

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Détection et prédiction des bifurcations alluviales



https://cdn.radiofrance.fr/s3/cruiser-production/2017/07/b6289425-61bd-4876-a7ba-5b7060735907/1200x680_la_loire_vue_aerienne_patrick_durand_getty.jpg

Détection et prédiction des bifurcations alluviales : le cas de la Loire

**Directeur de recherche
Stéphane Rodrigues**

2023-2024

**Auteurs
Cazeaux Clémence
Rougeyres Arthur**

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 de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

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

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

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

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

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

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

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre directeur de projet Stéphane Rodrigues qui nous a proposé ce sujet et qui s'est tenu disponible tout au long de ce projet. Il a pris le temps de nous recevoir régulièrement afin de nous conseiller et de nous aider lors des difficultés rencontrées. Nous tenons ensuite à remercier Alex Andréault qui nous a beaucoup aidé en nous fournissant les données dont nous avons besoin. Il nous a lancé sur cette seconde phase du projet en prenant le soin de nous expliquer les points clés du sujet en veillant toujours à ce que l'on ait bien compris. Nous pensons aussi à Abdelhafid Bouamoud qui nous a bien facilité le travail en nous donnant accès au serveur réseau, c'était compliqué mais ça valait le coup. Enfin, nous n'oublions pas Igor Boyer, Jules Le Guern et Corentin Gaudichet pour nous avoir aidé ponctuellement.

SOMMAIRE

1. Introduction.....	8
2. Matériel et méthode	9
2.1. Méthode bande active	10
2.2. Méthode étiage	11
3. Résultats.....	13
3.1. Résultats bande active	13
3.1.1. Analyse des beta ratio	13
3.1.1.1. Beta ratio et bifurcation	13
3.1.1.2. Tests statistiques	15
3.1.1.3. Coefficient de variation des beta ratio	16
3.1.2. Analyse des variations de largeur.....	17
3.1.2.1. Secteur 18.....	17
3.1.2.2. Secteur 45.....	18
3.1.2.3. Secteur 49.....	19
3.2. Résultats Etiage	20
4. Discussion.....	21
4.1. Bande active	21
4.1.1. Analyse des beta ratio	21
4.1.1.1. Beta ratio et bifurcations.....	21
4.1.1.2. Tests statistiques	22
4.1.1.3. Coefficients de variation des beta ratio	22
4.1.2. Analyse des variations de largeur.....	22
4.2. Etiage.....	23
5. Limites et pistes d'amélioration	25
Conclusion	26
Bibliographie	27
Annexes	28
.....	34
.....	35

Table des figures

Figure 1 - Localisation des trois sites d'études le long de la Loire	9
Figure 2 - Graphique des profondeurs à l'étiage - secteur 18.....	10
Figure 3 - Résultats des transects interpolés à la surface en eau à l'étiage.....	11
Figure 4 - Nouvel axe intersectant les transects des bras principaux.	12
Figure 5 - Différence entre la largeur calculée par ArcGIS Pro et la largeur réelle mesurée avec l'outil de mesure de distances.....	13
Figure 6 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 18	14
Figure 7 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 45	14
Figure 8 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 49	14
Figure 9 - Exemple de bifurcation nette considérée dans cette analyse	16
Figure 10 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 18.....	17
Figure 11 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 45.....	19
Figure 12 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 49.....	20
Figure 13 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 18.....	21
Figure 14 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 45.....	21
Figure 15 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 49.....	21
Figure 16 - Cas de bifurcation potentielle où les orthophotos ne correspondent pas	23
Figure 17 - Bifurcation potentielle non considérée par la méthode.....	24
Figure 18 - Bifurcation potentielle non intersectée par les transects.....	24

Table des tableaux

Tableau 1 - Résultats des tests statistiques - bande active.....	15
Tableau 2 - Coefficients de variations des beta ratio pour les trois sites d'étude	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3 - Excel de l'analyse des coefficients directeurs des largeurs du secteur 45.....	18
Tableau 4 - Valeurs moyennes des beta ratio dans les bifurcations nettes.....	22

1. Introduction

Ce projet de fin d'études (PFE) est la suite de la phase bibliographique qui s'était concentrée sur une théorie de géomorphologie fluviale selon laquelle l'élargissement du lit d'une rivière provoque la formation d'une barre sédimentaire au centre du chenal, qui constitue un support privilégié pour la végétation pionnière puis ligneuse ce qui induit un piégeage sédimentaire. La barre devient une île, entretenant une bifurcation alluviale. L'intérêt de ce PFE est de pouvoir mieux appréhender les conditions propices à l'installation d'une bifurcation afin notamment, de pouvoir mieux gérer les risques d'inondation que ces dernières peuvent engendrer ou encore contrer les phénomènes d'incision en favorisant le dépôt de sédiments.

L'étude bibliographique réalisée en amont avait permis de mettre en lumière les différents processus qui entrent en compte lors de la formation d'une bifurcation :

- **La largeur de la plaine d'inondation.** Morón et al. ont démontré dans leur étude que des modèles de type anabranch se sont développés en réponse à un élargissement de la plaine d'inondation. En effet, lorsque les écoulements s'étendent dans les sections plus larges et plus étroites de la plaine d'inondation, le rapport d'aspect de l'écoulement (qui représente la largeur divisée par la profondeur), augmente et diminue pouvant amener à créer des barres alluviales dans les parties les plus larges (Morón et al., 2017).
- **La longueur d'onde des variations de la largeur du chenal.** Les variations de largeur du chenal exercent une influence sur la morphodynamique des barres ainsi que sur la vitesse des macroformes. Les barres se développent sous l'effet des variations de la largeur d'un chenal. Les barres migratrices présentent une instabilité induite par l'expansion/contraction du chenal dans le contexte hydrodynamique, où la réduction de la largeur du chenal et du rapport d'aspect entraîne une augmentation des vitesses d'écoulement et des contraintes de cisaillement du lit (Claude et al., 2014). Repetto et al. (2002), indiquent que les longueurs d'onde des variations de largeur du chenal sont le facteur qui influe le plus sur la topographie et donc sur les macroformes.
- **Beta ratio.** Le beta ratio est étroitement lié à longueur d'onde des variations de la largeur du chenal puisqu'il est défini comme : largeur du chenal sur sa profondeur. Wu et Yeh (2005) indiquent que la transition d'un type de barre sédimentaire à un autre dépend principalement de ce ratio et mettent en avant la séquence suivante : pour de faibles valeurs de beta, il est possible d'observer des barres centrales dans les zones d'élargissement (Cazeaux, Rougeyres, 2023).

La bibliographie permet donc d'établir une ligne directrice sur les processus qui entrent en compte lors de la formation d'une barre au centre du chenal et donc d'une bifurcation potentielle. Quelles conditions de beta ratio et de largeurs du chenal sont favorables à la présence de bifurcations pour le cas de la Loire ?

L'hypothèse de ce travail est qu'une valeur de beta ratio caractéristique des bifurcations existerait et permettrait de prédire leur apparition.

Par soucis de temps, ainsi que de données, il n'a pas été possible de tester l'influence de la largeur de la plaine d'inondation sur les processus de mise en place des bifurcations.

La présentation qui suit a pour but de regarder s'il est possible de trouver des conditions propices à la mise en place de bifurcations sur la Loire. Pour réaliser cela, les données "Lidar topo-bathymétrique de la Loire, ARD Intelligence des Patrimoines (Phase 2) – UMR CNRS 7324 CITERES (S. Rodrigues)" ont été utilisées afin de calculer de façon automatisée plusieurs paramètres hydromorphologiques de la Loire (largeur, profondeur, beta ratio).

2. Matériel et méthode

Pour répondre à la problématique, un outil, plus précisément un ensemble de géotraitements a été mis en place sur ArcGIS Pro permettant de calculer le bêta ratio au droit de transects répartis le long de la Loire avec un espacement choisi en amont.

Initialement l'objectif était d'étudier tout le linéaire de la Loire entre Gien et Montsoreau. Compte tenu des performances des ordinateurs à disposition, trois sites éloignés et distincts géomorphologiquement ont été sélectionnés le long du fleuve : un de 53 km dans le département 18 (entre Mesves-sur-Loire et Briare), 59 km dans le 45 (entre Chécy et Suèvres) et 73 km dans le 49 (entre Candes-St-Martin et Rochefort-sur-Loire) (Figure 1). Ils correspondent respectivement aux relevés LiDAR 18_1, 45_1 et 49_2.



Figure 1 - Localisation des trois sites d'études le long de la Loire

Le protocole employé sur les 3 sites, avec pour chacun d'entre eux les deux méthodes suivantes (méthode bande active et méthode étiage), est détaillé en annexes.

Le relevé LiDAR dans le secteur de la centrale nucléaire de Belleville dans le département 18 a été mauvais : les transects n'ont pas été retenus sur 7 km de part et d'autre de la centrale. Les résultats de profondeur ont

confirmé le linéaire à retirer comme on peut le voir dans la Figure 2. Les secteurs sous l'influence de seuils, épis ou duyes sont aussi écartés du fait de l'interférence de ce type de structures dans les processus hydrosédimentaires.

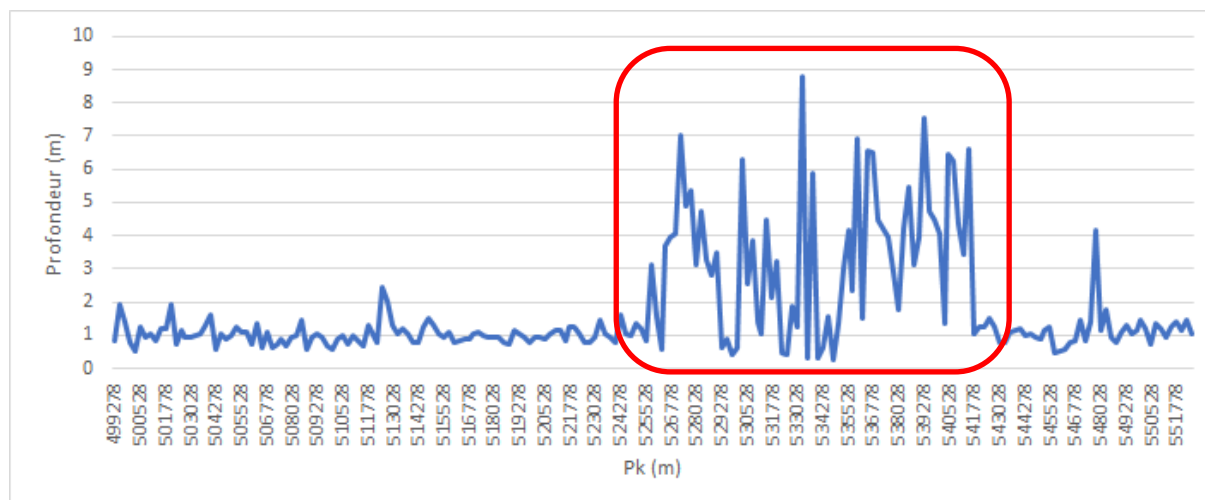


Figure 2 - Graphique des profondeurs à l'étiage - secteur 18.

