

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2019

Traitement de données LiDAR topobathymétrique acquises sur le fleuve Loire, premiers traitements et tentatives de classification des macroformes sédimentaires

[Photo si possible]

**Traitements des données de LiDAR
topobathymétriques acquises sur le
fleuve Loire, premiers traitements et
tentative de classification des
macroformes sédimentaires**

**Stéphane Rodrigues
2020**

Alex Andréault

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 souhaite remercier en premier lieu mon directeur de projet, M. Stéphane Rodrigues pour le soutien et les nombreux conseils apportés tout au long de ce travail.

Dans un second temps je souhaite remercier Jules Leguern pour la mise à disposition des données LiDAR et les remarques constructives à propos des données.

SOMMAIRE

Introduction	9
Contexte	11
1. Le LiDAR topobathymétrique.....	11
1.1. Définition	11
1.2. Fonctionnement.....	11
1.3. Historique et limites de l’outil	12
2. Le fleuve Loire	13
2.1. Le bassin versant et l’hydrologie de la Loire	13
2.2. Ecologie de la Loire	14
2.3. Organisation des unités morphodynamique de la Loire	14
2.4. Historique et gestion de la Loire	15
2.5. Le site d’étude : Saint Mathurin sur Loire	15
Matériels et méthodes.....	16
1. Acquisition des données topobathymétriques	16
1.1. Le LiDAR	16
1.2. Le cheminement.....	16
2. Premiers traitements des données brutes.....	17
2.1. Correction des données	17
2.2. Interpolation des MNT.....	17
2.3. Classification.....	17
3. Suppression de l’effet de pente des MNT (Débasculément).....	17
3.1. Concept	17
3.2. Données d’hydrologie (sonde DIVER).....	18
3.3. Création du MNT pente	19
3.4. Carte des altitudes relatives.....	19
4. Caractérisation de la morphodynamique.....	20
4.1. Caractérisation de la rugosité du lit.....	20
4.2. Calcul des pentes.....	20
4.3. Evolution du lit de la Loire entre 2017 et 2019	20
5. Classification des barres sédimentaires	21
Résultats	22
1. Suppression de l’effet de pente	22
1.1. Détermination de la pente de ligne d’eau.....	22
1.2. Etablissement du MNT correcteur de pente.....	23

1.3. MNT de 2017 et 2019 débasculés.....	23
2. Morphodynamique su tronçon de Loire à Saint-Mathurin-sur-Loire.....	25
2.1. Pentes du tronçon.....	25
2.2. Indice de rugosité.....	27
2.3. Evolution du lit de la Loire entre 2017 et 2019	27
Discussion	28
1. Les données LiDAR.....	28
1.1. Etendu des données LiDAR et influence sur le traitement des données.....	28
1.2. Qualité des résultats	28
2. Le débasculement des MNT 2017 et 2019	28
3. Détermination des paramètres de morphodynamiques	29
4. Classification des macroformes sédimentaires.....	29
4.1. Détermination des unités sédimentaires.....	29
4.2. Méthodologie de classification des macroformes sédimentaires.....	29
Conclusion et Perspectives.....	31
Bibliographie.....	32

Introduction

Les grands cours d'eau sont le théâtre de nombreuses activités humaines. On compte parmi elles, la production d'énergie, le transport de marchandises et divers loisirs. Cette cohabitation entre humains et rivières à régulièrement conduit à l'anthropisation des cours d'eau. Cette anthropisation avait pour principal objectif la protection des ressources humaines et matériels des crues d'ampleur significative. Les travaux qui ont été menés dans ce cadre ont très souvent menés à la destruction et la banalisation des systèmes existants. Cela étant, malgré les contraintes appliquées aux fleuves, certains présentent encore une dynamique hydrologique et sédimentaire marquée. Or, il est d'importance pour les usagers des cours d'eau de pouvoir endurer et être résilients face à des événements extraordinaires dont les impacts humains et matériels peuvent être importants. D'autre part, suite aux conséquences négatives des nombreux travaux d'aménagement, les populations ont commencé à prendre en compte l'importance de l'aspect environnemental dans les travaux d'aménagement des cours d'eau. De plus, la mise en place d'un cadre légal d'envergure européenne (Directive Cadre sur l'Eau) a permis d'initier, de financer et de réaliser de nombreux projets visant à la restauration écologique et fonctionnelle des hydrosystèmes. Ces projets englobent à la fois les petits cours d'eau situés en tête de bassin versant, très importants d'un point de vue de support pour la biodiversité (zone de reproduction) et de fournisseur du stock sédimentaire, et les grands fleuves dont les fonctions et les services écosystémiques associés sont également multiples.

Cependant, les actions de restaurations à entreprendre varient significativement selon le type de cours d'eau. Ainsi avant de les mettre en place il convient d'entreprendre des études visant à comprendre et appréhender le fonctionnement et la dynamique des hydrosystèmes. Cela passe par différentes études visant à caractériser de manière précise les aspects les composant. Parmi ces composantes, l'étude de la dynamique de la végétation ainsi que de la morphodynamique du lit d'un fleuve sont très importantes car les enjeux humains et bâtis peuvent en dépendre fortement. En effet, ces deux paramètres sont directement impliqués, par différents mécanismes, dans la probabilité d'inondation de zones à fort enjeux.

La morphodynamique des cours d'eau a été et est étudiée par différentes méthodes. Parmi elles, la topographie pour les zones émergées (barres sédimentaires, berges) via l'utilisation de moyens classiques tel que les théodolites, les DGPS ou les niveaux de chantiers ; et la bathymétrie pour les zones immergées (chenal) via l'utilisation d'échosondeur multi ou monofaisceau. Aujourd'hui, une méthodologie dite topobathymétrique commence à être mise en place. Elle permet de lever au cours d'une seule campagne de terrain à la fois les zones émergées et immergées. Ce genre de technologie permet un gain de temps et une caractérisation très précise de l'hydrosystème. Cette technologie a été employée dans le cadre d'un projet européen nommé Restauration du lit et Trajectoire Ecologique, Morphologique et d'Usages en Basse-Loire (R-TEMUS). Ce dernier a pour objectif d'appréhender les processus hydrosédimentaires ainsi que les dynamiques écosystémiques à l'œuvre sur un tronçon de la Loire aval s'étirant de Nantes à Montsoreau. Ce projet s'axe sur plusieurs thématiques différentes mais complémentaires, puisqu'il regroupe à la fois des sujets d'écologie, de morphodynamique et de société. Il est financé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB) mais également par l'union européenne grâce au Fond Européen de Développement Régional (FEDER) sur une durée de 4 ans (2016-2020). Les résultats de ces recherches ont pour principal objectif de répondre aux questions de gestion et d'aménagement de cet environnement instable et de contenter l'ensemble des acteurs interagissant avec cet hydrosystème. C'est dans l'axe de travail concernant les processus hydrosédimentaires de la Loire dans sa portion moyenne et aval

que ce travail s'inscrit. Il fait suite aux passages d'un avion équipé d'un LiDAR topobathymétrique en 2017 et 2019 sur le secteur de Saint-Mathurin-sur-Loire. Dans un premier temps l'objectif principal est de chercher des méthodologies de caractérisation du lit des cours d'eau et de les appliquer sur les données précédemment évoquées. Dans un second temps, un travail de recherche est effectué pour tenter d'établir une classification des macroformes sédimentaires du lit de la Loire et de l'appliquer sur le tronçon considéré.

Premièrement les outils et le site d'études seront décrit dans une partie exposant le contexte du projet. Ensuite, le matériel employé et les méthodologies appliquées seront décrite dans une deuxième partie. Puis les résultats exposés dans une troisième. Et enfin, les résultats et le travail effectué seront discutés dans une dernière partie.

La question scientifique sous-jacente à ce travail est la suivante :

⇒ **Quelles sont les potentialités du LiDAR topobathymétrique en termes de caractérisation de la morphodynamique d'un grand fleuve de plaine ?**

1. Le LiDAR topobathymétrique

1.1. Définition

Les LiDAR font partie d'une famille d'outils utilisés dans le domaine de la photogrammétrie dont le principe repose sur un principe simple d'optique. L'appareil émet un signal lumineux d'une certaine longueur d'onde pouvant varier entre l'ultraviolet et les infrarouges, puis lorsque ce signal impacte un objet de l'environnement, une portion du signal émis est réfléchi et est capté par le détecteur de l'appareil.

Les LiDAR peuvent être de plusieurs types. Les LiDAR terrestres, qui nécessitent une mise en station sur la terre ferme et qui ne peuvent pas être déplacés pendant l'acquisition de la donnée. Il existe également les LiDAR embarqués, soit sur un véhicule terrestre soit sur une embarcation aquatique et enfin des LiDAR aéroportés. Il s'agit d'un LiDAR transporté par avion ou hélicoptère pour couvrir un maximum de surface. Aujourd'hui les drones sont également utilisés pour l'acquisition de données LiDAR. Cet outil permet à la fois une facilité de mise en place, une stabilité lors du vol et un rapport qualité prix non négligeable (Pereira et Wicherson, 1999 ; Charlton *et al.*, 2003). Les LiDAR aéroportés semblent être, aujourd'hui, une méthode adaptée à l'étude des cours d'eau.

1.2. Fonctionnement

Les LiDARs aéroportés sont des appareils embarqués émettant un faisceau de lumière cohérente appelé laser. Ces appareils sont équipés d'un émetteur et d'un récepteur. Le principe repose sur l'émission d'une impulsion lumineuse. Puis, lorsque cette impulsion rencontre une surface plus ou moins opaque, une partie du signal initial est réfléchi. L'émetteur capte alors le signal retour et l'appareil détermine alors une distance par rapport à sa position selon l'équation 1 :

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

Où d correspond à la distance entre le LiDAR et le sol (en mètre), c correspond à la célérité de la lumière (299 792 458 m/s) et t correspond au temps entre l'émission et la réception du signal (en seconde).

Dans le cas d'un LiDAR topobathymétrique, contrairement à un LiDAR rouge, ce dernier a la capacité de lever à la fois la topographie du fond du lit malgré la présence d'eau et la lame d'eau (figure 1) permettant *in fine* de déterminer la profondeur d'eau. Les LiDARs verts ont la capacité de pénétrer la colonne d'eau du fait du fait d'une énergie de l'onde plus importante que celle émise par des longueurs d'onde rouge. Cependant, la profondeur atteinte par ces outils reste relativement limitée mais il existe cependant des appareils capables de capter de l'information dans des colonnes d'eau de plusieurs dizaines de mètres (Tonina *et al.* 2019). Cela est possible notamment, grâce à la puissance donnée au signal émis.

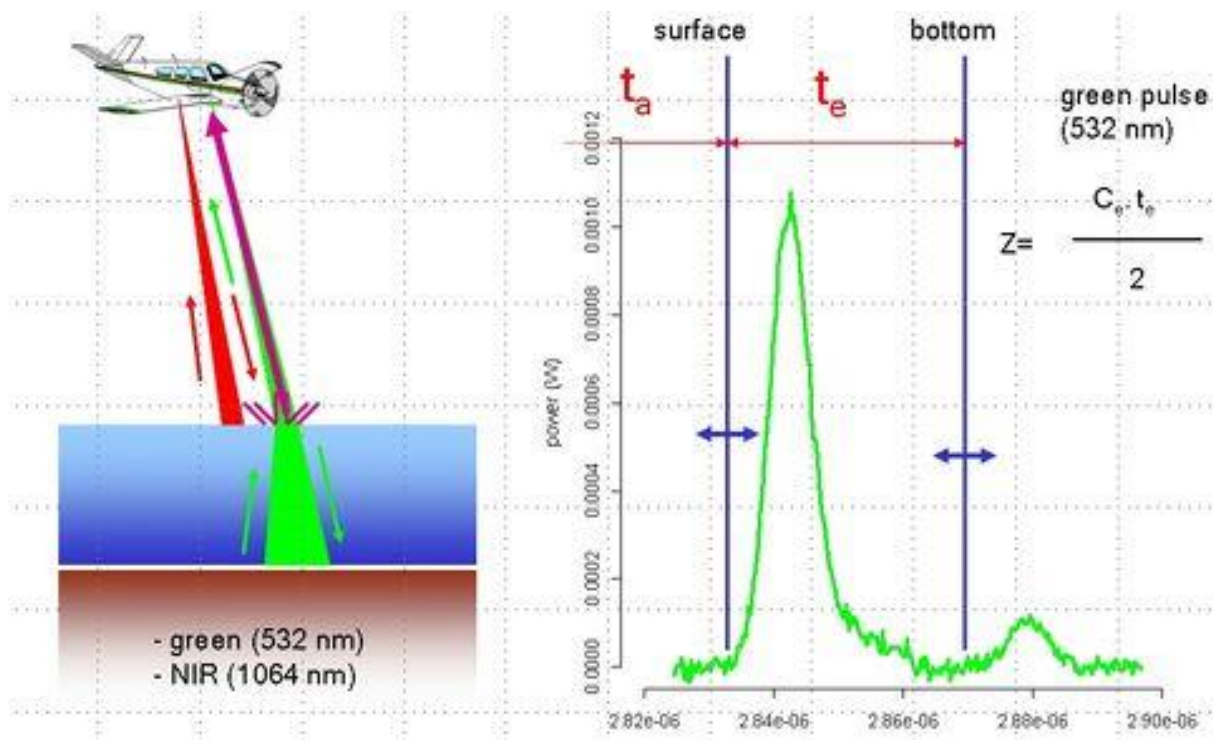


Figure 1: Fonctionnement du LiDAR topographique et topobathymétrie (source :wikhydro.developpement)

