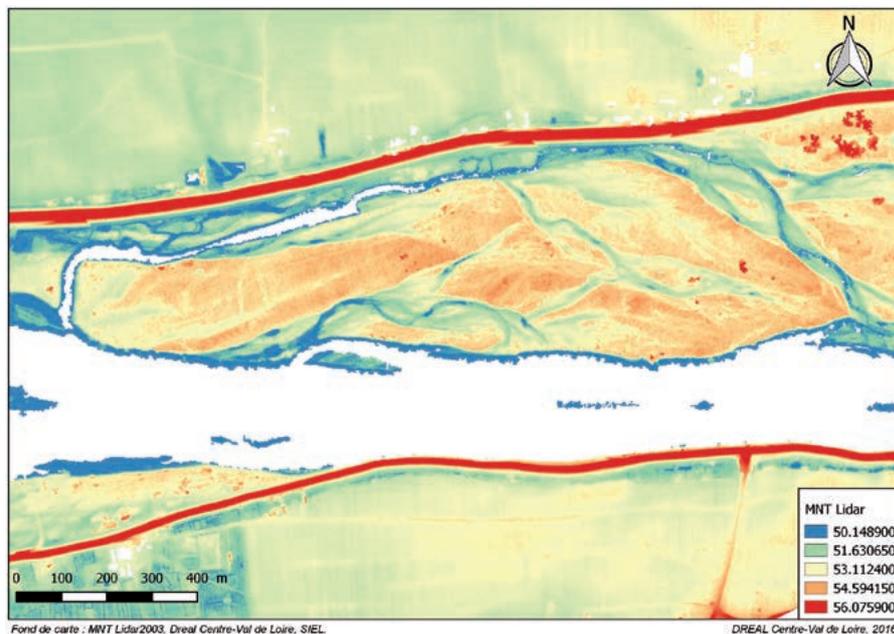


Figure 5. Identification des chenaux et paléo-chenaux du lit de la Loire.

Conclusion

Plus de vingt ans après sa création, le SIEL constitue un outil précieux d'observation et d'étude du lit de la Loire et de ses principaux affluents. Si son utilité n'est plus à démontrer, il est cependant nécessaire de l'adapter à un contexte budgétaire contraint. Il s'agit notamment de rechercher de nouveaux modes de financement (accompagnement par l'agence de l'Eau Loire-Bretagne ; financements FEDER par le programme opérationnel Loire) et de mieux connaître le niveau d'utilisation et les attentes des utilisateurs des produits du SIEL (une enquête a été lancée à l'automne 2016). L'adaptation de la mission ligne d'eau – autre pilier du SIEL – constitue également une perspective technique d'amélioration en travaillant sur des secteurs homogènes d'un point de vue hydrologique. Les futures campagnes de levés lidar devraient être confiées à l'IGN afin de réduire les coûts. Poursuivre la réflexion sur les cartes d'évolution, notamment sur la morphologie, permettra d'aider au plus près les gestionnaires des cours d'eau et de délivrer des produits cartographiques reproductibles et plus automatisés.

Référence bibliographique

- **Cornier**, 1998. Essai de typologie écologique des communautés végétales du lit de la Loire. Univ. de Tours, DIREN Centre, Orléans, 47 p.



Adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau à partir de données lidar topo-bathymétriques

Nathalie **Thommeret**

CNAM-ESGT, Laboratoire Géomatique et Foncier

Samuel **Dunesme**, Frédéric **Gob**, Vincent **Tamisier**, Clément **Virmoux**,

Daniel **Brunstein**, Scarlett **Raufaste**, Louis **Gilet**

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne - CNRS, Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591

Clélia **Bilodeau**

Université Paris Diderot - Paris 7, LADYSS UMR 7533

Karl **Kreutzenberger**

Agence française pour la biodiversité (AFB), Direction de l'appui aux politiques publiques

Résumé

Carhyce constitue un des outils mis en œuvre en France pour répondre aux objectifs de la directive cadre sur l'eau. Il comprend un protocole de terrain standardisé de mesure des caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau. Toutefois, ce protocole suppose que les cours d'eau soient prospectables à pied. Pour les grands cours d'eau non prospectables à pied, l'utilisation de données de télédétection et en particulier issues de levés lidar topo-bathymétriques paraît adaptée. Des pistes méthodologiques sont proposées pour, à terme, la mise en place d'un protocole d'extraction de variables décrivant la géométrie du lit à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) représentant de manière continue les berges et le lit mouillé, à haute résolution.

Mots clés : Carhyce, géométrie plein bord, méthodologie, lidar, MNT

Abstract

CarHyCE is one of the tools created for the needs of the Water Framework Directive. It includes a standardised field protocol for characterising stream hydromorphology. However, it assumes that the surveyed streams are wadable. For large, nonwadable rivers, recourse to topobathymetric lidar data seems appropriate. We therefore discuss methodological approaches to implement a variable extraction protocol able to reconstruct the bankfull geometry of the river reach using a high resolution DTM encompassing both the banks and the wetted section.

Keywords: hydromorphological characterization, bankfull geometry, methods, lidar, DTM

Introduction

Pour répondre aux objectifs de la directive cadre sur l'eau, plusieurs outils d'analyse hydromorphologique ont été mis en œuvre en France. Carhyce (Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau) constitue l'un de ces outils élaborés et alimentés grâce au soutien financier et technique des services de l'État et d'établissements publics (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Office national de l'eau et des milieux aquatiques [Onema], agences de l'Eau, organismes de recherche publics). Il a pour objectifs principaux la construction d'une base de données à l'échelle nationale fournissant un cadre de référence sur les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau français et l'élaboration d'indicateurs permettant de détecter et de quantifier une perturbation physique potentielle par rapport à un référentiel statistique [Gob et al., 2014]. Les modèles et indicateurs construits reposent sur les relations de géométrie hydraulique à plein bord telles que la relation entre la largeur du lit et la surface du bassin versant.

L'outil Carhyce repose sur un protocole de terrain standardisé en cours d'application sur un grand nombre de stations sur l'ensemble du territoire national (environ 1 500 en France métropolitaine et une centaine dans les DOM). L'acquisition des données, réalisée par les agents des services territoriaux de l'Onema, a débuté en 2009. Ce protocole consiste notamment à mesurer la géométrie à plein bord de la rivière sur quinze transects espacés d'une largeur plein bord, ainsi qu'à décrire les berges et la ripisylve. Toutefois, ce protocole suppose que la station soit accessible et que l'ensemble du tronçon soit prospectable à pied. Cette condition écarte les tronçons de cours d'eau dont les berges sont trop escarpées ou la ripisylve difficile à franchir. Un débit trop fort ou une rivière trop profonde peuvent également rendre l'opération d'acquisition dangereuse. Enfin, les rivières trop larges sont également écartées car la longueur de la station doit correspondre à quinze fois la largeur plein bord, une largeur trop importante peut engendrer des temps d'acquisition sur le terrain très élevés.

Il apparaît alors pertinent d'explorer le potentiel des données de télédétection pour décrire ces cours d'eau et pouvoir les intégrer dans les modèles de référence. Les données lidar (*light detection and ranging*) topo-bathymétriques présentent, en particulier, un fort potentiel pour la caractérisation de la géométrie plein bord d'un tronçon de rivière. Ces données, encore peu utilisées pour des applications en hydromorphologie, offrent la possibilité de décrire, à partir d'une même acquisition et par un nuage de points dense, la topographie du lit, à la fois dans sa partie immergée (lit mouillé) comme dans sa partie émergée (berge), sans être masquée ou altérée par la présence de végétation [McKean et al., 2009 ; Kinzel et al., 2013 ; Mandelburger et al., 2015 ; Lague et al., 2016]. Cette technique de mesure topographique est basée sur l'analyse du retour d'un signal laser émis. Un laser infrarouge (1 064 nm) est utilisé pour la topographie émergée et un laser vert (532 nm) pour la bathymétrie, permettant ainsi d'obtenir un modèle numérique de terrain (MNT) à très haute résolution de la station.

1. Enjeux et objectifs

L'objectif du travail présenté ici est de proposer des pistes méthodologiques pour extraire des variables décrivant la géométrie du lit à plein bord (largeur du lit, profondeur, surface mouillée) à partir d'un MNT continu qui couvre à la fois les berges et le fond du lit. Les données ainsi obtenues devront être de la même forme que celles issues du protocole de terrain Carhyce. À terme, le but est de mettre en place un protocole standardisé, objectif et automatisé de calcul des variables de géométrie hydraulique permettant ainsi de compléter les modèles.

2. Méthodes, données et matériels

2.1 Sites tests et données

Nous avons eu l'opportunité de travailler sur trois sites de morphologies très différentes [tableau 1]. Les MNT dont nous disposons pour les deux premiers sites ne sont pas issus de données lidar topo-bathymétriques. Nous considérons toutefois qu'ils sont pertinents pour nos tests méthodologiques puisqu'ils couvrent de manière continue les parties immergée et émergée de la rivière avec une forte densité de points.

Sur l'Yonne à la Pierre-Glissotte, un modèle numérique de surface (MNS) a été construit à partir de photographies aériennes acquises par drone selon une méthode basée sur le principe de la photogrammétrie SfM (structure from motion). Cette dernière nous a permis d'obtenir un nuage de points tridimensionnels géoréférencés à partir de plusieurs centaines de photos prises à différentes altitudes et dix-sept cibles au sol relevées à la station totale. La photogrammétrie nous fournit dans ce cas, une description continue équivalente à un MNT puisque nous sommes dans des conditions particulières avec un très faible niveau d'eau et une absence de végétation sur les berges.

Sur le Gardon, le MNT a été construit à partir de données lidar bathymétriques et complété par des données lidar topographiques (RGE Alti, IGN). Le MNT de la Bear Valley Creek est issu de données lidar topo-bathymétriques et fourni directement au format raster [McKean et al., 2009]. La densité des nuages de points initiaux est précisée dans le tableau 1.

Les traitements ont été réalisés et automatisés sous les logiciels ArcGIS et R.

Tableau 1 : Description des sites et données

	Longueur du tronçon	Style fluvial	Source des données
L'Yonne sur le site d'arasement du barrage de la Pierre-Glissotte	500 m	Chenal unique incisé dans un remplissage lacustre	Photogrammétrie - Drone, densité moyenne : 350 pts/m ²
Le Gardon à Cruviers-Lascours	1 500 m	Divagante à chenaux multiples	Lidar bathymétrique [Haweye II, Bailly et al., 2010], densité moyenne dans l'eau : 1 pt/0,9 m ² + lidar topographique (RGE Alti, IGN), densité souhaitée : 1 pt/m ²
La Bear Creek Valley (Idaho, États-Unis)	2 000 m	Méandres mobiles	Lidar topo-bathymétrique (EAARL), densité moyenne ~ 1pt/m ² [McKean et al., 2009]

2.2 Méthode

La méthode repose sur une hypothèse forte selon laquelle, pour une berge donnée, le niveau plein bord se situe à la même hauteur en moyenne par rapport au fond du lit. Cette hypothèse apparaît raisonnable, les stations Carhyce étant considérées, par définition, comme des tronçons homogènes. Ainsi, l'approche choisie ici repose sur trois étapes principales : l'annulation de la pente du chenal sur le MNT permettant de placer le fond du lit à la même altitude le long du tronçon, l'identification du niveau plein bord par rapport au fond du lit et la réalisation des profils en travers de type Carhyce.

2.2.1 Annulation de la pente du chenal sur le MNT

Cette étape a pour principe de soustraire au MNT un plan dont la pente est égale à la pente moyenne du fond du lit [McKean et al., 2009]. Pour cela, on commence par extraire la ligne de fond du lit à partir du MNT en utilisant un algorithme de calcul des réseaux hydrographiques potentiels. Ici, nous avons utilisé l'algorithme D8 [O'Callaghan et Mark, 1984] qui repose sur le calcul des directions puis d'accumulation des écoulements sur la surface couverte par le MNT.

Cet algorithme, souvent implémenté dans les logiciels de SIG, présente l'avantage d'être simple et robuste. Cette ligne est ensuite lissée pour atténuer les variations spatiales très locales du fond du lit, puis sa pente moyenne est calculée. Cette dernière est alors considérée comme la pente générale du lit du cours d'eau et est utilisée pour construire un plan incliné. Ce plan est ensuite soustrait au MNT. On ajoute enfin un facteur 100 pour éviter les valeurs négatives.

2.2.2 Détermination du plein bord

Une fois la pente du lit annulée, on suppose que pour chacune des berges, le niveau plein bord se situe à la même altitude. La question qui se pose maintenant est de savoir comment déterminer l'altitude relative de ce niveau. Le plein bord est défini comme « *la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant de déborder dans la plaine d'inondation* » [Leopold et Wolman, 1957]. Pour le délimiter à partir d'un MNT, deux approches peuvent être envisagées : une approche hydraulique où l'on va chercher à positionner le point de débordement à partir de la profondeur hydraulique [Faux et al., 2009] et une approche morphologique où l'on va rechercher des ruptures de pente délimitant le chenal. Nous nous sommes concentrés sur cette deuxième approche considérant qu'elle était plus proche de l'identification telle qu'elle est pratiquée sur le terrain dans le cadre du protocole Carhyce.

On propose d'utiliser la courbure longitudinale calculée à partir du MNT [Zevenbergen et Thorne, 1987]. Celle-ci est égale à la courbure du terrain dans le sens de la pente la plus forte, correspondant ici à la pente dans le sens de la berge (perpendiculairement à l'écoulement). Les valeurs de courbure les plus fortes permettent d'identifier les ruptures de pente que l'on suppose représenter la limite du haut de la berge. On choisit le seuil statistique de 5 % des valeurs les plus élevées pour mettre en évidence cette limite de part et d'autre du fond du lit. On fera également une sélection pour ne conserver que les ensembles de fortes courbures les plus proches de la ligne de fond du lit en supposant que c'est celle qui délimite le niveau plein bord.

Le niveau plein bord est défini à partir de l'altitude moyenne des ruptures de pente mises en évidence. On admet la possibilité que les berges en rive droite et en rive gauche soient à des niveaux différents. Elles sont donc traitées séparément, le plein bord étant fixé par la berge la plus basse.

2.2.3 Tracé des transects et calcul des variables Carhyce

Le but de cette dernière étape est d'extraire des données de géométrie du lit à plein bord équivalentes à celles collectées sur le terrain qui pourront ensuite être intégrées dans les modèles Carhyce. Ainsi, quinze transects perpendiculaires à la ligne de fond du lit et espacés d'une largeur plein bord moyenne sont générés. Ce qui nous permet ensuite de calculer la largeur et la profondeur à plein bord par transect, ainsi que d'autres variables telles que la surface mouillée.

3. Résultats

3.1 Application de la méthode basée sur la courbure longitudinale

La méthode entièrement automatique basée sur l'utilisation de la courbure longitudinale pour détecter le plein bord a été appliquée aux trois sites.

Dans le premier cas de l'Yonne à la Pierre-Glissotte, les résultats sont très satisfaisants [figure 1]. En effet, par rapport à un niveau plein bord de référence identifié sur le terrain, l'erreur n'est en moyenne que de 50 cm sur une largeur d'environ 16 m, soit une erreur inférieure à 10 % (définie comme acceptable par le protocole Carhyce). Sur ce tronçon, le chenal présente une

topographie très marquée avec des limites de berges clairement identifiables. L'utilisation de la courbure longitudinale permet donc de bien fixer le niveau plein bord.

Sur les deux autres sites, les résultats sont plus nuancés. En effet, par définition de la méthode automatique utilisée, on capte le premier niveau du lit qui correspond ici au chenal le plus souvent en eau. Or, sur des rivières divagantes à chenaux multiples, la géométrie du lit est plus compliquée et le niveau plein bord est moins évident à repérer. La méthode telle que conçue n'est pas adaptée à ces cas et nécessite d'être affinée.

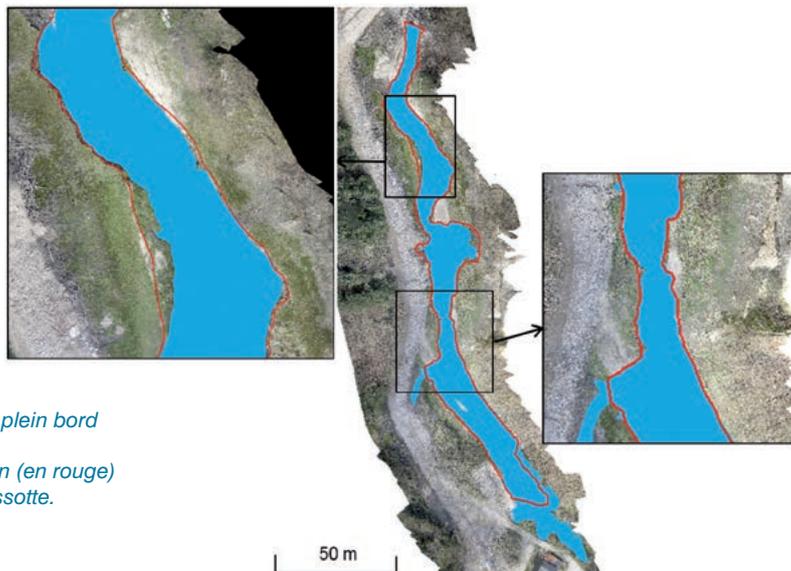


Figure 1. Comparaison du niveau à plein bord calculé automatiquement (en bleu) avec celui cartographié sur le terrain (en rouge) sur le site de l'Yonne à la Pierre-Glissotte.

3.2 Appui du plein bord sur des points de terrain

Une solution est de faire intervenir un opérateur dans le processus pour la détermination du plein bord. Le principe est alors d'utiliser la connaissance du terrain et l'expertise de l'opérateur pour déterminer le niveau plein bord sur le MNT. L'opérateur peut directement relever des points correspondant au plein bord sur le terrain ou fixer des points sur SIG en s'aidant de l'image et/ou du MNT. Comme pour le calcul automatique, le plein bord est ensuite calé sur l'altitude moyenne des points de la berge la plus basse. Ces points nous permettent de calibrer la méthode et de choisir le niveau du lit que l'on souhaite fixer.

Dans le cas du Gardon, nous avons utilisé des points relevés au GPS différentiel (DGPS) sur le terrain. Sur la figure 2, on peut voir l'apport de l'utilisation des points terrain, notamment sur les profils.

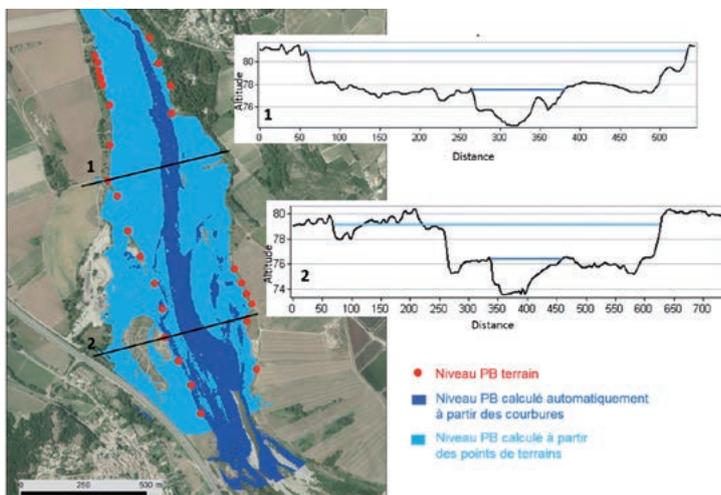


Figure 2. Comparaison des niveaux obtenus sur le site du Gardon par deux méthodes différentes : le calcul automatique à partir des courbures longitudinales et le calcul guidé par des points de terrain.

L'utilisation de points relevés ou déterminés introduit un effet lié à l'opérateur. Nous pouvons donc nous demander quel sera ce biais. Nous avons réalisé une expérience sur le tronçon de la Bear Valley Creek où cinq opérateurs différents ont identifié le niveau plein bord à partir d'images aériennes et du MNT sans connaissance du terrain a priori. Dans ce cas de rivière à méandres comportant des paléo-chenaux, les résultats montrent une forte variabilité interopérateurs : une variation de largeur moyenne supérieure à 10 m, soit un écart de l'ordre de 25 % [tableau 2]. La figure 3 permet de visualiser le positionnement de ces points par rapport au niveau calculé de manière automatique à partir des courbures longitudinales.

Tableau 2 : Comparaison de la largeur plein bord moyenne obtenue sur quinze transects par différents opérateurs

	Largeur PB
Opérateur 1	40,47 m
Opérateur 2	43,77 m
Opérateur 3	51,90 m
Opérateur 4	48,57 m
Opérateur 5	46,50 m
Calculée	38,91 m

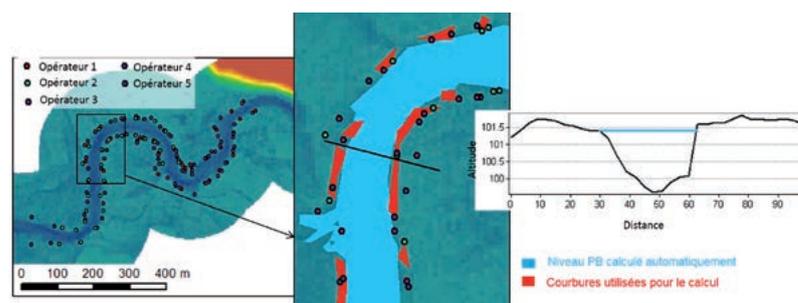


Figure 3. Comparaison des points de plein bord placés par les différents opérateurs sans connaissance du terrain et du niveau calculé automatiquement à partir des courbures.

4. Conclusion et perspectives

Les données lidar topo-bathymétriques présentent un intérêt pour l'adaptation du protocole Carhyce aux grands cours d'eau de par leur capacité à décrire la topographie du lit et des berges. Toutefois, une réflexion sur l'utilisation de ces données et le développement de méthodes de calcul des variables de géométrie hydraulique est nécessaire. La question de la détermination du niveau plein bord, qui se pose également sur le terrain, est centrale puisque toutes les valeurs de géométrie en découlent.

Nous avons pu voir, à travers les différentes applications, que l'utilisation de la courbure longitudinale est pertinente pour repérer les ruptures de pente et délimiter les différents niveaux du lit. Toutefois, la méthode automatique présentée ici propose de retenir le premier niveau du lit comme le niveau plein bord. Or ce choix ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants dans les cas de rivières comme le Gardon où la détermination du plein bord n'est pas évidente. Nous proposons alors de combiner les données lidar à des données relevées sur le terrain permettant de fixer le niveau plein bord. Cette approche, plus souple, permet d'ajuster le niveau plein bord sans se baser sur des règles numériques fixes et ainsi de s'adapter aux différents types de géométrie de cours d'eau. En revanche, elle augmente de fait le biais opérateur. Nous avons montré que ce biais opérateur est très important lorsque les opérateurs n'ont pas de connaissance du terrain. La connaissance du cours d'eau et de son fonctionnement reste indispensable pour une approche raisonnée.

Ce texte présente les premiers résultats d'une étude préliminaire qui sera approfondie dans le futur, notamment pour affiner les méthodes de calculs, quantifier les erreurs associées (effet opérateur, effet de la précision altimétrique...), et multiplier les cas d'applications. De plus, un travail équivalent sera à réaliser pour les autres volets Carhyce comme la caractérisation de la ripisylve.

Références bibliographiques

- **Bailly, J.-S., Le Coarer, Y., Languille, P., Stigermark, C.-J., Allouis, T.**, 2010, « *Geostatistical estimations of bathymetric lidar errors on rivers* », *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, pp. 1199-1210. doi:10.1002/esp.1991
- **Faux, R.N., Buffington, J.M., Whitley, M.G., Lanigan, S.H., Roper, B.B.**, 2009, « *Chapter 6 - Use of airborne near-infrared lidar for determining channel cross-section characteristics and monitoring aquatic habitat in Pacific Northwest rivers: a preliminary analysis* », In : Bayer J.M. et Schei J.L., (eds). PNAMP special publication: Remote sensing applications for aquatic resource monitoring. Cook, WA : Pacific Northwest Aquatic Monitoring partnership, pp. 43-60.
- **Gob, F., Bilodeau, C., Thommeret, N., Belliard, J., Albert, M.A., Tamisier, V., Baudoin, J.M., Kreutzenberger, K.**, 2014, « *Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (Carhyce)* », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 20-1, pp. 57-72. doi : 10.4000/geomorphologie.10497.
- **Kinzel, P.J., Legleiter, C.J., Nelson, J.M.**, 2013, « *Mapping river bathymetry with a small footprint green lidar: applications and challenges* », *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49, pp. 183-204. doi:10.1111/jawr.12008.
- **Lague, D., Launeau, P., Michon, C., Gouraud, E., Juge, C., Gentile, W., Crave, A., Hubert-Moy, L.**, 2016, « *Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux : premiers résultats et perspectives* », Journées techniques « *Avancées, apports et perspectives de la télédétection pour la caractérisation physique des corridors fluviaux* », Onema/MEEM, Paris, 10 juin 2016.
- **Leopold, L.B., Wolman, M.G.**, 1957, « *River channel patterns. Braided, Meandering and Straight* », U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-B, pp. 45-62.
- **Mandelburger, G., Hauer, C., Wieser, M., Pfeifer, N.**, 2015, « *Topo-Bathymetric lidar for monitoring river morphodynamics and instream habitats - a case study at the Pielach River* », *Remote Sensing*, 7(5), pp. 6160-6195. doi:10.3390/rs70506160.
- **McKean, J., Nagel, D., Tonina, D., Bailey, P., Wright, C.W., Bohn, C., Nayegandhi, A.**, 2009, « *Remote sensing of channels and riparian zones with a narrow-beam aquatic-terrestrial lidar* », *Remote Sensing*, 1, pp. 1065-1096.
- **O'Callaghan, J., Mark, D.**, 1984, « *The extraction of drainage networks from digital elevation data* », *Computer vision, graphics and image processing*, 28, pp. 323-344.
- **Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R.**, 1987, « *Quantitative analysis of land surface topography* », *Earth Surface Processes and Landforms*, w 12, pp. 47-56.

Remerciements

Les auteurs remercient Jean-Stéphane Bailly d'avoir mis à notre disposition les données lidar bathymétriques sur le Gardon et Jim McKeans d'avoir mis en ligne gratuitement le MNT de la Bear Creek Valley. Ce travail n'aurait pas pu se faire sans le soutien financier et scientifique de l'Onema ainsi que le concours de l'ensemble des agents qui mettent en œuvre le protocole pour la collecte des données sur le terrain, qui alimentent la base de données et contribuent à l'amélioration des développements méthodologiques.

Session B

Caractérisation des corridors fluviaux par l'imagerie spatiale et terrestre

- Caractérisation des ripisylves sur les grands territoires à partir de données à très haute résolution spatiale en France métropolitaine
- Caractérisation des durées d'inondation en milieux prairial par la télédétection satellitaire radar
- Suivi morphodynamique d'une annexe hydraulique rhénane restaurée par combinaison des méthodes d'imagerie terrestres





Caractérisation des ripisylves sur de grands territoires à très haute résolution spatiale en France métropolitaine

Thierry **Tormos**

Agence française pour la biodiversité, Pôle Recherches et développement AFB-Irstea en Hydroécologie des plans d'eau, UR RECOVER, Centre d'Aix-en-Provence.

Kris **Van Looy**, Yves **Souchon**

Irstea, UR MALY, Laboratoire d'hydroécologie quantitative, Centre de Lyon-Villeurbanne

Résumé

Le corridor rivulaire, abritant les ripisylves, est un des axes clés de préservation et de restauration du bon état écologique des cours d'eau. Disposer d'une information spatiale précise sur ces formations végétales rivulaires sur de grands territoires revêt donc un grand intérêt pour orienter efficacement les gestionnaires dans la définition des stratégies de préservation et restauration de ces espaces. Nous présentons ici les avancées sur le développement d'une procédure de classification permettant de délimiter et caractériser cet espace rivulaire sur de grands territoires. Cette procédure combine des données multi-sources de résolution métrique disponibles sur le territoire français métropolitain : des données vecteurs telles que la *BD TOPO*® de l'IGN, le Registre parcellaire graphique et les orthophotos infrarouges couleurs de l'IGN ou les images satellites *RapidEye* de Geosud. Elle est basée sur une approche de classification orientée objet. Afin de l'opérationnaliser, i.e. qu'elle soit applicable sur divers paysages rivulaires, des recherches ont été conduites pour : 1) identifier les critères spectraux et texturaux robustes et efficaces aussi bien pour la segmentation que la classification ; et 2) sélectionner automatiquement le paramètre d'échelle de l'algorithme de segmentation. Les résultats obtenus sont prometteurs puisque la procédure permet dans un premier temps de délimiter efficacement l'espace rivulaire potentiel quel que soit le paysage étudié (précision entre 82 % et 92 % avec les orthophotos). Les analyses de sélection de variables par *Random Forest* et expertise ont permis d'identifier des critères robustes et mettent en évidence la généralité de l'approche. L'indice de Johnson, qui combine la mesure d'homogénéité intra-région et la disparité inter-région, s'est avéré très pertinent pour sélectionner le paramètre d'échelle automatiquement. Cette procédure capable de tirer le meilleur profit des données multi-sources et d'en intégrer de nouvelles aisément s'avère incontournable pour caractériser finement les éléments des paysages rivulaires sur de grands territoires.

Mots clés : approche orientée objet expertisée, données multi-sources, état écologique des cours d'eau, indice de Johnson, Random Forest

Introduction

Avec l'hydromorphologie, le corridor rivulaire est un compartiment essentiel du fonctionnement de l'écosystème rivière et garant de leur qualité écologique [CSPNB, 2008]. Tous deux constituent donc des éléments clés de gestion de ces milieux, en particulier face aux changements climatiques (e.g., régulation thermique, couloirs de déplacements, zones refuges...). Tous ces

éléments n'ont pas encore fait l'objet d'une analyse suffisamment poussée lors du premier état des lieux en France, ce qui a eu entre autres pour conséquence des propositions de mesures encore peu fournies. La littérature sur les liens entre corridor riparien et réponses écologiques est assez hétérogène et surtout riche de très nombreuses expériences locales avec généralement une absence de vision intégrée sur les processus influençant l'état écologique des cours d'eau, y compris pour les mesures de restauration consistant à reboiser les berges [Palmer et al., 2007].

Les marges de progrès sont très nombreuses. Elles reposent notamment sur une extraction plus précise des éléments du paysage rivulaire sur de grands territoires, plus particulièrement sur les ripisylves. Cette information est indispensable pour la construction d'indicateurs traduisant les différentes fonctionnalités de ces espaces. Ces indicateurs se basent pour cela sur la composition (nature occupation du sol) et la configuration spatiale (largeur, continuité...) du corridor.

Même si les données vecteurs de précision métrique disponibles « en standard » sur le territoire national fournissent des informations non négligeables sur les éléments paysagers des corridors (surfaces en eau, végétation arborée, bâtiments, routes de la *BD TOPO*®, îlots de cultures du RPG...), il est nécessaire de les compléter. Elles ne renseignent pas notamment sur : 1) la nature des patchs boisés rivulaires (plus particulièrement sur la différenciation des bois durs/bois tendres) ; 2) sur leur naturalité (plantés/non plantés) ; 3) sur leur hétérogénéité au sein des patchs ; et 4) sur la présence de végétation herbacée et/ou arbustive. Tous ces éléments sont indispensables pour traduire correctement les fonctionnalités du corridor rivulaire. Par exemple, la différenciation entre bois durs et bois tendres est requise pour traduire l'état de la dynamique du corridor fluvial, car cette répartition végétale est intrinsèquement liée à cette dynamique [CSPNB, 2008].

