

Projet Recherche Innovation 2024-2025

Détection et prédiction des bifurcations alluviales : la Loire de Nevers aux Ponts-de-Cé



La Loire à Montsoreau (*Devanne, n.d.*)

Sous la direction de Stéphane Rodrigues

Antonin Cesbron et Mélissa Courteix

**Détection et prédiction des bifurcations
alluviales :
la Loire de Nevers aux Ponts-de-Cé**

Stéphane Rodrigues

Antonin Cesbron et Mélissa Courteix

2024-2025

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.

Les auteurs de cette recherche 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

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre gratitude envers notre directeur de projet, Stéphane Rodrigues, pour sa disponibilité constante tout au long de ce projet. Il a pris le temps de nous recevoir régulièrement, nous offrant ses conseils avisés et son soutien face aux difficultés rencontrées. Nous remercions également Alex Andréault pour avoir partagé avec nous certaines données essentielles à notre travail. Enfin, nous adressons nos remerciements à Jules Le Guern pour l'aide précieuse qu'il a su nous apporter ponctuellement.

SOMMAIRE

Table des matières

I.	Introduction	3
II.	Problématique de recherche et historique des précédents travaux	6
III.	Matériel et méthode	7
A.	Choix des secteurs d'études	7
1)	Test de la rétroaction de la formation d'une île sur la largeur du chenal	7
2)	Délimitation des secteurs d'études	10
B.	Détermination de la variation de largeur et du recoupement des barres sédimentaires	11
3)	Détermination de l'écart inter-transects	11
4)	Calcul de la variation de largeur et recoupement des barres	14
C.	Analyses statistiques	15
IV.	Résultats	18
D.	Statistiques descriptives	18
E.	Test de normalité	19
F.	Comparaison des variations de largeur en présence et absence de barres	19
G.	Mesure de corrélation bisériale	20
H.	Identification d'une gamme favorable à la formation de barres	20
V.	Discussion	22
VI.	Conclusion	24
VII.	Bibliographie	25
VIII.	Annexes	27

Table des figures

Figure 1 : Bifurcation alluviale de la Loire moyenne (source : touraine nature)	3
Figure 2 : Étapes de la formation d'une bifurcation alluviale	3
Figure 3 : Types de barres sédimentaires formées en fonction de la valeur du ratio d'aspect (Wu et Yeh, 2005)	4
Figure 4 : Apparition d'une barre centrale dans une zone d'élargissement du chenal durant une simulation en canal artificiel (Wu et Yeh, 2005)	4
Figure 5 : Plaine d'inondation contrainte en contexte urbain à Tours (source : saiko3p)	5
Figure 6 : Bifurcation alluviale stable avec une configuration asymétrique à la Riche	5
Figure 7 : Barre déterminée à partir des cartes de végétation de la DREAL	8
Figure 8 : Évolution de la largeur du chenal pour le site n°11	9
Figure 9 : Évolution de la largeur du chenal pour le site n°7	9
Figure 10 : Sites contraints par des protections de berges	9
Figure 11 : Secteur à chenaux multiples à Berthenay (Indre et Loire)	10
Figure 12 : Secteur avec des duits et ponts à Orléans	10
Figure 13 : Micro-élargissement de la bande active	11
Figure 14 : Variation de largeur de la bande active en fonction du point kilométrique à partir du premier transect (pour les 50 premiers kilomètres)	12
Figure 15 : Fréquences cumulées croissantes des variations de largeur pour les élargissements	12
Figure 16 : Vérification de la longueur d'onde calculée à partir du seuil 1,2 (1,4 km) sur un des 35 sites tirés aléatoirement	13
Figure 17 : Vérification de la longueur d'onde calculée à partir du seuil 1,4 (11,3 km) sur un des 35 sites tirés aléatoirement	13
Figure 18 : Transect incomplet à supprimer (à gauche)	14
Figure 19 : Traitements cartographiques réalisés pour calculer les variations de largeur des transects	15
Figure 20 : Synthèse des analyses statistiques effectuées	17
Figure 21 : Variations de largeur médiane en présence et absence de barres	18
Figure 22 : Variations de largeur moyenne en présence et absence de barres	19
Figure 23 : Histogramme du pourcentage de transects intersectant au moins une barre sédimentaire en fonction des gammes de variations de largeur, pour des écarts inter-transects de 750 m	21
Figure 24 : Histogramme du pourcentage de transects intersectant au moins une barre sédimentaire en fonction des gammes de variations de largeur, pour des écarts inter-transects de 1000 m	21

Table des tableaux

Tableau 1 : Résultats des tests de détermination de la rétroaction des îles sur la largeur de la bande active	8
Tableau 2 : Synthèse des statistiques descriptives de chaque échantillon	18
Tableau 3 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk par échantillon	19
Tableau 4 : Résultats des tests de Mann et Whitney et de Student	20
Tableau 5 : Résultats du test de corrélation bisériale	20

I. Introduction

La Loire moyenne est une portion du fleuve qui s'étend sur environ 400 km, du bec d'Allier à la confluence avec la Maine. Elle est caractérisée par un style fluvial à chenaux multiples, résultant de la formation de bifurcations alluviales (*Figure 1*).



Figure 1 : Bifurcation alluviale de la Loire moyenne (source : touraine nature)

Les bifurcations alluviales se forment lorsqu'une barre sédimentaire centrale émerge à l'étiage, dans une zone d'élargissement du chenal, par l'accumulation de sédiments, due à la divergence des lignes de courant (Claude et al, 2014). La barre sédimentaire émergente est colonisée par la végétation, d'abord pionnière, puis ligneuse, qui joue un rôle clé dans le piégeage des sédiments grâce à son système racinaire (Morón et al, 2017). L'accumulation de sédiments transforme progressivement la barre en une île fluviale (Wintenberger et al, 2015), marquant l'apparition d'une bifurcation alluviale, et par conséquent, la création de chenaux multiples (*Figure 2*).

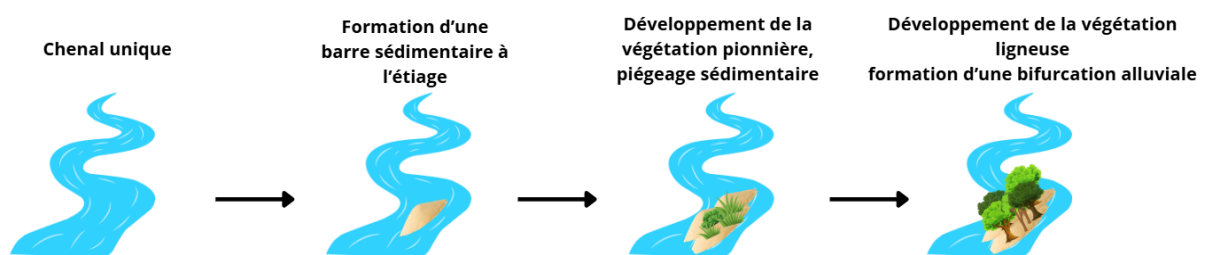


Figure 2 : Étapes de la formation d'une bifurcation alluviale

D'après les recherches bibliographiques effectuées, la formation des barres sédimentaires est soumise à trois principaux facteurs de contrôle qui sont :

- La largeur de la plaine d'inondation influence la morphologie des rivières. En effet, dans le cas des rivières anabranches, la plaine inondable est généralement large (Morón et al., 2017). Un élargissement de la plaine d'inondation peut se traduire par un élargissement de la largeur du chenal, engendrant ainsi une augmentation des surfaces exondées ou barres sédimentaires.
- Le ratio d'aspect correspond au rapport de la largeur du chenal sur sa profondeur. Ce paramètre joue un rôle sur la transition d'un type de barre sédimentaire à un autre (*Figure 3*). Les types de barres sédimentaires sont les barres centrales, les barres transverses et les barres alternes. Wu et Yeh ont défini ces correspondances : pour de faibles valeurs de ratio d'aspect,

des barres centrales ont tendance à se développer dans les zones d'élargissement, tandis que pour des valeurs de ratio d'aspect plus importantes, ce sont les barres transverses qui se développent. Enfin, lorsque ce ratio augmente encore davantage, les barres transverses sont remplacées par des barres alternes (Wu et Yeh, 2005).

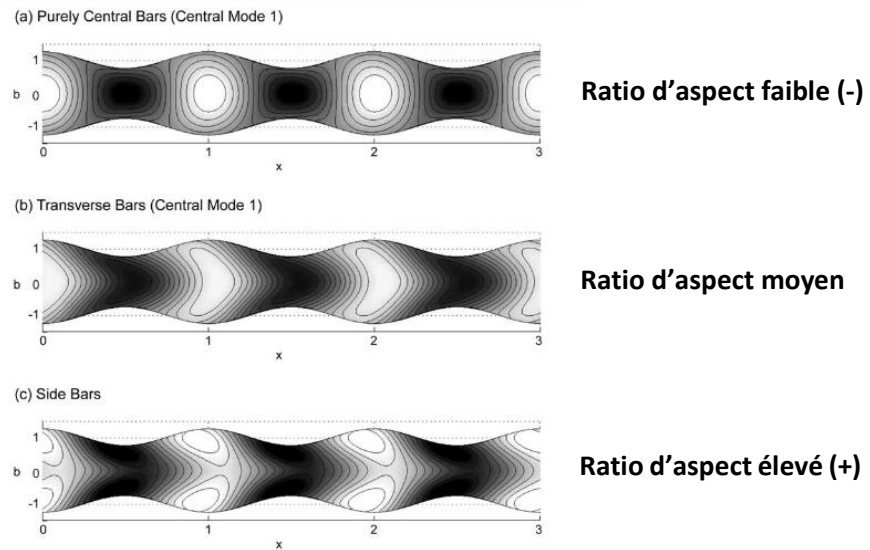


Figure 3 : Types de barres sédimentaires formées en fonction de la valeur du ratio d'aspect (Wu et Yeh, 2005)

- La longueur d'onde de variation de largeur est un paramètre crucial dans l'émergence des barres. En effet, les zones d'élargissement du chenal sont à l'origine d'une divergence des lignes de courant (Repetto et al, 2002), ce qui provoque un dépôt sédimentaire et l'émergence de barres (Figure 4).

