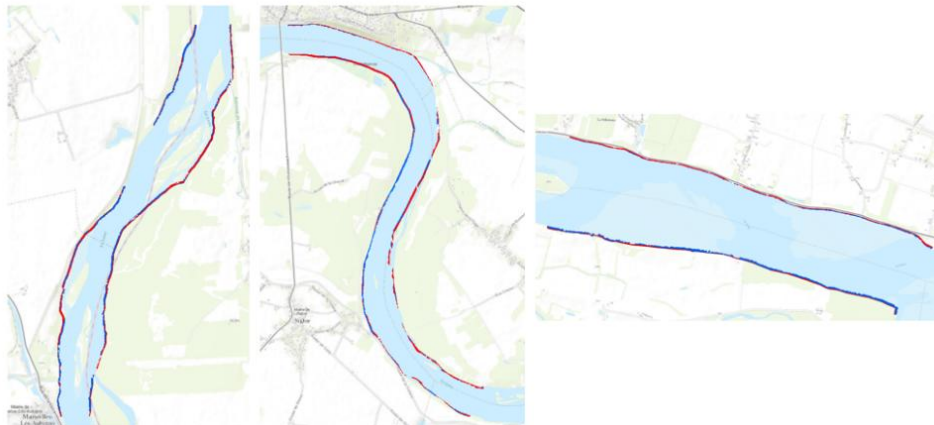


Projet Recherche Innovation 2025-2026

Estimation des volumes provenant de l'érosion des berges de la Loire par analyse de données LIDAR topobathymétriques



Sous la direction de :

Stéphane Rodrigues

Alex Andréault

Marie Siraud

**Estimation des volumes d'érosion des
berges de la Loire par analyse de données
LIDAR topobathymétriques :
Evolution des berges de la Loire Moyenne
entre 2003 et 2020 sur les sites de Marzy,
Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire**

Directeurs de recherche :

Stéphane Rodrigues

Alex Andréault

Auteure : Marie Siraud

Année 2025 2026

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 recherche innovation 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 recherche innovation (PRI) 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 M. Stéphane Rodrigues et M. Alex Andréault pour leur encadrement, pour leurs conseils et pour nos échanges au cours de ce projet de recherche qui m'a permis de développer mes compétences en SIG sur le domaine de la géomorphologie fluviale.

Je remercie Mme Elisabeth Lehec pour l'attention portée à la lecture de ce rapport.

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 9 |
| 2. Les méthodes de mesure d'érosion des berges..... | 9 |
| 2.1. Les différents types d'érosion | 9 |
| 2.2. La télédétection par LIDAR, une technique essentielle parmi les méthodes de mesure de l'érosion des berges | 10 |
| 2.3 Les méthodes de quantification de l'érosion des berges sous LIDAR..... | 11 |
| 2.3.1 Méthode volumétrique de l'érosion des berges fluviales à partir de photographies aériennes historiques séquentielles (Spiekermann et al., 2017)..... | 11 |
| 2.3.2 Méthode de mesure de l'érosion des berges et des falaises à partir du Lidar séquentiel et de la photographie aérienne historique (C. de Rose et al., 2011) | 11 |
| 2.3.3 Quantification de l'érosion des berges de la rivière South de 1937 à 2005 (Rhoades et al., 2009)..... | 12 |
| 2.3.4 Quantification des différents processus d'érosion des berges lors de crues extrêmes (Grove et al., 2013)..... | 12 |
| 3. Description des sites d'études | 13 |
| 4. Matériel et méthode de délimitation des berges sous ArcGIS | 14 |
| 4.1. Précision sur les données acquises avant de réaliser la méthode..... | 14 |
| 4.2. Préparation des données | 15 |
| 4.3 Méthode appliquée..... | 18 |
| 4.3.1. Création des pentes | 19 |
| 4.3.2. Représentation des pentes majeures | 19 |
| 4.3.3. Tracement de l'axe de berges | 21 |
| 4.3.4. Délimitation des berges par zone tampon..... | 22 |
| 4.3.5. Extraction des rasters de berges | 23 |
| 4.3.6. Détermination des zones de dépôt et d'érosion | 24 |
| 4.3.7 Traitement des données obtenues | 24 |
| 4.3.8 Schéma récapitulatif de la méthode | 25 |
| La méthode développée peut se résumer sous la forme de ce schéma (figure 17)..... | 25 |
| 5. Résultats | 26 |
| 5.1. Analyse cartographique des résultats..... | 26 |
| 5.2. Analyse quantitative des résultats | 29 |
| 6. Discussion et limites | 32 |
| 6.1 Discussion sur l'aspect des résultats morphodynamiques | 32 |
| 6.2 Avantages et limites de la méthode..... | 33 |

| | |
|---------------------|----|
| 7. Conclusion | 35 |
| Bibliographie | 36 |
| Annexes | 38 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : (Spiekermann et al., 2017, C. De Rose et al.,2011, Rhoades et al., 2019) Représentation des différentes méthodes des publications scientifiques..... | 12 |
| Figure 2 : Localisation des sites d'étude sur la Loire Moyenne (Marie Siraud) | 13 |
| Figure 3 : Orthophotographies de 2020 des différents sites Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire..... | 14 |
| Figure 4 : Schéma de l'étendue des données LIDAR de 2003 et de 2020 et visualisation sous ArcGIS | 15 |
| Figure 5 : Représentation des MNT raster de 2020 topobathymétriques superposés aux MNT ascii de 2003 topographiques des différents sites d'étude | 16 |
| Figure 6 : Conversion des ascii en raster shapefile sans conversion des valeurs nulles (à gauche) et avec configuration des valeurs minimales (à droite) sur le site de Guilly | 17 |
| Figure 7 : Zone tampon fusionnée de Marzy (en bleu) et l'emprise du site (en rouge) avec exemple de zone à ajuster | 17 |
| Figure 8 : MNT découpés des différents sites d'études Marzy, Guilly et Saint Mathurin sur Loire (2020 en haut et 2003 en bas) | 18 |
| Figure 9 : Rasters de pente de 2020 des différents sites | 19 |
| Figure 10 : raster de pente >35° (à gauche) et >15° (à droite) pour le site de Guilly | 20 |
| Figure 11 : Représentation des lignes de pente >35° (en violet) et > 15° (en orange) pour le site de Guilly de plus en plus précise sur la rive droite aval | 21 |
| Figure 12 : Axe de berges (en rouge et jaune) superposé aux pentes >35° des rasters de 2020 (à gauche) et 2003 (à droite) pour Guilly | 21 |
| Figure 13 : Délimitation des zones tampon par rapport à l'axe de berge pour Guilly..... | 22 |
| Figure 14 : Modification de l'axe de berge de Saint-Mathurin-sur-Loire | 23 |
| Figure 15 : Rasters de berges après extraction de la zone tampon de 20 m pour 2020 à gauche et 2003 à droite | 23 |
| Figure 16 : Exemple de couche de remblais déblais pour Marzy pour la zone de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite)..... | 24 |
| Figure 17 : Schéma de synthèse de la méthode | 25 |
| Figure 18 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Marzy avec une zone tampon de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite) | 26 |
| Figure 19 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Guilly avec une zone tampon de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite) | 27 |
| Figure 20 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Saint-Mathurin-sur-Loire avec une zone tampon de 20 m (en haut) et de 10 m (en bas)..... | 28 |
| Figure 21 : (Cerema) Schéma des zones d'érosion et de dépôt d'un méandre | 29 |
| Figure 22 : Graphique représentant l'évolution sédimentaire des berges au m ² entre 2003 et 2020 pour chaque site..... | 31 |
| Figure 23 : Cartographie du cordon dunaire et de la digue de Saint-Mathurin-sur-Loire..... | 32 |

Figure 24 : Manque d'information des données de 2003 par rapport à la délimitation des berges réalisée manuellement pour percevoir le manque de données 33

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Avantages et limites de différentes méthodes de mesure d'érosion | 10 |
| Tableau 2: Résultats de volumes sédimentaires entre 2003 et 2020 des différents sites pour une zone tampon de 10 m | 30 |
| Tableau 3 : Résultats de volumes sédimentaires entre 2003 et 2020 des différents sites pour une zone tampon de 20 m | 30 |
| Tableau 4 : Approximation des bilans sédimentaires sur chaque site selon l'épaisseur de la zone tampon | 30 |

1. Introduction

La Loire est un fleuve sablo graveleux qui évolue en transportant des sédiments et subit notamment des processus d'érosion au niveau des berges. Les berges constituent la zone de transition entre le lit mineur, la partie du cours d'eau occupée par l'eau à l'étiage, la période où le niveau d'eau est le plus bas et la plaine d'inondation, la zone maximale d'expansion des crues. Leur érosion est un processus naturel de transport de la charge sédimentaire qui conduit à la migration latérale, l'évolution des méandres et assure le fonctionnement dynamique fluvial. Cependant ce phénomène a été accentué par les activités anthropiques qui viennent perturber le fonctionnement du fleuve avec en particulier l'extraction de granulats qui s'est produite sur la Loire au cours des siècles et en particulier au XXème siècle avec le développement de l'industrialisation qui a fortement modifié le lit du fleuve et accentué son érosion. Cela a entraîné des conséquences négatives sur le milieu en allant jusqu'à développer de l'incision, un creusement du lit et donc un impact sur les habitats aquatiques. L'érosion peut également rendre les berges instables et générer des mouvements de terrain du fait du recul du trait de berges qui va alors impacter les habitats naturels et les aménagements.

Il est donc primordial de pouvoir quantifier ce processus d'érosion qui peut représenter un risque mais qui conditionne paradoxalement l'évolution de la morphologie du fleuve. Sans cette érosion des berges qui constitue la dernière ressource en sédiments mobilisable par le fleuve, il n'y aurait pas de restitution sédimentaire au chenal nécessaire pour réalimenter le système fluvial et ainsi permettre l'évolution des rivières.

Ce Projet de Recherche Innovation PRI a pour objectif d'estimer les volumes de sédiments provenant de l'érosion de berges de la Loire Moyenne par analyse de données LIDAR topobathymétriques.

Il s'agit d'une technique de télédétection optique qui utilise des faisceaux laser pour mesurer des distances et qui permet d'avoir une représentation spatiale de la topographie de la zone étudiée après traitement sous Système d'Information Géographique (SIG). Un état de l'art a été réalisé auparavant afin de déterminer les critères importants pour calculer le volume d'érosion de berges parmi les méthodes existantes et laquelle semblait la plus pertinente. Ce travail présente ainsi la création d'une méthode pour calculer un bilan sédimentaire sur la Loire avec une description de l'ensemble des étapes à réaliser pour obtenir un volume d'érosion de berges entre 2003 et 2020. Son objectif est de déterminer avec cette méthode comment les données LIDAR permettent de quantifier l'érosion des berges et de comprendre l'évolution de la dynamique fluviale.

Nous verrons dans un premier temps les méthodes de mesure d'érosion de berges avec les paramètres à prendre en compte d'après l'état de l'art, la description des sites d'études, l'ensemble de la méthode détaillée appliquée sous ArcGIS, les résultats obtenus pour les différents sites et la discussion et la présentation des limites de la méthode.

2. Les méthodes de mesure d'érosion des berges

2.1. Les différents types d'érosion

Il existe deux types d'érosion qui modifient la morphologie des cours d'eau, l'érosion verticale et l'érosion latérale.

L'érosion verticale correspond à un enfoncement du cours d'eau dans son propre substrat qui est causée par l'action de l'eau et entraîne une incision du lit du cours d'eau.

L'érosion latérale qui correspond à l'érosion des berges est celle à laquelle nous nous intéressons pour ce PRI. Elle dépend de la résistance des roches et de la largeur de la plaine. Elle est causée par différents phénomènes. Elle est causée majoritairement par l'effet de sape où une attaque directe par l'écoulement de l'eau va affecter la berge et l'effet gravitaire qui va conduire au glissement et à

l'effondrement des berges. Il peut également se produire de l'érosion par surcharge de végétation ligneuse. L'arbre va en effet entrainer avec lui la berge en tombant car la hauteur de berge est supérieure à la taille du système racinaire qui n'est donc plus en mesure de le maintenir.

2.2. La télédétection par LIDAR, une technique essentielle parmi les méthodes de mesure de l'érosion des berges

La quantité de sédiments transportés par le cours d'eau par l'érosion peut être estimée selon plusieurs méthodes de terrain et d'analyse expliquées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) (Fournier, 1967, Dubiez, 2023)

| Méthode | Principe | Avantages | Limites |
|-----------------|---|--|---|
| Photographique | Observation à l'œil nu ou en comparant des photographies directement prises sur le terrain | Réalisation facile donnant des informations sur l'état de l'art des berges (changement de forme, effondrement, recul de la berge...) | Faible précision, juste une constatation du recul des berges, impossibilité de quantifier la vitesse d'érosion au cours du temps ni la quantité érodée |
| Repères | Mesure de la longueur de tiges métalliques visible enfoncées perpendiculairement au sol | Réalisation facile avec des données quantitatives précises | Information à une échelle locale, pas applicable sur un grand périmètre d'étude et pour déterminer l'évolution générale de l'érosion Possible détérioration des berges en les déstabilisant davantage ou en accumulant de la matière censée être érodée autour des tiges |
| Topographique | Levés à partir de théodolites ou de niveaux | Mesures du relief des berges à plusieurs intervalles de temps | Applicable sur certains sites et limite de couverture spatiale, donne une estimation de hauteur et pas de volume exacte |
| Photogrammétrie | Construction en 3D des berges sous forme de nuage de points ou de maillage à partir d'images aériennes ou satellitaires | Représentation précise des berges (millimétriques) et possibilité de se concentrer sur certaines zones plus précises. Réalisation rapide par drone ou par caméra | Utilisation de logiciels spécialisés, demande de bonnes conditions météorologiques pour les images. Faible résolution des images pour délimiter les berges |
| LIDAR | Mesures de télédétection par faisceau laser avec une grande précision qui sont traitées par géomatique | Obtention d'un modèle 3D de la berge sur une grande surface Grande précision données uniformes Comparaison entre deux périodes | Le LIDAR demande de faire plusieurs campagnes de terrain dans le temps et demande de s'adapter aux conditions hydrologiques pour représenter le cours hors crue et hors étiage s'il s'agit d'un Lidar topographique uniquement |

Tableau 1: Avantages et limites de différentes méthodes de mesure d'érosion

Le LIDAR est la méthode la plus intégrative par rapport aux méthodes évoquées dans ce tableau car elle permet de réaliser des études sur des tronçons de cours d'eau de grande taille. En tant qu'outils de mesure spatiale, il permet d'obtenir à la fois des analyses en plan et altitudinales (Grivel et al., 2008). Le LIDAR est une technologie de télédétection qui permet d'élaborer rapidement et précisément des modèles numériques de terrain tridimensionnels (MNT) à partir de nuages de points. Les MNT permettent d'acquérir une surface lissée de la topographie avec une précision centimétrique. Ce sont

des couches rasters, des grilles de pixels qui ont chacun une valeur d'altitude. Le LIDAR réussit à ne pas prendre en compte ni les bâtiments ni la végétation et donne une représentation topographique de la surface avec uniquement le sol nu. Il présente également d'autres avantages par rapport à d'autres techniques de télédétection, elles peuvent être acquises à tout moment, le jour, la nuit et même par temps nuageux.

Concernant son fonctionnement, le LIDAR a pour principe de mesurer la distance à un point cible en calculant le temps écoulé entre l'émission d'un faisceau laser par un capteur et la détection de la lumière réfléchi vers ce même capteur situé sur un drone. Il en existe deux types. Le LIDAR topographique utilise un laser infrarouge mais les longueurs d'onde émises ne peuvent pénétrer l'eau et donne donc uniquement des informations sur le milieu émergé. Le LIDAR bathymétrique qui a été développé plus tard utilise des faisceaux laser bleu vert qui peuvent eux traverser le milieu et donc fournir des informations avec des précisions fines sur le lit des rivières (Awadallah et al.,2022). Ces types d'acquisition de données sont fondamentaux pour comprendre comment les données mises à disposition sur la Loire.

2.3 Les méthodes de quantification de l'érosion des berges sous LIDAR

L'état de l'art avait pour objectif de connaître différentes méthodes existantes pour quantifier le volume d'érosion de berges à partir de données LIDAR. Plusieurs méthodes issues de publications scientifiques comprenant les termes « bank erosion » ou encore « berge instability processus », « bank rate budget » associé au terme « LIDAR » ont été étudiées dans le rapport du premier PRI. Les articles ont été sélectionnés selon leur pertinence car certains n'étaient pas toujours liés à la problématique du sujet mais plutôt à l'érosion sur l'ensemble d'un bassin versant. Nous allons donc reprendre l'essentiel de ces méthodes qui quantifient le phénomène d'érosion de berges et nous pourrons nous référer au premier travail de PRI pour avoir plus de détail sur ces méthodes. L'objectif de départ était de déterminer la méthode la plus pertinente et la reproduire pour le cas de la Loire mais il a été choisi de réaliser une nouvelle méthode détaillée en prenant en compte les différents paramètres évoqués dans les publications scientifiques.