Les données de télédétection à très haute résolution spatiale (THRS), contenant une bande dans le proche infrarouge (PIR), peuvent apporter ce complément d'information. Dès lors, le défi technique repose sur le développement d'une procédure de classification opérationnelle capable d'extraire efficacement et de manière reproductible sur de grands territoires ces différents éléments de paysage rivulaire en combinant les données vecteurs et la donnée image produite en continu sur le territoire national et à coût réduit pour les gestionnaires. Il implique plus particulièrement de :

- rechercher une méthode capable de combiner au mieux les informations fournies par les données multi-sources en gérant les conflits générés par leur différence de résolution planimétrique et de date d'acquisition ;
- identifier les critères image robustes pour appliquer efficacement la procédure de classification sur les divers paysages rivulaires métropolitains ;
- et automatiser au maximum la procédure pour réduire les temps de traitement.

Tableau 1 : Nomenclature recherchée dans les corridors rivulaires pour la construction des indicateurs traduisant les fonctionnalités de ces espaces dans l'écosystème rivière

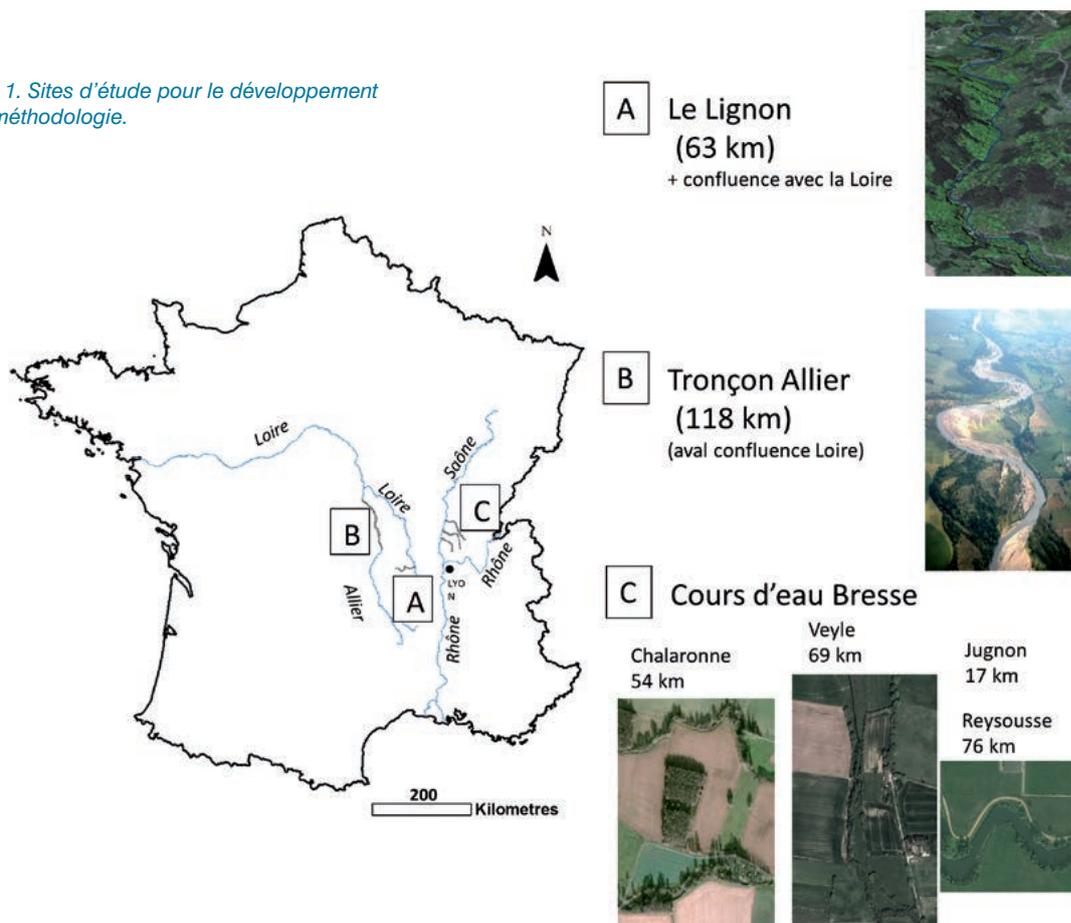
Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Zones urbaines			
Zones agricoles			
Voiries			
Cours d'eau	Eau		
	Bancs		
Végétation semi-naturelle herbacée et arbustive			
Végétation semi-naturelle arborée	Plantées	Peupleraies	
		Bois dur	Peupleraie ancienne
	Feuillus naturels		Bois tendre
		Platanes...	
Conifères semi-naturels		Aulnaie	
		Saulaie	

Cet article présente les avancées sur le développement de cette procédure. La nomenclature visée pour la construction des indicateurs traduisant les fonctionnalités de ces espaces dans l'écosystème rivière est rappelée dans le tableau 1. L'objectif est d'atteindre a minima le niveau 3 de cette nomenclature.

1. Sites d'étude

Afin de tester l'applicabilité et la robustesse de la procédure de classification, trois zones d'études présentant des cours d'eau avec des niveaux d'anthropisation du corridor rivulaire contrastés et des dynamiques fluviales différentes ont été sélectionnées [figure 1]. Le Lignon, dans la plaine du Forez (Loire) [figure 1A], présente un niveau d'anthropisation relativement faible dans le corridor et les ripisylves (saulaies, aulnaies) se mêlant avec les forêts avoisinantes (notamment sur sa partie amont). Elles se distinguent plus nettement sur la partie aval et sont bien établies à la confluence avec la Loire avec des patches relativement hétérogènes. Le tronçon de l'Allier sélectionné [figure 1B] est caractérisé par un corridor relativement plus anthropisé ; toutefois, la plaine alluviale reste sauvage et présente des patches de bois durs/bois tendres bien homogènes. Les corridors des cours d'eau de la Bresse [figure 1C] ont une dynamique fluviale plus faible que les cours d'eau précédents et sont très anthropisés, notamment par l'agriculture. En conséquence, les ripisylves sont étroites (présence uniquement d'un rideau d'arbres), voire absentes.

Figure 1. Sites d'étude pour le développement de la méthodologie.



2. Données et prétraitements

2.1 Données vecteurs et images à très haute résolution spatiale (THRS)

Les données sont présentées dans le tableau 2. Les contraintes de sélection des données ont reposé sur :

- leur accessibilité sur le territoire métropolitain ;
- leur résolution spatiale (< 5 m au maximum) ;
- leur contenu informatif en s'assurant pour les données images de la présence d'une information dans le PIR indispensable pour la discrimination des essences arborées [Müller, 1997].

2.2 Données terrain et de validation

Une vérité terrain a été constituée dans chaque zone d'étude. Cette vérité contient les limites des zones rivulaires potentielles (ZRP) dessinées par photo-interprétation des orthophotos IRC. Elle comporte également différents relevés terrain sur la nature des essences arborées à l'échelle du houppier et des patches effectués à partir d'une tablette GPS. Ces relevés ont été ensuite complétés par photo-interprétation des orthophotos IRC. Ils ont été réalisés à des périodes différentes en fonction de la zone d'étude : en juin 2012 pour l'Allier et entre avril et juin 2015 pour le Lignon et les cours d'eau de la Bresse. À noter que pour l'Allier, la base de données SIEL (Système d'information des évolutions du lit de la Loire, <http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/les-donnees-du-siel-r557.html>) a été également utilisée.

Tableau 2 : Présentation des sources de données mobilisables sur le territoire métropolitain

Type	Source	Producteur	Résolution spatiale	Mise à jour	Information
Vecteur	BD TOPO®	IGN	Métrique	Variable suivant les thèmes	Réseau routier, ferroviaire et hydrographique, bâti, végétation arborée...
	RPG	ASP	Métrique	1 an	Les limites et surfaces de cultures des îlots déclarés par les agriculteurs dans le cadre de la politique agricole commune (PAC)
Image	BD ORTHO® CN/IRC	IGN	0,5 m	3 ans	Orthophotos : V, R, PIR
	RapidEye	Geosud	5 m	1 an	Images satellites : B, V, R, R-edge, PIR

(IGN : Institut national de l'information géographique et forestière ; ASP : Agence de service et de paiement ; B : Bleu ; V : Vert ; R : Rouge ; PIR : Proche infrarouge)

2.3 Prétraitements

Les données images ont été organisées en une mosaïque sur la zone d'étude. Ensuite l'ensemble des données images et vecteurs sont découpées dans les fonds de vallée (couche issue du projet SYRAH-CE, <http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/maly/pole-onema-irstea/hydromorphologie-et-alterations-physiques-0>) des cours d'eau étudiés. L'ensemble de ces traitements ont été automatisés sous ArcGIS 10.0. Différentes textures *Haralick* ont été calculées pour les données images pour toutes les directions et pour toutes les bandes sous ENVI 4.2.

3. Procédure de classification et résultats

3.1 Présentation générale

La procédure de classification se base sur une approche orientée objet (OBIA). Cette approche est très bien adaptée à l'extraction d'information sur des données images à THRS et à la combinaison de données multi-sources [Tormos et al., 2012]. Elle consiste à identifier préalablement des objets composés de plusieurs pixels à l'aide d'un algorithme de segmentation, puis à opérer la classification de ces objets à partir des critères spectraux et texturaux à l'échelle de l'objet mais aussi sur la taille, la forme, le contexte à différents niveaux de perception de l'image. Ainsi, le pixel n'est plus traité de manière isolée mais dans son contexte. Les OBIA ont été menées à partir du logiciel *eCognition*® v.9. L'algorithme de segmentation multi-résolution a été utilisé ici pour délimiter les objets. C'est un algorithme de croissance de régions, l'opérateur doit définir d'une part, l'information (les critères spectraux et/ou texturaux) sur laquelle l'algorithme se base pour regrouper les pixels (paramètre d'homogénéité) et d'autre part, le paramètre d'échelle qui détermine la taille des objets. Afin de garantir l'automatisation de cette approche, la classification supervisée n'est pas privilégiée (la prise d'échantillon d'apprentissage étant trop consommatrice de temps). On cherchera donc à identifier des critères de classification (spectraux et/ou texturaux) soit par expertise (méthode essai/erreur) ou en s'appuyant sur des méthodes de sélection de variable. Les seuils de ces critères seront déterminés par expertise. La procédure comprend deux étapes : délimitation de l'espace des formations rivulaires (eau, banc, végétation) à la date de l'image et caractérisation de la composition des patches de végétation arborée (bois dur/bois tendre/mélange des deux).

3.2 Délimitation de la zone rivulaire potentielle (étape 1)

La zone rivulaire potentielle (ZRP) correspond à toute la végétation semi-naturelle en contact avec le cours d'eau (eau + bancs). Afin de délimiter cet espace, une classification de l'occupation du sol dans le fond de vallée présente à la date de l'image est tout d'abord réalisée en suivant le niveau 1 de la nomenclature [tableau 1]. Des segmentations/classifications (OBIA) sont réalisées de manière indépendante pour chaque classe d'occupation du sol recherchée dans l'image. Les règles OBIA sont spécifiques pour chaque classe. Elles combinent une source de donnée image (soit les orthophotos, soit les images *RapidEye*) et la source de donnée vecteur liée à la classe étudiée (exemple : pour la classe eau, on utilise la couche thématique eau fournie par la *BD TOPO*®). L'objectif de ces traitements est de mettre à jour chaque donnée thématique vecteur par rapport à l'image. Ces résultats sont ensuite combinés en gérant les conflits entre classes, puis agrégés selon la typologie visée. Enfin, en utilisant des règles de contexte (i.e., règles de voisinage entre objets), on délimite l'espace rivulaire potentiel en considérant les patches de végétation arborée, herbacée et/ou arbustive en contact de la rivière (eau + banc). La figure 2B [page suivante] montre un exemple de résultat obtenu sur un tronçon de l'Allier.

Cette délimitation a été testée et validée sur les différentes zones d'étude avec chacune des sources de données image. Les résultats montrent que la ZRP est délimitée avec une précision de plus de 80% sur les différents paysages rivulaires étudiés. Les orthophotos IRC se sont révélées plus efficaces, notamment pour identifier des ripisylves étroites (bande < 10 m). Les erreurs observées sont surtout liées à de la surdétection car le critère de contexte n'est pas assez discriminant. Il autorise la conservation, par exemple, de l'ensemble des haies, des talus, des prairies ou espaces boisés connectés à la ZRP. Cette dernière est donc surestimée, mais contient bien les formations végétales qu'on cherche à discriminer dans l'étape 2. Au niveau technique, les critères de segmentation/classification définis se sont avérés robustes. Seuls les seuils de ces critères de classification ont été modifiés entre les zones d'étude.

3.3 Différenciation des essences arborées (étape 2)

L'étape 2 consiste à discriminer les patchs de végétation arborée dans la ZRP selon la nomenclature définie dans le tableau 1 (hiérarchies 3 et 4) en un seul niveau de segmentation/classification. Compte tenu des résultats obtenus à l'étape 1, seules les potentialités des orthophotos IRC ont été testées. Pour atteindre cet objectif, un travail spécifique a été réalisé afin de :

- identifier les critères spectraux et/ou texturaux efficaces et robustes pour délimiter et discriminer les patchs de végétation arborée aussi bien pour la segmentation (afin de définir le paramètre d'homogénéité de l'algorithme de segmentation multi-résolution) et de classification ;
- automatiser la sélection du paramètre d'échelle de l'algorithme de segmentation multi-résolution utilisé (ce paramètre détermine la taille des objets du résultat de segmentation).

Pour identifier les critères spectraux et/ou texturaux les plus discriminants, des analyses de sélection de variables par *Random Forest* (RF ; *Breiman, 2001*, mode supervisé) et par expertise (méthode essai/erreur, mode expert) ont été menées séparément et comparées par la suite. La sélection des critères par RF a été réalisée sur la base d'échantillons pris sur le terrain et menée pour chaque zone d'étude compte tenu de la variabilité radiométrique des orthophotos entre départements. Afin de prendre en compte les degrés d'hétérogénéité de bois durs et de bois tendres au sein des patchs, des classes de mélange ont été rajoutées à la nomenclature.

Les résultats montrent que :

- les critères les plus discriminants sont similaires quel que soit le paysage rivulaire étudié aussi bien en mode expert qu'en mode supervisé ;
- les critères sont différents entre mode expert et supervisé mais ils se basent essentiellement sur la même information (PIR) et les critères experts sont un peu plus efficaces (+ 4 à 8 % de précision totale en fonction des zones étudiées).

Les formations végétales arborées ont donc des comportements spectraux et texturaux similaires quel que soit le paysage rivulaire étudié. À noter que seuls les seuils de ces critères de classification ont été modifiés entre les zones d'étude, en particulier pour pallier les différences radiométriques entre les orthophotos IRC de départements différents [*Tormos et al., 2012*].

Afin d'automatiser la sélection du paramètre d'échelle de la segmentation qui varie en fonction de l'hétérogénéité du paysage rivulaire étudié, on a testé l'utilisation de l'indice de Johnson [*Johnson et Xie, 2011*]. Cet indice permet d'identifier le paramètre d'échelle minimisant la variabilité intra-objet du paramètre d'homogénéité de l'algorithme (défini ici à partir des critères identifiés en mode expert) par rapport à celle de ses voisins. Les résultats obtenus sont très satisfaisants puisque les valeurs de paramètre d'échelle identifiées à l'aide de cet indice sont similaires à celles identifiées par expertise pour l'ensemble des zones d'étude.

Ces travaux de recherche montrent donc que la différenciation de manière automatique des essences arborées sur de grands territoires est réalisable à partir des orthophotos IRC. Les résultats in fine obtenus avec, pour la segmentation, le paramètre d'échelle sélectionné par l'indice de Johnson et le paramètre d'homogénéité utilisant les critères discriminants identifiés par expertise, puis pour la classification les critères discriminants identifiés par expertise, sont prometteurs (précision > 80 %). À noter que les résultats sont bien meilleurs pour le paysage rivulaire le moins complexe (Allier, précision de 98 %), où les patchs homogènes sont bien établis. Les paysages présentant des patchs boisés plus hétérogènes sont plus difficiles à appréhender compte tenu de la diversité des situations de mélange d'essences à prendre en compte.

4. Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus dans cette étude sont prometteurs. La procédure de traitement orientée objet développée, dédiée à la délimitation de la ZRP et à la caractérisation fine des patches arborés (en termes d'essences), semble incontournable pour obtenir cette information sur de grands territoires. Son point fort réside dans sa capacité à exploiter correctement les informations

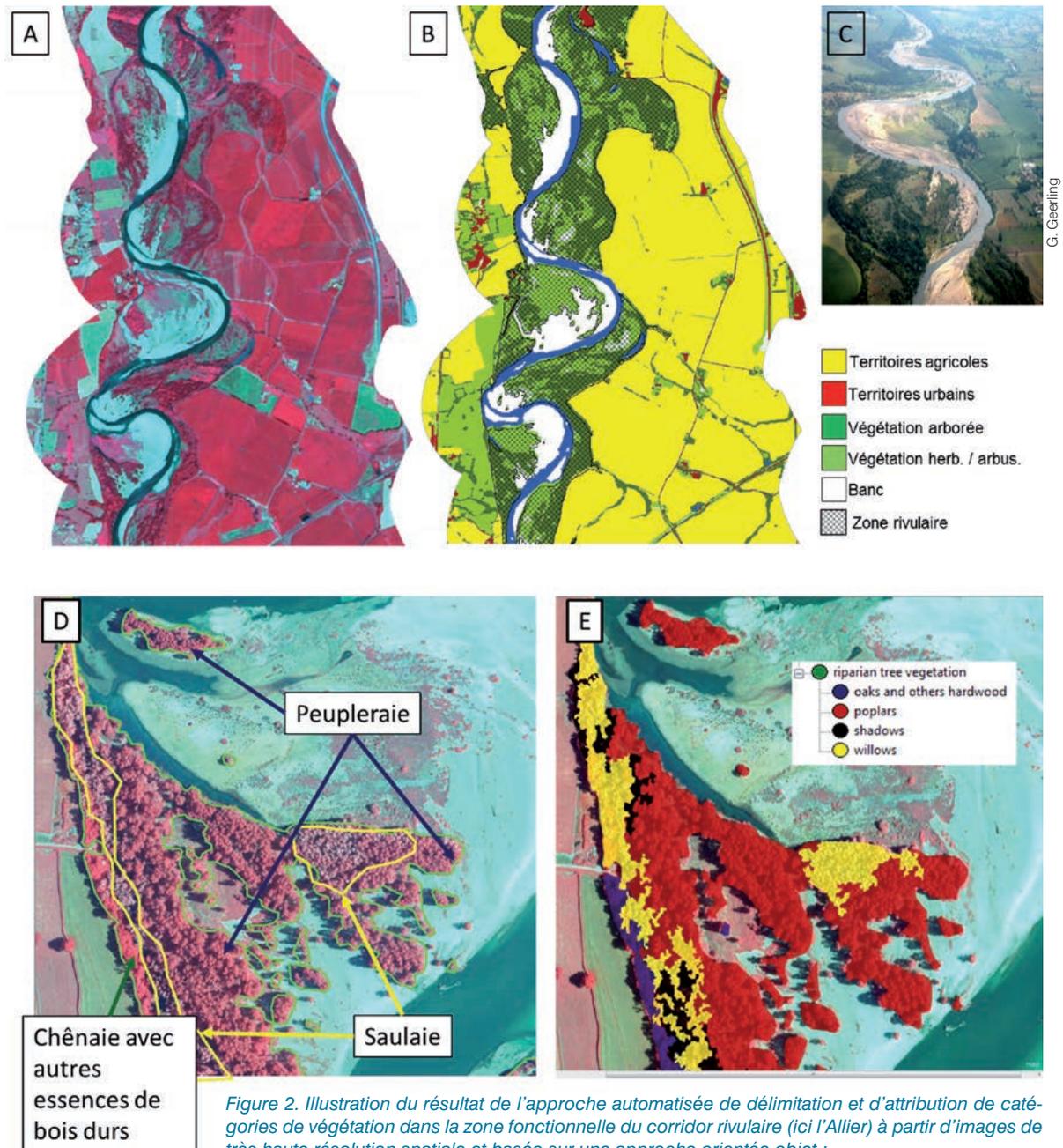


Figure 2. Illustration du résultat de l'approche automatisée de délimitation et d'attribution de catégories de végétation dans la zone fonctionnelle du corridor rivulaire (ici l'Allier) à partir d'images de très haute résolution spatiale et basée sur une approche orientée objet :

- en A : l'image orthophotos (0,5 m) ;
- en B : le résultat de la délimitation de la zone rivulaire après classification de l'occupation du sol ;
- en C : une vue synoptique de la zone en couleur réelle ;
- en D : zoom sur une analyse par photo-interprétation de délimitation et discrimination des patches boisés dans ce corridor ;
- en E : résultat obtenu sur ce zoom mais de manière automatique.

multi-sources. Autrement dit, elle est capable d'intégrer aisément de nouvelles sources d'information permettant d'améliorer au fur et à mesure cette caractérisation. Elle pourra, par exemple, facilement intégrer les données lidar (*light detection and ranging*), très informatives pour affiner la discrimination de la végétation riveraine et de plus en plus disponibles sur de grands territoires [Michez, et al., 2014]. Mais déjà avec les orthophotos IRC, la différenciation de manière automatique des essences arborées sur de grands territoires est réalisable puisque la segmentation/classification repose sur des critères orthophotos IRC qui se sont avérés robustes dans cette étude et que la segmentation a été automatisée grâce à l'indice de Johnson.

Toutefois, des progrès techniques doivent être réalisés pour :

- réduire les erreurs de surdétection de la ZRP (zones végétales arborées en connexion avec la ZRP), notamment par l'application d'un filtre spatial tenant compte de la distance au cours d'eau ;
- progresser dans la caractérisation des paysages rivulaires plus hétérogènes, notamment en réalisant une OBIA à deux niveaux de segmentation/classification emboîtés : le premier à l'échelle du houppier, et le deuxième à l'échelle du patch basé sur les résultats du premier. Le patch serait alors caractérisé par les proportions des différentes essences identifiées dans le niveau 1.

Les premiers résultats de sélection de variable à l'échelle du houppier nous poussent à aller dans ce sens puisqu'on observe un pouvoir discriminant supérieur à cette échelle par rapport à l'échelle du patch (trois fois supérieur).

La télédétection est donc un outil indispensable pour obtenir une information plus précise des éléments du paysage rivulaire sur de grands territoires. Ce progrès, associé à la prise en compte des échelles plus larges que celles communément abordées (comme réseau amont et/ou aval), sont les clés techniques pour améliorer les études de compréhension des liens entre le corridor rivulaire et l'état écologique des cours d'eau menées au niveau national [Van Looy et al., 2014]. La connaissance attendue de ces études sera une précieuse aide pédagogique et une base technique renforcée pour la préservation et la gestion complexe des corridors rivulaires.

Références bibliographiques

- Breiman, L., 2001, « *Random Forests* ». *Machine Learning*, 45, pp. 5-32.
- CSPNB (Conseil scientifique du patrimoine naturel et de la biodiversité), 2008, *L'arbre, la rivière et l'homme*. MEDAD/D4E Paris.
- Johnson, B., Xie, Z., 2011, « *Unsupervised image segmentation evaluation and refinement using a multi-scale approach* », *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, pp. 473-483.
- Michez, A., Piégay, H., Toromanoff, F., Brogna, D., Bonnet, S., Lejeune, P., et al., 2013, « *Lidar Derived Ecological Integrity Indicators for Riparian Zones: Application to the Houille River in Southern Belgium/Northern France* », *Ecological indicators*, 34, pp. 627-40.
- Palmer, M., Allan, D., Meyer, J., Bernhardt, E., 2007, « *River Restoration in the Twenty-First Century: Data and Experiential Knowledge to Inform Future Efforts* », *Restoration Ecology*, 15, pp. 472-481.
- Tormos, T., Kosuth, P., Durrieu, S., Dupuy, S., Villeneuve, B., Wasson, J.G., 2012, « *Object-based image analysis for operational fine-scale regional mapping of land cover within river corridors from multispectral imagery and thematic data* », *International Journal of Remote Sensing*, 33, pp. 4603-4633.
- Van Looy, K., Tormos, T., Piffady, J., Souchon, Y., 2014, « *Le corridor fluvial : des trames déjà en place à renforcer et à protéger* », *Sciences Eaux et Territoires*, pp. 30-35.



Caractérisation des durées d'inondation en milieu prairial par télédétection satellitaire radar

Cécile Cazals

Université Paris-Est, IGN, LaSTIG/MATIS, 6-8 av. B. Pascal, cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne la Vallée Cedex 2
GISWAY, 55 rue La Boétie, Paris 75008

Pierre-Louis Frison, Jean-Paul Rudant

Université Paris-Est, IGN, LaSTIG/MATIS, 6-8 av. B. Pascal, cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne la Vallée Cedex 2

Sébastien Rapinel, Anne Bonis,

CNRS UMR 6553 ECOBIO, université de Rennes 1, campus de Beaulieu, Rennes Cedex 35042

Grégoire Mercier,

CNRS UMR 6285 Lab-STICC, TELECOM Bretagne, technopole Brest-Iroise, Brest Cedex 29238

Clément Mallet,

IGN, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, LaSTIG/MATIS, 73 avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé

Samuel Corgne

CNRS UMR 6554 LETG Rennes, Université Haute-Bretagne, place Henri-Le Moal, Rennes Cedex 35043

Résumé

Cette étude évalue le potentiel des données radar satellitaires pour le suivi des dynamiques hydrologiques saisonnières en milieu prairial. Nous avons traité une série temporelle de quatorze images Sentinel-1 acquises entre décembre 2014 et mai 2015 en polarisation VV/VH avec un pas de temps de douze jours. Grâce à un seuillage supervisé à hystérésis, l'eau libre, la végétation inondée et la prairie sèche ont été distinguées. Les résultats ont été comparés à des simulations d'inondation obtenues à partir d'enregistrements de niveaux d'eau et d'un modèle numérique de terrain. La méthode permet de très bien extraire l'eau libre, et dans une moindre mesure l'eau avec végétation. On note une sous-détection importante des surfaces en eau liée à la microtopographie très variée de la zone. La durée d'inondation est dérivée des quatorze cartes d'inondation réalisées.

Mots clés : RSO (radar à synthèse d'ouverture), télédétection, série temporelle, zone humide, hydrodynamique

Abstract

This study evaluates the potential of satellite radar data to monitor seasonal hydrological dynamics in grassland areas. A time-series of 14 Sentinel-1 images acquired between December 2014 and May 2015 in VV/VH polarization with a time step of 12 days time is used. Thank to a supervised hysteresis thresholding algorithm, open water, flooded vegetation, and dry grassland are distinguished. The results are compared to flood simulations obtained from extrapolation of water level records on a digital terrain model. The method detects open water with a good accuracy, whereas flooded vegetation is extracted with a moderate accuracy. An under-detection of flooded areas due to the micro-topography is noticed. A flood map duration is derived from the 14 flood maps.

Keywords: SAR, remote sensing, time-series, wetland, hydrodynamic

Introduction

La télédétection est un moyen efficace de caractériser les processus hydrologiques sur de grands espaces [Bates et al., 1997]. L'étude de la dynamique hydrologique nécessite une résolution temporelle importante, difficilement atteignable avec l'imagerie optique satellitaire en raison des couverts nuageux qui affectent les images satellitaires. Les capteurs radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont tout particulièrement adaptés à la caractérisation des dynamiques hydrologiques en raison de la sensibilité de leurs mesures à la présence d'eau malgré la végétation [Hess et al., 1995 ; Martinez et al., 2007]. Toutes les acquisitions RSO sont exploitables en raison de la capacité du radar à acquérir des images de jour comme de nuit, quel que soit le couvert nuageux.

1. Enjeux et objectifs

La télédétection radar satellitaire a vécu une véritable révolution en 2014 avec le lancement du satellite Sentinel-1A par l'Agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme Copernicus. Ce capteur acquiert des données de manière régulière, en particulier sur l'Europe et leur diffusion est libre et gratuite quel que soit l'utilisateur. La fréquence temporelle est de douze jours pour des images dans la même géométrie d'acquisition. Ce temps pourra être réduit à six jours avec le lancement au printemps 2016 du satellite jumeau Sentinel-1B. Cette très haute résolution temporelle est particulièrement adaptée à l'étude de la dynamique hydrologique.

L'objectif de cette étude est d'estimer le potentiel des données radar pour établir des cartes d'inondation tous les douze jours. La méthode proposée permet d'exploiter l'information temporelle dans la détection des zones en eau. Cela permet d'estimer les durées d'inondation au sein des prairies ; information importante pour comprendre la dynamique des milieux prairiaux.

2. Méthodes, données et matériels

2.1 Site d'étude

Les recherches ont été menées sur le Marais poitevin, une zone humide de 100 000 ha localisée sur la façade atlantique française [figure 1]. Il s'agit d'un espace poldérisé depuis le X^e siècle sur l'estuaire de la Sèvre niortaise. Environ 40 % des surfaces agricoles sont cultivées en prairies, réparties dans toute la zone humide, avec une prédominance au nord-est de la zone. La topographie est relativement plane : entre 1,5 et 3,5 mètres, mais la microtopographie est très variée : elle présente des chenaux qui correspondent aux anciens chenaux de drainage du schorre [Terrisse, 2012]. Les habitats naturels présents dans ces prairies dépendent de cette microtopographie par le biais du gradient d'humidité et de la dynamique hydrologique [Rapinel et al., 2015]. La durée d'inondation dans les prairies est contrôlée par les gestionnaires, mais l'impact de cette gestion sur la biodiversité est encore mal connu.

2.2 Données

Une série temporelle de quatorze images Sentinel-1 acquises entre décembre 2014 et mai 2015 en polarisation VV/VH a été utilisée. La résolution est de l'ordre de 20 m et la taille de pixel de 10 x 10 m. Les caractéristiques précises des images sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des images Sentinel-1 utilisées pour l'étude

Résolution spatiale	20 × 22 m ² (azimut × ground range)
Taille du pixel	10 × 10 m ² (azimut × ground range)
Fauchée	250 km
Dates	2014 : 6, 18 et 30 décembre 2015 : 11 janvier ; 4, 16 et 28 février ; 12 et 24 mars ; 5, 17 et 29 avril ; 11 et 23 juin

Des simulations d'inondation ont été réalisées grâce au modèle numérique de terrain Litto3D[®] IGN/SHOM [figure 1]. Il est dérivé d'acquisitions lidar (*light detection and ranging*) aéroportées ayant eu lieu à l'été 2012, la stabilité de la topographie dans le temps nous permettant de l'utiliser malgré les trois ans d'écart avec l'acquisition des données radar. Sa résolution spatiale est de 1 m, avec une précision altimétrique de 20 cm.

