

Automatisation à large échelle du calcul de métriques hydromorphologiques à partir de données LiDAR

Large-scale automation of hydromorphological metrics from LiDAR data

Rétat A.¹, Thommeret N.², Gob F.³, Lespez L.⁴, Bailly J.-S.⁵, Kreutzenberger K.⁶, Depret T.⁷

- 1) Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591 – alexandre.retat@cnrs.fr
- 2) Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591 - nathalie.thommeret@u-pec.fr
- 3) Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591 - frederic.gob@univ-paris1.fr
- 4) Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591 - laurent.lespez@u-pec.fr et laurent.lespez@cnrs.fr
- 5) LISAH, Université Montpellier, AgrosParisTech, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France - bailly@agroparistech.fr
- 6) Office français de la biodiversité, Direction générale, Service Eau et Milieux Aquatiques - karl.kreutzenberger@ofb.gouv.fr
- 7) Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR 8591, Université Paris-Est Créteil, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne – thomas.depret@cnrs.fr

RÉSUMÉ

La collecte de données hydromorphologiques, incluant principalement la géométrie des lits, la caractérisation de la végétation riveraine et la granulométrie, revêt aujourd'hui un enjeu important pour comprendre le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau mais aussi répondre aux objectifs des politiques publiques en matière de surveillance et de restauration de la qualité des cours d'eau. Pour cela, ces données permettent notamment d'établir un diagnostic de l'altération d'un cours d'eau ou d'évaluer les conséquences d'une action de restauration écologique. L'enjeu de ce travail repose sur un double constat et une opportunité : d'une part un besoin croissant de données de caractérisation hydromorphologique sur les cours d'eau en France et l'impossibilité logistique d'appliquer des méthodes de terrain à de très vastes échelles et, d'autre part, la mise à disposition de données haute définition couvrant l'ensemble du territoire français. Ce travail vise ainsi à développer des méthodes de mesures et de caractérisation hydromorphologique de manière automatisée à partir de nuages LiDAR sur tout le territoire français, afin de compléter une vaste banque de données aujourd'hui constituée de mesures de terrain (Carhyce). Ces méthodes et ces nouvelles données permettront aussi d'envisager un changement d'échelle d'analyse : du stationnelle à l'ensemble du linéaire hydrographique.

ABSTRACT

The collection of hydromorphological data, mainly including bed geometry, characterization of riparian vegetation and sediment size, is a key factor in understanding the hydromorphological functioning of watercourses and meeting public policy objectives in terms of monitoring and restoring watercourse quality. In particular, these data can be used to diagnose the deterioration of a watercourse or to assess the consequences of an ecological restoration action. The challenge of this work is based on a double observation and an opportunity: on the one hand, a growing need for hydromorphological characterization data on French rivers and the logistical impossibility of applying field methods on very large scales, and on the other hand, the availability of high-definition data covering the whole of France. The aim of this work is to develop automated methods for measuring and characterizing hydromorphology using LiDAR data throughout France, in order to complete a vast database currently made up of field measurements (Carhyce). These methods and new data will also enable us to envisage a change in the scale of analysis: from station to the entire hydrographic line.

MOTS CLÉS

Hydromorphologie, LiDAR, télédétection, paramètres pleins-bords, large échelle.

Hydromorphology, LiDAR, remote-sensing, bankfull parameters, large scale.

