

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

Les inversions de chenaux en Loire Moyenne



Exemple d'une inversion de chenaux en Loire Moyenne à Langeais (37)
(Source : Remonter le temps IGN)

Les inversions de chenaux en Loire Moyenne : Origines et modalités

**Directeur de recherche
Alex Andréault**

**Auteure
Illona Doyon**

Année 2023 – 2024

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

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

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

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

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

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

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

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Monsieur Alex Andréault, Chercheur en science de l'environnement, de m'avoir accompagnée tout au long de ce projet. Son expérience et ses connaissances ont très fortement contribuées à ma recherche et m'ont guidée.

Je tiens également à remercier Monsieur Stéphane Rodrigues, Enseignant et Chercheur dans les milieux aquatiques, qui le secondait dans la direction de cette recherche, apportant son regard avisé sur la réalisation de mon travail.

Enfin, je remercie mes camarades de promotion avec qui je me suis exercée à la bonne utilisation des logiciels nécessaires à la réalisation de cette étude.

SOMMAIRE

I.	Introduction	8
II.	Matériels et méthodes.....	11
2.1.	Présentation générale de la Loire et de son bassin versant.....	11
2.2.	Recensement des sites d'études	14
2.3.	Présentation des sites d'études	15
2.3.1.	Site 1 – Neuvy sur Loire	15
2.3.2.	Site 2 – Beaugency	15
2.3.3.	Site 3 – Montlouis sur Loire.....	16
2.3.4.	Site 4 – Saint Pierre des Corps	16
2.3.5.	Site 5 – Rigny-Ussé.....	17
2.4.	Géoréférencement et suivi des îles	18
III.	Résultats	19
3.1.	Site 1 – Neuvy sur Loire	19
3.2.	Site 2 – Beaugency	20
3.3.	Site 3 – Montlouis sur Loire	21
3.4.	Site 4 – Saint Pierre des Corps	22
3.5.	Site 5 – Rigny-Ussé	23
3.6.	Une tendance générale ?	25
IV.	Discussion	27
	Bibliographie	28
	Annexes	30

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : FRISE CHRONOLOGIQUE DE L'ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ DES EXTRACTIONS DE GRANULATS DANS LE LIT MINEUR DE LA LOIRE (SOURCE : LATAPIE, 2011)	10
FIGURE 2 : LA LOIRE, LE PLUS LONG FLEUVE DE FRANCE (SOURCE : BD CARTAGE IGN, BD TOPO IGN ; AUTEUR : ILLONA DOYON)	11
FIGURE 3 : EXEMPLE DE DUIS A ORLEANS DANS LA LOIRE (SOURCE : GRIVEL ET AL., 2018)	13
FIGURE 4 : EFFONDREMENT DU PONT WILSON LE 9 AVRIL 1978 (SOURCE : LA NOUVELLE REPUBLIQUE, PIERRE FITOU).....	13
FIGURE 5 : SITE 1 - NEUVY SUR LOIRE - EN 1949 A GAUCHE ET 2000 A DROITE (@ REMONTERLETEMPS.IGN.FR)	15
FIGURE 6 : SITE 2 - BEAUGENCY - EN 1955 A GAUCHE ET 1968 A DROITE (@ REMONTERLETEMPS.IGN.FR)	15
FIGURE 7 : SITE 3 - MONTLOUIS SUR LOIRE - EN 1969 A GAUCHE ET 1981 A DROITE (@ REMONTERLETEMPS.IGN.FR).....	16
FIGURE 8 : SITE 4 - SAINT PIERRE DES CORPS - RESPECTIVEMENT EN 1967, 1974 ET 2002 (@ REMONTERLETEMPS.IGN.FR) 17	
FIGURE 9 : SITE 5 - RIGNY-USSE - EN 1959 A GAUCHE ET EN 1981 A DROITE (@ REMONTERLETEMPS.IGN.FR)	18
FIGURE 10 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ÎLE DE NEUVY SUR LOIRE PAR RAPPORT A LA PREMIÈRE ANNÉE D'ÉTUDES (1982) (@ILLONA DOYON).....	19
FIGURE 11 : DÉPLACEMENT DU BARYCENTRE DE L'ÎLE DE NEUVY SUR LOIRE (@ILLONA DOYON, QGIS)	20
FIGURE 12 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ÎLE DE BEAUGENCY (@ILLONA DOYON)	20
FIGURE 13 : CONTOUR DE L'ÎLE DE BEAUGENCY EN FONCTION DES ANNÉES (@ILLONA DOYON, QGIS)	21
FIGURE 14 : CONTOUR DU SITE DE MONTLOUIS SUR LOIRE (@ILLONA DOYON, QGIS).....	21
FIGURE 15 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ÎLE PAR RAPPORT A L'ANNÉE 1956 (@ILLONA DOYON)	21
FIGURE 16 : ÉTUDE DU BASCULEMENT DE CHENAL SUR LE SITE DE MONTLOUIS SUR LOIRE, AVEC DESCRIPTION DES ÉLÉMENTS COMPOSANT LE SITE (@JULIEN BOCCHINO, 2022).....	22
FIGURE 17 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU SITE DE SAINT PIERRE DES CORPS (@ILLONA DOYON, QGIS)	23
FIGURE 18 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU SITE DE SAINT PIERRE DES CORPS PAR RAPPORT A L'ANNÉE 1956 (@ILLONA DOYON, QGIS).....	23
FIGURE 19 : CONTOUR DE L'ÎLE DE RIGNY-USSE AU COURS DU TEMPS (@ILLONA DOYON, QGIS)	24
FIGURE 20 : ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DU SITE DE RIGNY-USSE PAR RAPPORT A LA PREMIÈRE ANNÉE D'ÉTUDE (1950) (@ILLONA DOYON).....	24
FIGURE 21 : OBSTRUCTION DES ÉCOULEMENTS VERS LE CHENAL NORD PAR LE DÉPLACEMENT DE L'ÎLE SITUÉE EN AMONT (@REMONTERLETEMPS.IGN.FR, 1972).....	24
FIGURE 22 : OBSTRUCTION PROGRESSIVE DU CHENAL PRINCIPAL (@REMONTERLETEMPS.IGN.FR, RESPECTIVEMENT 1950, 1959, 1968 ET 1978)	25
FIGURE 23 : VARIATION DE LA DISTANCE ENTRE LA RIVE GAUCHE ET LE BARYCENTRE DE L'ÎLE DE CHAQUE SITE ÉTUDIÉ PAR RAPPORT A LA PREMIÈRE ANNÉE D'ÉTUDE DE CHAQUE SITE (E1) (@ILLONA DOYON)	25
FIGURE 24 : ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE LA RIVE GAUCHE ET LE BARYCENTRE DE L'ÎLE POUR CHAQUE SITE ENTRE DEUX ANNÉES D'ÉTUDES CONSECUTIVES (@ILLONA DOYON)	26
FIGURE 25 : ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DU LIT MINEUR DE LA LOIRE AU BARYCENTRE DE L'ÎLE DE CHAQUE SITE PAR RAPPORT A LEUR PREMIÈRE ANNÉE D'ÉTUDES (E1) (@ILLONA DOYON).....	26