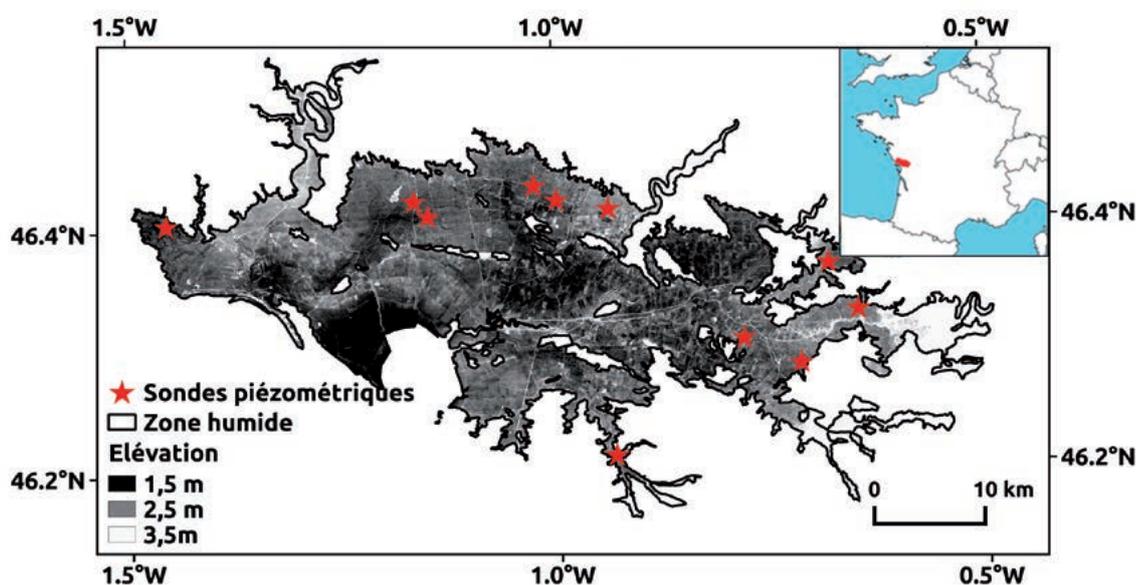


Figure 1. Extrait du modèle numérique de terrain (MNT) Litto3D[®] de l'emprise de la zone humide du Marais poitevin.

Onze sondes piézométriques ont été installées en octobre 2014 dans des prairies pour enregistrer la hauteur de la nappe d'eau. La localisation des sondes est visible en figure 1.

Les surfaces d'eau permanentes de la BD TOPO[®] de l'IGN ont également été utilisées pour estimer la précision de détection sur les surfaces d'eau permanentes. Les surfaces d'eau étirées dont les valeurs de compacité sont supérieures à 100 ont été écartées.

2.3 Méthode

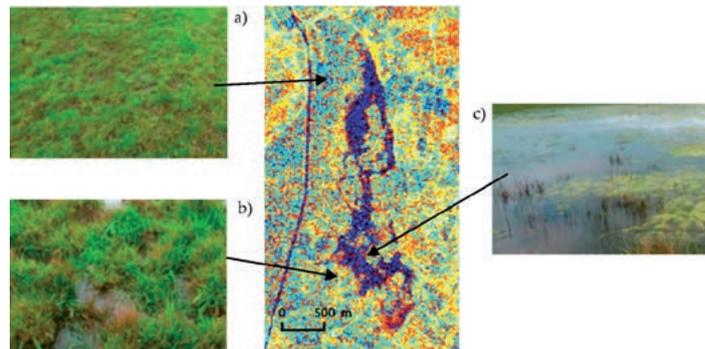
2.3.1 Prétraitements

L'utilisation de données radar nécessite quelques traitements préliminaires qui ont été réalisés avec le logiciel de l'Agence spatiale européenne SNAP [<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>]. Les quatorze images ont été calibrées de manière à obtenir le coefficient de rétro-diffusion σ_0 , puis géo-référencées et ortho-rectifiées afin d'exploiter les images dans un SIG. Elles ont ensuite été filtrées à l'aide d'un filtre de Perona-Malick.

2.3.2 Détection de l'inondation

La composition colorée radar [figure 2] permet de distinguer trois classes différentes : la prairie sèche [figure 2a], la végétation inondée [figure 2b] et l'eau libre [figure 2c]. Pour chacune des quatorze dates, ces trois classes ont été séparées en utilisant un algorithme de seuillage à hystérésis supervisé détaillé chez Cazals [Cazals et al., 2016], cette méthode est proche de celle utilisée par Boni [Boni et al., 2016]. En jaune-orangé, on distingue la végétation inondée mais également d'autres occupations du sol et certains champs ou zones urbaines. Afin de lever cette ambiguïté, l'eau avec végétation ne sera recherchée que dans les zones ayant été inondées en eau libre au moins une fois pendant la période couverte par la série temporelle.

Figure 2. Au centre : agrandissement d'une composition colorée radar ($R : \sigma_0VV, G : \sigma_0VH, B : \sigma_0VH - \sigma_0VV$) sur le marais communal de Lairoux. Trois tons se distinguent : a) en cyan, la prairie sèche, b) en jaune-orangé, la végétation inondée et c) en bleu sombre, l'eau libre.



2.3.3 Estimation de la précision

Afin de donner une estimation précise de la qualité des résultats, les cartes d'inondation obtenues ont été comparées à des simulations d'inondation. Ces simulations ont été réalisées en extrapolant le niveau d'eau enregistré par les sondes sur le modèle numérique de terrain. Afin de limiter les erreurs, chaque simulation est utilisée au sein d'une parcelle, dans une dépression, et dans un rayon de 500 m autour de la sonde. Cela nous donne quatorze simulations d'inondation pour chacune des onze sondes.

Cette méthode permet de simuler les zones inondées mais pas de séparer la végétation inondée de l'eau libre présente dans les prairies. Ainsi, pour valider les données, il est nécessaire de réunir les classes d'eau libre et de végétation inondée au sein d'une même classe de zone inondée.

La résolution spatiale des simulations est la même que celle du modèle numérique de terrain (MNT) qui les a engendrées, soit 1 m. Ces simulations ont été ré-échantillonnées pour être comparées aux cartes d'inondations obtenues avec les images radar dont le pixel est de 10 m. Les simulations sont ré-échantillonnées de manière à obtenir un pourcentage d'inondation pour chaque pixel de 10 x 10 m. Pour la validation, on ne s'intéressera pas aux pixels mixtes, dont le taux d'inondation varie entre 10 et 90 %.

3. Résultats et perspectives

3.1 Détection de l'inondation

Le seuillage permet d'extraire les surfaces d'eau libre, de végétation inondée et de prairie sèche pour les quatorze acquisitions. Cela confirme que la polarisation partielle VV/VH permet de distinguer la végétation inondée de la végétation sèche. En faisant l'hypothèse de continuité de l'inondation entre deux dates, une carte de durée d'inondation a été estimée. Un extrait du résultat est présenté sur la figure 3.

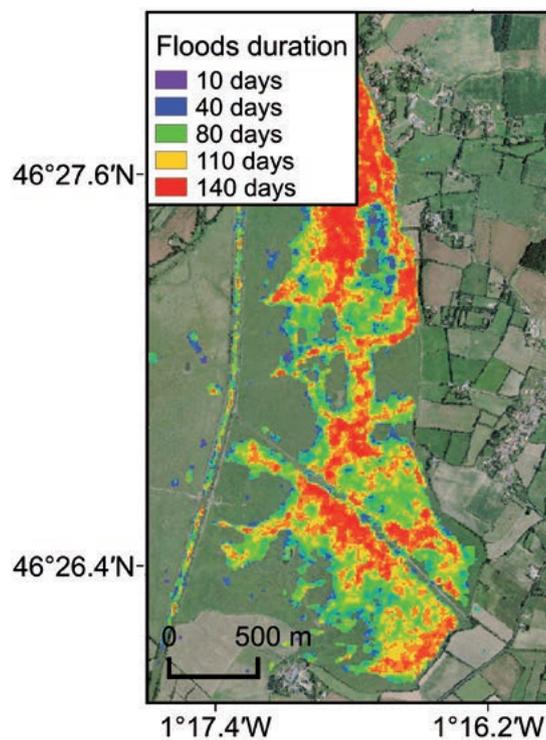


Figure 3. Durées d'inondation extraites par télédétection radar sur le marais communal de Lairoux dans le Marais poitevin.

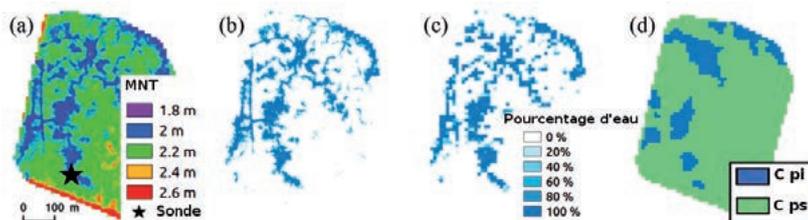
3.2. Estimation de la précision à l'échelle intraparcellaire

Les simulations d'inondation permettent une estimation précise de la qualité des résultats. Parmi les 85 049 pixels de validation, 35 % des échantillons sont des pixels mixtes, ils sont donc écartés. Seules 25 % des surfaces inondées restantes ont une largeur supérieure à 20 m, soit la résolution de Sentinel-1, on s'attend donc à une forte sous-détection des surfaces en eau.

La figure 4a représente une vue partielle du MNT sur une partie de la commune de Nalliers. Elle donne un bon exemple de la microtopographie des prairies du Marais poitevin. La figure 4b montre la simulation d'inondation réalisée à partir du niveau d'eau donné par la sonde P04, en figure 4c. On y constate les effets du ré-échantillonnage et, enfin, en figure 4d, le résultat obtenu avec l'image radar correspondante. On observe une forte corrélation spatiale entre les zones d'eau simulées et extraites sur le radar. Cependant, la carte obtenue avec le radar présente beaucoup moins de détails, en raison de la résolution décimétrique de l'image radar.

Figure 4.

- a) MNT autour de la sonde P04 ;
- b) Simulation d'inondation à 1 m de résolution le 17 avril 2015 ;
- c) Simulation d'inondation ré-échantillonnée à 10 m ;
- d) Carte de prairie inondée et de prairie sèche réalisée à partir de l'image Sentinel-1 du 17 avril 2015.



La comparaison numérique est donnée dans le tableau 2. On note une forte sous-détection : seules 40 % des zones inondées sont détectées. L'eau libre présente une faible erreur de commission (7 %), contrairement à la végétation inondée. Une étude plus poussée pour mieux caractériser l'eau avec végétation est en cours : la limite entre un sol humide, engorgé ou inondé n'est pas triviale.

Tableau 2 : Matrice de confusion obtenue pour les environs de onze sondes piézométriques pour les quatorze acquisitions

		Classification			Omission
		Eau libre	Eau végétation	Sec	
Référence simulation	Inondé	1 538	515	2 957	59 %
	Non inondé	10	439	49 823	1 %
Commission		7 %	46 %	6 %	

Précision globale : 94 % ; kappa : 0,51

3.3. Détectabilité des surfaces d'eau

Une comparaison entre les surfaces d'eau de la BD TOPO® et les surfaces d'eau libre cartographiées semi-automatiquement par le radar a été effectuée. Les surfaces d'eau détectées correctement sur le radar sont classées selon leur superficie afin d'établir un pourcentage de détection en fonction de l'aire [figure 5]. Il s'agit du résultat d'un seuillage semi-automatique et non d'une interprétation visuelle qui devrait être plus performante. Cette étude permet d'estimer qu'au-delà de 0,8 ha, 80 % des surfaces d'eau sont détectées. Ce résultat doit être relativisé car les 1 200 points d'eau issus de la BD TOPO® ont été numérisés par photo-interprétation sur des prises de vues aériennes antérieures à 2014. Ainsi, plusieurs discordances ont pu être constatées.

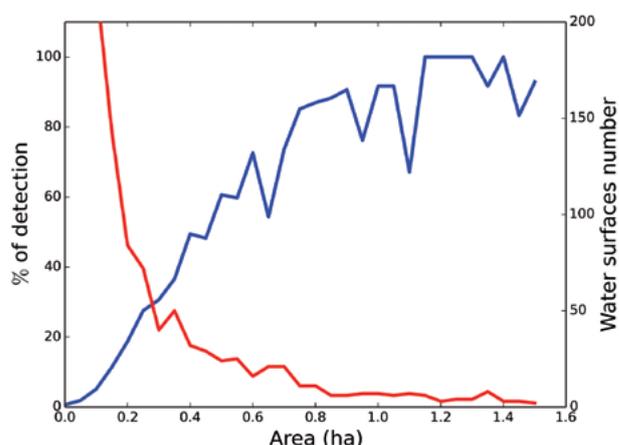


Figure 5. Pourcentage de détection des points d'eau par le radar (bleu) et nombre de points d'eau (en rouge) en fonction de l'aire.

4. Conclusion et perspectives

L'étude des séries temporelles Sentinel-1 en polarisation partielle VV/VH avec une résolution de 20 m permet d'estimer la durée d'inondation pour des surfaces de taille suffisante (> 0,8 ha), à échelle moyenne (échelle d'un département par exemple), à une haute fréquence temporelle et à coûts réduits pour les utilisateurs. La méthode de validation donne une estimation précise de la fiabilité des résultats. On note une forte sous-détection des surfaces en eau. En faisant l'hypothèse de stabilité du taux de détection, cette méthode permet les comparaisons intra- et inter-annuelles. L'approche proposée est opérationnelle : elle ne nécessite pas de relevés de terrain longs et fastidieux et les données utilisées sont gratuites.

Références bibliographiques

- **Bates, P.D., Horritt, M.S., Smith, C.N., Mason, D.**, 1997, « *Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling* », *Hydrological Processes*, 11(14), pp. 1777-1795.
- **Hess, L.L., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y.**, 1995, « *Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar* », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), pp. 896-904.
- **Martinez, J.M., Le Toan, T.**, 2007, « *Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data* », *Remote sensing of Environment*, 108(3), pp. 209-223.
- **Terrisse, J.**, 2012, « *Guide des habitats naturels du Poitou-Charentes : clefs de détermination et fiches descriptives des types d'habitats* », *Poitou-Charentes nature*, Fontaine-le-Comte.
- **Rapinel, S., Bonis, A., Oszwald, J., Taureau, F., Mansons, J., Bouzillé, J.B.**, 2015, « *Cartographie des végétations herbacées des marais littoraux à partir de données topographiques lidar* », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 210, 17 p.
- **Cazals, C., Rapinel, S., Frison, P.L., Bonis, A., Mercier, G., Mallet, C., Rudant, J.P.**, 2016, « *Mapping and Characterization of Hydrological Dynamics in a Coastal Marsh Using High Temporal Resolution Sentinel-1A Images* », *Remote Sensing*, 8(7), p. 570.
- **Boni, G., Ferraris, L., Pulvirenti, L., Squicciarino, G., Pierdicca, N., Candela, L., Pisani, A.R., Zoffoli, S., Onori, R., Proietti, C., et al.**, 2016, « *A prototype system for flood monitoring based on flood forecast combined with COSMO-SkyMed and Sentinel-1 data* ». *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 99, pp. 1-12.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'Établissement public du Marais poitevin pour la mise à disposition des données des sondes piézométriques, l'Institut national de l'information géographique et forestière pour le MNT Litto3D® ainsi que la BD TOPO® et l'Agence spatiale européenne pour les données Sentinel-1.



Suivi morphodynamique d'une annexe hydraulique rhénane restaurée par combinaison de méthodes d'imagerie terrestre

Mathieu **Koehl**, Pierre **Grussenmeyer**, Samuel **Guillemin**, Etienne **Supper**, Julie **Roy**
INSA de Strasbourg, ICube UMR 7357, Équipe TRIO (Téléédétection, Radiométrie et Imagerie Optique)

David **Eschbach**, Laurent **Schmitt**

Université de Strasbourg, LIVE (Laboratoire Image, Ville, Environnement), UMR 7362 CNRS-Unistra-ENGES, LTER « Zone Atelier Environnementale Urbaine »

Résumé

Le projet LIFE+ « *Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen* » a pour objectif de restaurer le fonctionnement hydromorphologique et écologique de l'hydrosystème : inondations dynamiques, transport sédimentaire grossier, mobilité latérale, échanges nappe-rivière, rajeunissement des successions végétales, renforcement du caractère hygrophile de la végétation, etc. À cet effet, une prise d'eau amont et un chenal de connexion nouvellement créés permettent de reconnecter le Rhin au Bauerngrundwasser, principal chenal de l'île. Les débits injectés varient de 2 à 80 m³/s en fonction de l'hydrologie du Rhin. Dans le cadre du suivi géomorphologique mené sur le nouveau chenal, plusieurs méthodes d'imagerie 3D ont été déployées pour modéliser les évolutions des formes fluviales. La lasergrammétrie a été utilisée pour modéliser l'état initial, avant les premières injections. Des acquisitions photogrammétriques et topo-bathymétriques ont été réalisées après chaque crue. Une chaîne de traitement a été développée pour quantifier les volumes d'érosion et de dépôt (budget sédimentaire). Les premiers résultats ont permis d'évaluer l'intensité de la morphodynamique fluviale et laissent apparaître des tendances évolutives futures à moyen terme.

Mots clés : suivi géomorphologique, analyse diachronique, topographie, photogrammétrie, lasergrammétrie

Abstract

The LIFE+ project “*Restoring dynamics of Rhine alluvial habitats on the Rohrschollen Island*”, aims to restore the hydromorphological and ecological functioning of the hydrosystem: bedload dynamics, channel mobility, surface water-groundwater exchanges, renewal of pioneer ecosystems. Thus, the Bauerngrundwasser (anastomosing channel of Rohrschollen Island) was reconnected to the Rhine by a floodgate and a new upstream connection channel. The water input can reach 80 m³/s, leading to dynamic overflows. In the frame of a geomorphic monitoring carried out on the new channel, 3D imaging methods were used to model the morphodynamical evolutions. A terrestrial laser scanner was used to model the pre-restoration state, before the first floods. The photogrammetry and topo-bathymetrical surveys were implemented after each floods. A data treatment chain was built to quantify volumetric changes (volumes of erosion and deposit) by using a sediment budget. First results show that these methods are relevant to

assess the intensity of hydro-morphological processes, as well as to give the future tendency of geomorphological adjustments.

Keywords: geomorphological survey, diachronic evolution, topography, photogrammetry, lasergrammetry

Introduction

Le Rhin est l'un des fleuves les plus artificialisés d'Europe, notamment entre Bâle et Bingen où l'essentiel des surfaces initiales de l'hydrosystème a disparu au profit de surfaces agricoles, industrielles, portuaires et urbaines [Carbiener, 1983 ; Herget et al., 2005 ; Tricart et Bravard, 1991]. Il subsiste aujourd'hui quelques lambeaux de milieux alluviaux, notamment sur les îles artificielles des aménagements en festons [Middelkoop et al., 2005 ; Uehlinger et al., 2009]. Les aménagements successifs ont engendré de nombreuses perturbations fonctionnelles, y compris dans les zones alluviales résiduelles : inondations rares et statiques, interruption de quasiment toute l'activité géomorphologique (érosion latérale, transport sédimentaire grossier, dépôt de bancs vifs graveleux, etc.), colmatage des annexes hydrauliques, banalisation des biocénoses, de leur caractère hygrophile, interruption des processus de rajeunissement des successions végétales, etc.

Stimulés par la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000), les projets de restauration du Rhin supérieur se sont multipliés depuis environ trois décennies [Schmitt et al., 2012]. Les plus ambitieux d'entre eux visent à redynamiser les fonctionnalités hydromorphologiques et hydroécologiques. C'est le cas de l'île du Rohrschollen, située à 8 km au sud-est de Strasbourg et classée en réserve naturelle nationale en 1997. Sur ce site, le projet LIFE+ « LIFE08 NAT/F/000471 Restauration de la dynamique des habitats alluviaux rhénans sur l'île du Rohrschollen », piloté par la ville de Strasbourg entre 2010 et 2015, vise à restaurer les habitats alluviaux typiques de l'île en agissant sur les processus hydromorphologiques : inondations dynamiques, crues morphogènes, transport sédimentaire, échanges nappe-rivière, etc. D'un point de vue technique, le projet a consisté à creuser un nouveau chenal *ex nihilo* pour reconnecter le Bauerngrundwasser (ancienne annexe hydraulique déconnectée dans sa partie amont) au Rhin. À l'amont de ce chenal, un important ouvrage hydraulique de prise permet de recréer des submersions dynamiques et fréquentes par l'injection d'un débit variable, pouvant atteindre 80 m³/s, sur des périodes potentiellement longues, en fonction de l'hydrologie du fleuve. Comme le débit à pleins bords du nouveau chenal a été volontairement sous-dimensionné à 20 m³/s, les submersions sont relativement fréquentes et longues et le chenal tend à s'ajuster spontanément aux nouvelles conditions hydrologiques.

Le fonctionnement post-restauration de l'hydrosystème est évalué grâce à un monitoring interdisciplinaire ambitieux (2012-2016, qui doit être prolongé jusqu'en 2021), à la fois abiotique et biotique : hydraulique-hydrologie, hydrogéologie et échanges nappe-rivière, transport solide, morphodynamique, hydrogéologie, écologie de la faune et de la flore, physicochimie de l'eau et des sédiments, etc. En 2014, une convention de partenariat a été mise en place entre le laboratoire LIVE, chargé du suivi scientifique, et l'INSA de Strasbourg. Entre chaque submersion écologique, le suivi des évolutions morphologiques sur le nouveau chenal est réalisé par photogrammétrie et tachéométrie. L'état initial a été réalisé par lasergrammétrie. Une comparaison diachronique, basée sur des modèles 3D, permet d'observer les évolutions morphologiques et d'estimer les volumes de sédiments érodés et déposés.

1. Enjeux et objectifs

Le suivi scientifique vise à évaluer les effets de la restauration en développant des approches et méthodes les plus innovantes possibles [Eschbach et al., submitted]. Rarement utilisée en géomorphologie fluviale, l'imagerie 3D se révèle être un outil de prospection et d'évaluation de grand intérêt pour : 1) suivre la dynamique morphologique d'un chenal ; 2) réaliser des budgets sédimentaires érosion-dépôt ; et 3) prédire les tendances d'évolutions morphologiques futures. Cet outil constitue pour les gestionnaires un moyen innovant de suivi à court et moyen termes.

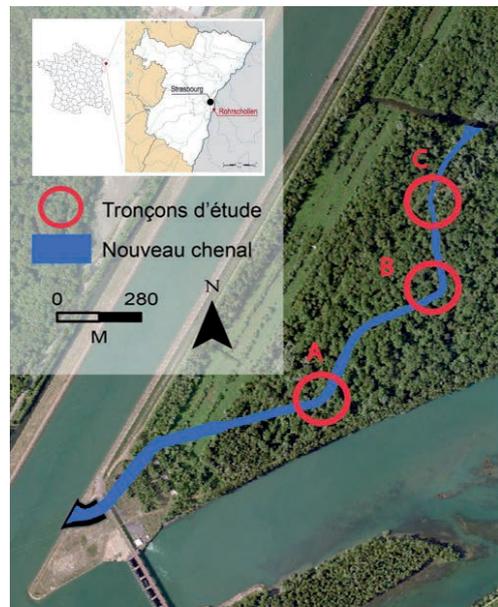
L'étude présentée ici s'organise autour de trois objectifs principaux :

- tester et adapter les méthodes d'acquisition et de modélisation 3D au suivi géomorphologique en milieu alluvial ;
- estimer les évolutions morphologiques du nouveau chenal à l'aide de comparaisons diachroniques ;
- quantifier les volumes de sédiments déplacés dans le nouveau chenal, exportés vers l'ancien chenal et déposés dans la plaine alluviale.

2. Méthodes, données et matériels

Sur le chenal, long d'environ 900 mètres, trois tronçons (A, B et C) ont été sélectionnés pour la modélisation en 3D. Ces derniers sont localisés dans les courbures du chenal où les évolutions morphologiques sont les plus intenses [figure 1].

Figure 1. Localisation du nouveau chenal et des trois tronçons suivis par imagerie 3D.



2.1 Levé topographique (tachéométrie)

Des méthodes de levé topographique conventionnelles accompagnent chaque campagne de mesures et permettent notamment de fournir des points précis de calage et de référence sur tout le linéaire du chenal. Plusieurs levés conventionnels ont été réalisés : le premier par la société *Transroute* qui a eu en charge les travaux de terrassement, les suivants par les topographes de l'INSA.

Le but de ces premiers relevés a été de mettre en place un canevas de points d'appuis permettant de géoréférencer les différents autres levés. Des stations totales ont été utilisées pour la mesure de l'ossature du canevas, lui-même positionné à partir du système de navigation par satellites RTK-GNSS (*Global navigation satellite system*). À partir de ce canevas de référence, un ensemble de points a été déterminé pour permettre le géoréférencement des mesures d'un scanner 3D terrestre, ainsi que de bandes d'images dans des projets photogrammétriques [cf. 2.3 Photogrammétrique].

D'autres relevés topographiques complets ont été effectués pour définir la topographie du chenal sous forme de points singuliers et de profils en travers comportant tous les points caractéristiques. Les profils sont espacés en moyenne d'une vingtaine de mètres, certains points caractéristiques intermédiaires ont été rajoutés en fonction de la configuration du chenal, notamment dans les courbures, sur les seuils et dans les mouilles.

La combinaison des points caractéristiques et des profils en travers permet la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) par triangulation. Bien que la résolution reste relativement faible, cette méthode permet d'obtenir un modèle complet du chenal.

Le temps d'acquisition de terrain est de l'ordre d'une journée. Ces levés permettent, après chaque événement hydrologique important, de disposer d'une information bathymétrique, d'un profil en long complet et de nombreux profils en travers pour suivre les évolutions morphologiques sur l'ensemble du chenal.

Les méthodes et instruments mis en œuvre permettent d'obtenir des points avec une précision de l'ordre de quelques centimètres (erreur moyenne quadratique [Emq] des positions planimétriques : 2,1 cm et des déterminations altimétriques : 0,9 cm).

2.2 Lasergrammétrie

La lasergrammétrie est la première méthode développée sur le chenal pour le suivi géomorphologique en complément des levés conventionnels. Elle a permis de réaliser un modèle numérique de référence sur les trois tronçons du chenal sous la forme d'un nuage de points qui a ensuite été maillé et texturé.

Un scanner 3D est un instrument de mesure par balayage laser reposant sur un principe de mesure de distances. Dans notre cas, nous avons utilisé un scanner 3D terrestre de type *FARO Focus 3D* permettant la mesure d'une scène complète en 360° en horizontale et verticale [figure 2].



Figure 2. Acquisition lasergrammétrique (Faro focus 3D) sur le tronçon C.

Des millions de points formant des nuages de points sont acquis en quelques minutes. Ces points correspondent à des données brutes qu'il s'agit ensuite de consolider et de géoréférencer par l'intermédiaire de cibles et de sphères réparties tout au long du chenal, et connues en coordonnées (relevés par tachéométrie).

La densité des nuages de points acquis dépend de la résolution du relevé scanner 3D qui peut être configurée par l'opérateur. On peut ainsi choisir d'acquérir des points distants entre eux de quelques millimètres à quelques centimètres. La précision relative du scanner est très bonne jusqu'à une distance de quelques dizaines de mètres. La densité des points mesurés est directement fonction de leur éloignement par rapport au scanner 3D.

Une chaîne de traitements a ensuite été mise en place pour passer des différents nuages de points bruts obtenus à partir de chaque station du scanner 3D à un nuage de points unique,

fusionné, géoréférencé et colorisé. En effet, en plus des points acquis en 3D, le scanner peut enregistrer des images (mosaïque d'images panoramique sphérique de 70 MPx) qui permettent d'associer une combinaison de couleurs (colorisation) à chaque point du nuage [figure 3].



Faro Focus 3D, INSA 2015

Figure 3. Colorisation du nuage de points obtenu par lasergrammétrie.

Pour pouvoir ensuite manipuler le nuage de points, ce dernier a été dégradé par un ré-échantillonnage en fonction des besoins. Il a également été débruité (bruits de mesure) et nettoyé ou segmenté, pour y supprimer la végétation et les branchages. L'excellente précision des nuages de points ainsi obtenus (de l'ordre du cm) permet de sélectionner cette modélisation comme un modèle de référence qui sera utilisé pour les analyses diachroniques et la comparaison méthodologique avec la photogrammétrie.

Concernant la méthode et le matériel utilisés dans cette approche, les avantages et les inconvénients de la lasergrammétrie sont les suivants :

Méthode et matériel utilisés : avantages et inconvénients de la lasergrammétrie	
-	Matériel se démocratisant, mais relativement onéreux
-	Durée de mise en place assez longue, suivie d'acquisitions de quelques minutes
-	Matériel encombrant et délicat à transporter (en zone difficilement accessible)
+	Chaîne de traitements élaborée, traitements relativement rapides
+	Obtention de nuages de points denses
+	Résultats homogènes
+	Précision centimétrique

2.3 Photogrammétrie

La méthode photogrammétrique a été utilisée pour modéliser l'évolution sur le long terme des trois tronçons d'étude. Une bande d'images terrestres (avec un fort taux de recouvrement) de chaque berge est ainsi acquise à partir de la berge opposée [figure 4]. Le taux de recouvrement des images est de l'ordre de 75 % à 85 %.

Des logiciels de traitement de type SfM (*structure from motion*, Agisoft Photoscan) permettent de générer des modélisations en 3D à partir de ces images en commençant par générer des nuages de points géoréférencés, sur la base de points homologues détectés dans les parties en recouvrement. Ces nuages peuvent ensuite être maillés, texturés, puis comparés aux nuages de points obtenus par lasergrammétrie.



D. Eschbach, 2015

Figure 4. Acquisition photogrammétrique (Canon EOS 5D Mark II) sur le tronçon A.

Cette méthode d'acquisition, qui consiste en des prises de vues terrestres perpendiculaires et obliques à la berge photographiée, a l'avantage d'être à la fois rapide et peu onéreuse. Du choix du matériel photographique dépendra la qualité des restitutions obtenues. Dans cette étude,



Figure 5. Cible codée permettant de faciliter le géoréférencement des images sous Photoscan.

nous avons mis en œuvre des appareils numériques reflex (*Canon EOS 5D Mark II*) sur lesquels ont été montés des objectifs calibrés de 28 mm de focale.

La consolidation des bandes d'images et le géoréférencement sont facilités par la mise en place de cibles codées détectables automatiquement dans le logiciel de traitement et dont la position en XYZ a été mesurée par tachéométrie [figure 5].

La photogrammétrie, tout comme la lasergrammétrie, ne permet pas de relever la bathymétrie. D'un point de vue méthodologique, les meilleurs résultats sont obtenus avec des photographies perpendiculaires aux berges. Toutefois, des prises de vues obliques peuvent s'avérer intéressantes pour améliorer la géométrie du levé et recréer des liens entre images, notamment dans le cas où un obstacle (ici souvent des embâcles) crée une rupture dans la continuité de la berge.

Les traitements comprennent trois étapes :

- l'orientation des images et la calibration de l'appareil photographique ;
- la génération du nuage de points (logiciel *Photoscan*) ;
- la préparation et le nettoyage des nuages de points (logiciels *3DReshaper* et *CloudCompare*).

La précision des nuages de points issus de la photogrammétrie peut s'estimer en comparant le modèle photo avec un modèle plus précis, ou en utilisant les points d'appui et leurs positions dans le nuage de points. Les Emq des observations obtenues sont dans ce cas de l'ordre de 5 cm, en fonction des tronçons et du nombre de cibles utilisées.