1 LE PROGRAMME CARHYCE, ÉVALUATION HYDROMORPHOLOGIQUE DE TERRAIN

1.1 Le protocole et les méthodes d'analyse Carhyce

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), adoptée en 2000 à l'échelle de l'Union Européenne, a fixé l'objectif général pour les États membres « de parvenir au minimum à un bon état des eaux » [1]. Au plan général, outre la définition du très bon état (écologique), l'analyse des conditions hydromorphologiques y est rendue nécessaire en particulier pour justifier de la non dégradation de l'état existant ou encore en tant qu'exigence dans les programmes de surveillance, d'évaluation et de mesures afin d'atteindre l'état écologique requis (Art. 11.3.i). Les éléments de qualité (EQ) hydromorphologiques (hydrologie, continuité, morphologie) sont dès lors considérés comme en soutien des éléments de qualité biologiques (EQB) d'un cours d'eau. La mise en application de cette directive se traduit dans le droit de chaque État membre, chacun développant alors ses propres politiques et réglementations en termes de méthodes et de réseaux de collecte, comme d'exploitation, de données. En France, les services de l'Etat et notamment l'Office français de la biodiversité (OFB) et ses partenaires techniques locaux, ainsi que la communauté scientifique, pilote et met en œuvre plusieurs dispositifs visant à connaître, suivre et évaluer le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et des pressions anthropiques qu'ils subissent. Il s'agit notamment du dispositif d'évaluation des liens pressions-impacts « Prhymo » pour Plateforme pressions et risques d'impacts hydromorphologiques des cours d'eau, et du programme de Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau de France (Carhyce). Le dispositif Prhymo fournit un cadre général standardisé multiscalaires (depuis le bassin versant) d'analyses des liens pressions – fonctionnement – impacts hydromorphologiques multi-EQ (hydrologie, morphologie et continuité des cours d'eau) via des schémas géomatiques d'intégration de données spatialisées et des modèles d'évaluation des risques d'altérations [2]. Le programme Carhyce est quant à lui un dispositif pérenne et permanent du programme de surveillance de l'état des eaux. Il se base sur des données de caractérisation environnementale acquises directement sur le terrain, à l'échelle de stations de suivi, suivant un protocole standardisé [3] ; et concerne spécifiquement l'EQ « Morphologie ». Ces deux approches se complètent dans la recherche et l'identification de secteurs présentant un risque d'altération ou bien pour constat d'un mauvais état hydromorphologique, et permettent d'en faire le lien avec les causes à l'échelle du linéaire hydrographique ou du bassin versant. Elles couvrent par ailleurs le territoire hexagonal comme les départements et régions d'Outre-mer.

Afin d'établir un diagnostic objectif et homogène de l'état hydromorphologique des cours d'eau français, le programme Carhyce repose donc sur un protocole de terrain standardisé et sur une banque de données comptant à ce jour 4625 opérations de collecte sur 2619 stations (i.e. tronçon de cours d'eau généralement de quelques centaines de mètres) en France hexagonale et outre-mer. Des métriques et des indicateurs d'évaluation sont ensuite calculés à partir des données collectées sur le terrain. En accord avec les spécificités de la DCE et de sa transcription française, le protocole Carhyce comporte à la fois une description géométrique : topographie en 2D sur 15 sections transversales, largeur à plein bords, pente, etc... ; mais aussi de données granulométriques ainsi que des informations sur la végétation riveraine : strates, épaisseurs, continuités. Dans la phase d'exploitation, les méthodes d'analyse de Carhyce permettent notamment de faire ressortir un diagnostic de l'état de chaque cours d'eau par rapport à des références régionales [4].

1.2 Opportunités du LiDAR HD pour la collecte de données

Le dispositif Carhyce se concentrant sur des relevés à la station, l'évaluation du fonctionnement et des altérations hydromorphologiques sur l'ensemble d'un linéaire hydrographique n'est aujourd'hui possible qu'à dire d'experts, dans les limites que représentent un tel changement d'échelles (notamment difficultés de moyens et de standardisation). De plus, la collecte de données de terrain via le protocole Carhyce implique des moyens humains importants (environ 5 personnes pendant 1 journée pour une station), se heurtant par ailleurs à des difficultés de mise en pratique ne permettant pas de couvrir tous les types de station. Il n'est ainsi déployable que sur des stations prospectables à pied, excluant ainsi les cours d'eau trop profonds, ou ceux dont la progression est rendue difficile lorsque la végétation est très dense. Ainsi, l'utilisation de données de télédétection apparaît pertinente et adaptée pour caractériser les stations, ouvrant d'une part à la possibilité d'automatiser une partie de la collecte de données, et d'autre part de passer à l'échelle du linéaire de tronçon de cours d'eau, y compris pour des secteurs non actuellement suivis. Ces enjeux de systématisation nécessitent le développement de méthodes et d'outils d'extraction de métriques hydromorphologiques les plus automatisés possible. Si la littérature scientifique abonde de travaux portant sur l'automatisation de mesures de métriques de cours d'eau [5, 6, 7, 8], elles sont bien souvent limitées par une faible résolution spatiale de la donnée et/ou par une part importante d'intervention utilisateur. Depuis peu, la France a la chance de disposer d'une donnée

