

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Traitement de données LiDAR topobathymétriques acquises sur le fleuve Loire pour l'identification de formes du lit à partir d'un indice de rugosité

**Traitement de données LiDAR
topobathymétriques acquises sur le fleuve
Loire pour l'identification de formes du lit à
partir d'un indice de rugosité**

Alex Andréault et Stéphane Rodrigues

Amélie Lett

2023

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de projet M. Alex Andréault pour son suivi et sa pédagogie. Merci pour ses nombreux conseils qui m'ont permis de pousser plus loin ma réflexion et de mobiliser de nouveaux outils.

Je remercie mon co-directeur de projet M. Stéphane Rodrigues pour son accompagnement et son aide dans la définition du sujet et de ses objectifs.

Enfin, je remercie M. Pierre Peeters pour sa participation dans la production de résultats de modélisation hydraulique qui seront de valeur dans de potentielles futures étapes du projet.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Introduction | 8 |
| Site d'étude..... | 10 |
| 1. La Loire et le sous-bassin de la vallée de la Loire | 10 |
| 2. Le site de Mareau-aux-prés | 10 |
| Matériels et méthodes..... | 12 |
| 1. Le LiDAR topobathymétrique | 12 |
| 1.1. Définition et principe | 12 |
| 1.2. Acquisition du nuage de points..... | 12 |
| 1.3. La classification des points | 12 |
| 1.4. Génération des MNT..... | 12 |
| 2. Caractérisation de l'indice de rugosité | 13 |
| 3. Extraction par unité morphologique..... | 13 |
| Résultats | 14 |
| 1. Variabilité topographique des unités morphologiques..... | 14 |
| 2. Comparaison des indices de rugosité par unité morphologique et taille de fenêtre mobile..... | 16 |
| 3. Application de l'indice de rugosité | 17 |
| Discussion | 18 |
| 1. Différenciation des unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés | 18 |
| 2. Limites de la méthode et influence des tailles de jeux de données sur la comparaison | 18 |
| 3. Application et voies d'amélioration de la méthode pour un grand cours d'eau de plaine | 18 |
| Conclusion..... | 19 |
| Bibliographie..... | 20 |
| Table des figures | 22 |
| Table des tableaux..... | 22 |
| Annexes | 22 |

INTRODUCTION

La Directive-cadre européenne sur l'eau publiée en 2000, fixe des objectifs environnementaux et définit la notion de « bon état des eaux » vers lequel doivent tendre tous les États membres de l'Union européenne. Concernant les eaux de surface, l'atteinte du bon état ou potentiel écologique repose sur l'évaluation de l'état chimique et écologique des masses d'eau (Melun et al., 2019). L'état écologique est déterminé à partir d'éléments de qualité et d'indicateurs biologiques et physico-chimiques dont les valeurs sont dépendantes de la qualité et de la diversité des habitats et donc des conditions hydromorphologiques des cours d'eau. L'hydromorphologie d'un cours d'eau définit l'ensemble de ses caractéristiques physiques : hydrologique (quantité et dynamique des écoulements), géomorphologique (dimension et mobilité du chenal, structure du lit, taille du substrat) et de continuité (Belletti et al., 2015). De nombreuses méthodes de prospection de terrain ont été développées pour l'évaluation hydromorphologique des cours d'eau à l'échelle du segment. Les processus hydromorphologiques se produisent cependant à différentes échelles spatiales et temporelles. L'évaluation de l'état et le suivi de l'évolution hydromorphologique des cours d'eau requièrent donc l'application et le développement d'outils et de méthodes multiscalaires permettant de prendre en compte les variations spatiales et temporelles des processus (Kampa and Bussetini, 2018).

Exploités depuis les années 1960, les outils Light Detection And Ranging (LiDAR) permettent l'enregistrement de très nombreux points d'altitude avec une précision importante et sur de grandes surfaces. Les données LiDAR sont notamment exploitées en milieux aquatiques continentaux pour la modélisation hydraulique (Mason et al., 2009) et morphologique des cours d'eau (Cavalli et al., 2008). En effet, le développement des LiDAR topobathymétriques rendant possible l'acquisition simultanée de données topographiques et bathymétriques, a ouvert la voie à de nouvelles applications dans l'étude de la morphologie des cours d'eau et de son évolution (Charlton et al., 2003 ; Lallias-Tacon, 2015 ; Duró et al., 2018).

L'exploitation des données LiDAR topobathymétriques et des Modèles Numériques de Terrain (MNT) qui en sont dérivés, pour l'étude de la géomorphologie fluviale repose notamment sur le traitement et l'analyse, de paramètres hydromorphologiques de cours d'eau tels que l'altitude, la pente ou encore la granulométrie (Matsumoto and Young, 2018 ; Chardon et al., 2020) et d'indices hydromorphologiques qui en sont dérivés. Différentes études ont par exemple montré la pertinence de la rugosité comme paramètre permettant la classification de la granulométrie ou la caractérisation des formes sédimentaires du lit par l'utilisation, parfois combinée, de différents indices de rugosité sur des données LiDAR (Díaz Gómez et al., 2022). Cavalli et al. (2008) notamment, ont développé une méthode, permettant la reconnaissance de séquences de radiers-mouilles d'un cours d'eau de montagne à forte pente, par l'application d'un indice de rugosité.

Ainsi, les données LiDAR topobathymétriques et leur exploitation, présentent un fort potentiel pour l'étude de la morphologie des cours d'eau mais leur application dans l'étude des formes sédimentaires de grands cours d'eau de plaine semble encore peu documentée. Le principal objectif de ce projet est de tester l'application de l'indice de rugosité de Cavalli et al. (2008) reposant sur la variabilité topographique locale, pour l'identification de formes sédimentaires dans le lit de la Loire à Mareau-aux-prés.

La question scientifique sur laquelle repose ce travail étant :

Quel est le potentiel de la variabilité topographique comme indice permettant l'identification des unités morphologiques du lit de la Loire à Mareau-aux-prés ?