Concernant la méthode et le matériel utilisés dans cette approche, les avantages et les inconvénients de la photogrammétrie sont les suivants :

Méthode et matériel utilisés : avantages et inconvénients de la photogrammétrie	
+	Matériel compact, coût abordable
+	Acquisition très rapide (prise de photographies)
-	Chaîne de traitements longue et chronophage (plusieurs heures)
-	Méthode peu adaptée à des levés de grande étendue
-	Nécessité d'élaborer un canevas de référence
-	Précision demi-décimétrique

Les nuages de points issus de la lasergrammétrie permettent d'atteindre des Emq sur la position d'une cible proche du cm. Dans le cas de la photogrammétrie, cette Emq est de l'ordre de 5 cm en fonction des tronçons et du nombre de cibles utilisées.

3. Résultats

Le suivi fin par imagerie 3D à haute résolution (lasergrammétrie et photogrammétrie) est abondé d'une acquisition topo-bathymétrique au tachéomètre. Le couplage des méthodes permet d'obtenir des modèles combinés qui associent les points topo-bathymétriques de tout le chenal aux nuages de points lasergrammétriques et photogrammétriques des courbures, où les évolutions géomorphologiques sont les plus élevées.

3.1 Suivi morphodynamique

Des levés topographiques par lasergrammétrie ont débuté en 2014, avant les premières mises en eau du chenal de connexion. Du fait de la précision et de la densité de points acquis par le scanner *Faro Focus 3D*, cette première étape a permis la définition d'un modèle numérique 3D de référence. La topographie initiale (berges et fond du chenal) de trois zones d'études a pu être enregistrée.

Pour le suivi à moyen/long terme des trois tronçons, la photogrammétrie a été retenue. Cette méthode présente l'avantage d'être à la fois peu onéreuse par rapport à l'utilisation d'un scanner 3D et très rapide à l'acquisition. Au total, cinq périodes ont été suivies entre 2014 et 2016 (février et juillet 2014 / février et juin 2015 / mars 2016).

3.2 Analyse diachronique

Les évolutions morphodynamiques ont pu être comparées entre deux périodes de suivi. Une comparaison nuage-nuage apporte des informations visuelles sur la localisation des écarts entre deux nuages de points selon une échelle prédéfinie [figure 6b]. Ces données sont obtenues à l'aide du logiciel libre *CloudCompare* (EDF R&D). Il permet de calculer la distance en utilisant la méthode M3C2 entre deux trames de points, ici les berges du chenal. Parmi les différents algorithmes de calcul de la distance nuage-nuage, M3C2 cherche la direction la plus pertinente pour évaluer la distance, cette direction étant définie pour chaque point suivant la normale à la surface formée par les points voisins dans un rayon de recherche paramétrable [Supper, 2015]. Le modèle d'érosion-dépôt ainsi créé permet de réaliser des bilans sédimentaires par tronçons ou pour l'ensemble du chenal, comme présenté dans la figure 6a.

On observe une nette tendance à l'érosion sur l'ensemble du chenal (2 100 m³ de sédiments érodés contre 1 750 m³ de dépôts), notamment du fait d'une tendance générale à l'élargissement, avec une diminution de l'intensité entre 520 et 590 m, suivie d'une forte augmentation dans le tronçon C. La variation de l'intensité de l'érosion s'explique essentiellement par la morphologie du chenal : l'érosion est minimale sur les linéaires rectilignes et maximale au droit des berges concaves des courbures, comme l'illustre la figure 6b. Notons que le fait que l'érosion soit supérieure aux dépôts (déficit sédimentaire) s'explique également par l'absence d'apports de charge de fond par l'ouvrage de prise. En effet, ce dernier n'atteint pas le fond du bief canalisé du Rhin, lequel est par ailleurs dépourvu de charge grossière.

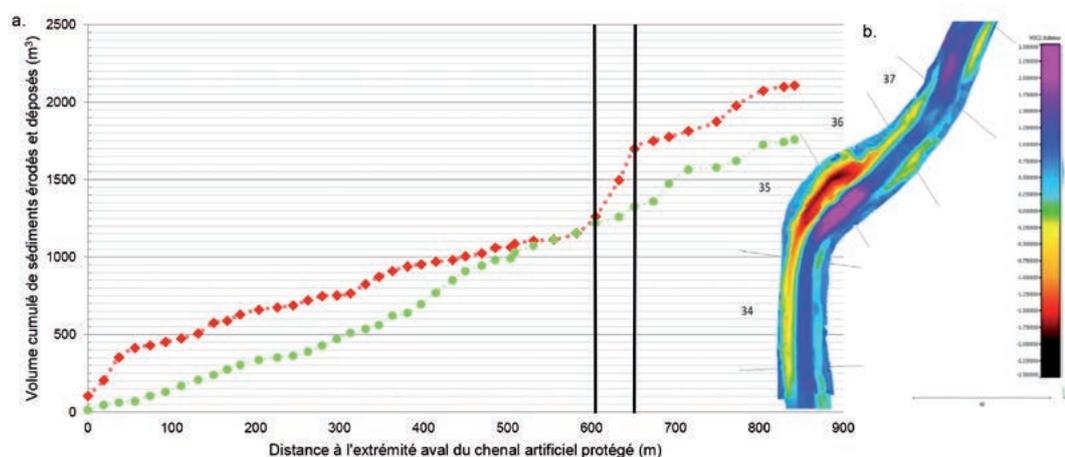


Figure 6.

a) Bilan sédimentaire cumulé global sur l'ensemble du chenal.

b) Comparaison diachronique des modèles combinés topo-bathymétriques de la campagne 1 (lasergrammétrie + bathymétrie par tachéométrie) et de la campagne 2 (photogrammétrie + bathymétrie par tachéométrie) sur le tronçon C.

Couleur chaude = érosion / couleur froide = dépôts.

3.3 Apports méthodologiques

Le suivi photogrammétrique est bien maîtrisé en milieu urbain ou sur des zones d'études stables. Dans le cas du suivi de berges à forte évolution, la méthode photogrammétrique a dû être adaptée. Ainsi, des tests nous ont montré que les meilleurs résultats en termes de reconnaissance d'objets et de précision du modèle final sont obtenus avec des recouvrements transversaux allant jusqu'à 85 %. Ceci implique bien évidemment un protocole de prise de vues plus strict. Les images obliques, compléments indispensables pour des restitutions en 3D avec des parties se recouvrant, n'apportent ici pas d'information intéressante du fait de la topologie simple des berges mais contribuent à améliorer la géométrie lors des calculs photogrammétriques de chaque bande.

Les études de précision ont montré que la lasergrammétrie a permis d'obtenir des résultats bien supérieurs à la photogrammétrie. Il en ressort un intérêt particulier de cette première méthode qui permet d'obtenir des modèles fins et précis pouvant servir de modèles de référence.

Néanmoins, la mise en œuvre de la lasergrammétrie est beaucoup plus complexe (transport et manipulation du matériel, nécessité de mesurer des points de référence communs à plusieurs nuages de points, etc.) alors que les résultats obtenus par photogrammétrie permettent, sans problème majeur si une précision décimétrique s'avère suffisante, d'obtenir des résultats de qualité sur l'évolution de la morphologie d'un chenal. Cette méthode est aussi plus facilement transférable à un gestionnaire pour un suivi à long terme. Mais dans cette perspective, il faudra encore veiller à densifier et à pérenniser le réseau de cibles de références mis en place sur les tronçons d'étude. Le protocole de prise de vues [Supper, 2015] préconise ainsi des paramètres de recouvrement, l'orientation des photographies (perpendiculairement à la berge, sans oublier l'ajout de vues obliques) et l'intégration de cibles de références dans les images.

4. Conclusion et perspectives

Les premiers résultats montrent l'intérêt de la modélisation 3D pour évaluer l'intensité des évolutions morphodynamiques sur le nouveau chenal. Les méthodes utilisées permettent une analyse diachronique et multiscalaire. Cette approche est particulièrement intéressante en géomorphologie fluviale car elle permet :

- de visualiser/localiser les évolutions géomorphologiques (érosion/dépôt) ;
- de quantifier ces évolutions à différentes échelles, de tronçons relativement courts à des linéaires fluviaux plus étendus : profil en travers, profil en long, budget sédimentaire, etc.

Le suivi topo-bathymétrique est une base essentielle pour spatialiser l'ensemble des données collectées sur le terrain et pour modéliser les évolutions morphologiques globales du chenal. Il permet également de compléter les nuages de points lasergrammétriques et photogrammétriques qui ont pour inconvénient d'exclure l'information bathymétrique. En outre, les levés topo-bathymétriques présentent une résolution moins élevée (cinq points bathymétriques/10 m), ce qui contraste avec celle des méthodes d'imagerie 3D (plusieurs points au m²) et intègre des biais dans l'estimation des volumes dont les marges d'erreur peuvent être importantes.

Pour limiter ces marges d'erreurs et affiner l'estimation des volumes déplacés à l'échelle globale, un survol lidar topo-bathymétrique de l'ensemble de l'île est envisagé en 2017. D'autre part, pour améliorer la reproductibilité des mesures topographiques et bathymétriques, des repérages pérennes seront mis en place au niveau de profils transversaux de référence (espacés d'environ 50 m) afin de faciliter les comparaisons diachroniques de l'intégralité des profils en travers.

Du fait des nombreux avantages déjà évoqués (coût, rapidité d'acquisition), le protocole d'acquisition photogrammétrique est le plus facilement transférable au gestionnaire de la réserve pour un suivi à long terme. Les traitements des données restent néanmoins lourds et complexes. Ils devront être automatisés et optimisés, un travail actuellement en cours.

Références bibliographiques

- **Carbiener, R.**, 1983, « *Le grand Ried Central d'Alsace : écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane* », Bulletin d'écologie, 14, 4, pp. 249-277.
- **DCE**, 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Adoptée le 23 octobre 2000, JO du 22 décembre 2000.
- **Eschbach, D., Piasny, G., Schmitt, L., Pfister, L., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Skupinski, G., Serradj, A.**, accepted, in revision. « *Thermal infrared remote sensing of surface water/groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France)* », Hydrological Processes.
- **Herget, J., Bremer, E., Coch, T., Dix, A., Eggenstein, G., Ewald, K.**, 2005, « *Engineering impact on river channels in the river Rhine catchment* », Erdkunde, 59, pp. 294-319.
- **Middelkoop, H., Schoor, M.M., Wolfert, H.P., Maas, G.J., Stouthamer, E.**, 2005, « *Targets for ecological rehabilitation of the lower rhine and Meuse based on a historic-geomorphologic reference* », Archiv für Hydrobiologie, Supplementband, Large Rivers, pp. 63-88.
- **Schmitt, L., Roy, D., Trémolières, M., Blum, C., Dister, E., Pfarr, U., Späth, V.**, 2012. « *30 years of restoration works on the two sides of the Upper Rhine River: feedback and future challenges* », Final Proc. Int. Conf. Integrative Sciences and Sustainable Development of Rivers, Lyon, France, pp. 101-103.
- **Schneider, P., Vogt, T., Schirmer, M., Doetsch, J., Linde, N., Pasquale, N., Perona, P., Cirpka, O.A.**, 2011, « *Towards improved instrumentation for assessing river-groundwater interactions in a restored river corridor* », Hydrology and Earth System Sciences, 15, pp. 2531-2549. doi:10.5194/hess-15-2531-2011.
- **Supper, E., Schmitt, L., Grussenmeyer, P., Eschbach, D.**, 2015, « *Suivi géomorphologique du chenal de reconnexion du Bauerngrundwasser par combinaison de méthodes d'imagerie terrestres et aériennes* ». Projet de fin d'étude, INSA de Strasbourg, 85 p.
- **Tricart, J., Bravard, J.-P.**, 1991. « *L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. Problèmes et méfaits* », Annales de Géographie, 100, pp. 668-713. doi:10.3406/geo.1991.21654
- **Uehlinger, U., Wantzen, K.M., Leuven, R.S.E.W., Arndt, H.**, 2009. « *The Rhine river basin* ». In: Tockner, K., Uehlinger, U., Robinson, C.T. (eds), Rivers of Europe. Amsterdam ; London : Academic Press, pp. 199-245.

Session C

Apports des différentes techniques lidar

- Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux
- Apports des données lidar pour la délimitation et la caractérisation des zones humides de fond de vallées alluviales *[résumé]*
- Caractérisation des coulées torrentielles survenues en 2010 dans le torrent du Prêcheur (Martinique) : apport des données lidar et AFM





Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux

Dimitri **Lague**, Alain **Crave**

Geosciences Rennes/OSUR, CNRS/Université Rennes 1 (dimitri.lague@univ-rennes1.fr)

Patrick **Launeau**

LPG/OSUNA, Université Nantes/CNRS

Cyril **Michon**, Emmanuel **Gouraud**, W. **Gentile**

Fit-Conseil, Nantes

Florentina **Moatar**

GéHCO, Université F. Rabelais, Tours

Laurence **Hubert-Moy**

LETG COSTEL/OSUR, Université Rennes 2

Résumé

Les techniques lidar (*light detection and ranging*) aéroportées, terrestres et les approches par photogrammétrie/*structure from motion* (SfM) 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 technologiquement matures, 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 (SfM) 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 1 064 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 with 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.

Keywords: airborne lidar, bathymetry, fluvial geomorphology, riparian vegetation, big data

1. Introduction et problématique de la bathymétrie 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 SfM. 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 1 000 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 *et Lague*, 2012], tout en permettant la détection de changements très fins (p. ex., 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 (p. ex., profils topographiques) et de convertir ces données en informations cartographiques (p. ex., modèle numérique de terrain), mais aussi d'extraire des informations impossibles à obtenir avec des méthodes traditionnelles (p. ex., 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 où, par définition, les zones submergées constituent l'objet

central d'intérêt. Les lidar aéroportés et terrestres utilisent des lasers fonctionnant dans le proche ($\lambda = 1\,064\text{ nm}$) ou le lointain ($\lambda = 1\,550\text{ nm}$) 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 (p. ex., 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 comparables aux données topographiques à haute résolution et ne permettent pas 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] :

1) le sonar multi-faisceau n'est mobilisable que pour les cours d'eau navigables et profonds ($> 5\text{ m}$), 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 ;

2) 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 ;

3) les lidars bathymétriques côtiers existent depuis de nombreuses années. Ils utilisent un puissant laser vert ($\lambda = 532\text{ nm}$) 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 [p. ex., Bailly et al., 2010] pour trois raisons : 1) leur coût d'utilisation est très élevé ($> 1\,000\text{ €/km}^2$) ; 2) l'empreinte laser est de 1 à 2 m de diamètre, ce qui couplé à une densité de points faible (0,1-1 pt/m²), se traduit par une résolution trop faible pour les cours d'eau de taille moyenne ; 3) la détection des faibles profondeurs ($< 0,5\text{ m}$) et la performance 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 lidars topo-bathymétriques offrant une empreinte laser réduite (tache laser inférieure à 50 cm), une fréquence d'acquisition élevée (densité de points $> 2\text{ pts/m}^2$), 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.

Conscientes 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.

Tableau 1 : Comparaison des différentes méthodes existantes de mesure synoptique de la bathymétrie

	Topographie	Végétation	Bathymétrie	Linéaire mesurable
Lidar topo	++	++	o	> 10 km
Photo/SfM drone	++	+	+ *	< 10 km
Méthode spectrale	o	o	+	1 – 100 km
Lidar topo-bathy	++	++	++	> 10 km

Types de mesure : o : impossible, + : possible mais données limitées, ++ : parfaitement adapté
* en cours de développement

2. Méthodes, données et matériels

2.1 Caractéristiques de l'instrument Titan

L'instrument Titan DW (*Dual Wavelength*) développé par la société *Teledyne-Optech* en 2015, utilise deux longueurs d'onde laser : $\lambda = 1\,064\text{ nm}$ et $\lambda = 532\text{ nm}$ [figure 1 page suivante]. L'instrument peut fonctionner comme un lidar topographique en volant jusqu'à 1 900 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 de 36 pts/m² sur les parties émergées (532 nm + 1 064 nm), et de 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 (un 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.

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 basées 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.

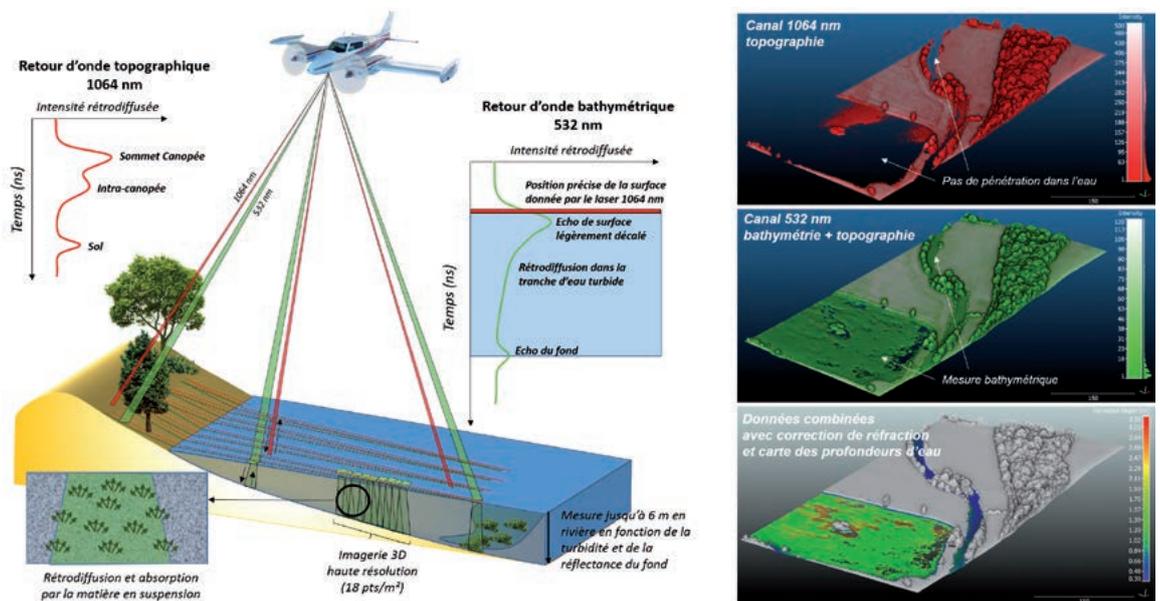


Figure 1. **Gauche** : principe de fonctionnement du lidar topo-bathymétrique bispectral. Le numériseur installé avec le Titan peut enregistrer le retour d'onde complet de chaque tir pour un post-traitement avancé. **Droite** : données obtenues sur une zone d'étang et de petit cours d'eau près de Gisors, et carte topo-bathymétrique résultante. Les profondeurs maximales sont de 0,5 m dans le cours d'eau et de 3,2 m dans l'étang. La mesure bathymétrique est complète.

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 qui permettra à l'instrument de détecter le fond. Ces facteurs peuvent se comprendre en étudiant un retour d'onde bathymétrique [figure 1] composé de trois 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 1 064 nm ne pénétrant pas l'eau, donne en revanche une excellente mesure de la position de la surface d'eau (± 5 cm). Tout couvert végétal en surface de l'eau (p. ex., 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 six à huit 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 bimoteurs. 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. À 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 (huit heures de vol), ce qui correspond à plus de douze 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 trente minutes à onze 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 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 adaptées 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.

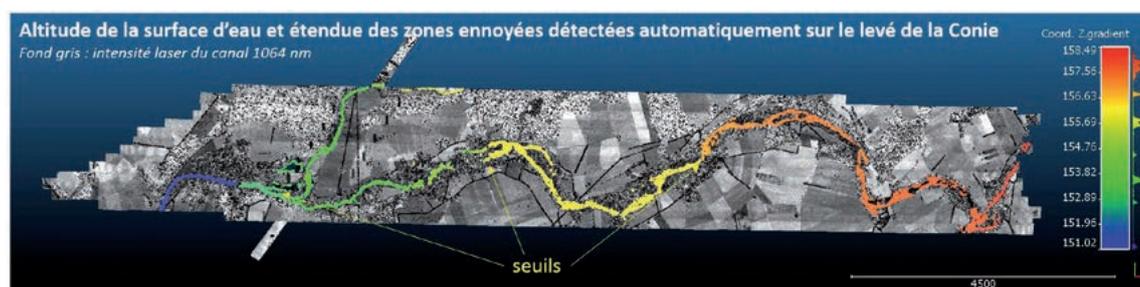


Figure 2. Levé de la Conie (affluent du Loir) et cartographie des zones inondées. Les variations rapides d'altitude de la surface d'eau indiquent la présence d'un seuil. Les 25 km de linéaire de rivière ont été acquis en 3,5 heures de vol.

3. Résultats

3.1 Profondeurs atteintes et couverture bathymétrique

Pour l'Ain, rivière à fond clair et faible densité de végétation aquatique, volée à 330 m d'altitude, la profondeur maximale atteinte a été de 4 m, avec une forte diminution 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 [figure 3]. Pour cette rivière profonde et large, la stratégie suivie a été de voler en été durant les débits d'étiages les plus faibles.

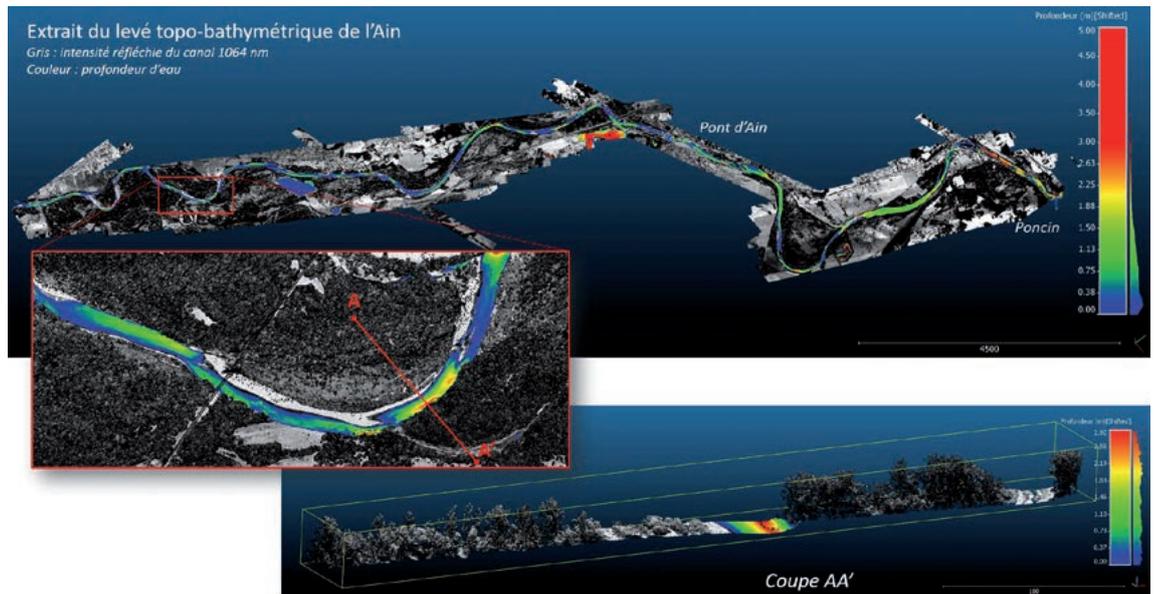


Figure 3. Extrait des données acquises sur l'Ain. On note une parfaite continuité entre les données topographiques et bathymétriques.

Pour la Conie [figure 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 :

- 1) 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 ;
- 2) la couverture dense de végétation aquatique et de renoncules en surface d'eau a fortement limité la mesure bathymétrique. Ce vol, réalisé durant les phases de test de l'instrument, nous enseigne 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 [figure 4].

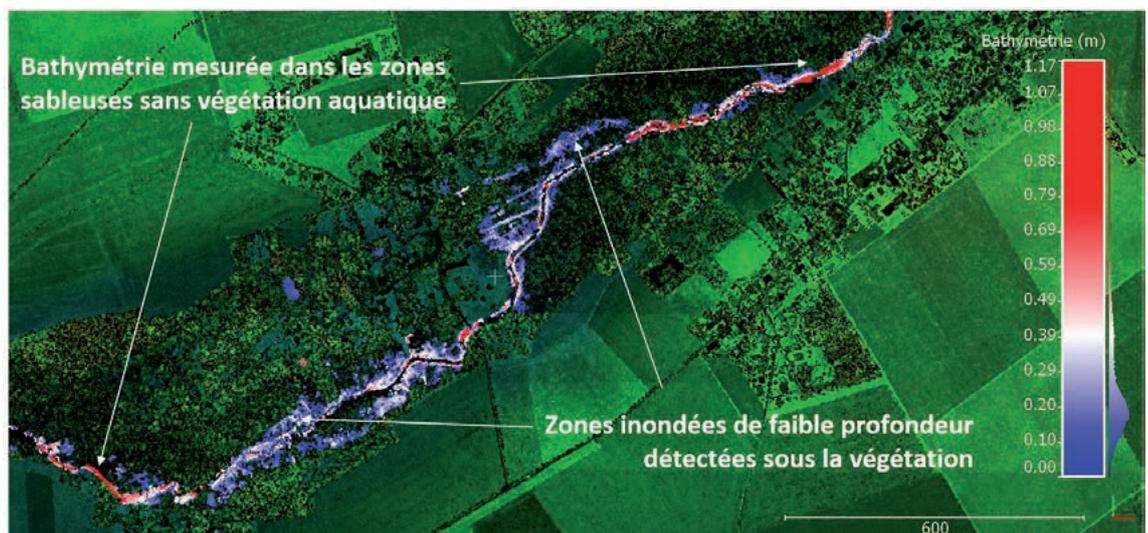


Figure 4. Détail de la Conie montrant la présence de zones ennoyées de faible profondeur sous la canopée étroitement connectées au cours d'eau principal.

À 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 coûts 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 [tableau 1]. Les autres techniques existantes nécessitent de combiner différentes techniques (p. ex., 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 coût 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 coût de mobilisation plus élevé. Dans le cas de l'Ain, le coût 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 coût 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. À titre de comparaison, un levé lidar bathymétrique côtier dépasse 1 000 €/km², alors que pour du lidar topographique, les coûts varient de 40 à 100 €/km² en fonction de la densité de points recherchée. En mode strictement topographique, le lidar Titan présente des coûts de mobilisation similaires, voire 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 coût 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 trois 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. À 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'instruments. 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 successives 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.

4. Conclusions et perspectives

Les premiers résultats obtenus sur différentes rivières françaises montrent que la mesure topo-bathymétrique 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 matures 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.

Références bibliographiques

- **Bailly, J.-S., Le Coarer, Y., Languille, P., Stigermark, C.-J., Allouis, T.**, 2010, « *Geostatistical estimations of bathymetric lidar errors on rivers* », *Earth Surf. Process. Landforms*, 35(10), pp. 1199-1210, doi:10.1002/esp.1991.
- **Brodu, N., Lague, D.**, 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), pp. 121-134, doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.
- **Lague, D., Brodu, N., Leroux J.**, 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., Roberts, D.A., Lawrence R.L.**, 2009, « *Spectrally based remote sensing of river bathymetry* », *Earth Surf. Process. Landforms*, 1059(March), pp. 1039-1059.
- **Mandlburger, G., Hauer, C., Wieser, M., Pfeifer N.**, 2015, « *Topo-bathymetric lidar for monitoring river morphodynamics and instream habitats-A case study at the Pielach River* », *Remote Sens.*, 7(5), pp. 6160-6195, doi:10.3390/rs70506160.
- **McKean, J., Nagel, D., Tonina, D., Bailey, P., Wright, C.W., Bohn, C., Nayegandhi A.**, 2009, « *Remote sensing of channels and riparian zones with a narrow-beam aquatic-terrestrial lidar* », *Remote Sens.*, 1(4), pp. 1065-1096, doi:10.3390/rs1041065.
- **Pan, Z., Glennie, C., Hartzell, P., Fernandez-Diaz, J., Legleiter, C., Overstreet, B.**, 2015, « *Performance Assessment of High Resolution Airborne Full Waveform lidar for Shallow River Bathymetry* », *Remote Sens.*, 7(5), pp. 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., Carbonneau, P.E., Visser, F., Maddock, I.P.**, 2015, « *Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry* », *Earth Surf. Process. Landforms*, 40(1), pp. 47-64, doi:10.1002/esp.3613.

Remerciements

Les données de l'Ain ont été acquises pour le compte et en collaboration avec Électricité 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 économique et régional (FEDER).

Les données de la Conie ont été acquises grâce au soutien de l'établissement public Loire, du FEDER et de l'AELB (projet Régulation thermique).



Apports des données lidar pour la délimitation et la caractérisation des zones humides de fond de vallées alluviales

Sébastien **Rapinel**

LETG-RENNES COSTEL UMR CNRS 6554, Université Rennes 2, place du recteur Henri-Le Moal, 35043 Rennes
ECOBIO UMR CNRS 6553, Université Rennes 1, avenue du général-Leclerc, 35000 Rennes

Marianne **Laslier**, Jean **Nabucet**, Simon **Dufour**, Laurence **Hubert-Moy**

LETG-RENNES COSTEL UMR CNRS 6554, Université Rennes 2, place du recteur Henri-Le Moal, 35043 Rennes

Résumé

Les zones humides de fond de vallée jouent un rôle important pour la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité. L'évaluation des fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques de ces milieux à large échelle reste un enjeu scientifique, technique et opérationnel majeur. Or le développement de données lidar (*light detection and ranging*) offre l'opportunité de caractériser, sur de grandes superficies, certains paramètres structurels indispensables à une évaluation fonctionnelle pertinente comme la micro-topographie ou la structure interne du couvert végétal. Dans cette présentation, deux domaines d'application sont exposés. Premièrement, il s'agit de montrer l'apport opérationnel des données lidar pour la délimitation des zones humides et la cartographie du réseau de drainage en plaine. Pour cela, des données lidar ont été acquises sur un site de 132 km², le long du Couesnon en Bretagne (*Leica ALS 50 SN63*, densité de quatre points au m², précision altimétrique \leq à 10 cm, bande du proche infrarouge, angle maximal de 28°). La cartographie et la caractérisation du réseau de fossés ont été obtenues par classification orientée objet du modèle numérique de terrain (MNT) dérivé des données lidar. La délimitation des zones humides a été obtenue par normalisation et seuillage des altitudes par rapport au cours d'eau. Afin de calibrer l'analyse des données lidar, 54 relevés pédologiques et deux transects topographiques ont été réalisés sur le terrain. Ces résultats démontrent que les données lidar permettent d'identifier, à large échelle, les limites externes mais aussi internes des zones humides au 1 : 5 000^e avec une précision de 87 %. De fait, plus de 1 900 fossés ont été identifiés sur le site d'étude et caractérisés, y compris sous couvert arboré. Deuxièmement, nous présentons les premiers résultats de l'exploitation de données lidar plus riches que les premières, acquises sur un tronçon de plus de 30 km de la Sélune (Basse-Normandie) : données bispectrales, à retour d'onde complète et avec une très haute densité de points. L'apport potentiel de ce type de données pour la caractérisation de la structure interne du couvert végétal, notamment pour l'identification des morphologies et des espèces de la ripisylve, est ainsi testé. Enfin, la faisabilité de la mise en œuvre et de l'exploitation de ces deux types de données lidar est discutée dans une perspective opérationnelle.

