

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2020-2021

Analyse de la dynamique des mouvements des barres sédimentaires en Loire par l'utilisation de données de télédétection

Sous la direction de **Stéphane Rodrigues**

Gaël Chéneau

Analyse de la dynamique des mouvements des barres sédimentaires en Loire par l'utilisation de données de télédétection

Stéphane Rodrigues

Gaël Chéneau

2021

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 dans un premier temps Stéphane Rodrigues pour sa disponibilité, son aide ainsi que ses bons conseils dans l'avancé et la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Je remercie aussi Jules Le Guern et Alex Andréault pour les connaissances ainsi que les données qu'ils ont pu me transmettre à propos du site d'étude de Saint-Mathurin-sur-Loire. Je les remercie aussi pour les bons conseils qu'ils m'ont prodigué.

Je remercie mes colocataires Alex Slimani et Antoine Courpon pour l'atmosphère de travail qu'ils ont instauré dans l'appartement.

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction	8
Contexte	9
La télédétection	10
Matériel et Méthode	12
Le site d'étude	12
Explication des mouvements sédimentaires	12
Démarche suivie	13
1) Définition du débit seuil pour observer les barres sédimentaires de second ordre	13
2) Trouver un pas de temps intéressant pour observer les barres sédimentaires de second ordre	14
3) Le choix des ortho-photos	14
4) Utilisation de la SIG pour suivre les fronts	14
5) Obtention des résultats	15
Traitement des données LiDAR	15
Résultats	16
Contexte Hydrologique	16
Résultat Ortho-Photo	16
Résultat MNT LiDAR	17
Comparaison	18
Discussion	20
Résultat Ortho-photos	20
Résultat MNT LiDAR	20
Biais méthode	21
Conclusion	22
Annexes	23
Annexe I	23
Annexe II	24
Annexe III	24
Annexe IV :	25
Annexe V :	26
Annexe VI :	27
Bibliographie	28
Sitographie :	29

Introduction

Contrairement aux idées reçues, la Loire est un fleuve, anthropisé. Au cours des siècles, afin de pouvoir le rendre navigable, l'homme a construit de nombreuses infrastructures. Hors ces infrastructures ont modifié les dynamiques hydrauliques et sédimentaires. Aujourd'hui, la Loire est en déficit sédimentaire constant. Le lit se creuse donc continuellement ce qui met en péril la pérennité de certains ouvrages (ponts, digues ...). Ce Projet de fin d'étude (PFE) s'inscrit donc dans la continuité du PFE d'Alex Andréault qui s'inscrit lui-même dans le projet R-TEMUS (Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'Usages en Basse Loire). C'est un projet qui a pour but de « comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire et écologique de la Loire en intégrant la réponse écologique aux actions d'aménagement/ restauration » (Muriel, Citeres, 2016) qui seront mis en place dans le futur. Ce projet s'applique sur un tronçon aval de la Loire qui va de Montsoreau à Nantes. Ce projet est multi-disciplinaire, il couvre la compréhension du fonctionnement écologique, morphodynamique et son usage par les acteurs. Ces disciplines sont interconnectées et s'influencent entre-elles. Les objectifs de ce projet sont de répondre aux questions d'aménagement de la Loire en comprenant comment fonctionne la Loire sur le plan biotique et abiotique. C'est un projet sur 4 ans qui a commencé en 2016. Il est financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne ainsi que par le programme opérationnel interrégional FEDER (Fonds européen de développement régional).

Contexte

La problématique de cette étude est de voir quelles sont les possibilités que peut apporter la télédétection pour l'étude du mouvement des barres sédimentaires dans le lit de la Loire en période d'étiage. Cette problématique rentre dans la thématique de la morphodynamique fluviale. Ce thème se décompose en deux disciplines que sont le transport solide et l'hydraulique fluviale. Le transport solide désigne la matière transportée. L'hydraulique fluviale désigne quant à elle le facteur de transport.

Le fonctionnement d'un cours d'eau est l'interconnexion d'une multitude de facteurs qui sont mis en relation (Figure 1). Toute modification / ajustement de variables dépendantes telles que la largeur ou la profondeur de la rivière nécessite une érosion ou le dépôt de sédiment dans le lit du cours d'eau. Normalement, la plus grosse activité de dépôt ou d'érosion dans les cours

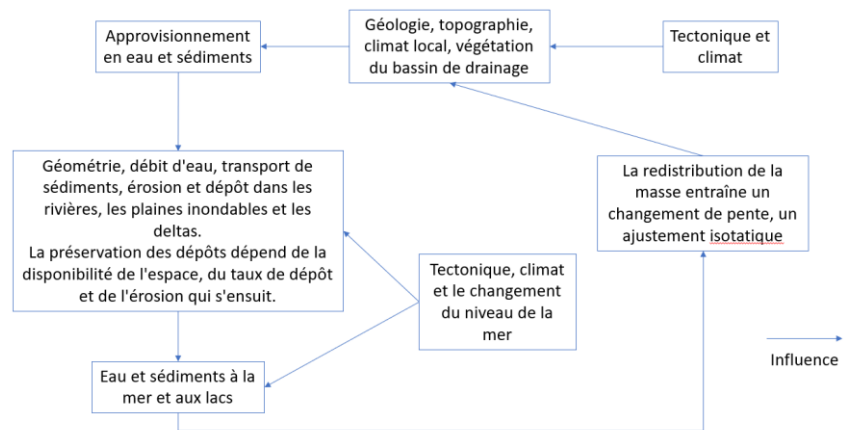


Figure 1: La relation entre les matériaux, les processus et les reliefs dans les systèmes de rivières alluviales (John S. Bridge, 2003)

d'eau est assuré lors des épisodes de hautes eaux (périodes de crues). La géométrie des rivières est donc contrôlée par ces épisodes de forts débits. Il est donc important de prendre en compte la fréquence ainsi que la puissance de ces périodes hydrologiques. Généralement, les épisodes de fortes crues avec un débit de débordement ont une période de retour entre 1 et 2 ans. Cependant, cette période de retour peut varier le long d'une rivière donnée mais aussi entre les rivières du fait de leurs différences de forme des hydrogrammes de crues. De plus, la période de retour du stade de débordement est plus courte pour les rivières avec dépôt de sédiment par rapport aux rivières incisives. Toutes les périodes hydrologiques sont capables de transporter des sédiments et donc par conséquent avoir des effets sur la géométrie du cours d'eau. Cependant elles auront moins d'impact que les épisodes de crues dominantes évoqués précédemment (Bridge J.S., 2003 ; Wintenberger, 2015).

On considère que la morphodynamique des cours d'eau est régie par 4 facteurs : la pente, le débit d'eau, la granulométrie du substrat et l'apport sédimentaire (Lane, 1955). Ces quatre facteurs sont normalement en équilibre, ou tendent à l'être. Toute action humaine sur un cours d'eau peut modifier l'un ou plusieurs de ces facteurs. Le système cherchera donc à retrouver son équilibre et va par conséquent modifier la morphologie du cours d'eau (la pente, la profondeur, la largeur ...) ou la dynamique de celui-ci (le débit). La Loire est un très bon exemple de cette problématique car elle a subi de nombreuses modifications d'une part pour la rendre navigable et qu'elle le reste (mise en place d'aménagements permettant un auto-entretien du lit pour permettre aux bateaux de passer) mais aussi par la pratique de l'extraction de sédiment dans le cours d'eau qui a été une pratique courante jusqu'en septembre 1994, date de l'interdiction de l'extraction de substrat dans la Loire (Dambre, 1996). Toutes ces pratiques ont entraîné un déficit en sédiment de la Loire ce qui cause une incision continue de son lit. Cela provoque un changement de la morphologie du cours d'eau mais aussi une augmentation de la puissance spécifique de celui-ci. La capacité à fragiliser les ouvrages, se situant sur la Loire (ponts, digues ...) en cas de crues exceptionnelles, est donc aussi augmenté. Cette incision

a aussi pour effet d'engendrer une rupture de la continuité écologique. En effet, la morphodynamique d'un cours d'eau est la base de la mise en place de la végétation dans ce cours d'eau. C'est ce que l'on appelle la biogéomorphologie. Dans un premier temps, c'est le stade géomorphologique c'est-à-dire la dynamique physique du fleuve qui crée le substrat permettant l'implantation. Ensuite vient le stade pionnier où les premiers végétaux vont se mettre en place dans ce substrat. Ensuite, c'est le stade biogéomorphologique qui se met en place. Les plantes sont assez développées et commence à avoir une influence sur son environnement (ralentissement du cours d'eau, fixation des sédiments ...). Le stade suivant est le stade « écologique » : les communautés végétales sont bien en place dans le milieu.