1. La Loire et le sous-bassin de la vallée de la Loire

La Loire prend sa source au Mont Gerbier de Jonc à 1404 mètres d'altitude, au sud-est du Massif central et s'écoule jusqu'à l'océan Atlantique (Moatar and Dupont, 2016). Le fleuve draine un bassin versant d'environ 117 000km² dont 33 % dans le Massif central cristallin, 55 % dans le Bassin Parisien et la Limagne et 12 % dans le Massif armoricain en aval (Lenail-Chouteau, 1996 in Macaire et al., 2001). L'altération des roches cristallines du Massif central produit l'essentiel de la matière solide (91 %) produite dans le bassin de la Loire (Macaire et al., 2001). Le sous-bassin de la vallée de la Loire correspond à l'axe de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire, aussi appelé Loire moyenne, et au bassin topographique qui l'entoure. Le sous-bassin a une superficie de 9 888km² et est situé dans le bassin sédimentaire parisien (Moatar and Dupont, 2016). La lithologie est qualifiée de très homogène, avec des substrats perméables calcaires et sableux en rive droite et la présence d'argile faiblement perméable en rive gauche. L'altitude moyenne du sous-bassin est de 211m avec un climat de type tempéré océanique et des précipitations annuelles moyennes de 737mm sur la période 1981-2010. L'occupation des sols est dominée par de grandes cultures intensives de céréales et d'oléoprotéagineux (blé, colza). Concernant la morphologie, le style fluvial est l'anabranchement avec des chenaux multiples, du Bec d'Allier jusqu'à Briare puis le tracé devient relativement rectiligne avec cependant quelques grands méandres à l'amont d'Orléans (Moatar and Dupont, 2016). En aval de Tours, la configuration morphologique retrouve un style à chenaux multiples (C. Wintenberger et al., 2015). Les îles et barres sédimentaires font partie intégrante du paysage fluvial de la Loire moyenne (Grivel, 2008). La densité de population du sous-bassin en 2010 était de 81 hab./km². L'endiguement et le resserrement du lit visant à protéger la population face au risque d'inondation, notamment au droit des principaux pôles urbains d'Orléans, Tours et Blois, représentent des facteurs influençant le fonctionnement morphologique du fleuve.

2. Le site de Mareau-aux-prés

Le site de Mareau-aux-prés est situé à 8 km à l'aval d'Orléans, à 1.2km de la confluence entre la Loire et le Loiret et au sein de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin. La roche mère est un calcaire lacustre tertiaire couvert de sédiments siliceux de la Loire (C. Wintenberger et al., 2015). À Orléans, le débit moyen est de 287 m³.s⁻¹, la crue biennale atteint les 1350 m³.s⁻¹, la crue décennale 1960 m³.s⁻¹ et son QMNA5 est de 45 m³.s⁻¹ (Données Banque hydro). La Figure 1 présente les débits moyens journaliers de la Loire à Orléans au cours de l'année 2020. La pente dans ce secteur est proche de 0.5‰. Le linéaire étudié est long de 3.5km et d'une largeur moyenne de 350m. Le site présente une forme de méandre de faible amplitude et un élargissement du lit, dans un secteur où la Loire est qualifiée de relativement rectiligne (Moatar and Dupont, 2016). Les unités morphologiques identifiées sur le site à partir des orthophotos sont des macro-formes dont la longueur est du même ordre de grandeur que celle du chenal (Figure 2). On retrouve des barres sédimentaires exondées lors des périodes de basses eaux, et des îles, constituées de sables et de limons et colonisées par des espèces végétales identiques à celles présentes dans le lit majeur (Moatar and Dupont, 2016). La présence de ces barres est associée à l'effet d'abri fourni par des affleurements de la roche-mère apparaissant dans le chenal principal (C. Wintenberger et al., 2015). Ce radier est également responsable de l'augmentation de la largeur de la section transversale, ce qui entraîne une diminution de la capacité de transport

des sédiments (C. Wintenberger et al., 2011). La grande diversité d'unités morphologiques du site est à l'origine d'une grande diversité d'habitats et d'une biodiversité unique. On retrouve ainsi une grande diversité d'écotopes allant de la forêt de bois dur à chênes (*Quercus spp.*) et noyers (*Juglans spp.*), à la ripisylve mature de peupliers noirs (*Populus nigra L.*), ou encore à la prairie à chiendent (*Elytrigia spp.*) (M. Villar et al., 2015). En septembre 2012, des travaux d'entretien lourd du lit ont été réalisés sur un des quatre îlots du site par les services de l'État. Deux projets de recherche BioMareau-I et BioMareau-II ont été menés sur le site afin d'étudier la colonisation du nouvel îlot formé suite à ces travaux, par deux espèces de Salicacées : *Populus nigra L.* et *Salix alba L.*, et en la comparant aux îlots non impactés et à d'autres sites aux caractéristiques similaires (C. L. Wintenberger et al., 2015). Cinq composantes représentatives de la biodiversité ligérienne ont notamment été étudiées : les bryophytes, la flore vasculaire, les insectes coléoptères Carabidae, les oiseaux des grèves et le castor d'Europe (M. Villar et al., 2015).

Débit moyen sur n jours (n=1, non glissant) - Données les plus valides de l'entité - K435 0010 10 - La Loire à Orléans - Pont Royal - du 01/01/2020 00:00 au 31/12/2020 23:59 (TU)

Généré le 22/11/2022 20:24 (TU)