2.3.1 Méthode volumétrique de l'érosion des berges fluviales à partir de photographies aériennes historiques séquentielles (Spiekermann et al., 2017)

Cette méthode modélise les berges sous forme de trapèze au cours des deux périodes données. Les chercheurs déterminent ensuite la différence de volume entre les deux trapèzes pour connaître la quantité de sédiment érodée (figure 1). Ils expliquent que l'érosion est difficile à intégrer dans des modèles car elle varie dans le temps et l'espace. Elle dépend de plusieurs paramètres des facteurs de contrôle physiques tels que la végétation, la composition des berges, la topographie, la forme du chenal et les conditions hydrauliques. Cette méthode a été déployée sur des tronçons de rivières en Nouvelle Zélande de 3 à 15 km. Les calculs sont effectués à petite échelles 1 :4000 et 1 :6000 pour avoir une meilleure précision. Les trapèzes étaient modélisés tous les 2m le long des berges pour avoir un résultat précis. Ils s'appuient sur les orthophotographies et les pentes pour définir les sommets de berges et considèrent dans leur calcul que la hauteur reste constante et la définissent à partir des valeurs d'altitude issues du LIDAR.

2.3.2 Méthode de mesure de l'érosion des berges et des falaises à partir du Lidar séquentiel et de la photographie aérienne historique (C. de Rose et al., 2011)

La méthode interprète l'érosion des berges à partir des observations de mouvement de chenaux (figure 1). Les chercheurs travaillent sur des rivières sinueuses entre 16 et 28 km avec un intervalle de temps de 50 ans. Ils transforment des orthophotographies anciennes en photogrammétrie et les comparent avec un MNT plus récent avec une précision de 1m Le taux d'érosion est déterminé en

mesurant l'élargissement du chenal sur la vallée fluviale. Ils utilisent également des cartes de pentes et d'ombrage des collines pour bien distinguer les limites de berges. Les polygones obtenus sont ensuite filtrés, on calcule leur largeur moyenne que l'on multiplie par la différence d'élévation entre les deux MNT étudiés pour avoir des valeurs d'érosion et de dépôt. Ils ont constaté que la résistance des berges et la grande largeur du chenal peuvent influencer le volume d'érosion réel.

2.3.3 Quantification de l'érosion des berges de la rivière South de 1937 à 2005 (Rhoades et al., 2009)

Cette méthode développée sur une rivière sinueuse à lits de graviers sur 47 km calcule l'érosion de berge sur une période de 70 ans. Les chercheurs ont utilisé des données LIDAR et des orthophotographies numérisées. Des zones tampons de 2m ont été créées pour pouvoir tracer précisément les limites de berges en essayant de ne pas être impacté par la canopée qui empêche de bien les délimiter. Pour effectuer les calculs, ils ont ensuite formé des grilles SIG (figure 1). Avec ce maillage, ils ont alors pu déduire un pourcentage moyen de changement de chenal qu'ils multiplient par la hauteur de berge pour obtenir le volume d'érosion.

2.3.4 Quantification des différents processus d'érosion des berges lors de crues extrêmes (Grove et al., 2013)

Cette méthode utilise des matrices DoD qui mesurent la différence entre deux couches raster. Elle choisit des secteurs où l'érosion a le plus de probabilité de se produire où les pentes sont supérieures à 35% soit 19° pour tracer les polygones et ensuite obtenir à partir de la matrice un volume d'érosion.

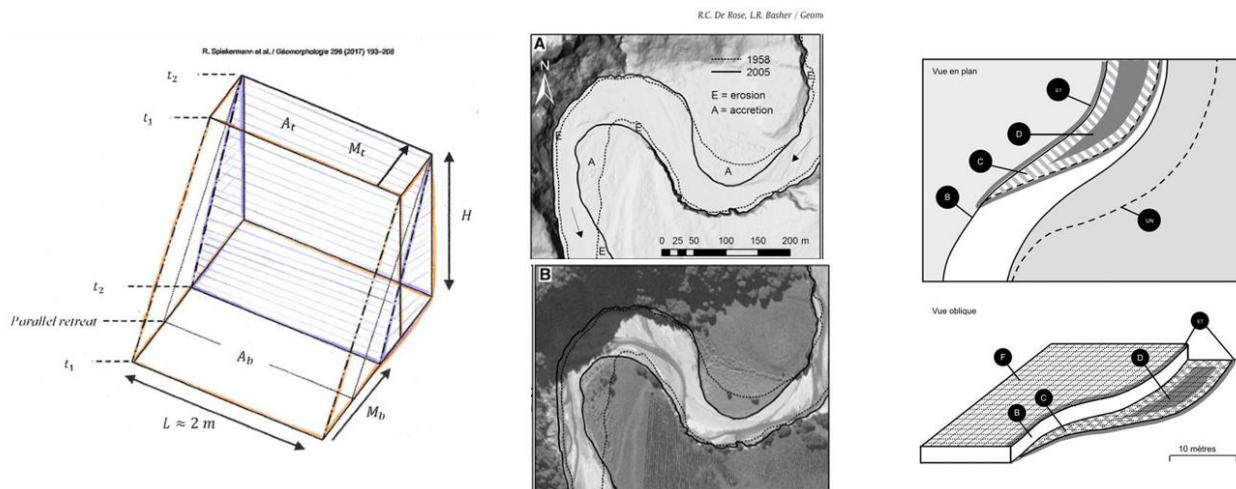


Figure 1 : (Spiekermann et al., 2017, C. De Rose et al., 2011, Rhoades et al., 2019) Représentation des différentes méthodes des publications scientifiques

Toutes ces méthodes montrent que le LIDAR avec ses données tridimensionnelles est indispensable au calcul d'érosion des berges. Elles définissent les différents paramètres importants à prendre en compte dans la méthode comme les ruptures de pente pour définir les surfaces de berges. Il y a aussi la hauteur de berge qui varie en toute cellule du MNT mais nous n'allons pas la moyenner contrairement à ce qui est présenté car nous souhaitons avoir une estimation la plus réelle de l'érosion en prenant la différence d'altitude pixel par pixel. Il y a également l'identification de changements de forme du lit

par orthophotographie mais ce n'est pas réalisable sur la Loire car en 20 ans la morphologie n'aura pas autant évolué que dans les cas d'études présentés. L'orthophotographie pourra servir à bien distinguer les berges de la végétation aquatique et de la topographie du lit.

Nous développons donc une nouvelle méthode à partir de ces paramètres et nous exploitons le plus possible les données LIDAR. Nous réalisons les calculs d'érosion directement à partir du MNT et nous n'essayons pas de déterminer visuellement les espaces érodés puis de réaliser les calculs ensuite car cela n'est pas applicable sur nos données.

3. Description des sites d'études

La Loire est le plus long fleuve de France, elle s'étend sur une distance de 1012 km et est divisée en plusieurs tronçons : la Loire amont, depuis sa source jusqu'à sa confluence avec l'Allier, la Loire moyenne entre l'Allier et la Maine et la Loire aval, depuis Angers jusqu'à l'estuaire (Latapie, 2014). Elle présente des chenaux multiples dans en aval de l'Allier soit au début de la Loire moyenne et devient ensuite assez rectiligne jusqu'à Tours et à l'aval de Tours elle retrouve un style à chenaux multiples (Claude, 2012).

Les différents sites étudiés au cours de ce travail de recherche sont les secteurs de Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire. Ils sont répartis sur l'ensemble de la Loire Moyenne (figure 2) et représentent chacun différents styles fluviaux (figure 3).

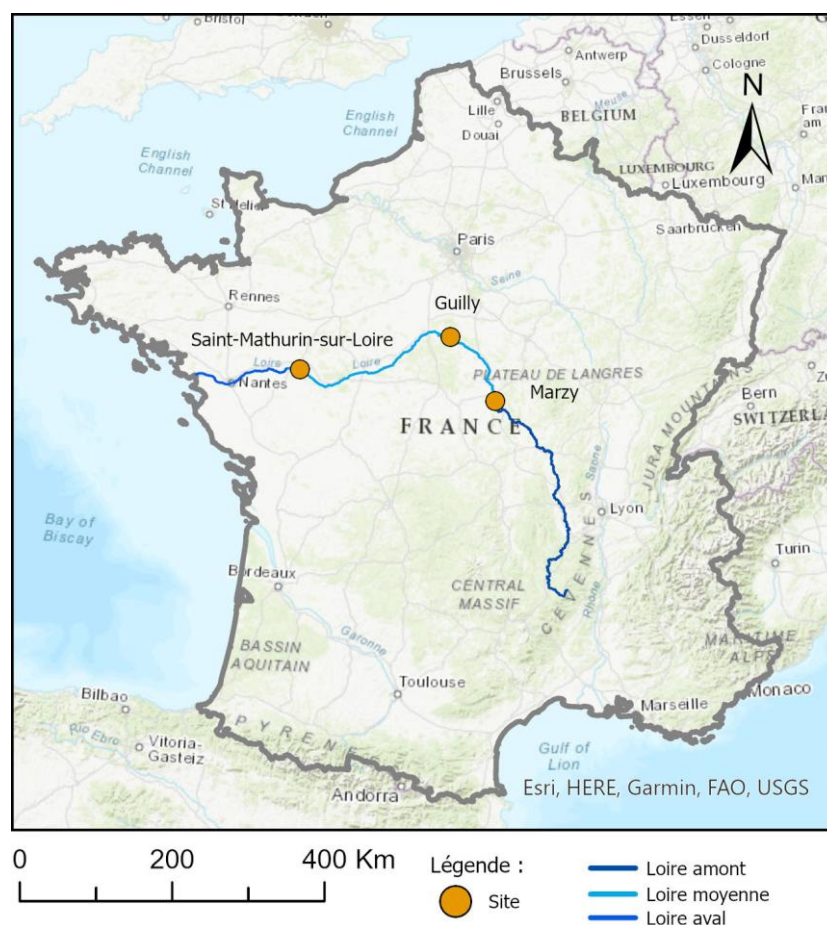


Figure 2 : Localisation des sites d'étude sur la Loire Moyenne (Marie Siraud)



Figure 3 : Orthophotographies de 2020 des différents sites Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire

Le site de Marzy en amont de la Loire moyenne est caractérisé par des chenaux multiples. Guilly présente un style fluviale méandriforme qui est le seul secteur présentant ce type de morphologie sur la Loire moyenne (Latapie, 2011) et Saint-Mathurin-sur-Loire en aval est composé d'une morphologie en tresses. Le tronçon de la Loire étudié à Marzy s'étend sur 3,9 km, 5,2 km pour Guilly et 2,7 km pour Saint-Mathurin-sur-Loire.

4. Matériel et méthode de délimitation des berges sous ArcGIS

La méthode réalisée au cours du PRI utilise les différentes fonctions de géotraitement de SIG sous ArcGIS afin de déterminer l'espace des berges et de pouvoir estimer la quantité de sédiments érodés entre deux années. L'objectif est de réaliser cette délimitation de la surface des berges en évitant de digitaliser manuellement pour pouvoir reproduire cette méthode rapidement et à plus grande échelle sur l'ensemble de la Loire Moyenne.

L'ensemble des étapes de la méthode qui a été élaborée est appliqué sur les différents sites d'études l'un après l'autre avec pour chacun un traitement dans un premier temps du MNT de 2020 puis de celui de 2003. Au cours de la création et de l'expérimentation de la méthode, une automatisation sous modèle Builder sous ArcGIS a été réalisée pour certaines étapes afin d'accélérer le temps de traitement en pouvant les réutiliser pour différents sites (annexe 1).

4.1. Précision sur les données acquises avant de réaliser la méthode

Les MNT provenant de données LIDAR de 2020 réalisées sur la Loire Moyenne sont issus des travaux de mes encadrants (programme IPAT2, UMR CNRS CITERES, S. Rodrigues) et ceux issus des données LIDAR de 2003 proviennent de la DREAL, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Centre-Val de Loire. Les MNT de 2020 ont une résolution de 0.5 m afin d'être le plus précis possible et les MNT de 2003 ont une résolution de 1 m par pixel.

Les emprises des différents sites d'études au niveau de Guilly, Marzy et Saint Mathurin ont été fournies à partir d'ancien travaux réalisés par mes tuteurs. Elles sont représentées en rouge sur les différentes figures (Andréault et al., 2023).

Les MNT des deux années sont différents car la technique d'acquisition par données LIDAR s'est améliorée au cours du temps. Les MNT de 2003 sont constitués uniquement des données topographiques (les zones hors d'eau en surface qui s'étendent jusqu'au sommet de berge) tandis que les MNT de 2020 présentent à la fois des données topographiques et bathymétriques (les zones en eau du lit mineur et donc du pied de berge). Ainsi seules les surfaces communes sont comparées au cours de ce travail. Comme on peut le voir sur la figure 4, les surfaces comparées sont celles situées entre le lit mineur et le lit majeur, seule la partie émergée de la berge sera comptabilisée dans le calcul de volume puisque les données immergées de 2003 ne sont pas disponibles comme elles ne pouvaient pas être mesurées à l'époque.

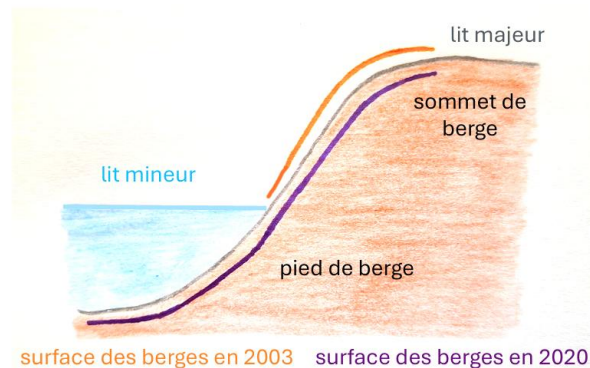


Figure 4 : Schéma de l'étendue des données LIDAR de 2003 et de 2020 et visualisation sous ArcGIS

Les orthophotographies des différents sites sont également nécessaires pour effectuer la méthode. Elles doivent correspondre aux mêmes années de réalisation des MNT. Celles datant de 2020 proviennent de la BD Ortho de l'IGN des départements où se situent les sites d'études et ont été réalisées en janvier. Les données ont été téléchargées pour les départements du Loiret (45) pour Guilly, le Maine et Loire (49) pour Saint Mathurin et la Nièvre (58) pour Marzy. Seules les orthophotographies qui correspondaient au niveau des emprises ont été conservées, il y en a deux pour chaque site. Les orthophotographies de 2003 proviennent de la DREAL et représentent le territoire au niveau de la Loire en décembre. Aussi seules celles de Guilly et Marzy étaient disponibles. Cependant l'absence d'orthophotographies anciennes de 2003 n'est pas limitante pour la méthode car elles servent uniquement d'indication et de vérification pour délimiter les berges en plus des MNT et le travail se fait principalement avec celles de 2020 qui sont en couleur et représentent la situation actuelle.

4.2. Préparation des données

Ces données sont ensuite traitées. Les MNT de 2020 sont découpés autour de la zone d'emprise des sites à étudier pour faciliter les temps de calculs car les données initiales étaient présentes sur des grandes parties du linéaire de la Loire.

Les données LIDAR de 2003 sont sous forme de fichiers ascii. Il faut d'abord sélectionner les grilles ascii qui correspondent aux zones d'études car chacune des couches représente des parties de la Loire sur tout son linéaire (figure 5).

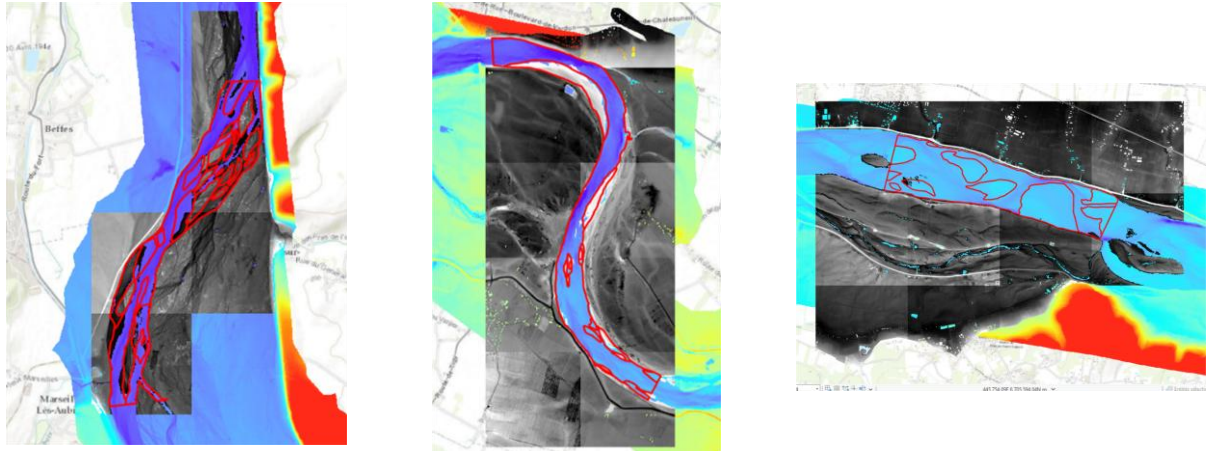


Figure 5 : Représentation des MNT raster de 2020 topobathymétriques superposés aux MNT ascii de 2003 topographiques des différents sites d'étude

Les MNT de 2020 disposent de 3 canaux ce qui permet de leur attribuer une symbologie colorée qui permet de mieux distinguer le lit mineur du lit majeur et surtout de distinguer la forme des chenaux tandis que les MNT de 2003 disposent de seulement 1 canal et sont donc en noir et blanc.