Par ce modèle, il est visible que la geomorphologie d'un cours d'eau est la base de son appropriation par des espèces végétales ou animales. Si l'activité de l'homme impact cette morphodynamique du cours d'eau, alors elle aura aussi des répercussions sur les communautés animales et végétales. Pour avoir un impact favorable et durable sur les milieux, il ne faut pas restaurer des habitats mais bien les dynamiques qui sont derrière.

A partir de cela, il donc très important d'avoir des connaissances pointues sur les milieux que les hommes souhaitent restaurer afin de mieux comprendre les dynamiques qui sont en jeux et donc par ce fait, de restaurer de manière plus durable le fleuve ou cours d'eau en question. C'est cet objectif que poursuit le projet R-TEMUS afin de pouvoir restaurer le plus durablement possible le fleuve Loire. Dans cette optique, une compréhension du déplacement sédimentaire est très importante. C'est pourquoi, l'utilisation de système de télédétection peuvent être employé afin d'avoir des données précises. Dans ce sens, Alex Andreault a travaillé sur le système LiDAR mais la télédétection amène une nouvelle approche à ce sujet. En lien avec le travail fait précédemment par Alex, le but va être de déterminer la vitesse de déplacement des barres sédimentaires (amas de sédiments) à l'aide de systèmes de télédétection.

La télédétection

La méthode traditionnelle, pour réaliser des profils de la forme du lit et ainsi déterminer la position des différents dépôts de sédiments, est l'utilisation de bateaux équipés de transducteurs acoustiques afin de pouvoir réaliser la bathymétrie des fleuves. Cependant certaines techniques comme la télédétection ont fait leurs apparitions, faisant ainsi évoluer les techniques et ouvrant de nouvelles possibilités aux chercheurs.

L'utilisation de la télédétection pour analyser les cours d'eau fait l'objet d'études depuis 2010 (**Dugdale et al.**, 2010). Le terme télédétection désigne les techniques aériennes pour obtenir des photographies du milieu d'étude. Cela prend en compte l'utilisation de vols d'avions habités équipés d'appareils photos à haute résolution, l'utilisation de drones ainsi que l'utilisation de satellites pour obtenir des photographies de précision de tronçons de cours d'eau à de courtes périodes d'intervalles. « L'échantillonnage traditionnel dans les rivières est effectué de manière intensive sur de petites zones ou avec des mesures largement espacées sur de grandes zones. Ces deux méthodes ont le risque de sous-échantillonner les environnements fluviaux et manquer des éléments critiques de la rivière (**Marcus et Fonstad**, 2008). En utilisant la télédétection, les chercheurs sont capables de collecter spatialement des mesures détaillées des variables physiques primaires (par exemple, la largeur, profondeur, pente et taille des sédiments) et calculer les variables hydrauliques secondaires (par exemple, la vitesse et la puissance des cours d'eau) (**Carbonneau**, 2005 ; **Dugdale et al.**, 2010 ; **Fonstad et Marcus**, 2010 ; **Walther et al.**, 2011 ; **Carbonneau et al.**, 2012) » (**James T. Dietrich**, 2016). Cette méthode permet donc de gagner en temps, en précision mais aussi et surtout d'obtenir des données pour des lieux qui seraient inaccessibles pour les moyens d'échantillonnages classiques (utilisation de GPS, de systèmes LiDAR). En effet, la récupération de données se fait à partir de vols habités (avions équipés d'appareils photos) mais aussi des vols non-habités (l'utilisation de drone). Pour avoir

une qualité d'image optimal pour créer des orthomosaïques, il faut « un chevauchement latéral et longitudinal de 80% des images » (**Javernick et al.**, 2014 ; **James T. Dietrich**, 2016). Cela est nécessaire quand il faut travailler sur de grandes étendues d'eau comme les fleuves.

Matériel et Méthode

Le site d'étude

Le site d'étude est au niveau de la commune de Saint-Mathurin sur Loire, entre Angers et Saumur. La zone d'étude fait environ 5 km de long. Cependant, afin de concorder avec les relevés LiDAR réalisé sur lequel l'étude va aussi s'appuyer, la zone d'étude a été agrandi (Figure 2). La configuration morphologique du site d'étude est définie par la position des barres sédimentaires présentes sur le site. Ici, ce sont des barres alternées qui donne cette sinuosité au cours d'eau (**Le Guern et al. 2021**)



Figure 2: Délimitation de la zone d'étude au niveau de Saint-Mathurin-sur-Loire

Explication des mouvements sédimentaires

La structure sédimentaire de la Loire repose sur différentes formes sédimentaires à plusieurs échelles. Dans un premier temps, on retrouve des rides qui sont des microformes. Elles se forment avec des niveaux d'énergies faibles dans un sédiment relativement fin. Elles se présentent sous la forme de petites ondulations du lit. Elles sont posées sur une forme sédimentaire plus importante qui est la dune subaquatique. La mise en place de ces dunes est influencée par la vitesse du courant ainsi que la profondeur d'eau présent lors du dépôt des sédiments. Ces dunes s'implantent sur des macroformes nommées barres sédimentaires dont la longueur est du même ordre de grandeur que celle de la largeur du chenal. Dans la Loire, il est possible de distinguer deux types de barres sédimentaires. Les barres sédimentaires de premier ordre qui sont visible même en période de hautes eaux. Il y a aussi les barres sédimentaires de second ordre qui sont, elles, visibles qu'en période d'étiage. Ces dernières sont l'objet d'intérêt de cette étude. Les barres sédimentaires de premier ordre sont déplacées par les épisodes de crues alors que les barres sédimentaires de second ordre sont toujours immergées. Elles sont donc en permanence en déplacement par un effet de Seuil – Mouille. Lors des basses eaux, au niveau du thalweg, il y a une divergence de flux. En effet, au niveau du seuil, il y a une décélération du courant du fait de la présence d'une faible pente positive. Juste après le thalweg se trouve une forte contre-pente que l'on nomme la mouille. Du fait de cette forte chute, il y a une ré accélération du courant. Cette divergence des flux va provoquer une avancée des sédiments qui vont chuter du seuil pour se déposer dans la mouille. C'est par ce phénomène que les barres sédimentaires de second ordre avancent en période d'étiage. Ce phénomène est visible sur la Figure 3, en a)12, la zone rouge est cette zone de seuil – mouille. Plus le temps défile a)14, a)15, a)16, a)17, plus il est possible de voir ce front se déplacer vers l'aval comme le montre la position sur l'axe des abscisses (**Le Guern et al., 2021**).

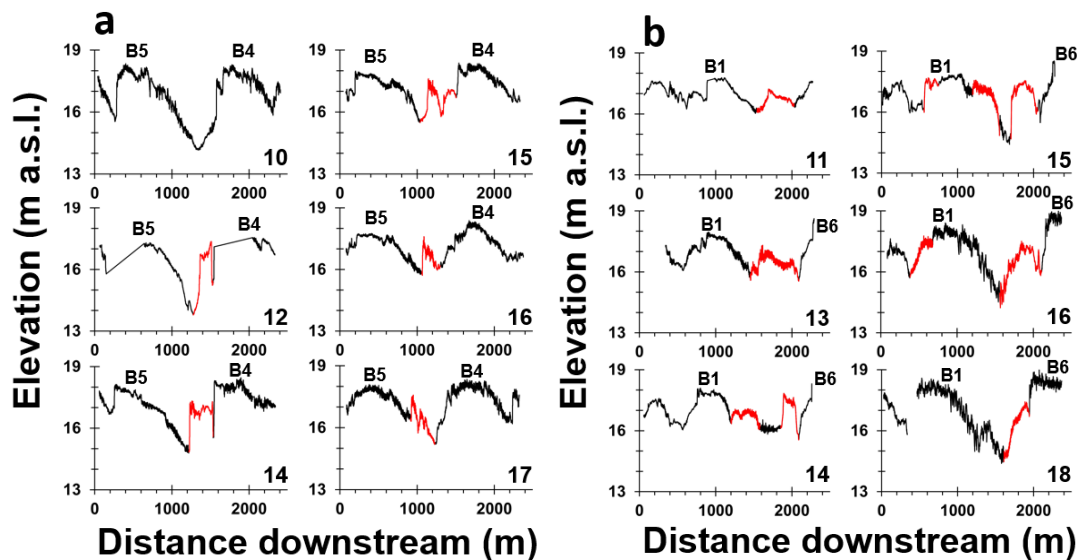


Figure 3: Relevés bathymétriques de transect sur le site d'étude (Le Guern et al., 2021)