1.3. Historique et limites de l'outil

Les LiDARs aéroportés ont été initialement utilisés dans des domaines différents de l'étude des rivières. Ces domaines étaient ceux du maritime (Höfle et al., 2009) et de l'archéologie (George-Leroy et al., 2011). Dans le cadre d'étude maritimes et côtières le LiDAR permet de couvrir et lever une surface très importante avec une densité de points proportionnellement importante. Dans le domaine de l'archéologie, certains outils permettent, de par leurs capacités d'acquérir des données avec une grande résolution, de mettre en évidence des variations microtopographiques témoins des pratiques passées. Cependant, les caractéristiques techniques et les paramétrages de l'outil appliqués pour l'étude de ces domaines ne conviennent pas à l'étude des systèmes fluviaux. En effet, ces derniers nécessitent une résolution spatiale plus importante que pour l'étude du domaine maritime et côtier et une résolution plus faible que celle qui est appliquée dans le cadre d'étude archéologiques. La prise de données topobathymétrique sur le domaine fluvial nécessite alors l'établissement d'une balance entre la résolution spatiale appliquée et la surface à lever désirée car les hydrosystèmes fluviaux sont largement plus restreint que le domaine marin et bien plus étendue que des sites archéologiques. Il s'agit alors d'établir un rapport permettant de caractériser de manière précise le lit d'une rivière tout en effectuant la campagne d'acquisition des données en un temps intéressant.

D'autre part, le type de laser employé a une influence sur la qualité de la donnée topographique. En effet, le laser présente une surface d'impact de forme circulaire avec une certaine aire qui correspond à la zone d'incertitude à la fois sur le plan XY et sur le plan altitudinal. Cette incertitude, si elle est peu importante pour le LiDAR utilisé en milieu marin, elle peut être préjudiciable dans le cadre de l'étude des rivières. En effet, la prise en compte des variations micro-mésotopographique peut être nécessaire car elles peuvent avoir une influence sur les variations altitudinales des lignes d'eau lors d'événements hydrologiques particuliers.

2. Le fleuve Loire

2.1. Le bassin versant et l'hydrologie de la Loire

La Loire est le plus grand fleuve de France avec un linéaire de 1020 km et une surface de bassin versant de 117 000 km² représentant 1/5^{ème} du territoire français (Moatar et al., 2016). Elle prend sa source au Mont Gerbier-de-Jonc dans le massif des Cévennes et se jette dans l'océan Atlantique à Saint-Nazaire. Son orientation suit un axe SSE-NNO jusque dans l'orléanais, puis elle s'infléchit pour prendre une orientation E-O. La Loire a la particularité de ne pas s'écouler au centre de son bassin versant, en effet elle longe les lignes de partages des eaux avec le bassin versant du Rhône à l'Est et celles avec le bassin versant de la Seine au Nord. Cette configuration lui confère une organisation de ses affluents majeurs assez particulière puisque la majorité est située en rive gauche (Allier, Cher, Indre et Vienne) et un seul en rive droite (Maine). D'un point de vue hydrologique, les crues de la Loire sont de trois types, le premier type de crue est engendré par des précipitations en amont du bassin, dans les Cévennes. Le second est dû aux précipitations provenant de l'océan Atlantique et les plus grandes crues sont issues de précipitation océaniques et cévenoles.

La Loire est découpée en trois secteurs : amont, moyen et aval. La Loire amont s'étend des sources au bec d'Allier. Elle s'écoule sur les roches cristallines du massif Central dont l'altération produit la majorité du stock sédimentaire mobilisé par le fleuve (Macaire et al., 2001). La gamme granulométrique de ce secteur est relativement grossière. La rivière dont la pente varie de 0,38 % à 0,07 % dans cette division, est encaissée et s'écoule dans des gorges jusqu'au barrage de Grangent avant de s'élargir et d'acquérir un style méandrique dans la plaine du Forez. A Nevers le débit moyen est de 178 m³.s⁻¹, la crue biennale atteint les 1000 m³.s⁻¹ et son QMNA moyen est de 35,7 m³.s⁻¹ (Données Banque hydro).

La Loire Moyenne continue sa course du bec d'Allier jusqu'au bec de Maine. A ce stade elle traverse les formations sédimentaires des calcaires de Beauce et Turoniens du bassin Parisien. L'apport de ce substrat à la charge solide est pratiquement nul car les formations carbonatées sont intégralement dissoutes. Ainsi la grande majorité des sédiments charriés sont des sables et des graviers siliceux du massif Central dont le D₅₀ (taille médiane des sédiments) décroît d'amont en aval de 4,6 mm à 0,63 mm (Latapie, 2011). La pente du cours d'eau s'adoucit encore pour atteindre les 0,04 % et la morphologie évolue vers un style avec des structures sédimentaires comme des îles plus ou moins grandes et tout un cortège de formes sédimentaires de tailles variées (barres, dunes, rides). A Blois le module atteint les 358 m³.s⁻¹, la crue biennale 1700 m³.s⁻¹ et le QMNA moyen est de 88 m³.s⁻¹ (Données banque hydro).

Enfin la Loire aval débute du bec de Maine et termine sa course à son embouchure avec l'océan Atlantique à Saint-Nazaire. Elle traverse le massif armoricain composé essentiellement de formations cristallines. De son embouchure jusqu'à la commune de Montjean-sur-Loire, la marée influence fortement la dynamique sédimentaire (Brossé, 1982). La pente décroît encore pour atteindre 0,02%. Le style morphologique de la Loire aval est à chenaux multiple séparés par des îles de grandes tailles. A Nantes le débit moyen est de 868 m³.s⁻¹, la crue biennale atteint 3100 m³.s⁻¹ et le QMNA moyen est de 216m³.s⁻¹ (Données banque hydro).

2.2. Ecologie de la Loire

Le fleuve Loire est caractérisé par une mosaïque d'habitat très diverse du fait de son étendue et les régions biogéographiques traversées. Ainsi, la Loire traverse en son cours supérieur la région biogéographique continentale. Puis, en son cours moyen et aval elle s'écoule dans la région Atlantique. On retrouve ainsi, une grande diversité floristique et faunistique. Sur son cours moyen et aval on observe un étagement clair de la végétation selon un gradient perpendiculaire à l'écoulement. Aux abords directs du cours d'eau, la végétation est principalement représentée par la strate herbacée composée en très grande majorité d'espèces ligneuses comme le Peuplier noir (*Populus nigra*) et les Saules (*Salix spp.*). Ces espèces, notamment, ont une capacité de croissance très forte dans les premiers stades de leur vie et vont avoir un effet sur le transport sédimentaire et par la suite sur la morphodynamique du lit. En effet, le premier phénomène mis en place suite à l'installation de plante de pionnières s'appelle l'effet de peigne, le principe de cet effet consiste en la capture des sédiments suite à la modification par les végétaux des conditions hydrauliques locales. Par la suite, l'accumulation local de sédiment forme des proto-îles qui vont pouvoir être colonisées de nouveaux par de la végétation pionnière. Enfin, avec l'accrétion de matériaux sédimentaires, la proto-île s'élève et les conditions de vie deviennent plus clémentes et permettent l'établissement d'individus plus grands et d'essence différentes. Ce gradient peut à la fois s'observer sur les éléments géomorphologiques internes au cours d'eau mais également sur ses rives. La végétation dans les hydrosystèmes joue un rôle important dans l'organisation paysagère de la rivière mais également dans la manière dont la rivière va évoluer. Il a été montré, par exemple, que l'apparition de la végétation vasculaire au cours des temps géologiques a engendré la formation des systèmes méandriformes.

2.3. Organisation des unités morphodynamique de la Loire

La Loire est composée de différentes structures observable à différentes échelles spatiales. Ainsi à une échelle très locale il est possible d'observer des microformes, également appelées rides, dont la hauteur n'excède pas quelques dizaines de centimètre. Ces rides reposent sur des structures similaires mais dont la taille augmente significativement pour atteindre des ordres de grandeurs équivalents à la profondeur d'eau, ces structures sont des dunes (mésoformes). Leur installation est gouvernée en grande partie par les conditions hydrologiques et hydraulique du cours d'eau à un moment donné. Enfin ces structures s'établissent sur des unités sédimentaires de très grande taille dont la longueur est équivalente à la largeur du cours d'eau. Ces macroformes (Church et Jones, 1982) sont appelées barres sédimentaires. Ces barres sont le résultat de l'accrétion de matériaux alluviales suite à des modifications hydrauliques localisées tel que la présence de bosquet de végétation qui peuvent engendrer des protobarres dont la fusion créera une barre (Wintenberger, 2015). Les barres sont généralement engraissées au cours des périodes de crues, et lors de la décrue les barres sont retouchées. On distingue alors une organisation spatiale particulière de la barre avec vers l'aval le front de barre dont l'altitude est élevée et la pente forte, et la queue de barre située plus en amont dont la hauteur est plus faible et la pente plus douce. Enfin, du fait de particularités topographique, des chenaux transversaux apparaissent sur la barre (Bluck, 1979).

Ces dernières présentent une diversité morphologique notable et dont la classification reste mouvante au cours du temps. Ainsi, initialement, il était possible de discerner des barres dites unitaires, linguoïde, de côté, transversale, diagonale, etc.... Cependant cette classification a été remise en question plusieurs fois du fait des critères de détermination relativement inapplicable au milieu naturel (Bridges, 2009). Les barres peuvent également être différenciée sur la base de leur dynamique au sein du chenal. Ainsi, on distingue les barres dites libres des barres forcées

(Tubineau et al., 1999). Les premières ont la capacité de se déplacer vers l'aval du chenal, tandis que les secondes ont une migration extrêmement limitée résultant de paramètres de forçage au sein du chenal (élargissement, rétrécissement) mais un dynamisme statique marqué. Enfin il est également possible de distinguer les barres sédimentaires en fonction de leur structure sédimentaire. Cela nécessite d'effectuer une analyse poussée des couches composant la structure. Les classifications actuelles définissent deux types de barres : les barres unitaires et les barres composées.

Les structures sédimentaires s'organisent également au sein du chenal selon des schémas particuliers. Cette organisation dépend principalement de la largeur du cours d'eau et de la profondeur moyenne (β -ratio). Les barres peuvent donc être organisées sur un seul axe longitudinal ou sur plusieurs (Bridges, 2009).

2.4. Historique et gestion de la Loire

La Loire a été fortement exploitée pour ses ressources minérales, aménagée pour la navigation (épis) et endiguée pour la protection des populations contre les inondations. Ces travaux ont entraîné une accélération de l'incision du chenal principal menant parfois à la disparition totale des alluvions et à l'affleurement du substratum rocheux. A titre d'exemple, à Pouilly-sur-Loire la vitesse d'incision était de 8 cm/an de 1970 à 1995 (Grivel et Gautier, 2012). Cet encaissement du chenal principal de la Loire a conduit à l'abaissement significatif de la ligne d'eau d'étiage. Cette incision a été fortement influencée par les ouvrages de navigation dont le but est d'entretenir un chenal navigable toute l'année en favorisant son auto-curage. L'endiguement diminue l'espace de divagation latérale de la rivière, favorisant l'incision du chenal, et engendre la déconnexion avec sa plaine alluviale. Cette déconnexion et l'incision entraînent la disparition des milieux ripariens très riches en biodiversité. L'incision, quant à elle, est responsable de l'abaissement des lignes d'eau d'étiage et de la déconnexion des annexes hydrauliques tel que les barres sédimentaires et les chenaux secondaires. Suite à leur déconnexion ces chenaux vont être colonisés par la végétation pionnière, ce qui aura pour effet d'augmenter la rugosité du lit augmentant alors l'altitude des lignes d'eau de crues. Lorsque surviennent des crues dont la hauteur de la ligne d'eau est de l'ordre de la végétation en place, l'augmentation de la rugosité majeure l'élévation des lignes d'eau et les risques de surverse ainsi que de rupture de digue augmentent. Des travaux d'entretien sont menés régulièrement sur les unités morphologiques de la Loire pour limiter le risque (Wintenberger, 2015). Ils visent à restaurer la capacité hydraulique par l'arasement de la végétation et à la lutte contre l'incision par l'export des sédiments dans le chenal principal.