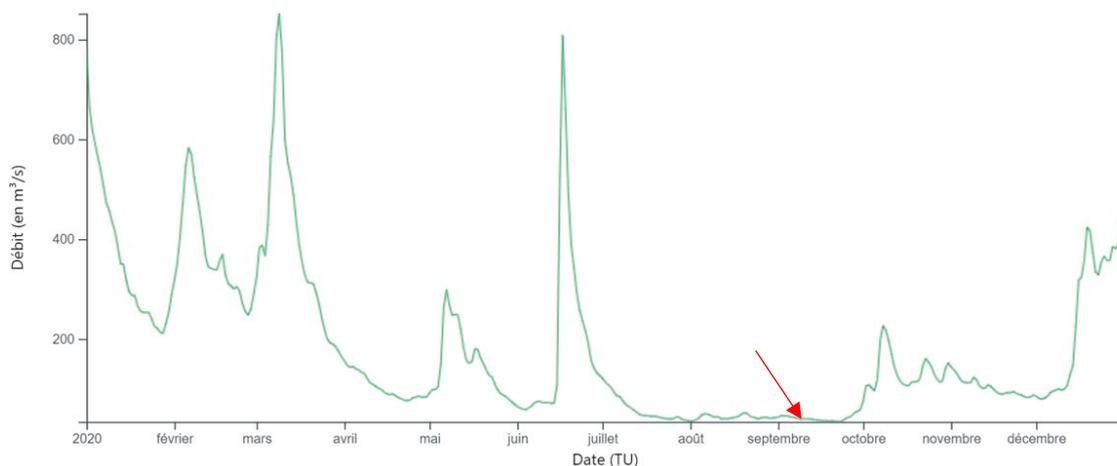


Figure 1 : Courbe des débits moyens journaliers de la Loire à Orléans au cours de l'année 2020 (Données Banque hydro). La flèche rouge indique la période d'acquisition des données LiDAR.



Figure 2 : Présentation des unités morphologiques du site de Mareau-aux-près (Source : Google Earth)

[1] Chenal principal ; [2] chenal secondaire ; [3] îles végétalisées ; [4] barres nues ; [5] accumulation de sédiments due à la présence des îles ; [6] seuils, radiers ; [7] chenaux secondaires au sein des îles.

MATERIELS ET METHODES

1. Le LiDAR topobathymétrie

1.1. Définition et principe

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un signal lumineux et la réception d'une partie du signal après réfléchissement sur une surface. La distance d entre l'émetteur et la surface peut être calculée grâce à l'équation suivante (Mallet and Bretar, 2009).

$$d = \frac{c \times t}{2}$$

Où c est la célérité de la lumière (299 792 458 m/s) et t le temps de vol du signal lumineux. Le couplage à un système GPS permet de géoréférencer les mesures. L'utilisation de longueurs d'onde d'émission particulière, permet l'acquisition de données pour différents types de surfaces. Les ondes rouges sont utilisées pour l'étude de la topographie ou de la végétation et les ondes vertes traversant la colonne d'eau, permettent l'acquisition de données bathymétriques. Ainsi, le développement des LiDAR aéroportés permet l'acquisition de données topographiques et bathymétriques denses et précises sur de grandes surfaces.

1.2. Acquisition du nuage de points

Les données LiDAR topobathymétriques ont été acquises en période d'étiage sur un linéaire d'environ 600km de la Loire entre Nevers et Nantes. La campagne d'acquisition sur le linéaire du département du Loiret (45), où se situe le site d'étude, a été réalisée entre le 3 et le 22 septembre 2020. La Figure 1 permet de visualiser les débits d'étiage de la Loire à Orléans lors de la période de campagne d'acquisition des nuages de points menée par la société GEOFIT-EXPERT.

1.3. La classification des points

La classification des points et la génération des Modèles Numériques de Terrain (MNT), ont été réalisées par la Plateforme LiDAR topo-bathymétrique Nantes-Rennes. Les points du canal infrarouge (1064nm) sont classifiés afin de séparer les points de la surface d'eau, les points du sol, les points de la végétation et des bâtiments (Feldmann et Lague, 2021). La correction de la réfraction permet de séparer les points du canal vert (532nm) intermédiaires de la colonne d'eau, des points du fond de la rivière.

1.4. Génération des MNT

Les zones non couvertes, zones profondes non mesurées par le LiDAR ou zones d'écrantage conséquent par la végétation rivulaire et aquatique, ont nécessité une interpolation de Poisson (Feldmann et Lague, 2021). L'algorithme utilisé pour reconstruire ces zones est l'outil « Poisson Reconstruction » de CloudCompare. Les MNT ont été générés à l'aide du logiciel Lastools par moyennage des altitudes des points présents dans les mailles de la grille raster (Feldmann et Lague, 2021). La résolution des MNT est de 0.5m. Le système de référence planimétrique est le RGF93-L93 et le système de référence altimétrique est le NGF-IGN69.

2. Caractérisation de l'indice de rugosité

Les outils de l'extension Spatial Analyst de ArcGIS sont utilisés pour la caractérisation de l'indice de rugosité du lit sur le site de Mareau-aux-près d'après la méthode de Cavalli et al. (2008). Le site d'étude, c'est-à-dire, le chenal actif et les unités morphologiques du lit, est extrait par application d'une extraction par masque sur le MNT brut. Le MNT obtenu est ensuite moyenné avec l'outil de statistiques focales et selon une taille de fenêtre mobile de 25 pixels par 25 pixels (156.25m²). Le MNT moyen dont les altitudes sont lissées, est soustrait au MNT initial afin d'obtenir la topographie résiduelle. Les cartes d'indice de rugosité sont obtenues par calcul d'un écart-type de la topographie résiduelle sur l'ensemble de la surface d'étude en appliquant l'outil de statistiques focales. Le calcul de l'écart-type sur la topographie résiduelle, permet ainsi de mettre en évidence des zones de forte variation d'altitude. Différentes tailles de fenêtres mobiles sont appliquées pour le calcul de l'écart-type afin de tester les paramètres les plus adaptés pour l'identification des formes du lit. Les tailles de fenêtres sont choisies proportionnellement aux dimensions des unités morphologiques du lit de la Loire moyenne. Au total, sept tailles de fenêtres mobiles présentées dans le Tableau 1 sont appliquées pour le calcul de l'indice de rugosité.

Tableau 1 : Tailles de fenêtres mobiles appliquées pour le calcul de l'indice de rugosité.

| Code | Taille de fenêtre (pixels) | Surface (m ²) |
|------|-------------------------------|---------------------------|
| F5 | 5x5 | 6.25 |
| F10 | 10x10 | 25 |
| F15 | 15x15 | 56.25 |
| F20 | 20x20 | 100 |
| F25 | 25x25 | 156.25 |
| F50 | 50x50 | 625 |
| F100 | 100x100 | 2500 |

3. Extraction par unité morphologique

Cinq unités morphologiques sont identifiées visuellement à partir des ortho-photos : les barres, berges, îles, mouilles et seuils. Les unités sont délimitées manuellement pour créer des couches sous SIG. Ces couches sont ensuite appliquées comme masque afin d'extraire et d'isoler les valeurs d'indice de rugosité pour chaque unité morphologique.