Mots clés : fossés, hydrodynamisme, évaluation fonctionnelle, végétation, MNT.

Thèmes

- *Analyse des caractéristiques physiques des corridors fluviaux à différentes échelles spatio-temporelles par des méthodes 3D, lidar : exemples et perspectives d'application.*
- *Techniques, méthodes et expériences appliquées à d'autres milieux et possiblement exportables ou adaptables aux corridors fluviaux.*



Caractérisation des coulées torrentielles survenues en 2010 dans le torrent du Prêcheur (Martinique) : apport des données lidar et AFM

Anouk **Ville**, Franck **Lavigne**, Frédéric **Gob**

Laboratoire de Géographie Physique (LGP/CNRS UMR 8591, Université Panthéon-Sorbonne, Paris 1)

Cyril **Aubaud**, Valérie **Clouard**

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP)

Résumé

La rivière du Prêcheur, située dans le nord-ouest de l'île de la Martinique, est un torrent appartenant au massif volcanique de la montagne Pelée. Cette rivière est en situation d'excédent sédimentaire, ce qui la rend extrêmement instable. Depuis les années 1950, une large paroi surplombant son principal affluent de tête de bassin, la rivière Samperre, montre des signes d'instabilité qui se traduisent par de fréquents glissements de terrain. Les masses sédimentaires éboulées sont par la suite emportées par des lahars de magnitude variable dont l'un particulièrement remarquable survenu en juin 2010. La dynamique de ces lahars a pu être étudiée grâce à deux géophones (*acoustic flow monitoring*, [AFM]). À partir de plusieurs séries d'images lidar (*light detection and ranging*), une analyse diachronique du relief du fond de vallée a permis de modéliser en trois dimensions le fond de vallée avant et après les éboulements ainsi qu'à la suite de plusieurs lahars de forte magnitude. Nous avons ainsi montré que 56 % des masses éboulées ont été évacuées en mer laissant, au terme de cette étude, près de la moitié de ces sédiments toujours stockés dans le lit. Ces derniers représentent un risque important pour la commune du Prêcheur.

Mots clés : AFM, lahar, lidar diachronique, Martinique, risque torrentiel

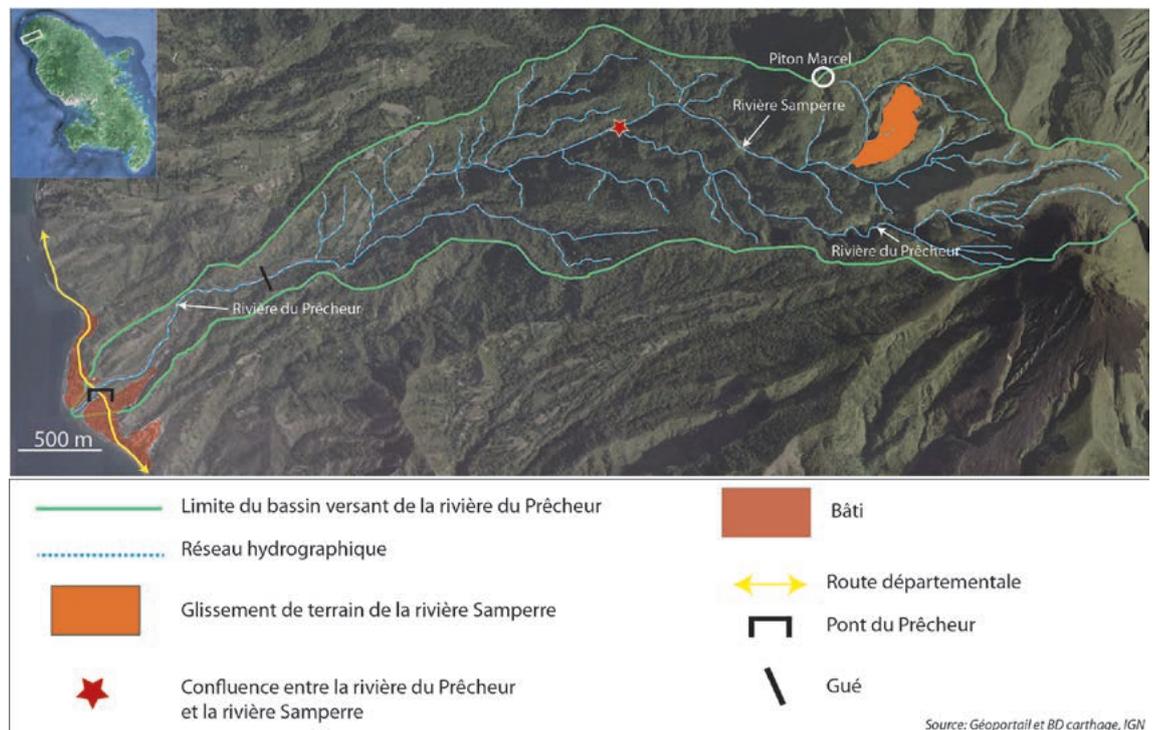
Abstract

Prêcheur River is a torrent located in the northwest of Martinique on the volcanic massif of mount Pelee. This stream is characterized by an excess of sediment, making its bed extremely unstable. Since the 1950's, a rock wall overhanging its main tributary of the upper catchment (Samperre River) has shown frequent signs of instability, leading to numerous landslides. The resulting slumped debris is carried out through the fluvial system by successive lahars (e.g. the massive lahar that occurred in June 2010). The dynamics of these lahars have been studied using two geophones (AFM) and several series of lidar images. A diachronic analysis allowed 3D-models of the bed to be built before and after the landslides and the consecutive lahars. It has been calculated that 56% of slumped debris have been washed away into the ocean by the lahars. At the end of this study, almost half of the sediment still remained stocked in the river bed, representing a significant risk for the Precheur municipality.

Keywords : AFM, diachronic lidar, lahar, Martinique, torrential hazard

Introduction

La rivière du Prêcheur [figure 1] est un torrent appartenant au massif volcanique de la montagne Pelée en Martinique. Ce torrent est influencé par les fortes précipitations du climat tropical et montagneux du nord de l'île (> 6 000 mm/an) et est régulièrement soumis aux lahars. Ce type de mouvement de terrain correspond au remaniement, sous forme de lave torrentielle, des matériaux volcanoclastiques. En milieu volcanique tropical, les lahars représentent un risque important et sont considérés comme le principal agent morphogène qui peut inciser les fonds de vallée sur des dizaines de mètres [Lavigne, 1998 ; Lavigne et al., 2000].



La rivière du Prêcheur est aujourd'hui la seule de Martinique sur laquelle des lahars potentiellement destructeurs ont récemment été observés. Elle est en effet en situation d'excédent sédimentaire, ce qui la rend extrêmement instable. La présence du bourg du Prêcheur à l'aval de la rivière, constitue un enjeu socio-économique important. L'unique route reliant les villages du nord-ouest de la montagne Pelée au reste de l'île a notamment été coupée à plusieurs reprises suite aux passages de ces lahars.

L'histoire de ce cours d'eau [Bouloc, 1981 ; Sedan et al., 1998 ; Meunier, 1999 ; Saffache, 2001 ; Aubaud et al., 2013] fait état de plusieurs crises liées à l'occurrence de nombreux lahars de différents types. Le torrent du Prêcheur, comme de nombreuses autres rivières du flanc ouest de la montagne Pelée, a été affecté par des lahars synéruptifs et post-éruptifs lors des éruptions de 1902 et 1929 [Lacroix, 1904] ; la première étant tristement célèbre pour avoir totalement détruit la ville de Saint-Pierre. Depuis 1929, l'activité volcanique ayant cessé, le bassin du Prêcheur est affecté par des lahars non éruptifs qui trouvent leur origine dans d'importants éboulements sur un escarpement instable de 300 m de hauteur localisé sur la rivière Samperre affluente du torrent du Prêcheur [figures 1 et 2].

Cette étude s'intéresse aux cinq années qui ont suivi une crise majeure consécutive à l'éboulement survenu le 11 mai 2010 sur l'escarpement de la rivière Samperre et qui a été à

l'origine de nombreux lahars [Clouard et al., 2013 ; Aubaud et al., 2013]. Le lahar du 19 juin 2010 constitue l'évènement le plus important ayant inondé le bourg du Prêcheur et détruit le pont de la route départementale [figure 3] [Aubaud et al., 2013].



Figure 2. Escarpement de la rivière Samperre (10 juin 2010).



Figure 3. La crise de 2010 : le pont du Prêcheur :
à gauche : vue du pont après le lahar du 17 mai 2010 ; à droite : vue du pont après le lahar du 19 juin 2010.

1. Enjeux et objectifs

En couplant l'étude diachronique de deux modèles numériques de terrain (MNT) à l'analyse de données géophysiques, les objectifs de cette étude sont de quantifier les transferts sédimentaires à l'échelle de la rivière, en mettant en évidence les différentes zones d'érosion et d'accumulation suite aux lahars de 2010 afin de :

- mieux comprendre les mécanismes de déclenchement des lahars de la rivière du Prêcheur grâce à la collecte des données issues de l'instrumentation géophysique de la rivière. Cette dernière a été équipée de deux géophones et d'un pluviomètre par l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique – Institut de physique du globe de Paris (OVSM/IPGP) depuis la fin des années 1990 ;

- évaluer l'impact des lahars sur la morphologie du lit à partir de deux MNT issus de données lidar. Ils permettent une analyse diachronique de la morphologie de la vallée avant (mars 2010) et après le glissement du 11 mai 2010 et les lahars qui en ont découlé (juillet 2010). Les volumes d'érosion liés au glissement d'une partie de la paroi de l'escarpement de la rivière Samperre ont été mesurés et les volumes de dépôts engendrés par les lahars le long de la rivière du Prêcheur calculés.

2. Méthodes, données et matériels

La méthodologie employée se décompose en deux parties. Tout d'abord, les signaux des deux géophones (AFM) ont été traités afin d'identifier et d'analyser la dynamique des principaux lahars survenus en 2010. Les géophones enregistrent toutes les secondes les vibrations du sol émises par le charriage des blocs dans le fond du lit lors d'un lahar ou d'une forte crue. Le signal émis est amplifié et exprimé à travers trois bandes de fréquences : 1) signal toutes fréquences (FULL : 10-300 Hz) ; 2) signal basses fréquences (HiLo : 10-100 Hz) ; et 3) signal hautes fréquences (HiHi : 100-300 Hz). Les données brutes de chaque fréquence sont exprimées en millivolt (mV) sur une gamme allant de 0 à 4 000 mV. Les basses fréquences (HiLo) permettent de détecter des coulées de débris ou les écoulements hyperconcentrés (lahars) alors que les hautes fréquences (HiHi) détectent les écoulements liquides de faible intensité de type crue [Lavigne et al., 2000 ; Van Westen et Daag, 2005]. Les deux géophones (CPMA et RPRE) ont été installés en 1998 par l'OVSM/IPGP [figure 4]. CPMA est situé à Case Petit à environ 300 m de la rivière en rive droite à 150 m d'altitude et RPRE à l'amont en rive gauche de la rivière Samperre, à une trentaine de mètres du lit à 450 m d'altitude. En couplant les signaux des géophones et la chronologie des lahars de 2010 [Aubaud et al. 2013], les différents événements ont pu être analysés.

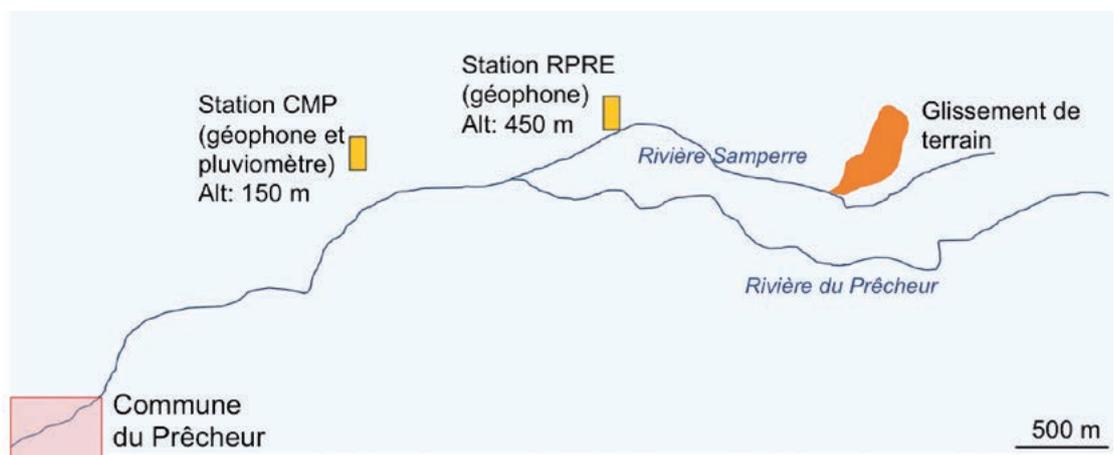


Figure 4. Localisation des géophones et du pluviomètre.

Le géophone situé en aval (CPMA) est associé à un pluviomètre à auget d'une résolution de 0,5 mm. Ce dernier a permis de caractériser les événements pluvieux potentiellement déclencheurs des lahars (quantité, durée, intensité des pluies).

Dans un deuxième temps, l'évolution morphologique de la rivière a été étudiée à partir de plusieurs images lidar. Les premières datent de mars 2010 (avant les lahars, MNT réalisé en partenariat avec l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), l'État, le Service hydrographique et océanographique de la Marine [Shom] et l'Agence des aires marines protégées, dans le cadre du programme Litto3D® et cofinancé par l'Europe). Les secondes datent de juillet 2010 (après les lahars, MNT réalisé par la société Helimap et financé par la DEAL

Martinique). En superposant ces MNT, les volumes d'accumulation et d'érosion liés aux matériaux des éboulements et des matériaux transportés par les lahars ont pu être calculés. Le MNT de juillet 2010, post-lahars est associé à des images orthorectifiées d'une résolution de 0,2 m.

3. Résultats et perspectives

3.1 Les lahars conditionnés par le stock sédimentaire et les précipitations

L'occurrence d'un lahar dépend non seulement du stock de matériaux mobilisables mais également de la pluviométrie. Ce lien entre stock sédimentaire, pluviométrie et déclenchement d'un lahar apparaît clairement dans la rivière du Prêcheur en 2010. La figure 5 renseigne, pour la période allant d'avril à décembre 2010, sur le nombre d'éboulements journaliers selon leur intensité (déterminé à partir du site internet de l'OVSM), l'occurrence des lahars et leur magnitude d'après la chronologie de Aubaud *et al.* (2013), ainsi que sur la pluviométrie mensuelle cumulée d'après les données pluviométriques de la station CPMA. On dénombre un total de 267 éboulements, 51 d'intensité forte et 1 d'intensité très forte (celui du 11 mai 2010). Il en ressort que l'intensité et le nombre d'éboulements ne sont pas homogènes dans le temps. Le mois de mai est le plus touché avec 61 % des éboulements survenus sur la période étudiée. La majorité des lahars se sont, quant à eux, produits aux mois de mai (20 %) et de juin (28 %). Il y a donc une bonne concordance entre un apport massif de matériaux survenu entre le 8 et le 31 mai (où 44 % des éboulements sont d'intensité forte et très forte) et le nombre de lahars déclenchés entre le 13 mai et le 24 juin (48 % des lahars de 2010). En mettant en relation ces observations avec la pluviométrie, il semble que les mois de mai et de juin soient les moins pluvieux de l'année (avec respectivement 168 mm et 290,5 mm). À l'inverse, les deux mois les plus pluvieux sont ceux d'octobre (avec 487 mm) et de novembre (avec 453 mm), et concentrent seulement 12 % des lahars, tous de magnitude faible. L'apport sédimentaire est, quant à lui, très faible avec 8 % des éboulements dont une majorité peu intense.

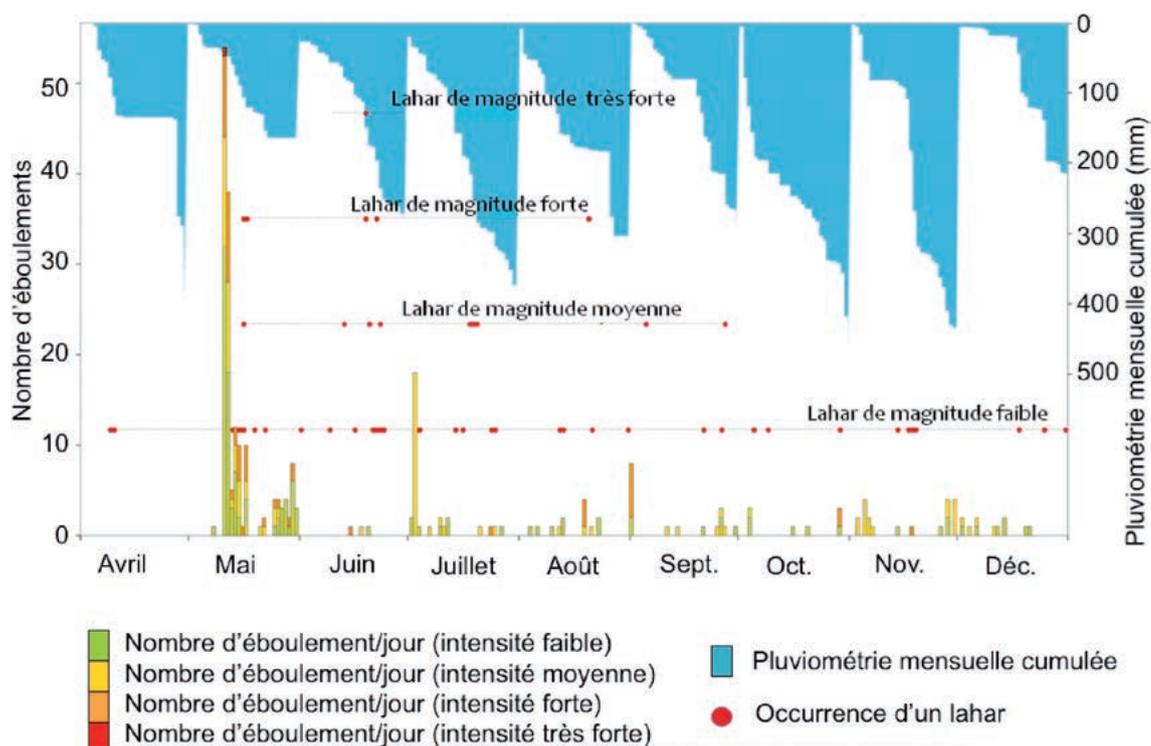


Figure 5. Chronologie des éboulements et des lahars par rapport à la pluviométrie.

Il ressort de cette analyse que la pluviométrie ne semble pas être une condition suffisante pour déclencher les lahars et que la disponibilité de matériaux dans le lit apparaît comme le principal facteur explicatif. Néanmoins, une étude de la pluviométrie déclenchante des lahars doit être approfondie car elle est à l'heure actuelle fortement sous-estimée. Le pluviomètre actuel est situé à 300 m d'altitude, à l'aval de la vallée, alors que les précipitations sont deux fois plus importantes à l'amont, zone de déclenchement et de départ des lahars. De plus une quantification du volume des éboulements serait souhaitable afin d'avoir une idée précise des apports sédimentaires dans la vallée (la photogrammétrie pourrait constituer une méthode intéressante et peu coûteuse).

3.2 Analyse des données AFM

L'analyse des signaux AFM montre qu'il existe plusieurs formes de signaux correspondant à un même type d'écoulement (lave torrentielle, hyperconcentré ou fluvial). Une typologie des signaux enregistrés a été réalisée, différenciant les lahars caractérisés par une seule pulsation, de ceux caractérisés par plusieurs pics. Le lahar du 19 juin [figure 6], évènement paroxysmal de la crise, est particulier dans la mesure où le signal est complètement saturé durant l'évènement. Le signal a été déclenché brutalement et s'est maintenu à haute intensité pendant près de quinze heures. La pluie (15 mm/h) a débuté quarante minutes avant le déclenchement du lahar et est restée relativement constante pendant les premières heures de l'évènement (47,5 mm de pluie cumulée). Bien que ce lahar ait été très important, la vitesse du front, calculée à partir du décalage entre les deux géophones, est restée relativement lente (1,8 m/s).

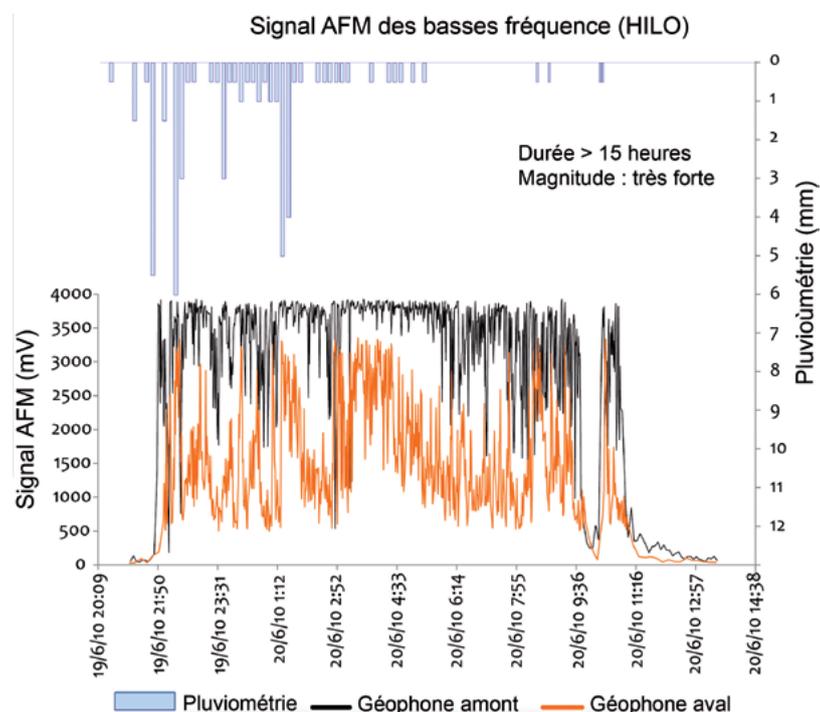


Figure 6. Signal AFM du lahar du 19 juin 2010.

Le signal AFM de ce lahar est très particulier. Faute de calibrage des géophones, il n'est pas possible de déterminer avec certitude la nature des écoulements. La nature du signal suggère toutefois que le lahar du 19 juin 2010 correspondait plutôt à un écoulement de type hyperconcentré. La charge solide de l'écoulement aurait en effet été suffisante pour transporter de gros blocs par traction et saltation (présence de très nombreux pics sur le signal AFM), mais trop faible pour transporter les blocs en suspension. La très longue durée de l'évènement plaide également pour un écoulement hyperconcentré, les laves torrentielles étant généralement plus brèves.

3.3 L'impact de l'éboulement du 11 mai 2010 et des lahars : les données lidar

La figure 7 correspond au résultat de la soustraction altimétrique entre le MNT de mars 2010 et celui de juillet 2010. Les dépôts apparaissent en jaune/rouge et l'érosion en vert/bleu. Les bilans de transfert des matériaux à partir des MNT peuvent être synthétisés de la manière suivante :

$$\text{Eq 1 : } V_t - V_a = V_d$$

$$\text{Eq 2 : } V_e - V_a = V_r$$

$$\text{Eq 3 : } V_r - V_d = V_m$$

Avec : V_e = volume éboulé (2 065 000 m³), V_a = volume accumulé en pied d'escarpement (280 000), V_t = volume total de dépôt (zone d'éboulement et dépôts de la rivière égal à 1 063 000 m³), V_r = volume remobilisé par les lahars, V_d = volume déposé dans la rivière et V_m = volume déposé en mer.

On voit sur cette carte [figure 7] que la zone glissée (section 1) de la paroi de l'escarpement correspond à un volume de plus de 2×10^6 m³. Les dépôts accumulés en pied de pente atteignent 40 m d'épaisseur par endroit et l'érosion verticale maximale est de 133 m (correspondant au recul de l'escarpement suite au décrochage d'un pan de « falaise »). En aval, le volume de sédiments déposés dans le lit du cours d'eau est de l'ordre de $0,8 \times 10^6$ m³. Ces dépôts proviennent de l'éboulement de la rivière Samperre mais également du sapement des berges lors du passage des lahars. Au final, il a été calculé qu'environ $1,8 \times 10^6$ m³ de matériaux ont été remobilisés par les lahars, et que 1×10^6 m³, soit 56 % des dépôts, auraient été évacués en mer.

Entre 400 m d'altitude et la confluence entre la rivière du Prêcheur et la rivière Samperre (260 m d'altitude), le lit est étroit et est bordé de hauts versants abrupts. En juillet 2010, cet espace était fortement encombré par des dépôts de lahar de 10 à 30 m d'épaisseur (section 3). En bordure du lit mineur, quelques zones d'érosion d'une dizaine de mètres de large sont visibles. Elles correspondent probablement à des effondrements de berge suite au passage des lahars. En aval de la confluence avec la rivière du Prêcheur et jusqu'à l'embouchure, la dynamique de dépôt par les lahars est dominante sur l'ensemble du lit avec très peu de zones d'érosion et une aggradation comprise entre 1 et 5 m (section 4).

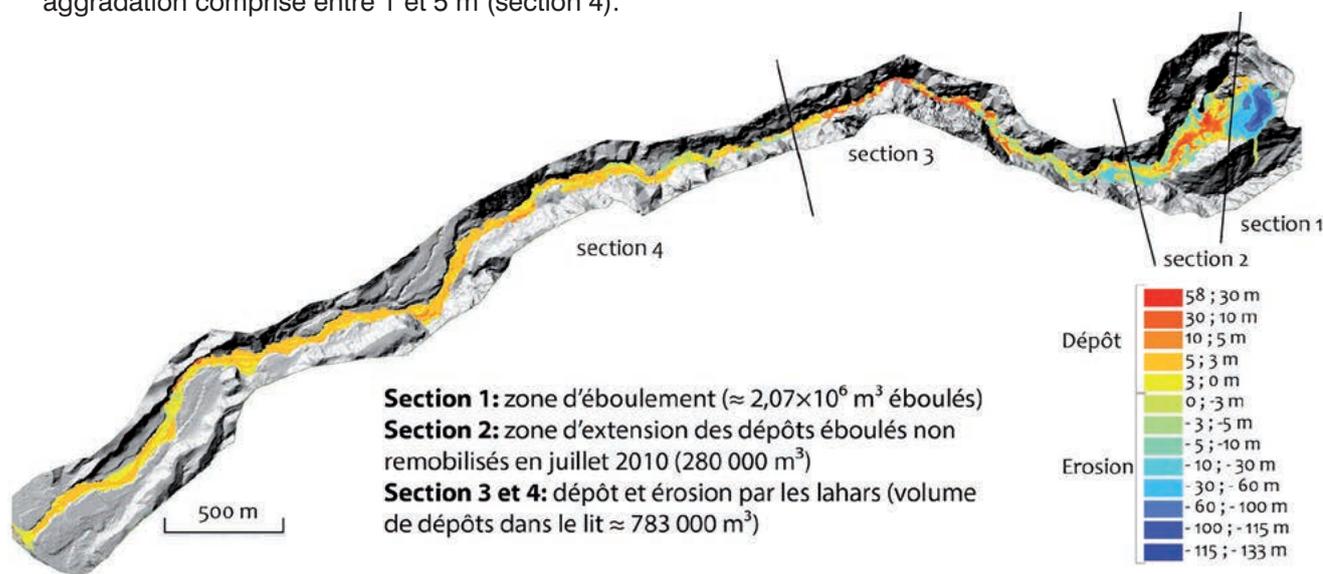


Figure 7. Cartographie des zones de dépôt et des zones d'érosion.

4. Conclusion

Cette étude présente des résultats préliminaires devant s'inscrire dans le cadre d'un projet plus vaste. L'étude a mis en lumière certains points nécessitant un approfondissement à la fois méthodologique et thématique pour améliorer les connaissances sur les lahars de la rivière du Prêcheur. La dynamique de ces derniers, encore mal connue, semble plus complexe par rapport aux autres torrents, du fait de la présence de sources de sédiments plus variées. Générateurs d'importants dommages matériels comme en 2010 mais aussi humains dans le cas des lahars éruptifs de 1902, les lahars possèdent d'importantes capacités de transport et de submersion, couplées à des vitesses d'écoulement élevées à l'origine d'une forte capacité d'impact. L'analyse des signaux émis par les instruments, outre le fait de constituer un système de détection, est une riche source d'information qui ne fait actuellement pas l'objet d'étude particulière. En effet, les géophones peuvent donner des indications quant à la concentration sédimentaire des écoulements, paramètre important dans la détermination du potentiel destructeur d'une coulée. Couplée à l'acquisition de données pluviométriques, ainsi qu'à un suivi topographique et morphologique, cette instrumentation constitue une source de données nécessaires à la caractérisation des coulées et des crues, menant à une meilleure connaissance scientifique de l'aléa.

Références bibliographiques

- **Aubaud, C., Athanase, J.-E., Clouard, V., Barras, A.-V., Sedan, O.**, 2013, « *A review of historical landslides, floods, and lahars in the Precheur river catchment, Montagne Pelée volcano (Martinique, Lesser Antilles)* », Bulletin de la Société géologique de France, 184, n°1-2, pp. 137-154.
- **Bouloc, J.**, 1981, *Aménagements de la rivière du Prêcheur*. Laboratoire hydraulique de France, 17 p.
- **Chrétien, S.**, 1983, *Identification et analyse des phénomènes précédant l'éruption du 8 mai 1902 de la Montagne Pelée (Martinique) d'après les documents d'époque*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, 241 p.
- **Clouard, V., Athanase, J.-E., Aubaud, C.**, 2013, « *Physical characteristics and triggering mechanisms of the 2009-2010 landslide crisis at Montagne Pelée volcano, Martinique: implication for erosional processes and debris-flow hazards* », Bulletin de la Société Géologique de France, 184, n°1, pp. 155-164.
- **Lacroix, A.**, 1904, *La Montagne Pelée et ses éruptions*. Paris : Ed. Masson & Cie, 662 p.
- **Lavigne, F.**, 1998, *Les lahars du volcan Merapi, Java Central, Indonésie : déclenchement, budget sédimentaire, dynamique et zonage des risques associés*. Thèse de doctorat, Université Clermont-Ferrand II Blaise Pascal, 603 p.
- **Lavigne, F., Thouret, J.-C., Voight, B., Suwa, H., Sumaryono, A.**, 2000, « *Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview* », Journal of Volcanology and Geothermal Research, n°100, pp. 423-456.
- **Lavigne, F., Thouret, J.-C., Voight, B., Young, K., La Husen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D.S., Dejean, M.**, 2000, « *Instrumental lahar monitoring at Merapi volcano, Central Java, Indonesia* », Journal of Volcanology and Geothermal Research, n°100, pp. 457-478.
- **Meunier, M.**, 1999, *Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique. Hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamique torrentielles*. Paris : Cemagref Édition, 338 p.
- **Saffache, P.**, 2001, *Les rivières du Carbet et du Prêcheur : deux siècles d'écoulements torrentiels*. Éditions Naturellement, Collection Nature, 83 p.
- **Sedan, O., Monpelat, J.M., Fiquet, M.**, 1998, *Laves torrentielles du Prêcheur de janvier 1997 et 1998, Martinique. Suivi et définition des moyens de réduction du risque*. Rapport BRGM R 40 106 – FR, 17 p.
- **Van Western, C.J., Daag, A.**, 2005, « *Analysing the relation between rainfall characteristics and lahar activity at Mount Pinatubo, Philippines* », Earth Surface Processes and Landforms, n°30, pp. 1663-1674.