Concernant les fonds de cartes utilisés, les dalles du SIEL DREAL les plus récentes datent de 2020 soit au début des campagnes LiDAR (menées entre 2020 et début 2023), tandis que les orthophotos ArcGIS Pro sont actualisées régulièrement et sont donc plus récentes. La comparaison avec les deux permet de remarquer que la Loire ne s'est pas déplacée, seulement les conditions hydrologiques varient : l'étiage est plus sévère avec les dalles du SIEL. Ces deux sources de données ont été utilisées selon les besoins ainsi que pour comparer.

2.1. Méthode bande active

But : Déterminer la largeur et la profondeur pour en déduire le beta ratio le long de la Loire à l'échelle de la bande active.

Données utilisées : A partir des orthophotos ArcGIS, la bande active a été numérisée manuellement en fonction des possibilités de débordement en cas de crues déterminées visuellement. L'axe hydraulique de la Loire issu de la base de données Carthage a été utilisé puis grâce aux données LiDAR, le processus de géotraitement annexé a été employé.

Principe de la méthode : Des transects suffisamment larges pour aller au-delà de la bande active numérisée ont été générés tous les 250 m le long de l'axe hydraulique. La valeur 250 a été choisie car en espaçant encore moins les transects, les temps de calculs devenaient trop importants pour le reste des manipulations (particulièrement l'ajout des informations de surface). Les transects ont ensuite été interpolés, c'est-à-dire recoupés selon la forme de la bande active puis, grâce au MNT, les valeurs d'altitude Z_{moyen} et Z_{max} le long de chaque transect ont été associées à chaque transect afin de calculer le bêta ratio.

$$\text{Beta} = \text{largeur du transect} / (Z_{max} - Z_{moyen})$$

Limites : Utiliser Z_{max} pour la méthode bande active présuppose que la cote altimétrique des deux extrémités des transects est similaire. Autrement, il aurait fallu prendre la valeur des deux la plus faible pour estimer au plus près la section potentielle véritablement en eau.

2.2. Méthode étiage

En complément de la méthode à l'échelle de la bande active, un deuxième outil ajusté aux conditions à l'étiage a été développé puisqu'il a été montré que ce sont les conditions propices à la formation de bifurcation (Cazeaux, Rougeyres, 2023).

But : Déterminer la largeur et la profondeur pour en déduire le beta ratio le long de la Loire à l'échelle de la surface en eau à l'étiage.

Données utilisées : En plus du MNT et des transects déjà générés avec la méthode bande active, un Excel contenant les points XYZ de la ligne d'eau à l'étiage lors des campagnes LiDAR du MNT ont été utilisés.

Axe hydraulique : Initialement, l'axe du thalweg avait été créé (streamburning -> direction des flux -> accumulation des flux) et après superposition de l'axe hydraulique BD Carthage, celui-ci empruntait le thalweg quasiment à l'identique ce qui permettait de s'affranchir de l'étape de numérisation du thalweg très chronophage. Le but était, dans le cas des bifurcations, de discriminer les deux bras pour ne retenir que le principal pour pouvoir à la fin représenter les données selon le point kilométrique le long de l'axe Loire (Pk0 = source de la Loire BD Carthage). Cette méthode avait l'avantage d'être plus rigoureuse car le critère de discrimination était le thalweg mais a conduit à une perte d'information. En effet, à de nombreux endroits l'axe hydraulique BD Carthage n'intersectait pas les transects interpolés à la surface en eau à l'étiage (Figure 3).



Figure 3 - Résultats des transects interpolés à la surface en eau à l'étiage

Un nouvel axe basé sur les orthophotos du SIEL a donc été numérisé manuellement, passant systématiquement par un morceau de transect, et ce dans ce qui semblait être les bras principaux. Deux transects distincts sont situés de part et d'autre de la barre centrale, c'est bien le bras de droite sur la Figure 4, qui peut être considéré comme le principal.



Figure 4 - Nouvel axe intersectant les transects des bras principaux.

Principe de la méthode : Les transects de la méthode bande active sont réutilisés afin de conserver les mêmes emplacements et de pouvoir ensuite les comparer. Les données d'altitude de ligne d'eau à l'étiage sont associées aux transects non-interpolés via une jointure spatiale : le point le plus proche de chaque transect et donc sa valeur d'altitude est associée au transect. Les transects sont ensuite convertis en raster afin de pouvoir utiliser la calculatrice raster grâce à laquelle on ne conserve que les parties des transects dont l'altitude est inférieure à celle du MNT ; soit les parties immergées à l'étiage (cf. Figure 3 et 4). C'est à ce stade que l'axe hydraulique numérisé à la main a pu être créé.

Il n'est pas possible de convertir le raster obtenu en polygones car ce sont des valeurs décimales associées à chaque pixel (i.e. les valeurs d'altitude). Pour contourner ce problème et ainsi ne pas arrondir à l'entier les altitudes, le raster est converti en points puis en polygones. A ce stade-là, nous avons un fichier contenant la valeur d'altitude de la ligne d'eau au droit de chaque transect.

A présent il faut obtenir les largeurs et l'altitude moyenne le long des transects, renseignée par le MNT. Le raster des parties immergées à l'étiage est cette fois converti en entiers puis en polygones (les largeurs des transects sont automatiquement calculées). Ensuite, les polygones intersectées par l'axe hydraulique numérisé à la main ont été conservées : sur celles-ci ont été calculés le Zmoyen.

Enfin, une jointure spatiale du fichier, renseignant les valeurs d'altitudes de ligne d'eau de chaque transect avec celui-ci des largeurs et des Zmoyen, est effectué pour pouvoir calculer le bêta ratio.

$$\text{Beta} = \text{largeur du transect corrigée}^1 / (\text{altitude de la ligne d'eau} - \text{Zmoyen})$$

Largeur du transect corrigée¹ : cf. limites ; valeur du facteur de correction = 0.851165891712109

Limites :

1. La conversion des transects du format raster à shapefile polyligne entraîne une surestimation de la valeur de largeur. Pour pallier cela un facteur de correction est appliqué (déterminé à partir d'une sélection de 15 transects (5 par site) pris au hasard pour lesquels les longueurs réelles ont été comparées aux largeurs surestimées). Malgré la correction, en fonction de la longueur et l'orientation des transects, la fidélité par rapport aux valeurs vraies n'est pas tout le temps bonne ce qui rend les résultats moins précis. Une réduction de la taille des cellules du raster (0.1 et même 0.01 à la place de 1) ne permet pas d'améliorer la correspondance et rallonge nettement les temps de calcul (Figure 5).

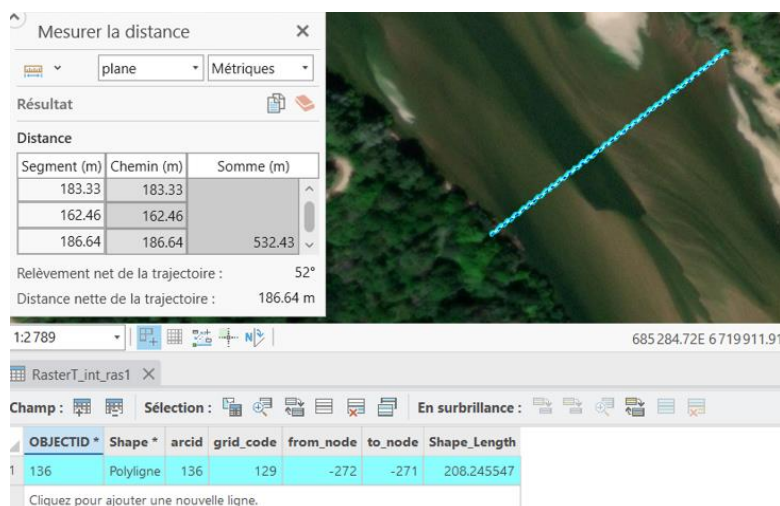


Figure 5 - Différence entre la largeur calculée par ArcGIS Pro et la largeur réelle mesurée avec l'outil de mesure de distances

2. Le calcul des largeurs d'eau à l'étiage est moins adapté au secteur 49 où le chenal y est très subdivisé si bien qu'il est difficile d'y discerner un chenal principal.

3. Pour poursuivre l'analyse, des orthophotos représentant les conditions hydrologiques lors de la campagne LiDAR du site sont nécessaires.

3. Résultats

Les tables attributaires des transects de chaque secteur de la Loire, contenant les informations de largeur, de profondeur et de bêta ont été extraites d'ArcGIS Pro pour pouvoir exploiter les données sur Excel. Le but est d'analyser ces paramètres afin de mettre en lumière des conditions prédictives de bifurcations.

3.1. Résultats bande active

3.1.1. Analyse des beta ratio

3.1.1.1. Beta ratio et bifurcation

Dans un premier temps, le graphique représentant le beta ratio calculé à chaque transect avec en parallèle la position des bifurcations par rapport à ces mêmes transects a été réalisé pour les trois sites (Figure 6, 7 et 8).

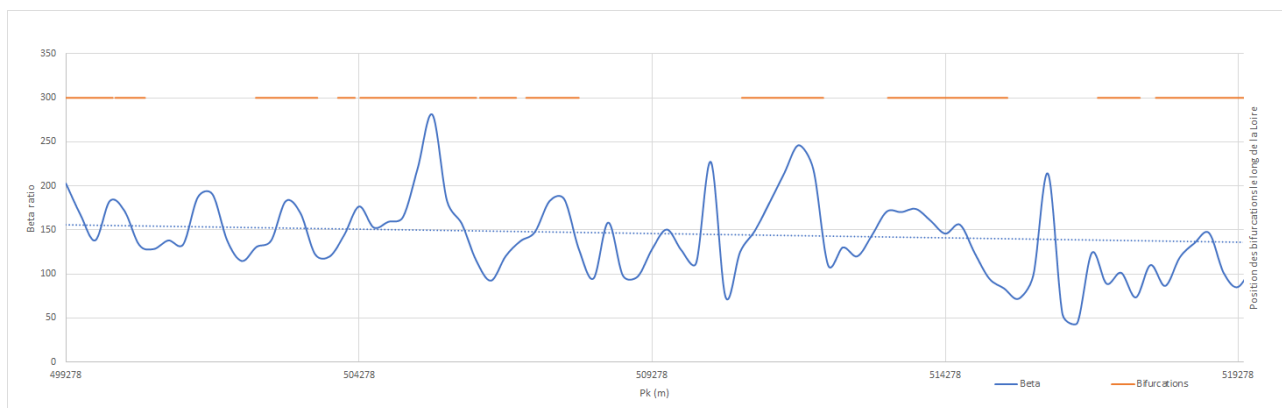


Figure 6 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 18

Le linéaire à partir de la mauvaise acquisition LiDAR (liée à la présence de la centrale de Belleville) a été exclu car trop court et trop morcelé (présence de seuils).