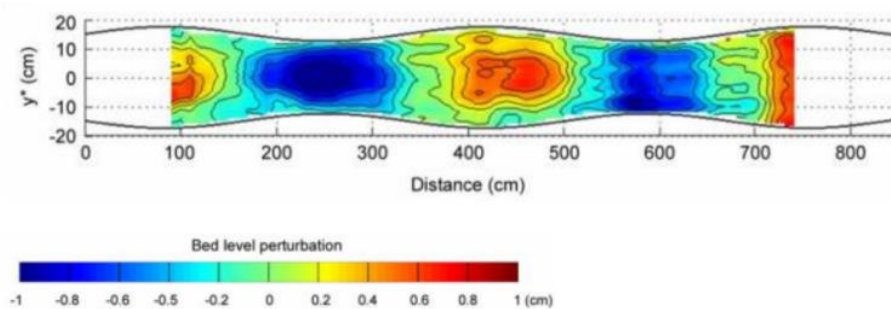


Figure 4 : Apparition d'une barre centrale dans une zone d'élargissement du chenal durant une simulation en canal artificiel (Wu et Yeh, 2005)

Une fois la barre sédimentaire émergée, les conditions hydrologiques et la largeur de la plaine d'inondation sont les principaux facteurs qui influencent la stabilisation et la transformation de la barre en île fluviale. Une plaine d'inondation restreinte (Figure 5) favorise l'augmentation de la hauteur d'eau, par resserrement de la section d'écoulement. Dans ce cas, en période de hautes eaux, les barres sont submergées par une hauteur d'eau importante et les contraintes de cisaillement sont fortes. Cela induit une migration des barres vers l'aval et un arrachement de la végétation pionnière. L'intégrité de la barre est menacée et la formation de l'île est mise en péril. Pour une large plaine d'inondation, l'eau s'étale en période des hautes eaux, limitant l'augmentation des hauteurs d'eau dans le chenal. La stabilisation des barres sédimentaires est alors favorisée car la végétation n'est pas arrachée et retient les sédiments (Morón et al, 2017).



Figure 5 : Plaine d'inondation contrainte en contexte urbain à Tours (source : saiko3p)

Enfin, pour que l'île végétalisée constitue une bifurcation alluviale pérenne, elle doit se stabiliser. Le paramètre principal qui gouverne la stabilité des bifurcations est la contrainte de Shields (ou seuil de mise en mouvement) (Bolla Pittaluga et al, 2015). Elle s'ajoute à d'autres paramètres comme le ratio d'aspect (Wang et al, 2019), l'uniformité ou non des écoulements en entrée des chenaux (Federici & Paola, 2003) et la répartition des sédiments sur la macroforme (Jing & Qin, 2023). L'influence de la contrainte de Shields diffère selon la configuration de la bifurcation (symétrique ou asymétrique). Dans le cas de bifurcations asymétriques, celles-ci sont stables pour toutes les contraintes de Shields considérées. Cependant dans le cas de bifurcations asymétriques, seules les valeurs de contraintes de Shields intermédiaires sont favorables à la stabilité des bifurcations, si cette contrainte vient à diminuer ou augmenter fortement, alors la bifurcation alluviale perdra de sa stabilité. En général, les bifurcations alluviales tendent vers des configurations asymétriques plus stables, avec une branche principale par laquelle transite la majorité du débit et une branche secondaire (Bolla Pittaluga et al, 2015) (Figure 6).



Figure 6 : Bifurcation alluviale stable avec une configuration asymétrique à la Riche

La formation puis la stabilisation d'une bifurcation alluviale résulte de processus complexes qui font intervenir plusieurs paramètres. Ces bifurcations sont associées à de nombreuses problématiques environnementales et sociétales. Elles favorisent les débordements du fleuve dans la plaine d'inondation, en rétrécissant localement la section d'écoulement. Elles soutiennent ainsi le cycle de vie de nombreuses espèces et exacerbent l'exposition des populations humaines aux risques d'inondation. Elles constituent également une mosaïque d'habitats spécifiques et abritent une riche diversité faunistique et floristique. Enfin, elles permettent de lutter contre le phénomène d'incision du lit de la Loire, en piégeant des sédiments. La compréhension et l'anticipation de leur formation revêt donc une importance cruciale et constitue un objet de recherche particulièrement intéressant.

II. Problématique de recherche et historique des précédents travaux

Malgré son appellation de “dernier fleuve sauvage d’Europe”, la Loire est un fleuve anthropisé dont la largeur de la plaine alluviale est fortement contrainte sur la majorité de son cours, notamment sur sa partie moyenne (Braud et al., 2021). Des digues et protections de berges limitent la dynamique latérale du fleuve. L’étude de l’influence de la plaine d’inondation n’est donc pas pertinente car ce paramètre évolue peu sur le secteur d’études. De plus, J. Le Guern a démontré que la valeur du ratio d’aspect de la Loire moyenne est très majoritairement compatible avec la formation de barres centrales (Le Guern, 2021). L’étude du ratio d’aspect n’est également pas pertinente car il ne s’agit pas d’un paramètre limitant pour la formation de barres et donc de bifurcations.

Ainsi, la longueur d’onde de variation de largeur apparaît comme le paramètre principal de contrôle de la formation des bifurcations alluviales sur la Loire moyenne.

La question posée par cette étude vise à définir, s’il existe, une gamme de variation de largeur favorable à la formation de barres sédimentaires et donc de bifurcations alluviales. Le secteur étudié s’étend de Nevers (Nièvre) aux Ponts de Cé (Maine et Loire). L’hypothèse développée est la suivante : Il existe une gamme d’élargissement du chenal favorable à la formation de barres sédimentaires, cette gamme est comprise entre 1,2 et 1,3.

Le travail présenté dans ce rapport s’inscrit dans la continuité de précédents Projets de Fin d’Études. Tout d’abord, un travail bibliographique mené par C. Cazeaux et A. Rougeyres s’est intéressé à la théorie de géomorphologie fluviale selon laquelle les bifurcations alluviales sont la résultante d’un élargissement du lit des rivières. Il a permis d’identifier les principaux paramètres responsables de la formation des bifurcations alluviales, présentés dans l’état de l’art.

Un deuxième travail, axé sur l’élaboration d’une méthodologie cartographique, a été mené. Son objectif était de développer une méthode permettant de calculer les paramètres de ratio d’aspect et de variation de largeur, afin d’examiner leur éventuel lien avec la présence de barres sédimentaires à différentes échelles, notamment le lit d’étiage et la bande active. Ce travail a permis de dégager des premières tendances, suggérant une corrélation entre le ratio d’aspect et la présence de barres sédimentaires.

Enfin, un troisième travail réalisé par M. Courteix et S. Gaduel, également méthodologique, s’est focalisé sur l’étude des paramètres de ratio d’aspect et de variation de largeur, spécifiquement dans des conditions d’étiage (favorables à la formation de barres et donc de bifurcations). Certains traitements cartographiques élaborés lors de la première méthode ont été repris et optimisés. Les zones comportant des aménagements anthropiques tels que des épis ou des duits ont été exclues de l’étude afin de garantir l’intégrité des résultats et les calculs ont été automatisés à l’aide de modèles builder.

III. Matériel et méthode

La partie matériel et méthode est composée de trois grandes sous-parties nommées : “Choix des secteurs d’études”, “Calcul de la variation de largeur et recoupement des barres” puis “Analyses statistiques des résultats”. La première détaille l’étude de la rétroaction de la formation d’une île sur la largeur du chenal, ainsi que la réflexion menée et les traitements cartographiques effectués pour délimiter les secteurs à analyser. La seconde explique le choix des espaces inter-transects et les traitements cartographiques effectués pour calculer les variations de largeur et déterminer le recoupement des barres. Enfin, la dernière sous-partie présente les analyses statistiques effectuées.

A. Choix des secteurs d’études

La première étape de la méthodologie consiste à délimiter les secteurs d’études où les variations de largeur seront calculées. Cette étape a notamment pour objectif d’identifier, sur l’ensemble du linéaire de recherche (de Nevers aux Ponts-de-Cé), les secteurs adaptés aux traitements cartographiques, c’est-à-dire ceux où la méthodologie est adaptée. Elle permet ainsi d’exclure pour la suite des traitements les secteurs susceptibles de générer des artéfacts lors des calculs.

Parmi les secteurs susceptibles de générer des artéfacts de calcul figurent ceux à chenaux multiples, où se trouvent des îles végétalisées (bifurcations alluviales). En effet, la divergence des écoulements provoquée par l’apparition d’une île peut entraîner un élargissement du chenal. Dans ce contexte, prendre en compte la largeur actuelle du chenal (après la formation de l’île) risque de surestimer la largeur réelle du chenal au moment de la formation de l’île. Il est donc essentiel d’évaluer l’intensité de cette rétroaction afin de déterminer si les secteurs contenant des îles végétalisées doivent être exclus de l’analyse des variations de largeur.

1) Test de la rétroaction de la formation d’une île sur la largeur du chenal

La méthode utilisée pour déterminer l’intensité de la rétroaction repose sur une comparaison de la largeur du chenal à plein bord (de berge à berge) avant et après la formation de l’île. La largeur avant la formation de l’île est mesurée manuellement à l’aide du logiciel ArcGIS, en se basant sur les photographies aériennes du SIEL de 1995 ou 1998. La largeur après la formation de l’île est déterminée de la même manière, en utilisant les photographies aériennes du SIEL de 2019. Les mesures de largeur sont effectuées au droit d’un même transect positionné au centre de l’île, pour l’état initial et l’état final.

Pour certaines formes sédimentaires, il est parfois difficile de différencier une barre d’une île végétalisée à partir des photographies aériennes. Dans ces situations, les cartes de végétation élaborées par la DREAL (2019 pour la Loire aval et 2015 pour la Loire moyenne) servent de référence. Si la forme sédimentaire est colonisée par des espèces de type bois durs, telles que le chêne, le frêne, l’orme ou les peupliers, elle est classée comme une île. Dans le cas contraire, elle est considérée comme une barre ([Figure 7](#)).