2.5. Le site d'étude : Saint Mathurin sur Loire

Le site d'étude est situé proche de la commune de Saint-Mathurin-sur-Loire dans le département du Maine-et-Loire (49). Cette commune est à environ 90 km de Tours. Initialement long de 6 km pour les études sur le volet hydro-sédimentaire, le linéaire de cours d'eau a été doublé pour l'étude LiDAR du secteur. D'un point de vue morphodynamique, ce secteur est caractérisé par la présence d'îles et de barres sédimentaires alternées dont l'existence a pu être établie dès le début du 20^{ème} siècle (Leguern et al., 2018). Ainsi, malgré les conséquences des travaux conduits dans le lit de la Loire par le passé, le site présente aujourd'hui encore une organisation morphologique stable.

Matériels et méthodes

1. Acquisition des données topobathymétriques

1.1. Le LiDAR

Le LiDAR a été calibré préalablement afin de corriger immédiatement les données acquises. En effet, du fait de l'accélération et de la vitesse de l'appareil de vol les données peuvent biaiser l'acquisition. Cette calibration nécessite le calcul du bras de levier entre le LiDAR et l'IMU (Initial Measurement Unit) et entre le GPS et l'IMU. L'IMU est le système permettant de prendre en compte les accélérations et vitesses angulaire dans les trois dimensions. Les données acquises sont référencées en Lambert 93 en planimétrie et les données d'altitudes sont enregistrées en IGN69. Les données de topographie et de surface d'eau ont été acquises via l'utilisation d'une longueur d'onde de 1064 nm et de 532 nm. Tandis que la bathymétrie a été enregistrée grâce à la longueur d'onde 532 nm (Feldmann et Lague, 2018).

1.2. Le cheminement

L'acquisition des données LiDAR en 2017 a été effectuée le 18/10/2017 et représentait un linéaire de cours d'eau de 12 km entre la Ménittré et les Ponts de Cé (figure 2) (Gouraud, 2017). Le LiDAR couvrait 100 % de la surface du cours d'eau et aucune zone non couverte n'est recensée (Gouraud, 2017). La Loire était en période d'étiage pendant la campagne d'acquisition ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

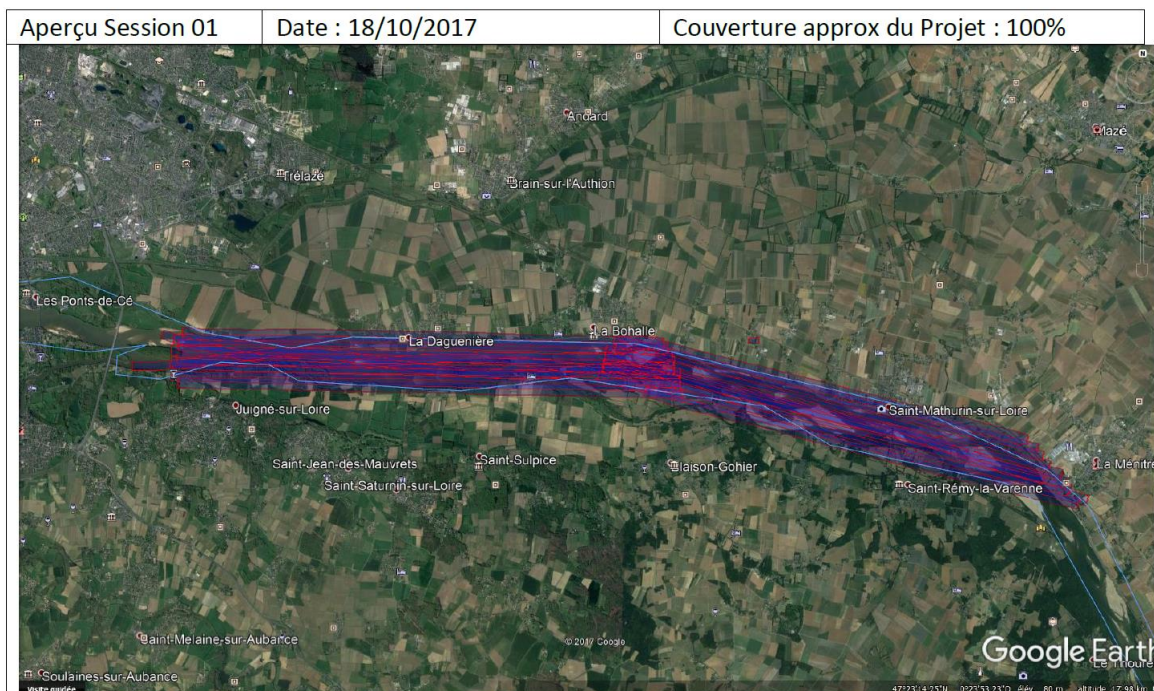


Figure 2: Cheminement de l'avion lors de l'acquisition des données topobathymétriques (source: rapport GEOFIT expert)

2. Premiers traitements des données brutes

2.1. Correction des données

L'eau ayant un effet sur les rayons lumineux (réfraction), les données de positionnement à la fois en planimétrie et altimétrie sont faussées. Il a donc été mis en place une correction des données, bathymétriques uniquement, sur la base des fichiers de trajectoire SBET et des données de surface d'eau acquises par la longueur d'onde 1064 nm (Feldmann et Lague, 2018).

2.2. Interpolation des MNT

Utilisation de l'interpolation de Poisson via l'utilisation de l'outil *Poisson reconstruction* du logiciel CloudCompare (Feldmann et Lague, 2018).

2.3. Classification

Le jeu de données brutes est classé en plusieurs catégories pour un meilleur traitement. Les catégories de classification sont les suivantes : Non classé, sol, végétation, bâtiment, bathymétrie, surface d'eau et interpolé. La table de codes utilisée pour cette classification est basé sur la convention ASPRS.

3. Suppression de l'effet de pente des MNT (Débasculément)

3.1. Concept

Les tronçons de rivière présentent une variation latérale de la surface topographique mais également longitudinal (pente). Dans le cas d'une étude sur les formes sédimentaires et de la présente tentative de classification de ces dernières, il convient de mettre en place une méthode qui soit capable de traiter de grands jeux de données tel ceux acquis par LiDAR. Or, l'effet de pente existant et notable sur des tronçons de plusieurs kilomètres de long engendre une sous-estimation des altitudes des formes sédimentaires selon un gradient amont aval (Steinmann, 2016). Ainsi, des barres sédimentaires, situé en aval du tronçon, de même altitude relative qu'une barre sédimentaire situé à l'amont, se verront être distinguées les unes des autres malgré leur similarité. Il est alors nécessaire de supprimer du jeu de données LiDAR cet effet de pente. Ce débasculément de MNT s'effectue en soustrayant la pente générale du tronçon à la topographie du site (Steinmann, 2016). Le résultat de cette opération permet d'obtenir un MNT à altitudes relatives.

3.2. Données d'hydrologie (sonde DIVER)

Les données d'hydrologie ont été acquises par des sondes DIVER. Ces sondes utilisent le principe de pression et définissent une hauteur d'eau selon une courbe de tarage. Elles ont été positionnées en rive droite de la Loire et leur emprise est d'environ 6 km (figure 3). Elles ont enregistré des données toutes les 25 minutes. Les données qui ont été utilisées pour déterminer les pentes de lignes ont été enregistrées sur la période du 23/09/2016 au 29/06/2017. Cette période inclue l'ensemble des événements hydrologiques pouvant survenir en Loire (crues et étiages). Les courbes de tarages ont permis, ensuite, de calculer la pente de la ligne d'eau pour différents débits. Ces pentes ont ensuite été utilisées pour représenter la pente générale du fond du lit. Cette méthode assume qu'en période de basses-eaux la pente de la ligne d'eau ne diffère pas de la pente du fond du lit. Ces données de pente ont permis de créer le MNT de la pente générale. Il est nécessaire d'utiliser des données externes au MNT afin de pouvoir éviter d'intégrer un biais dans les futurs calculs.

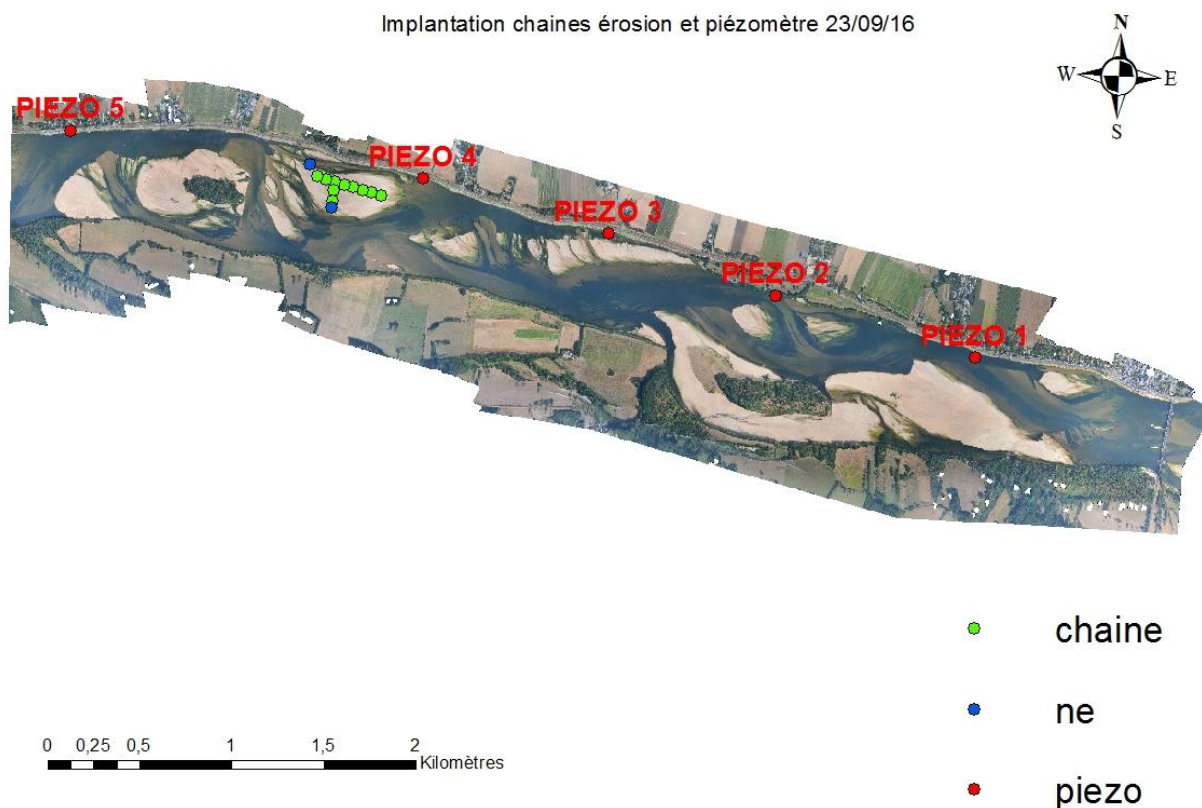


Figure 3: Positionnement des sondes DIVER (source: Jules Leguern)

Dans le cadre de notre étude, les sondes DIVER ne sont pas positionnées sur l'ensemble du tronçon levé par topobathymétrie. Deux solutions ont donc été évoquées 1) récupérer les données de hauteur d'eau situées à l'extrémité du tronçon d'étude (Pont Dumnacus) à l'aide de la Banque Hydro, 2) extrapoler les pentes de lignes d'eau à partir des données déjà disponibles. Il a été retenu la deuxième solution car les données disponibles au Pont Dumnacus étaient bien antérieures à celles obtenues par les sondes DIVER. Il aurait alors été nécessaire d'extraire les données selon des débits correspondant à ceux acquis par les sondes DIVER. Cette méthodologie paraissant être trop longue à mettre en place, la deuxième méthode a été retenue. Les hauteurs d'eau ont donc été extrapolées linéairement sur un transect correspondant à la

droite de régression des points des sondes DIVER. Ce transect s'étire hors des limites du MNT topobathymétrique et des points sont créés régulièrement le long.

3.3.Création du MNT pente

Le MNT pente a été créé de tel sorte que son emprise totale inclue la totalité du levé topobathymétrique tant en longueur qu'en largeur. Il a donc été créé une construction géométrique incluant des droites toutes perpendiculaires entre elles dont les intersections correspondent à un point d'altitude calculée grâce à la pente de la ligne d'eau. Le résultat donne un nuage de points plus ou moins régulièrement distribués sur la surface du MNT (figure 4).