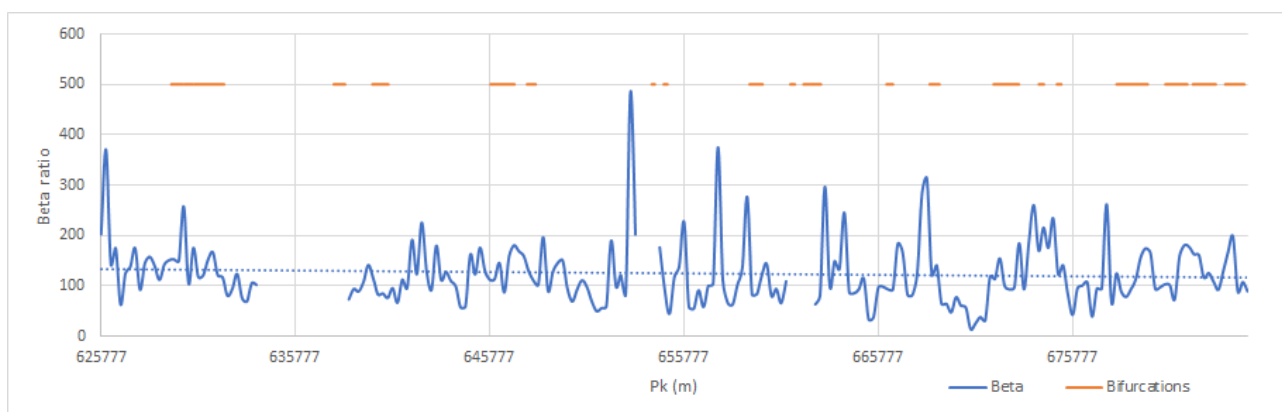


Figure 7 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 45

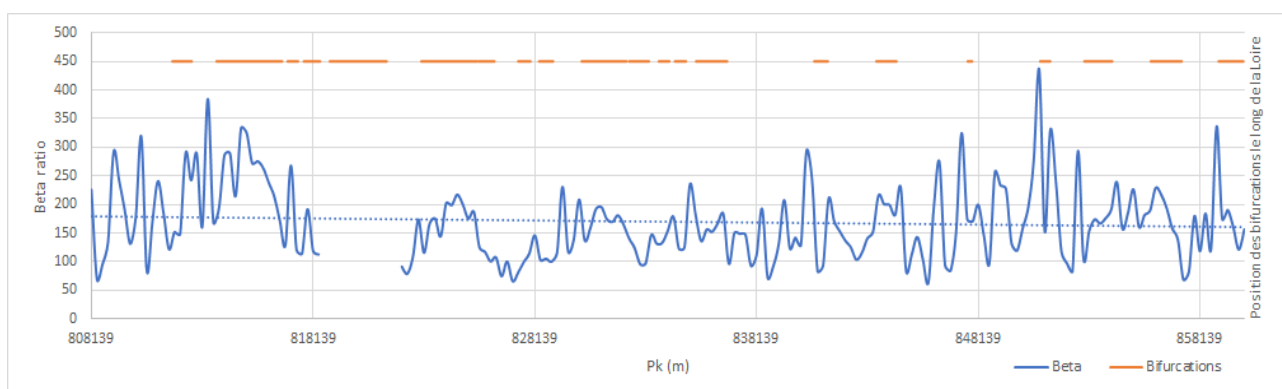


Figure 8 - Localisation des bifurcations par rapport au beta ratio des transects - secteur 49

De manière générale, aucun lien ne semble se dessiner à l'œil, une analyse statistique a été faite pour vérifier cela.

3.1.1.2. Tests statistiques

Des tests de corrélation de Pearson ont été réalisés compte tenu du nombre d'échantillons, c'est-à-dire de transects : $N > 50$ pour les trois sites.

D'une part, la corrélation entre la présence de bifurcation au droit d'un transect et la valeur de beta ratio de ce même transect a été étudiée.

D'autre part, la corrélation entre la présence de bifurcation au droit d'un transect et la valeur du coefficient directeur entre ce transect et celui qui le précède (dans le sens l'écoulement donc le transect à son amont) par rapport à la variation de largeur entre les deux.

Les résultats sont regroupés dans le Tableau 1 ci-dessous, avec à chaque fois, les p-values indiquées.

Tableau 1 - Résultats des tests statistiques - bande active

Test de corrélation (Pearson - $\alpha=0.05$) - secteur 18 :											
Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :			Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :		
Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur
Bifurcations	1	0.044	Bifurcations	0	0.524	Bifurcations	1	0.062	Bifurcations	0	0.365
Beta	0.044	1	Beta	0.524	0	Coefficient directeur	0.062	1	Coefficient directeur	0.365	0

Test de corrélation (Pearson - $\alpha=0.05$) - secteur 45 :											
Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :			Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :		
Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur
Bifurcations	1	-0.028	Bifurcations	0	0.663	Bifurcations	1	0.110	Bifurcations	0	0.092
Beta	-0.028	1	Beta	0.663	0	Coefficient directeur	0.110	1	Coefficient directeur	0.092	0

Test de corrélation (Pearson - $\alpha=0.05$) - secteur 49 :											
Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :			Matrice de corrélation (Pearson) :			p-values (Pearson) :		
Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Beta	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur	Variables	Bifurcations	Coefficient directeur
Bifurcations	1	0.204	Bifurcations	0	0.001	Bifurcations	1	0.028	Bifurcations	0	0.639
Beta	0.204	1	Beta	0.001	0	Coefficient directeur	0.028	1	Coefficient directeur	0.639	0

3.1.1.3. Coefficient de variation des beta ratio

Dans cette partie, le coefficient de variation des beta ratio en entrée de bifurcation, dans la bifurcation et en sortie a été calculé (Tableau 2). Il n'est pas calculé sur l'ensemble des bifurcations pour chaque secteur mais sur les bifurcations qui apparaissent comme les plus nettes, c'est-à-dire assez centrales et bien végétalisées comme le montre la Figure 9. Pour le premier secteur, le 18, 10 bifurcations ont été retenues, 15 pour le 45 et 19 pour le 49.



Figure 9 - Exemple de bifurcation nette considérée dans cette analyse

Il est important de préciser que toutes les bifurcations considérées ne sont pas aussi imposantes. Certaines sont petites et moins centrales mais représentaient quand même des beaux cas à considérer.

Tableau 2 - Coefficients de variations des beta ratio pour les trois sites d'étude

	CV (18)	CV (45)	CV (49)
Beta ratio d'entrée de bifurcation (%)	31	27	50
Beta ratio dans la bifurcation (%)	28	28	23
Beta ratio en sortie de bifurcation (%)	40	30	36

Pour le secteur 18, à part pour les beta ratio dans la bifurcation, les autres sont au-dessus de 30% signifiant des données hétérogènes. Le secteur 45 à quant à lui des données pour les beta ratio d'entrée et d'intérieur de bifurcation qui sont en dessous de 30 indiquant une faible dispersion des données par rapport à la moyenne. Enfin, le 49 est le secteur où les données sont les plus largement distribuées autour de la moyenne avec un coefficient de variation de 50% pour les beta ratio d'entrée de bifurcations et un coefficient de 36% pour les beta ratio de fin de bifurcations. Seul le coefficient de variation correspondant aux beta ratio dans les bifurcations est inférieur à 30%.

3.1.2. Analyse des variations de largeur

3.1.2.1. Secteur 18

Pour chaque secteur, le coefficient de variation des largeurs a été calculé afin de mesurer la dispersion relative des données autour de la moyenne. Les coefficients directeurs entre chaque transect ont aussi été calculés dans le but d'examiner les différences de largeur entre un transect et celui le précédent, afin d'ensuite voir si certaines valeurs de coefficients directeurs ne sont pas propices à la mise en place de bifurcations. Les coefficients directeurs ont été calculés comme suit : $(y_B - y_A) / (x_B - x_A)$. Une fois ces derniers calculés, un graphique représentant la distribution de ceux-ci a été tracé dans le but de choisir les coefficients directeurs qui seraient liés à la présence de bifurcations d'après ce qu'il est possible d'observer sur les orthophotos de la Loire.

Pour le secteur 18_1, il est possible d'observer (Figure 10) que les coefficients directeurs sont principalement compris entre -0.2 et 0.1 traduisant une faible variation de largeur entre les transects.

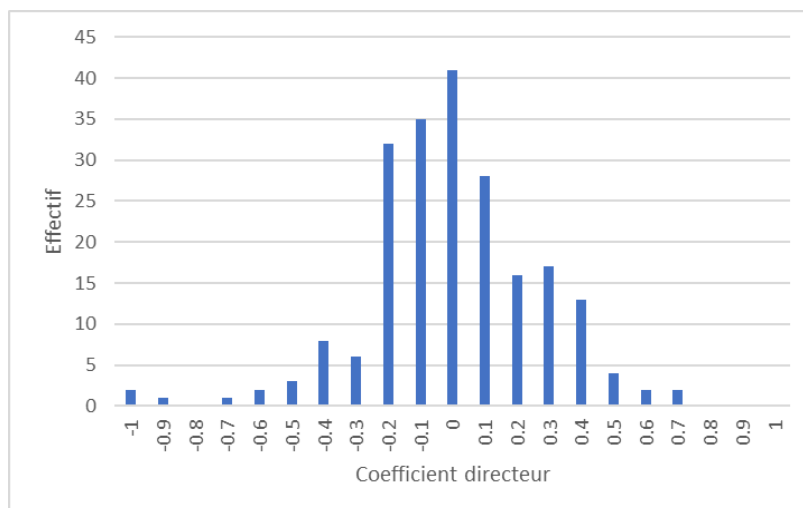


Figure 10 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 18

Les transects étudiés seront ceux où le coefficient directeur est supérieur à 0.4 et ceux où le coefficient directeur est inférieur ou égal à -0.4. Cette valeur a été choisie car cela représente un élargissement ou un rétrécissement du chenal assez important, l'apparition de bifurcation étant donc susceptible d'apparaître pour ce genre de valeurs. De plus, sur le graphique ci-dessus, une séparation nette se fait vers cette valeur par rapport au reste. A partir des valeurs 0.4 et -0.4 les coefficients directeurs sont plus rares.