précise et homogène à haute densité (10-70 pt/m²) grâce au programme d'acquisition LiDAR HD de l'IGN. Une vision du sol et du couvert végétal pourra ainsi bientôt être disponible sur tout le territoire national permettant la mise en application d'algorithmes de calcul pour la caractérisation hydromorphologique des cours d'eau de l'ensemble du réseau hydrographique français, hors Guyane. Les méthodes et résultats présentés ici portent sur la principale difficulté que représente l'extraction automatique des paramètres à pleins-bords (notamment largeur). Paramètre central du programme Carhyce, le niveau à pleins-bords, qualifiant le niveau à partir duquel le cours d'eau débute son inondation de sa plaine alluviale [9], a fait l'objet de plusieurs publications concernant les moyens de le calculer géométriquement. Les principales méthodes employées aujourd'hui se tournent (i) soit vers l'identification, le long de profils en travers, de ruptures de pente dans la topographie pouvant être associées au sommet de la berge [10], (ii) soit vers le calcul de la profondeur hydraulique (ratio surface mouillée/largeur), ensuite exprimée en fonction de la hauteur [7]. Si ces deux approches ont leurs qualités propres, la seconde est davantage adaptée aux données haute densité car elle se trouve moins sensible aux variations micro-topographiques. C'est à partir de cette approche que nous avons développé la méthode Bf3D.

2 GRANDS PRINCIPES DE LA MÉTHODE BF3D

2.1 Reconstruction de la topographie

La première étape de cette méthode d'extraction de paramètres pleins bords consiste à reconstruire la topographie à partir de données LiDAR et du point aval de la station considérée. Les données LiDAR HD employées sont issues de capteurs LiDAR topographiques (longueur d'onde ~1050nm), avec une densité d'environ 10 impulsions/m², c'est-à-dire entre 10-70 pt/m² en sortie. Les nuages sont classifiés par une approche deep-learning suivi d'un contrôle manuel. Les principales limites de ces données dans notre exploitation sont l'absence quasi-général de point sur la surface de l'eau et la possibilité d'absence de points « Sol » sous un fort couvert végétal.

La grande différence de notre approche par rapport à la littérature est que le calcul de variables pleins bords ne se fait plus en moyennant plusieurs transects mais par une modélisation continue du cours d'eau. Cela permet de s'affranchir du choix de la position et de l'orientation des transects ainsi que du biais inhérent à la segmentation. La délimitation du chenal en eau au moment de l'acquisition suit un processus itératif se basant sur divers critères : l'altitude et la densité des points, la présence de points classés « Eau » ou « Pont » et la disposition des points de végétation. Suite à cette identification, les points à proximités du chenal sont récoltés et un modèle TIN (réseau triangulé irrégulier) continu est créé à partir des points « Sols ». La surface de l'eau identifiée suit un processus d'aplanissement et une suppression de la pente est effectuée afin de générer un modèle numérique de terrain (MNT) relatif au cours d'eau. L'algorithme de suppression de la pente prend en compte la sinuosité du cours d'eau afin d'éviter les incohérences topographiques liées au méandrage.

2.2 Calcul de la largeur à plein bords

De la même manière que pour l'approche 2D, un calcul de la profondeur hydraulique en fonction de la hauteur est effectué. Mais la profondeur hydraulique est ici définie comme le rapport entre le volume mouillé et la surface au miroir, intégrant ainsi l'intégralité de la surface topographique de la station. L'identification de maximums locaux sur cette courbe permet de définir les niveaux où la surface augmente significativement par rapport au volume, indiquant ainsi les niveaux d'inondations. L'antécédent du principal pic ainsi retenu peut alors être qualifié de niveau à pleins bords. La largeur à pleins bords est alors calculée comme le rapport de la surface au miroir avec la longueur de la station.

3 ÉVALUATION ET APPLICATION À LARGE ÉCHELLE

Les résultats présentés sont la comparaison à large échelle (> 1000 stations) entre les largeurs à pleins bords mesurées via le protocole Carhyce, basées sur des transects, et l'approche automatique Bf3D. Une première application sur une trentaine de stations avec des caractéristiques hydromorphologiques variées en termes de géométrie et d'artificialisation a d'ores et déjà montré des résultats très encourageants. Une détermination manuelle y a été faite sur le MNT LiDAR résultant en des écarts de l'ordre de 20% avec la référence Carhyce (figure 1.a). Notre algorithme automatique a quant à lui donné des résultats dont l'écart est en moyenne de 24% avec cette même référence (figure 1.b). Cette petite perte de qualité comparée au gain de temps permet par l'automatisation est considérée comme acceptable pour les besoins des gestionnaires.