Les couches ascii ont ensuite nécessité d'être transformées en un unique raster sous forme de shapefile pour pouvoir effectuer les calculs sous ArcGIS et être comparés aux rasters de 2020. Pour cela, c'est l'outil « mosaïque vers nouveau raster » qui a été utilisé et qui permet d'obtenir un seul raster pour 2003 en format tiff au lieu d'un ensemble de grilles ascii.

Cependant nous devons nous assurer lors de la conversion que les valeurs sans données restent bien sous cette forme sans valeur (NA) et ne deviennent pas nulles (figure 6). Elles correspondent aux parties en eau qui ne sont donc pas prise en compte par le LIDAR de 2003. On ne peut donc pas connaître leur valeur exacte mais elles ne peuvent en aucun cas avoir une altitude de 0 m équivalente au niveau de la mer. On choisit ainsi dans les paramètres environnement d'attribuer la valeur non applicable NA lors de la conversion finale à la valeur minimale générée lors de la fusion des grilles ascii (soit 0m d'altitude pour les données de 2003 de Guilly). Sans cette vérification primordiale, on obtiendrait des erreurs d'estimations avec des ordres de grandeur trop important à l'échelle du million ce qui est impossible pour des sites de ces superficies. Cela prendrait en compte des fausses valeurs bathymétriques pour 2003 avec une différence d'altitude de plus de 100 m alors qu'elles n'ont pas pu être mesurées.

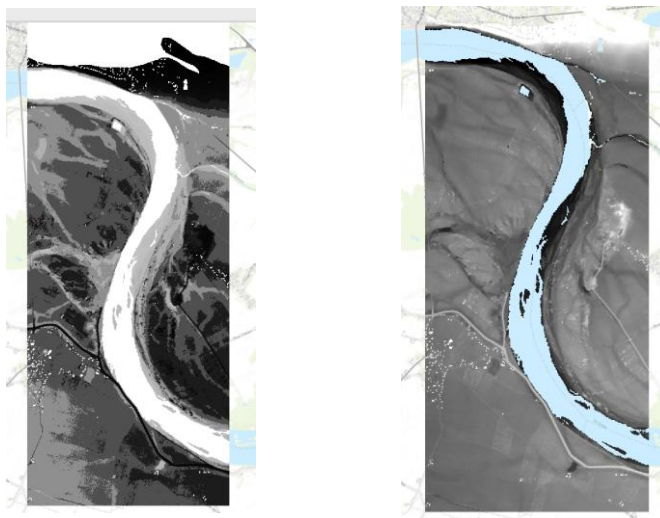
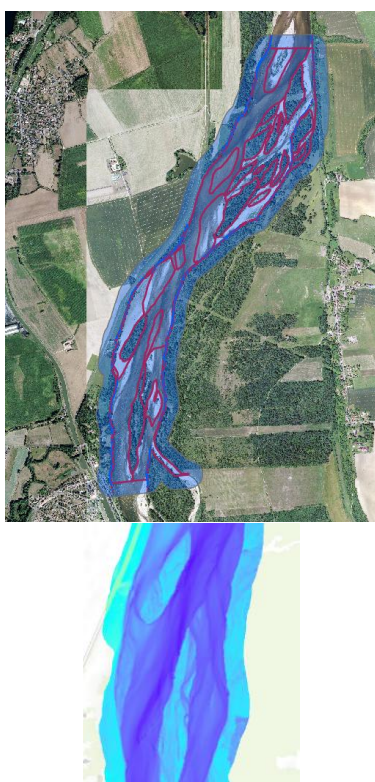


Figure 6 : Conversion des ascii en raster shapefile sans conversion des valeurs nulles (à gauche) et avec configuration des valeurs minimales (à droite) sur le site de Guilly

Il aurait été également possible de découper sur une zone commune le raster de 2020 par rapport à l'étendue du raster de 2003 mais ne voulant pas perdre les informations bathymétriques de 2020, le raster de 2020 a été conservé tel qu'il est. De plus cela n'exerce aucune influence sur le calcul de volume car la soustraction se fait automatiquement et donne un résultat seulement pour les pixels qui ont des valeurs disponibles pour les 2 années de raster.



Les MNT sont ensuite découpés en créant une zone tampon de 80m autour de l'emprise de la zone d'étude pour gagner en efficacité par rapport aux temps de calcul (figure 8). Les outils utilisés sont donc « zone tampon » avec pour données en entrée l'emprise du site traité et on réalise ensuite une « extraction par masque » des MNT à partir de cette zone tampon. Elle a été définie à 100m pour Marzy (figure 7) car l'emprise de départ suivait à un endroit précis une barre sédimentaire et paraissait être à la limite d'être suffisamment étendue avec une zone de 80m pour atteindre la berge complète. Il était donc préférable de prendre une zone un peu plus agrandie et cela n'a pas d'impact comme on va ensuite à partir de ce raster recouper un autre raster qui délimite spécifiquement la berge afin de réaliser les calculs.

Si l'emprise de départ comporte plusieurs polygones, on peut également choisir de les fusionner en créant un champ commun pour obtenir un seul polygone final de zone tampon buffer.

Figure 7 : Zone tampon fusionnée de Marzy (en bleu) et l'emprise du site (en rouge) avec exemple de zone à ajuster

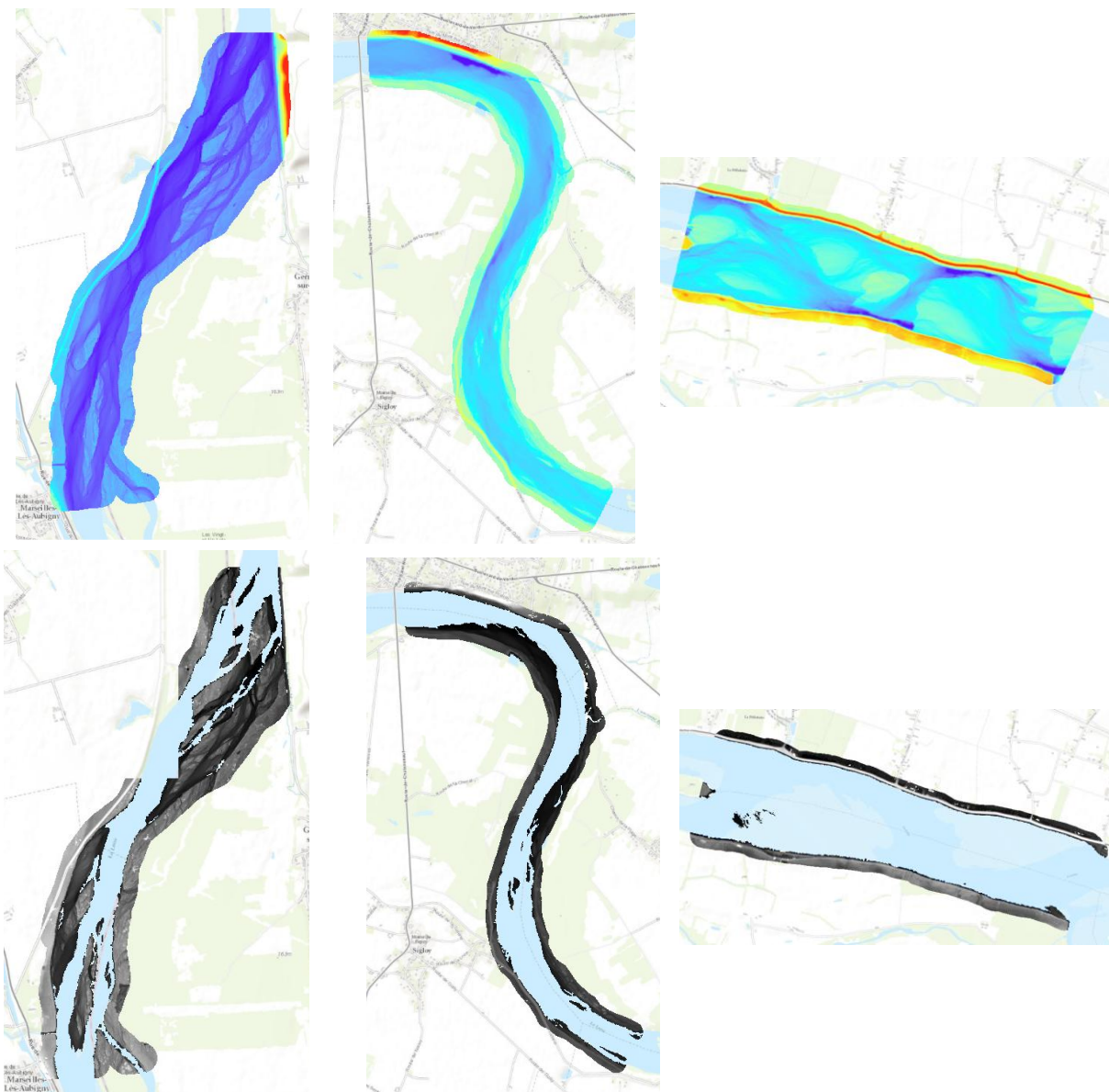


Figure 8 : MNT découpés des différents sites d'études Marzy, Guilly et Saint Mathurin sur Loire (2020 en haut et 2003 en bas)

On constate en 2003 une perte d'information dans la partie centrale à l'Est de la zone car les données n'existaient pas sur cette partie du linéaire de la Loire. Comme expliqué auparavant cela n'empêchera pas d'obtenir des résultats même si cela constitue une perte d'information si on veut connaître l'estimation de volume par rapport à la longueur du tronçon.

4.3 Méthode appliquée

Pour délimiter les berges, nous cherchons à identifier les zones où il y a un changement de topographie qui délimite le lit majeur du lit mineur équivalent à la berge. Notre objectif est donc de distinguer les ruptures de pente.

4.3.1. Création des pentes

Nous commençons par réaliser un raster de pente en degré décimaux à partir de la couche MNT découpée avec la zone tampon. On utilise l'outil « Pente » du géo traitement d'ArcGIS (figure 9).



Figure 9 : Rasters de pente de 2020 des différents sites

On obtient le même type de couche avec les rasters de 2003 avec différentes classes de pente (quantiles). On remarque déjà sur la figure que les ruptures de pente les plus importantes sont représentées par une symbologie plus foncée. Elles sont plus marquées pour Marzy et Saint-Mathurin-sur-Loire que Guilly et nous permettent pour chaque secteur de bien séparer le lit mineur du lit majeur. Elle permet également de bien distinguer les différents types fluviaux.

4.3.2. Représentation des pentes majeures

On cherche ensuite à conserver les pentes majeures qui représentent la forme de la berge et on construit de nouvelles couches rasters qui mettent en évidence uniquement ces catégories de pente. On utilise la fonction spatial analyst « pente » avec comme critère degrés décimaux

A partir de la calculatrice raster, on crée des rasters de pente supérieures à 35°. D'après les différents tests effectués sur ArcGIS, c'est la valeur qui semble effectivement la plus adaptée pour représenter les pentes majeures au niveau de la Loire. Il ne faut pas prendre une pente trop forte au-delà de 35° car on ne pourrait alors plus pouvoir déterminer visuellement la délimitation des berges car peu de zones présentent une pente aussi importante.

Il est également nécessaire de réaliser un raster de pentes supérieures à 15° qui correspond à l'ordre de grandeur de celle vue dans l'état de l'art. Il permet de voir plus en détail l'organisation de la pente et des parties des berges peuvent ne pas forcément apparaître avec le raster de pentes supérieures à 35°. Cela permet donc de ne pas perdre de zone et de s'assurer de la bonne délimitation de la rupture de berges.

On réalise cette étape sous forme de modèle Builder (annexe 1). On calcule les pentes supérieures à 35° puis on crée des polygones à partir du raster obtenu. Pour l'option de conversion en polygone, on

choisit de ne pas les simplifier et donc de garder uniquement la forme des pixels pour conserver l'information exacte et ne pas supprimer des zones en reliant ces pixels de même catégorie de pente entre eux. En effet en lissant les polygones, cela pourrait modifier le choix du tracé de l'axe de berge.

On souhaite ensuite conserver uniquement les polygones qui représentent les pentes supérieures à 35°. On sélectionne alors les attributs de la couche obtenue où le champ gridcode = 1 car ils représentent donc les pentes supérieures à 35°.

Cette même étape est réalisée ensuite pour les pentes supérieures à 15° (figure 10).

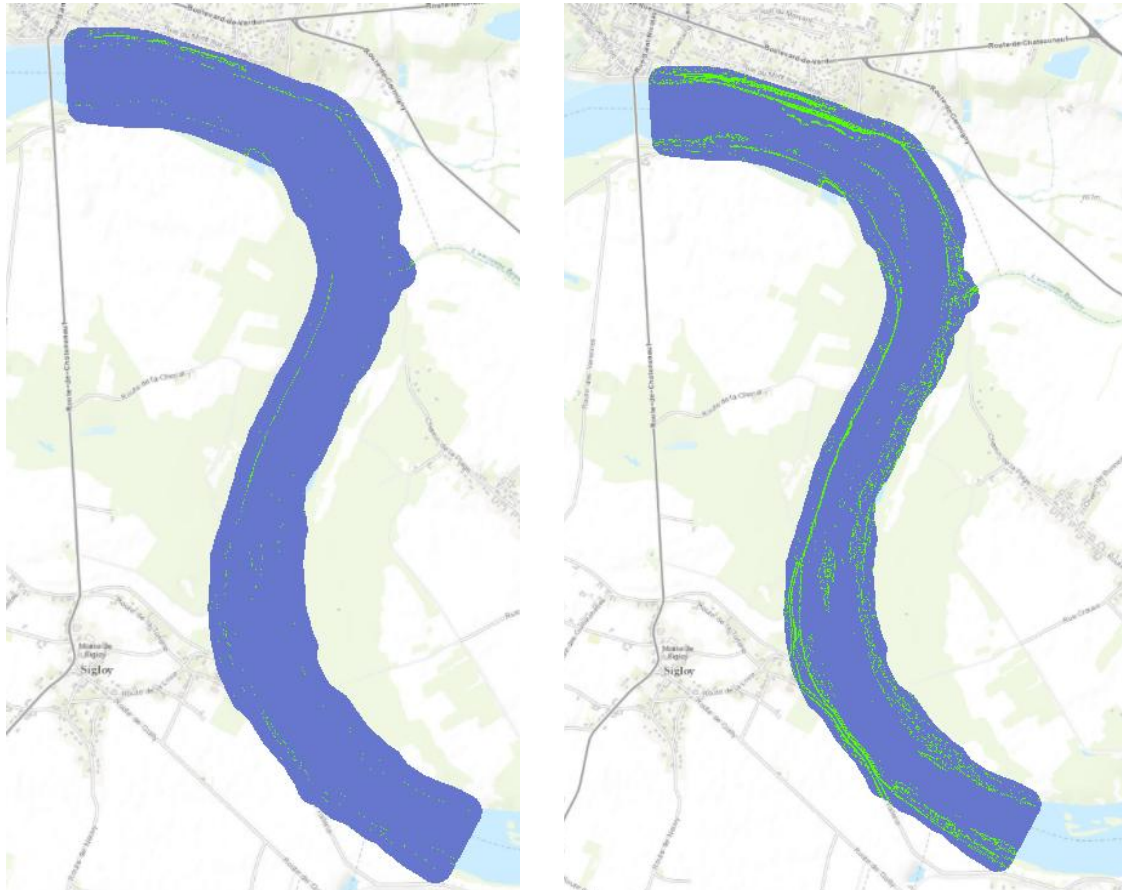


Figure 10 : raster de pente >35° (à gauche) et >15° (à droite) pour le site de Guilly

Il est nécessaire de vérifier en parallèle avec les orthophotographies les indications des rasters de pente afin de bien définir ce qui appartient à la berge ou non. En effet, les ruptures de pente symbolisent également des barres sédimentaires, des îles fluviales et aussi des fosses dans la morphologie du lit mineur pour le MNT de 2020. Elles peuvent également prendre en compte les aménagements anthropiques tels que les routes qui sont surélevées et qui sont donc autant marquées que la pente des berges. Tous ces facteurs nous empêchent de réaliser une automatisation complète de la méthode mais il est préférable de s'assurer personnellement de la bonne délimitation des berges car cela permet également de s'intéresser à des zones complexes (barres sédimentaires végétalisées qui forment désormais une nouvelle berge ou non). Pour cela il faut convertir en polygones les rasters de pente obtenus pour pouvoir mieux les visualiser en superposant ensemble les pentes >35° et >15° au-dessus des orthophotographies. Il s'agit de la dernière étape du modèle Builder. On obtient une représentation des pentes de la figure ce qui facilite la visualisation des berges (figure 11).