I. Introduction

La géomorphologie des cours d'eau dépend de quatre critères : du débit solide et du débit liquide, qui sont des variables de contrôle, ainsi que de la pente et de la granulométrie. L'évolution de ces variables influe sur la morphologie d'un cours d'eau qui se caractérise en fonction de sa pente et de sa section. Ces variables sont impactées par des facteurs externes qui régissent le fonctionnement du cours d'eau tels que l'hydrologie, le climat, la tectonique, la nature du substratum, l'occupation du sol du bassin versant, ou encore les activités humaines (communication personnelle). Une rivière peut avoir des formes très variées basées sur son environnement et les ressources auxquelles elle a accès. Trois grands types de styles fluviaux ont été définis : rectilignes, méandriformes, et en tresses (Claude, 2012). Un cours d'eau à méandres peut être constitué d'un chenal principal, soit un canal naturel ou artificiel qui contient l'eau courante, et éventuellement de chenaux secondaires qui permettent des écoulements courants moins importants, en termes de débit, que le chenal principal (communication personnelle). Selon Abbe et Montgomery (1996), les cours d'eau méandriformes, leur tracé répartit l'énergie des écoulements et celle-ci est plus importante en *extrado* de méandre ce qui provoque de l'érosion. En revanche, en *intrado*, du dépôt s'opère, ce qui donne lieu à une évolution continue du tracé du fleuve avec un déplacement des méandres vers l'extérieur. Un cours d'eau en tresses est constitué de multiples chenaux séparés par des bancs alluviaux, et lorsque des îles végétalisées se forment dans le lit du cours d'eau, ce dernier est alors caractérisé par un style fluvial en anabranchement. Ce type de rivière est constitué de plusieurs écoulements induits par les îles végétalisées qui sont stables.

La dynamique d'un système fluvial conditionne les écoulements au sein du cours d'eau. Ces derniers peuvent être concentrés en un chenal unique, ou bien divisés en plusieurs chenaux comme expliqué précédemment dans le cas d'un cours d'eau en tresses ou anabranchement, dans lequel des îles végétalisées répartissent les flux. Ces bifurcations ont un impact sur le transport sédimentaire au sein des cours d'eau, comme le précisent Frings et Kleinhans (2008) : « *River bifurcations strongly control the distribution of water and sediment over a river system* ». Ces auteurs montrent donc que le transport solide dans les bifurcations de cours d'eau est très variable et dépend de nombreux facteurs, tels que la distribution des débits, la vitesse de l'écoulement, la taille des sédiments et la forme de la bifurcation.