Session D

Applications opérationnelles des techniques d'imagerie

- Projet d'outil de suivi hydromorphologique par la photogrammétrie
- Utilisation d'images drone pour caractériser la mosaïque sédimentaire d'une rivière en tresses (Vénéon, massif des Écrins)
- Utilisation de données lidar pour la délimitation du domaine public fluvial de la Dordogne





Projet d'outil de suivi hydromorphologique par la photogrammétrie

Bruno Le Chevallier

Chef du service départemental du Puy-de-Dôme, Agence française pour la biodiversité (AFB), Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes

William Sremski

Chef de service « Production et valorisation des connaissances », Loire-Bretagne et Adour-Garonne, Agence française pour la biodiversité (AFB), Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes

Résumé

La direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes de l'AFB met au point, en collaboration avec l'association « *Le Pélican jaune* », un outil complet permettant de réaliser le suivi hydromorphologique de cours d'eau. Cet outil en cours de développement se veut avant tout ergonomique. Il est construit pour être opérationnel et accessible à des opérateurs peu qualifiés dans le domaine de la géomatique. Il intègre la totalité des étapes depuis la prise de vue à l'analyse des informations par photo-interprétation. Il est facile à mettre en œuvre, nécessite peu de matériel et permet d'intervenir sur tout le territoire métropolitain à partir de n'importe quel aérodrome. L'outil est mis en application sur une zone d'étude facile d'accès, située sur un tronçon néoformé de l'Artière à Lempdes (Puy-de-Dôme, France).

Mots clés : photographie aérienne, photo-interprétation, suivi hydromorphologique, photogrammétrie, restauration

Introduction

Le projet est né d'une rencontre entre une passion, l'aviation, et un métier, technicien au sein de l'AFB. Dès 2002, Bruno Le Chevallier est persuadé que la vision du territoire vu du ciel peut être un outil de gestion très intéressant, notamment pour suivre les pressions s'exerçant sur les cours d'eau. Il fonde l'association *Le Pélican jaune* et se lance dans l'aventure de la photographie aérienne amateur. La démocratisation récente du matériel photographique numérique et les évolutions informatiques de traitement (notamment le développement de logiciels open source) ont permis d'élaborer les premiers dispositifs de prises de vues aériennes.

En 2014, la collaboration entre l'Onema (intégré aujourd'hui à l'AFB) et *Le Pélican jaune* ouvre une nouvelle perspective opérationnelle. Un suivi expérimental par photographie aérienne [figure 1] est effectivement réalisé dans le cadre de l'étude sur la recolonisation par l'ichtyofaune d'un tronçon néoformé de l'Artière (Puy-de-Dôme).



Pélican jaune / Bruno Le Chevillier - AFB

Figure 1. Première série de photos sur l'Artière en 2014 (Puy-de-Dôme, France).

1. Enjeux et objectifs

L'enjeu de ce travail est d'explorer les possibilités qu'offrent les prises de vues aériennes géoréférencées pour suivre les évolutions hydromorphologiques d'un cours d'eau.

Ce travail expérimental a notamment pour objectif de mettre au point et de rationaliser une méthode analytique basée sur d'une part, des prises de vues réalisées à basse altitude (entre 150 m et 500 m) à partir d'un avion de tourisme et d'autre part, l'utilisation de logiciels libres (*QGIS Mission Planner*).

2. Méthodes, données et matériels

Ce travail s'articule en deux parties [Ritchie, 2014] : la première phase concerne tout ce qui est inhérent à la prise de vue (préparation du plan de vol, équipement de l'avion, autorisations *ad hoc*...), et la seconde traite de l'analyse des données en post-traitement (calage des référentiels cartographiques, traitement des photos, photo-interprétation, photogrammétrie).

2.1 Prise de vues

2.1.1 Plan de vol et équipement de l'avion

Ce travail, réalisé par *Le Pélican jaune*, consiste à préparer le plan de vol à partir du logiciel *open source Missionplanner* et à équiper l'avion (*Cessna* ou *DR400*) du dispositif de prise de vues développé par Bruno Le Chevillier [figure 2]. Ces deux actions peuvent être faites indépendamment mais requièrent la compétence d'un pilote expérimenté.



Pélican jaune / Bruno Le Chevillier - AFB

Figure 2. Système de prise de vues monté sur un Cessna.

2.1.2 Photographie du site

Les clichés sont pris en faisant plusieurs survols de la zone à deux altitudes différentes (500 m et 150 m). Pour permettre la réalisation de bonnes photographies sans zone d'ombre, les vols doivent être réalisés de préférence lorsque le soleil est au zénith.

Le matériel utilisé est un appareil numérique reflex grand public (*Canon EOS 6D*), doté d'un objectif (*Canon EF 24-70mm f/4L IS USM*) réglé sur la focale 30 mm. Cet appareil est équipé d'un GPS qui géolocalise les photographies lors de la prise de vue.

Le rayon d'action d'un avion léger sur la métropole est un atout non négligeable. Il permet, à moindre coût, sur des territoires de différentes tailles (linéaire de 100 m à plusieurs kilomètres ; surface de 0,5 ha à plusieurs hectares) de réaliser de multiples prises de vues, avec la possibilité d'acquérir au cours d'une même campagne des images aériennes sur différents sites.

2.2 Analyse des clichés

2.2.1 Tri et assemblage des photographies

Les photographies sont triées, traitées (format, netteté, balance des couleurs...) et assemblées à partir de différents logiciels de retouche photographique (ex. *Canon DDP*). Elles sont dans un second temps importées sous SIG (*QGIS*) pour être géoréférencées.

2.2.2 Géoréférencement et exploitation des données

Le géoréférencement des photographies est, après le calage des prises de vues, une étape essentielle du travail. En milieu naturel, l'absence de repères fixes constitue le principal écueil. C'est en particulier le cas sur l'Artière, qui vu du ciel et suite à la phase travaux, n'offre que peu de repères nécessaires au géoréférencement.

Pour faciliter le calage des photographies prises entre 2014 et 2015, un travail avec un géomètre expert a permis, à partir de cibles positionnées sur le terrain, de géoréférencer la campagne d'observation de 2016 (couche de référence) et de recalibrer de manière satisfaisante les clichés antérieurs.

3. Résultats et perspectives

Les premiers résultats étaient prometteurs, quoique perfectibles. L'absence de points de calage (liée au caractère artificiel de la zone) dans le cadre de la première campagne de prises de vues, a limité les possibilités en matière d'interprétation. Seule une valorisation en plan a été abordée de manière partielle en 2015 [figure 3]. Néanmoins, ce travail couplé à des opérations de terrain (protocole CarHyCE, profils en long et profils sédimentaires) a permis d'enrichir cette démarche expérimentale.

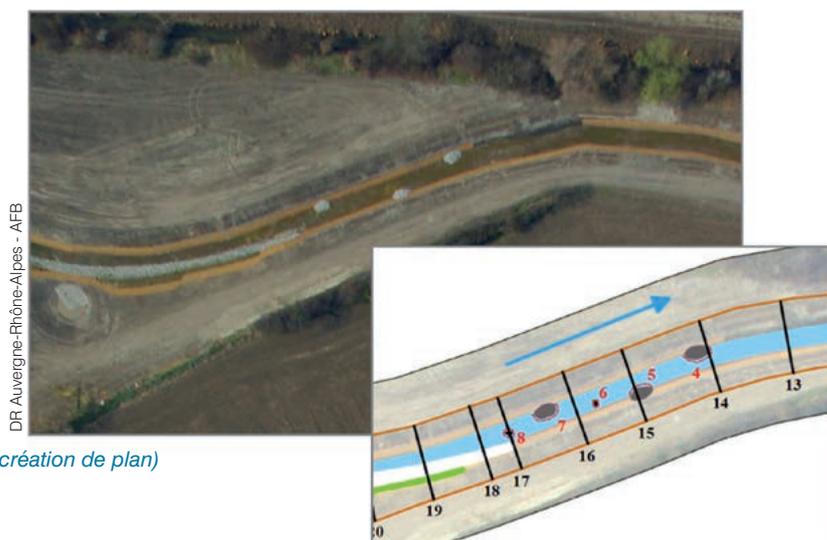


Figure 3. Première valorisation (création de plan) à partir de la campagne 2015.

3.1 Des pistes d'amélioration

Dès 2016, des solutions pour améliorer la précision des données récoltées et leurs interprétations ont été envisagées. Ces améliorations étaient nécessaires pour pouvoir se lancer dans la photogrammétrie. L'amélioration des techniques de géoréférencement sur site, en équipant la zone d'étude de cibles géolocalisées au GPS différentiel, a permis de créer une couche de référence et de caler les fichiers plus anciens issus des campagnes 2014 et 2015.

Conjointement aux prises de vues aériennes, une campagne de photographies a été réalisée sur site avec un appareil photographique muni d'un GPS.

3.2 Des résultats encourageants

Le géoréférencement des photographies 2016 à partir de QGIS est très satisfaisant et relativement simple à mettre en pratique. Sur cette base, le calage des photographies aériennes plus anciennes a pu être effectué à partir de points de référence communs. Ce travail reste difficile à faire et requiert une bonne connaissance du terrain. À ce titre, une campagne photographique *in situ*, directement sur le terrain, facilite le travail, permet d'engager les premières photo-interprétations et de tester quelques outils de calculs [figures 4 et 5].



Figure 4. Assemblage des trois campagnes photographiques (superpositions 2016 / 2014 / 2015).

William Sremski - AFB



Figure 5. Photogrammétrie et photo-interprétation (campagne 2016).

William Sremski - AFB

3.3 Des coûts raisonnables

L'investissement pour couvrir un tronçon de 500 m de cours d'eau reste raisonnable :

- demi-journée à deux personnes pour la pose de 41 cibles avec géolocalisation (420 € TTC) ;
- demi-journée préparation du vol et acquisition d'images à deux personnes (pilote + photographe) ;
- demi-journée à une personne pour le traitement des photos aériennes ;
- demi-journée de calage des photos (couche de référence).

Au total, la campagne 2016 a nécessité trois hommes par jour pour la constitution des fichiers de références (780 € TTC).

3.4 Des perspectives intéressantes

L'intérêt de ce type de travail semble se confirmer, notamment par l'utilisation d'un avion de tourisme qui offre une échelle d'analyse intermédiaire entre les images satellitaires et celles produites via des drones à basse altitude.

Depuis 2013, une nouvelle réglementation européenne exige une procédure de certification pour approuver notre système de fixation. Les démarches ont été initiées par *Le Pélican jaune* auprès de l'Agence européenne de la sécurité aérienne.

Dans un tel processus, la qualité des images produites conditionne celle de l'assemblage photographique résultant. Un travail de fiabilisation des prises de vues est en cours par l'association qui doit trouver la meilleure adéquation possible entre le réglage de l'appareil photographique et la hauteur de vol plancher (entre 150 et 250 m). La technologie *wifi* permet actuellement d'envisager des optimisations, notamment sur les réglages et la validation de la qualité des clichés en plein vol.

La pose de cibles (dès le premier survol) semble être une solution peu onéreuse pour augmenter la qualité du géoréférencement. Une réflexion sur l'optimisation du nombre de cibles par rapport au linéaire ou à la surface étudiés et sur les limites d'utilisation de cette méthode sera menée par l'AFB dans les mois à venir.



Figure 6. Assemblage de prises de vues sur l'Allier (Puy-de-Dôme, France).

4. Conclusion

L'utilisation d'un avion est intéressante car ce vecteur se situe entre le satellite et le drone. Cette méthode est adaptable à tous types de milieux et pour différentes missions en lien avec la surveillance des milieux naturels (suivi post-crue, suivi travaux...). Elle permet de caractériser des cours d'eau de différentes tailles [figure 6] sur des linéaires variables de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Elle peut également être utilisée pour caractériser des milieux remarquables au titre de la biodiversité.

Ce type d'approche permet pour un coût modéré, dans un rayon d'action important au départ de n'importe quel aéroport de métropole, de réaliser un suivi photographique.

Référence bibliographique

● **Ritchie, A.**, 2014, Communication « *The Elwha PlaneCam Tracking the largest dam removal ever in high spatiotemporal resolution with cheap cameras* », Powerpoint de 38 diapos.



Utilisation d'images drone pour caractériser la mosaïque sédimentaire d'une rivière en tresses (Vénéon, massif des Écrins)

Daniel **Vazquez Tarrío**

Université Grenoble-Alpes, Irstea Grenoble, UR ETNA ; FICYT, Oviedo (Espagne)

Laurent **Borgniet**, Frédéric **Liebault**, Alain **Recking**

Université Grenoble-Alpes, Irstea Grenoble, UR ETNA

Rémi **Loire**, Jean-René **Malavoi**

EDF-DPIH, Chambéry

Résumé

Dans ce travail de recherche, on explore le potentiel des images drone pour caractériser la distribution granulométrique des rivières à lit grossier. Une campagne d'échantillonnage granulométrique et cinq vols drone ont été réalisés sur le tronçon d'étude du Vénéon (massif des Écrins) durant l'été 2015.

Deux procédures différentes ont été appliquées sur un jeu d'image drone. D'un côté, les images ont été traitées à partir d'un outil de restitution photogrammétrique de type structure from motion (SfM) afin de produire des nuages de points 3D denses et précis. Sur ces modèles photogrammétriques, on a estimé la rugosité de surface et on l'a corrélée avec la taille de grains mesurés sur le terrain. On a ensuite appliqué des algorithmes de segmentation d'image sur les orthophotographies (2 cm taille pixel) pour faire une délimitation des patches de sédiment sableux.

Une forte corrélation a été trouvée entre la rugosité estimée à partir des modèles SfM et la taille de grain mesurée sur le terrain avec la méthode Wolman. Nos résultats confirment que les méthodes de segmentation automatique d'image nous apportent des cartographies fiables des patches de sédiment fin (< 8 mm). La méthodologie utilisée ici présente ainsi un potentiel important pour la caractérisation rapide et continue de la taille de grain dans les rivières à gravier.

Mots-clés : Drone, SfM, Photogrammétrie, Granulométrie, Rivières à gravier

Abstract

This research explores the potentiality of drone-based optical aerial imagery for characterizing grain size distribution in gravel-bed rivers. A Wolman field campaign and five drone surveys were accomplished over the Vénéon (Ecrins massif, French Alps) study site in summer 2015.

Two different techniques were performed on the acquired aerial image data set. On the one hand, structure-from-motion photogrammetry was applied and dense, accurate 3D point clouds were derived. Roughness descriptors were computed on the resulting SfM point clouds, and they were correlated with the median grain size of the Wolman samples. On the other hand, texture based image segmentation was applied on the aerial orthophotographs (2-cm pixel size) built from our drone image data set, in order to delimitate the fine sediment patches.

A strong relationship exists between drone-SfM derived grain roughness and Wolman grain size. Results also show that texture based image segmentation is accurate, providing adequate estimations of fine sediment extent. The procedure followed here has a strong potential for fast and continuous characterization of grain size distribution and roughness in gravel-bed rivers.

Key-words: Drone, SfM, Photogrammetry, Grain size, Gravel bed rivers

Introduction

La texture granulométrique de surface des bandes actives est une composante physique majeure des corridors fluviaux qui conditionne la rugosité du lit et la résistance à l'écoulement, et donc la contrainte hydraulique et le transport solide par charriage. Outre les aspects purement hydro-morphologiques, la connaissance de la granulométrie d'un lit fluvial est fondamentale d'un point de vue écologique car les sédiments fluviaux sont un habitat majeur pour les biocénoses aquatiques et ripariales (Bunte et Abt, 2001).

Nous présentons ici un exemple de reconstitution de la texture de la mosaïque sédimentaire d'un lit en tresses à partir des images drone. Notre cas d'étude est le Vénéon à Plan du Lac (massif des Écrins). On a utilisé la photogrammétrie SfM et l'analyse digitale d'image sur tout une série d'images aériennes prises par drone. Nos résultats confirment l'intérêt de la méthode pour caractériser la granulométrie de surface des rivières à gravier.

1. Enjeux et objectifs

Les méthodes traditionnelles d'échantillonnage granulométrique de surface en rivières à gravier (Wolman, *photosieving*) permettent d'obtenir une distribution de la taille des grains sur de petites surfaces, mais elles sont trop longues à mettre en œuvre pour une caractérisation granulométrique distribuée sur l'ensemble de la bande active. Ainsi, on ne dispose pas de reconstitutions spatialement continues de la texture des lits en tresses, malgré le fait que cette information peut s'avérer très utile pour l'interprétation et la modélisation morphodynamique. Heureusement, avec le développement récent des nouvelles technologies topographiques (Lidar aérien et terrestre, photogrammétrie digitale et SfM), un champ d'application considérable s'est ouvert (Brasington et al., 2012).

Ainsi, quelques travaux antérieurs ont montré que la rugosité de surface dérivée des données obtenus à partir du laser terrestre permettait de reconstituer la granulométrie du lit (Heritage et Milan, 2009 ; Brasinton et al., 2012). D'autres, en utilisant l'analyse digitale de l'imagerie aérienne haute résolution ont obtenu des relations entre la texture de l'image et la granulométrie (Carbonneau et al., 2005a). Dans ce travail, on utilise des images prises par drone. La généralisation récente des drones et le développement de logiciels SfM facilement accessibles permettent aux géomorphologues de délivrer des caractérisations fines de la topographie du corridor fluvial (Fonstad et al. 2013), d'évaluer les changements morphologiques (Javernick et al., 2014) et/ou de reconstruire la bathymétrie de chenaux en basses eaux (Woodget et al., 2015). Ici, l'imagerie drone est utilisée pour reconstituer la distribution spatiale de la granulométrie de surface.

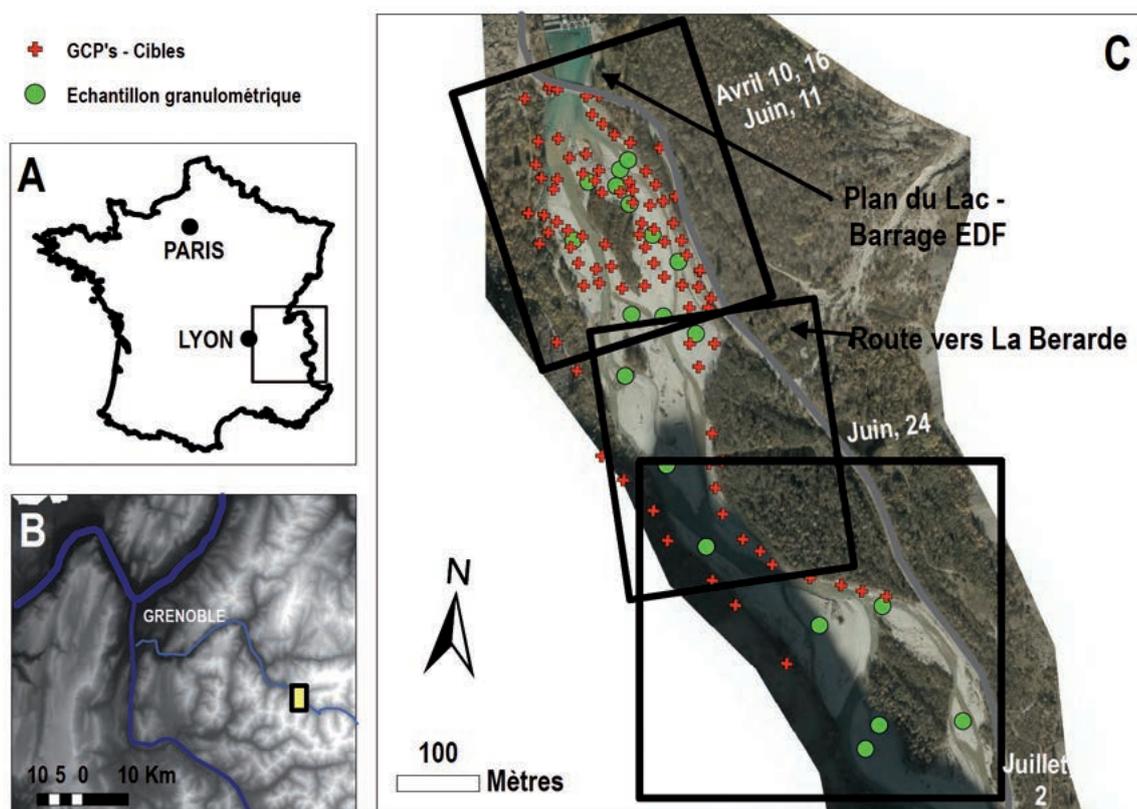
Ce travail présente deux objectifs principaux : tester l'utilisation de la photogrammétrie SfM et l'imagerie drone pour caractériser la texture granulométrique de surface d'un lit à gravier ; et proposer un protocole simple pour extraire la granulométrie de surface à partir de l'imagerie aérienne haute résolution et arriver à produire cartes granulométriques spatialement continues.

2. Méthodes, données et matériels

2.1 Description du tronçon d'étude

Le rivière Vénéon, affluent de la Romanche, présente un bassin versant de 316 km² qui draine une partie du massif des Écrins (*figure 1*). Le paysage physique de ce bassin d'origine glaciaire et périglaciaire est dominé par des pentes abruptes et rocheuses et des dépôts de versant. La source principale du Vénéon est le glacier de La Pilatte, et par conséquent, il montre un régime hydrologique de type glacio-nivale.

Entre les communes de Vénosc et Saint-Christophe-en-Oisans, le Vénéon développe une morphologie en tresses, avec des chenaux multiples et de multiples bancs de graviers (*figure 1*). On a travaillé sur ce tronçon d'environ 2 km de longueur, localisé immédiatement à l'amont du barrage hydroélectrique de Plan du Lac, construit dans les années 1950 et géré par EDF. Sur ce secteur d'étude, la granulométrie est grossière (D50 ~ 40-50 mm), mais on peut reconnaître aussi sur toute la surface des bancs de nombreux patches de sable d'échelle métrique, ce qui définit un caractère fortement bimodal au sédiment de la surface du lit (*figure 2*).



2.2 Données et matériels

Cinq vols drone ont été réalisés entre avril et juillet 2015 sur le tronçon d'étude (*figure 1C*). Tous les vols ont été réalisés avec le même quadricoptère (*figure 2*), selon une hauteur de vol constante de 35 m. Sous le drone on a monté un appareil photos GoPro HERO 3+ Silver programmé pour prendre une image toutes les secondes. Pour bien caler la position des nuages de points, des cibles ont été placées sur le terrain pour obtenir des points de contrôle. Leurs coordonnées ont été mesurées avec un dGPS en mode RTK-10 s (*figure 1C*).

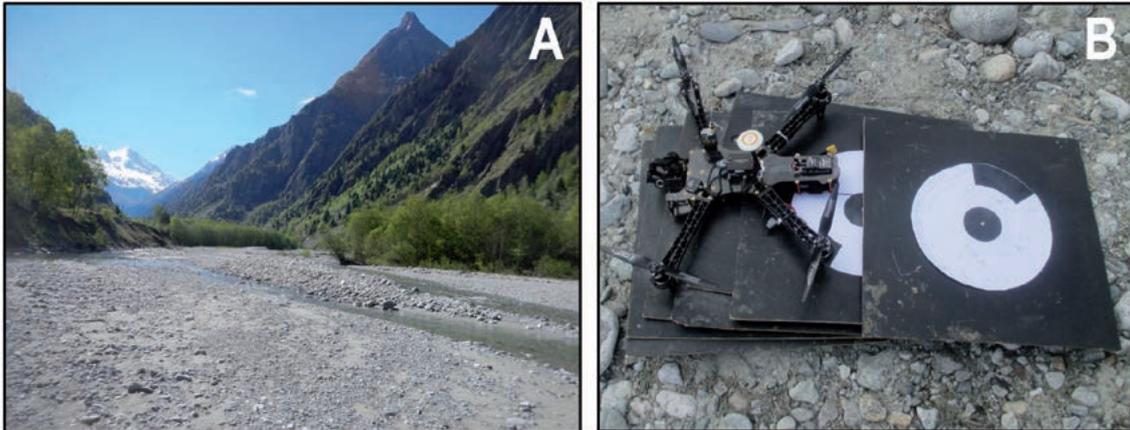


Figure 2. A) Vue sur le terrain du tronçon d'étude: on peut apprécier le caractère bimodale du sédiment des bancs de graviers. B) Quadricoptère et cibles utilisés dans cet étude.

Une campagne d'échantillonnage granulométrique a été réalisée entre avril et mai 2015. Un total de 19 échantillons a été collecté sur les bancs de graviers (figure 1C) en suivant la méthode Wolman (1954).

2.3 Méthodes

On a appliqué les algorithmes de photogrammétrie SfM sur les images drone (Westoby et al., 2012) à partir de l'outil *Agisoft PhotoScan*, un logiciel commercial avec une interface d'utilisateur conçue pour appliquer d'une façon rapide et relativement simple la méthode SfM. On a obtenu ainsi des nuages de points de très haute densité (50-200 points/m²) et précision altimétrique (~ 5 cm), et avec une résolution verticale inférieure à 1 cm. Une orthophotographie aérienne (2 cm de résolution pixel) a également été produite pour chaque vol.

L'étape suivante concerne la caractérisation de la texture du lit du Vénéon, avec dans un premier temps la détermination de la valeur médiane de la taille de grain en surface, et dans un deuxième temps la détermination de l'extension superficielle des patches sableux.

2.3.1 Granulométrie de surface

La rugosité altimétrique de surface a été dérivée des nuages des points SfM, selon trois protocoles différents : différence locale des altitudes, écart-type des altitudes et écart-type après suppression de la pente. Ces trois métriques de rugosité ont été calculées dans un rayon de 40 cm autour de chaque point du nuage 3D, et ils ont été comparés avec les percentiles classiques des échantillonnages granulométriques *in situ*. Pour toutes les estimations des valeurs de rugosité on a utilisé le logiciel « open source » *Cloud Compare*.

2.3.2 Extension superficielle des patches de sable

La résolution des orthophotographies aériennes étant de 2 cm, elle est équivalente à la taille des grains en surface, ce qui permet d'avoir recours aux techniques d'analyse digitale d'image (Carbonneau et al., 2005b).

Tout d'abord, on a fait une cartographie manuelle des bancs afin de les extraire des images. Puis, on a estimé la texture de l'image (entropie) à partir de la matrice de cooccurrences, sur une fenêtre de 19 x 19 pixels. On a re-échantillonné ensuite la carte texturale en 255 niveaux et on a appliqué la méthode d'Otsu pour définir le seuil entre patches de sable et l'armure grossière. Finalement, on a appliqué les algorithmes de segmentation d'image disponibles sur *ENVI 4.7*,

et on a délimité les patches de sédiment fin (< 8 mm). Sur les images aériennes on a mesuré la surface couverte par les patches de sable au niveau de chaque point d'échantillonnage granulométrique, et on l'a comparé avec les pourcentages de sable mesurés sur le terrain et aussi avec les surfaces mesurées directement de façon manuelle sous *ArcGis*.

3. Résultats et perspectives

Nos résultats confirment qu'il y a une très forte corrélation entre la distribution granulométrique in situ et la rugosité estimée à partir des nuages de points SfM (*figure 3*). Des trois métriques de rugosité utilisées dans ce travail, c'est la différence locale des altitudes qui montre la meilleure relation avec la granulométrie. Cette corrélation est plus importante quand on compare avec les valeurs de la granulométrie tronquée (< 8 mm) ; c'est-à-dire, la granulométrie de la partie grossier du lit (sans prendre en compte des particules de taille inférieur à 8 mm). Cela pourrait être dû à l'incertitude intrinsèque des nuages des points SfM. En effet, la résolution verticale est de 1 cm, ce qui implique une troncature à 1 cm des valeurs de rugosité.

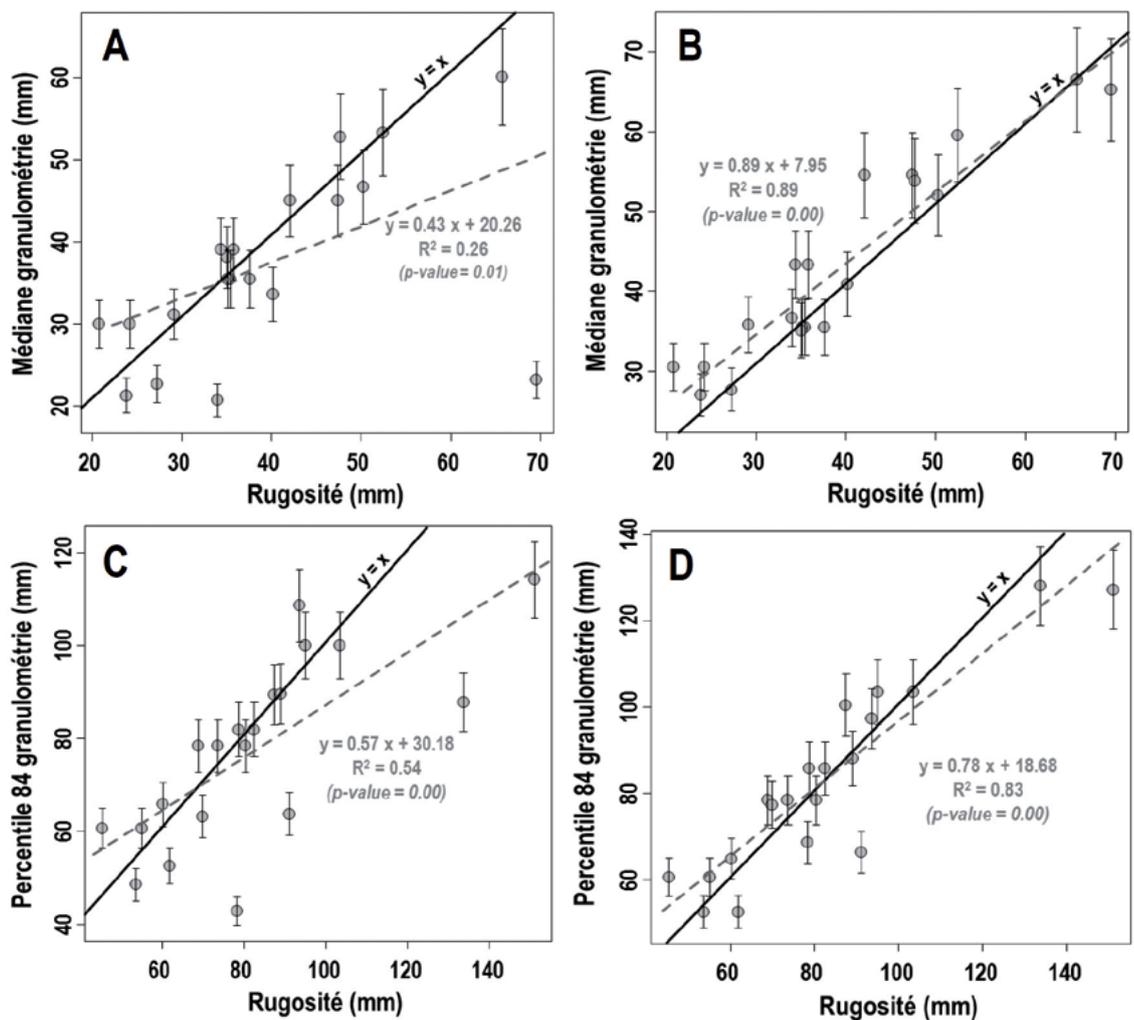


Figure 3. Percentiles granulométriques mesurés sur le terrain en fonction de la rugosité altimétrique dérivée des nuages de points SfM. (A) et (C) : granulométries non tronquées ; (B) et (D) granulométries tronquées à 8 mm.