Le Tableau 3 ci-dessous représente en jaune les transects qui ont un coefficient directeur supérieur ou inférieur à 0.4 et -0.4. Pour chaque transect, est indiqué dans la dernière colonne ce qui se trouve au niveau du transect sur la Loire. En vert, sont indiquées les bifurcations qui apparaissent pour des secteurs où le coefficient directeur est hors gamme retenue (valeurs comprises entre -0.4 et 0.4).

Tableau 2 - Excel de l'analyse des coefficients directeurs des largeurs du secteur 45

OID_	PK (mètre depuis source)	Shape_Length	Coefficient directeur (a)	b	Beta	Importante variation coeff directeur
1	499278	519.9060973			202.7715	
2	499528	397.7129905	-0.5	244553.2	166.933655	Présence d'une petite bifurcation ,île végétalisée
3	499778	368.9121676	-0.1	57945.0	138.250153	
4	500028	480.7546808	0.4	-223216.8	183.045075	Fin d'une petite bifurcation, fin d'une île végétalisée, le lit s'élargit, amont d'une autre bifurcation
5	500278	535.8542485	0.2	-109724.6	171.464523	
6	500528	374.9764726	-0.6	322470.3	132.924912	Fin d'une petite bifurcation, fin d'une île végétalisée
7	500778	336.9748307	-0.2	76458.5	128.359863	
8	501028	357.9070156	0.1	-41592.5	138.144562	
9	501278	363.9569499	0.0	-11766.8	133.587616	
10	501528	336.9647675	-0.1	54486.3	187.114136	
11	501778	362.9668464	0.1	-51826.1	190.52092	
12	502028	311.9837024	-0.2	102691.8	138.126267	
13	502278	393.9717572	0.3	-164329.2	114.72187	
14	502528	444.9348062	0.2	-101996.5	130.699188	Présence d'une bifurcation
15	502778	480.9475067	0.1	-71944.6	137.906662	
16	503028	528.8942212	0.2	-95945.3	182.766495	
17	503278	543.8912218	0.1	-29646.8	169.150879	
18	503528	515.8968206	-0.1	56899.8	122.40432	
19	503778	417	-0.4	199705.2	119.925507	Entre deux bifurcations
20	504028	570.8858228	0.6	-309680.2	144.689056	Début d'une bifurcations sur la droite

Sur les 24 bifurcations identifiées sur tout le secteur, 21 ont été détectées par les coefficients directeurs supérieurs ou égaux à 0.4 et inférieurs ou égaux à -0.4. Est entendu détecté lorsqu'une bifurcation se situe effectivement sur ou à proximité immédiate du transect sur lequel est calculé le coefficient directeur. De ce fait, pour le secteur 18_1, cela donne une détection de 88% des bifurcations en appliquant cette méthode.

Remarque : Les secteurs où les relevés LiDAR ont été mauvais de part et d'autre de la centrale de Belleville n'ont pas été retirés de cette analyse puisque seules les données de largeur sont utilisées.

3.1.2.2. Secteur 45

Pour le secteur 45_1, il est possible d'observer que les coefficients directeurs sont principalement compris entre -0.2 et 0.2 (Figure 11) montrant une tendance générale de faible variation de largeur entre les transects. La distribution des coefficients directeurs est moins étalée en comparaison avec le secteur 18_1. Les coefficients de variations tendent moins vers des valeurs extrêmes.

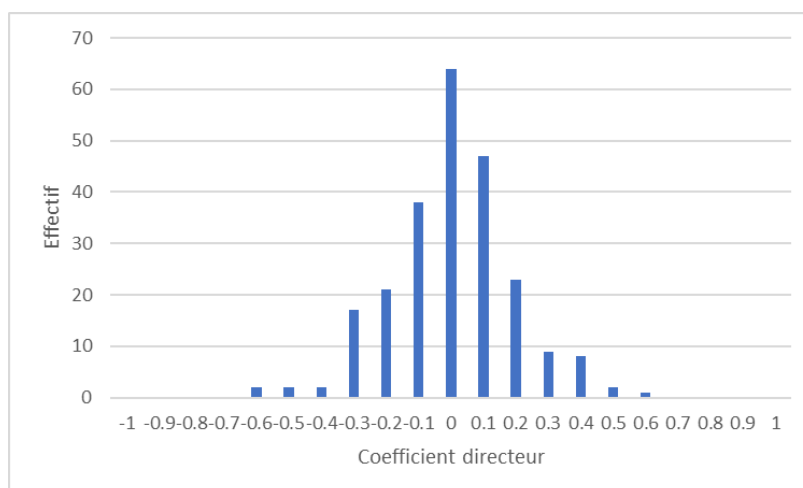


Figure 11 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 45

Comme précisé précédemment, les coefficients directeurs sont majoritairement compris entre les valeurs -0.2 et 0.2. De ce fait, les transects étudiés afin de pouvoir analyser les variations de largeur seront ceux qui auront un coefficient directeur inférieur ou égal à -0.3 et supérieur ou égal à 0.3.

Sur le même principe que pour le secteur 18_1, le tableau présent en Annexe 2 indique en jaune les transects dont le coefficient directeur est inférieur ou égal à -0.3 et supérieur ou égal à 0.3.

Sur les 23 bifurcations identifiées sur tout le secteur, 16 ont été détectées par le coefficient directeur supérieur, inférieur ou égal à 0.3 et -0.3. De ce fait, pour le secteur 45_1, cela donne une détection d'environ 70% des bifurcations en appliquant cette méthode.

3.1.2.3. Secteur 49

Le coefficient de variation pour les largeurs est de 27%. Il est inférieur à 30% ce qui voudrait dire que les données sont homogènes.

Pour ce secteur 49_2, il est possible d'observer (Figure 12) que les coefficients directeurs sont assez largement distribués, toutefois, ils sont majoritairement compris entre -0.2 et 0.2 montrant une tendance générale de faible variation de largeur entre les transects.

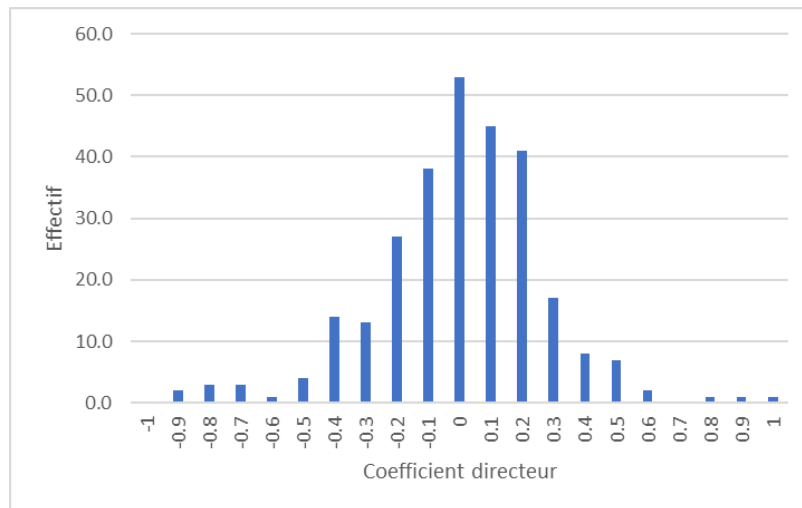


Figure 12 - Distribution des coefficients directeurs dans le secteur 49

Pour ce secteur-ci, une hésitation se crée entre -0.3, 0.3 et -0.4, 0.4 comme choix pour la valeur seuil du coefficient directeur. De ce fait, dans le tableau présenté en Annexe 3, tous les transects ayant 0.3 ou -0.3 comme coefficient directeur ont été surlignés en beige.

Sur les 22 bifurcations identifiées sur tout le secteur, 16 ont été détectées lorsque le coefficient directeur était supérieur, inférieur ou égale à 0.3 et -0.3. De ce fait, cela donne une détection d'environ 73% des bifurcations. Toutefois, en excluant les valeurs 0.3 et -0.3, la détection des bifurcations passent de 73% à 45% avec seulement 10 bifurcations détectées sur les 22.

Remarques générales : Il est important de faire remarquer que pour les trois secteurs, il arrive assez régulièrement que les bifurcations soient détectées en double, au moment de l'élargissement du chenal et au moment du rétrécissement, elles ne sont comptées bien évidemment qu'une seule fois. De plus, il faut préciser qu'il est possible de remarquer que pour certains transects le coefficient directeur était assez important lié à un transect qui se trouvait en réalité de travers et donc pour lequel sa largeur était surestimée. Ces cas-là n'ont pas été comptés dans les bifurcations détectées pour chaque secteur.

Limites : Cette méthode de détection des bifurcations comporte des limites liées aux variations du chenal. En effet, lorsque l'élargissement ou le rétrécissement du chenal est progressif, les coefficients directeurs des transects deviennent alors petits et risquent d'être exclus de l'analyse.

3.2. Résultats Etiage

Le but était de s'intéresser aux conditions d'étiage pour voir si certaines étaient susceptibles de générer de nouvelles bifurcations que nous appelons "bifurcations potentielles". Ce sont les barres sédimentaires situées au centre du chenal et exondées à l'étiage (germination de végétaux pionniers possible).

Lors des relevés LiDAR, il est possible de constater que les conditions hydrologiques n'étaient pas aussi basses qu'au moment des orthophotos du SIEL puisque que plusieurs barres sont observables au niveau des transects, ce qui ne devrait pas être le cas ; le but étant d'ajuster les transects à la section en eau. Les orthophotos ArcGIS Pro non plus ne s'ajustent pas aux conditions hydrologiques lors des campagnes LiDAR. Il n'a donc pas été possible d'identifier des bifurcations potentielles de façon fidèle aux données et donc de poursuivre l'analyse comme pour la méthode "bande active".

Il est néanmoins possible de comparer les valeurs de beta ratio obtenues à celles issues de la méthode bande active (Figure 13,14 et 15).