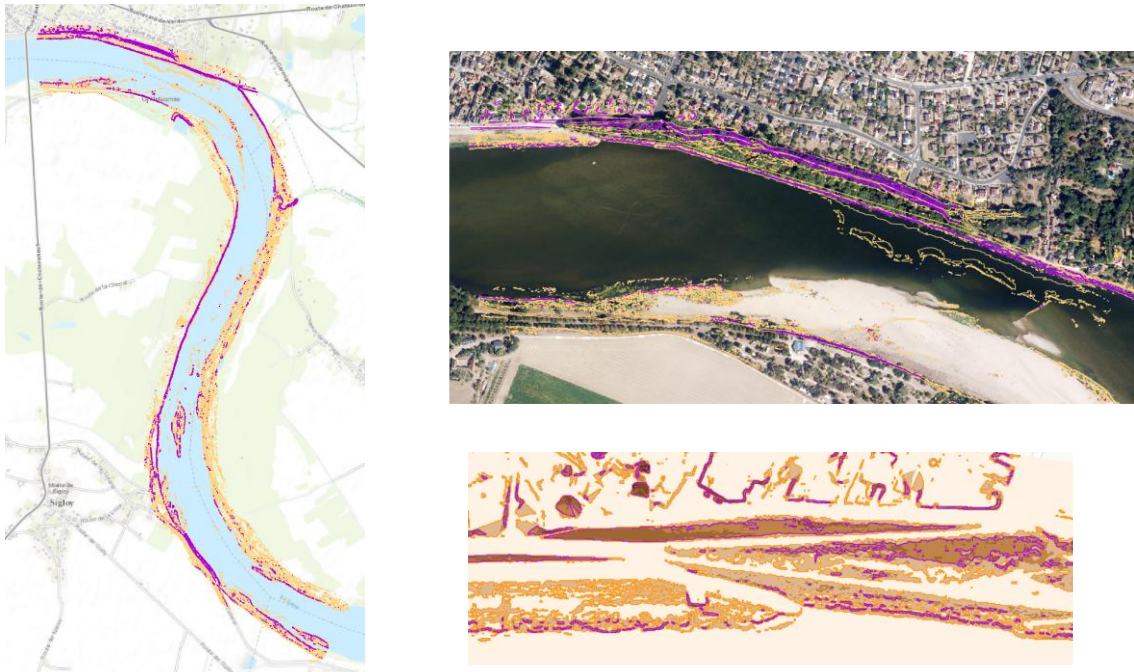


Figure 11 : Représentation des lignes de pente >35° (en violet) et > 15° (en orange) pour le site de Guilly de plus en plus précise sur la rive droite aval

4.3.3. Tracé de l'axe de berges

A partir de ces données issues du raster de pente, nous pouvons alors tracer l'axe de berge manuellement sur le site d'étude à l'échelle 1 : 1 500 (figure 12). Il suit en priorité les pentes supérieures à 35° et le cas échéant les pentes supérieures à 15° lorsque les pentes supérieures à 35° n'apparaissent plus.

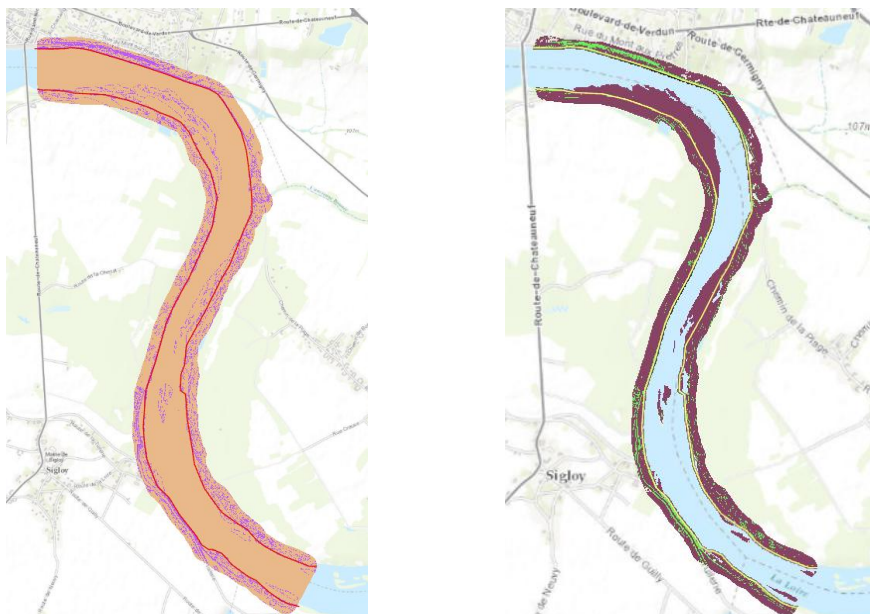


Figure 12 : Axe de berges (en rouge et jaune) superposé aux pentes >35° des rasters de 2020 (à gauche) et 2003 (à droite) pour Guilly

Cela n'a pas été possible de tracer automatiquement car les polygones issus des différents degrés de pente ne présentaient pas de surfaces communes pour pouvoir les relier directement de proche en proche les uns aux autres. Il faut également prêter attention bien suivre les pentes de 35° et éviter de tracer l'axe trop proche de la limite du cours d'eau pour ne pas avoir une perte d'information vu que le raster de 2003 ne prend pas en compte les données bathymétriques soit les parties immergées de la berge.

Cet axe de berge est identique pour 2003 et 2020 afin de pouvoir comparer exactement les mêmes superficies entre les deux MNT. Nous devons donc nous assurer que l'axe passe bien par les ruptures de pente supérieure à 35° de 2003.

4.3.4. Délimitation des berges par zone tampon

Ensuite une fois que l'axe des berges est tracé des deux côtés, rive gauche et rive droite, on crée une zone tampon buffer qui représente la surface où sont situées les berges. Elle est la même entre 2020 et 2003 car les rasters doivent pouvoir se chevaucher afin d'être comparable. Une étude de sensibilité a été réalisée avec des zones de berges de largeur de 20m et de 10m. Ceci est un paramètre crucial pour l'estimation des volumes. L'étude a été réalisée uniquement sur avec ces deux épaisseurs car la zone tampon ne doit pas être trop importante car elle prendrait en compte des zones attenantes qui ne correspondent plus à la berge.

On choisit donc dans les paramètres de l'outil de géotraitement de « zone tampon » de créer cette zone autour de l'axe de berge avec une largeur de 5 m de chaque côté du linéaire pour la zone de 10 m et 10 m de chaque côté pour la zone de 20 m (figure 13). On choisit une extrémité planaire pour l'extrémité.

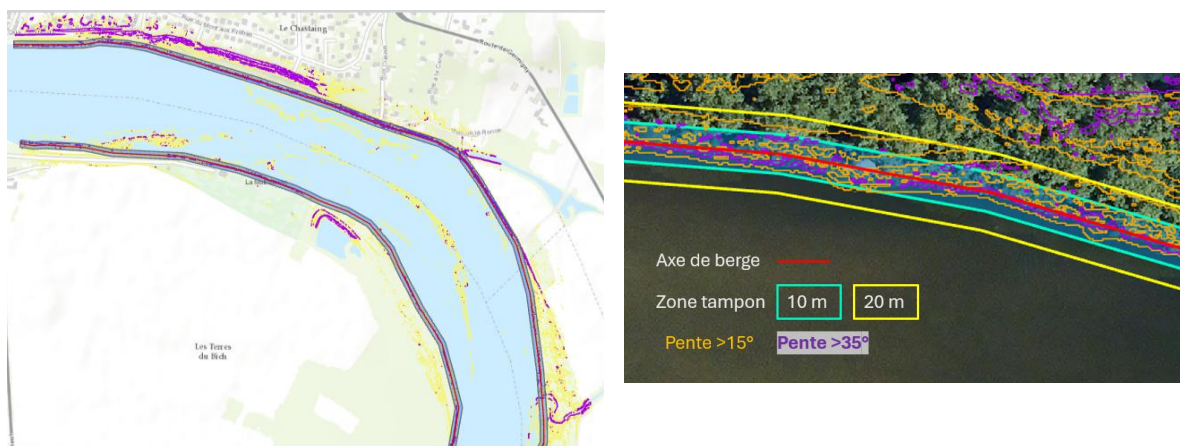


Figure 13 : Délimitation des zones tampon par rapport à l'axe de berge pour Guilly

Ensuite à partir de ces zones buffer de berges, il faut vérifier et s'assurer que les indications de ruptures de pente supérieures à 35° soit bien comprises à l'intérieur (annexe 2). Il est parfois nécessaire de faire quelques ajustements des axes de berges d'après l'orthophotographie pour s'assurer que la berge réelle soit mieux prise en compte. Des zones nécessitent de décaler légèrement de quelques mètres l'axe de berge des ruptures de pente supérieures à 35° afin de prendre en compte davantage de parties où la pente est supérieure à 15°. On a donc des zones légèrement un peu moins proches du cours d'eau pour s'assurer d'avoir des données. Cela a été le cas au niveau de la rive droite de Saint Mathurin sur Loire car en superposant les MNT, il n'y aurait eu quasiment aucune zone commune entre les MNT de 2020 et 2003 et donc pas de comparaison possible. Il faut s'assurer de toujours prendre en compte les ruptures de pente supérieures à 35° (figure 14).

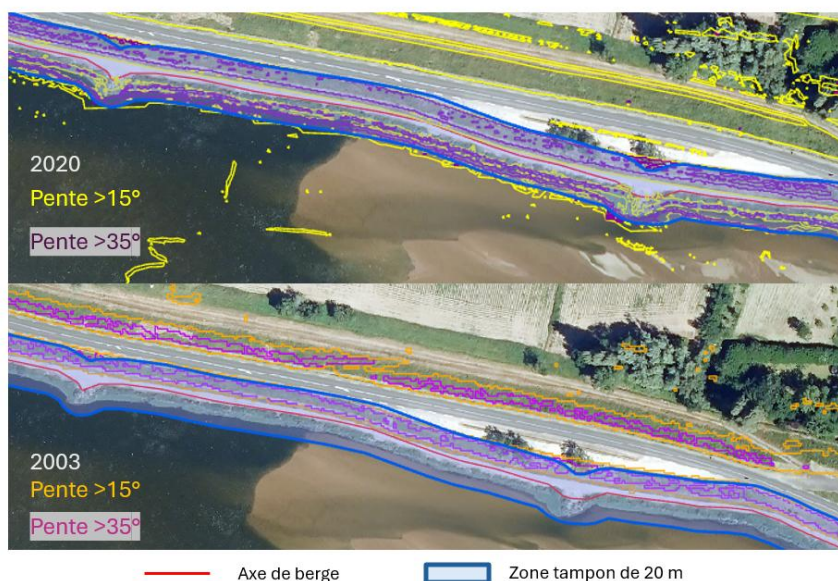


Figure 14 : Modification de l'axe de berge de Saint-Mathurin-sur-Loire

On peut également vérifier la fiabilité de ces zones buffer par rapport à la réalité en regardant si elles passent bien par les lignes de berges définies par la BD SIEL de la DREAL. C'était le cas pour nos différentes zones et permet de confirmer la cohérence de la méthode pour délimiter les berges.

4.3.5. Extraction des rasters de berges

A partir de ces zones tampon de berges, on réalise une « extraction par masque » des rasters des différentes années et on obtient alors une zone de raster de berge pour chaque rive (figure 15). C'est à partir de ces rasters de berges que vont s'effectuer les calculs d'estimation de volume comme ils comprennent uniquement les zones de ruptures de pente correspondant à la berge que l'on a identifié avant.

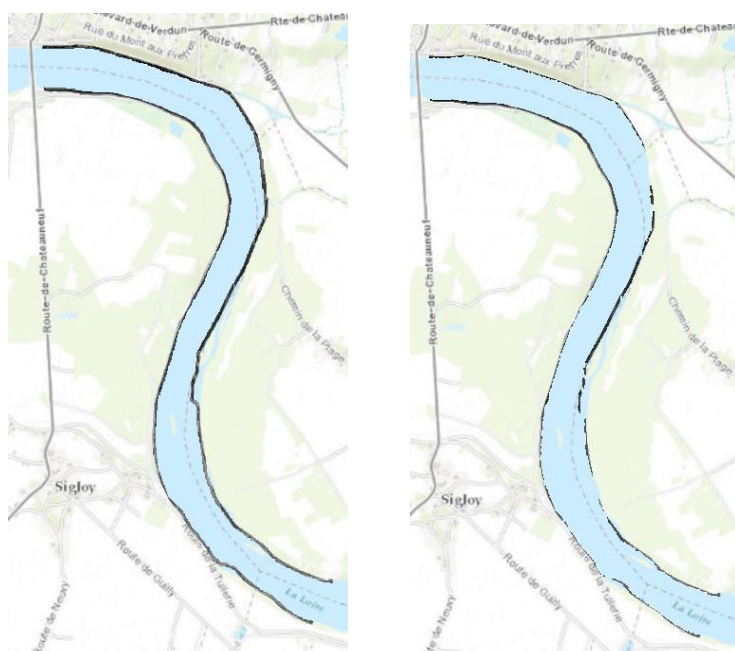


Figure 15 : Rasters de berges après extraction de la zone tampon de 20 m pour 2020 à gauche et 2003 à droite

4.3.6. Détermination des zones de dépôt et d'érosion

Pour comparer les rasters de 2020 et 2003 et donc déterminer les zones de dépôt et d'érosion, on utilise l'outil de géotraitement « remblais déblais » (Cut and Fill). On rentre en entrée initiale le MNT de 2003 et en entrée résultante le MNT de 2020 ce qui permet de donner la différence d'altitude ajoutée ou perdue entre les deux périodes, 2020 par rapport à 2003 sur chaque pixel du MNT. Le facteur Z est égal à 1 car les unités x, y et z conservent la même unité de mesure puisque l'on travaille sur des pixels carrés. Lors de la réalisation du calcul par ArcGIS, la résolution de la couche raster obtenue est de 1m², il convertit automatiquement le raster de 2020 pour qu'il corresponde à celui de 2003. Cette résolution permet ainsi de ne pas effectuer de calcul supplémentaire de conversion au m² sur la table attributaire. Cette étape peut également être réalisée rapidement dès l'étape d'axe de berge sous modèle Builder (annexe 1)

On obtient alors une couche avec des gains et des pertes qui permet de se rendre compte du changement des berges. Les gains correspondent aux endroits où se sont produits du dépôt et les pertes correspondent aux zones ayant subi de l'érosion. Il existe également une catégorie de valeur inchangée dans le cas où il n'y aurait eu aucune évolution mais cela n'est pas le cas sur nos zones. On peut alors localiser les sites d'érosion et de dépôt sur chacun des rasters (figure 16).



Figure 16 : Exemple de couche de remblais déblais pour Marzy pour la zone de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite)

On vérifie ces résultats observés en utilisant la fonction soustraction de la calculatrice raster en faisant la soustraction du MNT de berges de 2003 à celui de 2020 (Calculatrice raster). On peut alors choisir deux classes de symbologie l'une positive et l'autre négative. Cela permet de nous assurer que les classes gains et pertes représentant l'apparition et la disparition de sédiments issues de la fonction remblais déblais correspondent bien au résultat attendu.

4.3.7 Traitement des données obtenues

A partir de la couche raster obtenue, on détermine ensuite les valeurs de volume en utilisant la table attributaire de la couche remblais déblais. Celle de la soustraction par calculatrice raster n'est pas disponible immédiatement, il faudrait réaliser des transformations notamment de conversion en entier pour l'obtenir mais comme le raster remblais déblais correspond parfaitement nous travaillons à partir de celui-ci.

Dans la table attributaire, nous avons une liste de valeurs de volumes (Volume) associés à un nombre de pixels (Count) et une aire (Area). Les champs Count et Area sont équivalents puisque la table a une résolution de 1m. La table suit des règles spécifiques, les volumes positifs associés correspondent aux

perdes, les zones avec un retrait de matériau c'est-à-dire aux volumes érodés et les volumes négatifs représentent les gains, les zones avec un ajout de matériau soit les volumes déposés. On exporte ensuite les données sous Excel.

Sous Excel, on trie les volumes positifs et négatifs pour chaque site (tri par ordre croissant) et on calcule la somme des volumes positifs et négatifs. Cela nous donne par conséquent la quantité déposée et érodée en m³ du site étudié. On en déduit ensuite un bilan global en sommant ces deux volumes positif et négatif pour connaître la quantité de sédiment totale qui a été perdue ou qui s'est ajoutée entre 2003 et 2020. On est alors en mesure de connaître la différence de volume qu'il s'est produite entre les deux périodes sur chaque zone.

On détermine également les aires de dépôt et d'érosion sur l'ensemble des zones à partir des sommes des superficies associée à chaque pixel.