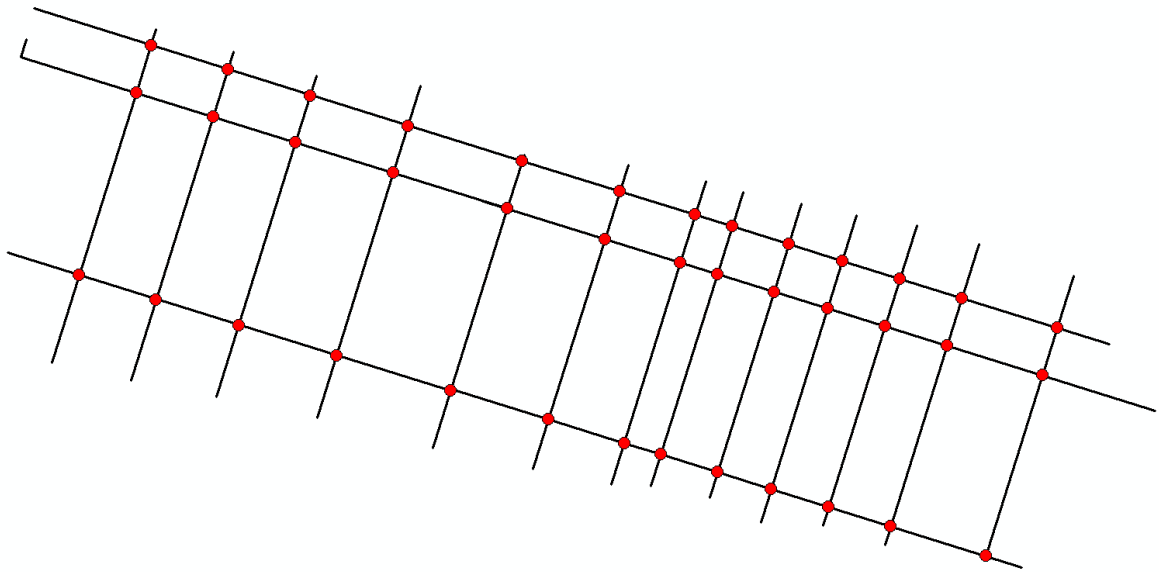


Figure 4: Construction du semis de points pour le MNT de pente

Les données sont ensuite interpolées en utilisant l'interpolation *topo to raster* du logiciel ArcMAP. Cette interpolation se base sur le principe de *Inverse Distance Weighting* (IDW). Cette méthode d'interpolation permet d'utiliser les points adjacents au point à interpoler mais tout en les pondérant selon leur distance à ce dernier. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que des points très éloignés de la zone à interpoler n'auront qu'une influence minime sur le résultat final.

3.4.Carte des altitudes relatives

La dernière étape au débasculé du MNT consiste en une soustraction du MNT pente au MNT LiDAR. L'outil *Raster calculator* du logiciel ArcMAP a été utilisé pour cette opération. Le résultat de cette opération est une carte dont l'effet de pente a été retiré et dont les altitudes sont relatives.

4. Caractérisation de la morphodynamique

4.1. Caractérisation de la rugosité du lit

La caractérisation de la rugosité du lit a nécessité l'utilisation des MNT LiDAR brut sans débasculement. Pour ce faire, le MNT brut a été moyenné selon une fenêtre mobile de 25 pixels par 25 pixels (625 m²). Le résultat de cette étape consiste en un MNT dont les altitudes sont lissées. Ensuite, le MNT moyen est soustrait au MNT brut et permet d'obtenir la topographie résiduelle. Enfin, un écart-type est calculé sur l'ensemble de la surface d'étude en utilisant une fenêtre mobile de 5 pixels par 5 pixels. Le résultat donne une carte de l'indice de rugosité (figure 5). Initialement cette méthodologie a été utilisée dans le cadre d'étude sur des plus petits cours d'eau et plus pentus afin de déterminer des zones de radiers et de mouilles. Dans le cas de notre site d'étude, ce dernier étant à la fois très large, long et très peu pentu, il permet toutefois de mettre en évidence des zones où la résistance à l'écoulement est majorée tel que les îles végétalisées et les barres sédimentaires.

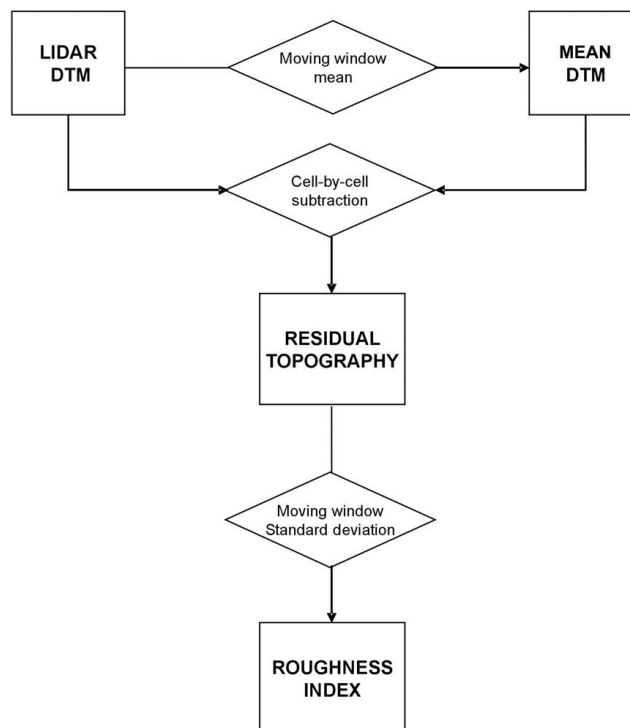


Figure 5: Schéma conceptuel de la construction de la carte d'indice de rugosité (source : Cavalli et al. 2008)

4.2. Calcul des pentes

Les pentes ont été déterminées à l'aide de l'outil *slope* du logiciel ArcMAP.

4.3. Evolution du lit de la Loire entre 2017 et 2019

Afin d'évaluer l'évolution du lit de la Loire, une soustraction entre le MNT de 2019 et le MNT de 2017 a été effectuée. Le calcul permet de mettre en évidence les zones où des processus morphogènes ont eu lieu (érosion, dépôt, stable). Les zones où le résultat de la soustraction est négatif signifie que le processus mis en cause est l'érosion et lorsqu'il s'agit d'un résultat positif c'est le dépôt qui a été majoritaire au cours du laps de temps entre les deux campagne LiDAR.

Enfin, les secteurs où il n'a été observé que très peu de variations (0~0,25 m) ont été considéré comme stable.

5. Classification des barres sédimentaires

La classification des barres sédimentaires étant un des objectifs de ce projet. Il a été émis, comme première méthode de classification des macroformes sédimentaires, d'utiliser leur hauteur maximale. Pour cela, les barres sont identifiées visuellement sur le MNT débasculé et un point est positionné sur le point haut de l'unité. Enfin, pour extraire l'altitude du pixel sous-jacent au point, l'outil extraction de valeurs vers des points du logiciel ArcMAP est utilisé. Les données acquises sont ensuite représentées en un nuage de points. Il est également possible d'appliquer à ce nuage de points une symbologie selon différents critères tel que la position par rapport au chenal (centre, latéral), la présence d'île ou non ou encore la forme de la barre sédimentaire (profil en long). Ces paramètres n'ont pas été appliqués.

Résultats

1. Suppression de l'effet de pente

1.1. Détermination de la pente de ligne d'eau

Les calculs basés sur l'enregistrement des hauteurs des sondes DIVER ont permis de déterminer que la pente de la ligne d'eau pour des débits encadrant les périodes d'étiages et de crues ne diffère pas et est de 0,0002 m/m (figure 6). Dans le cadre des débasculements effectués par Steinman (2016) et Alber et Piegay (2011), ces derniers préconisaient de ne pas utiliser les pentes de ligne d'eau lorsque la rivière est en crue car lors de ces évènements hydrologiques la pente de la ligne d'eau diffère significativement de la pente du fond du lit. Or, dans le cas de ce tronçon de Loire la pente générale du site d'étude est tellement faible que la pente de la ligne d'eau reste très proche de celle-ci. Les pentes étant toutes similaires la valeur de 0,0002 m.m⁻¹ a été retenue.

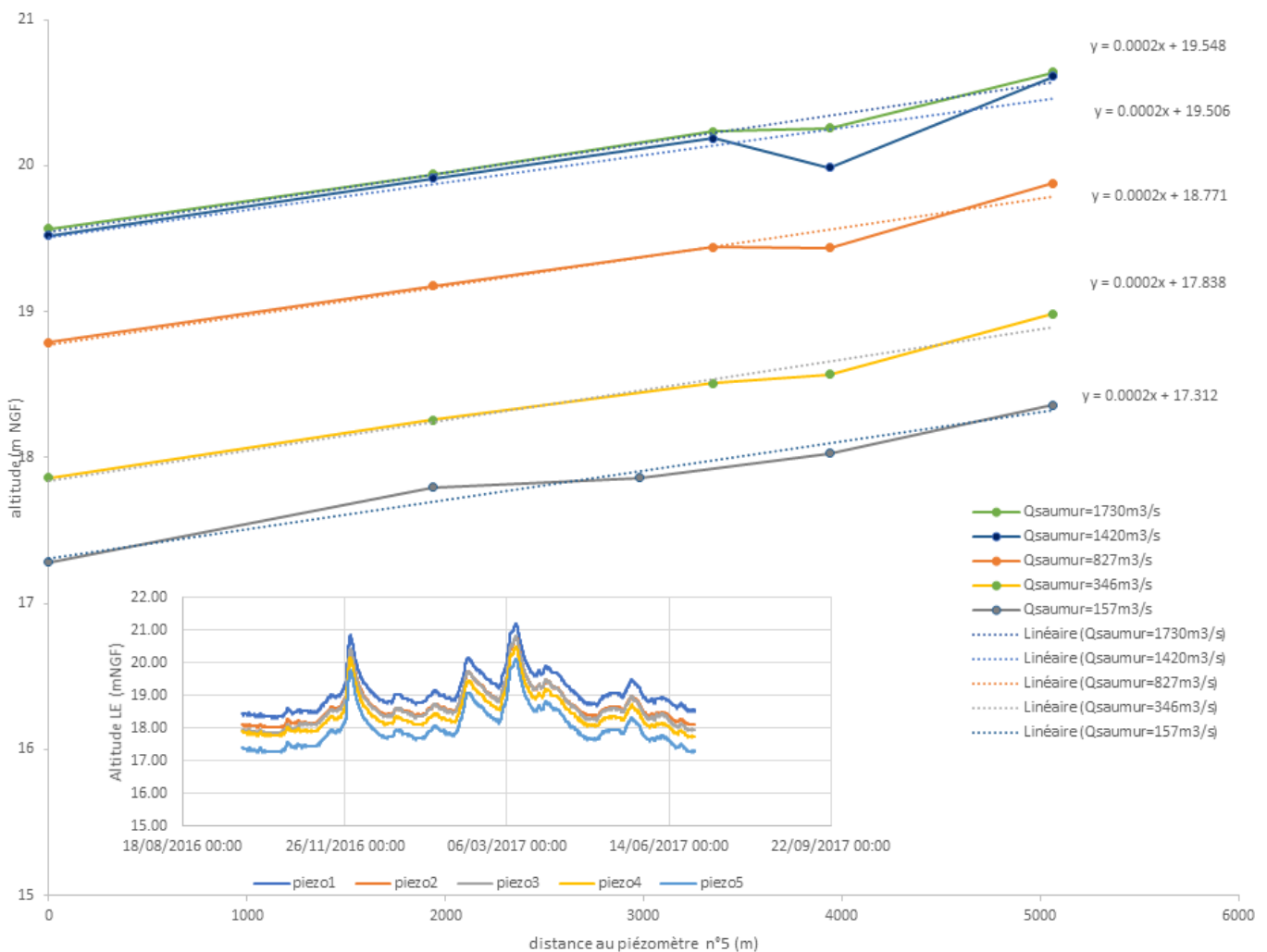


Figure 6: Pentas de la ligne d'eau pour différents débits (source : Jules Leguern)

1.2. Etablissement du MNT correcteur de pente.

L'établissement du MNT de pente a nécessité de créer un maillage de points auxquels ont été attribuées des valeurs d'altitudes (figure 7). L'ensemble du MNT couvre la totalité des MNT LiDAR 2017 et 2019. La pente est régulière sur la quasi-totalité du MNT hormis dans une zone restreinte la plus aval où il semble y avoir des erreurs de calculs de la part du logiciel car les altitudes diminuent puis réaugmentent. D'autre part, il est également possible d'observer qu'il y a des fluctuations brusques mais très localisées des altitudes. Ceci peut être le résultat d'erreurs de calcul de la part du logiciel ou d'un positionnement trop imprécis des points altitudinaux ayant servis à l'interpolation de ce MNT. Il est également possible que l'interpolation utilisée pour le calcul de ce MNT ne corresponde pas aux données d'entrée