1. Variabilité topographique des unités morphologiques

La Figure 3 présente les boîtes à moustaches des résultats d'indice de rugosité (écart-type de la topographie résiduelle) pour les différentes unités morphologiques et par taille de fenêtre mobile. Les berges et les îles présentent les valeurs de médianes les plus élevées. Les médianes des berges sont toujours légèrement supérieures à celles des îles sauf pour la fenêtre mobile 100x100 pixels pour laquelle les îles présentent une valeur de médiane plus élevée. Les barres et seuils présentent des valeurs de médianes intermédiaires, légèrement plus faibles pour les seuils sauf pour la fenêtre mobile 100x100 pixels. Enfin, les mouilles sont l'unité morphologique qui présente les valeurs de médianes les plus faibles. Les plus grandes valeurs de médiane obtenues pour les berges et les îles peuvent se traduire par le fait que leur morphologie présente une plus forte variation d'altitude locale par rapport à celles des barres et des seuils. La morphologie des mouilles est celle qui présente la plus faible variation d'altitude locale. Pour chaque unité morphologique, la valeur de la médiane augmente avec l'agrandissement de la taille de fenêtre mobile.

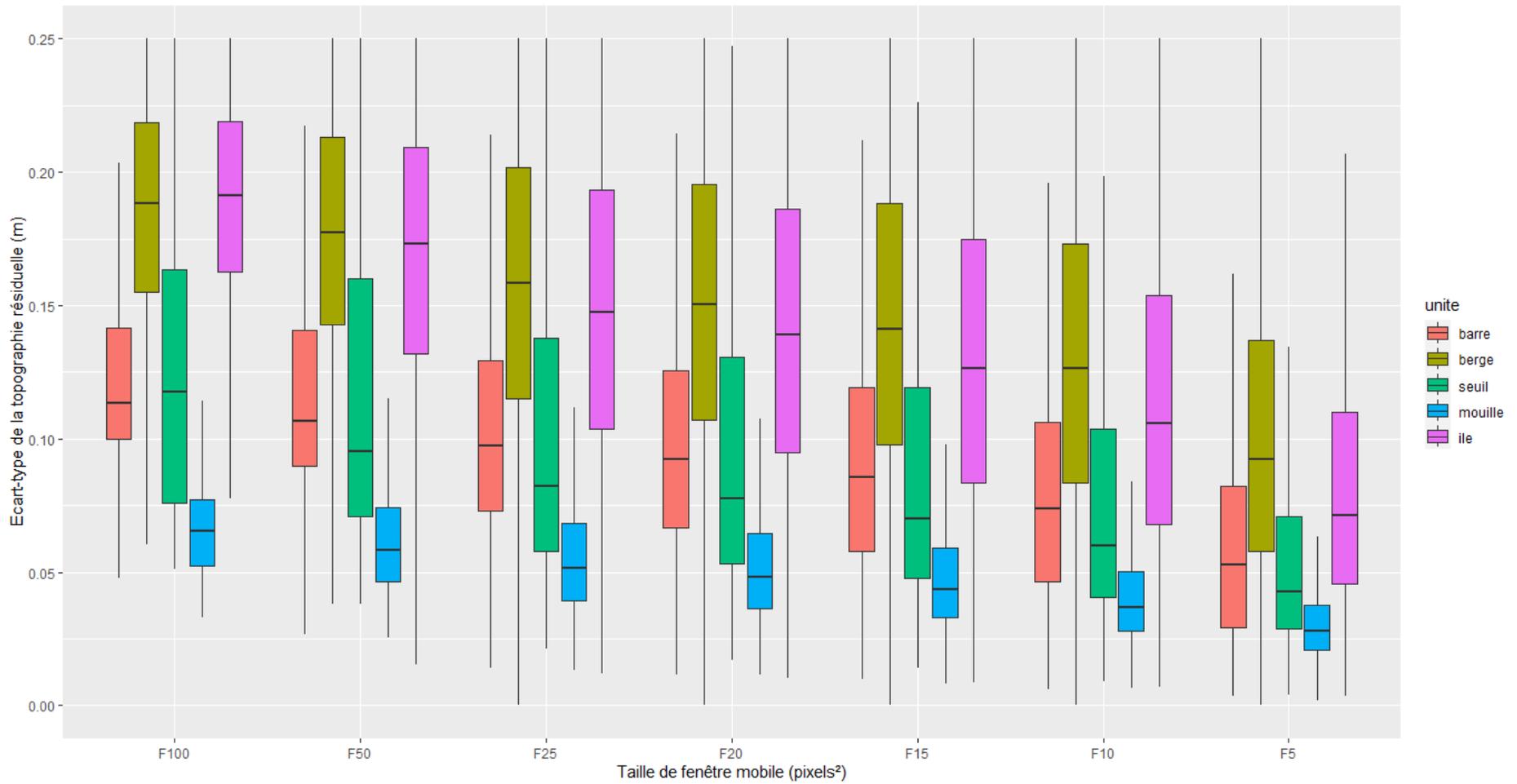


Figure 3 : Boîtes à moustaches de l'indice de rugosité (écart-type de la topographie résiduelle) des unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés pour différentes tailles de fenêtre mobile

2. Comparaison des indices de rugosité par unité morphologique et taille de fenêtre mobile

Les résultats des analyses statistiques sont présentés dans le Tableau 2 et le Tableau 3. Une différence significative ($\alpha = 0.05$) est obtenue entre toutes les unités morphologiques deux à deux, pour toutes les tailles de fenêtre mobile, à l'exception des unités seuil et barre, qui ne présentent pas de différence significative pour une fenêtre mobile de 100x100 pixels (Tableau 2). De plus, toutes les tailles de fenêtre mobile comparées deux à deux sont significativement différentes ($\alpha = 0.05$) pour une même unité morphologique (Tableau 3).