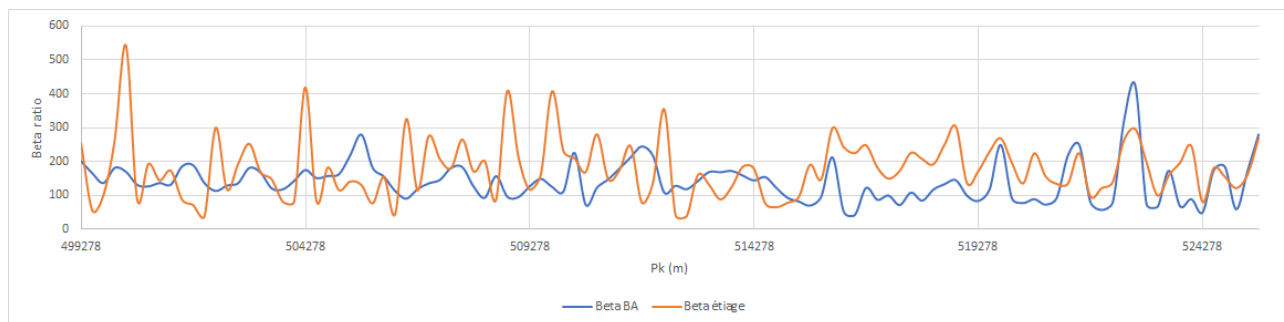


Figure 13 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 18

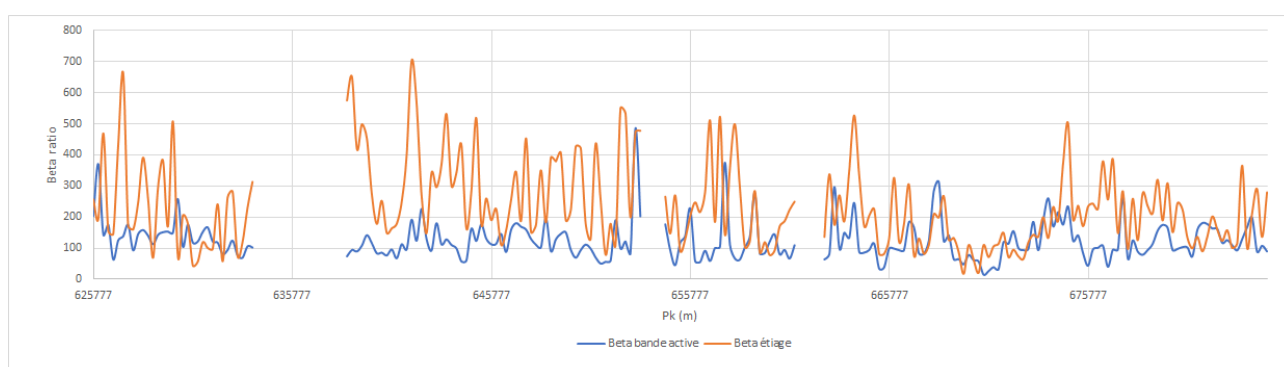


Figure 14 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 45

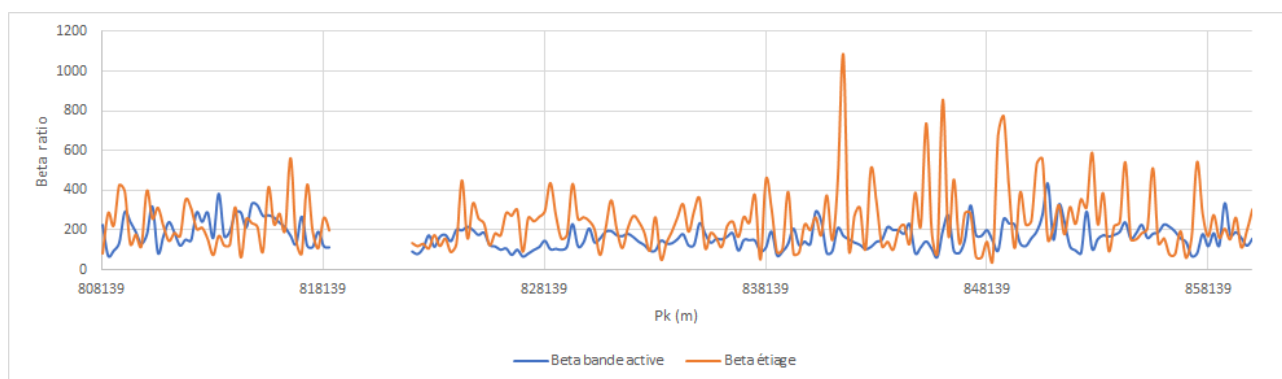


Figure 15 - Comparaison des beta ratio à l'échelle de la bande active et à l'étiage - secteur 49

4. Discussion

4.1. Bande active

4.1.1. Analyse des beta ratio

4.1.1.1. Beta ratio et bifurcations

Les graphiques permettent de rejeter l'hypothèse selon laquelle un beta ratio caractéristique prédisant l'apparition d'une bifurcation existerait : en effet, on observe des bifurcations pour toute valeur de beta ratio et ce qu'importe le site.

4.1.1.2. Tests statistiques

On obtient une relation de corrélation entre les bifurcations et le beta ratio sur le secteur 49. Elle en demeure tout de même faible (0.204). Pour le reste, que ce soit pour la corrélation bifurcation-beta ou bifurcation-coefficient directeur, aucune corrélation significative au seuil $\alpha = 0.05$ n'est observée.

Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de lien puisqu'il a déjà été montré dans l'état de l'art (Cazeaux, Rougeyres, 2023) mais que d'autres facteurs rentrent en compte et que c'est deux facteurs que sont le bêta et le coefficient directeur des largeurs ne suffisent pas à prédire les bifurcations. Il n'est donc pas possible pour l'instant de dresser une règle générale.

4.1.1.3. Coefficients de variation des beta ratio

En considérant un seuil de 30%, seuls les bêta situés dans les bifurcations sont relativement homogènes peu importe le site. Il est donc possible de dresser le tableau suivant :

Tableau 3 - Valeurs moyennes des beta ratio dans les bifurcations nettes

Secteur	18	45	49
Beta	151	110	170

Il apparaîtrait donc plutôt une gamme de beta ratio initiateurs de bifurcations et non une valeur précise. Cette gamme diffère selon les secteurs ce que montre les valeurs moyennes dans le tableau ci-dessus ; ce qui n'est pas étonnant compte tenu des caractéristiques morphologiques propres à chaque site (lit plus large et barres sédimentaires plus nombreuses sur le 49 par exemple).

4.1.2. Analyse des variations de largeur

De bon taux de détection des bifurcations sont obtenus (88% sur le 18, 70% sur le 45 et 73% pour le 49). Ce résultat, intéressant de prime abord compte tenu de l'objectif de ce travail, vient en contradiction avec les séries de tests statistiques effectués qui ne montraient pas de relation de corrélation entre les coefficients directeurs et les bifurcations. Cela peut provenir de la différence de rigueur des deux méthodes employées. L'analyse des coefficients directeurs est plus souple et plus large : elle est effectuée à l'œil et intègre aussi les bifurcations à proximité des transects même si ceux-ci n'intersectent pas la bifurcation en question ; ce que ne peut pas faire la méthode statistique qui regarde au droit du transect s'il y a une intersection ou non d'une bifurcation. Il est donc probable qu'en réduisant l'espacement entre les transects (de 250m à 100m par exemple) les tests statistiques aient une meilleure corrélation.

Sur un échantillon du linéaire du 18, les tests statistiques ont été réalisés avec des transects tous les 100m et tous les 10m. La corrélation se voit améliorée avec l'espacement de 100m tandis qu'elle est réduite à presque 0 avec 10m.

Le taux de détection a été étudié mais cela ne suffit pas, en effet la plage de coefficients directeurs retenue pourrait très bien comporter des sites sur lesquels aucune bifurcation ne se trouve en réalité. Le nombre de sites détectés mais sans bifurcation en réalité a donc été étudié :

- Sur le 18 un seul secteur d'élargissement a été détecté alors qu'il ne présente pas de bifurcation. Pour autant, il est possible d'observer des barres sédimentaires exondées dont une barre centrale pouvant devenir une bifurcation ce qui n'invalides pas la méthode.
- Deux secteurs détectés avec des barres centrales pour le 45 ;
- Le cas du 49 comme déjà évoqué est plus complexe car la représentation des macro-formes est différente sur ce secteur avec entre autres de nombreuses barres centrales et alternes. Cinq secteurs détectés comme avec bifurcation mais présentant seulement des barres centrales / bifurcations potentielles sont observés ainsi qu'un secteur détecté sans être favorable à la mise en place de bifurcation.

Cela reste marginal pour les secteurs 18 et 45, mais notable pour le 49 (6 erreurs sur 22 bifurcations comptabilisées).

Pour revenir à la question des transects de travers exagérant les variations de largeur, il se trouve qu'après approfondissement les cas concernés sont des cas où il y a quand même une bifurcation en réalité ; ce n'est donc pas forcément un problème en termes de qualité de détection. Le fait que certains transects soient de travers est imputé à la configuration de l'axe hydraulique BD Carthage au droit d'ouvrages (ponts, seuils, etc.) ou dans les secteurs où la largeur de la bande active varie. De plus, Repetto et al., 2002 ont mis en évidence le rôle fondamental des divergences des lignes de courant dans la formation des bifurcations ce qui peut expliquer pourquoi l'on rencontre malgré tout des bifurcations lorsque les transects sont de travers.

4.2. Etiage

Il n'a pas été possible de traiter les résultats de la même manière qu'avec la bande active comme expliqué dans la partie "résultats" à cause de l'écart des conditions hydrologiques des orthophotos à disposition par rapport à celles des campagnes LiDAR. Plusieurs limites à la méthode étiage sont présentées ci-dessous (Figure 16, 17 et 18).



Figure 16 - Cas de bifurcation potentielle où les orthophotos ne correspondent pas

Dans le cas ci-dessus, il est possible ici d'observer une bifurcation potentielle où les orthophotos ne correspondent pas aux conditions hydrologiques des transects : sur la Figure X par exemple, les transects ne s'ajustent pas à la surface en eau et débordent sur des barres alternes ce qui masque l'élargissement-rétrécissement.



Figure 17 - Bifurcation potentielle non considérée par la méthode

Ensuite, la barre centrale peut être clairement assimilée à une bifurcation potentielle pourtant elle n'est pas prise en compte par la méthode étiage car celle-ci suppose de sélectionner un des deux chenaux. Il y a donc une perte de bifurcations potentielles inhérentes à cette méthode.



Figure 18 - Bifurcation potentielle non intersectée par les transects

Enfin, l'espacement de 250m a conduit à l'exclusion de nombreuses bifurcation potentielles, notamment les petites, car non intersectées par les transects.

Ceci étant dit, on peut comparer les bêta ratio obtenus avec les deux méthodes : ceux obtenus à l'étiage sont globalement supérieurs à ceux à l'échelle de la bande active ce qui va de pair avec le fait qu'à l'étiage les

conditions sont propices à l'exondation de barres qui par la suite peuvent se végétaliser et donc conduire à une bifurcation.