Démarche suivie

Dans un premier temps, un choix a dû être fait sur le choix de la plateforme fournissant les ortho-photos. Plusieurs choix étaient possibles comme la plateforme Planet ou bien l'institut d'études géologiques des Etats Unis avec son logiciel EROS (Earth Resources Observation and Science). Le choix s'est porté sur la plateforme « Planet.com ». En effet, cette entreprise propose un service de photos satellites journaliers avec une résolution allant jusqu'à 3 mètres par pixel. La résolution de l'image est très importante car si elle est trop grande, il ne sera pas possible de voir le déplacement des barres sédimentaires de second ordre entre 2 dates assez rapproché (du fait que ce soit à l'étiage et donc faible courant)

A partir du choix du service d'imagerie, il a fallu mettre en place une méthode pour traiter ces images et obtenir les informations recherchées. Le traitement des données s'est réalisé en 5 étapes :

1) Définition du débit seuil pour observer les barres sédimentaires de second ordre

La station hydrologique la plus proche du site d'étude se situe au niveau de Saumur (Banque Hydro). Les données fournies sont de 1948 à 2020 avec un pas de temps de 1 jour. Il a donc fallu dans un premier temps traiter ces données afin de sélectionner la bonne tranche temporelle ainsi que les débits qui sont intéressants pour l'étude. En effet, l'étude est réalisée entre 2017 et 2019 afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec l'étude réalisée par Alex Andréault sur l'utilisation du LiDAR topobathymétrique sur le fleuve Loire (Alex Andréault, 2019). De plus, l'étude des barres sédimentaires de second ordre par télédétection ne peut se faire que sur des débits à l'étiage assez faible. Le choix s'est porté sur des débits inférieurs à $350 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la Loire. Ce seuil a été établi à partir de l'expérience terrain de Jules Le Guern qui travaille actuellement sur le même site d'étude. A partir de cela, il a été possible de traiter les données avec un programme python (Annexe V) afin d'obtenir les jours entre 2017 et 2019 pour lesquels le débit est inférieur à $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 1).

Date pour Q350					
2017		2018		2019	
de	à	de	à	de	à
Mai	Décembre	Juillet	Décembre	Avril	Novembre

Tableau 1: Ensemble des dates entre 2017 et 2019 où le débit est inférieur à 350 m³/s

2) Trouver un pas de temps intéressant pour observer les barres sédimentaires de second ordre

La résolution des ortho-photos fourni par la plateforme Planet est de 3m/pixel. Il faut donc un déplacement des fronts de barres d'au minimum 3 mètres pour voir une différence sur les images. Après une étude plus en détail des images fournies par la plateforme Planet, un pas de temps d'au minimum 15 jours entre chaque cliché semble pertinent pour l'étude des barres sédimentaires de second ordre. La formule utilisée pour calculer la vitesse de déplacement des barres sédimentaires prenant en compte la date des deux clichés utilisés, un écart supérieur à 15 jours entre les deux clichés n'est pas dérangeant.

3) Le choix des ortho-photos

Le choix des ortho-photos est très important car c'est la donnée qu'il va falloir exploiter. La plateforme Planet propose un panel permettant de filtrer les clichés en fonction de la résolution recherché, de l'ensoleillement, de la couverture nuageuse et de d'autres paramètres. Les trois premiers paramètres cités sont ceux qui nous intéressent. Le seuil maximal de la résolution des clichés était de 3m/pixel, la couverture nuageuse devait être inférieur à 10% du cliché et ne pas se situer sur la zone du cours d'eau.

4) Utilisation de la SIG pour suivre les fronts

Dans un premier temps, il a fallu récupérer les différentes ortho-photos utiles à l'étude. Cela s'est fait directement sur le site Planet. Mais il y a eu une limitation du nombre d'images pouvant être téléchargées. Il a donc fallu trouver une solution pour pouvoir continuer le travail. Heureusement, Planet propose une extension sur le logiciel de cartographie QGIS permettant d'importer et de travailler directement sur les ortho-photos dans le logiciel. A partir de ces images, il a fallu mettre en place une méthode manuelle pour pouvoir les traiter par QGIS. Méthode :

- 1) Sélectionner une barre de second ordre bien visible dans le site d'étude
- 2) Définir si le déplacement de la barre est transversal ou longitudinal
- 3) Délimitation du front de la barre pour chaque date. Du fait de la résolution proposée par la plateforme Planet qui est de 3 mètres par pixel, le choix a été de définir comme front de barre, la zone où les pixels s'assombrissaient, qui correspond à la zone d'avancement de la barre
- 4) Mesure de la longueur du front de barre
- 5) Mesure de l'air entre le front de barre à temps j par rapport au front de barre à un temps j-1

5) Obtention des résultats

A partir des différentes informations obtenues à partir du traitement des images, il est possible de calculer une vitesse de migration des différentes barres de second ordre grâce à la formule proposée par Strick dans son article “Quantification of bedform dynamics and bedload sediment flux in sandy braided rivers from airborne and satellite imagery “ :

Application de la formule de Strick :

$$M_b = A_b / \bar{L}(t_2 - t_1)$$

L étant la longueur du front de barre, A_b étant la surface d'un polygone créée à partir de la position du front de barre à t_1 puis à t_2 . t_1 et t_2 sont les deux dates auxquelles les clichés ont été pris. Cela donne un mouvement de barre M_b en $m.h^{-1}$. On obtient donc un taux de migration des barres unitaires et des dunes (Strick et al., 2019).

Tous les résultats sont répertoriés dans un tableau sous la forme ci-dessous :

Coordonnées : 694624; 5254935 / Type : Transversal					
Date	Longueur de front (m)	Longueur moyenne (m)	Aire par rapport au front précédent (m2)	Delta T (Jours)	Vitesse m/j
29-juin	616.34	/	/	/	/
14-juil	626.36	621.35	5683.01	15.00	0.61
05-août	660.03	643.19	5383.04	22.00	0.38
19-août	681.14	670.59	1691.76	14.00	0.18
08-sept	695.69	688.42	2505.28	20.00	0.18

Tableau 2: Tableau de mise en forme des résultats

Traitement des données LiDAR

Lors de la réalisation de son projet de fin d'étude, Alex Andréault a obtenu des modèles numériques de terrain pour le relevé LiDAR du 18/10/2017 et le relevé du 29/05/2019. Les MNT de ces relevés laser possède une précision plus grande (1 mètre par pixel) que la précision fournie les ortho-photos avec une résolution de 3 mètres par pixel. L'idée est de pouvoir comparer le résultat de la méthode proposée par Strick entre des données de photographie et des données LiDAR afin de vérifier si l'utilisation de la télédétection est possible pour étudier les dynamiques de la Loire. La méthode appliquée sera donc la même que pour les ortho-photos.

Résultats

Contexte Hydrologique

Les contextes hydrologiques des années 2017, 2018 et 2019 sur le site d'étude sont très contrastés (Figure 4). L'année 2017 est une année assez sèche. En effet, le débit moyen annuel de 2017 est de 358 m³/s. Le débit de 2017 est dans l'ensemble inférieur au débit moyen sur 20 ans sauf en début mars où un pic (1760 m³/s) de débit est observable. Le débit de l'année 2018, après l'année sèche de 2017, est supérieur au débit moyen sur les 20 dernières années (622 m³/s) avec un débit de 721 m³/s. C'est le mois de janvier qui a apporté le plus d'eau avec un débit moyen mensuel de 2111 m³/s et des crues à 3000 m³/s. Cependant la période d'étiage a été assez longue puisqu'elle s'est prolongée jusqu'à la fin du mois de novembre. L'année 2019 est beaucoup plus sèche, avec un débit moyen annuel de 405 m³/s. L'étiage est marqué par des débits très faibles, inférieurs à 130 m³/s. Des valeurs inférieures aux 100 m³/s (minimum à 80.3 m³/s), qui n'avait pas été mesuré depuis 1991 (81.5 m³/s), ont même été mesurés pendant 6 jours, fin août - début septembre.