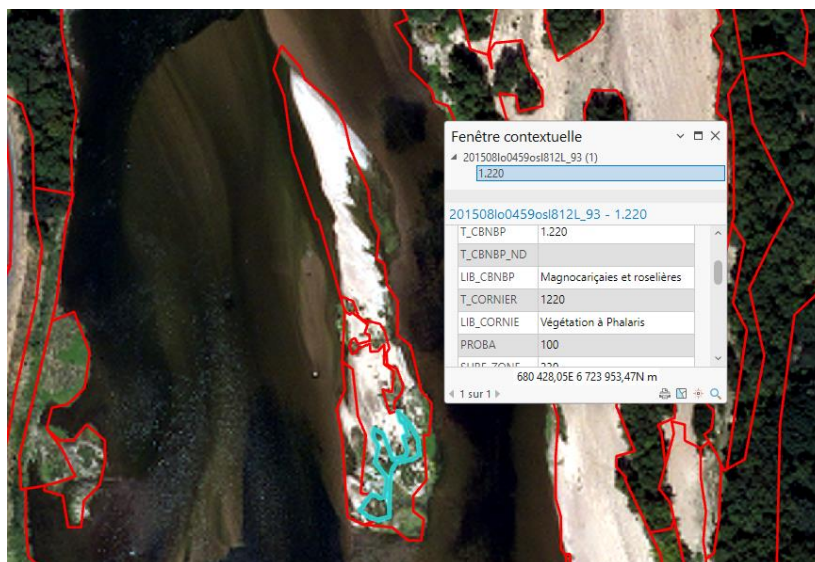


Figure 7 : Barre déterminée à partir des cartes de végétation de la DREAL

Ainsi, sur l'entièreté du linéaire de Nevers à Nantes, 13 sites ont présenté les conditions nécessaires à l'analyse (absence d'île végétalisée en 1995 ou 1998 et présence d'île végétalisée en 2019) (Annexe 1).

Sur ces sites, les largeurs mesurées avant la formation des îles varient de 243 m à 339 m et les largeurs mesurées après la formation des îles varient de 246 m à 339 m (Tableau 1). Trois sites présentent une diminution de la largeur du chenal après la formation de l'île, sept sites une augmentation de la largeur et trois sites ni augmentation ni diminution. Les deux rétroactions les plus importantes ont été observés pour les sites numéro 11 et 7 où la largeur du chenal s'est respectivement élargie de 22 m (pourcentage de variation de 8,40 %) et rétrécie de 20 m (pourcentage de variation de -6,78 %) (Figure 8 et 9). Le pourcentage de variation moyen est de + 0,79 % pour les 13 sites et + 1,77 % en excluant les trois sites qui présentent un rétrécissement du chenal (pourcentage de variation négatif).

Tableau 1 : Résultats des tests de détermination de la rétroaction des îles sur la largeur de la bande active

Numéro du site	Largeur du chenal en 1995 ou 1998 (m)	Largeur du chenal en 2019 (m)	Différence (m)	Pourcentage de variation (%)
1	279	279	0	0,00
2	384	386	2	0,52
3	281	280	-1	-0,36
4	296	296	0	0,00
5	304	303	-1	-0,33
6	314	317	3	0,96
7	262	284	22	8,40
8	243	246	3	1,23
9	303	304	1	0,33
10	260	267	7	2,69
11	295	275	-20	-6,78
12	339	339	0	0,00
13	280	290	10	3,57
Moyenne	295,3846154	297,3846154	2	0,79



Figure 8 : Évolution de la largeur du chenal pour le site n°11



Figure 9 : Évolution de la largeur du chenal pour le site n°7

Les résultats indiquent que l'effet rétroactif du développement d'une île végétalisée sur la largeur du chenal semble très limité, voire inexistant dans certains cas. Toutefois, la méthodologie employée présente certaines limites :

- La présence de protections de berges sur certains sites contraint la largeur du chenal et empêche son ajustement latéral (*Figure 10*). Par conséquent, aucune rétroaction ne peut être observée sur ces sites.
- Les ouvrages tels que les épis, duits ou piles de ponts provoquent des perturbations au niveau du champ de vitesse des écoulements par la création de tourbillons. L'abaissement des vitesses d'écoulement en aval immédiat de l'ouvrage induit un dépôt de sédiments et donc la formation de barres sédimentaires
- Il est possible que la rétroaction observée ne soit pas entièrement aboutie sur les orthophotographies de 2019, car l'ajustement de la largeur du chenal est un processus lent qui se déroule sur plusieurs années.
- Seuls 13 sites ont pu être étudiés, ce qui limite la portée des conclusions et ne permet pas d'extrapoler les observations réalisées, à l'ensemble des îles situées entre Nevers et Nantes.

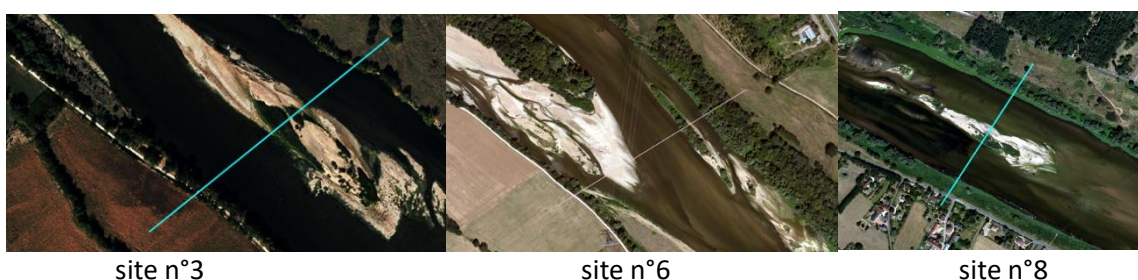


Figure 10 : Sites contraints par des protections de berges

Ainsi, au vu des limites non négligeables que présente la méthodologie, les secteurs d'études devront se limiter aux chenaux uniques afin de s'affranchir de la potentielle rétroaction qu'engendre la formation d'une île sur la largeur du chenal, bien qu'il ne soit pas certain que cette rétroaction soit significative.

2) Délimitation des secteurs d'études

L'étape de délimitation des secteurs d'étude consiste à tracer des polygones sur ArcGIS, dont l'emprise englobe les secteurs qui seront analysés par la suite. Elle permet ainsi d'exclure les secteurs suivants :

- Les secteurs à chenaux multiples pour les raisons citées précédemment (1. Test de la rétroaction de la formation d'une île sur la largeur du chenal) (*Figure 11*). Les frontières entre les secteurs à chenaux multiples et chenal unique ne sont pas considérées à la pointe des îles, mais plusieurs dizaines de mètres en aval ou en amont. Cela permet d'exclure les variations de largeur du chenal qui sont provoquées par la formation de l'île. La différenciation des barres sédimentaires végétalisées et des îles est parfois complexe à partir des photos aériennes. Dans ce cas, les cartes de végétation de la DREAL sont utilisées (1. Test de la rétroaction de la formation d'une île sur la largeur du chenal).



Figure 11 : Secteur à chenaux multiples à Berthenay (Indre et Loire)

- Les secteurs avec des aménagements anthropiques (piles de ponts, épis, duits, etc ...) qui perturbent la dynamique hydro-sédimentaire (*Figure 12*).



Figure 12 : Secteur avec des duits et ponts à Orléans

- Les micro-élargissements locaux de la couche de la bande active dû à la présence d'encoches de berges et d'erreurs de digitalisation (*Figure 13*). Ces élargissements sont très ponctuels et pourraient créer des artéfacts dans les calculs des variations de largeur par la suite.



Figure 13 : Micro-élargissement de la bande active

Indirectement, certains secteurs à chenal unique n'ont également pas été inclus dans les polygones. Il s'agit de cours secteurs situés entre deux tronçons à chenaux multiples, dont la longueur n'est pas assez importante pour permettre, par la suite, le calcul des variations de largeur avec la méthodologie utilisée (présentée par la suite).

Finalement, sur le linéaire d'environ 400 km, de Nevers aux Ponts-de-Cé, 240 km ont été exclus lors de la phase de délimitation des secteurs d'études.

Les parties suivantes traiteront les 160 km restants, jugés propices à l'analyse des variations de largeur du chenal.

B. Détermination de la variation de largeur et du recoupement des barres sédimentaires

Le calcul de la variation de largeur de la bande active repose sur la comparaison entre la longueur d'un "transects amont" et celle d'un "transect aval", générés le long de l'axe hydrographique de la Loire perpendiculairement aux écoulements. La formule utilisée est la suivante (*Equation 1*) :

Variation de largeur = Longueur du transect aval (m) / Longueur du transect amont (m)

Equation 1 : Formule de la variation de largeur

L'espace inter-transects choisi lors de la génération des transects impacte fortement les résultats obtenus. Le choix d'un espacement inter-transects trop faible conduit à des variations de largeurs infimes et ne permet pas l'obtention de données analysables. Au contraire, un espacement inter-transects trop important ne fournit pas de résultats fiables car il ne représente pas les changements géométriques du lit (il peut contenir plusieurs élargissements et contractions du chenal) et qu'il entraîne la non-détection de nombreuses barres qui ne sont pas recoupées.

Le choix de l'espace inter-transects doit donc être étudié afin d'être pertinent.

3) Détermination de l'écart inter-transects

La longueur d'onde de variation de largeur du chenal correspond à la distance entre deux élargissements ou rétrécissements successifs. Il s'agit du paramètre à déterminer pour connaître la

distance inter-transects maximum utilisable. Pour y parvenir, des transects ont été générés avec un espacement de 100 m puis des graphiques de la variation de largeur en fonction du point kilométrique ont été produits (n'est présenté ici que celui des 50 premiers kilomètres pour plus de lisibilité) (Figure 14). On observe que la majorité des variations de largeur est comprise entre 0,8 et 1,3.