Pour pouvoir comparer les résultats entre les différents sites comme ils ne présentent pas la même superficie et volume de berges, on divise les quantités de chaque volume (érodé, déposé et global) par la superficie totale (nombre de pixel total) afin d'avoir une évolution moyenne au m² pour chaque site (annexe 3).

4.3.8 Schéma récapitulatif de la méthode

La méthode développée peut se résumer sous la forme de ce schéma (figure 17).

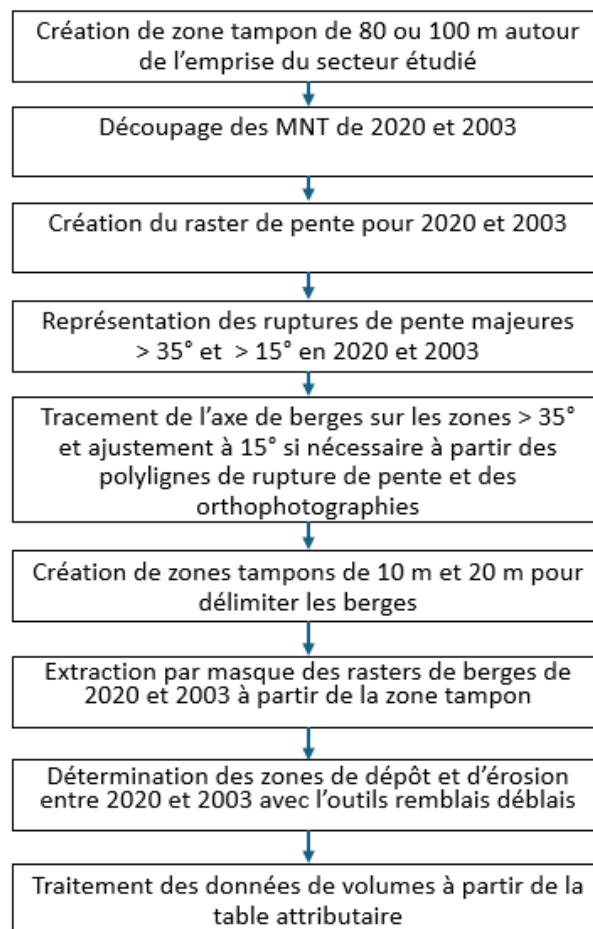


Figure 17 : Schéma de synthèse de la méthode

5. Résultats

5.1. Analyse cartographique des résultats

A partir de la méthode, nous obtenons donc deux rasters de berges par sites pour chaque zone tampon. La zone de dépôt de 20 m permet de percevoir plus facilement les zones de dépôts et d'érosion comme il présente une plus grande épaisseur par rapport à la zone de 10 m. Cela nous permet alors d'obtenir une représentation spatiale pour comprendre les processus d'érosion et de dépôt sur les territoires d'études (figures 18, 19 et 20).

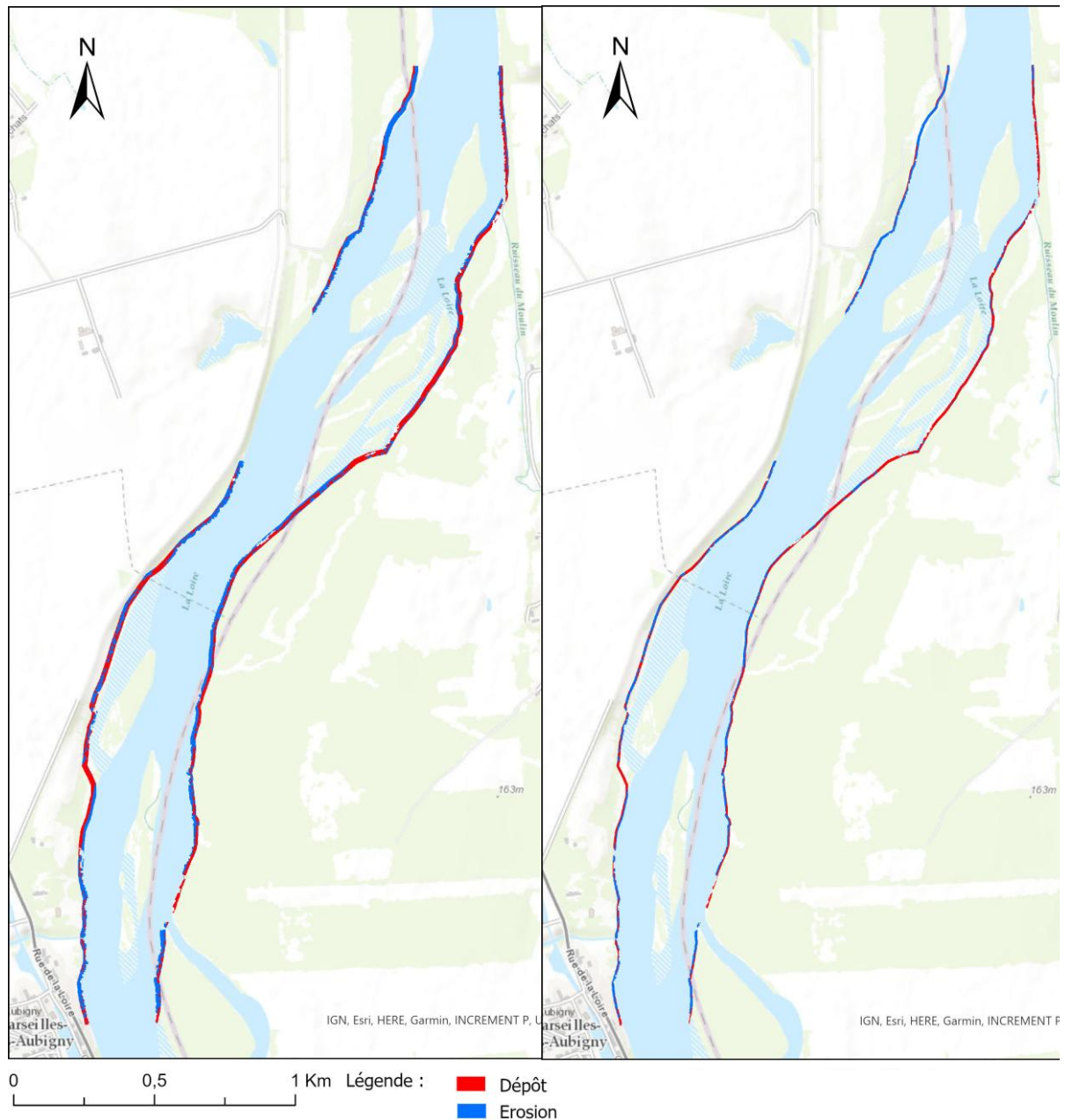
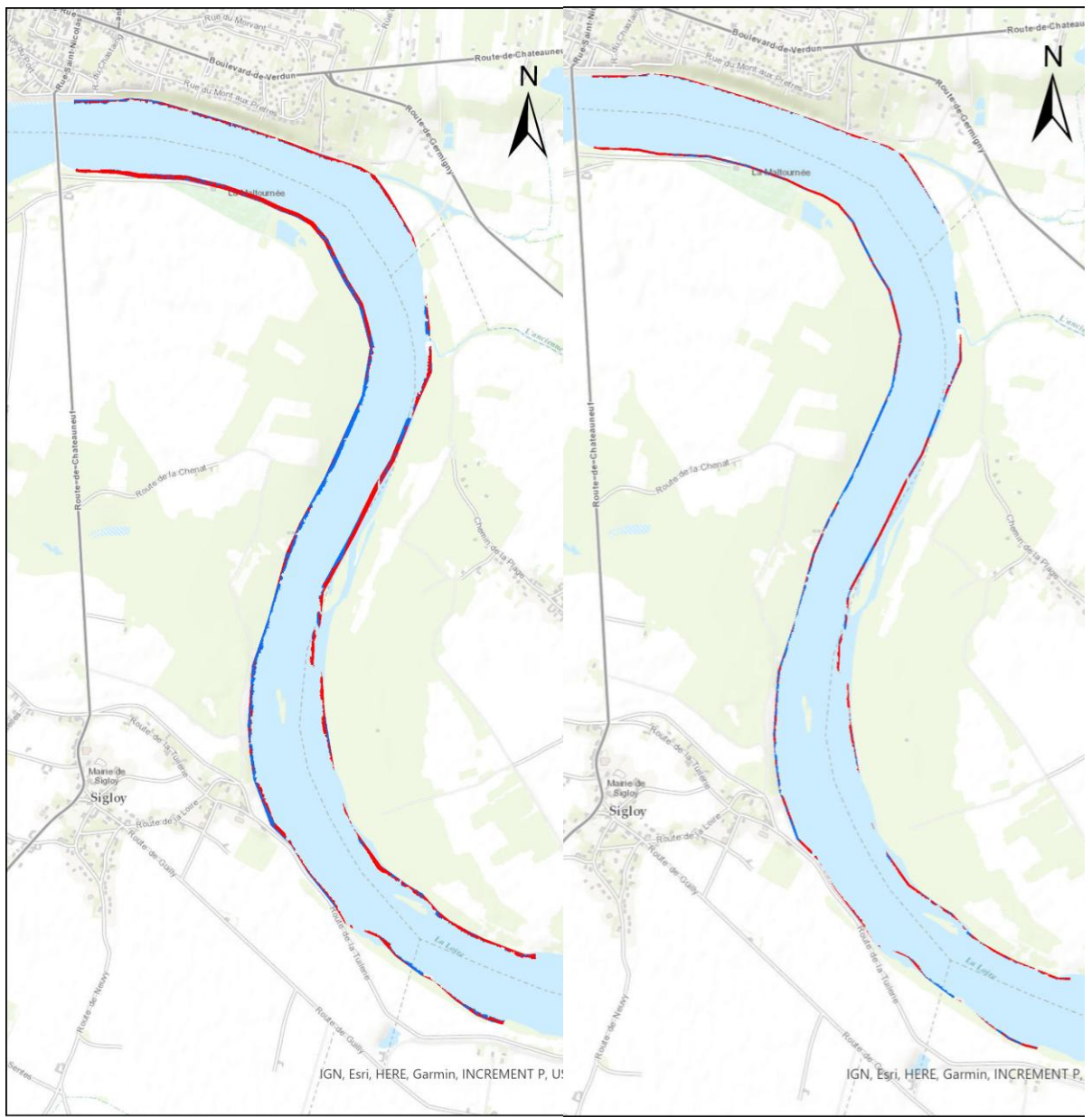
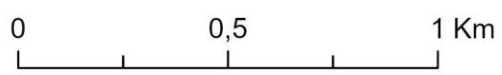
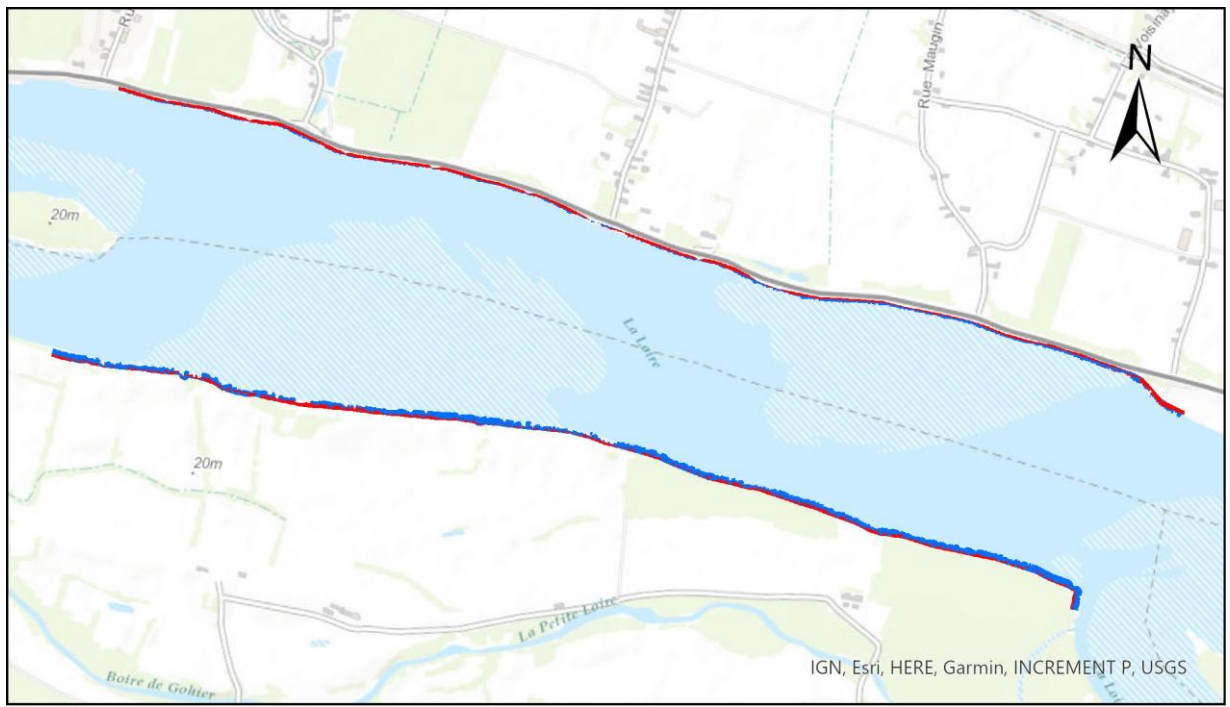


Figure 18 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Marzy avec une zone tampon de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite)



0 0,5 1 Km Légende : ■ Dépôt
■ Erosion

Figure 19 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Guilly avec une zone tampon de 20 m (à gauche) et de 10 m (à droite)



Légende : ■ Dépôt
■ Erosion

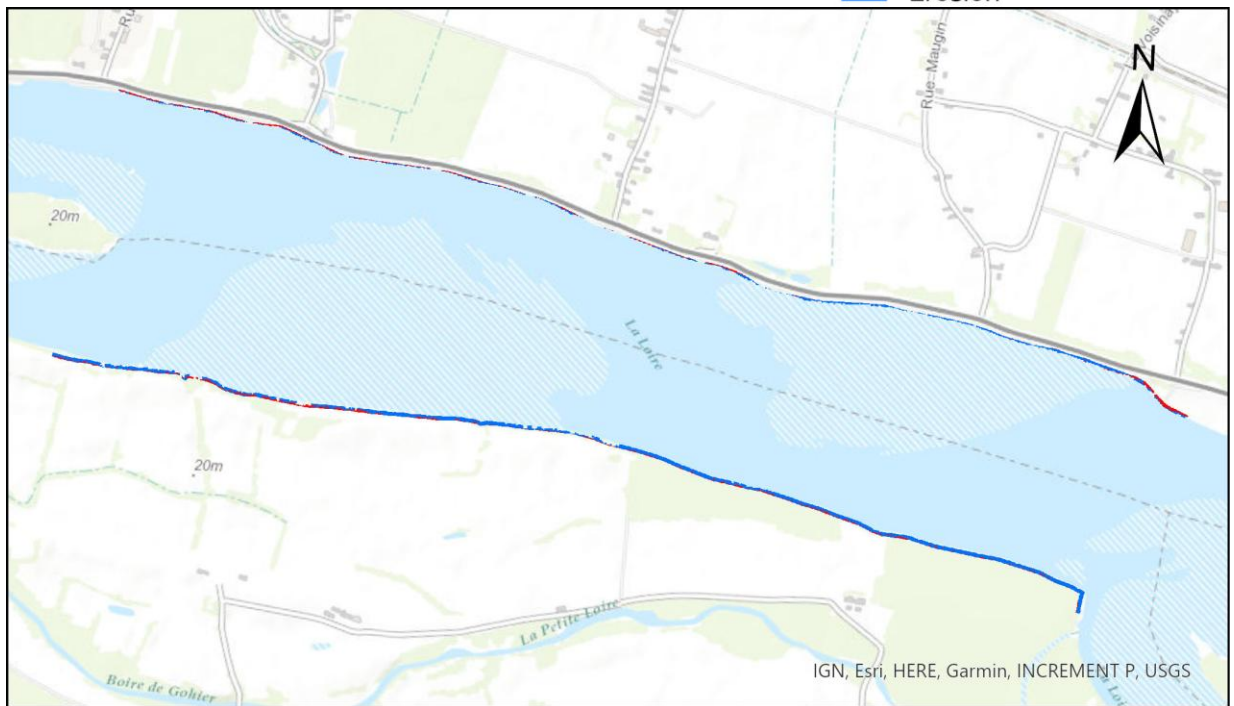


Figure 20 : Rasters de berges présentant l'érosion et le dépôt pour le site de Saint-Mathurin-sur-Loire avec une zone tampon de 20 m (en haut) et de 10 m (en bas)

A partir des rasters de berges obtenus on peut alors étudier le phénomène d'érosion et de dépôt pour chaque site.

On constate que Marzy présente de l'érosion et du dépôt sur les berges des deux rives. Les processus s'alternent entre les deux rives, par exemple on observe du dépôt en rive gauche en amont de la zone, les parties où on retrouve seulement deux îles fluviales et en rive droite on retrouve de l'érosion. Au contraire, en aval du site on remarque plutôt un dépôt au niveau des chenaux multiples en rive droite et de l'érosion en rive gauche.