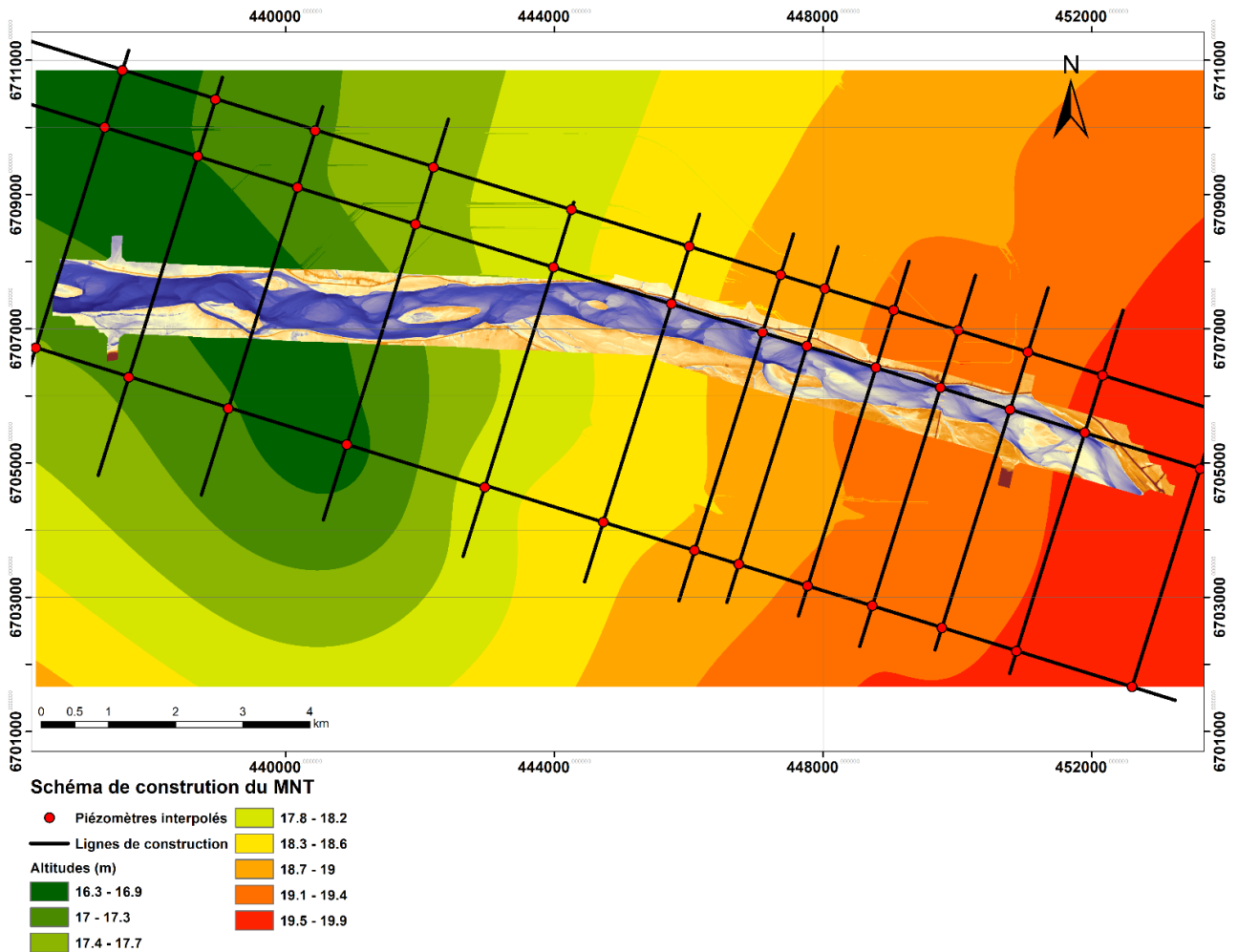


Figure 7: MNT de la pente générale du cours d'eau et son schéma de construction

1.3. MNT de 2017 et 2019 débasculés

Le débasculement des MNT semble avoir fonctionné correctement. En effet, il est possible d'observer sur les MNT bruts un gradient d'intensité des couleurs d'amont vers l'aval où les couleurs rouges semblent s'atténuer avec la distance vers l'aval et les couleurs bleues s'intensifient dans le même sens (figure 8). L'effet de pente est responsable de ces variations. Or, après le débasculement ces variations graduelles orientées ne sont plus visibles. Il est notamment possible d'observer ce phénomène sur la route longeant la Loire au Nord où en observant le lit mineur de la Loire où la couleur bleue est relativement homogène d'Est en

Ouest. En l'état actuel de la carte, après débasculement, il devient également possible de discerner des barres sédimentaires d'altitudes similaires.

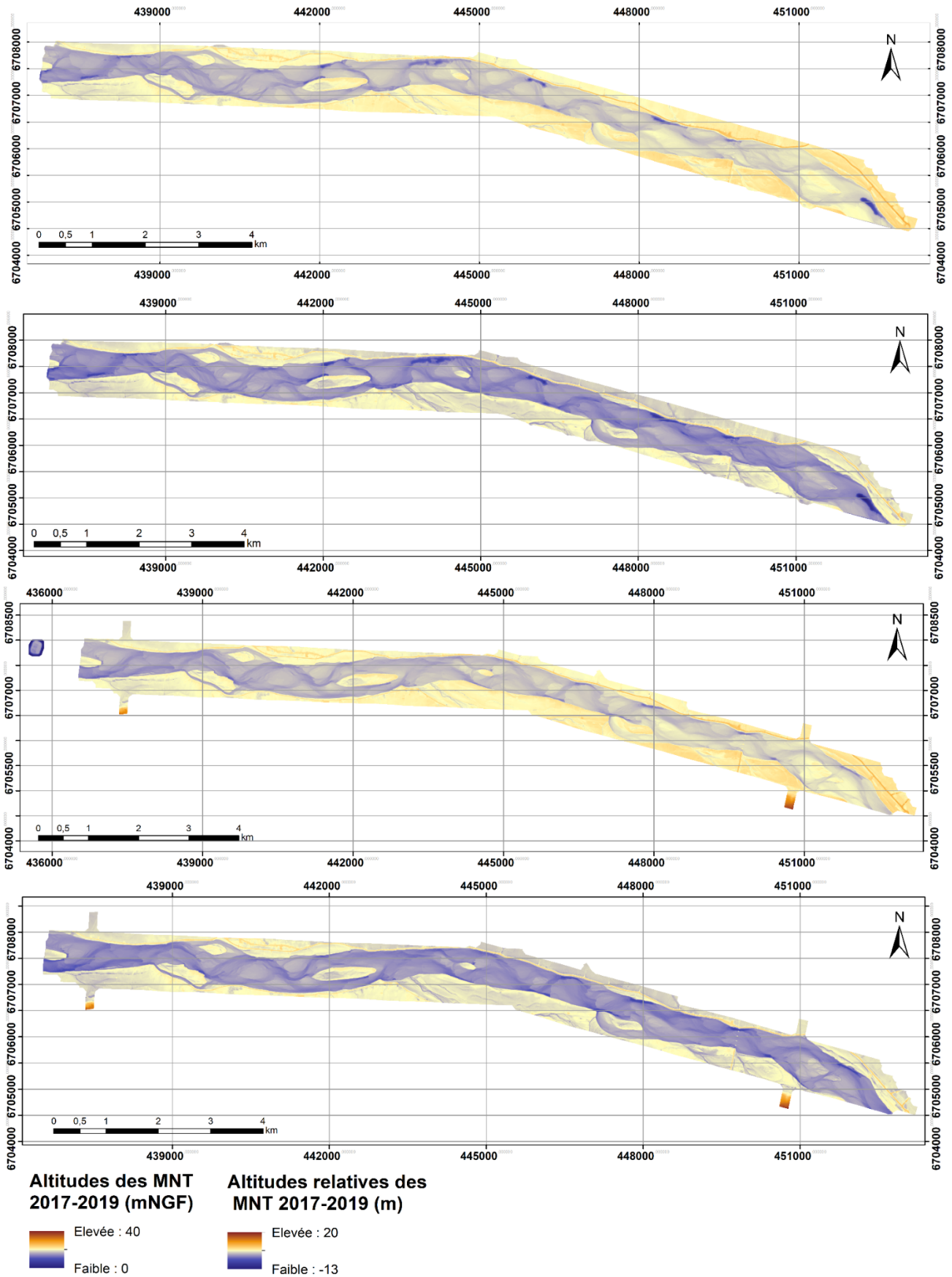


Figure 8: MNT avant et après débasculement

2. Morphodynamique su tronçon de Loire à Saint-Mathurin-sur-Loire

2.1.Pentes du tronçon

Outre les pentes importantes situées aux abords directs des unités morphologiques tels que les îles ou les berges de la rivière, il est possible de distinguer, grâce à la résolution des MNT, des zones de fortes pentes sur les fronts de barres sédimentaires (figure 9). Il également possible d'observer une organisation alterne des barres sédimentaires au sein du chenal en considérant les lignes de fortes pentes dessinées sur les fronts de barres. Les pentes au lieu des fronts de barres peuvent, pour certaines, atteindre des pourcentage important ($> 200 \%$).

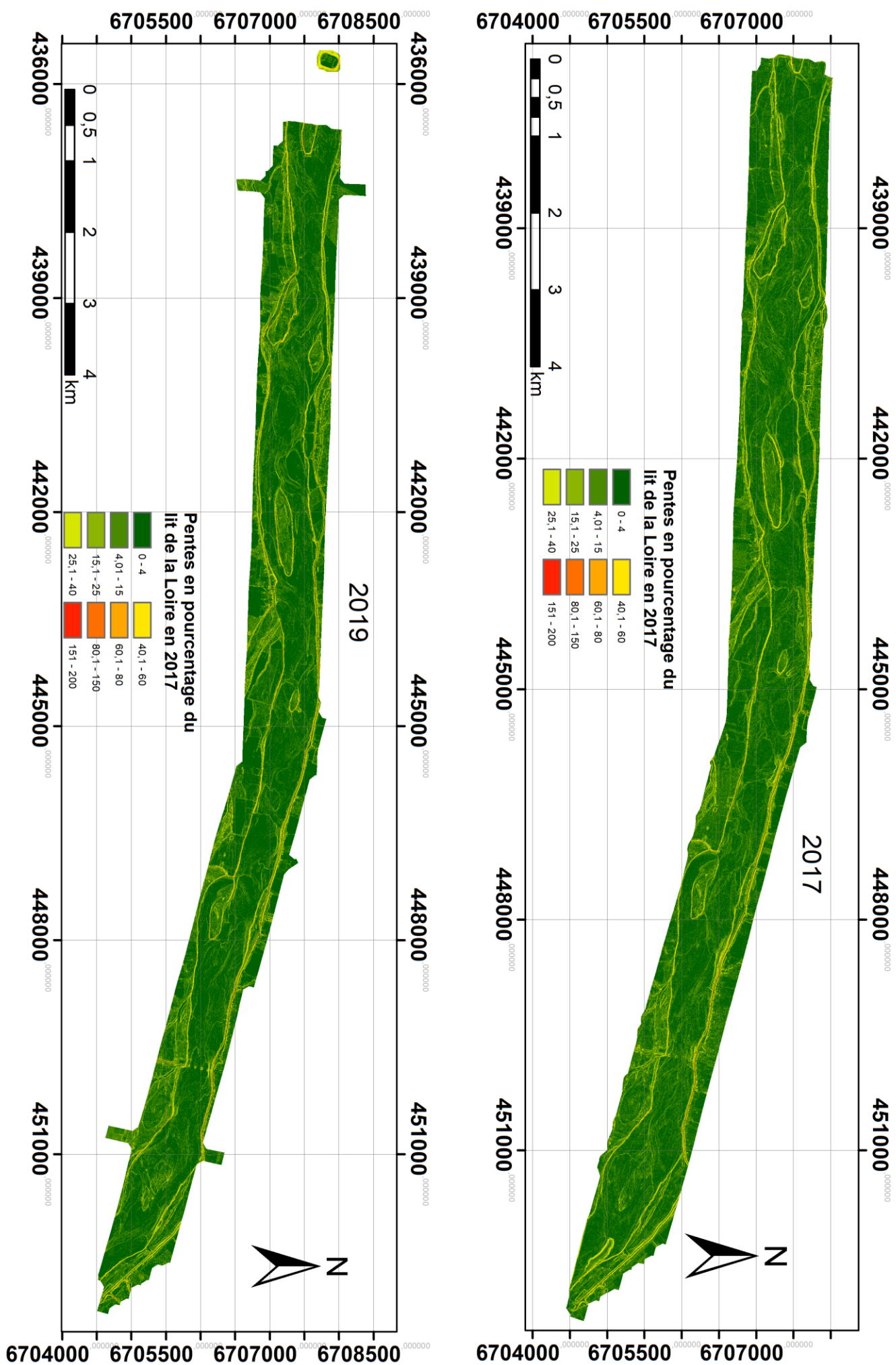


Figure 9: Carte des pentes du tronçon de Loire étudié

2.2. Indice de rugosité

Le calcul de l'indice de rugosité permet également de discerner des secteurs où la variation de l'indice de rugosité est importante et localisé sur les fronts des barres sédimentaires. Ce résultat paraît cohérent car la méthodologie employée pour la détermination de l'indice de rugosité repose sur la variation de la topographie, les zones de fronts de barres présentent une forte variation des altitudes sur un secteur très localisé (Annexe 1 et 2). D'autre part, le calcul de l'altitude résiduelle a également permis de bien mettre en évidence les formes sédimentaires et les chenaux secondaires car cette opération permet de ne conserver que les variations topographiques.