5. Limites et pistes d'amélioration

Dans le cadre de ce travail où l'on s'intéresse aux réponses du chenal par rapport à ses variations morphologiques, les linéaires de Loire retenus (18_1, 45_1 et 49_2) posent quelques problèmes. Il serait en effet plus pertinent de sélectionner et de se concentrer sur des secteurs dépourvus de perturbations hydromorphologiques trop importantes qui s'ajouteraient à l'ensemble des variables gouvernant la formation de bifurcations déjà nombreuses. Les secteurs urbanisés et/ou aménagés pour permettre la navigation sont à éviter. C'est d'ailleurs une limite des secteurs 45 et 49 où de fait plusieurs tronçons ont dû être retirés pour ne pas biaiser l'analyse. Il serait donc peut être plus judicieux de travailler sur des tronçons plus courts pour pouvoir réduire l'espacement entre les transects tout en conservant des temps de calculs acceptables (tous les 10 m par exemple au lieu de 250 m) afin de pouvoir intersecter un maximum de bifurcations.

Plus de l'ordre du détail, initier les transects sur des points kilométriques ronds et intelligibles serait un bon point, pour simplifier la lecture des graphiques notamment.

Quant à la partie Analyse des beta ratio

Afin de reproduire le traitement des transects réalisé dans la sous-partie "Analyse des variations de largeur" effectué par opérateur, peuvent être envisagées les étapes suivantes :

- Créer un tampon de 10-20m par exemple pour chaque transect
- Intersecter les bifurcations avec les tampons puis refaire les tests de corrélation

Pour éviter la double détection des bifurcations dans l'analyse des coefficients directeurs (comme expliqué dans les limites), il faudrait tester de ne prendre que les coefficients positifs qui correspondent aux zones d'élargissement du lit tout en vérifiant que l'on ne dégrade pas la qualité de détection notamment dans le cas des élargissements progressifs mais rétrécissements brusques : en effet, certaines bifurcations peuvent être détectées au moment du rétrécissement et non de l'élargissement.

Il serait en outre intéressant de reproduire l'étude des variations de largeur cette fois-ci en étudiant les variations de beta ratio. En effet, on peut s'attendre à de meilleurs taux de détection des bifurcations avec ce paramètre qui intègre déjà les variations de largeur mais aussi la profondeur.

Une autre chose peut être envisagée, la création d'un nouvel outil qui cette fois-ci calculerait la longueur d'onde des variations de largeur du chenal de façon automatisée afin de comparer les résultats avec la présence effective des bifurcations.

Conclusion

Un outil permettant de générer des transects le long d'un cours d'eau et de calculer leur beta ratio de façon automatisée avec l'outil ArcGIS Pro a été développé. Ce dernier a permis, sur la base des données LiDAR, les photographies aériennes ou encore l'axe hydraulique de la Loire, de calculer la largeur et la profondeur moyenne des transects sur les trois sites étudiés et ainsi d'en déduire le beta ratio. En parallèle l'écart de largeur entre chacun de ces transects a été calculé sous la forme de coefficient directeur ce qui a permis de détecter la majorité des bifurcations existantes.

Il a été confirmé que ces facteurs (beta ratio, variations de largeur) jouent un rôle dans les processus d'émergence de bifurcation (Cazeaux, Rougeyres, 2023) néanmoins, pris tout seul, ils ne suffisent pas à prédire leur présence comme souhaité avec ce travail. En effet, une corrélation significative entre les valeurs de beta ratio et la présence de bifurcations a été trouvée mais elle ne concerne que le secteur 49 et reste modérée.

Malheureusement, la méthode étiage, qui aurait pu permettre la vérification de la méthode bande active, n'a pas pu être développée du fait des orthophotos non fidèles aux conditions hydrologiques lors des campagnes LiDAR.

Bien que chronophage et nécessitant un opérateur, la méthode employée sur la base des coefficients directeurs des variations de largeur, permet de recenser des zones dans lesquelles effectivement se trouve des bifurcations. Il faudrait donc l'améliorer et l'automatiser afin de pouvoir étendre l'analyse et avoir une meilleure rigueur / reproductibilité.

Quant à l'hypothèse de départ, l'idée selon laquelle un beta ratio caractéristique pourrait prédire l'apparition des bifurcations a été rejetée, celles-ci pouvant avoir lieu pour toute sorte de valeur.

Ce travail ne permet donc pas, avec l'outil SIG développé, de pouvoir prédire les bifurcations potentielles, ni de pouvoir détecter toutes les bifurcations de façon systématique, mais constitue un socle sur lequel s'appuyer pour poursuivre l'analyse, notamment en modifiant certaines approches voire en ajoutant d'autres paramètres faisant défaut pour enfin prédire et détecter les bifurcations alluviales. En effet, comme Wu et Yeh (2005) l'avait exprimé, plusieurs critères rentrent en compte dans la formation de barres puis de bifurcations, tel que le seuil de mise en mouvement des sédiments ainsi que le diamètre des sédiments en plus du beta et de la longueur d'onde des variations de largeur du chenal. Il serait peut-être bien d'ajouter ces facteurs, cela donnerait peut-être des prédictions plus précises.

Bibliographie

Cazeaux, C., & Rougeyres, A. (2023). *Les variations de largeur du chenal : Coévolution entre barres, île et bifurcation alluviale.*

Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.-G., Tassi, P., & Jugé, P. (2014). Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France. *Water Resources Research*, 50(4), 2850-2873. <https://doi.org/10.1002/2013WR015182>

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>

Wu, F., & Yeh, T. (2005). Forced bars induced by variations of channel width : Implications for incipient bifurcation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F2), 2004JF000160.
<https://doi.org/10.1029/2004JF000160>

Annexes

Annexe 1 : Protocoles de calcul du beta ratio et limites

Calcul du beta ratio

Méthode “bande active” :

Input :

- MNT
- Axe hydraulique BD Carthage
- Polygone bande active

Démarche :

1. Entités vers rasters (<- polygone bande active, taille cellules = 1)
2. Générer des transects le long des lignes (<- axe hydraulique, 250 m distance inter-transects, 5000 m de long)
3. Interpoler les formes (raster polygone bande active en surface, transects en entités)
4. Ajouter des informations de surface (transects étape 3 en entités, MNT en surface, cocher Zmax et Zmoyen)
5. Ajouter un champ “DeltaZ” flottant au fichier étape 4 puis avec la calculatrice de champ : $\Delta Z = Z_{\max} - Z_{\text{moyen}}$
6. Ajouter un champ “Beta” flottant puis avec la calculatrice de champ : $\text{Beta} = \text{Shape_length} / \Delta Z$

Méthode “étiage” :

Input :

- MNT
- Axe hydraulique numérisé manuellement
- Transects non-interpolés issus de l'étape 2 de la méthode “bande active”
- Ligne de points XYZ de la ligne d'eau à l'étiage

Démarche :

- A. Création des profils interpolés à la surface en eau à l'étiage :
 1. Table xy vers points (<- ligne de points XYZ de la ligne d'eau, spécifier champ Z = Z, Lambert_93)
 2. Jointure spatiale (transects en entités, joindre la ligne de points XYZ de la ligne d'eau à l'étiage, “plus proche”)
 3. Entités vers rasters (<- transects étape A2, terrain = Z, taille cellules = 1)
 4. Calculatrice raster : $\text{Con}(\text{raster des transects cotés en Z étape A3} > \text{MNT}, \text{raster des transects cotés en Z étape A3})$
- B. Calcul du beta ratio de chaque transect (1-5 : calcul largeurs et Zmoy ; 6-7 : calcul altitudes ligne d'eau) :
 1. Calculatrice raster : $\text{Int}(\text{raster étape A4})$
 2. Raster vers polyligne (<- raster étape B1)
 3. Numérisation d'un axe hydraulique passant par les bras principaux de la Loire et recoupant systématiquement un transect généré à l'étape A4
 4. Sélectionner une couche par emplacement (intersecter les polygones étape B2 selon l'axe hydraulique des bras principaux étape B3) puis exporter les entités sélectionnées
 5. Ajouter des informations de surface (fichier étape B4 en entités, MNT en surface, cocher Zmoyen)
 6. Raster vers points (<- raster étape A4)
 7. Points vers ligne (<- fichier de points étape B6, champ de ligne = champ renseignant l'altitude)

8. Jointure spatiale (polylignes étape B5 en cible, points reliés étape B7 en jointure, "plus proche").
Attention l'ordre (champ "OBJECTID") des transects peut-être perdu lors de cette étape : effectuer un tri en fonction de l'altitude (champ "grid_code") après avoir exporté la table attributaire
9. Ajouter un champ "Depth" flottant au fichier étape B8 puis avec la calculatrice de champ : $\text{Depth} = Z - Z_{\text{moyen}}$
10. Ajouter un champ "Beta" flottant puis avec la calculatrice de champ : $\text{Beta} = \text{Shape_length} / \text{Depth}$