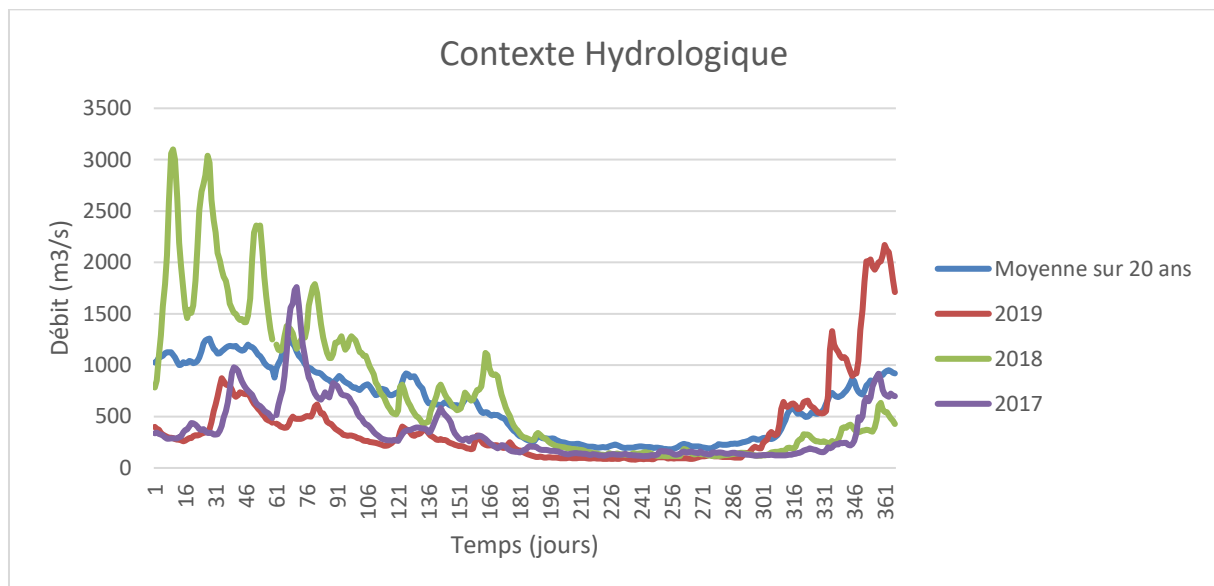


Figure 4: Contexte hydrologique de la zone d'étude pour 2017, 2018 et 2019 (source : Banque Hydro, station de Saumur)

Résultat Ortho-Photo

La formule de Strick faisant une différence de l'état d'avancement du front de la barre entre 2 dates distinctes, cela explique qu'à la première date de relevé pour chaque année, il n'y a pas de vitesses définies. Pour certaines barres sédimentaires de second ordre, la visibilité sur certaines photos ne permettant pas une bonne digitalisation du front de barre, il a été choisi de ne pas faire la digitalisation pour ces dates afin de ne pas avoir de résultats erronés. Cette absence d'information est indiquée par la forme « / » comme on peut le voir sur le Tableau 4 pour la barre 5 au 19 août et au 8 septembre de l'année 2018.

Tableau 3 : Vitesse de migration de barres sédimentaires de second ordre pendant la période d'étiage de 2017 sur le site de Saint-Mathurin-sur-Loire

Résultat des vitesses de migrations de barres sédimentaires de second ordre sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire en 2017								
Numéro de la barre :		1	2	3	4	5	6	7
Orientation de la barre :		Transversale	Longitudinale	Longitudinale	Transversale	Longitudinale	Longitudinale	Longitudinale
Date	Débit (m3/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)
15-juin	229	/	/	/	/	/	/	/
15-juil	167	0.587	0.500	0.422	0.736	0.874	1.298	1.418
16-août	130	0.422	0.564	0.275	0.372	0.902	0.734	1.033
18-sept	160	0.401	0.707	0.437	0.850	0.735	0.403	1.108

Tableau 4 : Vitesse de migration de barres sédimentaires de second ordre pendant la période d'étiage de 2018 sur le site de Saint-Mathurin-sur-Loire

Résultat des vitesses de migrations de barres sédimentaires de second ordre sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire en 2018									
Numéro de la barre :		1	2	3	5	4	6	7	8
Orientation de la barre :		Transversale	Longitudinale	Transversale	Longitudinale	Transversale	Transversale	Longitudinale	Longitudinale
Date	débit (m3/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)
29-juin	333	/	/	/	/	/	/	/	/
14-juil	244	0.610	1.050	2.747	1.355	1.595	1.396	1.015	/
05-août	144	0.380	1.209	1.039	0.988	0.549	1.120	0.275	0.314
19-août	133	0.180	0.976	0.739	/	0.521	0.564	0.212	0.233
08-sept	115	0.182	0.375	0.374	/	0.389	0.435	0.060	0.124

Tableau 5 : Vitesse de migration de barres sédimentaires de second ordre pendant la période d'étiage de 2019 sur le site de Saint-Mathurin-sur-Loire

Résultat des vitesses de migrations de barres sédimentaires de second ordre sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire en 2018								
Numéro de la barre :		1	2	3	4	5	6	7
Orientation de la barre :		Longitudinale	Transversale	Longitudinale	Longitudinale	Longitudinale	Transversale	Longitudinale
Date	Débit (m3/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)
19-avr	244	/	/	/	/	/	/	/
12-mai	359	0.898	1.179	0.477	1.540	0.513	0.568	1.253
01-juin	209	0.879	1.511	1.406	1.555	0.494	0.471	1.634
17-juin	223	0.584	1.020	0.762	1.848	0.260	0.592	0.924
02-juil	142	0.135	0.610	0.334	2.279	0.459	0.293	0.648
17-juil	99.1	/	0.327	0.544	/	0.271	0.748	/
22-août	85.6	/	0.227	0.230	/	0.299	0.124	/
13-sept	92.6	/	0.255	0.358	/	/	0.196	/

Résultat MNT LiDAR

Il n'y a eu que 2 relevés LiDAR sur la zone d'étude. Un premier le 18 octobre 2017 et un second le 29 mai 2019. Du fait d'avoir seulement 2 relevés, il ne peut y avoir qu'une vitesse de migration pour chaque barre sédimentaire de second ordre digitalisée.

Tableau 6 : Résultat des vitesses de migrations de barres sédimentaires de second ordre sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire par l'utilisation de LiDAR entre 2017 et 2019

Résultat des vitesses de migrations de barres sédimentaires de second ordre sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire par l'utilisation de LiDAR entre 2017 et 2019							
Numéro de la barre :	1	2	3	4	5	6	7
Date	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)	Vitesse de migration (m/s)
18/10/2017	/	/	/	/	/	/	/
29/05/2019	0.329	0.867	0.549	0.530	0.587	1.144	0.931

Comparaison

Pour traiter les résultats, nous avons découpé en plusieurs classes : les résultats de 2017, de 2018, de 2019, ceux venant des relevés LiDAR. Puis à la suite de la digitalisation, l'orientation des barres sélectionnées a pu être défini, il a donc été choisi de regarder aussi la vitesse de migration des barres en fonction de l'orientation de cette migration.

A partir du Tableau 7, la vitesse moyenne de migration déterminés à l'aide des ortho-photos de 2017, 2018 et 2019 est d'environ 0.7 à 0.75 mètre par jour. Résultat que l'on retrouve aussi pour le relevé LiDAR. Il est observable que la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires de second ordre est plus importante pour la migration longitudinale que la migration transversale (0.675 m/j pour la migration transversale contre 0.758 m/j pour la migration longitudinale).