Cela témoigne de l'évolution du cours d'eau. Quand on regarde les orthophotographies de 2020, on constate que ces zones de dépôts se trouvent au niveau de bancs de sables séparés par des îles végétalisées. Une nouvelle limite de berge pourra être formée dans plusieurs décennies et modifier la morphologie du cours d'eau si le système vient à se transformer en chenal unique.

Pour le site de Guilly, on observe principalement du dépôt sur l'entièreté de la rive droite et sur la gauche majoritairement en aval et légèrement. On remarque également au niveau de la partie centrale du site, une érosion importante en extrado du méandre au milieu du site et du dépôt en intrado de méandre qui sont caractéristiques de l'évolution de rivière méandrique (figure 21). L'extrado de méandre est l'extérieur de la courbe de méandre, là où la berge est concave et donc favorable à l'érosion latérale avec des vitesses d'écoulement plus importantes. L'intrado de méandre correspond à la berge convexe qui est favorable à la sédimentation car les vitesses de courant y sont moins importantes.

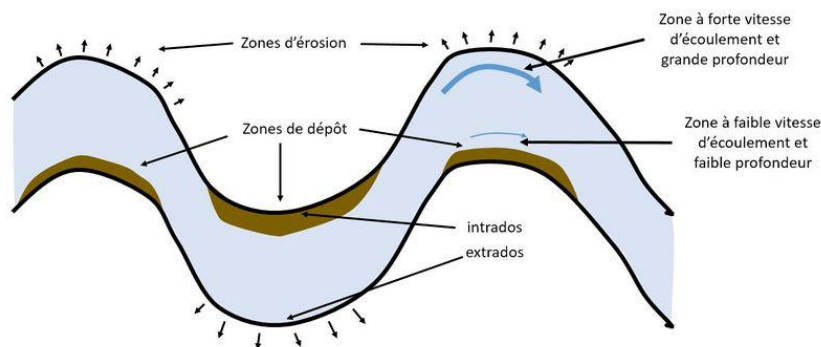


Figure 21 : (Cerema) Schéma des zones d'érosion et de dépôt d'un méandre

Pour Saint Mathurin sur Loire, on distingue une hétérogénéité par rapport aux autres sites avec un contraste fort entre la rive gauche et la rive droite des processus qui se sont produits entre 2003 et 2020. La rive gauche présente en majorité de l'érosion alors que la rive droite est caractérisée par du dépôt principalement avec une légère érosion qui sépare ce dépôt du lit mineur.

5.2. Analyse quantitative des résultats

Nous allons désormais voir ce que ces premières observations traduisent en termes de quantité. Après le traitement des tables attributaires comme expliqué dans la méthode, on obtient des volumes d'érosion et de dépôt pour chaque site d'étude pour chaque zone tampon (tableaux 2 et 3) et par conséquent un bilan global (tableau 4).

| Volume en m ³ pour une zone tampon de 10m | Marzy | Guilly | Saint-Mathurin-sur Loire |
|--|--------|--------|--------------------------|
| Déposé | 12779 | 20854 | 1644 |
| Erodé | -33181 | -18590 | -27178 |
| Bilan | -20402 | 2264 | -25534 |

Tableau 2 : Résultats de volumes sédimentaires entre 2003 et 2020 des différents sites pour une zone tampon de 10 m

| Volume en m ³ pour une zone tampon de 20m | Marzy | Guilly | Saint-Mathurin-sur Loire |
|--|--------|--------|--------------------------|
| Déposé | 21661 | 36947 | 7429 |
| Erodé | -59194 | -32843 | -45100 |
| Bilan | -37533 | 4104 | -37671 |

Tableau 3 : Résultats de volumes sédimentaires entre 2003 et 2020 des différents sites pour une zone tampon de 20 m

On se concentre principalement sur les bilans sédimentaires pour se représenter l'évolution globale des secteurs et on arrondit les résultats obtenus.

| Bilan | 10m | 20m |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Marzy | 20 400 m ³ d'érosion | 37 500 m ³ d'érosion |
| Guilly | 2 260 m ³ de dépôt | 4 100 m ³ de dépôt |
| Saint-Mathurin-sur-Loire | 25 500 m ³ d'érosion | 37 700 m ³ d'érosion |

Tableau 4 : Approximation des bilans sédimentaires sur chaque site selon l'épaisseur de la zone tampon

Marzy et Saint-Mathurin-sur-Loire ont donc subi une érosion importante entre 2003 et 2020 avec un ordre de grandeur de 20 400 à 25 500 m³ avec une zone tampon de 10 m et de 37 500 à 37 700 m³ pour une zone de 20 m. En revanche contrairement aux autres sites, un léger dépôt s'est produit pour Guilly d'environ 2 200 m³ pour la zone tampon de 10m et qui est estimé à 4 000 m³ pour celle de 20 m entre 2003 et 2020. Le processus d'érosion a donc été plus fort pour les sites de Marzy et Saint-Mathurin-sur-Loire et l'érosion et le dépôt se sont compensés au niveau de Guilly ce qui explique les plus faibles quantités globales de volume observées.

On constate également que les estimations sont différentes selon la taille des zones tampons puisqu'elles prennent davantage de surface. Les valeurs de volumes sont environ multipliées par 2 pour la zone de 20m par rapport à 10m, 1,8 fois pour Guilly et Marzy et 1,5 fois pour Saint-Mathurin-sur Loire.

Nous pouvons alors nous demander si les résultats sont proportionnels à l'épaisseur de la zone tampon. Pour cela, on calcule alors la proportion de zone de dépôt et d'érosion par rapport à la superficie totale de chaque secteur pour avoir une estimation de leur répartition sur le territoire et voir si elles sont semblables pour chaque zone tampon. Pour Marzy on trouve dans les deux cas que les berges présentent 60% de dépôt et 40% d'érosion. Pour Guilly il y a 47% de dépôt et 53% d'érosion pour les deux épaisseurs de zone tampon. Or pour Saint-Mathurin-sur-Loire, le site présente des valeurs qui diffèrent grandement, il y a 20% de dépôt et 80% d'érosion pour la zone de 10m et 40% de dépôt et 60% d'érosion pour la zone de 20m de largeur. Comme nous n'obtenons pas les mêmes

résultats pour la dernière zone, il est nécessaire d'étudier les deux zones tampons. Cette différence doit être dû aux caractéristiques du site et sera abordée dans la discussion.

Pour pouvoir comparer l'évolution sédimentaire entre les sites les uns par rapport aux autres, tous les volumes d'érosion, de dépôt et de bilan sont rapportés à la superficie totale des rasters de berges. Il ne serait pas représentatif de comparer les sites entre eux directement comme ils n'occupent pas la même aire géographique.

Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme (figure 22) comme il s'agit de valeurs quantitatives et nous donnent une évolution moyenne en cm/m^2 pour chaque zone tampon.

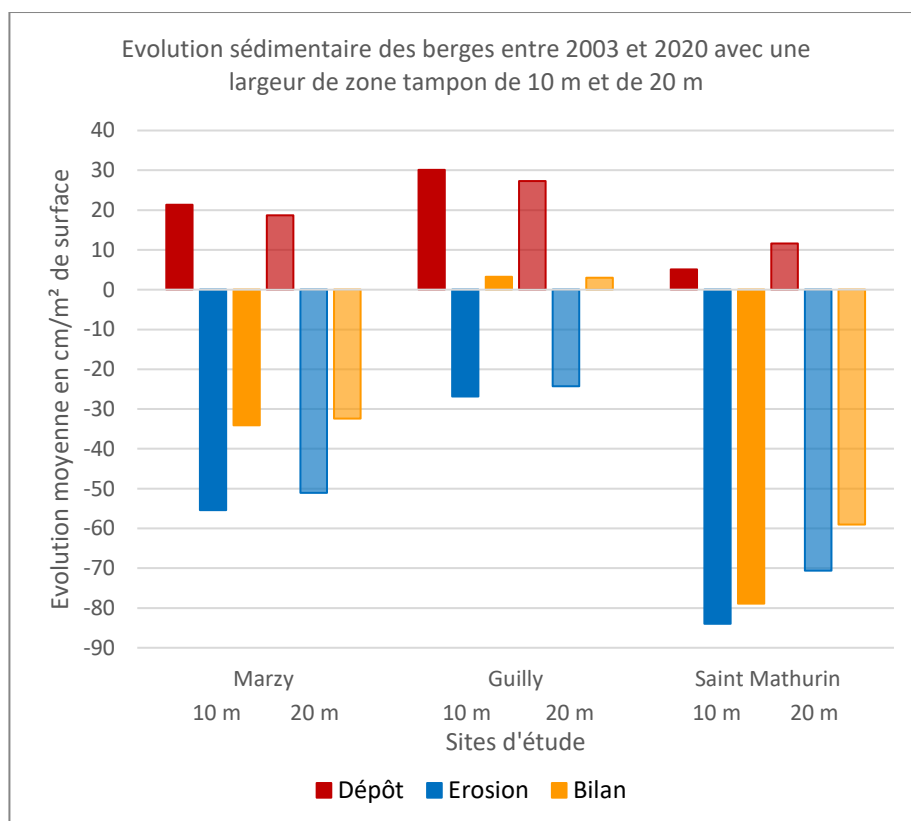


Figure 22 : Graphique représentant l'évolution sédimentaire des berges au m^2 entre 2003 et 2020 pour chaque site

Il y a eu une érosion générale entre 30 et 35 cm/m^2 sur les berges de Marzy.

Pour Guilly, nous obtenons un dépôt moyen de 3 cm/m^2 .

L'évolution moyenne de dépôt et d'érosion est presque équivalente pour les deux zones tampons pour Marzy et Guilly et ne l'est pas pour Saint-Mathurin-sur-Loire. Pour les berges de Saint Mathurin, il y a une érosion de 80 cm/m^2 avec la zone tampon de 10m et de 60 cm/m^2 avec la zone de 20m.

On voit que les processus de dépôt et surtout d'érosion sont plus accentués avec la zone tampon de 10 m.

Aussi on remarque que l'érosion globale est environ 2,5 fois plus importante à Saint-Mathurin-sur-Loire qu'à Marzy et pourtant les volumes globaux présentés auparavant sont assez proches d'où l'importance de déterminer cette évolution moyenne par m^2 . Ces résultats permettent de nous rendre compte de l'intensité des processus d'évolution sédimentaire qui s'effectuent sur chaque site.

6. Discussion et limites

6.1 Discussion sur l'aspect des résultats morphodynamiques

A partir des résultats obtenus nous pouvons comprendre et émettre des hypothèses sur l'évolution de la morpho dynamique fluviale des secteurs étudiés sur la Loire moyenne.

En regardant plus précisément les cartographies, on se rend compte qu'il y a sur chaque site une érosion en pied de berge qui se répand au bord du lit mineur et un dépôt en haut des berges (figure 16). Cela traduit alors un creusement du lit. La force de l'eau va gratter la rive et conduire à une incision du lit de la Loire et à un affaissement des berges. On peut alors supposer que le matériel situé plus haut au niveau du sommet de berge glisse le long de la pente et crée alors le dépôt perçu sur le raster. Ce phénomène a été probablement été accentué par les crues qui se sont produites entre 2003 et 2020. Une étude des conditions hydrologiques sur le site permettrait de connaître la fréquence et l'intensité des périodes de hautes eaux qui se sont produites. Sur les orthophotographies de 2003, on constate déjà ce phénomène (annexe 4) Ces crues auraient donc pu entraîner cette attaque de l'eau sur la berge et même déposer sur les sommets de berge une partie des sédiments issus du transport fluvial.

Chaque site présente des résultats différents. Guilly ne présente pas une érosion aussi forte que les autres sites car le système se compense avec l'apport du transport sédimentaire dans l'intrado du méandre. Cette absence d'érosion avec ce faible dépôt traduit donc le déplacement du méandre.

Marzy comporte une érosion de berges importante et répandue sur le site avec quelques dépôts qui coïncident avec un regroupement d'îles qui s'ensablent qui pourrait redéfinir la délimitation du trait de berge.

L'érosion est encore plus forte à Saint-Mathurin d'après l'évolution moyenne et sa répartition pose question. Nous pouvons nous demander pourquoi il y a une hétérogénéité autant marquée pour Saint-Mathurin-sur-Loire avec d'un côté du dépôt et de l'autre une forte érosion.

Pour comprendre cette constatation, on s'appuie sur le raster d'origine de la Loire de 2020. On y remarque un cordon dunaire sur la rive droite (en haut de la figure 23) qui est surélevé et témoin du dépôt observé. Il correspond en réalité à une digue qui longe tout le linéaire du secteur étudié. On l'identifie à partir des données du SIEL inventoriant les ouvrages présents sur la Loire.

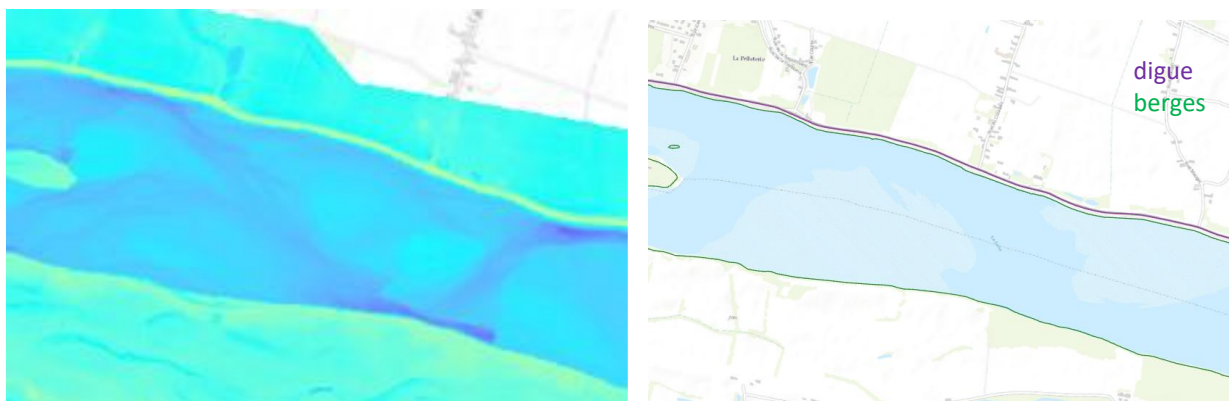


Figure 23 : Cartographie du cordon dunaire et de la digue de Saint-Mathurin-sur-Loire

Cette levée va donc pouvoir réduire l'érosion du côté et accentuer le dépôt. Le fleuve n'est plus capable d'altérer le lit majeur comme il en est séparé par la digue artificielle. Il n'y a donc pas de berge

disponible à éroder sur la rive droite. Par conséquent c'est au niveau de la rive gauche que l'érosion réalisée par la rivière va être la plus forte avec une concentration des vitesses à cet endroit. On constate même sur le raster de 2020 que le cordon dunaire de la rive gauche s'atténue ce qui peut témoigner du recul de ce trait de berge. Du côté de la digue, il y aura alors majoritairement du dépôt. On constate également ce phénomène à quelques endroits pour Marzy et Guilly (annexe 5). L'analyse approfondie des données LIDAR permet donc de comprendre les processus morphodynamiques qui se produisent sur les différents secteurs de la Loire.

6.2 Avantages et limites de la méthode

Nous allons maintenant voir les avantages et les limites de la méthode appliquée.

Le principal avantage de la méthode développée est qu'elle permet à la fois d'avoir des estimations de l'érosion des berges sous forme volumétrique et cartographique. Ces deux approches combinées sont complémentaires et permettent d'analyser comment les processus d'érosion et de dépôt se sont réalisés. Avec la cartographie, on se rend compte des endroits où les processus s'effectuent mais on ne sait pas en quelle quantité. On peut savoir quel processus domine sur la zone avec les bilans et savoir si l'un a été majoritaire par rapport à l'autre ou s'ils sont équivalents en les regardant séparément. On peut même les comparer entre eux en les rapportant à une même superficie et pouvoir analyser les processus sur les différents styles fluviaux.

Aussi la méthode présente une certaine fiabilité car elle comprend l'analyse des données LIDAR des deux années étudiées et une vérification à partir des orthophotographies. Le fait d'avoir plusieurs sources de données permet ainsi de s'assurer de la bonne délimitation des berges et que cela représente au mieux la réalité. On s'appuie également sur les données de la DREAL et du SIEL pour les vérifications.

La limite principale de ce travail provient des données de 2003. Comme elles ne contiennent pas de données bathymétriques, elles ne présentent pas l'entièreté des berges et par conséquent on a un manque d'information et on ne peut pas estimer le volume réel d'érosion de berges (zones vides de la figure 24). On connaît seulement les taux de la partie immergée et pas celles du pied de berge.