2.3. Evolution du lit de la Loire entre 2017 et 2019

Le calcul de la différence altimétrique entre le MNT de 2019 et le MNT de 2017 a permis d'élaborer une carte représentant les processus morphodynamiques mis en jeu au cours des deux années. Un résultat positif de l'opération indique que le processus majoritaire est le dépôt et un résultat négatif que le processus majoritaire est l'érosion. Entre 2017 et 2019, il ne semble pas y avoir de processus majoritaire au sein du chenal. Les zones de dépôt correspondent à l'ancienne position du chenal et les zones d'érosion à l'emplacement initial des barres sédimentaires. Il est à noter que des zones relativement stables, dont la variation altitudinale ne dépasse pas 0,25 m se situent dans la plaine alluviale de la Loire et à l'interface entre les zones d'érosions et de dépôt. De plus, cette carte montre que des secteurs, normalement stables dans le temps, présentent un abaissement de leur cote topographique (cf. plaine alluviale). Ce résultat paraît discutable car il était attendu de ces secteurs, qu'ils restent à la même altitude. Cependant, la figure 10 montre bien le morphodynamisme de ce secteur de Loire.

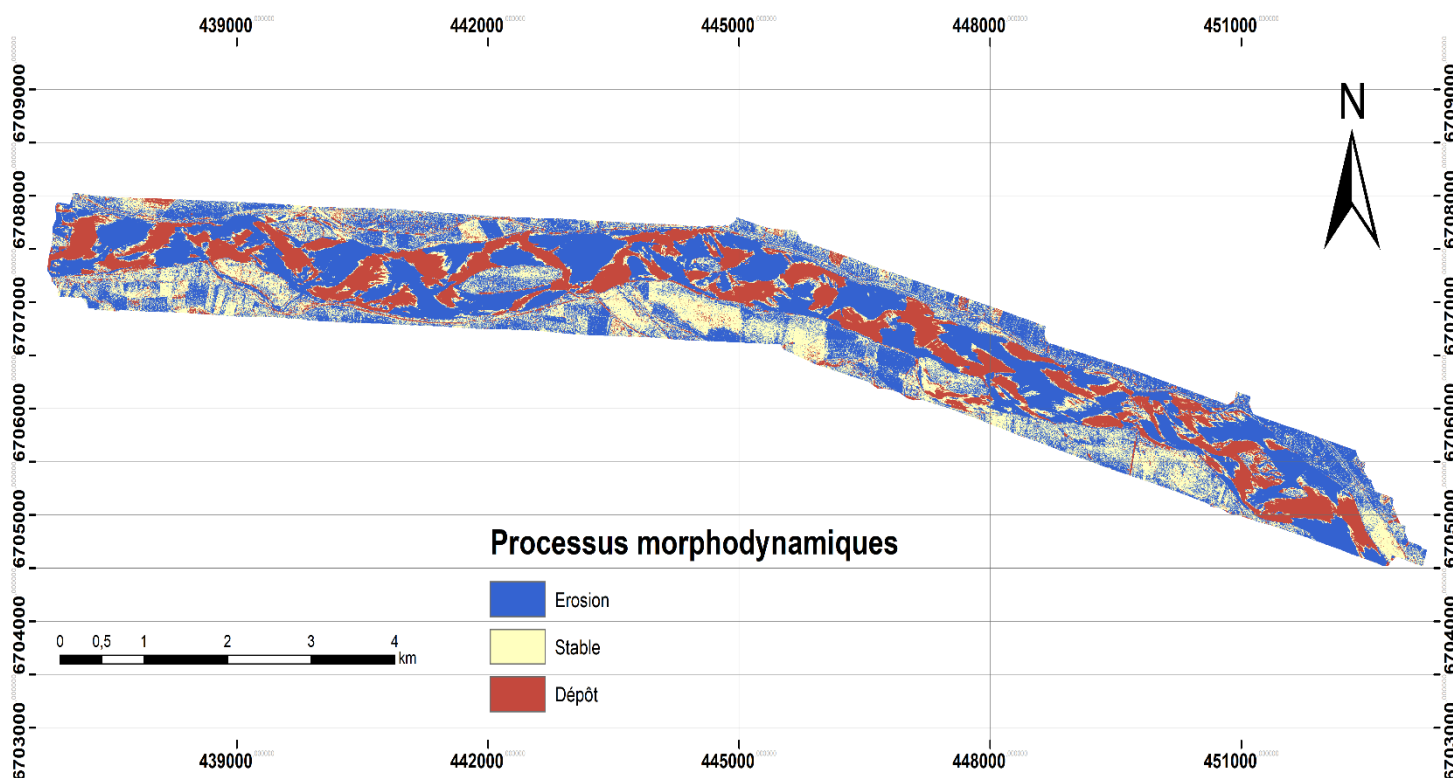


Figure 10: Carte des processus morphodynamiques en jeu sur le tronçon d'étude

1. Les données LiDAR

1.1. Etendue des données LiDAR et influence sur le traitement des données

Il s'est avéré au cours de ce travail sur la caractérisation de la morphodynamique du lit et de l'étude des macroformes sédimentaires, que la taille du jeu de données ainsi que ses caractéristiques intrinsèques, notamment la résolution, pouvait être une limite à la représentation graphique des données. Il a donc été mené au cours de ce travail une recherche significative concernant le moyen de représenter au mieux les objets topographiques afin de rendre un résultat lisible et représentatif. Par exemple, la mise en place de l'indice de rugosité à initialement été fait pour une résolution équivalente à celle du MNT, mais celle-ci était trop importante et, paradoxalement le résultat manquait de précision et de lisibilité. Il apparaît donc comme étant essentiel de déterminer une méthode ou un choix de représentation de ce genre de données pour que les résultats soient le plus lisible possible. Il serait intéressant d'effectuer un découpage du tronçon afin de réduire les portions d'études. Cela étant, un tel découpage nécessite une justification des choix des tronçons sur des bases morphologiques notamment.

1.2. Qualité des résultats

Les données acquises par les LiDAR en 2017 et en 2019 sur le tronçon de Saint-Mathurin-sur-Loire, présente une résolution importante appréciable pour les méthodologies qui ont été appliquées dans ce travail. Cependant, il s'est avéré que les données acquises en 2019 présentaient une étendue légèrement supérieure à l'emprise des données de 2017, et incluait une unité morphologique, pouvant être assimilé à une gravière, qui présentait des informations altitudinales aberrantes (valeurs négative de -10 m NGF).

D'autre part, au cours de l'utilisation de l'outil remblais déblais du logiciel ArcMAP, il a été impossible d'obtenir un résultat. La raison de ce phénomène est encore aujourd'hui inexplicée et demande un travail approfondi dans ce sens. Cela étant, il est possible que la présence de données erronées ait pu engendrer l'impossibilité des calculs.

2. Le débasculement des MNT 2017 et 2019

Le débasculement des MNT permet en tout premier lieu d'observer la morphologie d'un tronçon et de ses éléments géomorphologiques sans l'influence de la pente sur les altitudes relatives des unités sédimentaires. Dans le cadre de ce travail le débasculement a pu être effectué sans problème particulier. Cependant, les résultats obtenus restent discutables. En effet, le MNT de pente servant à la correction du MNT LiDAR présente des variations incohérentes qui peuvent altérer la qualité du débasculement. Plusieurs raisons à ces imprécisions ont été identifiées. La première peut provenir de l'interpolation de la ligne d'eau sur l'ensemble du tronçon. En effet, l'emprise des sondes DIVER couvrait une moitié seulement du site total. Il a donc été nécessaire d'étendre cette pente de ligne d'eau en extrapolant à partir des données disponibles. Enfin, concernant les pentes de ligne d'eau utilisées pour le débasculement des deux MNT, les données d'altitudes étaient celles enregistrées entre 2016 et 2017. Ainsi, leur utilisation est pertinente pour le débasculement de 2017 mais il est discutable d'avoir utilisé les mêmes données pour le débasculement de 2019.

De plus, le MNT de pente construit selon la méthode de Steinman (2016) ne prend pas en compte les variations latérales de la rivière. Or, Alber et Piegay (2011), dans leur construction du modèle de débasculement, établissent le MNT de pente en intégrant les changements de direction du cours d'eau. Cette technique permettrait d'obtenir des altitudes relatives plus précises. Dans le cas du tronçon de Loire étudié, malgré une organisation morphologique assez simple (chenal

rectiligne) un angle est formé à la moitié du tronçon et ce dernier nécessiterait d'être pris en compte pour de plus amples investigations.

3. Détermination des paramètres de morphodynamiques

Au cours de ce projet deux protocoles, parmi ceux recensés au cours du travail de bibliographie, pour déterminer des paramètres de morphodynamiques ont été appliqués. Il a été essayé d'établir des zones d'écoulements préférentiels en utilisant les outils du logiciel ArcMAP, cependant, les résultats obtenus n'étaient pas ceux attendus. En effet, les réseaux hydrographiques obtenus présentaient une certaine incohérence dans leur tracé, des chenaux débutait et se stoppait sans raison apparente. La raison de cet échec réside certainement dans le fait que le tronçon d'étude présente une très faible pente ($<0.0002 \text{ m.m}^{-1}$) et cela pourrait engendrer des erreurs dans les calculs du logiciel. La deuxième méthodologie appliquée visait à déterminer les zones où la rugosité et donc la résistance à l'écoulement était plus importante. Initialement, Cavalli et al. (2008) ont appliqué ce protocole afin de déterminer l'organisation longitudinal d'un cours d'eau montagnard. Ces cours d'eau présentent des successions généralement marquées entre faciès lotiques et faciès lentiques (radier/mouille), leurs résultats pour un tronçon d'étude relativement court montrent une nette distinction entre les deux morphologies. L'application de ce protocole dans le cas de notre étude a donné des résultats moins distincts. Une explication possible peut être liée au choix de la résolution appliquée lors des calculs des statistiques focales par rapport à la taille du secteur à étudié. En effet, plusieurs tailles de fenêtre mobile ont été essayées et il apparaît que plus les statistiques focales sont faites à petite échelle, plus les résultats seront précis mais paradoxalement moins lisibles. Ainsi, il apparaît, bien qu'applicable dans notre cas, que ce protocole nécessite un travail approfondi sur comment l'appliquer dans un cadre significativement différent de l'initial afin d'obtenir des informations pertinentes.

4. Classification des macroformes sédimentaires

4.1. Détermination des unités sédimentaires

La classification des barres sédimentaires nécessite dans un premier temps de reconnaître l'unité et de réussir à déterminer son étendue dans le système. Or, ces formes, sont pour la plupart, dans ce tronçon, des barres libres, c'est-à-dire qu'elle se déplacent au cours du temps. De plus, ces unités géomorphologiques sont modifiées au cours de chaque épisode hydrologiquement favorable au transport sédimentaire. Elles peuvent ainsi être engraisser au cours d'une crue puis découper lors de la décrue en plusieurs sous-unités. Ainsi, sur une même unité il est possible de retrouver des chenaux secondaires, eux même hiérarchisé en plusieurs sous-catégories. Ces chenaux peuvent également sembler délimiter des barres sédimentaires de taille plus modérée. Ainsi, l'identification précise d'une unité sédimentaire est apparue comme étant une étape essentielle avant la mise en place d'une classification fonctionnelle. Pour des raisons de temps, cette étape poussée d'identification n'a pas été menée. Les barres ont été identifiées et délimitées visuellement en observant l'aspect général de la structure et les déplacements entre 2017 et 2019. Cette méthode est donc fortement sujette au biais d'observateur et il est possible que le nombre de barre ait été sous-estimé.

4.2. Méthodologie de classification des macroformes sédimentaires.

Bridges (2009) recense dans son ouvrage différents essais de classification des barres sédimentaires. L'ensemble de ces classifications se sont révélés inefficaces de part la difficulté à les appliquer à un système extrêmement dynamique. Dans le cas de l'étude aucune classification n'a été réellement initié par faute de temps. Cela étant, l'idée principale était d'établir une méthodologie de classification applicable pour toute rivières présentant des caractéristiques

sédimentaires et morphologique similaire. Une première approche par l'altitude du point haut des barres sédimentaires a montré qu'il n'y avait pas de distinction apparente. Une classification sur l'altitude des barres ne semble pas être suffisante. Afin de compléter cette classification il conviendrait d'ajouter des paramètres pour discrétiser les macroformes. Une observation des altitudes par rapport au caractère immergé ou émergé ne semble pas non plus être suffisant car les niveaux d'eau varient continuellement donc la classification potentielle peut également varier. Les caractères altitude et émergé/immergé ne sont donc pas non plus suffisant pour établir une classification performante. Il pourrait être intéressant d'utiliser d'autres paramètres tel que la position de la barre par rapport au chenal, son dynamisme (forcée ou libre) ou sa forme générale. L'utilisation croisée de ces différents paramètres pourrait conduire à une méthodologie effective. Une autre solution pourrait être d'acquérir des données avec une haute résolution temporelle et observer le dynamisme de l'objet d'étude. Il est possible que les barres sédimentaires montrent des schémas de dynamisme relativement similaires entre elles. Cependant, la mise en place de tels protocoles remet en question la faisabilité et la facilité de l'application de la méthode.