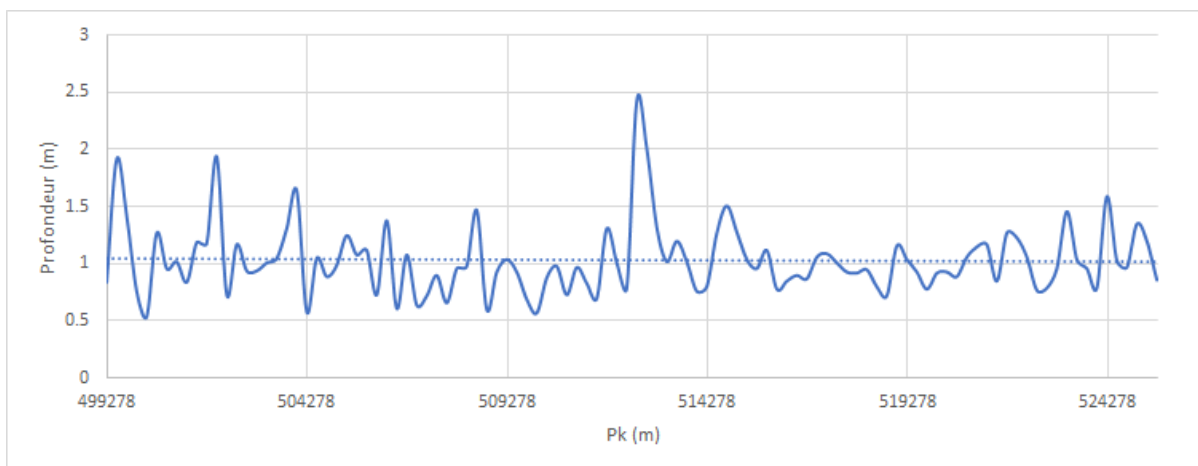
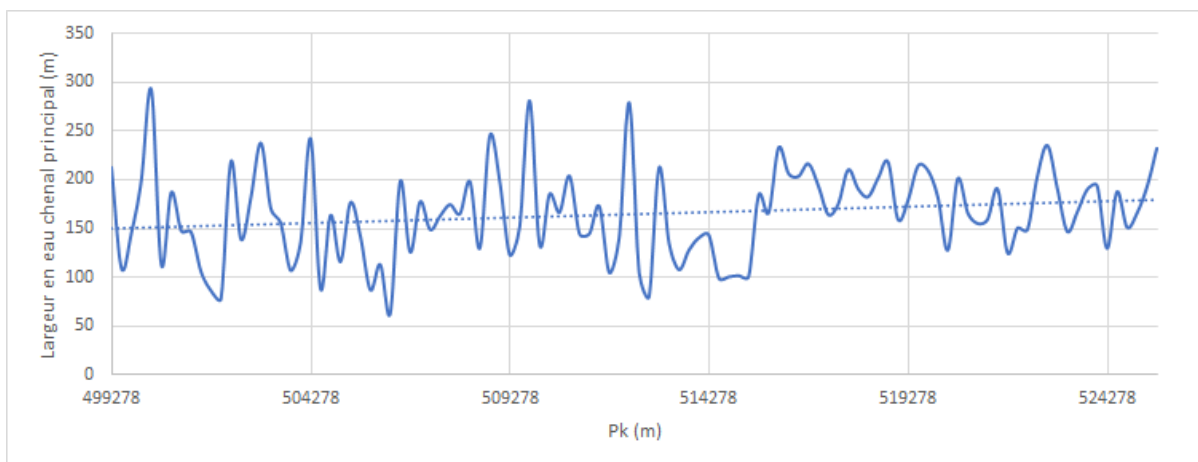
Annexe 2 : Tableau Excel de l'analyse des coefficients directeurs des largeurs du secteur 45

OID_	PK (mètre depuis la source)	Shape_Length	Coefficient directeur (a)	b	Beta-ratio	Importante variation coeff directeur
1	625776.9	203.0			202.7	
2	626026.9	300.9	0.4	-244943.7	370.7	Léger élargissement du chenal, transect précédent n'est pas assez large
3	626276.9	333.0	0.1	-80053.8	143.5	
4	626526.9	248.0	-0.3	213320.9	175.0	Transect trop court
5	626776.9	233.9	-0.1	35402.4	63.2	
6	627026.9	318.0	0.3	-210387.9	124.9	Zone d'élargissement du chenal
7	627276.9	332.9	0.1	-37266.1	137.9	
8	627526.9	278.0	-0.2	138302.3	174.9	
9	627776.9	269.0	0.0	22828.3	92.6	
10	628026.9	314.0	0.2	-112768.0	144.8	
11	628276.9	347.0	0.1	-82602.5	158.0	
12	628526.9	271.0	-0.3	191427.4	140.1	Zone de rétrécissement du chenal
13	628776.9	204.0	-0.3	168662.1	112.2	Transect trop court
14	629026.9	318.0	0.5	-286549.6	142.2	Un peu à l'amont d'une bifurcation, transect précédent n'est pas assez large
15	629276.9	396.0	0.3	-195910.8	151.2	Zone d'élargissement du chenal
16	629526.9	409.9	0.1	-34629.9	153.0	
17	629776.9	339.0	-0.3	178964.1	149.4	Vers la fin d'une bifurcation
18	630026.9	384.0	0.2	-113014.0	257.9	
19	630276.9	334.9	-0.2	124045.7	104.8	Bifurcation
20	630526.9	432.9	0.4	-246646.1	175.5	Problème de transect, il est en travers donc trop large, situé à l'amont d'une bifurcation

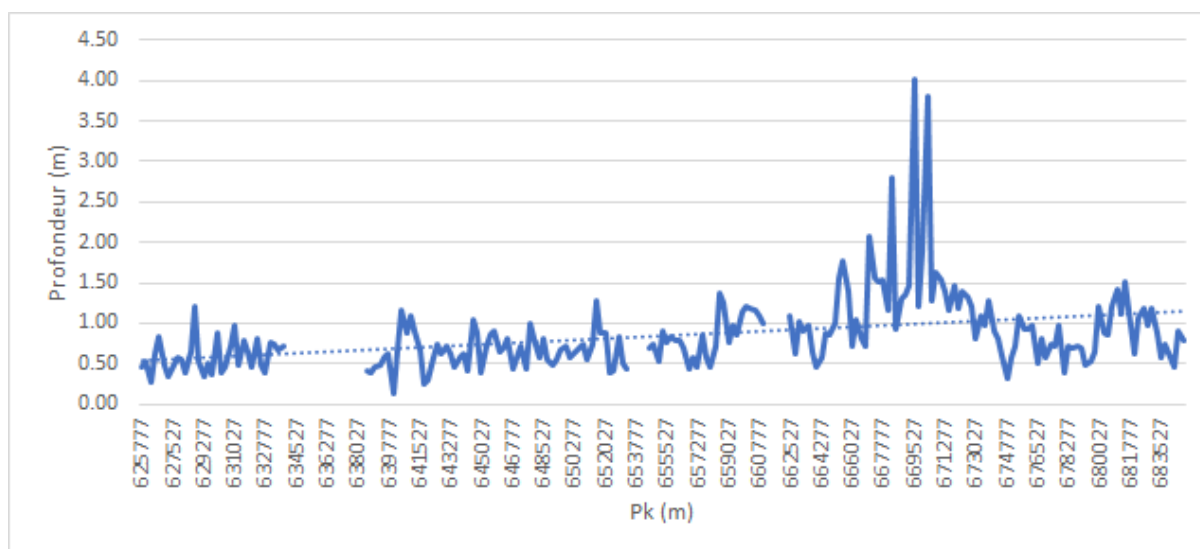
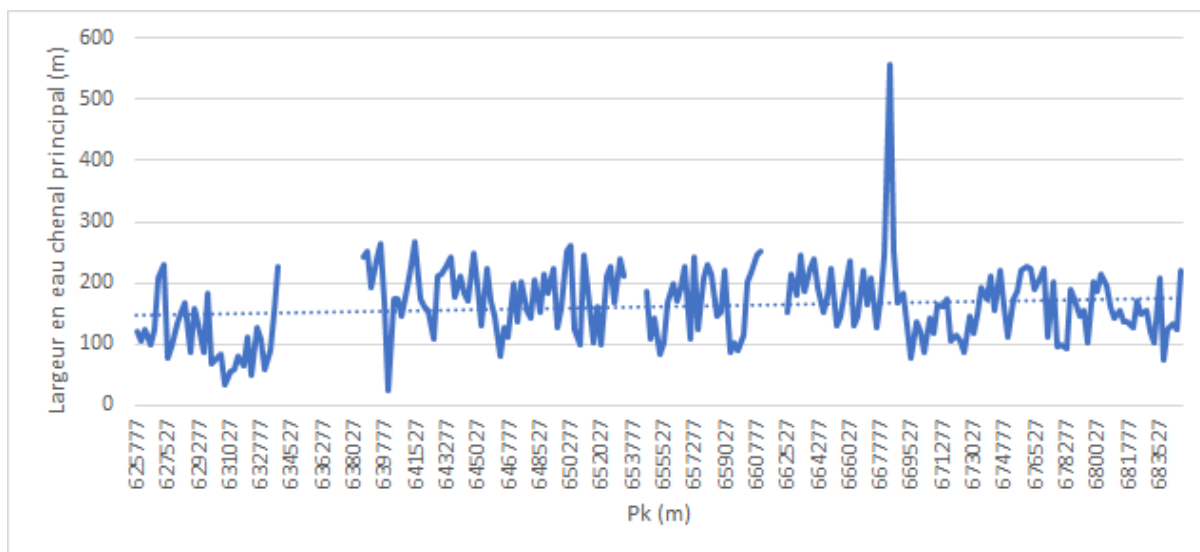
Annexe 3 : Tableau Excel de l'analyse des coefficients directeurs des largeurs du secteur 49

OID_	PK (mètre depuis la source)	Shape_Length	Coefficient directeur (a)	b	Beta	Importante variation coeff directeur
1	808138.8	319.9			225.9	
2	808388.8	344.9	0.1	-80558.2	69.7	
3	808638.8	402.8	0.2	-186730.2	95.7	
4	808888.8	458.8	0.2	-180802.2	134.6	
5	809138.8	503.9	0.2	-145530.5	291.4	
6	809388.8	601.9	0.4	-316470.0	242.3	Elargissement du chenal
7	809638.8	619.9	0.1	-57637.4	190.9	
8	809888.8	550.9	-0.3	223935.8	131.4	
9	810138.8	535.0	-0.1	52150.9	177.7	
10	810388.8	512.9	-0.1	72120.5	318.9	
11	810638.8	468.0	-0.2	146069.3	84.6	
12	810888.8	527.9	0.2	-193813.2	169.1	
13	811138.8	505.0	-0.1	74847.7	240.7	
14	811388.8	466.9	-0.2	124076.8	186.4	
15	811638.8	525.9	0.2	-191081.3	122.0	
16	811888.8	541.9	0.1	-51395.2	152.1	
17	812138.8	597.0	0.2	-178339.7	148.3	
18	812388.8	652.9	0.2	-180897.9	290.0	
19	812638.8	673.0	0.1	-64762.5	242.5	
20	812888.8	647.0	-0.1	85187.4	289.0	
21	813138.8	628.0	-0.1	62426.5	161.0	
22	813388.8	592.9	-0.1	114853.1	384.3	
23	813638.8	718.0	0.5	-406487.3	169.5	Début d'une bifurcation, le chenal commence à s'élargir