Tableau 2 : Comparaison des unités morphologiques - résultats du test de Mann-Whitney-Wilcoxon (seuil de signification $\alpha = 0.05$).

| Unité morphologique | Taille de fenêtre mobile (pixels) | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 5x5 | 10x10 | 15x15 | 20x20 | 25x25 | 50x50 | 100x100 |
| Indice de rugosité <i>p</i> -value | | | | | | | |
| SE-BA | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | 0.016 | 0.004 | < 0.001 | 0.114 |
| SE-BE | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| SE-MO | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| SE-IL | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| BE-IL | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| BE-MO | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| BE-BA | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| BA-MO | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| BA-IL | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| MO-IL | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |

SE : seuil; BA : barre; BE : berge; MO : mouille; IL : île

Tableau 3 : Comparaison des tailles de fenêtre mobile par unité morphologique : résultats du test de Mann-Whitney-Wilcoxon (seuil de signification $\alpha = 0.05$)

| Fenêtres mobiles | Unités morphologiques | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| | Barre | Berge | Ile | Mouille | Seuil |
| Indice de rugosité <i>p</i> -value | | | | | |
| F5-F10 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F5-F15 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F5-F20 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F5-F25 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F5-F50 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F5-F100 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F10-F15 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F10-F20 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F10-F25 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F10-F50 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F10-F100 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F15-F20 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F15-F25 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F15-F50 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |

| | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| F15-F100 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F20-F25 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F20-F50 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F20-F100 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F25-F50 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F25-F100 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |
| F50-F100F | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 | < 0.001 |

3. Application de l'indice de rugosité

La Figure 4 présente la carte des différences entre les altitudes moyennes et les valeurs d'indice de rugosité calculées avec une fenêtre mobile de dimension 50x50 pixels.

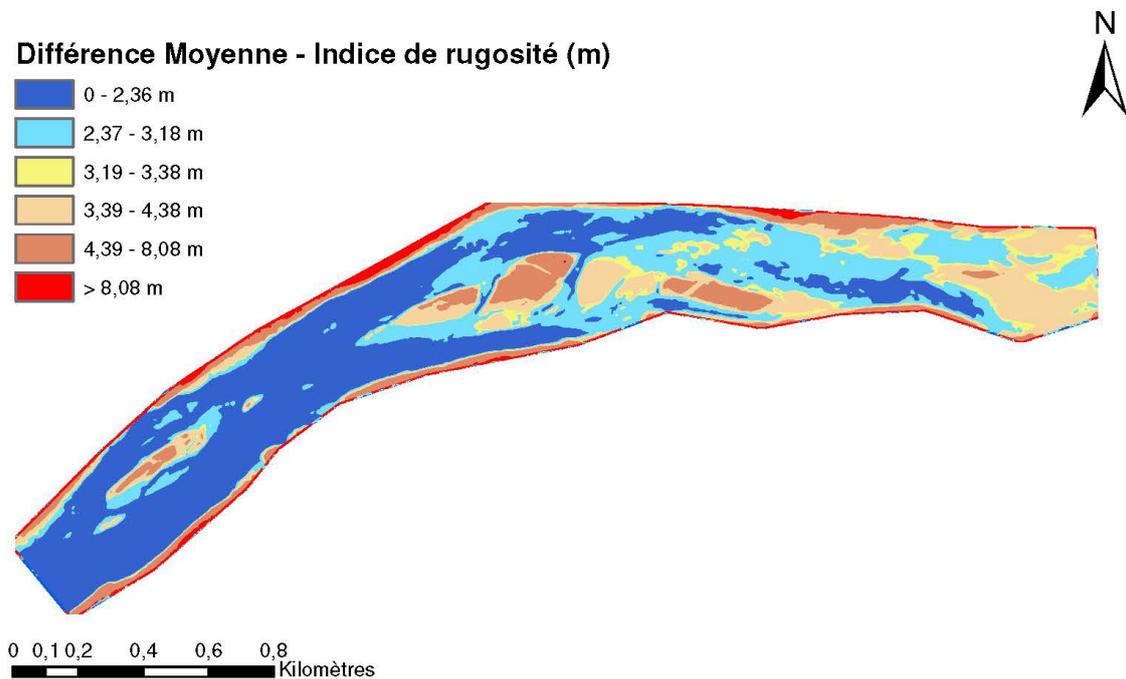


Figure 4: Carte de la différence entre les altitudes moyennes et les indices de rugosité calculés par application d'une fenêtre mobile de dimension 50x50 pixels

DISCUSSION

1. Différenciation des unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés

Les résultats obtenus montrent que les valeurs d'indices de rugosité obtenues pour des tailles de fenêtre mobile inférieures ou égales 50x50 pixels, permettent de distinguer significativement les unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés entre elles (Tableau 2). L'application du calcul de l'indice de rugosité pour la différenciation des unités morphologiques d'un grand cours d'eau de plaine ne semble ainsi pas nécessiter l'utilisation d'une taille de fenêtre mobile particulièrement fine alors que la taille de fenêtre mobile appliquée par Cavalli et al. (2008) pour le calcul de l'écart-type de la topographie résiduelle, était de l'ordre de 5x5 pixels pour un cours d'eau de montagne. Même si l'application de toutes les fenêtres mobiles dont la dimension est inférieure ou égale à 50x50 pixels permet de différencier les unités morphologiques entre elles, les valeurs d'indices de rugosité pour une même unité morphologique sont significativement différentes entre les différentes tailles de fenêtre mobile appliquées (Tableau 3). On observe en effet une augmentation des valeurs de la médiane avec l'agrandissement de la taille de la fenêtre (Figure 3). Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'une fenêtre de plus grande dimension peut potentiellement intégrer une plus grande variabilité topographique et donc tirer la valeur de l'indice de rugosité vers le haut.