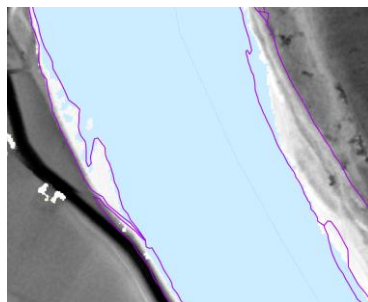


Figure 24 : Manque d'information des données de 2003 par rapport à la délimitation des berges réalisée manuellement pour percevoir le manque de données

Cette limite permet aussi d'assimiler les conditions de réalisation de la méthode. Si nous avions les données bathymétriques de 2003, la méthode présentée resterait exactement la même. La seule différence serait que les couches de remblais/déblais soient plus complètes. On ne ferait en aucun cas directement la soustraction d'un raster moins l'autre car on comparerait tous les compartiments du système fluvial, le lit mineur et la plaine alluviale ensemble et les variations sédimentaires observées

ne correspondraient pas uniquement à celles des berges. La réalisation de la délimitation des berges est donc essentielle dans ce projet.

Aussi concernant les données, le fait que les résolutions des rasters soient différentes n'a pas d'impact sur les résultats obtenus comme le logiciel les convertit directement à la même unité et permet de ne pas faire de calcul de conversion qui peuvent être source d'erreur. Sinon on pourrait également rééchantillonner la taille des pixels de chaque raster (resample) mais cela ne présentait pas de réel intérêt ici.

Nous pourrions penser que le traçage manuel de l'axe de berge est une autre limite du projet mais en réalité non car cela permet de s'assurer d'avoir une bonne délimitation des berges. L'intérêt de l'automatisation sous modèle Builder est d'accélérer le traitement car cela prend du temps mais elle serait problématique pour l'axe de berge. En traçant directement l'axe comme on ne peut pas le faire directement par le logiciel, il n'y a pas de confusion possible avec les autres nombreuses ruptures de pentes que le logiciel pourrait assimiler à des berges.

Nous pouvons aussi discuter du choix de la zone tampon qui facilite le traitement des données. Il a été choisi de faire une étude de sensibilité avec des valeurs de 10 m et 20 m car ces valeurs étaient cohérentes par rapport aux épaisseurs de ce que l'on présume être la berge à partir des orthophotographies. Ces valeurs ont été choisies pour faire en sorte que la zone de raster de berge soit assez étendue afin d'avoir des données raster à comparer entre 2020 et 2003 comme nous avons vu que pour 2003 elles étaient limitées. En revanche, il ne faut pas que ces zones soient plus grandes, 20 m correspond à l'étendue maximale car ça ajouterait aux résultats des valeurs qui ne correspondent pas aux berges.

Entre les deux, on ne peut pas dire qu'il y a une bonne et une mauvaise zone tampon car il n'y a pas distance exacte qui définit la berge. Il faudrait réaliser plus d'études, réaliser des profils ou aller directement sur le terrain pour connaître l'étendue exacte. Les deux zones prennent bien chacune les pentes attendues dans les deux cas. La zone de 10 m comprend parfaitement la limite de berge au niveau du lit mineur et celle de 20 m également du fait de l'absence de données bathymétriques de 2003, elle s'étend juste 5m plus loin. La zone de raster de berge de dépôt et d'érosion à la fin de méthode représente souvent moins de 20 m et est plutôt équivalente à 15 m en réalité comme la partie en eau n'est pas prise en compte dans les calculs.

Elles sont aussi intéressantes à comparer. Nous avons des résultats semblables pour les deux zones pour Marzy et Guilly et elle était accentuée pour Saint-Mathurin-sur-Loire pour la zone de 10 m. Comme la surface est plus petite elle permet davantage de se rendre compte de la dominance de l'érosion. Elle est multipliée par 1,3 en passant à la zone tampon de 10 m par rapport à 20 m et cela nous permet d'avoir un ordre de grandeur de l'estimation de l'érosion.

7. Conclusion

Ce Projet de Recherche Innovation présente une méthode complète qui permet d'estimer précisément les processus d'érosion de berges sur des sites de la Loire moyenne à partir des données LIDAR topobathymétriques. Ces données très précises ont permis d'atteindre cet objectif.

L'état de l'art a permis de connaître les paramètres nécessaires à la délimitation des berges comme la distinction des pentes et l'utilisation des orthophotographies en plus des MNT et de voir le potentiel du LIDAR. La méthode développée repose sur l'identification des ruptures de pente les plus importantes qui permet de délimiter les zones de berges avec une vérification par orthophotographie. A partir de cela les zones de berges sont extraites des MNT et permettent de comparer les berges des deux années étudiées et d'obtenir des valeurs d'érosion et de dépôt de façon cartographique et quantitative.

L'application de la méthode sur les sites de Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire qui présentent différents styles fluviaux a permis de mettre en évidence différentes dynamiques sédimentaires.

On a une érosion des berges fortes de 50 cm/m^2 pour Marzy et qui varie de 60 à 80 cm/m^2 pour Saint-Mathurin-sur-Loire selon la zone tampon de 10 ou 20 m accentuée par la digue présente sur l'ensemble de la rive droite. Au contraire pour Guilly, un léger dépôt de 3 cm/m^2 s'est effectué entre 2003 et 2020 car les processus de dépôt et d'érosion se sont compensés ce qui traduit une migration du méandre. Même si elle présente une limite importante liée à l'absence de données bathymétriques pour 2003, la méthode donne des résultats cohérents et est capable de donner une estimation réelle de l'érosion de berges à partir de ces zones tampons. Les zones tampons de 10 m et 20 m permettent de confirmer les tendances sédimentaires observées et apportent de la précision en les utilisant pour comparer l'évolution moyenne.

La méthode étant détaillée, elle pourra être reproduite sur l'ensemble de la Loire Moyenne. Elle permettra alors de connaître l'ensemble des processus d'érosion et de dépôt sur tout son linéaire. Dans une poursuite de cette étude, il serait envisageable de comparer les volumes d'érosion des secteurs qui présentent les mêmes styles fluviaux que ceux étudiés dans ce projet sur une même distance de tronçon. Nous pourrions ainsi voir si les ordres de grandeurs de volumes sédimentaires sont les mêmes pour confirmer les valeurs obtenues et savoir si elles sont spécifiques à chaque style fluvial. Cela nous permettrait également de savoir l'impact des aménagements anthropiques sur l'érosion par exemple en comparant les résultats de Saint-Mathurin-sur-Loire avec un autre secteur en tresse où il n'y a pas de digue. La méthode pourrait également être adaptée pour les îles fluviales et les barres sédimentaires. D'autres études pourraient également à partir de ces résultats essayer de déterminer un lien entre l'érosion et l'incision du fleuve.

Bibliographie

Spiekermann, Raphael, Betts, Harley, Dymond, John, Basher, Les. Volumetric measurement of river bank erosion from sequential historical aerial photography. ScienceDirect [en ligne]. 2017, 296, p.193-208. Disponible sur :

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X17303586>>

C. De Rose, Ronald, R. Basher, Les. Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. ScienceDirect [en ligne]. 2011, Geomorphology , 126, p.132-147. Disponible sur :

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10004861>>

Rhoades, Erica L., O'Neal, Michael A., Pizzuto, James E. Quantifying bank erosion on the South River from 1937 to 2005, and its importance in assessing Hg contamination. ResearchGate [en ligne]. 2009, Applied Geography, 29, p.125-134. Disponible sur :

<https://www.researchgate.net/publication/248337964_Quantifying_bank_erosion_on_the_South_River_from_1937_to_2005_and_its_importance_in_assessing_Hg_contamination>

Grove, James, Crocke, Jacky, Thompson, Chris. Quantifying different riverbank erosion processes during an extreme flood event. Research Gate [en ligne]. 2013, Earth Surface Processes and Landforms, 38, p.1393-1406. Disponible sur :

<https://www.researchgate.net/publication/263162319_Quantifying_different_riverbank_processes_during_an_extreme_flood_event>

Andréault, Alex, Rodrigues, Stéphane, Gaudichet, Corentin, Wintenberger, Coraline. Statistically derived morphological signatures of large river channels extracted from topo-bathymetric LiDAR data. Wiley [en ligne]. 2023, Earth Surface Processes and Landforms, 49, 2, p.804-820. Disponible sur :

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.5741>>

Latapie, A., Camenen, B., Rodrigues, S., Paquier, A., Bouchard, J.P., Moatar, F. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. Science Direct [en ligne]. 2014, Catena, 121, p.1-12. Disponible sur :

<<https://geosciences.univ-tours.fr/images/media/20140617153537-pdffft.pdf>>

LATAPIE, Audrey. *Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne*. Thèse de doctorat : Sciences de la Terre et de l'Environnement. Tours : Université François Rabelais, 2011, 279 p. Disponible sur :

< <https://theses.hal.science/file/index/docid/644961/filename/these-a-latapie.pdf>>

GRIVEL, Stéphane. *La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion*. Thèse de doctorat : Géographie et Aménagement. Vincennes-Saint Denis : Université Paris VIII, 2008, 519 p. Disponible sur :

<<https://theses.hal.science/tel-00455981v1>>

CLAUDE, Nicolas. *Processus et flux hydro sédimentaires en rivière sablo graveleuse : influence de la largeur de section des bifurcations en Loire moyenne (France)*. Thèse de doctorat : Sciences de la terre, spécialité Sédimentologie fluviale. Tours : Université François Rabelais, 2012, 364 p. Disponible sur :

< <https://geosciences.univ-tours.fr/images/media/20140506175638-claude.pdf>>

Dubiez, Xavier. Utilisation du LIDAR de l'iPhone pour la caractérisation de l'érosion des berges. HAL open science [en ligne]. 2023, 46p. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04410479v1/file/DUBIEZ%20Xavier.pdf>

Fournier, Frédéric. Mesure de l'érosion principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. AIHS [en ligne]. 1965, Planification des réseaux hydrologiques, 67, p.343-445. Disponible sur : https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/11334.pdf

Awadallah, Mahmoud O.M., Juárez, Ana, Alfredsen, Knut. Comparison between Topographic and Bathymetric LIDAR Terrain Models in Flood Inundation Estimations. Research Gate [en ligne]. 2022, Remote sensing, 14, 227, 17 p. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/357621172_Comparison_between_Topographic_and_Bathymetric_LiDAR_Terrain_Models_in_Flood_Inundation_Estimations

Sites :

GEOSERVICES. *BDOrtho* [en ligne]. 2021. Disponible sur : <https://geoservices.ign.fr/bdortho>

DREAL CENTRE-VAL-DE-LOIRE. *Les cartographies du SIEL*. Disponible sur : <https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/les-cartographies-du-siel-r561.html>

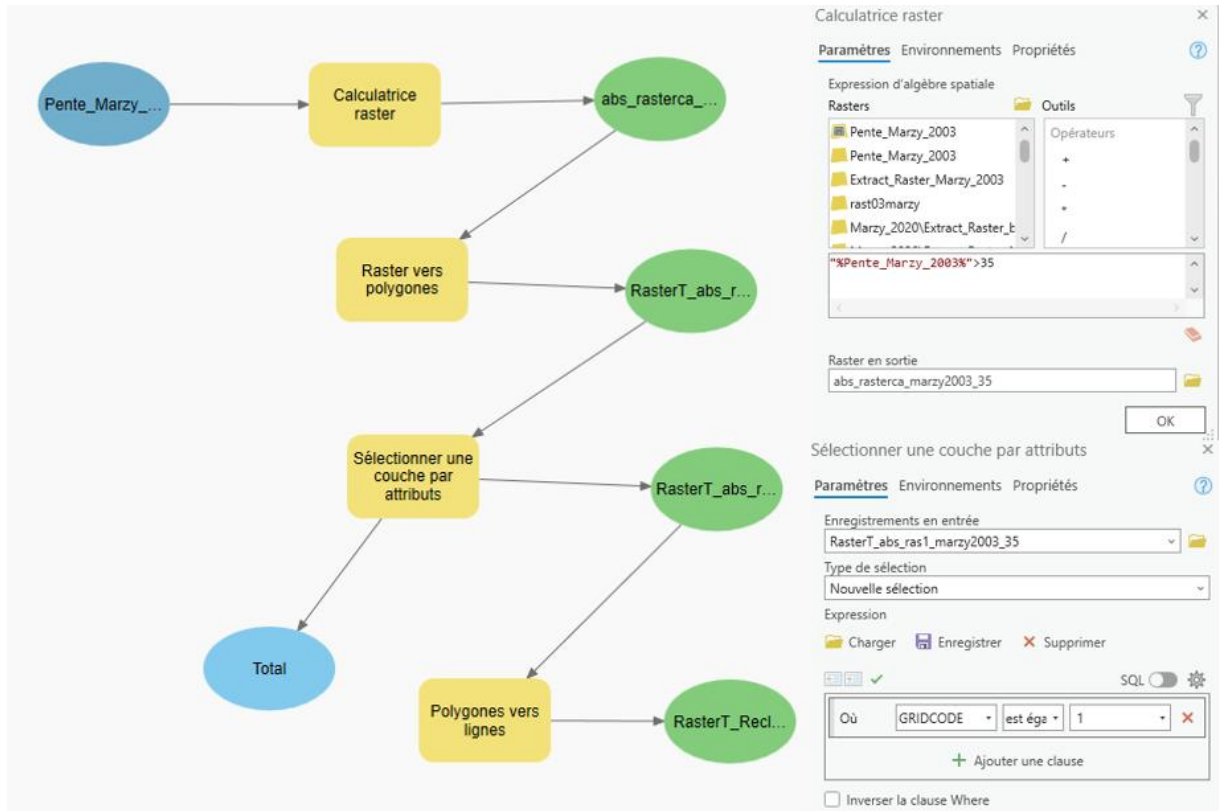
ESRI ARCGIS PRO. Remblais déblais (Spatial Analyst). Disponible sur : <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/cut-fill.htm>

WIKIGEOTECH. CEREMA. *Extrados*. Disponible sur : http://wikigeotech.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Extrados_%28HU%29

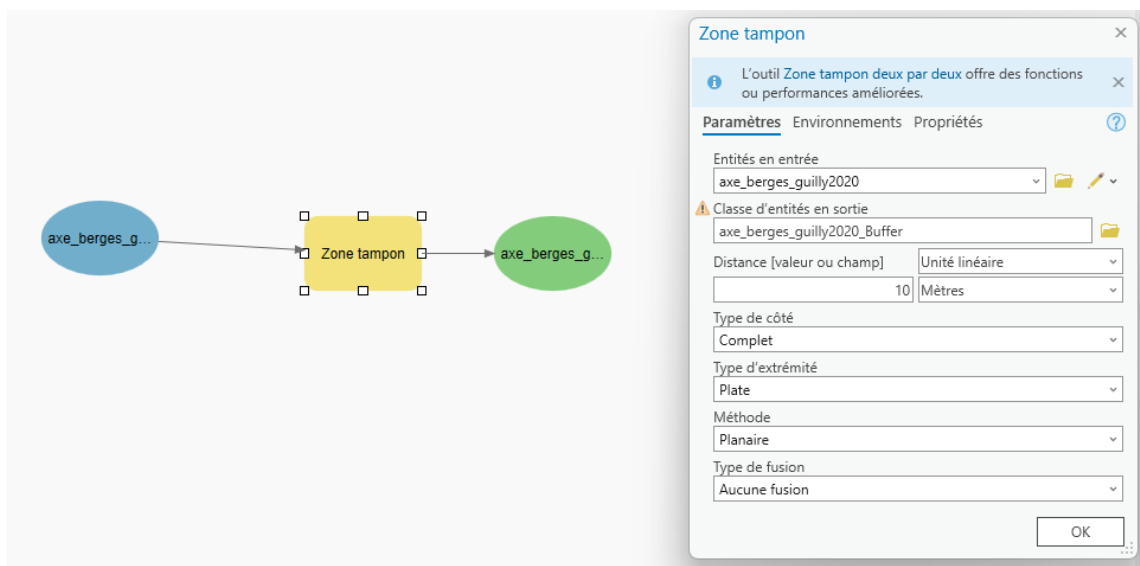
Annexes

Annexe 1 : Modèles Builder

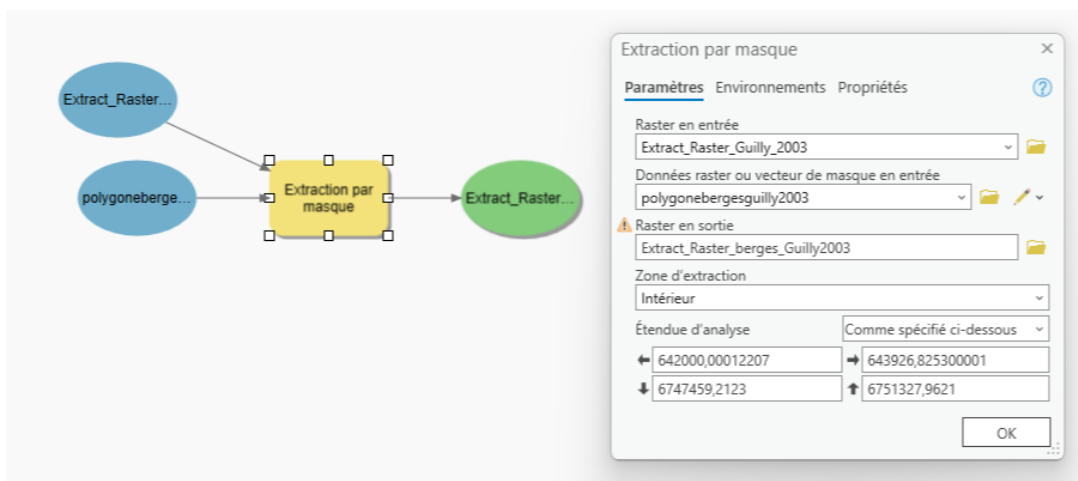
Modèle Builder 1 et 2 : détermination rupture de pentes, un pour les pentes >35° et le même pour les pentes >15°) à faire pour chaque MNT de chaque site et de chaque année (6 fois au total)