Par rapport à la différenciation automatique des patches de sable, une première évaluation visuelle des résultats de la segmentation des images nous montre qu'on arrive à des délimitations très fiables (figure 4). De plus, la comparaison avec les résultats d'une cartographie manuelle nous montre également qu'on arrive à des estimations très similaires de l'extension superficielle des patches sableux (figure 5A). De la même façon, la comparaison avec les mesures de terrain indique une très forte concordance (figure 5B). Cependant, l'évaluation visuelle révèle des limitations liées à la qualité des images ou à la taille trop réduite des patches sableux.

En s'appuyant sur ces résultats, on a produit sous ArcGIS des cartes granulométriques (figure 6). L'évaluation visuelle nous montre que les cartes produites donnent des valeurs granulométriques cohérentes avec la texture observée sur les images aériennes (figure 7). Ces cartes pourraient être exploitées pour caractériser les habitats terrestres et aussi pour capturer les changements de texture de surface après les crues.



Figure 4. Segmentation d'image réalisée sur les orthophotographies aériennes et délimitation des patches sableux.

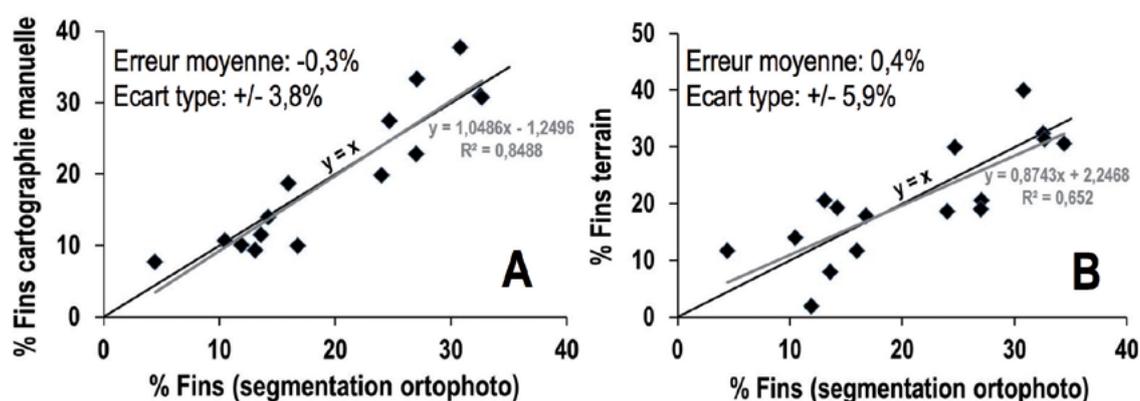


Figure 5. Extension superficielle des patches de sédiment fin définis à partir des images segmentées, comparée avec les pourcentages de sédiments fins obtenus à partir de cartographie manuelle (A) ou des mesures de terrain (B).

Nos résultats confirment que l'imagerie drone peut être utilisée pour reconstituer la granulométrie du lit d'une rivière à graviers. Une procédure relativement simple et bon marché pour caractériser rapidement et de manière continue la texture du lit est proposée. Néanmoins, cette méthode ne permet pas de caractériser les surfaces immergées. Toutefois, l'étude récente de Woodget et al. (2015) montre que la photogrammétrie SfM peut être utilisée sur les surfaces submergées

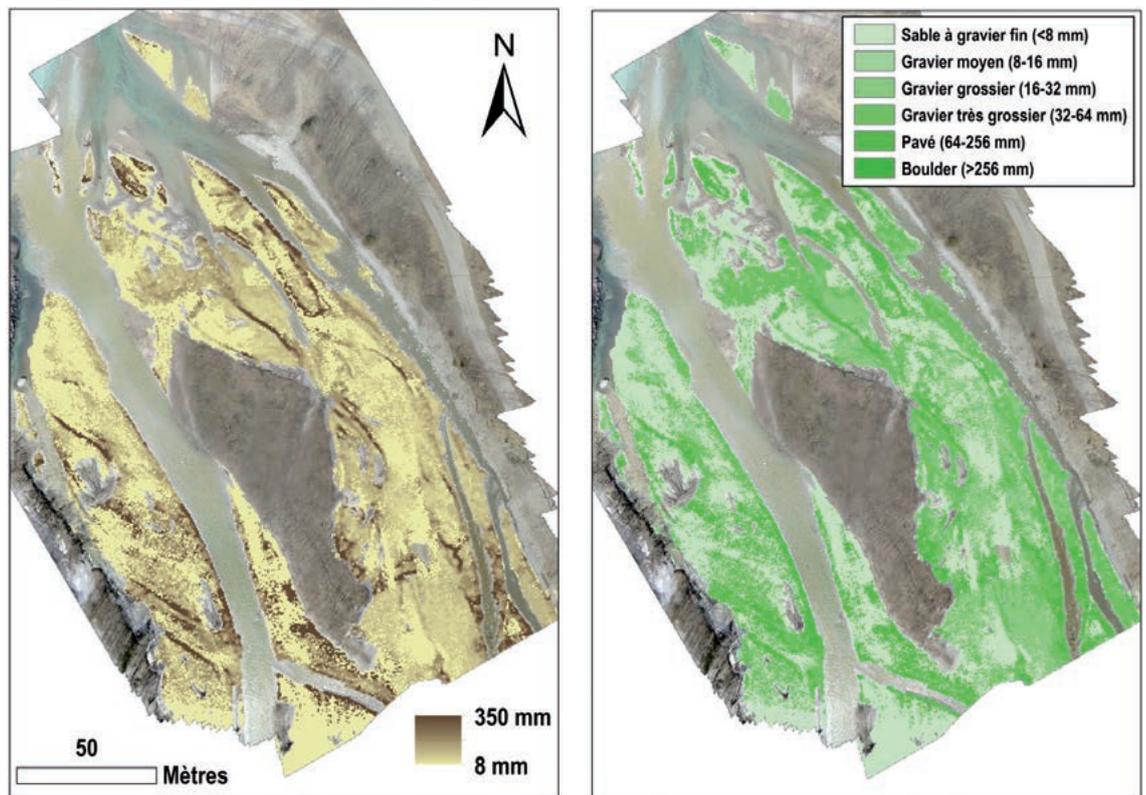


Figure 6. Cartes granulométriques dérivées de nos nuages des points drone-SfM.

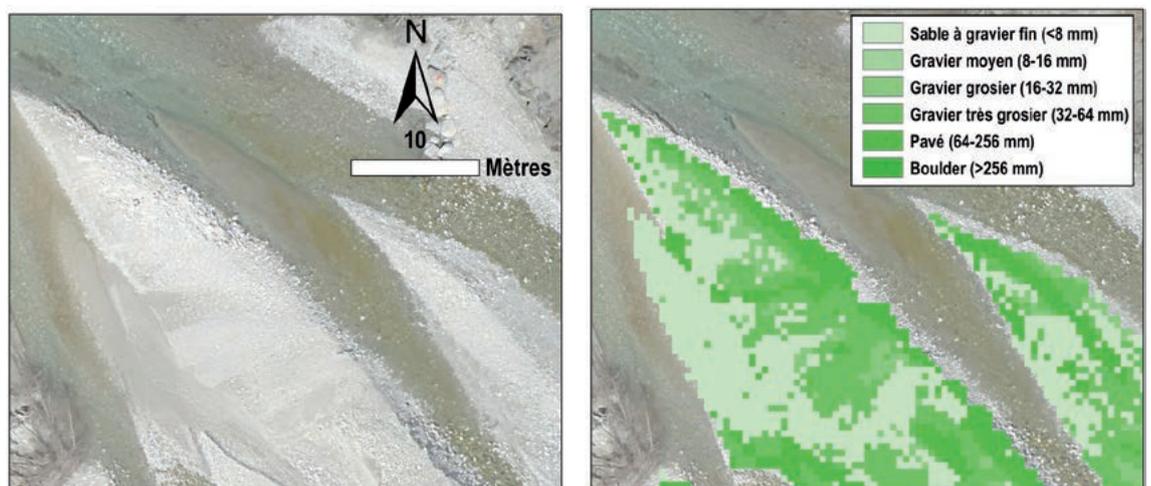


Figure 7. Carte granulométrique comparée avec l'orthophotographie aérienne. La comparaison visuelle montre une bonne correspondance entre les deux.

du chenal, à condition que les eaux soient claires et peu profondes (< 0.7 m). Il semble donc que dans certaines conditions favorables, notre méthode pourrait être utilisée pour les surfaces immergées.

Il faut remarquer que l'estimation de la granulométrie de surface à partir de la rugosité extrait des modèles SfM nécessite des données de terrain pour calibrer l'équation de régression, car la rugosité ne dépend pas seulement de la taille des grains, mais aussi d'autres caractéristiques texturales comme l'exposition des grains, les arrangements entre particules ou l'imbrication (Brasington et al., 2012). Pour un tronçon d'étude similaire au notre, 8-10 échantillons semblent suffisant pour caler une relation.

4. Conclusion

Nous présentons ici une reconstitution de la texture granulométrique de surface d'un lit en tresses à partir d'images drone obtenues sur le site du Vénéon au Plan du Lac. Plusieurs campagnes de prises de vue par drone ont été réalisées entre avril et juillet 2015 sur un tronçon de 1,5 km de long. Les restitutions photogrammétriques SfM ont permis d'obtenir des nuages de points 3D à partir desquels des reconstitutions granulométriques indirectes ont pu être comparées aux distributions mesurées sur place à partir de 19 comptages de type Wolman réalisés entre avril et mai 2015 sur le site. L'utilisation du logiciel *AgiSoft Photoscan* a permis d'obtenir des nuages de point de très haute densité et de très grande précision à partir desquels la rugosité altimétrique de surface a été extraite selon trois protocoles différents. Ces métriques de rugosité ont été comparées avec les percentiles classiques des échantillonnages granulométriques in situ. Les résultats obtenus confirment l'intérêt de la rugosité comme proxy de la granulométrie de surface. Une analyse de la texture des images drone montre par ailleurs qu'il est possible de cartographier automatiquement les patches de granulométrie homogène qui structurent la bande active.

Ce travail montre ainsi les possibilités offertes par la restitution photogrammétrique SfM d'images drone pour la caractérisation objective et continue de la mosaïque sédimentaire d'un lit en tresses. Il ouvre également des pistes intéressantes pour la détection des changements dans l'organisation spatiale des patches sédimentaires qui composent cette mosaïque.

Références bibliographiques

- **Brasington, J.; Vericat, D. et Rychov, I.** (2012). *Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning*. *Water Resources Research* 48 W11519.
- **Bunte, K. et Abt, S.R.**, (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring*. General Technical Report n° RMRS-GTR-74, U.S. Department of Agriculture, Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 428 p.
- **Carbonneau, P.E.; Bergeron, N. et Lane, S.N.** (2005a). *Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes*. *Water Resources Research*, 41, W11426.
- **Carbonneau, P.E.; Bergeron, N.E. et Lane, S.N.** (2005b) *Texture-based segmentation applied to the quantification of superficial sand in salmonids river gravels*. *Earth Surface Processes and Landforms* 30: 121-127.
- **Fonstad, M. A. ; Dietrich, J.T. ; Courville, B.C. ; Jensen, J.L. et Carbonneau, P.E.** (2013). *Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 421–430.
- **Heritage, G. et Milan, D. J.** (2009). *Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river*. *Geomorphology*, 113 (1), 4-11.
- **Javernick, L.; Brasington, J. et Caruso, B.** (2014). *Modelling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry*. *Geomorphology*, 213, 166–182.
- **Westoby, M. J.; Brasington, J.; Glasser, M. J.; Hambrey, M. J. et Reynolds, J. M.** (2012). *Structure-from-Motion photogrammetry: a low cost, effective tool for geoscience applications*. *Geomorphology* 179: 300–314.
- **Wolman, M. G.** (1954). *A method of sampling coarse river-bed material*. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 (6), 951-956.
- **Woodget, A. S. ; Carbonneau, P. E. ; Visser, F. et Maddock, I. P.** (2015). *Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (1), 47-64.

Remerciements

Ce travail de recherche a été possible grâce au soutien financier de la bourse ACA14-30, cofinancée par les programmes postdoctoraux « Clarin »-FICYT (Gouvernement du Principat des Asturies) et Marie Curie-Cofund. L'étude a également bénéficié d'un soutien financier de la part d'EDF. Remerciements à Marie Vivier, Guillaume Piton, Emmanuel Thibert, Fred Ousset, Éric Mermin et Pascal Tardiff pour l'assistance sur le terrain.



Utilisation de données lidar pour la délimitation du domaine public fluvial de la Dordogne

Olivier **Guerri**, Guy **Pustelnik**

Épidor, Établissement public territorial du bassin de la Dordogne, place de la Laïcité, 24250 Castelnaud-la-Chapelle

Véronique **Cesari**

2 Alter-Géo, 36 avenue du Dr Boissel, 24200 Sarlat

1. Contexte et objectifs de l'étude

Depuis le 1^{er} janvier 2015, Épidor est gestionnaire d'un réseau hydrographique de 460 km, principalement réparti sur trois cours d'eau (la Dordogne, l'Isle et la Vézère) appartenant au domaine public fluvial (DPF). Pour exercer sa mission, l'établissement a souhaité se doter d'une enveloppe estimative des limites du DPF. Cette cartographie a pour but de constituer une référence informative diffusable auprès des collectivités riveraines et des usagers. Elle vise également à fournir une vision d'ensemble au gestionnaire, permettant d'orienter ses stratégies de gestion vis-à-vis de zones de conflit potentiel ou de zones à enjeux de conservation ou de surveillance.

Le principe de délimitation du DPF est défini par l'article L. 2111-9 du Code général de la propriété des personnes publiques. Il repose sur la détermination du *plenissimum flumen*, qui correspond à la hauteur des eaux coulant à plein bord avant débordement. C'est la berge la plus basse qui détermine cette limite [figure 1]. Le *plenissimum flumen* détermine la ligne de partage entre le domaine public fluvial et les propriétés riveraines.

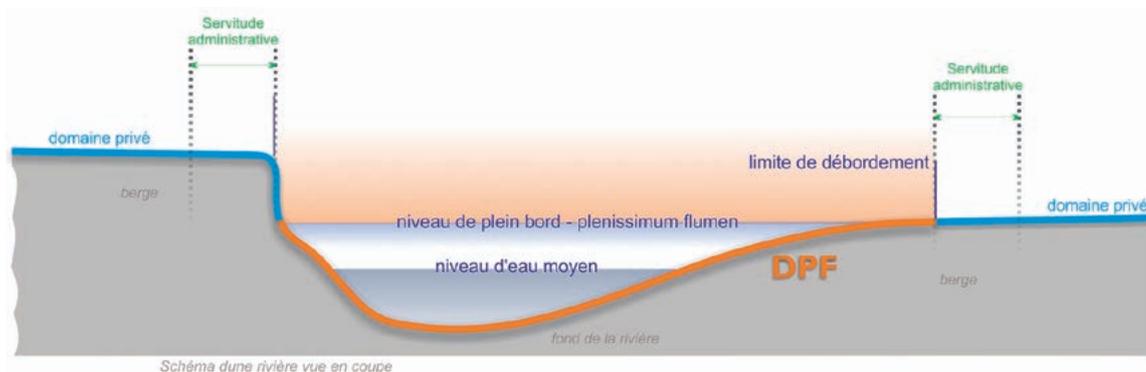


Figure 1. Schéma de principe de détermination du plenissimum flumen.

Cette délimitation constitue un constat temporaire qui n'est valable qu'à un instant donné. En effet, les limites du DPF ne sont pas fixes ; elles suivent l'évolution naturelle du cours d'eau. En règle générale, la limite du DPF est définie au cas par cas, de façon amiable et informelle entre le gestionnaire et le propriétaire riverain, quand le besoin se présente. Dans le cas présent, il ne s'agit pas de se substituer à ces délimitations particulières qui continueront de rester nécessaires, mais de constituer une référence et de fournir une vision globale du DPF. Les résultats, produits à une échelle de l'ordre de l'échelle cadastrale (1 : 2 000), doivent pouvoir constituer des éléments de référence utilisables pour l'analyse de cas particuliers.

En pratique, les limites du DPF sont définies selon les principes suivants :

- l'analyse est menée à l'échelle de tronçons hydrauliquement homogènes ;
- les points les plus bas des rives, constituant des exceptions par rapport à la configuration générale et à la dynamique de débordement, sont écartés ;
- on retient le niveau d'eau qui va générer un débordement généralisé vers le lit majeur.

Le DPF comprend donc au moins le lit de la rivière qui est toujours en eau, mais selon les secteurs et la forme du cours d'eau, il peut englober des zones plus ou moins vastes qui sont en eau de façon assez régulière (bras secondaires, bras morts, bancs et îles, zones marécageuses, prairies humides, forêts alluviales...).

2. Méthode d'élaboration

La méthode de délimitation de l'enveloppe du DPF repose sur une approche topomorphologique. Elle découle de la détermination de la zone de transition entre la berge et la rive. On retrouve d'ailleurs cette notion de transition chez différents auteurs suivant des approches morphologiques ou hydrauliques du cours d'eau. Ainsi, Wahl [1984] indique le recoupement des notions de *plenissimum flumen* avec la zone de rive, le régime de plein bord et le lit principal pour les cours d'eau permanents. Williams [1978] répertorie plusieurs définitions du régime de plein bord basées sur l'étude des profils en travers, notamment « *la zone de changement du rapport de l'aire du profil et de sa largeur* ». Si l'on dérive d'un profil le calcul de la profondeur hydraulique, la transition haut de berge/rive est déterminée par un maximum relatif sur la profondeur hydraulique [Williams, 1978 ; Leopold et al., 1964 ; Radecki-Pawlik, 2002]. Des démarches analogues ont été menées ces dernières années (Navratil, 2005), y compris sur des données lidar (*light detection and ranging*) [Cencetti et De Rosa, 2014 ; Cratso et al., 2010].

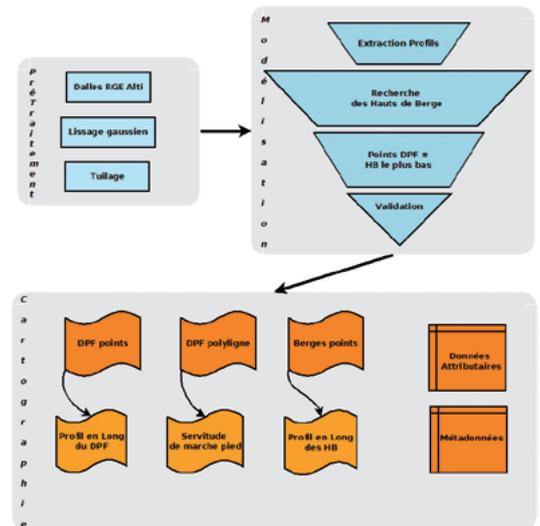


Figure 2. Présentation générale de la méthodologie appliquée.

La limite de débordement est désignée ici comme le haut de berge. Nous déterminons le haut de berge sur des profils transversaux échantillonnés tous les mètres sur le modèle numérique de terrain RGE ALTI® de l'IGN pour constituer la limite du DPF [figure 2]. Les résultats de la délimitation de l'enveloppe du DPF sont proposés en format vectoriel, sous forme de points associés aux profils transversaux et d'une enveloppe globale.

3. Traitement des données

3.1 Description des données

L'IGN a procédé ces dernières années à un relevé des altitudes par moyen lidar. Il s'agissait de campagnes où le capteur était aéroporté, avec de multiples mesures par maille et une série d'échos verticaux (4) pour garantir une détection jusqu'au niveau du sol [IGN, 2013]. Les relevés altitudinaux sont fournis sous forme de dalles géoréférencées de 1 km² en format .asc, projetées en RGF93.

3.2 Prétraitement

Les dalles lidar sont lissées par application d'un filtre gaussien pour atténuer le bruit.

L'intersection du profil de la rivière avec le dallage RGE ALTI® montre que l'emprise de la rivière, rives comprises, peut se trouver à cheval sur plusieurs dalles [figure 3]. Nous procéderons donc dans un premier temps au réassemblage des dalles pour le recentrer sur le linéaire de rivière.

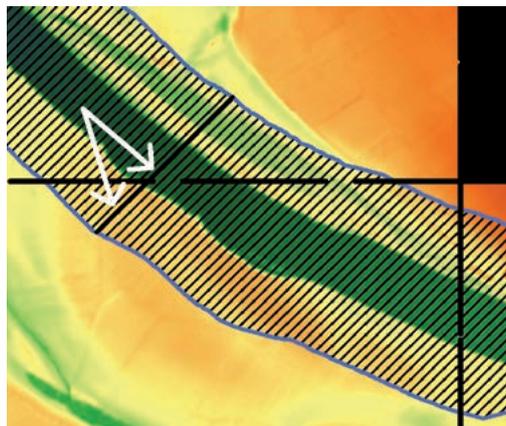


Figure 3. Exemple de profil tronqué à la jonction de dalles.

4. Élaboration de la délimitation

4.1 Exploitation des profils

Les profils transversaux à l'axe de la rivière sont générés par pas d'un mètre. Le profil est examiné en partant du centre et en cherchant le point de débordement vers chaque rive.

Sur la figure 4, l'algorithme détecte les maxima locaux de l'estimation de profondeur hydraulique (courbe orange) aux points A en rive gauche et B et C en rive droite. Tous les maxima locaux les plus bas sont situés ici en rive gauche, soit B et C.

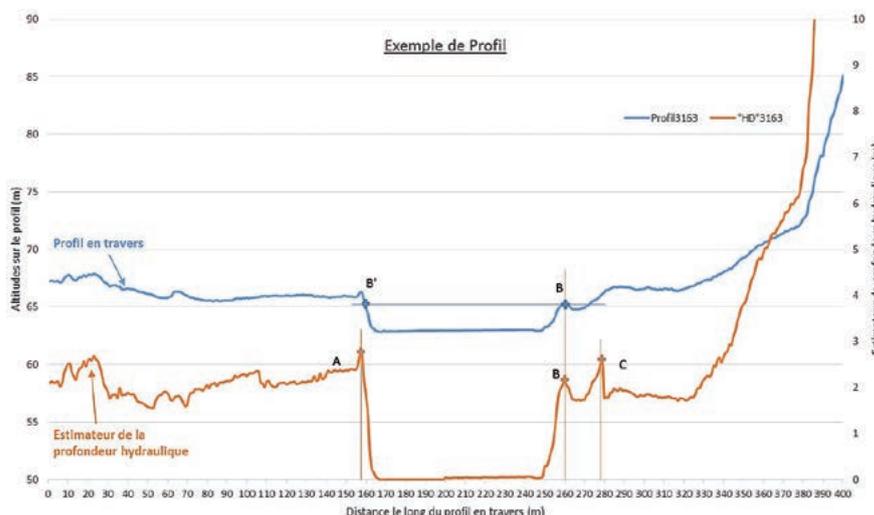


Figure 4. Recherche du point de débordement.

Le point de débordement le plus bas constitue la valeur du DPF pour le profil altitudinal (courbe bleue), ici au point B. Cette valeur altitudinale est alors projetée sur la rive opposée, soit en B' sur la figure 3. Les valeurs métriques de DPF sont ensuite lissées dans un voisinage de 10 m.

4.2 Situations spécifiques

4.2.1 Traitement du bruit résiduel

Certains tronçons sont entachés d'erreur à la prise de vue. On les reconnaît visuellement par un effet de lignage [figure 5]. Lorsque ces *artefacts* sont très marqués, le lissage gaussien n'a pas permis de les masquer. On a recours à un traitement statistique du profil en long pour les détecter et interpoler les valeurs de DPF erronées en fonction de leurs voisins.

4.2.2 Annexes fluviales, îlots

Lors du traitement, on met en œuvre la reconnaissance du cours d'eau principal et on effectue une distinction entre les points de berges du cours principal et ceux associés à une île ou à un bras mort [figure 6].

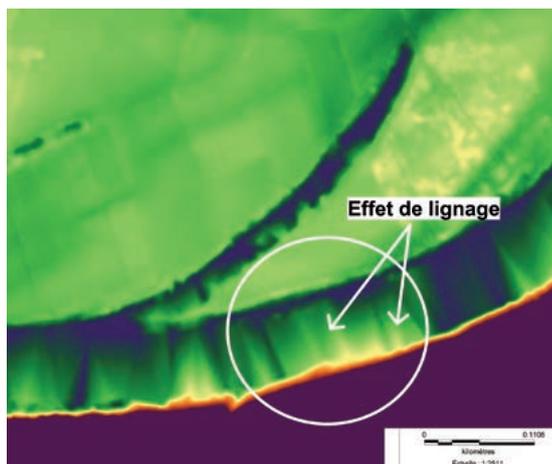


Figure 5. Donnée bruitée.

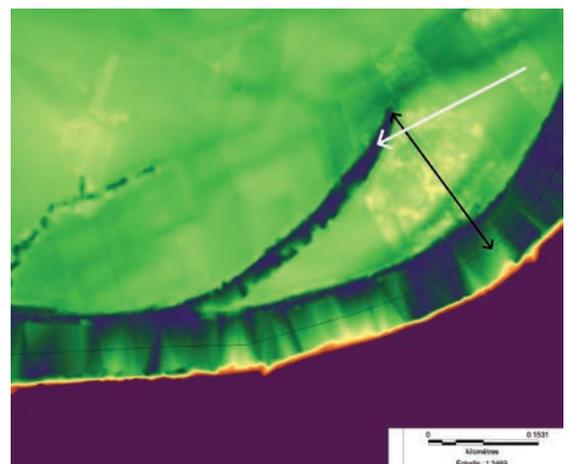


Figure 6. Annexe au cours principal.

4.3 Validation

La validation utilise deux approches. La première est interne à la modélisation des points du DPF et repose sur l'évaluation de la pertinence statistique des points calculés. Elle se traduira par un attribut du niveau de confiance que l'on accorde au point, comparativement à la distribution des valeurs de DPF des points voisins.

Lors de la détection des zones bruitées, que l'on est amené à interpoler, la longueur de la section bruitée est référencée. Les zones bruitées en question font l'objet d'une vérification *a posteriori* par superposition aux orthophotos.

La phase de validation à proprement parler utilise les données de terrain dont dispose Épidor : profils bathymétriques et campagnes de terrain d'observation de la limite de débordement. Une partie de ces jeux de données est consacrée au calage du modèle et le reste à la validation.

5. Résultats

5.1 Livrables

L'information concernant la délimitation de l'enveloppe du DPF se décline sous deux formes :

- un fichier vectoriel des points de DPF assortis de données attributaires : altitude, type de point et niveau de confiance ;
- un fichier vectoriel polygone qui contient l'enveloppe du DPF et les zones dépressionnaires que l'on a pu détecter lors du balayage du profil.

5.2 Exemples

Nous sommes encore au démarrage de la cartographie, mais voici un premier exemple de rendu, pour la zone de Castelnaud-la-Chapelle. L'enveloppe de DPF est figurée en violet, et les zones dépressionnaires rencontrées sur le profil transversal en bleu [figures 7 à 9].

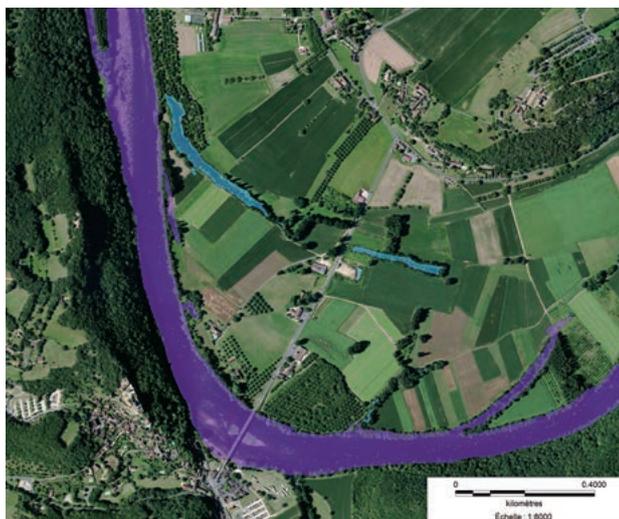


Figure 7. Enveloppe du DPF et zones dépressionnaires.

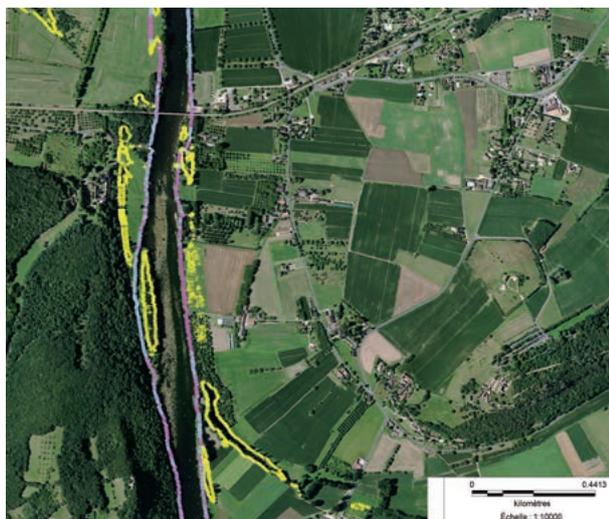


Figure 8. Codage du cours principal et des dérivés.

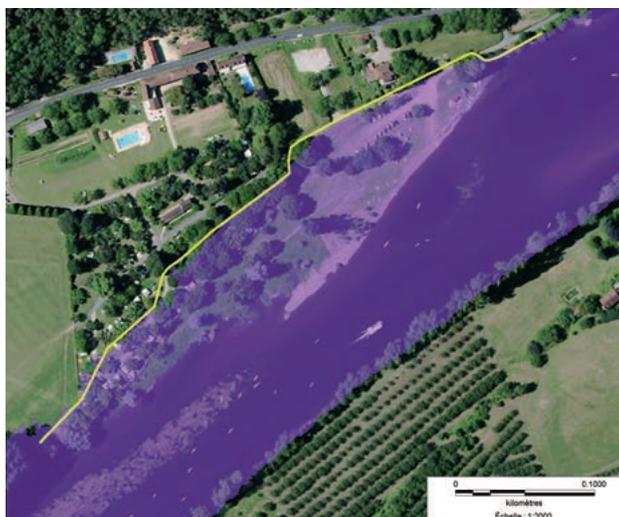


Figure 9. Comparaison à un tracé in situ (17 février 2016).

6. Discussion

L'utilisation du traitement numérique de données issues de la télédétection ouvre des perspectives nouvelles et particulièrement étendues pour le gestionnaire. Elle permet de mener des analyses de grande précision sur des territoires de grande étendue, dans un temps restreint et avec des moyens relativement limités.