2. Limites de la méthode et influence des tailles de jeux de données sur la comparaison

La principale limite quant à l'analyse repose sur l'application du test de Mann Whitney Wilcoxon sur un grand jeu de données. Le test de Kolmogorov Smirnov a permis de montrer que les jeux de données ne suivent pas une distribution normale et le test non paramétrique de Mann Whitney Wilcoxon est donc appliqué. Cependant, l'interprétation d'une différence significative peut être questionnée car plus les jeux de données sont grands, plus ils sont potentiellement différents et donc plus il est probable qu'ils soient testés significativement différent. En plus d'être de grande taille, les jeux de données sont aussi de différentes tailles puisque les unités morphologiques n'ont pas les mêmes surfaces. Il serait ainsi nécessaire de pondérer les valeurs de l'indice par la surface des unités morphologiques pour une comparaison des unités entre elles. Cependant, l'identification et la délimitation manuelle des unités sous logiciel SIG peut varier significativement d'un opérateur à l'autre et ainsi induire une variabilité supplémentaire dans la localisation et l'étendue des données extraites pour une même unité morphologique.

3. Application et voies d'amélioration de la méthode pour un grand cours d'eau de plaine

La méthode de Cavalli initialement développée pour la reconnaissance de séquences de radiers-mouilles d'un petit cours d'eau de montagne, s'est ainsi montrée applicable pour la différenciation d'unités morphologiques de la Loire à partir de la variation locale d'altitude. L'application de la différence entre les altitudes moyennes et les valeurs d'indice de rugosité semble également présenter un potentiel pour l'identification et la classification des unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés. Des études complémentaires sont à réaliser, notamment pour tester la méthode sur d'autres jeux de données de la Loire et potentiellement pouvoir valider plus largement son application pour la reconnaissance des unités morphologiques de grands cours d'eau de plaine.

CONCLUSION

Ce travail de projet de fin d'étude a permis de montrer le potentiel de la variabilité topographique comme indice permettant l'identification de formes du lit de la Loire à Mareau-aux-prés. L'application de l'indice de rugosité de Cavalli et al. (2008) a en effet, permis la différenciation des îles, barres, berges, seuils et mouilles à partir d'un MNT dérivé de données LiDAR, et son application semble présenter un fort potentiel pour la classification de ces unités morphologiques. Le développement, la validation et l'extraction d'une telle méthode pourrait ainsi permettre la cartographie des formes sédimentaires de grands cours d'eau sur de grandes distances et voir une application dans de nombreux domaines tels que la cartographie des habitats ou le suivi hydromorphologique de cours d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- Augustin, S., Bakyono, JP., Bouvet, A., Bréheret, J.-G., Chantereau, M., Chevalier, R., Dauffy-Richard, E., Denux, O., Dimouro, B., Dubois, A., Fillatre, Y., Fleury, J., Gaudet, C., Greulich, S., Guerez, Y., Guérin, V., Handfus, T., Hémeray, D., Imbault, V., Jorge, V., Jugé, P., Lédée, C., Marell, A., Marin, S., Martin, H., Martinez, J., Moliard, C., Montes, P., Ndiaye, A., Nusillard, B., Penne-Galland, I., Pernot, C., Poitelon, C., Rodrigues, S., Rossi, J.-P., Saudubray, J., Villar, M., Villemey, A., Wintenberger, C., 2015. Conséquences des travaux d'entretien du lit de la Loire sur plusieurs composantes de la biodiversité au sein de la mosaïque des îles de Mareau-aux-prés. Projet BioMareau. Compte rendu final : synthèse des travaux de recherche, Inra Val de Loire site d'Orléans, 20 p.
- Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E., 2015. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environ. Earth Sci.* 73, 2079–2100. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3558-1>
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., Dalla Fontana, G., 2008. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *CATENA* 73, 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.001>
- Chardon, V., Schmitt, L., Piégay, H., Beisel, J.-N., Staentzel, C., Barillier, A., Clutier, A., 2020. Effects of Transverse Groynes on Meso-Habitat Suitability for Native Fish Species on a Regulated By-Passed Large River: A Case Study along the Rhine River. *Water* 12, 987. <https://doi.org/10.3390/w12040987>
- Charlton, M.E., Large, A.R.G., Fuller, I.C., 2003. Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK. *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 299–306. <https://doi.org/10.1002/esp.482>
- Díaz Gómez, R., Pasternack, G.B., Guillon, H., Byrne, C.F., Schwindt, S., Larrieu, K.G., Solis, S.S., 2022. Mapping subaerial sand-gravel-cobble fluvial sediment facies using airborne lidar and machine learning. *Geomorphology* 401, 108106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108106>
- Duró, G., Alessandra, C., Maarten, K., Wim, U., 2018. On the morphological evolution of restored banks: Case study of the Meuse river. *E3S Web Conf.* 40, 02021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002021>
- Feldmann B., Lague D., 2021. Rapport de traitements, Acquisition sur la Loire. Plateforme LiDAR topobathymétrique Nantes-Rennes, 9 p.
- Grivel, S., 2008. La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion (phdthesis). Université Paris VIII Vincennes-Saint Denis.
- Kampa E., Bussetini M., 2018. River Hydromorphological Assessment and Monitoring Methodologies Final Report, 126 p.