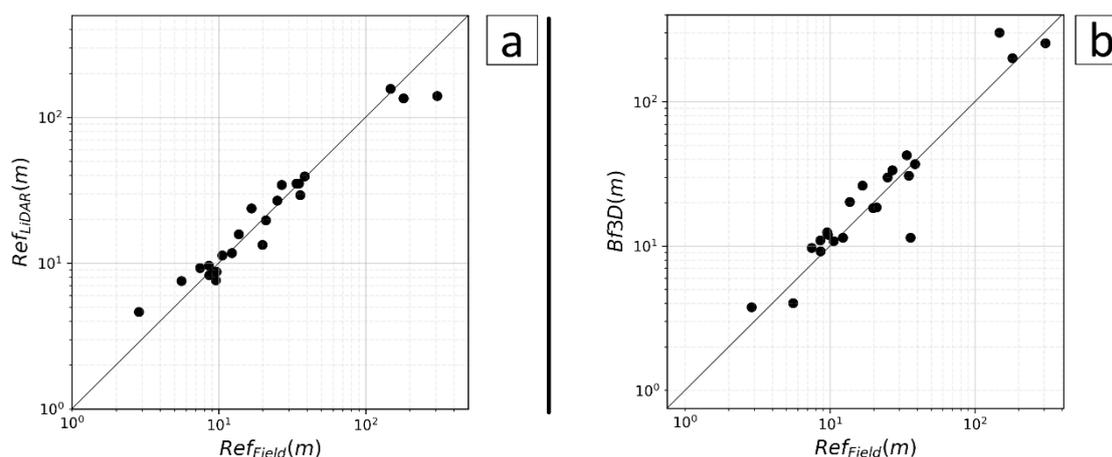


Figure 1: Comparaison des largeurs à pleins bords issues de la banque de données Carhyce par rapport a) à celles mesurées manuellement sur la donnée LiDAR. b) à celles mesurées automatiquement avec la méthode Bf3D.

Nos résultats confirment ainsi la pertinence de travailler à l'échelle de la station, et non des sections transversales. Ce changement permet ainsi de s'affranchir de la segmentation de la donnée, sans une flagrante perte de qualité des résultats. Il permet également d'omettre l'étape de lissage de la courbe de profondeur hydraulique, nécessaire dans une approche par transect en raison de la variabilité locale et obstacle majeur à l'automatisation à large échelle. Enfin il permet de manière conceptuelle, de rechercher directement un niveau plein bord moyen sur l'ensemble de la station. L'utilisation de ces méthodes peut alors être envisagée au-delà du réseau de stations Carhyce, de manière continue sur l'ensemble du réseau hydrographique.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Union Européenne. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Journal officiel des Communautés européennes, L 327, 22 décembre 2000, 73p.
- (2) L. Grosprêtre, K. Kreutzenberger, 2024. Plateforme Pressions et Risques d'impacts HYdroMORphologiques (PRHYMO) : rapport méthodologique. Dynamique Hydro et Office Français de la Biodiversité, juin 2024.
- (3) J-M. Baudoin, L. Boutet-Berry, M. Cagnant, F. Gob, K. Kreutzenberger (coord.), F. Lamand, J-R. Malavoi, P. Marmonier, C. Pénil, C. Rivière, M. Sadot, V. Tamisier, M. Tual, (2017). Carhyce - Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied. Agence française pour la biodiversité, Collection Guides et protocoles, 1-52.
- (4) F. Gob, C. Bilodeau, N. Thommeret, J. Belliard, M-B. Albert, V. Tamisier, J-M. Baudoin, K. Kreutzenberger, (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), 57-72.
- (5) O. Navratil. 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. (Ph.D. Thesis). Grenoble INPG. 2005.
- (6) J. Mckean, D. Nagel, D. Tonina, P. Bailey, C.W. Wright, C. Bohn, A. Nayegandhi, (2009). Remote Sensing of Channels and Riparian Zones with a Narrow-Beam Aquatic-Terrestrial LIDAR. Remote Sensing, 1(4), 1065-1096.
- (7) P. De Rosa, A. Fredduzzi, C. Cencetti, (2019). A GIS-Based Tool for Automatic Bankfull Detection from Airborne High Resolution Dem. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(11), 480.
- (8) J. Garber, K. Thompson, M.J. Burns, J. Kunapo, G.Z. Zhang, K. Russell, (2024). Artificial Intelligence and Objective - Function Methods Can Identify Bankfull River Channel Extents. Water Resources Research, 60(1).
- (9) L.B. Leopold, M.G. Wolman, (1957). River channel patterns: Braided, meandering, and straight. Geological Survey Professional Paper, 282(B).
- (10) S.J. Riley (1972). A comparison of Morphometric measures of Bankfull. Journal of Hydrology, 17, 23-31.