La présente application fait suite à plusieurs expériences déjà menées sur le bassin de la Dordogne. L'interprétation d'imagerie satellitaire et d'orthophotographies assistée par ordinateur avait déjà été menée en 2007 pour réaliser une cartographie des zones à dominante humide sur l'ensemble du bassin versant de la Dordogne (25 000 km²). Ce travail avait rendu possible un porter à connaissance à l'ensemble des communes du bassin versant d'une cartographie informative utilisable pour l'élaboration des documents d'urbanisme communaux.

En 2008, un exercice d'évaluation des fonctions des zones humides avait par ailleurs été réalisé à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale, combinant relevés lidar et images satellitaires à très haute résolution. Ce travail avait permis de réaliser l'analyse spatiale de l'état de conservation des zones à dominante humide du bassin versant de la Lizonne (750 km²) et d'identifier les secteurs présentant les plus fortes potentialités de restauration en fonction de différents critères de fonctionnalités hydrologiques, biogéochimiques et écologiques des zones humides.

Avec l'étude de délimitation du DPF, Épidor disposera de nouveaux éléments qui faciliteront l'accomplissement de sa mission de gestionnaire du domaine. Pour rappel, cette gestion consiste principalement à :

- maintenir l'usage public du DPF ;
- conserver l'intégrité du domaine et éviter toute appropriation ;
- délivrer des autorisations pour les occupations temporaires qui dépassent le cadre de l'usage public ;
- maintenir une servitude dite « de marchepied » de part et d'autre de la rivière. En effet, les activités riveraines peuvent générer des différends sur les limites à respecter pour le développement ou l'implantation de constructions, plantations, voiries, cheminements ou autres aménagements.

Avec la cartographie élaborée dans le cadre de la présente étude, Épidor disposera d'une référence objective, homogène et précise (échelle cadastrale) qui facilitera l'analyse des situations sur le terrain, sur l'ensemble des 460 km du domaine. Cela permettra de rationaliser et d'harmoniser les réponses qui devront être apportées aux différentes demandes et situations rencontrées (occupations, aménagements, conflits). Avec des techniques classiques de relevés topographiques sur le terrain, ce type de délimitation *a priori* serait impossible car il nécessiterait des moyens disproportionnés.

En outre, cette cartographie globale fournira une vue d'ensemble du domaine qui permettra de bâtir des stratégies de gestion et d'action concernant par exemple : la reconquête d'espaces faisant l'objet d'appropriations, la restauration ou la renaturation de sites d'intérêt écologique ou patrimonial, la surveillance de sites à fort enjeu... Elle pourra enfin constituer un outil d'information des usagers et des collectivités dans le cadre des porter à connaissance qui pourront être diffusés auprès de ces acteurs.

Les résultats de ces modélisations ne sauront se substituer à des mesures sur le terrain qui resteront les seules observations déterminantes. Mais en fournissant des supports de débat précis et objectifs, elles faciliteront grandement le métier du gestionnaire et fiabiliseront les débats.

Références bibliographiques

- **Cencetti, C., De Rosa, P., Fredduzzi, A.**, 2014, « *Geomorphological features extraction from high resolution DEM* », Proceedings OGRS, pp. 75-82.
- **Crasto, N., Hopkinson, C., Marsh, P., Donald, L., Forbes, D.I., Spooner, I.**, 2010, « *Delineation of lakes and channels in the Mackenzie delta, NWT using airborne lidar* », Remote Sensing And Hydrology (proceedings IAHS publ. 352, 2012), pp 359-362.
- **IGN**, 2013, http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_RGE-ALTI.pdf.
- **Leopold, L.B., Wolman, M.G.**, 1957, « *River channel patterns: braided, meandering and straight* », Rap. US Geological Survey, pp 39-85.
- **Navratil, O.**, 2005, Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques. Thèse INPG-Cemagref (Grenoble Institute of Technology), 308 p.
- **Radecki-Pawlik, A.**, 2002, « *Bankfull discharge in mountain streams: theory and practice* », Earth Surface Processes and Landforms. John Wiley and Sons, 27, pp. 115-123.
- **Wahl, K.L.**, 1984, « *Evolution of the use of channel cross-section properties for estimating streamflow characteristics* », Selected papers in Hydrologic Sciences, vol. 43, pp. 53-66.
- **Williams, G.P.**, 1978, « *Bank-Full discharge of rivers* », Water Resources Research, vol. 14-6, pp. 1141-1153.

Posters

- Avantages et limites des méthodes photogrammétriques pour l'étude de la végétation riveraine
- Vers une méthode de suivi du marnage des plans d'eau par imagerie
- Télédétection infrarouge thermique des cours d'eau : retour d'expérience de cinq années de recherche dans les bassins du Rhône et de la Loire
- Apport de l'imagerie drone pour le suivi à haute fréquence temporelle de la végétation alluviale : exemple du suivi de la restauration de la continuité écologique de la Sélune *[résumé]*





Avantages et limites des méthodes photogrammétriques pour l'étude de la végétation riveraine

Borbála Hortobágyi^{1,2}, Franck Vautier^{3,4}, Doy Corenblit^{1,2}, Johannes Steiger^{1,2}, Erwan Roussel^{1,2}, Jean-Luc Peiry^{1,2}

¹Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, GEOLAB, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France; ²CNRS, UMR 6042, F-63057; ³Université Clermont Auvergne, Université Blaise Pascal, Maison des Sciences de l'Homme, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France; ⁴CNRS, USR 3550, F-63057 (auteur correspondant: Borbála.HORTOBAGYI@univ-bpclermont.fr).



Contexte

La végétation riveraine répond aux perturbations hydrogéomorphologiques et contrôle l'érosion et le dépôt des sédiments. Cependant, il existe encore des lacunes dans la compréhension et la quantification des ajustements réciproques (rétroactions) entre la végétation et les formes fluviales.

La photogrammétrie peut être utilisée pour : 1) dériver des modèles de hauteur de la végétation pour quantifier dans un contexte hétérogène et dynamique le taux de croissance ; 2) dériver des modèles numériques de terrain (MNT).

Objectifs

- 1) Construire des modèles photogrammétriques 3D de la végétation riveraine à partir des photographies aériennes à deux échelles spatiales complémentaires (corridor et banc).
- 2) Développer une méthode de photogrammétrie terrestre pour étudier la végétation riveraine et la topographie à l'échelle du micro-site.
- 3) Évaluer la qualité des modèles photogrammétriques par des mesures de hauteur végétale sur le terrain.

Site d'étude

Rivière méandriforme avec forte dynamique latérale.

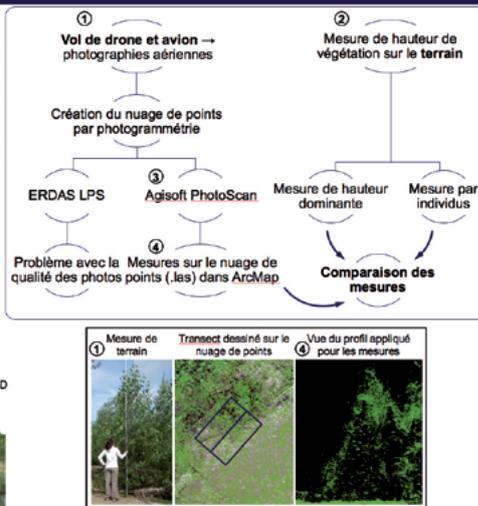
Mosaïque paysagère complexe : répartition spatiale hétérogène de l'âge et de la taille des taches de végétation.

Méthodes

Drone et avion

	Drone	Avion
Matériel	Falcon-8 (Aedac GmbH)	Cessna172
Échelle	Banc (18 ha)	Plaine alluviale (2 300 ha)
Caméra	Sony NEX-5n	Canon EOS 6D
Hauteur de vol	80 m	535 m
Résolution	25 mm/pixel	10 cm/pixel

Type de végétation	Arbre (<i>Populus nigra</i> , <i>Salix alba</i>), arbuste, herbacée
Hauteur de végétation	0,1 m – 23 m
Méthodes de mesure	1. Végétation isolée (individu) 2. Hauteur végétale dominante dans un rayon de 5 m
Outils de mesure	Mire de 5 m, télémètre laser

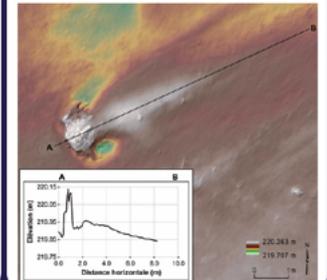


Photogrammétrie terrestre

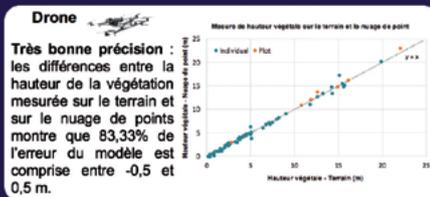
Un PENTAX WG (16 mégapixels) a été utilisé pour collecter des photographies hivernales de deux peupliers et de leur traînée sédimentaire.

1) Utilisation du logiciel Agisoft PhotoScan → modèle 3D (MNT) → analyse topographique des traînées sédimentaires.

2) Évaluation des paramètres clés renseignant la physiologie végétale (hauteur, largeur du tronc, profondeur) à l'aide de marqueurs numériques placés manuellement sur les différentes photographies → calcul des paramètres de physiologie végétale.



Résultats – qualité des modèles photogrammétriques 3D



Conclusions

Drone
Haute précision dans la représentation d'une végétation riveraine hétérogène. Logistique et organisation du vol sont aisées.
Limites : peut être appliquée à grande échelle (ex. banc alluvial) mais pas à l'échelle des petits arbres isolés de 15-40 cm.

Avion
Précision moyenne dans la représentation d'une végétation riveraine hétérogène. La méthode est adéquate pour étudier la végétation riveraine à petite échelle (ex. tronçon de 10 km) et pour la végétation > 3 m.
Limites : le plan de vol doit être strictement suivi ; logistique (mise en place des cibles, disponibilité du pilote et de l'avion, organisation du vol chronophage).

Photogrammétrie terrestre
Résultats précis, simples à mettre en place mais travail chronophage sur l'ordinateur pour extraire les paramètres de végétation. Méthode inadaptée aux petites échelles.

Le taux de croissance est un élément fondamental à prendre en compte lors de l'étude des rétroactions entre la construction des formes fluviales et l'établissement de la végétation et de la succession.

Les informations extraites par photogrammétrie peuvent être utilisées pour alimenter des modèles numériques 3D de la dynamique de la végétation riveraine.

La photogrammétrie peut être un outil utile pour la gestion environnementale.

Pour aller plus loin : Hortobágyi, B., et al. 2016. « A multi-scale approach of fluvial biogeomorphic dynamics using photogrammetry », *Journal of Environmental Management*.

Vautier, F., et al. 2016. « Monitoring and reconstructing past biogeomorphic succession within fluvial corridors using stereophotogrammetry », *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 : pp. 1448-1463.



VERS UNE MÉTHODE DE SUIVI DU MARNAGE DES PLANS D'EAU PAR IMAGERIE

Thierry Tormos^{1,2}, Pierre-Alain Danis^{1,2}

INTRODUCTION

Le marnage (fluctuations du niveau d'eau) est l'une des altérations qui modifient fortement les caractéristiques des écosystèmes lacustres (e.g. température, disponibilité des habitats, état/potential écologique). Notre travail cherche à développer une méthode de suivi opérationnelle du marnage par télédétection afin de mieux comprendre son impact.

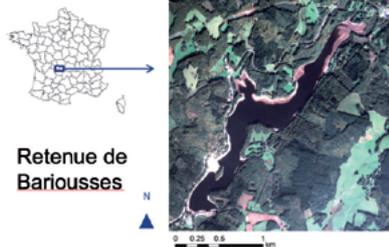
MÉTHODE

Classification des surfaces en eau à l'aide d'une analyse orientée objet : segmentation et classification de chaque image afin d'extraire les surfaces en eau sur une zone locale à faible pente non encombrée.



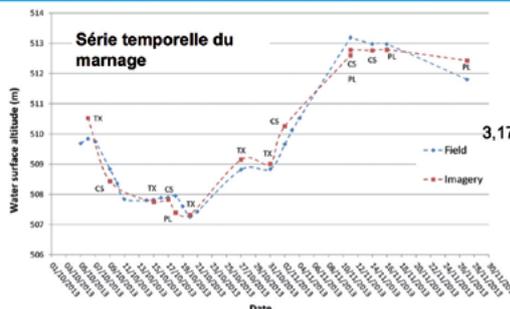
Analyse par régression : cote en eau (composante verticale du terrain) en fonction de la surface en eau sur la zone locale (composante verticale de l'imagerie).

SITES D'ÉTUDE



Source des images : orthophotos IGN®

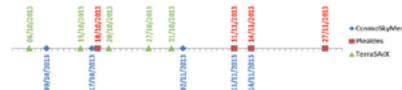
RÉSULTATS



Régression :
Cote en eau =
 $3,1757 * (\text{surface}) + 501,07$
 $R^2 = 0,9633$
RMSE = 0,42 m

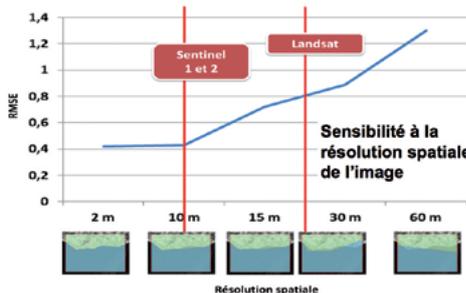
DONNÉES

1. Imagerie :



Pléiades : 5 bandes, 4 XS (4 m), panchro (0,5 m)
Cosmo-Skymed (RADAR) : 1 bande, 0,5 m
TerraSAR-X (RADAR) : 1 bande, 0,5 m

2. Données terrain : cotes de la surface de l'eau (en m) à chaque date d'image.



Sur la zone locale observée :
RMSE équivalente à 10 m de résolution spatiale
RMSE doublé (mais acceptable) à 30 m de résolution spatiale

PRÉ-TRAITEMENTS

Correction des effets du speckle pour les images radar (filtre Gamma MAP, matrice 7x7). Correction géométrique pour les TerraSAR-X (utilisation du SRTM). Ré-échantillonnage spatial pour générer une version de chaque image à 2, 10, 15, 30 et 60 m de résolution spatiale.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

- Très bonne relation entre les variations verticales et horizontales.
 - Intérêt des images radar : haute résolution temporelle par tout temps.
 - Résultats identiques avec les images Sentinel-1 et -2 disponibles gratuitement (10 m, 1 image tous les 2, 3 j)
- Études en perspective pour mettre en opération la méthode :
- Sensibilité à la pente de la zone locale observée ?
 - Cas des retenues ou lacs sans présence de plage mais avec de la végétation aquatique émergente ?



¹ Onema : Pôle Onema-Irstea Hydroécologie des Plans d'eau, Centre d'Aix-en-Provence
² Irstea : UR RECOVER, équipe FRESHCO, Centre d'Aix-en-Provence

Contacts :
Thierry Tormos ; thierry.tormos@onema.fr
Pierre-Alain Danis ; pierre-alain.danis@onema.fr

Remerciements :

Un grand merci à Ricardo Simon pour son travail sur ce sujet. Merci également aux programmes GEOSUD et RTU CNES pour l'appui au financement des images et à EDF pour la fourniture des données terrain.



Téledétection infrarouge thermique des cours d'eau

retour d'expérience de 5 années de recherche dans les bassins du Rhône et de la Loire

Apports souterrains (Loire moyenne)

Les images thermiques Landsat ont permis de réaliser des profils thermiques longitudinaux de la Loire au niveau de l'aquifère de la Beauce.

Le débit phréatique a été quantifié en utilisant un bilan de chaleur et le modèle hydrogéologique Eau-Dyssée (Lalot et al., 2015 ; Baratelli et al., en révision). Il est estimé à $13,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en été et $5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en hiver. Ce débit est plus important lors des périodes de diminution du débit de la Loire.

Refuges thermiques (Ain)

L'imagerie thermique aéroportée a permis de détecter une centaine de refuges thermiques sur un linéaire de 50 km (Wawrzyniak et al., 2016).

La présence de refuges sur le continuum fluvial est liée à la mobilité latérale du cours d'eau, au transport sédimentaire et au contexte géologique local.

Les résurgences et les remontées hyporhéiques montrent une variabilité interannuelle liée aux conditions de nappe alors que les bras latéraux froids sont plus stables.

Les 4 types de refuges thermiques observés :

- Bras latéraux froids
- Résurgences
- Remontées hyporhéiques
- Parajoches des affluents

Sources karstiques (Cèze)

Les images thermiques ont permis d'identifier des sources d'origine karstique jusqu'ici encore inconnues.

A partir des profils de température et en utilisant le principe de mélange, il est possible de quantifier les débits de certaines sources karstiques.

Vecteurs utilisés

	Satellite	Hélicoptère	ULM	Paramoteur	Drone
Résolution spatiale	60 - 120 m	0,5 - 5 m		0,1 - 1 m	
Linéaire de cours d'eau	> 100 km	10 - 100 km		0 - 2 km	
Coût	Gratuit (Landsat)	1000 - 3000€		500 - 1000€	
Etudes réalisées	Rhône, Loire	Ain, Cèze, vieux Rhône, Loir, Connie, Cher		Drôme, Eygues, Bez, Vénéon, Bans, Drac Noir, Buéch, Bléone, Asse de Bieux	

Qualité

Drône au niveau de la réserve des Karst



Partie gauche de l'affiche en page précédente

s d'eau e et de la Loire

Vincent Wawrzyniak^{1,2*}, Eric Lalot³,
Hervé Piégay¹, Florentina Moatar³ &
Pascal Allemand⁴

¹Université de Lyon, CNRS-UMR 5600 EVS
²Université de Franche-Comté, CNRS UMR 6049 Théma
³Université François Rabelais, Laboratoire GEHCO
⁴Université de Lyon, CNRS-UMR 5276 LGLTPE

*email : vincent.wawrzyniak@gmail.com

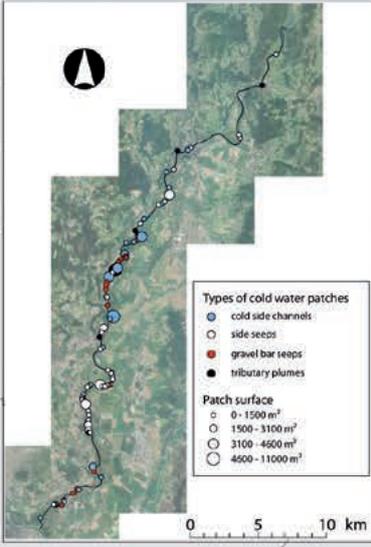
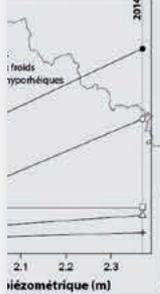


(Ain)

ur une centaine de
ak et al., 2016).

i la mobilité latérale
e géologique local.

rent une variabilité
bras latéraux froids



Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Goma R., Grandjean P. 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold water patches assessed using thermal Infrared (TIR) remote sensing. Remote Sensing of Environment 175: 337-348

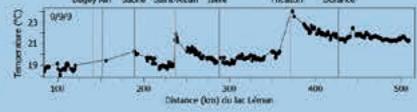
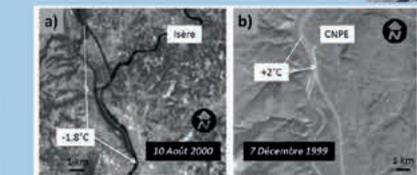
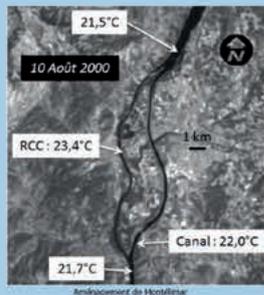
Lalot E., Curie F., Wawrzyniak V., Barattelli F., Schomburgk S., Filpo N., Piégay H., Moatar F. 2015. Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging. Hydrology and Earth System Sciences 19(11): 4479-4492

Wawrzyniak V., Piégay H., Allemand P., Vaudor L., Grandjean P. 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. International Journal of Remote Sensing 34(13): 4612-4631

Wawrzyniak V., Piégay H., Poinel A. 2012. Longitudinal and temporal thermal patterns of the French Rhône River using Landsat ETM+ thermal infrared (TIR) images. Aquatic Sciences 74(3): 405-414

Barattelli F., Filpo N., Moatar F. 2016. Estimation of stream-aquifer exchanges at regional scale using a distributed model: sensitivity to in-stream water level fluctuations. Under revision for Journal of Hydrology

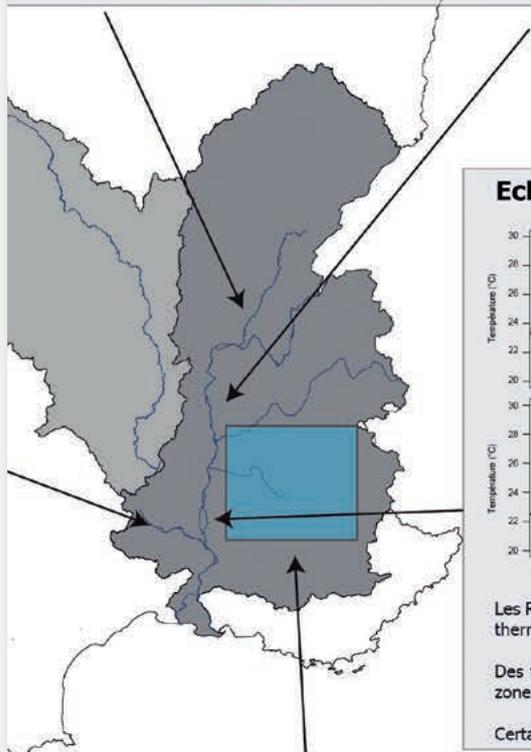
Impact potentiel des aménagements (Rhône)



Les images Landsat permettent de caractériser les structures thermiques longitudinales sur plusieurs centaines de kilomètres (Wawrzyniak et al., 2012).

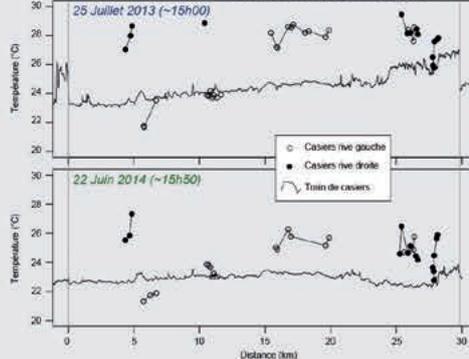
Les centrales nucléaires engendrent un panache chaud visible sur plusieurs kilomètres.

En été, le Rhône court-circuité (RCC) est plus chaud que le canal car la profondeur y est plus faible.



Echauffement estival des habitats riverains (Rhône)

Profil longitudinal et T° des casiers Girardon (aménagement de Dorzière-Mondragon)

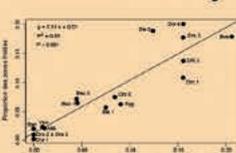


Les RCC montrent un léger gradient thermique longitudinal (~0,05°/km). Latéralement, la variabilité thermique est faible.

Des températures élevées sont observées dans des zones peu profondes et/ou stagnantes (rives, zones entre épis, bras peu courants, casiers Girardon).

Certains contre-canaux, bras latéraux ou casiers sont froids (alimentés par des eaux souterraines).

Qualité des habitats (Rivières en tresses)



Le drone et le paramoteur permettent d'étudier les structures thermiques à très haute résolution spatiale ainsi que d'effectuer plusieurs vols dans une journée (Wawrzyniak et al., 2013).

En conditions de basses eaux, certains tronçons présentent un réseau de tresses bien développé du fait d'une forte connectivité avec les eaux souterraines.

L'hétérogénéité thermique peut être estimée à partir de la diversité des habitats aquatiques (proportion de mares et de chenaux alluviaux ou phréatiques).



Apport de l'imagerie drone pour le suivi à haute fréquence temporelle de la végétation alluviale : exemple du suivi de la restauration de la continuité écologique de la Sélune

Marianne **Laslier**, Laurence **Hubert-Moy**, Simon **Dufour**

LETG-RENNES COSTEL UMR CNRS 6554, Université Rennes 2, place du recteur Henri-Le Moal, 35043 Rennes

Résumé du poster

La démocratisation des drones s'est accompagnée d'une production importante d'images 2D à très haute résolution pour l'étude de l'environnement ; leur flexibilité d'utilisation et leur coût de production relativement faible en faisant un outil potentiellement très intéressant pour les gestionnaires, en particulier dans les secteurs peu accessibles comme les corridors fluviaux. Cependant, encore peu d'études analysent finement cet outil pour les gestionnaires de cours d'eau. Dans le domaine de la restauration écologique, les drones peuvent permettre de caractériser spatialement et à une résolution temporelle fine le processus de restauration. Dans le cas particulier d'un arasement de barrage conduisant à la formation d'une nouvelle ripisylve sur les berges dénoyées du lac de retenue, le drone peut être utilisé afin de suivre la végétalisation du milieu, et donc sa restauration.

Nous avons cherché à évaluer l'intérêt d'utiliser des images drone pour étudier la colonisation végétale d'un lac de retenue dénoyé, en caractérisant le processus de colonisation (vitesse de colonisation, patron spatial, caractéristiques de la végétation colonisatrice). Pour cela, nous avons dans un premier temps cartographié l'étendue de la couverture végétale à différentes dates en utilisant des régressions non linéaires de type SVM afin d'estimer la vitesse et le patron spatial de la colonisation. Dans un deuxième temps, nous avons identifié et cartographié les communautés présentes sur le site en réalisant des analyses statistiques (NMDS, CAH) et des classifications supervisées de type SVM.

Les résultats montrent l'utilité du drone pour cartographier et évaluer la vitesse et le patron spatial de colonisation. En effet, les images drones ont permis de cartographier avec une grande précision ($> 0,90$) le recouvrement végétal sur toute la zone d'étude. Ces cartes nous ont permis d'estimer la vitesse de colonisation (recouvrement quasi total du site en quelques mois) et de visualiser le patron spatial de colonisation. Cependant, les résultats n'ont pas permis de cartographier les communautés présentes sur le site d'étude avec une précision correcte ($\kappa < 0,6$).

Si ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'imagerie drone, ils permettent également de discuter ses limites et contraintes, tant d'un point de vue scientifique, puisque nous ne sommes pas parvenus à discriminer les communautés végétales, que d'un point de vue technique et opérationnel, la qualité variable des images à traiter, la lourdeur des traitements et les temps de calculs étant autant de contraintes à considérer dans le processus de production de l'information à partir de l'imagerie drone.

Mots clés : colonisation, drone, arasement de barrage, succession

Conclusion

Pour en savoir plus





Conclusion

Philippe Dupont

Directeur de la recherche, de l'expertise et du développement des compétences, Agence française pour la biodiversité (AFB)

J'ai apprécié le positionnement de départ de cette journée consacrée à l'utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux. En effet, notre souhait à l'AFB est de réussir à faire la part des choses entre le soutien à la recherche, pour que la connaissance avance... et le soutien à la recherche en appui assez direct à l'action, pour une ou des applications données, par exemple ici la caractérisation, l'évaluation, le suivi de la restauration à différentes échelles. Nous avons le souci permanent de travailler en ce sens, de mettre en relation la science, les questions de gestion et les besoins des politiques publiques et c'est donc ce qui a été tenté et réussi lors de cette journée.

La diversité des exposés a permis de montrer une grande richesse de projets. Certains sont encore prospectifs et font appel à des notions et des méthodes très pointues. D'autres exposés ont porté sur des exemples très concrets d'usage des outils de télédétection en réponse à des besoins opérationnels. En collaboration avec le ministère, dans nos missions mobilisant la recherche, nous devons ainsi réussir à définir une stratégie de soutien de ces actions de recherche dans le souci permanent de leur utilisation future. Nous devons aussi nous interroger sur la manière d'utiliser la masse impressionnante d'informations que génèrent ces technologies pour fournir aux gestionnaires des outils simples et directement utilisables.

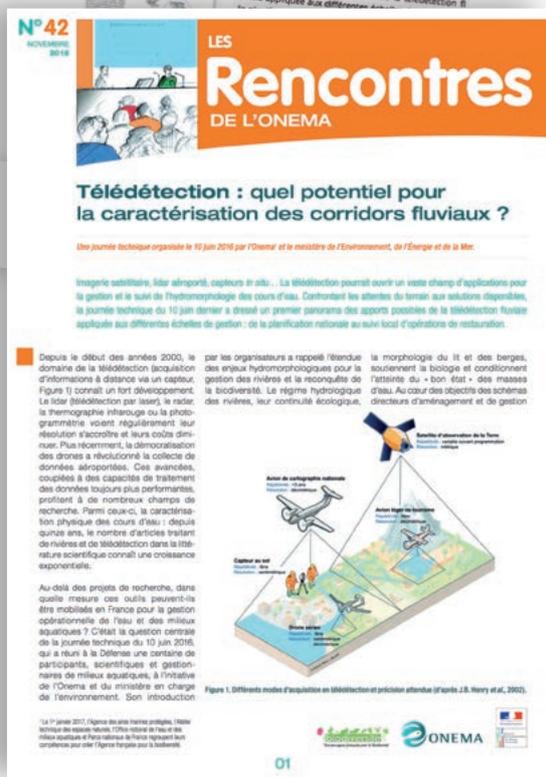
Je voudrais également rebondir sur cette question des gestionnaires. Il me semble qu'il faut bien faire la différence entre ce que produisent les chercheurs en termes d'outils, de modélisation et l'utilisation potentielle effective de ces outils par les gestionnaires. Il faut en effet prendre en compte la capacité des gestionnaires à s'emparer de tel ou tel sujet, de tel ou tel outil. Certains établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) ont ainsi des équipes techniques qui leur permettent de monter des partenariats avec les scientifiques pour élaborer des projets répondant à leurs besoins opérationnels. Mais pour les petits syndicats de rivière, c'est impossible. Il faut que nous, État, établissements publics, nous nous posions la question de comment venir en aide à ces structures. Il est très important de mener les projets jusqu'au bout, jusqu'aux utilisateurs finaux, de rendre les outils non seulement utilisables mais également utilisés.

Dans l'avenir, dans le cadre de l'AFB, il faut que nous arrivions, au sein de ce foisonnement de possibilités, à construire notre stratégie, à définir des lignes de conduite et de force pour optimiser notre action. Cette journée a montré que nous avons des cartes en mains, et qu'il faut donc inscrire cet axe de travail dans la durée !



Pour en savoir plus

Page web du séminaire avec les présentations (vidéo et diaporama) et les actes complets : <http://www.onema.fr/avancees-apports-et-perspectives-de-la-teledetection-pour-la-caracterisation-physique-des-corradors>



http://oai.afbiodiversite.fr/cindococai/download/PUBLI/1072/1/2016_064.pdf_1605Ko

Citation

Vivier A., Breton L., Grivel S., Melun G. (coordinateurs), 2018.
Avancées, apports et perspectives de la télédétection
pour la caractérisation physique des corridors fluviaux.
Actes de la journée technique Paris, 10 juin 2016.
Agence française pour la biodiversité. Collection Les actes. 120 pages.

Édition : Véronique Barre et Béatrice Gentil-Salasc
Réalisation : Graphies et Bluelife

ISBN web : 978-2-37785-027-3

ISBN print : 978-2-37785-028-0

Imprimé en France sur papier issu de forêts gérées durablement
Estimprim

Mars 2018

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT



<http://www.afbiodiversite.fr/>