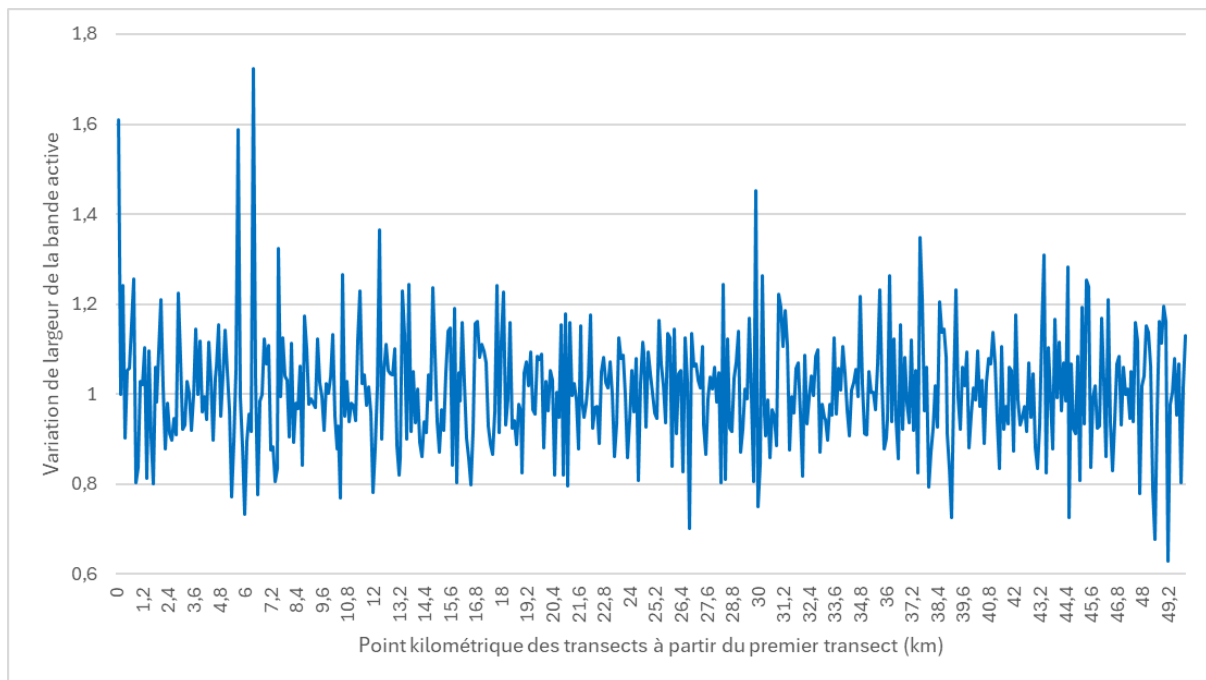


Figure 14 : Variation de largeur de la bande active en fonction du point kilométrique à partir du premier transect (pour les 50 premiers kilomètres)

Afin de déterminer la longueur d'onde de variation de largeur, il est nécessaire de définir un seuil à partir duquel on considère qu'une variation de largeur est significative. Un travail de recherche bibliographique a été effectué pour déterminer ce seuil à considérer mais aucune information n'a été trouvée. Il a alors été décidé de considérer, après discussion avec notre tuteur, un élargissement de la bande active pour une valeur seuil de variation de largeur de 1,3. D'après la courbe des fréquences cumulées croissantes des variations de largeur, ce seuil est dépassé dans moins de 3 % des cas pour les élargissements (Figure 15).

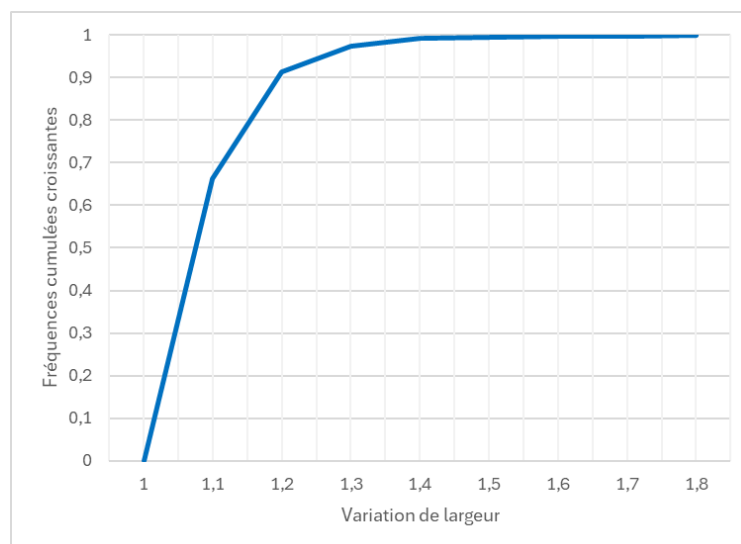


Figure 15 : Fréquences cumulées croissantes des variations de largeur pour les élargissements

La distance médiane entre les transects qui présentent une variation de largeur supérieure ou égale à la valeur seuil (1,3) a été déterminée. Cette distance médiane est de 5,4 km. Il s'agit d'une valeur approchée de la longueur d'onde. Un tirage aléatoire de 35 secteurs a permis de vérifier que pour une distance de 5,4 km il y avait bien pour chaque secteur un seul élargissement et un seul rétrécissement.

Les mêmes calculs ont été effectués en essayant avec les valeurs seuils 1,2 et 1,4. Les longueurs d'ondes déterminées sont respectivement 1,4 km et 11,3 km. Elles ne sont pas correctes pour tous les secteurs tirés au hasard. Pour la distance de 1,4 km il n'y avait pas systématiquement un élargissement et un rétrécissement (Figure 16), tandis que pour la distance 11,3 km il y avait pour certains secteurs plusieurs élargissements et contractions du chenal (Figure 17).

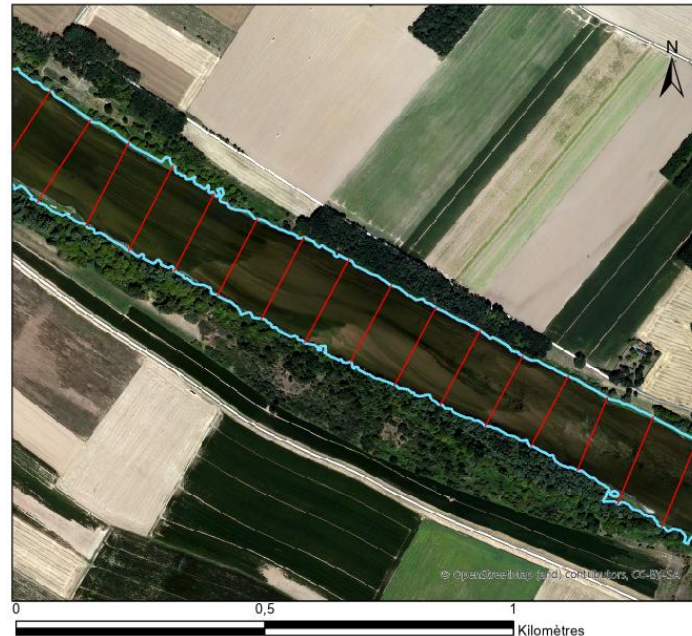


Figure 16 : Vérification de la longueur d'onde calculée à partir du seuil 1,2 (1,4 km) sur un des 35 sites tirés aléatoirement

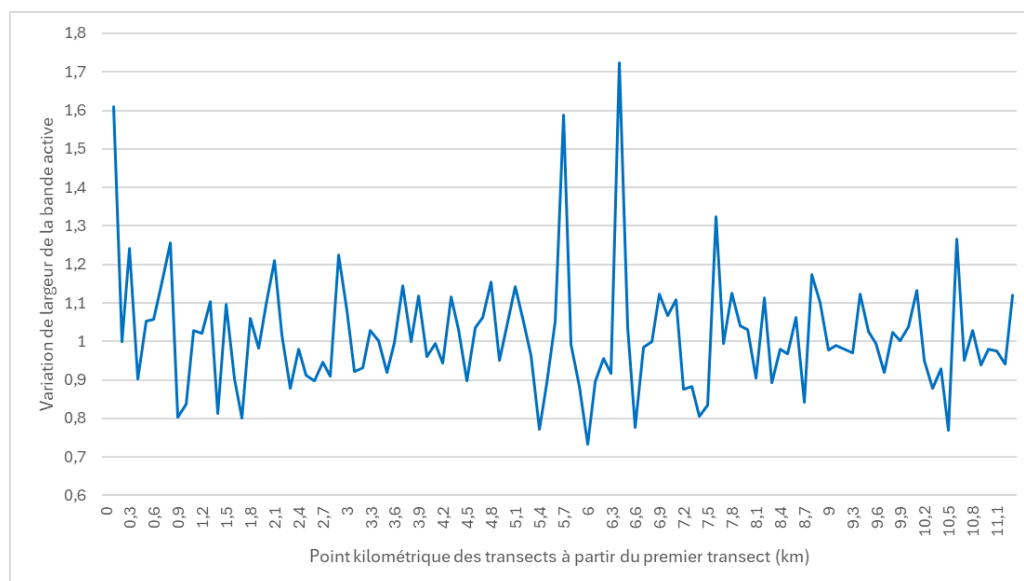


Figure 17 : Vérification de la longueur d'onde calculée à partir du seuil 1,4 (11,3 km) sur un des 35 sites tirés aléatoirement

La longueur d'onde de variation de largeur du chenal retenue est donc de 5,4 km. L'écart inter-transects maximal doit donc être égal à cette distance divisée par deux afin de n'avoir qu'un

élargissement ou un rétrécissement entre chaque transect, soit un écart inter-transects maximal de 2,7 km.

Le choix a été fait de tester plusieurs écarts inter-transects afin d'appréhender leurs influences sur les résultats. Les écarts testés sont : 100, 150, 200, 250, 500, 750 et 1000 m. Il n'est pas possible d'espacer les transects de plus d'1 km car il y a beaucoup de secteurs d'études de faibles longueurs pour lesquels il n'y aurait alors qu'un seul transect, ce qui ne permet pas de calculer une variation de largeur. Concernant l'écart minimal testé il est de 100 m car un écart plus petit ne permet pas l'obtention de données analysables car les variations sont trop faibles. En effet, la précédente méthodologie développée par S. Gaduel et M. Courteix avait montré que pour des écarts inter-transects de 100 m les variations de largeur ne dépassent que très rarement 1,2.