Conclusion et Perspectives

Le travail effectué dans le cadre du projet de fin d'étude avait pour objectif principal de répondre à la question : Quelles sont les potentialités du LiDAR topobathymétrique en termes de caractérisation de la morphodynamique d'un grand fleuve de plaine ? Ce travail fait suite au travail d'état de l'art mené l'année précédente dont la finalité était d'identifier les lacunes concernant l'utilisation du LiDAR topobathymétrique et de trouver dans la littérature existante, des méthodologies de traitement.

Les quelques protocoles qui ont pu être appliqués sur le tronçon de Saint-Mathurin-sur-Loire ont bien fonctionné pour leur majorité. Cependant, il est apparu que pour certain protocole le site d'étude ne convenait pas et que pour d'autre malgré une apparente réussite de son application, les résultats obtenus n'étaient pas entièrement satisfaisants car manquaient de clarté dans leur représentation. D'autre part, une importante partie du travail consistait en l'établissement d'un MNT d'altitudes relatives dans le but de pouvoir travailler sur les formes sédimentaires du lit mineur du fleuve. Le résultat de cette partie est plutôt satisfaisant malgré des améliorations possibles dans l'application de la méthode. Il serait effectivement intéressant de trouver et de mettre en place un système de vérification de la qualité du débasculement afin d'attester de la réussite de ce dernier.

Enfin, le dernier travail portait sur une possible tentative de classification des macroformes sédimentaires du lit de la Loire aux droits du site. Cette étape principalement à cause d'une mauvaise gestion de temps, n'a pas pu être conduite jusqu'au bout. Cela étant, le travail de bibliographie conduit pour tenter d'apporter une réponse à cette problématique a permis de définir et de comprendre la complexité d'une telle classification. De plus, les quelques résultats obtenus ont permis de confirmer cette affirmation.

A ce jour, le travail fournit ne permet de répondre que partiellement à la question scientifique initialement posée. En effet, trop peu de protocole ont été adaptés et appliqués dans le cadre de ce travail pour pouvoir affirmer avec certitude que les potentialités du LiDAR sont multiples. Cependant, il paraît évident qu'un tel outil d'acquisition de la donnée permet d'obtenir des informations du milieu naturel en masse et de très grandes qualité. Il conviendrait alors de continuer ce travail de recherche et d'application sur le jeu de données afin de mieux appréhender les possibilités de cet outil.

Bibliographie

- Alber A., Piégay H.**, 2011. Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology* vol. 125, p. 343-360.
- Bluck B.J.**, 1979. Structure of coarse grained braided stream alluvium. *Earth and Environmental science transactions of the royal society of Edinburgh*, vol. 70, p. 181-221
- Bridge J.S.**, 2009. *Rivers and floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record* by John Bridge. John Wiley & Sons, 504 p.
- Brossé R.**, 1982. Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire. Thèse, Université d'Angers, Angers, 350 p.
- 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, p. 249-260
- Charlton M., Large A. R. G., Fuller I. C.**, 2003. Application of airborne LiDAR in River environments: The River Coquet, Northumberland, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, p 299-306.
- Feldmann B., Lague D.**, 2018. Rapport de traitements, Projet sur la Loire. Plateforme LiDAR topobathymétrique Nantes-Rennes, 7 p.
- Georges-Leroy M., Bock J., Dambrine E., Dupouey J.L., Etienne D.**, LiDAR helps to decipher land-use history in Lorraine, France. *Understanding Landscapes, from land discovery to their spatial organization*, 8 p.
- Gouraud E.**, 2017. Acquisition LiDAR Topo-Bathymétrique sur la Loire, Rapport de Post-Traitement. GEOFIT Expert, 8 p.
- Grivel S., Gautier E.**, 2012. Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19^e siècle à aujourd'hui. *Cybergeo: European Journal of Geography* [Online], Environment, Nature, Landscape, document 615.
- Höfle B., Vetter M., Pfeifer N., Mandlburger G., Stötter J.**, 2009. Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 34, p. 1635-1649.
- Latapie A.**, 2011. Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : exemple de la Loire moyenne. Thèse, Université François Rabelais de Tours, Tours, 277 p.
- Le Guern J., Rodrigues S., Juge P., Handfus T., Wintenberger C.**, 2018. R-TEMUS (Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques Morphologiques et d'Usages en basse Loire, Rapport Phase 1 (septembre 2016-septembre 2017). Université de Tours, 38 p.
- Macaire J.J., Bellemlih S., Cocirta C., De Luca P., Di-Giovanni C., Gay-Ovejero I.**, 2001. Quantification des flux et des stocks solides holocène dans le bassin de la Loire (France). *La Houille Blanche*, p. 35-38
- Moatar F., Dupont N.**, 2016. *La Loire fluviale et estuarienne, un milieu en évolution*. Edition Quae, 320 p.
- Pereira G. L. M., Wicherson R. J.**, 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 54, p 105-114.

Steinmann R., 2015. L'influence climatique et anthropique sur trois cours d'eau bourguignons : géoarchéologie de sites de franchissement sur la Loire, la Saône et le Doubs au cours de l'Holocène. Thèse, Université de Bourgogne, 423 p.

Tonina D., McKean J. A., Benjankar R. M., Wright C. W., Goode J. R., Chen Q., Reeder W. J., Carmichael R. A., Edmondson M. R., 2019. Mapping river bathymetries: evaluating topobathymetric LiDAR survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 44, p. 507-520.

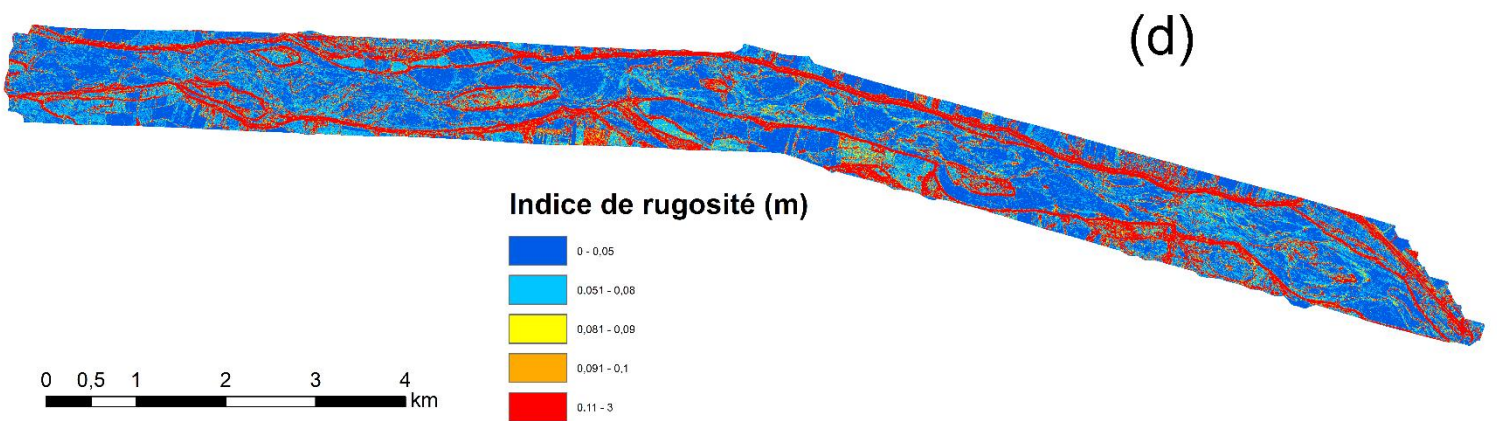
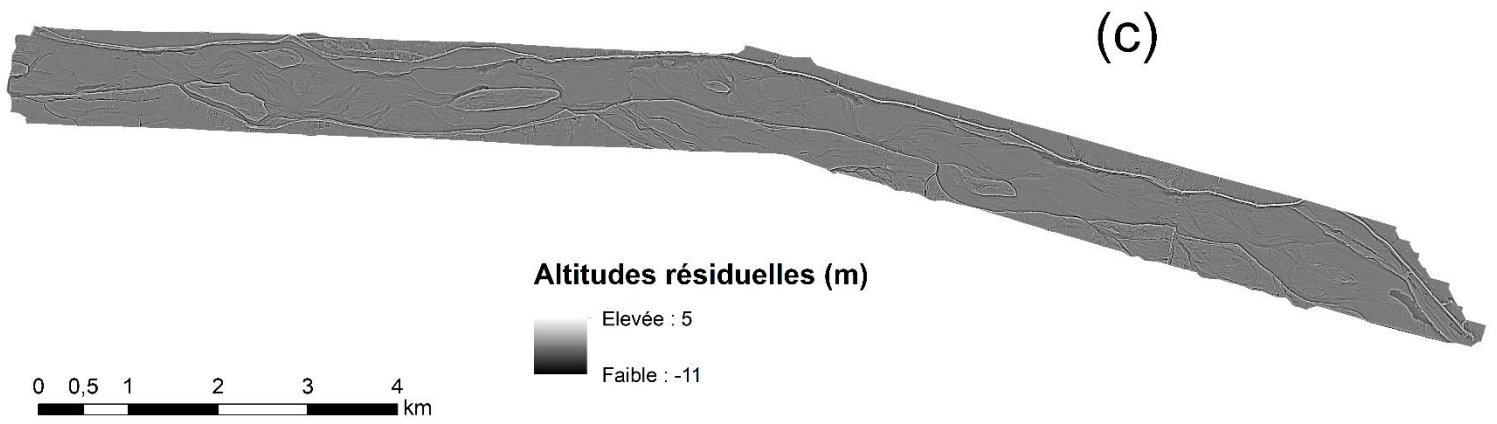
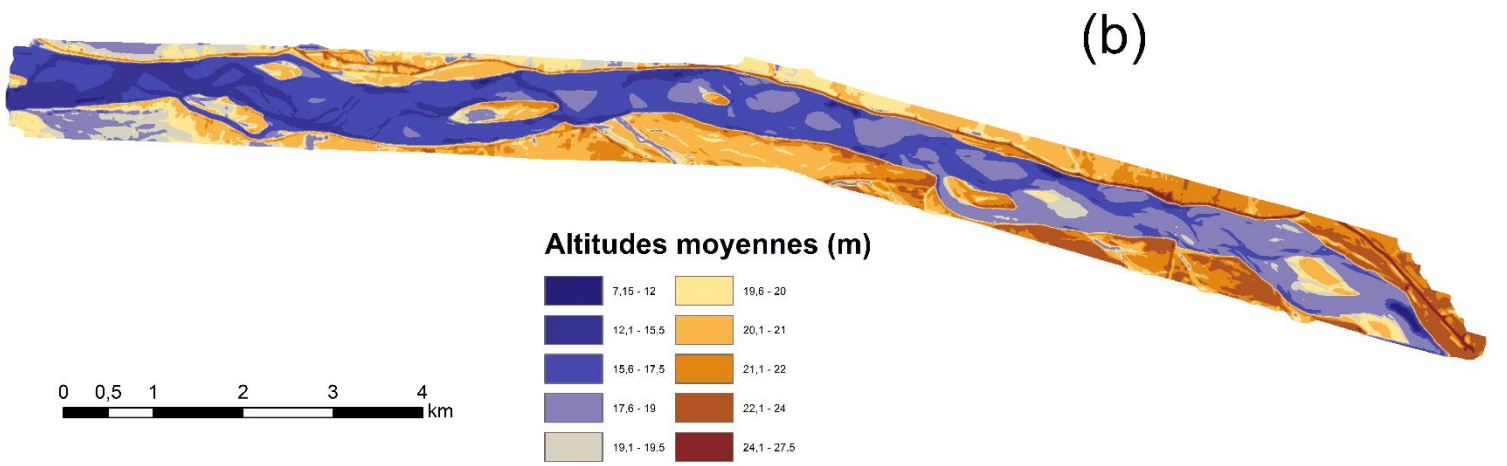
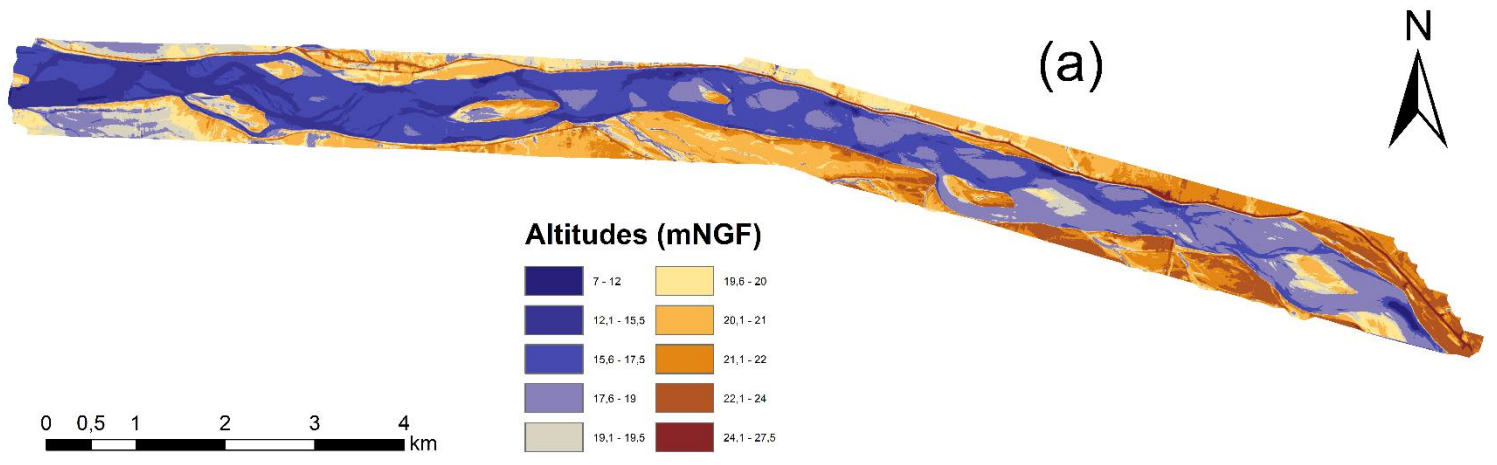
Wintenberger C., 2015. Dynamique fluviale et végétation pionnière à *Salicaceae* en rivière sablo graveleuse, Etude *in et ex situ* de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne. Thèse, Université François Rabelais de Tours, Tours, 355 p.