Cependant, l'analyse des résultats montre une forte dispersion des vitesses de migration lors de l'utilisation d'ortho-photos. En effet, l'écart-type avec la méthode utilisant les ortho-photo est de 0.5 à 0.6 m/j par rapport à la moyenne. Contrairement à la méthode utilisant le LiDAR qui a un écart-type beaucoup plus faible : 0.283 m/j par rapport à la moyenne.

Tableau 7: Résultats du traitement des données obtenues

	Moyenne (m/s)	Max (m/s)	Min (m/s)	Ecart type
2017	0.704	1.418	0.275	0.317
2018	0.724	2.747	0.060	0.581
2019	0.736	2.279	0.124	0.537
LiDAR	0.705	0.329	1.144	0.283
Transversale	0.675	2.747	0.124	0.520
Longitudinale	0.758	2.279	0.060	0.497

Afin de savoir s'il y a un lien entre le débit et la vitesse de migration des barres sédimentaires de second ordre, un coefficient de corrélation a été calculé entre le débit et la moyenne des vitesses de migration de toutes les barres pour chaque jour où il y a eu un relevé. Le coefficient de corrélation s'applique sur une année entière. A partir de ces calculs, les corrélations suivantes sont obtenues :

- Il y a une corrélation de 0.79 entre le débit et la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires en 2017
- Il y a une corrélation de 0.98 entre le débit et la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires en 2018

- Il y a une corrélation de 0.77 entre le débit et la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires en 2019

Discussion

Résultat Ortho-photos

A partir des différents graphiques (Figure 5 et Annexe IV), on peut voir que la vitesse de migration des barres sédimentaires est en correspondance avec le débit présent sur le site d'étude. Pour appuyer cette idée, un coefficient de corrélation a été calculé entre les débits qu'il y a eu les jours des clichés utilisés durant l'année et la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires de second ordre pour ces mêmes jours. Il est observé que la corrélation entre les débits et les vitesses de migration pour l'année 2017 est de 0.79, pour l'année 2018 : 0.98 et pour l'année 2019 : 0.77. Ces résultats confirment le lien entre le débit et la vitesse de migration des barres sédimentaires. Cependant certains aspects de la dynamique fluviale sont à prendre en compte. En effet, dans la Loire, on retrouve un chenal principal qui méandre. Or certaines barres ne se situent pas dans ce chenal mais leur front avance et se retrouvent à croiser ce chenal principal. La vitesse du courant au niveau du chenal principal est plus importante que dans le reste du cours d'eau. Il est donc observable une accélération de la vitesse de migration quand le front d'une barre sédimentaire atteint le chenal principal comme il est possible de voir pour la barre sédimentaire 1 et 2 sur l'annexe I.

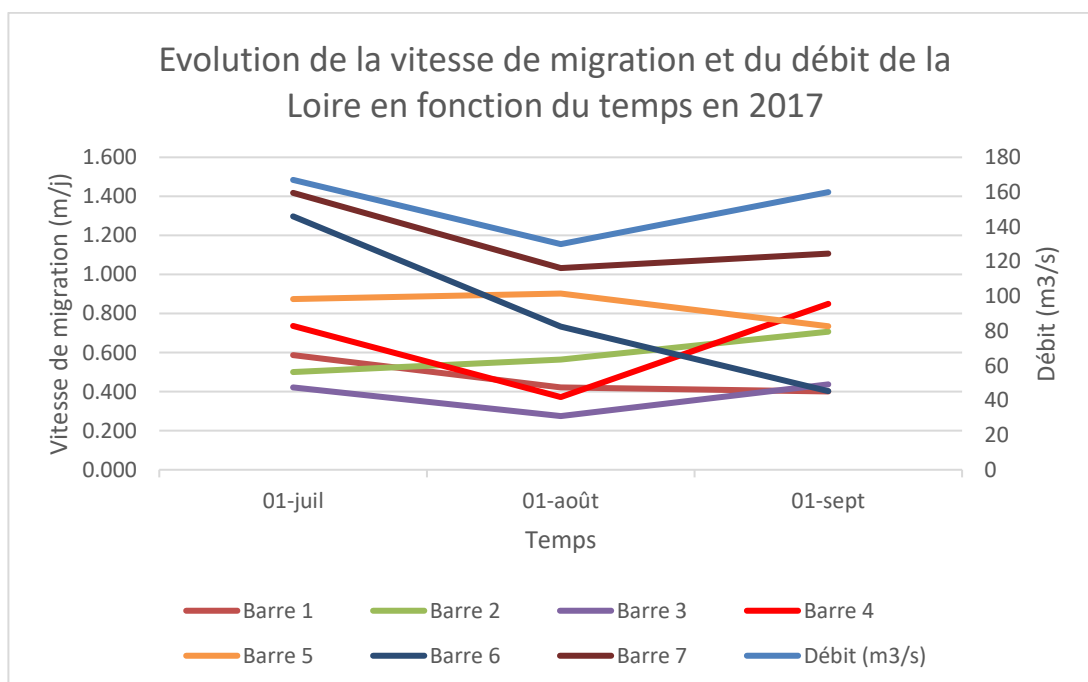


Figure 5 : Représentation de la vitesse de migration des barres sédimentaires de second ordre et du débit en fonction du temps pour l'année 2017

Résultat MNT LiDAR

L'utilisation de la méthode proposée par Strick pour des données LiDAR donne des résultats similaires à ceux obtenus pour l'analyse des ortho-photos, c'est-à-dire une vitesse moyenne de migration de 0.705 mètres par jour. Cependant, il convient de faire attention à ces résultats car le pas de temps entre les deux relevés est de pratiquement 2 ans (du 18/10/2017 au 29/05/2019, soit 588 jours). Le suivi d'une même barre sédimentaire est donc plus compliqué que pour des données plus rapprochées dans le temps. D'autant plus que l'année 2018 a connu

de fortes crues ce qui a pu avoir un fort impact sur le mouvement ainsi que la vitesse de déplacement des barres sédimentaires de second ordre.

Il serait donc intéressant de réaliser cette opération avec des données plus rapprochées dans le temps afin de confirmer si la méthode est bien applicable pour des relevés LiDAR.

Biais méthode

A la vue des résultats, la méthode semble fonctionnelle. Cependant, certains paramètres peuvent influencer la qualité des résultats. En effet, cette méthode repose sur l'avis d'expert de la personne qui l'applique pour la digitalisation des barres sédimentaires ainsi que pour définir la longueur de leurs fronts et la position des points utilisés pour digitaliser ces fronts. C'est pour cela que l'étude explique clairement quels ont été les choix fait pour digitaliser les fronts de barres afin que si d'autres opérateurs utilisent la même méthode, ils puissent être en concordance avec la méthode utilisée ici.

La résolution des images utilisées est un facteur très important dans cette méthode. Plus la résolution sera bonne, plus la digitalisation des fronts de barre sera bonne et donc les résultats plus précis. Actuellement la résolution des images utilisées est de 3 mètres par pixel. Cela peut expliquer une dispersion assez importante des valeurs pour les ortho-photos de 2017, 2018 et 2019. Il serait donc intéressant de travailler sur des photos avec une meilleure résolution. La plateforme Planet propose maintenant un service délivrant des clichés avec une précision de 50 centimètres par pixel. Il serait donc intéressant de tester ces clichés pour voir si la dispersion des résultats est aussi importante.

C'est une méthode très dépendante des conditions météorologique, un nuage sur la zone concernée, des conditions de luminosités défavorables et il n'est plus possible de travailler sur la photo. Cela restreint donc rapidement le nombre d'images utilisable. Cela s'est constaté entre 2017 et 2019 dans ce cas d'étude. La contrainte météorologique ainsi que la contrainte temporelle (un minimum de 15 jours entre chaque cliché afin de pouvoir voir une évolution significative de la migration du front des barres sédimentaires) sont les deux facteurs qui ont largement réduis le choix des ortho-photos dans notre cas d'étude.