4) Calcul de la variation de largeur et recoupement des barres

Les différentes couches vectorielles SIG des transects générés avec les espacements déterminés précédemment sont découpées par l'emprise de la bande active de la Loire moyenne de 2020 (pour ne correspondre qu'à la largeur de berge à berge), puis redécoupées par la couche des polygones des secteurs d'études. Une vérification est nécessaire pour supprimer les résidus de découpage et les transects incomplets (*Figure 18*).



Figure 18 : Transect incomplet à supprimer (à gauche)

Pour que les variations de largeur soient calculées uniquement entre les transects appartenant au même secteur d'étude, une jointure spatiale est réalisée avec la couche des secteurs d'études. Elle permet l'obtention d'un champ, dans la table attributaire, qui renseigne sur le secteur d'étude auquel appartient chaque transect.

La figure suivante résume l'ensemble des traitements ArcGIS à effectuer pour déterminer les variations de largeur (*Figure 19*).

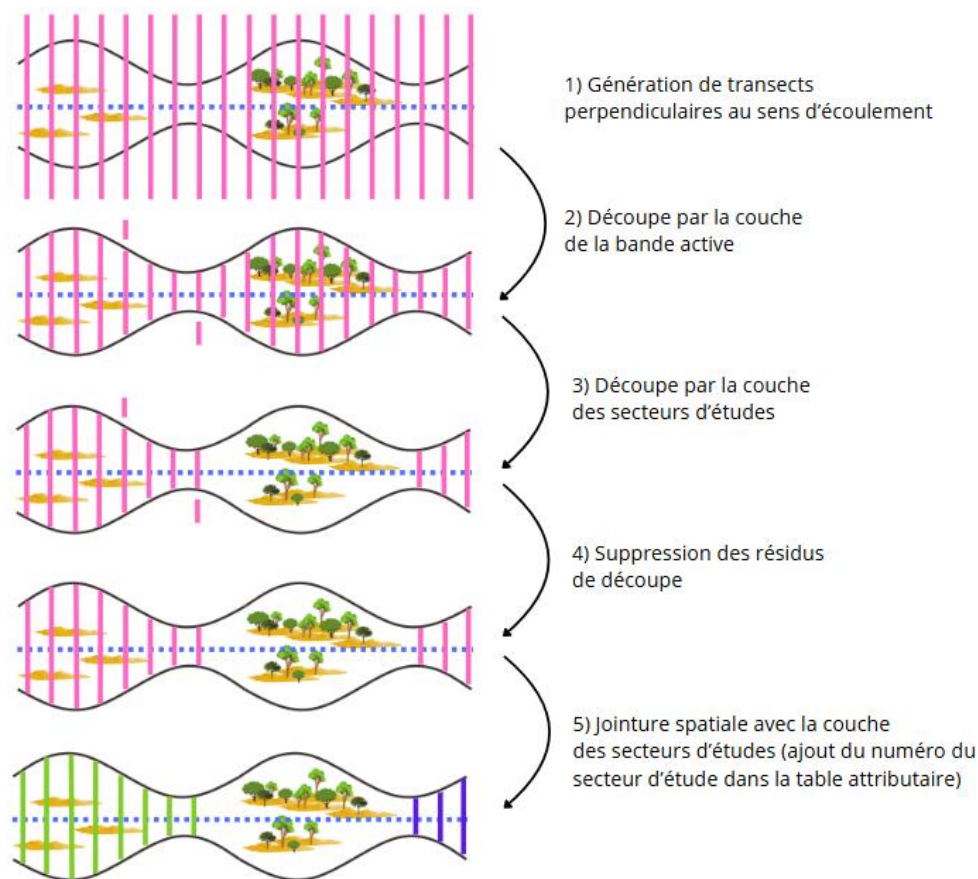


Figure 19 : Traitements cartographiques réalisés pour calculer les variations de largeur des transects

Afin de déterminer si chaque transect recoupe une barre sédimentaire, un nouveau champ "barres" est créé dans la table attributaire de la couche finale des transects. Ensuite, l'ensemble des barres émergées sur les secteurs d'études est digitalisé à partir des photographies aériennes du SIEL de 2019. L'outil "Sélection selon l'emplacement" permet de sélectionner, dans la table attributaire, uniquement les transects qui intersectent au moins une barre. Grâce à la calculatrice de champ, la valeur "1" est inscrite dans le champ "barres" pour tous les transects sélectionnés.

La table attributaire de la couche finale est exportée sous forme de fichier CSV. Elle comprend de nombreux champs qui renseignent sur : le numéro du transect, la longueur du transect, le numéro du secteur d'étude et le recoupement avec les barres.

Le calcul des variations de largeur est effectué sur Excel entre les transects d'un même secteur d'étude. La formule utilisée est celle précédemment citée ([Equation 1](#)).

C. Analyses statistiques

Une fois les valeurs de variations de largeur calculées et les données relatives à la présence ou l'absence de barres sédimentaires collectées, des analyses statistiques sont réalisées avec l'extension XLstat du logiciel Excel. Elles visent à vérifier l'hypothèse de travail de départ : Il existe une gamme d'élargissement du chenal favorable à la formation de barres sédimentaires, cette gamme est comprise entre 1,2 et 1,3.

Pour rappel, afin de s'affranchir de l'influence de l'écart inter-transects utilisé sur les résultats, toutes les analyses statistiques présentées sont réalisées pour différents écarts inter-transects, c'est-à-dire pour des espacements de 100, 150, 200, 250, 500, 750 et 1000 m.

Pour la suite de la méthodologie, on considère un échantillon comme une série de données qui regroupe toutes les variations de largeur calculées uniquement pour les transects qui recoupent des barres sédimentaires ou uniquement pour ceux qui n'en recoupent pas, pour un espacement inter transect donné. Par exemple : les variations de largeur pour les transects qui recoupent des barres, avec un espacement inter-transect de 200 m.

Dans un premier temps, des statistiques descriptives sont réalisées afin d'obtenir les valeurs de variations de largeur moyennes, médianes, maximums, minimums, Q1 et Q3 de chaque échantillon. Les résultats prennent différentes formes : tableaux, box-plots et graphiques des fréquences cumulées croissantes afin d'observer la distribution des données.

Ensuite, le test de Shapiro-Wilk sera effectué afin de déterminer la normalité des échantillons et en déduire le test de comparaison à effectuer. Les hypothèses nulle (H_0) et alternative (H_1) de ce test sont les suivantes :

- H_0 : Les données suivent une loi normale
- H_1 : Les données ne suivent pas une distribution normale

Une p-value est calculée par échantillon. Elle reflète la significativité du test qui est fixé à un seuil de 95%. Si la p-value est supérieure à 0,05, H_0 est acceptée, les données suivent une loi normale. A l'inverse, si la p-value est inférieure à 0,05, H_0 est rejetée et H_1 acceptée, les données ne suivent pas une distribution normale.

En fonction des résultats du test de normalité, deux tests sont effectués : le test t de Student ou le test de Mann et Whitney. Bien que leurs hypothèses soient différentes, ils permettent de déterminer s'il existe une différence significative entre les variations de largeur des transects qui intersectent des barres sédimentaires et les variations de largeur des transects qui n'intersectent pas de barres sédimentaires. Les hypothèses nulle (H_0) et alternative (H_1) de ces tests sont les suivantes :

Test t de student :

- H_0 : Les moyennes des deux échantillons sont égales
- H_1 : Les moyennes des deux échantillons ne sont pas égales

Test de Mann-Whitney :

- H_0 : La différence de position des échantillons est égale à 0
- H_1 : La différence de position des échantillons est différente de 0

Le test de t de student est un test paramétrique, il est utilisé lorsque les deux échantillons suivent une loi normale. A l'inverse, le test de Mann et Whitney est un test non paramétrique, il est utilisé lorsque qu'au moins un échantillon ne suit pas une loi normale.

Comme pour le test de normalité, des p-value sont calculées pour chaque échantillon pour ces deux tests. Elles reflètent la significativité du test qui est fixé à un seuil de 95%. Si la p-value est supérieure à 0,05 alors H_0 est acceptée, tandis que si la p-value est inférieure à 0,05, H_0 est rejetée et H_1 est acceptée.

En parallèle des tests de comparaison, un test de corrélation bisériale est effectué. L'échantillon analysé diffère des précédents tests, il s'agit de toutes les variations de largeur calculées pour un espace inter-transects (pas de critère de recoupement de barres). L'objectif est d'étudier le lien entre la variable quantitative (variation de largeur) et la variable binomiale (présence ou absence de barres sédimentaires) en renseignant sur l'intensité et la direction de l'association de ces deux variables. Les hypothèses posées pour le test de corrélation bisériale sont les suivantes :

- H_0 : La variable quantitative continue "variation de largeur" et la variable qualitative binaire "présence ou absence de barres" ne sont pas associées
- H_1 : La variable quantitative continue "variation de largeur" et la variable qualitative binaire "présence ou absence de barres" sont associées

Une fois encore, des p-value sont calculées par échantillon. Elles reflètent la significativité du test qui est fixé à un seuil de 95%. Si la p-value est supérieure à 0,05 alors H_0 est acceptée, tandis que si la p-value est inférieure à 0,05, H_0 est rejetée et H_1 est acceptée.

Lorsque H_1 est retenue, le coefficient de relation r est analysé. Il mesure la force et la direction de la relation entre les variables. Il est compris entre -1 et +1. Quand $r=1$, la corrélation est parfaitement positive (quand la variable binaire passe d'une catégorie à l'autre, la variable quantitative augmente systématiquement). Lorsque $r=-1$, la corrélation est parfaitement négative (quand la variable binaire passe d'une catégorie à l'autre, la variable quantitative diminue systématiquement). Si $r=0$, aucune corrélation n'est observée (pas de relation linéaire entre les deux variables).

Enfin, pour les échantillons qui présentent une corrélation significative entre les variations de largeur et la présence ou absence de barres, des histogrammes seront réalisés. Ils permettront de déterminer la ou les gamme(s) de variation de largeur pour lesquelles la plus grande part de transects intersecte des barres sédimentaires.

La figure suivante résume l'ensemble des analyses statistiques effectuées (Figure 20).