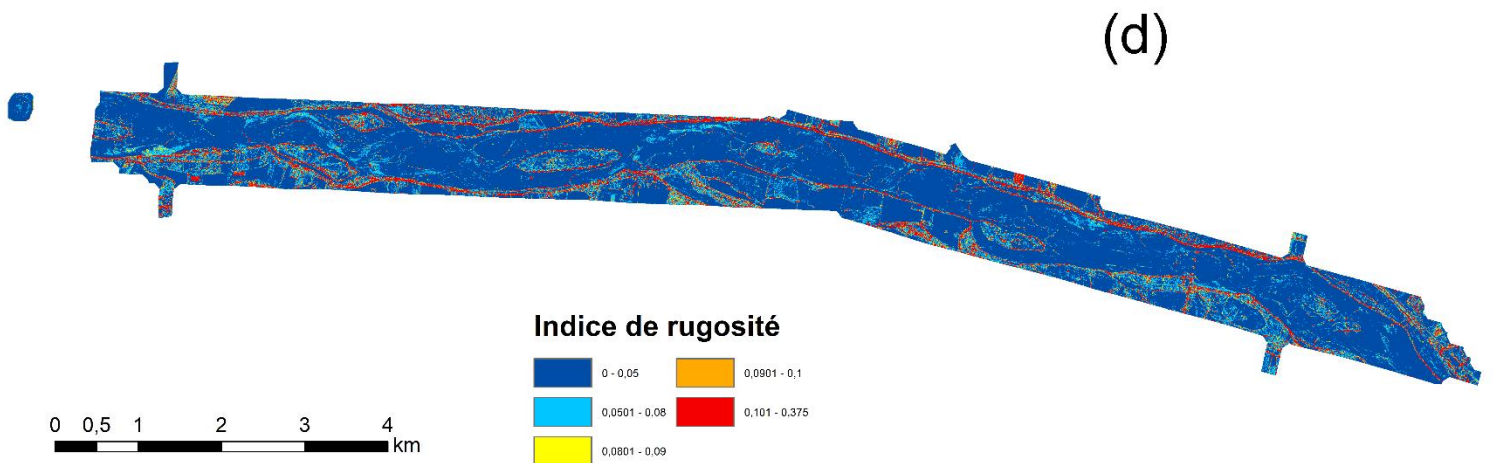
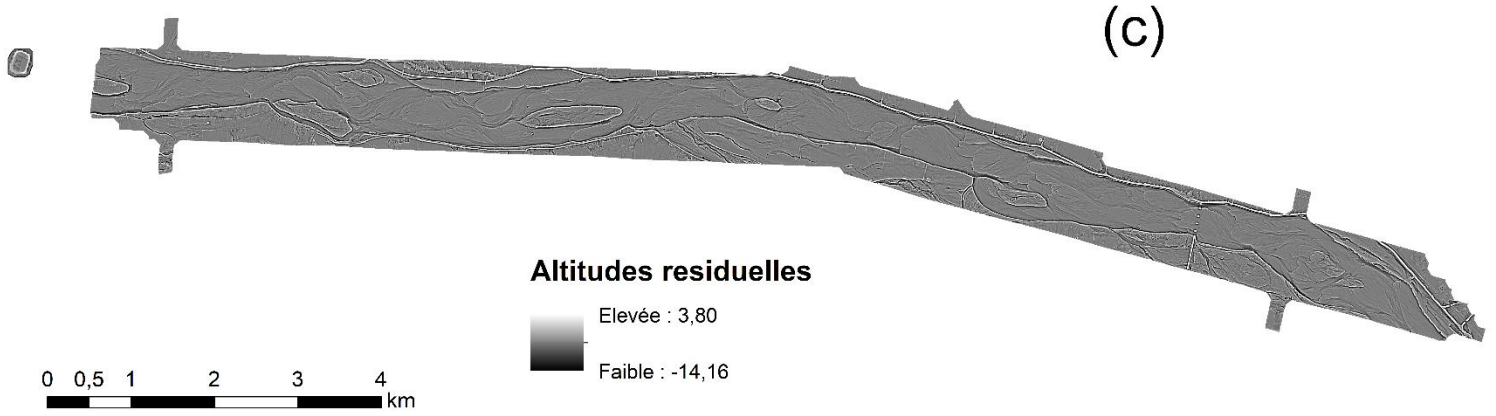
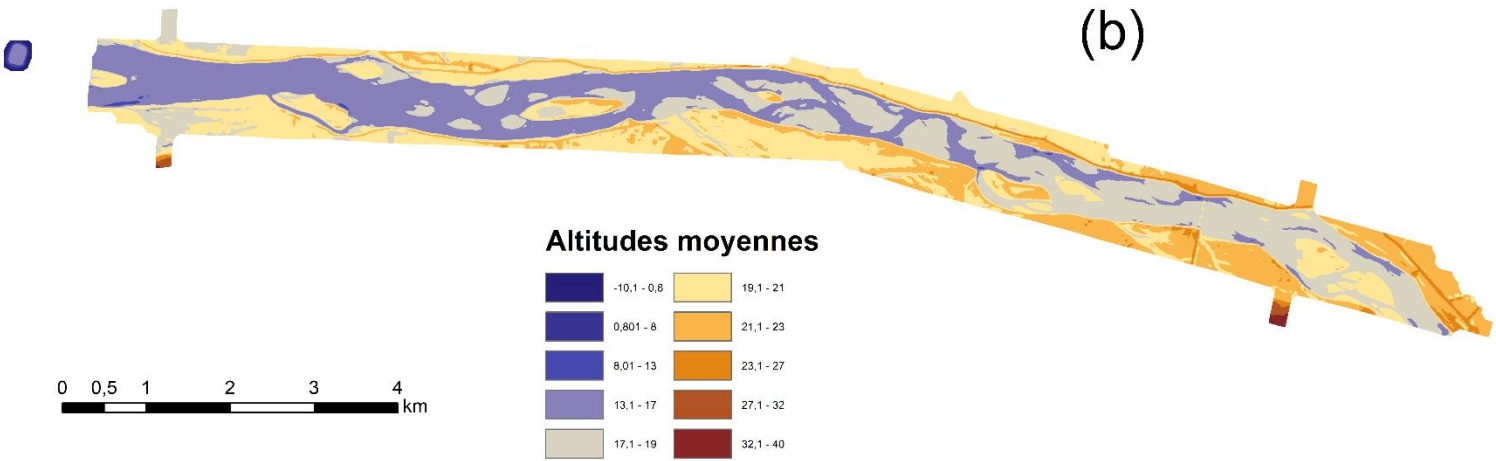
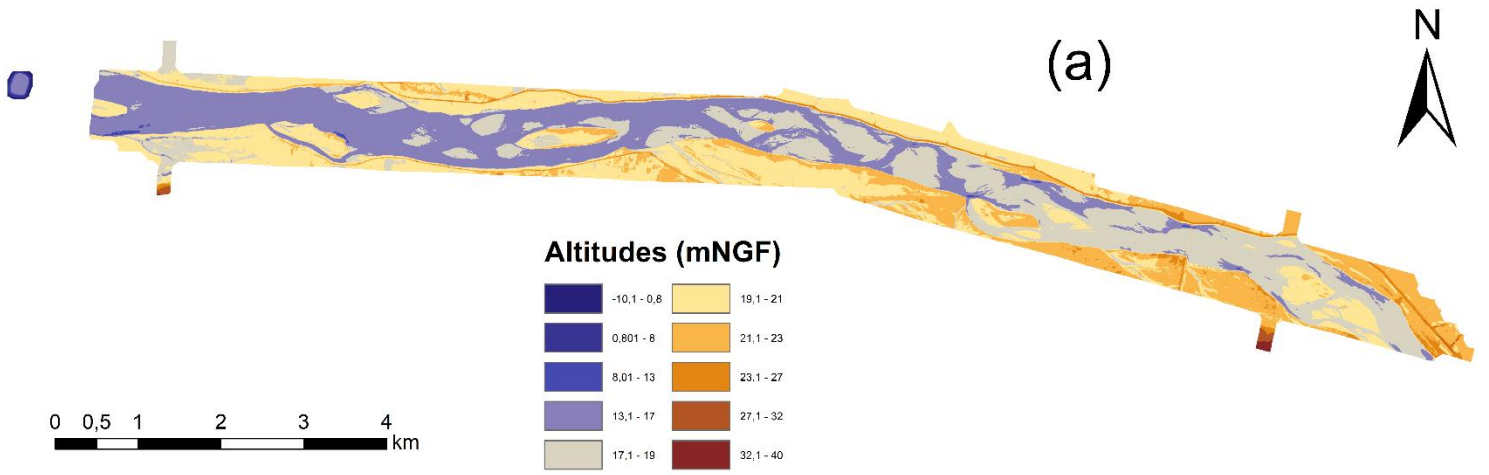
Tables des figures

Figure 1: Fonctionnement du LiDAR topographique et topobathymétrique (source :wikydro.developpement).....	12
Figure 2: Cheminement de l'avion lors de l'acquisition des données topobathymétriques (source: rapport GEOFIT expert).....	16
Figure 3: Positionnement des sondes DIVER (source: Jules Leguern)	18
Figure 4: Construction du semis de points pour le MNT de pente	19
Figure 5: Schéma conceptuel de la construction de la carte d'indice de rugosité (source : Cavalli et al. 2008).....	20
Figure 6: Pentes de la ligne d'eau pour différents débits (source : Jules Leguern)	22
Figure 7: MNT de la pente générale du cours d'eau et son schéma de construction.....	23
Figure 8: MNT avant et après débasculement.....	24
Figure 9: Carte des pentes du tronçon de Loire étudié.....	26
Figure 10: Carte des processus morphodynamiques en jeu sur le tronçon d'étude	27

Annexes

Annexe 1 : Carte des différentes étapes lors de la création de l'indice de rugosité. (a) MNT brut, (b) MNT moyenné, (c) Topographie résiduelle et (d) indice de rugosité.





Directeur de recherche :

Stéphane Rodrigues

Alex Andréault
PFE/DAE5
IMA
2019-2020

Traitements de données de LiDAR topobathymétriques acquises sur le fleuve Loire, premiers traitements et tentative de classification des macroformes sédimentaires

Résumé :

La Loire est un fleuve qui présente une diversité morphologique dont la genèse et l'évolution au cours du temps sont encore mal connues. Le projet R-TEMUS cherche à répondre à ces questions en étudiant les processus hydro-sédimentaires et les dynamiques écologiques en jeu en Loire moyenne et en basse-Loire. Plusieurs études ont donc été conduites dans le cadre de ce projet, parmi elles, l'étude de la morphodynamique est celle dans laquelle s'inscrit le présent écrit. Parallèlement à d'autres campagnes de levés topographiques classiques, des survols en avion équipé d'un LiDAR topobathymétrique ont été menés sur le site de Saint-Mathurin-sur-Loire durant les années 2017 et 2019. L'utilisation de ce genre d'appareil, permettant l'acquisition de données très précises et en masse, est à ce jour encore peu documenté et utilisé. Pour cela un travail de bibliographie et de mise en pratique des protocoles existants a été mis en place afin de déterminer différents paramètres de la morphodynamique du tronçon. Un des sous-objectifs de la manipulation des données était également d'essayer de trouver une manière de classer les macroformes sédimentaires. Les résultats obtenus pour le premier objectif ont permis de constater que la qualité des données brutes permettait d'obtenir des résultats relativement précis, voir trop dans certains cas, mais ce travail a également permis de constater que la notion d'échelle spatiale était importante pour le traitement des données. Enfin, les travaux de recherche de classification des barres sédimentaires n'ont malheureusement pas abouti notamment du fait de la complexité de l'objectif.

Mots Clés : LiDAR, morphodynamique, barres sédimentaires, débasculement, topobathymétrie