- Lallias-Tacon, S., 2015. Spatio-temporal analysis of braided river morphology with airborne LiDAR (phdthesis). Université Lyon 2.
- Lenail-Chouteau A. (1996). - Analyse physiographique, hydrographique et lithologique du bassin versant de la Loire par méthode informatique. Mém. de Licence des Sciences de la Terre, Université de Tours, 42 p.
- Macaire, J.-J., Bellemlih, S., Cocirta, C., Luca, P.D., Di-Giovanni, C., Gay-Ovejero, I., 2001. Quantification des flux et des stocks solides holocènes dans le bassin de la Loire (France). *Houille Blanche* 35–38. <https://doi.org/10.1051/lhb/2001086>
- Mallet, C., Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 64, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007>
- Mason, D.C., Bates, P.D., Amico, J.T., 2009. Calibration of uncertain flood inundation models using remotely sensed water levels. *J. Hydrol.* 368, 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.034>
- Melun, G., Arnaud, F., Arnaud-Fassetta, G., Bertrand, M., Bilodeau, C., Borgniet, L., Boutault, F., Brousse, G., Cassel, M., Depret, T., Dufour, S., Gob, F., Grivel, S., Kreutzenberger, K., Le Bihan, M., Le Bissonnais, Y., Liébault, F., Loire, R., Magand, C., Malavoi, J., Piégay, H., Rolan-Meynard, M., Rollet, A.J., Tamisier, V., Thommeret, N., Vivier, A., 2019. Dossier. L'hydromorphologie. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019037>
- Moatar, F., Dupont, N., 2016. La Loire fluviale et estuarienne : Un milieu en évolution. Editions Quae.
- Petit, K., Michon, J., 2015. L'état des eaux de surface et des eaux souterraines. Synthèse ONEMA, 12 p.
- Wintenberger C. 2011. Transformation d'une barre sédimentaire de la Loire Moyenne en île : influence de la végétation ligneuse. Master's Thesis, University of Tours, 50 p
- Wintenberger, C., Bréhéret, J.-G., Rodrigues, S., Villar, M., Trémolières, M., Wantzen, K.M., Piégay, H., Tal, M., Stella, J.C., 2015. Dynamique fluviale et végétation pionnière à la Salicaceaeen rivière sablo-graveleuse: études in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne.
- Wintenberger, C.L., Rodrigues, S., Bréhéret, J.-G., Villar, M., 2015. Fluvial islands: First stage of development from nonmigrating (forced) bars and woody-vegetation interactions. *Geomorphology* 246, 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.026>

TABLE DES FIGURES

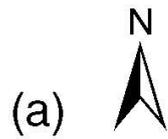
| | |
|--|----|
| Figure 1 : Courbe des débits moyens journaliers de la Loire à Orléans au cours de l'année 2020 (Données Banque hydro). La flèche rouge indique la période d'acquisition des données LiDAR..... | 11 |
| Figure 2 : Présentation des unités morphologiques du site de Mareau-aux-prés (Source : Google Earth)..... | 11 |
| Figure 3 : Boîtes à moustaches de l'indice de rugosité (écart-type de la topographie résiduelle) des unités morphologiques de la Loire à Mareau-aux-prés pour différentes tailles de fenêtre mobile..... | 15 |
| Figure 4: Carte de la différence entre les altitudes moyennes et les indices de rugosité calculés par application d'une fenêtre mobile de dimension 50x50 pixels..... | 17 |

TABLE DES TABLEAUX

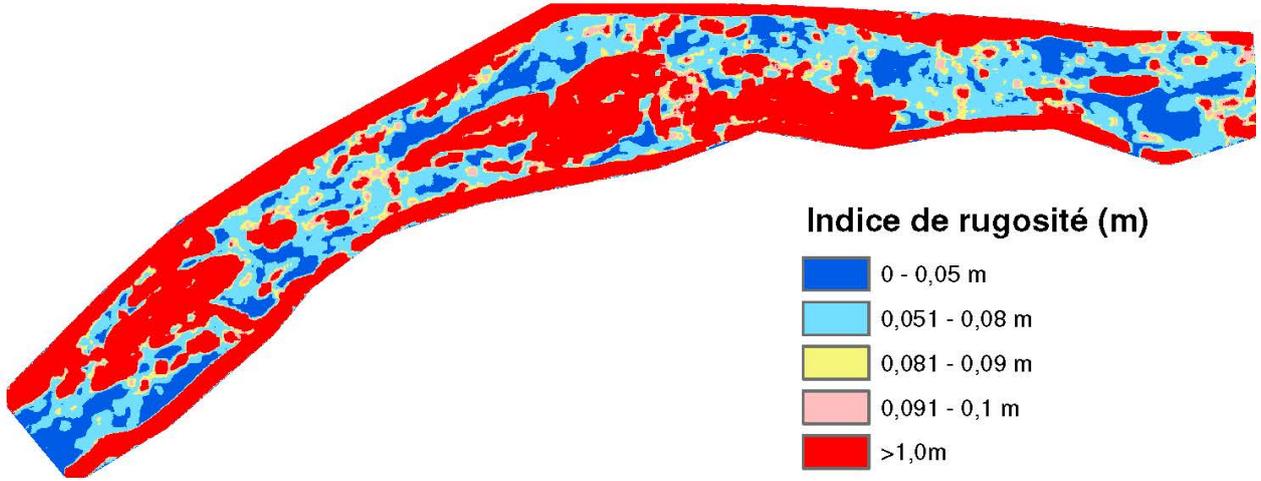
| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Tailles de fenêtres mobiles appliquées pour le calcul de l'indice de rugosité. | 13 |
| Tableau 2 : Comparaison des unités morphologiques - résultats du test de Mann-Whitney-Wilcoxon (seuil de signification $\alpha = 0.05$). | 16 |
| Tableau 3 : Comparaison des tailles de fenêtre mobile par unité morphologique : résultats du test de Mann-Whitney-Wilcoxon (seuil de signification $\alpha = 0.05$) | 16 |

ANNEXES

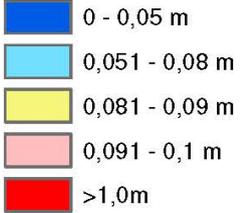
Annexe 1 : Cartes d'indices de rugosité calculés par l'application de fenêtres mobiles de différentes tailles. (a) 50x50 pixels, (b) 25x25 pixels, (c) 10x10 pixels



(a)