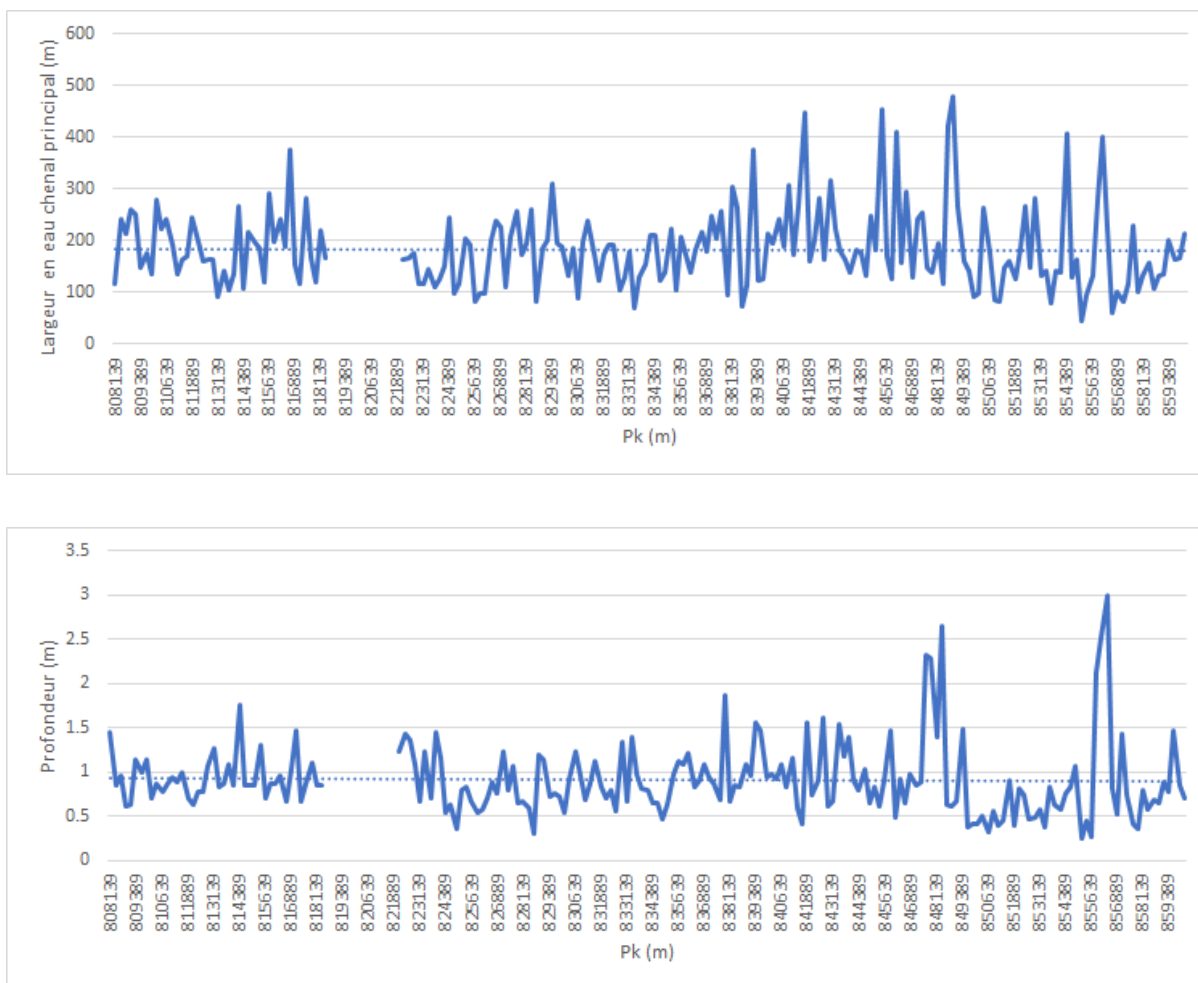
Annexe 4 : Graphiques des largeurs corrigées et des profondeurs obtenus sur les transects à l'étiage pour le secteur 18



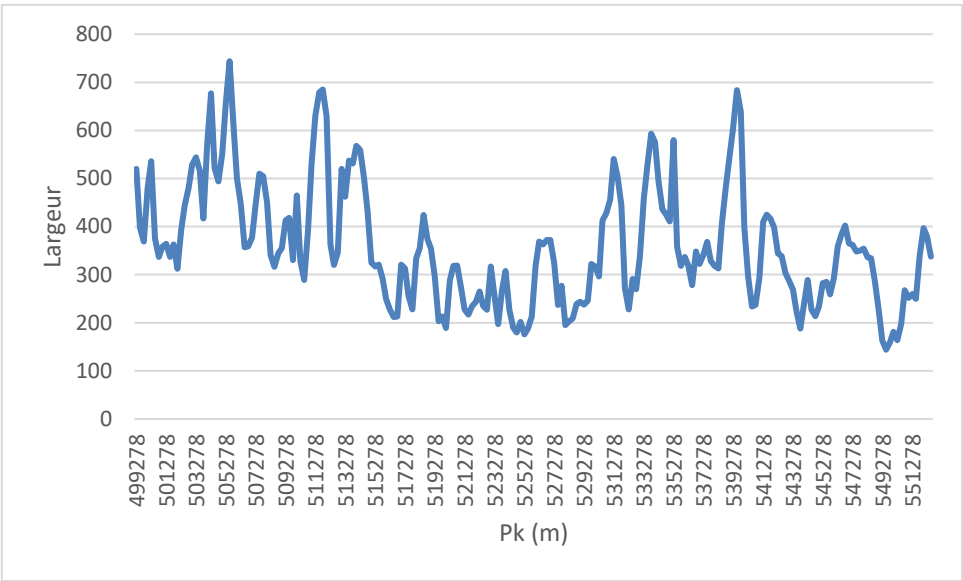
Annexe 5 : Graphiques des largeurs corrigées et des profondeurs obtenus sur les transects à l'étiage pour le secteur 45



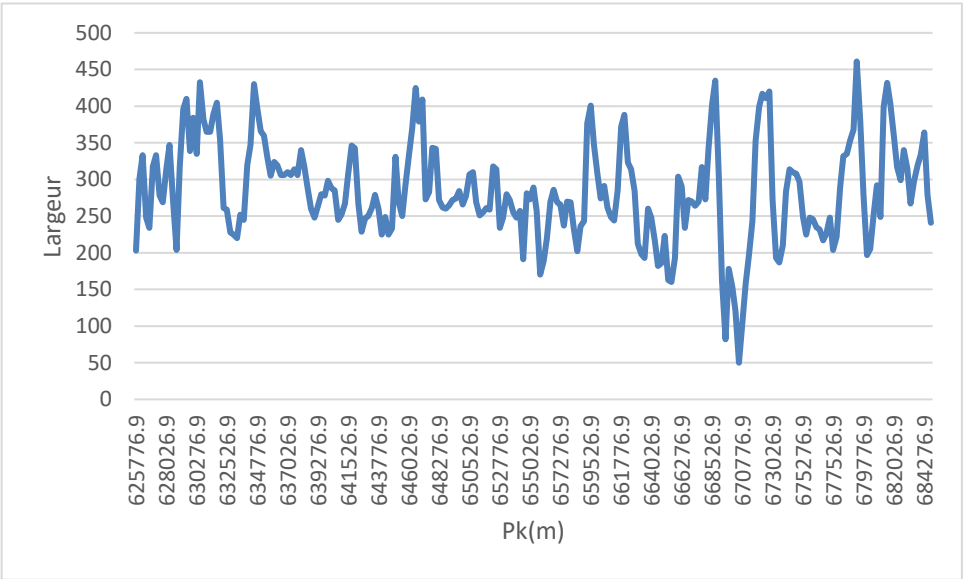
Annexe 6 : Graphiques des largeurs corrigées et des profondeurs obtenus sur les transects à l'étiage pour le secteur 49



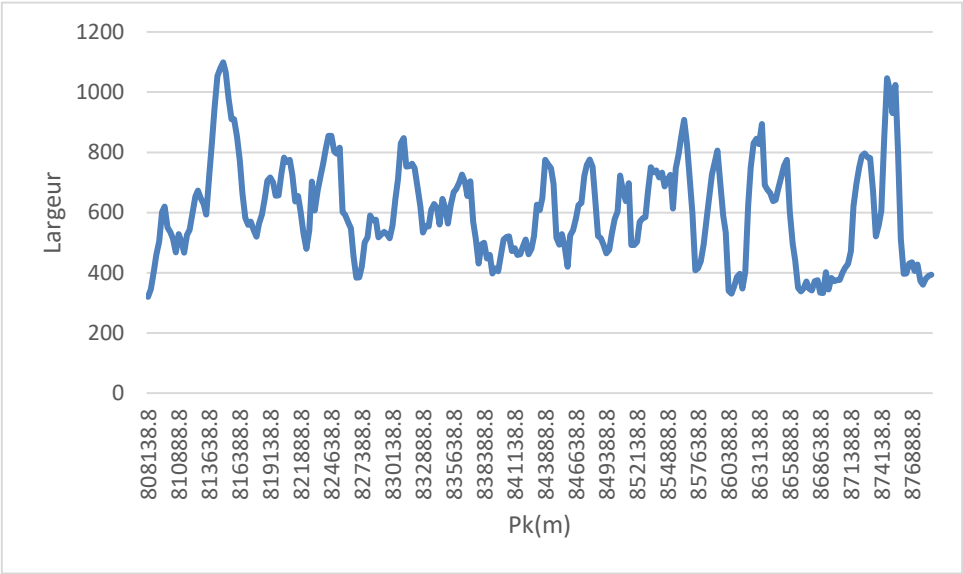
Annexe 7 : Graphique des largeurs obtenus sur les transects pour la bande active pour le secteur 18



Annexe 8 : Graphique des largeurs obtenus sur les transects pour la bande active pour le secteur 45



Annexe 9 : Graphique des largeurs obtenus sur les transects pour la bande active pour le secteur 49



Directeur de recherche :
Stéphane Rodrigues

Cazeaux Clémence
Rougeyres Arthur

PFE/DAE5
IMA
2023-2024

Détection et prédiction des bifurcations alluviales : le cas de la Loire

Résumé :

Ce projet de fin d'études (PFE) est la suite d'un état de l'art vérifiant une théorie de géomorphologie fluviale selon laquelle les zones d'élargissement-rétrécissement du lit d'une rivière seraient un lieu privilégié pour l'implantation des bifurcations alluviales. L'intérêt de ce travail de recherche est de pouvoir mieux appréhender les conditions propices à l'installation d'une bifurcation.

Un outil permettant de générer des transects le long d'un cours d'eau et de calculer leur beta ratio de façon automatisée avec l'outil ArcGIS Pro a été développé, sur la base des données LiDAR, les photographies aériennes et l'axe hydraulique de la Loire. En parallèle, les écarts de largeur entre chacun de ces transects ont été calculés sous la forme de coefficients directeurs ce qui a permis de détecter la majorité des bifurcations existantes.

Il a été confirmé que ces facteurs (beta ratio, variations de largeur) jouent un rôle dans les processus d'émergence de bifurcation néanmoins, pris tout seul, ils ne suffisent pas à prédire leur présence comme souhaité avec ce travail.

Mots Clés : Géomorphologie fluviale, bifurcation, beta ratio, variation de largeur, LiDAR