Conclusion

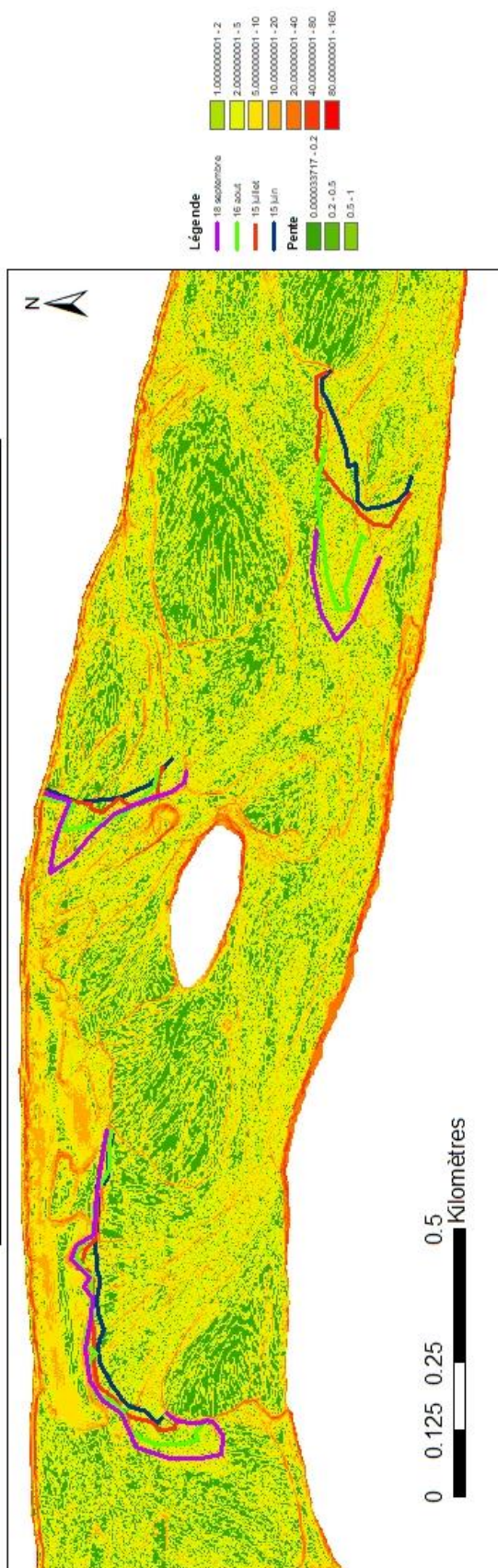
L'objet de ce projet de fin d'étude était de répondre à la question : quelles sont les possibilités que peut apporter la télédétection pour l'étude du mouvement des barres sédimentaires dans le lit de la Loire en période d'étiage. L'utilisation de la télédétection pour l'étude du transport solide étant apparue récemment (en 2010). Ce projet met en application les recherches fournies sur l'état de l'art réalisé l'année dernière qui avait pour but de recenser toutes les études réalisées sur ce sujet ainsi que les méthodes utilisées pour quantifier les mouvements de barre sédimentaire à partir de la télédétection.

La méthode retenue pour ce projet a été celle proposée par Strick dans son article « Quantification of bedform dynamics and bedload sediment flux in sandy braided rivers from airborne and satellite imagery ». Cette méthode montre des résultats satisfaisants puisque la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires de second ordre en période d'étiage est très proche entre les 3 années d'études (0.704 m/j en 2017, 0.724 m/j en 2018, 0.736 m/j en 2019). Ces résultats sont appuyés par l'analyse des données LiDAR de la zone d'étude qui montre une vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires presque similaire aux données de télédétection : 0.705 m/j.

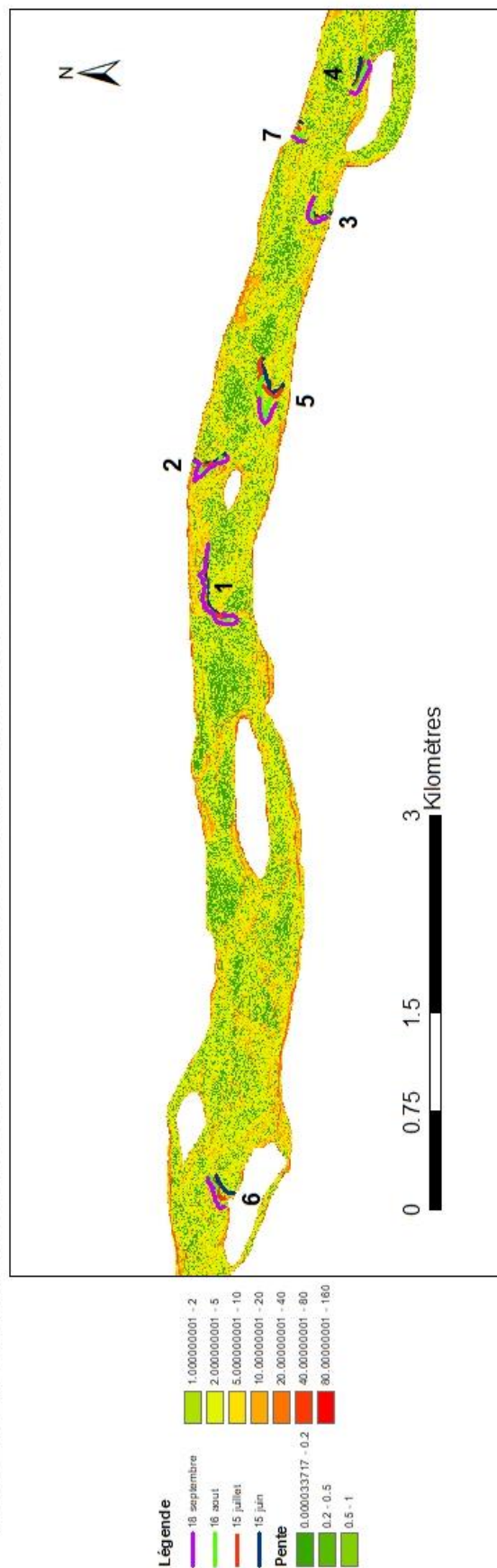
Les résultats sont satisfaisants mais la méthode présente certains biais qui peuvent impacter la qualité des résultats. La résolution des clichés utilisés est très importante, si elle n'est pas assez bonne, la digitalisation des fronts de barre ne sera pas précise. La digitalisation des fronts de barre se base sur l'avis d'expert de l'opérateur. Il est donc possible d'avoir des résultats différents entre les opérateurs pour un même site d'étude. Enfin la disponibilité des clichés dépend fortement des conditions climatiques et hydrologiques du site d'étude.

Cette méthode ouvre de nombreuses possibilités dans l'étude du transport sédimentaire. L'évolution de la résolution des clichés est un facteur qui permettra d'avoir des analyses encore plus précises. La plateforme Planet développe un service proposant des clichés avec une résolution à 50 cm par pixel. Il serait intéressant de travailler avec ces clichés et comparer les résultats avec cette étude afin de voir s'il y a une évolution significative de la précision des résultats. Il est difficile de pouvoir travailler sur les facteurs climatiques qui sont indépendants de la volonté des chercheurs. Cependant un point important d'amélioration, serait d'obtenir des relevés LiDAR plus rapprochés dans le temps. Cela permettrait un suivi plus précis des barres sédimentaires.

Agrandissement de la zone sur les barres 1, 2 et 5



Carte de la digitalisation des différentes barres sédimentaires de second ordre sur le site d'étude en 2017



Annexe II

Carte de la digitalisation des barres sédimentaires de second ordre sur le site d'étude en 2018