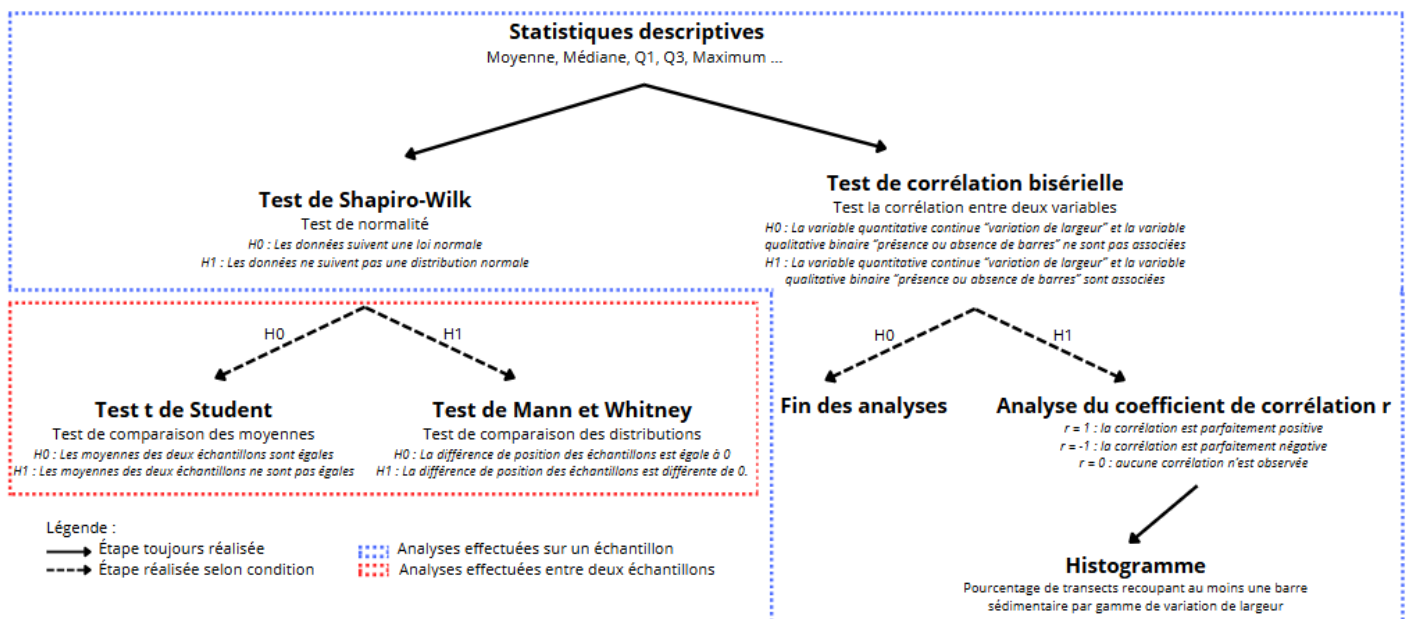


Figure 20 : Synthèse des analyses statistiques effectuées

IV. Résultats

D. Statistiques descriptives

Les valeurs minimales, maximales, moyennes, médianes, Q1 et Q3 pour les différents espaces inter-transects, en présence ou absence de barres, sont les suivantes (*Tableau 2*) :

Tableau 2 : Synthèse des statistiques descriptives de chaque échantillon

		Espacement intertransects (m)						
		100	150	200	250	500	750	1000
Présence de barres	Minimum	0,677	0,568	0,533	0,646	0,620	0,574	0,779
	Maximum	1,722	1,639	1,581	1,538	2,161	1,614	1,523
	1er Quartile	0,960	0,950	0,935	0,931	0,916	0,973	0,945
	Médiane	1,008	1,011	1,013	1,026	1,042	1,054	1,067
	3ème Quartile	1,054	1,071	1,089	1,116	1,167	1,185	1,270
	Moyenne	1,009	1,014	1,015	1,027	1,052	1,087	1,099
Absence de barres	Minimum	0,741	0,694	0,667	0,638	0,618	0,690	0,675
	Maximum	1,432	1,435	1,628	1,470	1,454	1,716	1,232
	1er Quartile	0,953	0,941	0,931	0,914	0,911	0,881	0,884
	Médiane	1,003	0,999	1,003	0,990	0,976	0,949	0,974
	3ème Quartile	1,049	1,068	1,073	1,070	1,074	1,090	1,055
	Moyenne	1,006	1,006	1,015	1,003	0,996	1,002	0,976

Les variations de largeur moyennes et médianes sont systématiquement plus importantes en présence de barres plutôt qu'en absence (seul l'écart inter-transects de 200 m présente une valeur moyenne égale en présence et absence de barres). Les écarts observés entre les valeurs moyennes et médianes, en présence de barres et en absence, ont tendance à augmenter lorsque l'espace inter-transects augmente (*Figure 21 et 22*).

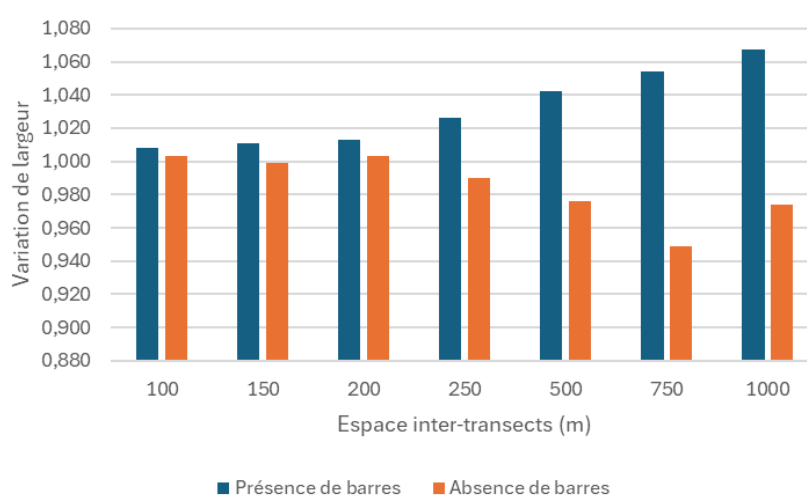


Figure 21 : Variations de largeur médiane en présence et absence de barres

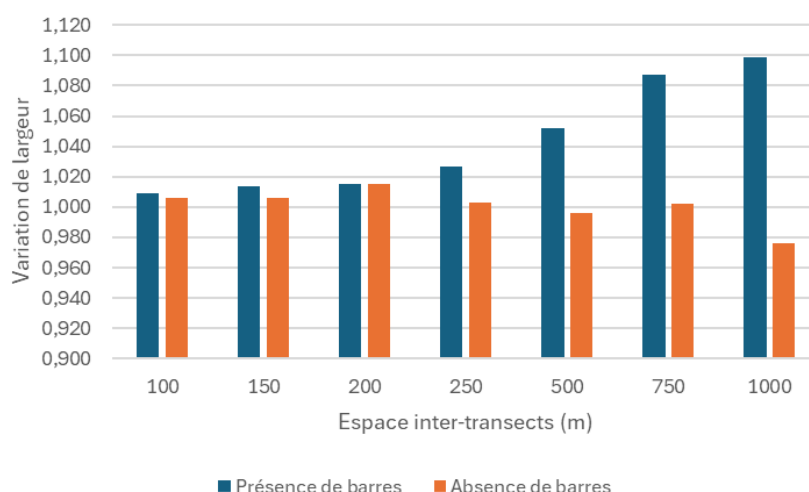


Figure 22 : Variations de largeur moyenne en présence et absence de barres

A ce stade, il semblerait, qu'il existe une différence significative entre les variations de largeur des transects en présence de barres et en absence, toutefois il est impossible de l'affirmer. Des tests statistiques sont effectués pour cela.

E. Test de normalité

Le test de Shapiro-Wilk démontre que seules les variations de largeur calculées pour un espace inter-transects de 1000 m suivent une loi normale en présence et en absence de barres (Tableau 3). Pour les autres espacements, au moins un des échantillons n'est pas normalement distribué.

Tableau 3 : Résultats du test de normalité de Shapiro-Wilk par échantillon

		Ecart inter-transects						
		100	150	200	250	500	750	1000
Présence de barres sédimentaires	p-value	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,43	0,123
Absence de barres sédimentaires		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,129	<0,001	0,998

L'hypothèse H_0 est acceptée; les données suivent une distribution normale

L'hypothèse H_0 n'est pas acceptée, l'hypothèse H_a est retenue; Les données ne suivent pas une distribution normale

Le test de Mann et Whitney sera effectué pour comparer les variations de largeur en présence et absence de barres pour tous les espaces inter-transects, hormis celui de 1000 m pour lequel le test de t de student sera appliqué.

F. Comparaison des variations de largeur en présence et absence de barres

D'après les résultats des tests de comparaison, trois cas présentent des échantillons significativement différents. Il s'agit des comparaisons pour les écarts inter-transects de 250, 750 et 1000 m (Tableau 4). Pour ces espacements, il est possible d'affirmer que les variations de largeur en présence et en absence de barres sont significativement différentes.

Pour les espacements de 100, 150, 200 et 500 m, la p-value est supérieure à 0,05. Les variations de largeur en présence et absence de barres sont égales.

Tableau 4 : Résultats des tests de Mann et Whitney et de Student

	Écart inter transect (m)							
	100	150	200	250	500	750	1000	
p-value	0,211	0,103	0,419	0,029	0,054	0,08	/	Test de Mann et Whitney
	/	/	/	/	/	/	0,021	Test de Student

L'hypothèse Ho est acceptée; les moyennes ou les distributions des échantillons sont égales
 L'hypothèse Ho n'est pas acceptée, l'hypothèse Ha est retenue; les moyennes ou les distributions des échantillons sont significativement différentes
 Test non effectué

G. Mesure de corrélation bisériale

Les p-value calculées pour le test de corrélation bisériale démontrent que les variables “variation de largeur” et “présence et absence de barres” sont associées pour les écarts inter-transects de 750 et 1000 m (Tableau 5). Pour les espacements de 100, 150, 200, 250 et 500 m, les variations de largeur et la présence ou l’absence de barres ne sont pas associées.