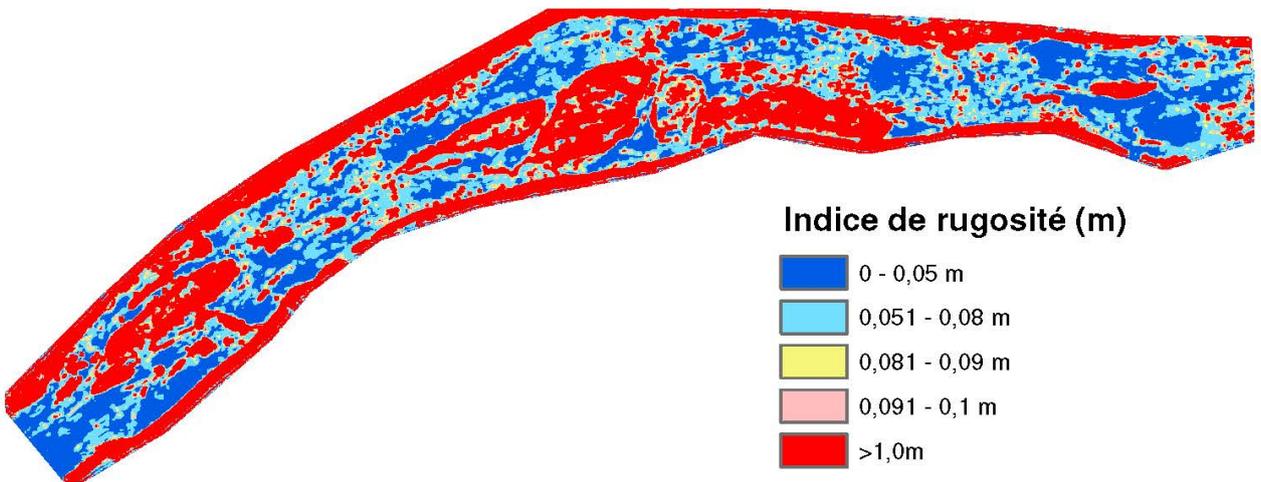


Indice de rugosité (m)

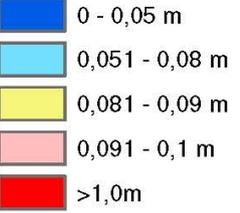


0 0,1 0,2 0,4 0,6 0,8
Kilomètres

(b)

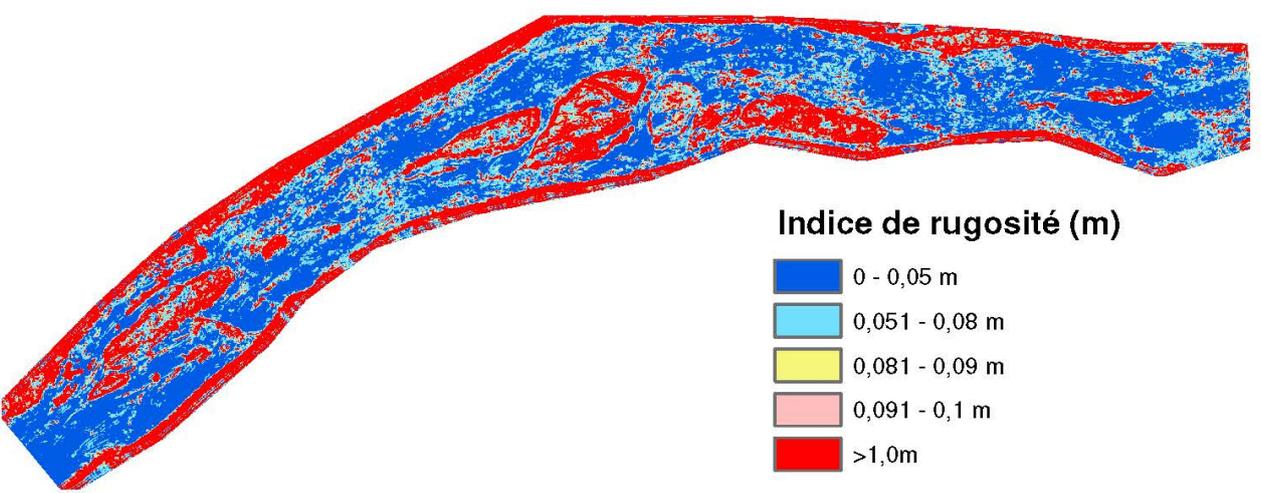


Indice de rugosité (m)

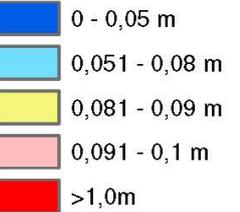


0 0,1 0,2 0,4 0,6 0,8
Kilomètres

(c)



Indice de rugosité (m)



0 0,1 0,2 0,4 0,6 0,8
Kilomètres

Directeurs de recherche :

**Alex Andréault
Stéphane Rodrigues**

**Amélie Lett
PFE/DAE5
IMA
2022-2023**

Traitement de données LiDAR topobathymétriques acquises sur le fleuve Loire pour l'identification de formes du lit à partir d'un indice de rugosité

Résumé :

Permettant l'acquisition de données topobathymétriques sur de grandes surfaces et avec une grande précision, les données LiDAR et les modèles qui en sont dérivés, ont montré leur potentiel pour l'identification d'unités morphologiques de cours d'eau. Ce projet se base sur de précédents travaux réalisés par Cavalli et al. (2008) sur l'application d'un indice dit de « rugosité » sur un Modèle Numérique de Terrain LiDAR pour la reconnaissance de séquences de radiers-mouilles d'un cours d'eau de montagne. L'indice de rugosité de Cavalli et al. (2008) se base sur la variabilité topographique comme indicateur pour différencier et identifier différentes unités morphologiques. La méthode de Cavalli et al. (2008) a ici été appliquée au complexe d'îles de Mareau-aux-prés, en Loire moyenne, afin de tester son utilisation pour un grand cours d'eau de plaine. La variabilité topographique a été calculée par l'application de statistiques focales avec différentes tailles de fenêtres mobiles. Les résultats ont montré que les tailles de fenêtres mobiles inférieures ou égales à 50x50 pixels permettent de différencier significativement les berges, les barres, les mouilles, les îles et les seuils entre eux. De plus, la différence entre l'altitude moyenne et la variabilité topographique semble présenter un potentiel pour l'identification et la classification des unités morphologiques. La méthode présente cependant de nombreuses limites notamment quant à la variabilité dans les tailles des jeux de données. Des études complémentaires sont ainsi nécessaires pour le développement, la validation et l'extraction de cette méthode qui présente un fort potentiel pour l'identification d'unités morphologiques de grand cours d'eau de plaine.

Mots Clés : LiDAR, topobathymétrie, unité morphologique, variabilité topographique, fleuve Loire