Légende

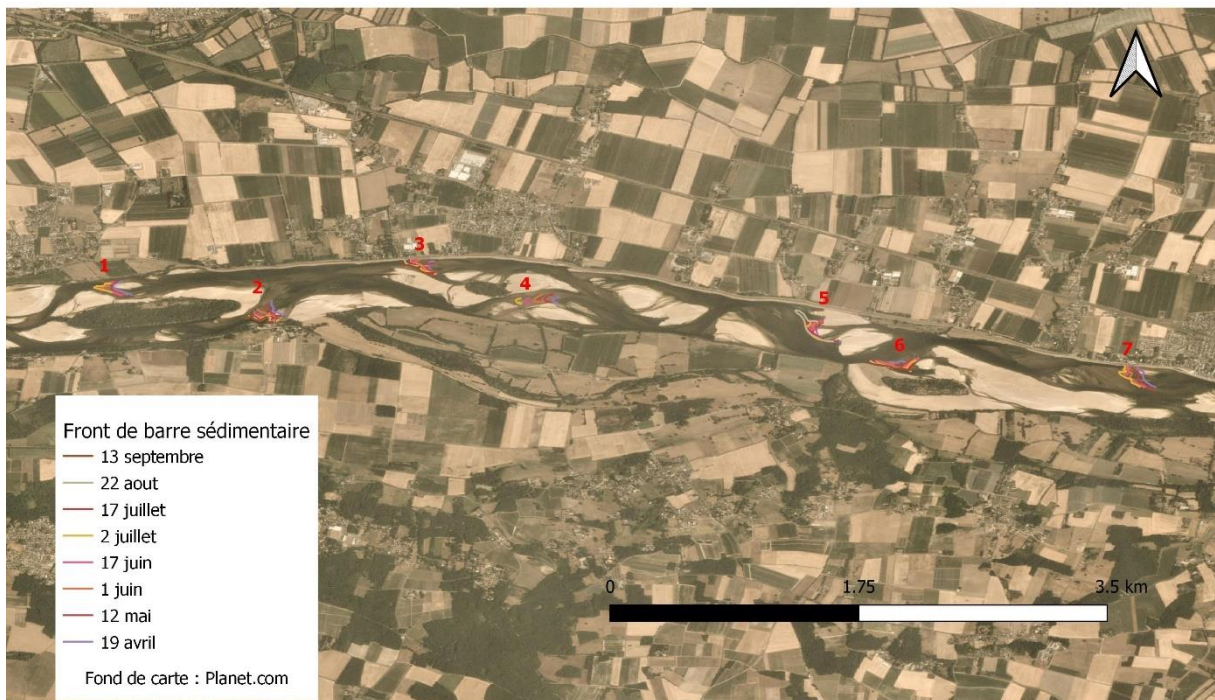
— 08 Septembre — 05 Août — 29 Juin
— 19 Août — 14 Juillet

Fond de carte : Planet.com

0 0.75 1.5 3
Kilomètres

Annexe III

Carte de la digitalisation des barres sédimentaires de second ordre sur le site d'étude de Saint-Mathurin-sur-Loire en 2019



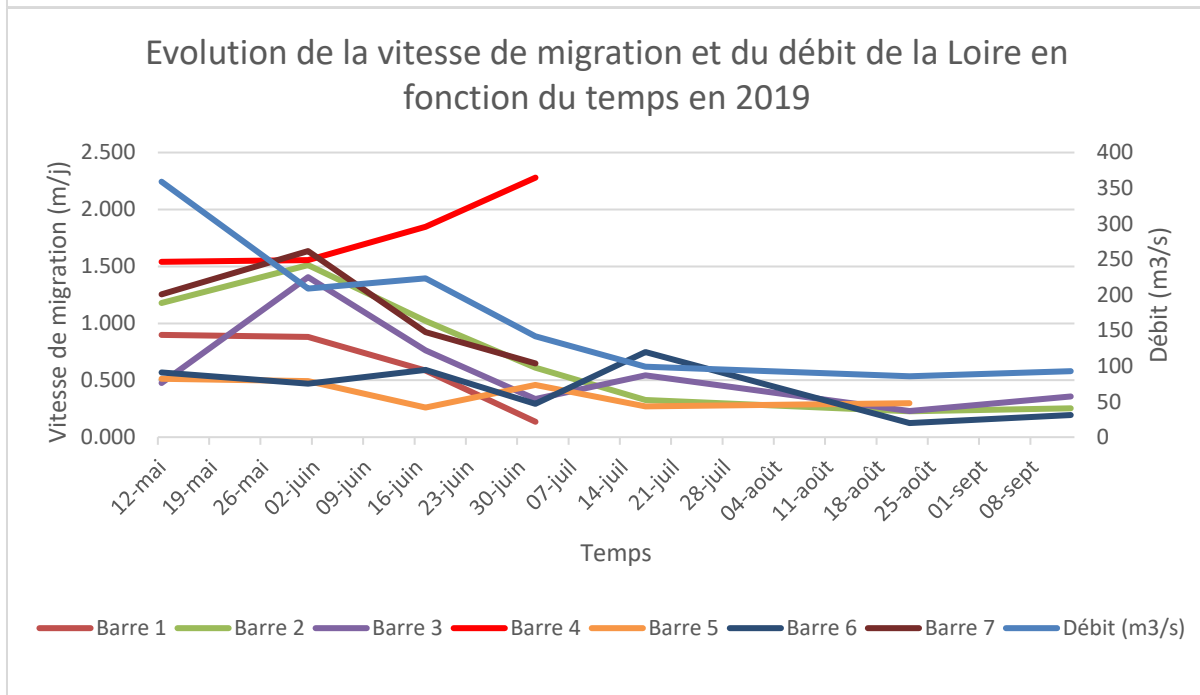
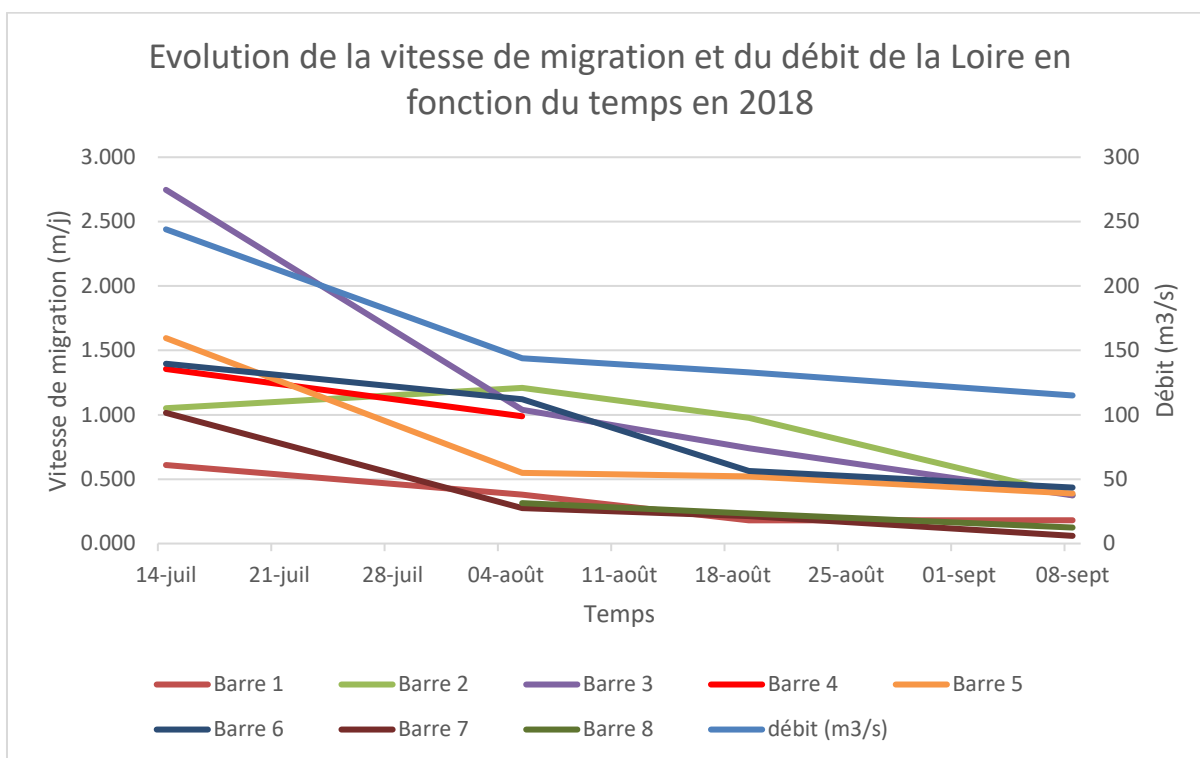
Front de barre sédimentaire

— 13 septembre
— 22 août
— 17 juillet
— 2 juillet
— 17 juin
— 1 juin
— 12 mai
— 19 avril

Fond de carte : Planet.com

0 1.75 3.5 km

Annexe IV :