Tableau 5 : Résultats du test de corrélation bisériale

	Écart inter- transects (m)						
	100	150	200	250	500	750	1000
p-value	0,52	0,247	0,889	0,061	0,053	0,042	0,021
r	/	/	/	/	/	0,213	0,299

L'hypothèse Ho est acceptée; la variable quantitative “variation de largeur” et la variable binaire “présence ou absence de barres” ne sont pas associées
 L'hypothèse Ho est rejetée et l'hypothèse alternative Ha est retenue; la variable quantitative “variation de largeur” et la variable binaire “présence ou absence de barres” sont associées
 Coefficient r non analysé

Pour les deux espacements qui présentent une corrélation significative, le coefficient r est utilisé pour définir la force et la direction de la relation. Ils sont respectivement 0,213 et 0,299 pour les espaces inter-transects de 750 et 1000 m. La relation entre les deux variables est donc dans le sens positif. Lorsque les valeurs de variations de largeur augmentent (élargissement), la variable binaire “présence et absence de barre” passe de la catégorie 0 à 1. Lors de la réalisation du test, la valeur 1 avait été affectée à la “présence de barres”. La corrélation reste néanmoins “faible” puisque les valeurs de r sont comprises dans l'intervalle]0,10; 0,30]. Il s'agit d'un intervalle défini par Cohen.J (Cohen, 2013) dans une échelle d'interprétation de la force de la corrélation, qui a été largement adoptée dans le domaine des sciences.

H. Identification d'une gamme favorable à la formation de barres

Pour un espace inter-transects de 750 m, la gamme de variation de largeur pour laquelle la plus grande part de transects intersecte au moins une barre sédimentaire est la gamme [1,2;1,3[avec 100 % (Figure 23). Pour les autres gammes, le taux de transects qui recoupent une barre fluctue généralement entre 70 et 40 %. Les gammes [1,1;1,2[et [1,3;1,4[présentent des taux plus importants que la moyenne aux alentours des 80 %. Les quatre classes les plus extrêmes [<0,70[, [0,70;0,80[et [1,4;1,5[, [>1,5[ne peuvent pas faire l'objet d'une analyse fiable car seulement deux à trois transects appartiennent à ces variations de largeur, seule une tendance peut donc être tirée.

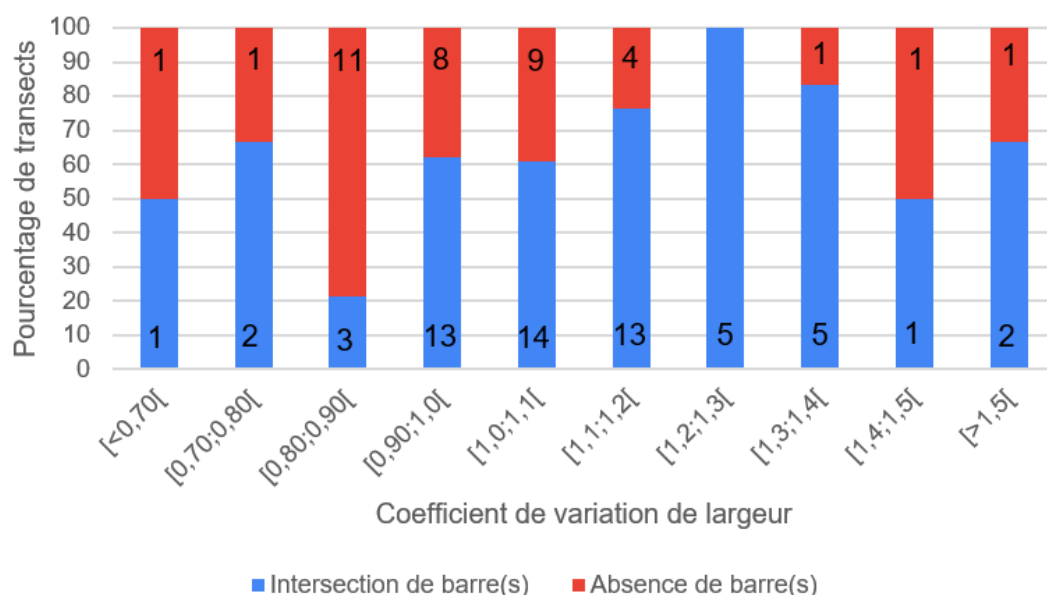


Figure 23 : Histogramme du pourcentage de transects intersectant au moins une barre sédimentaire en fonction des gammes de variations de largeur, pour des écarts inter-transects de 750 m

Pour un écart inter-transects de 1000 m, les gammes de variation de largeur [1,3;1,4[et [<1,4[présentent 100 % des transects qui intersectent au moins une barre sédimentaire (Figure 24). Cependant, les effectifs de ces deux gammes sont faibles (quatre transects par classe), ce qui limite la fiabilité des résultats. Pour les autres gammes, le taux de transects qui recoupent une barre fluctue généralement dans un intervalle très restreint, entre 50 et 60 %. La gamme de variation [1,2;1,3[présente un taux largement supérieur avec 85 %. Il s'agit d'une "gamme de transition" car on observe une "rupture" entre les pourcentages qui précèdent et suivent cette classe.

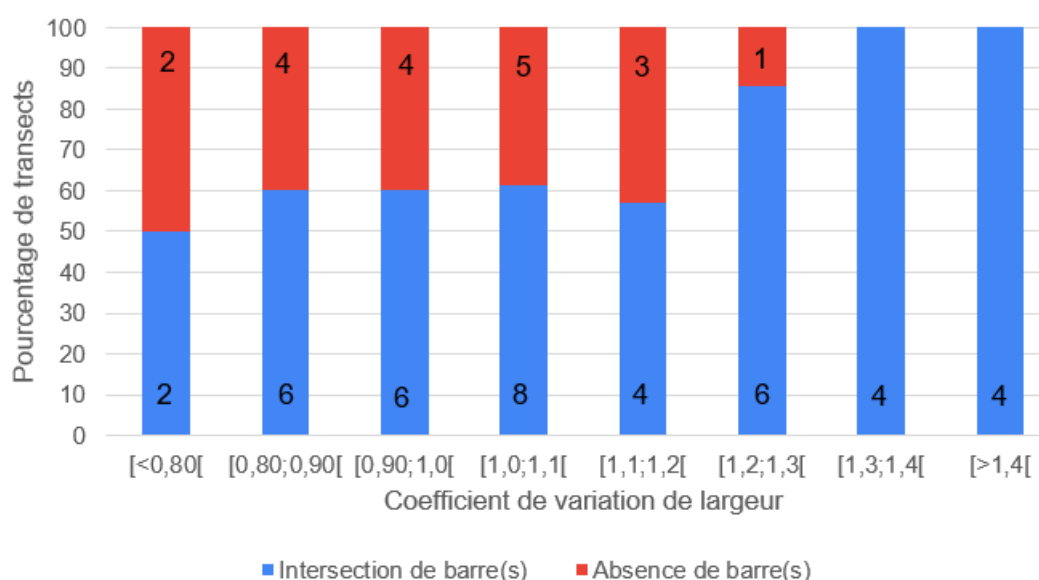


Figure 24 : Histogramme du pourcentage de transects intersectant au moins une barre sédimentaire en fonction des gammes de variations de largeur, pour des écarts inter-transects de 1000 m

V. Discussion

Selon les tests de corrélation bisériale, il existe un lien significatif entre les variations de largeur du chenal dans les secteurs à chenal unique et la présence de barres sédimentaires seulement pour les écarts inter-transects de 750 m ou 1000 m. Cela peut s'expliquer par le fait que, lorsque les écarts entre les transects sont inférieurs ou proches de la largeur du chenal (300 m en moyenne), des transects consécutifs peuvent intersecter plusieurs fois une même barre sédimentaire. En effet, les barres sont des macroformes et leur longueur est du même ordre de grandeur que la largeur du chenal. Il est donc probable que pour les espaces inter-transects de 500 m ou moins, une même barre soit recoupée plusieurs fois. Il aurait été plus pertinent de n'utiliser que des transects avec un espacement supérieur à la largeur maximale du chenal (500 m).

D'après les deux histogrammes, dans le cas d'un rétrécissement du chenal (variation de largeur inférieure à 1), le pourcentage moyen de transects qui intersectent une barre sédimentaire est aux alentours des 50 %. Il atteint au maximum 70 %, et au minimum 20%. En présence d'un élargissement du chenal (variation de largeur supérieure à 1), ce pourcentage est plus important. Au minimum il est de 50 %, et il atteint 100% pour plusieurs gammes. Les résultats obtenus sont donc en cohérence avec le principe de Repetto qui définit les élargissements comme des changements géométriques du lit favorables à la formation de barres (Repetto et al, 2002).

Enfin, on observe une "rupture" dans les valeurs des pourcentages de transects qui intersectent des barres à partir de la gamme de variation de largeur [1,2;1,3[(hausse de 24% pour un espacement de 750m et une hausse de 29% pour un espacement de 1000m). Cette "bascule" démontre que la gamme de variation de largeur [1,2;1,3[est extrêmement favorable à la formation de barres puis de bifurcations alluviales. Des élargissements moins prononcés (gamme variation de largeur [1,1;1,2[) n'apparaissent pas suffisants pour induire l'émergence d'une barre aussi fréquemment.

Le travail réalisé présente toutefois certaines limites, pour lesquelles plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées :

- Approfondir l'étude de la rétroaction de la formation d'une île sur la largeur du chenal pourrait permettre, si la rétroaction s'avère nulle ou non significative, d'étendre les secteurs d'études en incorporant les secteurs à chenaux multiples. Cela augmenterait fortement la longueur du linéaire d'études et améliorerait la représentativité globale des résultats à l'échelle de la Loire moyenne. Dans le cas où la rétroaction s'avère importante, l'approfondissement du test constituerait une source de données nouvelle sur un phénomène jusqu'à présent très peu documenté dans la littérature.

Pour y parvenir, plusieurs points d'amélioration peuvent être apportés au test. L'utilisation de photos aériennes plus anciennes (antérieures à 1995) permettraient d'augmenter le laps de temps utilisé pour la comparaison et ainsi de s'assurer de l'achèvement complet du phénomène de rétroaction. Étant donné que le nombre de sites sans protections de berges n'est pas suffisant, la comparaison pourrait être effectuée sur un fleuve aux caractéristiques hydrologiques et sédimentaires similaires à la Loire afin d'extrapoler les résultats à cette dernière.