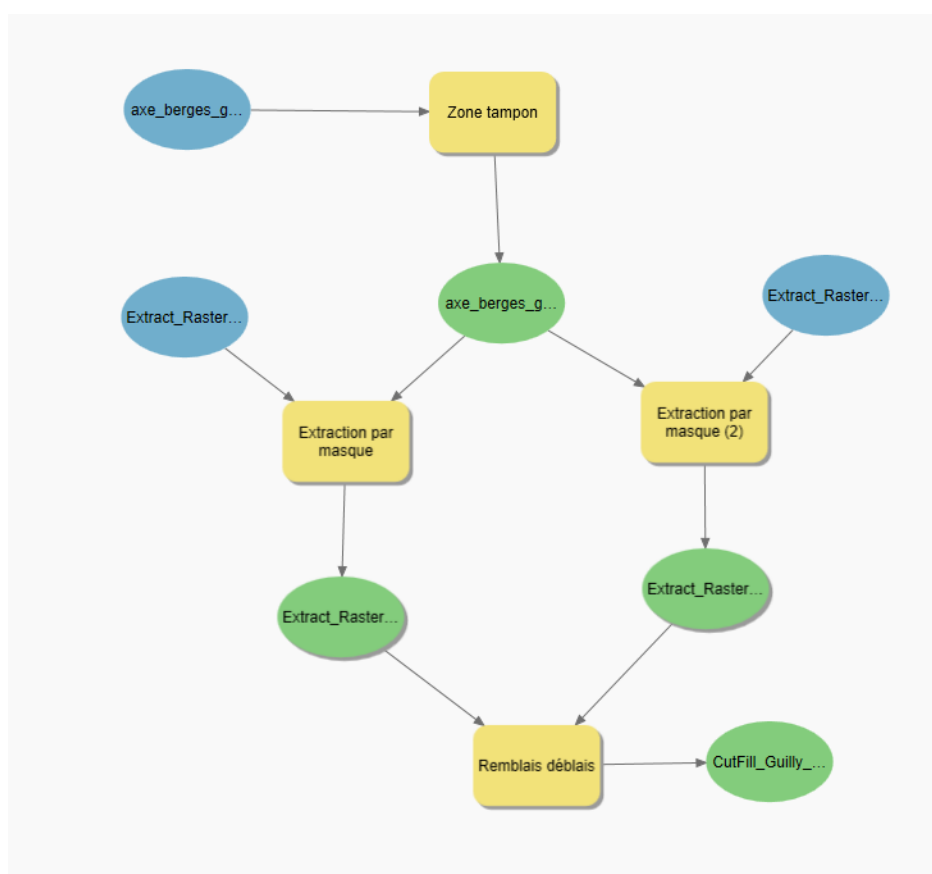
Modèle Builder 3 : création de la zone tampon de 20 m (10 m de chaque côté) pour celui de 10 m ce serait (5 m de chaque côté)



Modèle Builder 4 : extraction par masque du raster d'une année selon la zone tampon qui forme les polygones

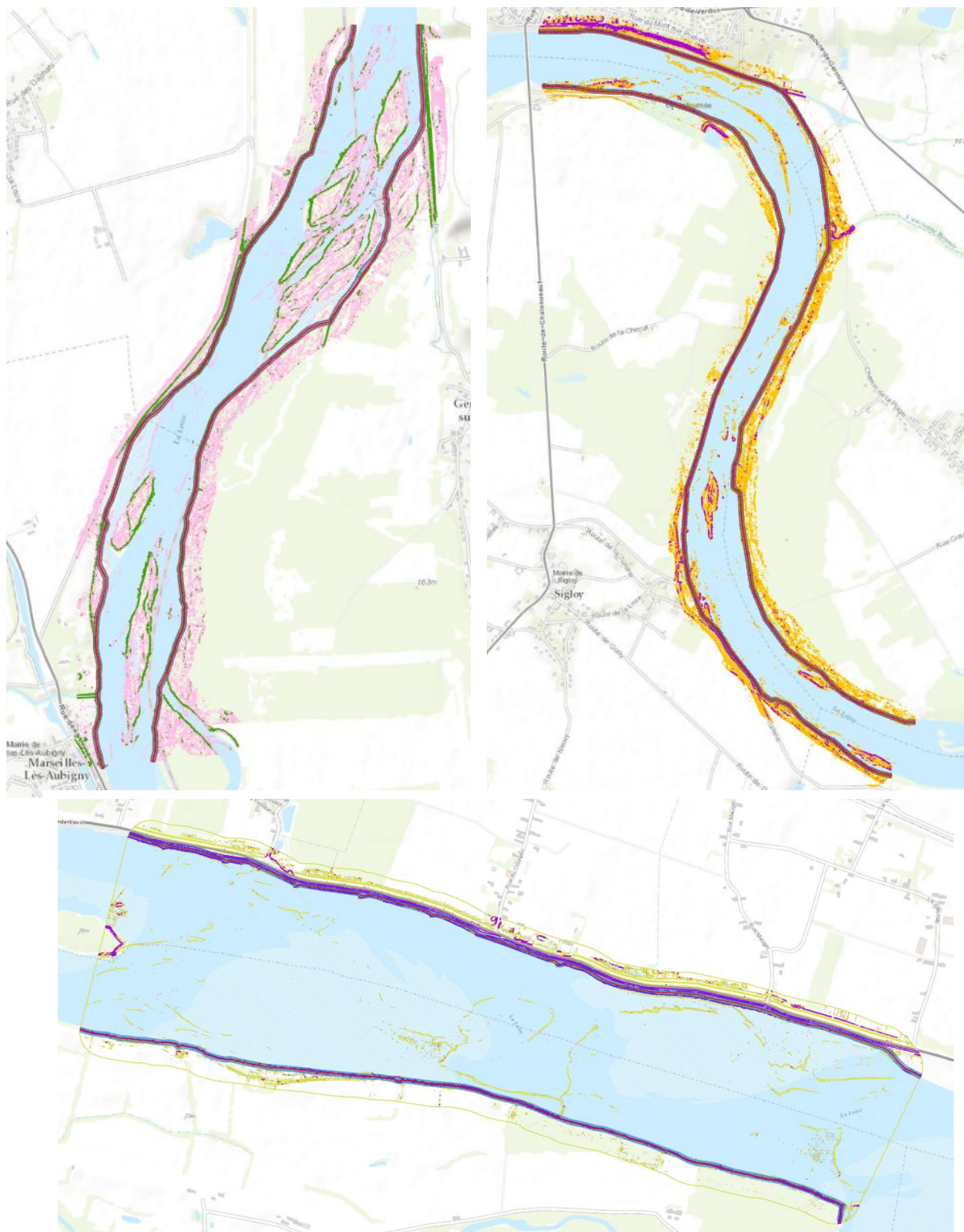


Modèle Builder 5 : simplification des modèles Builder 3 et 4 et création de la couche remblais déblais



Annexe 2 : Couches obtenues

Résultats des modèles Builder 1, 2 et 3 pour 2020 avec une zone tampon de 20 m en bleu autour de l'axe de berge en rouge montrant les pentes supérieures à 35° (rose pour Marzy, orange pour Guilly et jaune pour Saint-Mathurin) et à 15° (vert pour Marzy et violet pour Guilly et Saint-Mathurin)



Annexe 3 : Tableaux de résultats

Marzy 10m

| Volume m3 | |
|-----------|-------------|
| Déposé | 12778.7682 |
| Erodé | -33180.7373 |
| Bilan | -20401.9691 |

| Surface m2 | |
|-------------------|-------|
| Déposé | 28319 |
| Erodé | 31548 |
| Superficie totale | 59867 |

Rapport surfacique
0.47303189 47% de la surface présente du dépôt

0.52696811 53% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|-------------|
| Déposé | 21.3452623 |
| Erodé | -55.4240855 |
| Bilan | -34.0788232 |

dépôt de 21cm/m2 en moyenne

érosion de 55cm/m2 en moyenne

érosion de 34cm/ m2 en moyenne

Marzy 20m

| Volume m3 | |
|-----------|-------------|
| Déposé | 21660.7702 |
| Erodé | -59194.0573 |
| Bilan | -37533.2871 |

| Surface m2 | |
|-------------------|--------|
| Déposé | 53883 |
| Erodé | 61974 |
| Superficie totale | 115857 |

Rapport surfacique
0.46508195 47% de la surface présente du dépôt

0.53491805 53% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|-------------|
| Déposé | 18.6961256 |
| Erodé | -51.0923443 |
| Bilan | -32.3962187 |

dépôt de 19cm/m2 en moyenne

érosion de 51cm/m2 en moyenne

érosion de 32cm/ m2 en moyenne

Guilly 10m

| Volume m3 | |
|-----------|-------------|
| Déposé | 20854.1786 |
| Erodé | -18589.8878 |
| Bilan | 2264.29 |

| Surface m2 | |
|-------------------|-------|
| Déposé | 41876 |
| Erodé | 27438 |
| Superficie totale | 69314 |

Rapport surfacique
0.604 60% de la surface présente du dépôt

0.396 40% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|---------|
| Déposé | 30.087 |
| Erodé | -26.820 |
| Bilan | 3.267 |

dépôt de 30cm/m2 en moyenne

érosion de 27cm/m2 en moyenne

dépôt de 3cm/ m2 en moyenne

Guilly 20m

| Volume m3 | |
|-----------|------------|
| Déposé | 36947.1815 |
| Erodé | -32842.968 |
| Bilan | 4104.2138 |

| Surface m2 | |
|-------------------|--------|
| Déposé | 81050 |
| Erodé | 54395 |
| Superficie totale | 135445 |

Rapport surfacique
0.59839787 60% de la surface présente du dépôt

0.40160213 40% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|-------------|
| Déposé | 27.278365 |
| Erodé | -24.2481952 |
| Bilan | 3.0301698 |

dépôt de 27cm/m² en moyenne
érosion de 24cm/m² en moyenne
dépôt global de 3cm/m² en moyenne

Saint Mathurin 10 m

| Volume m ³ | |
|-----------------------|-------------|
| Déposé | 1644.38739 |
| Erodé | -27178.0631 |
| Bilan | -25533.6757 |

| Surface m ² | |
|------------------------|-------|
| Déposé | 7165 |
| Erodé | 25189 |
| Superficie totale | 32354 |

Rapport surfacique
0.22145639 22% de la surface présente du dépôt
0.77854361 78% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|-------------|
| Déposé | 5.0824856 |
| Erodé | -84.002173 |
| Bilan | -78.9196874 |

dépôt de 5cm/m² en moyenne
érosion de 84cm/m² en moyenne
érosion de 79cm/ m² en moyenne

Saint Mathurin 20m

| Volume m ³ | |
|-----------------------|-------------|
| Déposé | 7429.34028 |
| Erodé | -45100.0842 |
| Bilan | -37670.7439 |

| Surface m ² | |
|------------------------|-------|
| Déposé | 26491 |
| Erodé | 37347 |
| Superficie totale | 63838 |

Rapport surfacique
0.41497227 41% de la surface présente du dépôt
0.58502773 59% de la surface a été érodée

| Evolution moyenne | |
|-------------------|-------------|
| Déposé | 11.6378024 |
| Erodé | -70.6477086 |
| Bilan | -59.0099062 |

dépôt de 12cm/m² en moyenne
érosion de 71cm/m² en moyenne
érosion de 59cm/ m² en moyenne

Zone tampon 10 m

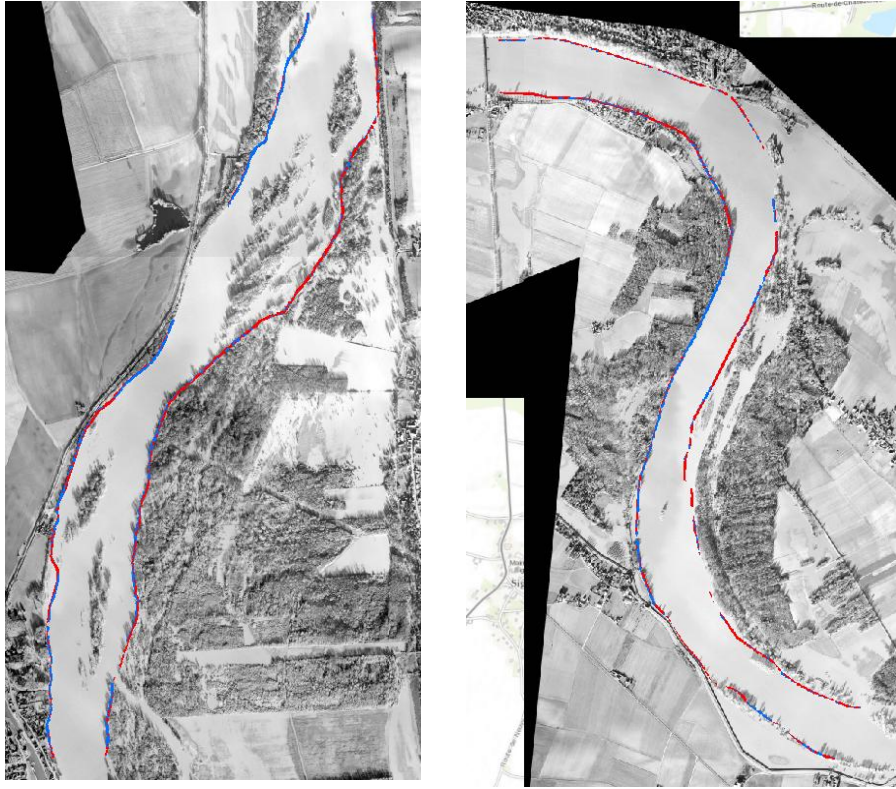
| Volume m ³ | Marzy | Guilly | Saint-Mathurin |
|-----------------------|--------|--------|----------------|
| Déposé | 12779 | 20854 | 1644 |
| Erodé | -33181 | -18590 | -27178 |
| Bilan | -20402 | 2264 | -25534 |

Zone tampon 20 m

| Volume m ³ | Marzy | Guilly | Saint-Mathurin |
|-----------------------|--------|--------|----------------|
| Déposé | 21661 | 36947 | 7429 |
| Erodé | -59194 | -32843 | -45100 |
| Bilan | -37533 | 4104 | -37671 |

Rapport 1.83967258 1.812721 1.475327015

Annexe 4 : Orthophotographies de décembre 2003 pour Marzy et Guilly (DREAL) et couche de volume d'érosion et de dépôt de berge



Annexe 5 : Levées issues des sonnées de la BD SIEL cartographiées en violet



Directeur de recherche :

Stéphane Rodrigues
Alex Andréault

Marie Siraud
PRI/DAE5
IMA
2025-2026

Estimation des volumes d'érosion des berges de la Loire par analyse de données LIDAR topobathymétriques : évolution des berges de la Loire Moyenne entre 2003 et 2020 sur les sites de Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire

Résumé :

Ce Projet de Recherche Innovation présente une méthode de calcul de volume d'érosion de berges à partir de données LIDAR topobathymétriques sur des sites de la Loire moyenne entre 2003 et 2020.

Elle comprend l'analyse des ruptures de pente de modèles numériques de terrain topobathymétriques et des orthophotographies pour délimiter les surfaces de berges. A partir des différents outils de traitement de géomatique (remblais déblais), elle met en évidence les processus d'érosion et de dépôt qui se produisent au niveau de Marzy, Guilly et Saint-Mathurin-sur-Loire selon différentes épaisseurs de berges représentées sous forme de zones tampon de 10 m et 20 m. Les résultats cartographiques et quantitatifs issus des tables attributaires permettent d'avoir une estimation précise de ces processus. On obtient des résultats de dépôt et d'érosion des berges avec des volumes globaux pour identifier le processus dominant sur chaque style fluvial. La réalisation d'une évolution moyenne permet de comparer les différents sites entre eux et ont permis de constater que Marzy présente de l'érosion et qu'elle est encore plus accentuée pour Saint Mathurin sur Loire à cause des aménagements anthropiques. Le site de Guilly présente lui un faible dépôt et témoigne de l'évolution de la dynamique fluviale du chenal. L'ensemble des étapes de la méthode développée sous ArcGIS est présenté afin de pouvoir être reproduite pour de nouvelles études sur l'ensemble de la Loire moyenne.

Mots Clés : érosion latérale, berges, dépôt, LIDAR, topobathymétrie , ArcGIS, MNT, raster