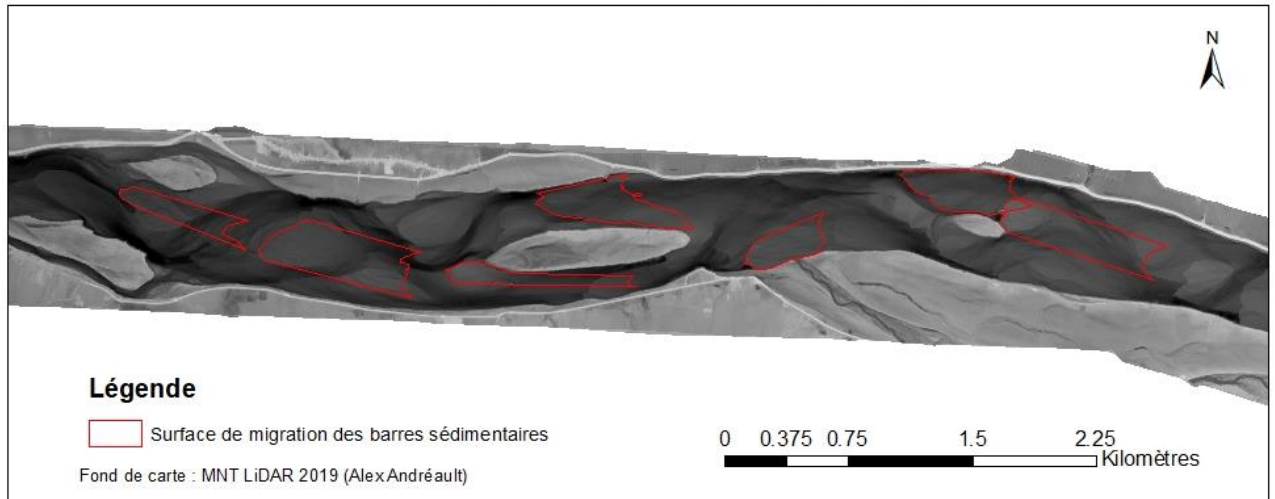


Annexe V :

```
8 import datetime
9 import copy
10
11 def writeResults(debit) :
12     with open("debit_350_Saumur_2017_2018_2019", "w") as file :
13         for key in debit :
14             if key in debit and debit[key][0] <= 350 :
15                 file.write(key+"\t"+str(debit[key])+"\n")
16
17 def ReadDebitValue(filename) :
18
19     yearToRegister = ['2017', '2018', '2019']
20
21     debit = {}
22
23     with open(filename, "r") as file :
24         lastDay = ''
25
26         tempDebit = []
27
28         for line in file :
29             listInfo = line.split("\n")[0].split("\t")
30             date = datetime.datetime.strptime(listInfo[1], "%d/%m/%Y")
31
32             if date.strftime("%Y") in yearToRegister :
33                 if lastDay != date.strftime("%d/%m/%Y") :
34                     if len(tempDebit) != 0 :
35                         debit[lastDay] = copy.deepcopy(tempDebit)
36                         tempDebit.clear()
37                     lastDay = date.strftime("%d/%m/%Y")
38
39                     tempDebit.append(float(listInfo[2]))
40
41     return debit
42
43 def TreatmentDebitValue(data) :
44
45     ValueDebit = {}
46
47     for key in data :
48         if len(data[key]) != 0 :
49             ValueDebit[key] = data[key]
50     print(ValueDebit)
51     return ValueDebit
52
53
54 def main() :
55
56     ListeDebit = ReadDebitValue("debit_saumur")
57     CorrectDebit = TreatmentDebitValue(ListeDebit)
58     writeResults(CorrectDebit)
59
60
61
62
63
64
65 if __name__ == "__main__" :
66     main()
```

Annexe VI :

**Digitalisation de la surface de migration des barres sédimentaires
sur des MNT LiDAR entre 2017 et 2019**



Bibliographie

- Alex Andréault**, 2019. Traitement des données de LiDAR topobathymétrique acquises sur le fleuve Loire, premiers traitements et tentatives de classification des macroformes sédimentaires. PFE, Polytech Tours, Tours.
- Bridge J.S.**, 2003. Rivers and Floodplains, Forms, Processes, and Sedimentary Record. Blackwell Publishing : 12-16
- Carbonneau, P.E.**, 2005. The threshold effect of image resolution on image-based automated grain size mapping in fluvial environments. *Earth Surf. Process. Landf.* 30, 1687–1693. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1288>.
- Carbonneau, P., Fonstad, M.A., Marcus, W.A., Dugdale, S.J.**, 2012. Making riverscapes real. *Geomorphology* 137, 74–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.030>.
- Dambre JL.**, 1996. Les extractions de matériaux dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire et de ses affluents. *La Houille Blanche* n° 6/7-1996 : 108-113. <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1996/05/lhb1996077.pdf>
- Dietrich JT.**, 2016. Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology* 252: 144–157
- Dugdale, S.J., Carbonneau, P.E., Campbell, D.**, 2010. Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps. *Earth Surf. Process. Landf.* 35, 627–639. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1936>.
- Fonstad, M.A., Marcus, W.A.**, 2010. High resolution, basin extent observations and implications for understanding river form and process. *Earth Surf. Process. Landf.* 35, 680–698. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1969>.
- Javernick L, Brasington J, Caruso B.**, 2014. Modelling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213: 166–182
- Lane E.**, 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, volume 81, pages 1–17.
- Le Guern, J., Rodrgues, S., Tassi, P., Cordier, F., and Wintenberger, C. L.**: Field observation of migrating bar formation and evolution in a complex pattern sandy-gravel bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, in prep.
- Marcus WA, Fonstad MA.**, 2008. Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. *Earth Surface Processes and Landforms* 33: 4–24.
- Strick et al**, 2019. Quantification of bedform dynamics and bedload sediment flux in sandy braided rivers from airborne and satellite imagery. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 953–972

Walther, S.C., Marcus, W.A., Fonstad, M.A., 2011. Evaluation of high-resolution, truecolour, aerial imagery for mapping bathymetry in a clear-water river without ground-based depth measurements. *Int. J. Remote Sens.* 32, 4343–4363.
<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.486418>.

Wintenberger, 2015. Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse, Etude in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire moyenne. Thèse, Université François Rabelais de Tours, Tours, 355 p.

Sitographie :

Citeres, R-TEMUS : Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'Usages en Basse Loire [en ligne]. Disponible sur : <http://citeres.univ-tours.fr/spip.php?article2476> (consulté le 06/01/2021)

Planet, Daily Satellite Imagery and Insights [en ligne]. Disponible sur : <https://www.planet.com/> (consulté le 12/01/2021)

Directeur de recherche :

Stéphane Rodrigues

Gaël Chéneau

PFE/DAE5

IMA

2020-2021

Analyse de la dynamique des mouvements des barres sédimentaires en Loire par l'utilisation des données de télédétection

Résumé :

La Loire a changé de dynamique morphologique au fil du temps, soit naturellement, soit par l'action de l'homme. Ce projet de fin d'études s'inscrit dans un projet beaucoup plus vaste, R-TEMUS, qui vise à « comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire et écologique de la Loire ». Cette étude vise à déterminer si les outils de télédétection peuvent être utiles dans l'analyse de la dynamique des barres sédimentaires dans le lit de la Loire et plus précisément sur la détermination de la vitesse de migration de barres sédimentaires de second ordre en période d'étiage. La télédétection étant tous les moyens aéroportés habités ou non permettant de prendre des clichés du site d'étude. C'est une technique permettant de faire des relevés dans des zones difficiles d'accès pour les techniques de relevés traditionnelles. Les photos proviennent de la plateforme Planet.com qui propose des services de télédétection satellites. L'analyse des photos par l'observation de l'avancé des fronts de barres sédimentaires pour l'année 2017, 2018 ainsi que 2019 montre une vitesse moyenne de migration de 0.7 à 0.75 m/j. Cette donnée est appuyée par l'analyse de relevé MNT LiDAR entre 2017 et 2019 dont la vitesse moyenne de migration des barres sédimentaires est de 0.705 m/j. Cependant, il faut faire très attention aux différents paramètres qui peuvent influencer l'analyse des images, tel que le climat lors de la prise du cliché ou encore la résolution du cliché en lui-même.

Mots Clés :

Télédétection, barre sédimentaire, Vitesse de migration, LiDAR, Planet.com, ortho-photo, Système d'Information Géographique