Enfin, il pourrait être envisagé de réaliser une modélisation hydro-sédimentaire (avec un modèle TELEMAC-GAIA par exemple), afin de calculer les retraits de berge par érosion latérale dans le cas où la formation d'une île aurait un impact sur la largeur du chenal.

- Développer une méthode de digitalisation des barres plus fiable qui n'implique pas l'utilisation d'orthophotos. Cela permettrait de s'affranchir de l'influence du débit, au moment de la prise de vue, sur l'émergence des barres. L'utilisation de données LiDAR topo/bathymétrique pour identifier les fronts de migration des barres sédimentaires avait été envisagée, cependant la complexité et le temps nécessaire à leur identification n'avait pas permis leur utilisation. Une réflexion sur cette méthode pourrait être envisagée pour de prochains travaux.
- Différencier les barres centrales et les barres latérales car les barres centrales sont davantage à l'origine de la formation des bifurcations.
- Travailler sur la détermination d'un seuil de variation de largeur au-delà duquel la formation de barres sédimentaires est favorisée, plutôt que de déterminer une gamme de variation de largeur. En effet, plus le degré d'élargissement est important, plus la divergence des écoulements est forte et les dépôts importants. Il n'est donc pas nécessaire de déterminer une gamme de variation car la valeur haute de la plage n'est pas intéressante mais plutôt d'essayer de préciser une valeur seuil.

Enfin, outre l'étude de la formation des bifurcations alluviales, l'étude de la pérennité et de la stabilisation des bifurcations apparaît comme une approche pertinente dans le contexte de prévention des inondations et de lutte contre l'incision du lit. En effet, comme expliqué en introduction, la présence d'une bifurcation alluviale n'est pas forcément pérenne. Étudier les différents paramètres à l'origine de la pérennité des bifurcations permettrait d'apporter des éléments de réflexion supplémentaires sur la présence des bifurcations au sein de la Loire moyenne.

VI. Conclusion

L'objectif de l'étude était de déterminer, s'il existe, une gamme de variations de largeur du chenal favorable à la formation de barres sédimentaires et donc de bifurcations alluviales, sur la Loire moyenne entre Nevers (Nièvre) et Les Ponts-de-Cé (Maine et Loire). Pour cela, une méthodologie inspirée de précédent Projets de Fin d'Études a été développée. Elle consiste à calculer les variations de largeur, entre des transects générés perpendiculairement aux écoulements, et qui correspondent à la largeur du chenal. Les calculs ont été réalisés pour différents espaces inter-transects, dans des secteurs d'études délimités qui correspondent aux secteurs à chenal unique sans aménagements anthropiques qui favorisent l'émergence de barres.

Ensuite, des analyses statistiques ont été effectuées. Elles ont démontré que les variations de largeur en présence et absence de barres sont significativement différentes pour des espaces inter-transects de 250, 700 et 1000 m. Il existe également une corrélation significative entre les variations de largeur et la présence ou l'absence de barres pour les espaces inter-transects de 750 et 1000 m. Enfin, la gamme de variation de largeur [1,2;1,3[constitue une "rupture" dans les valeurs des pourcentages de transects qui intersectent des barres sédimentaires. Elle est extrêmement favorable à la formation de barres puis de bifurcations alluviales. Des élargissements moins prononcés ne paraissent pas suffisants pour induire l'émergence de barres aussi fréquemment.

L'hypothèse de départ : "Il existe une gamme d'élargissement du chenal favorable à la formation de barres sédimentaires, cette gamme est comprise entre 1,2 et 1,3" est donc confirmée.

La méthodologie mise en place présente toutefois de nombreuses limites. Il serait intéressant au cours d'un prochain projet de recherche d'essayer de les réduire afin d'augmenter la fiabilité des résultats. Dans ce sens, plusieurs pistes d'amélioration ont été suggérées. Il est possible de digitaliser les barres sédimentaires à partir de données LIDAR, d'approfondir le test de rétroaction ou de déterminer un seuil de variations de largeur au-delà duquel la formation de barres sédimentaires est favorisée, plutôt que de déterminer une gamme de variations de largeur.

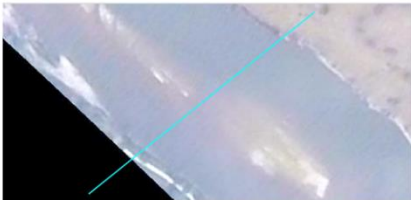
VII. Bibliographie

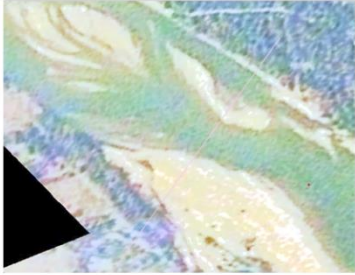
- Bolla Pittaluga, M., Coco, G., & Kleinhans, M. G. (2015). A unified framework for stability of channel bifurcations in gravel and sand fluvial systems. *Geophysical Research Letters*, 42(18), 7521-7536..
<https://doi.org/10.1002/2015GL065175>
- Braud, S., Patouillard, S., & Bouvard, G. (2021). Gestion durable de la forêt alluviale ligérienne pour limiter l'aléa de rupture de digue. *LHB*, 107(1), 1913008.
- Cohen, J. (2013). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. In *Routledge eBooks*.
<https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Devanne, P. (n.d.). *The Loire River seen from the sky in Montsoreau, Loire-Anjou-Touraine*. . . iStock.
<https://www.istockphoto.com/fr/photo/le-fleuve-de-la-loire-vue-du-ciel-%C3%A0-montsoreau-gm1248558792-363658791>
- Morón, S., Edmonds, D. A., & Amos, K. (2017). The role of floodplain width and alluvial bar growth as a precursor for the formation of anabranching rivers. *Geomorphology*, 278, 78-90.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.026>
- Repetto, R., Tubino, M., & Paola, C. (2002). Planimetric instability of channels with variable width. *Journal of Fluid Mechanics*, 457, 79-109. <https://doi.org/10.1017/S0022112001007595>
- Wang, Z., Li, Y., Weng, S., Zhang, J., & Hu, T. (2019). Research on the Water Diversion Ratio Characteristics of the Plain River Network—A Case Study of the Channel in Zhangjiagang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 384(1), 012190.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012190>
- Wintenberger, C. L., Rodrigues, S., Bréhéret, J., & Villar, M. (2015). Fluvial islands: First stage of development from nonmigrating (forced) bars and woody-vegetation interactions. *Geomorphology*, 246, 305–320.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.026>

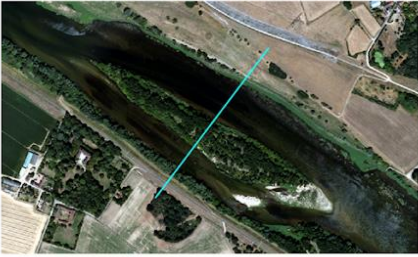
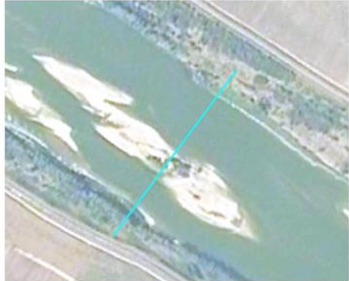
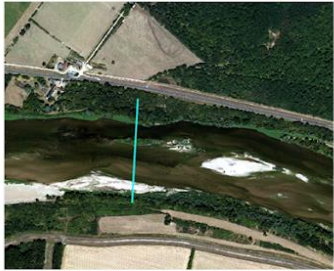
Wu, F., & Yeh, T. (2005). Forced bars induced by variations of channel width: Implications for incipient bifurcation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110(F2).
<https://doi.org/10.1029/2004jf000160>

VIII. Annexes

Annexe 1 : Sites pris en compte pour l'étude de la rétroaction de la formation d'une île sur la largeur de la plaine d'inondation

Site n°	Photographie en 1995 ou 1998	Photographie en 2019
1		
2		
3		
4		

5		
6		
7		
8		

9		
10		
11		
12		
13		



Directeur de recherche : Stéphane Rodrigues

Antonin Cesbron
Mélissa Courteix
PRI/DAE5
DAE/IMA
2024-2025

Détection et prédiction des bifurcations alluviales : la Loire de Nevers aux Ponts-de-Cé

Résumé : Les bifurcations alluviales sont associées à de nombreuses problématiques environnementales et sociétales. Elles abritent une riche diversité faunistique et floristique, permettent de lutter contre le phénomène d'incision du lit de la Loire et exacerbent l'exposition des populations humaines au risque d'inondation. La compréhension et l'anticipation de leur formation revêt donc une importance cruciale. Sur la Loire moyenne, les variations de largeur du chenal sont un des paramètres de contrôle majeurs de l'émergence des barres sédimentaires, la première étape de la formation des bifurcations. Cette étude vise à déterminer la gamme de variations de largeur la plus propice à la formation de barres sédimentaires de Nevers (Nièvre) aux Ponts-de-Cé (Maine et Loire). Pour cela, une méthodologie inspirée de précédents Projets de Fin d'Études a été développée. Elle consiste à comparer la longueur de transects générés perpendiculairement aux écoulements, dont l'emprise correspond à la largeur du chenal en période d'étiage, et réaliser des analyses statistiques sur les données collectées. Les résultats ont démontré une corrélation significative entre les variations de largeur et la présence de barres pour les espaces inter-transects de 750 et 1000 m, ainsi qu'une présence de barres plus importante pour des variations de largeur comprises dans la gamme [1,2;1,3[. L'hypothèse de départ : "Il existe une gamme d'élargissement du chenal favorable à la formation de barres sédimentaires, cette gamme est comprise entre 1,2 et 1,3" est donc confirmée. La méthodologie mise en place présente toutefois certaines limites qu'il serait préférable de réduire lors d'un prochain projet de recherche.

Mots Clés : Géomorphologie fluviale, bifurcations alluviales, barres sédimentaires, variations de largeur, chenal, transects