Un phénomène de bascule de chenal a été observé à l'endroit de ces bifurcations, et est ici perçu comme une inversion de chenaux, c'est-à-dire que les écoulements principaux, ceux identifiés avec le débit le plus important, qui s'effectuaient dans le chenal principal, s'écoulaient maintenant dans le chenal secondaire, et inversement, les écoulements ayant un débit plus faible qui se faisaient dans le chenal secondaire, s'effectuent à présent dans le chenal principal. Il y a donc une inversion entre le chenal principal et le chenal secondaire. Ce phénomène d'inversion de chenaux a déjà été mentionné dans le travail de Julien Bocchino (2022) qui avait pour objectif d'identifier les modalités de basculement de chenal sur la Loire. Il a mis en relation les inversions de chenaux et les extractions sédimentaires dont a été victime la Loire. Ces dernières provoquent en effet une incision du lit du chenal dans lequel elles ont été réalisées, ce qui peut induire une bascule du chenal principal vers le secondaire. Au travers de quelques cas d'études, Julien Bocchino pointe la responsabilité majoritaire des actions anthropiques.

Dans l'objectif de poursuivre le travail réalisé par Julien Bocchino, et dans le cadre de ce projet de fin d'études, on s'intéressera aux origines et aux modalités des changements morphologiques brutaux des cours d'eau tels que les inversions de chenaux. Ce phénomène de bascule de chenal peut avoir des causes naturelles telles que la végétation qui influence fortement la morphologie des chenaux et du lit du cours

d'eau « à partir de 5 mécanismes de base : la résistance au courant, la solidité des rives, les couches de sédimentation, la formation de barrages de détritux végétaux, et les dépôts sur les parties concaves des rives » (Nabet, 2013). Cet auteur explique aussi qu'un chenal secondaire peut se combler, notamment en stockant des sédiments. L'érosion des berges, les crues, les mouvements de terrain, les chutes de blocs et les changements de niveau du fond des rivières sont des facteurs naturels impactant la morphologie des cours d'eau (Gautier et al., 2000). L'érosion peut être aggravée par les crues, les variations de niveau d'eau et la présence ou non d'arbres ou de végétation en bordure du cours d'eau (Gautier et al., 2000). La fréquence d'apparition des crues joue également un rôle sur le système fluvial. Dans la Loire, « elles s'étaient raréfiées depuis les trois grandes crues du milieu du XIX^e siècle » (Leteinturier et al., 2000), élément soutenu par Nabet (2013) qui souligne « l'absence de grande crue susceptible de régénérer les formes fluviales (depuis 1866) ». De plus, les interactions complexes entre les facteurs naturels et anthropiques peuvent amplifier les effets des perturbations naturelles ou artificielles sur les systèmes fluviaux (Gautier et al., 2000).

Selon Leteinturier et al. (2000), « la métamorphose de la Loire résulterait bien plus de modifications des pratiques agricoles dans la plaine alluviale et dans ses annexes », avec, par exemple, l'arrêt de zones d'éco-pâturage laissant la végétation reprendre ses droits et coloniser le lit de la rivière (Nabet, 2013). L'installation d'ouvrages d'art tels que des ponts ou des barrages était aussi impactante : dans le cas de la Loire, plus de 50 ponts entre le bec d'Allier et Angers ont été implantés, et parmi ces ponts, certains sont très anciens et encombrant, ce qui est particulièrement perturbateur car ils ne permettent pas le libre écoulement des eaux et favorisent le phénomène d'érosion (Latapie, 2011). De plus, « les digues, construites pour protéger les vals des crues, tendent à favoriser l'incision du chenal et à figer les formes fluviales en limitant les divagations du lit » (Latapie, 2011). Et, afin de faciliter la navigation fluviale, le rescindement de méandre a parfois été utilisé (Malavoi, 2007), de nombreux ouvrages ont été mis en place dans le lit de la Loire (Latapie, 2011), ce qui a réduit la largeur du lit du fleuve, en accélérant les écoulements et en créant des zones de sédimentation et d'érosion, notamment une incision du fond du lit (Grivel et al., 2018).

Parmi ces causes anthropiques, on peut aussi considérer les extractions de granulats en Loire Moyenne. Rinaldi, Wyzga et Surian (2005) ont montré que l'extraction sédimentaire est l'activité humaine la plus perturbante pour l'équilibre des rivières, ce à quoi Audrey Latapie (2011) ajoute qu'« une action anthropique qui a eu un impact direct sur la géométrie du lit de la Loire est l'extraction de granulats en lit mineur ». « La Loire a [en effet] connu une intense extraction industrielle de granulat et plus particulièrement de sable au cours de la seconde moitié du XX^e siècle » (Nabet, 2013), et cette activité s'est opérée dans son lit mineur. Après la Seconde Guerre mondiale, en période de reconstruction, un besoin matériel important touche la France qui se concentre sur les cours d'eau à fond sablo-graveleux car les sables prélevés permettent la fabrication du béton pour la construction (Chapel, 2009). Les extractions de granulats au sein de la Loire se sont développées sur près de 40 ans avant de s'arrêter en 1990, et en 1995 dans certaines régions ligériennes (Figure 1).

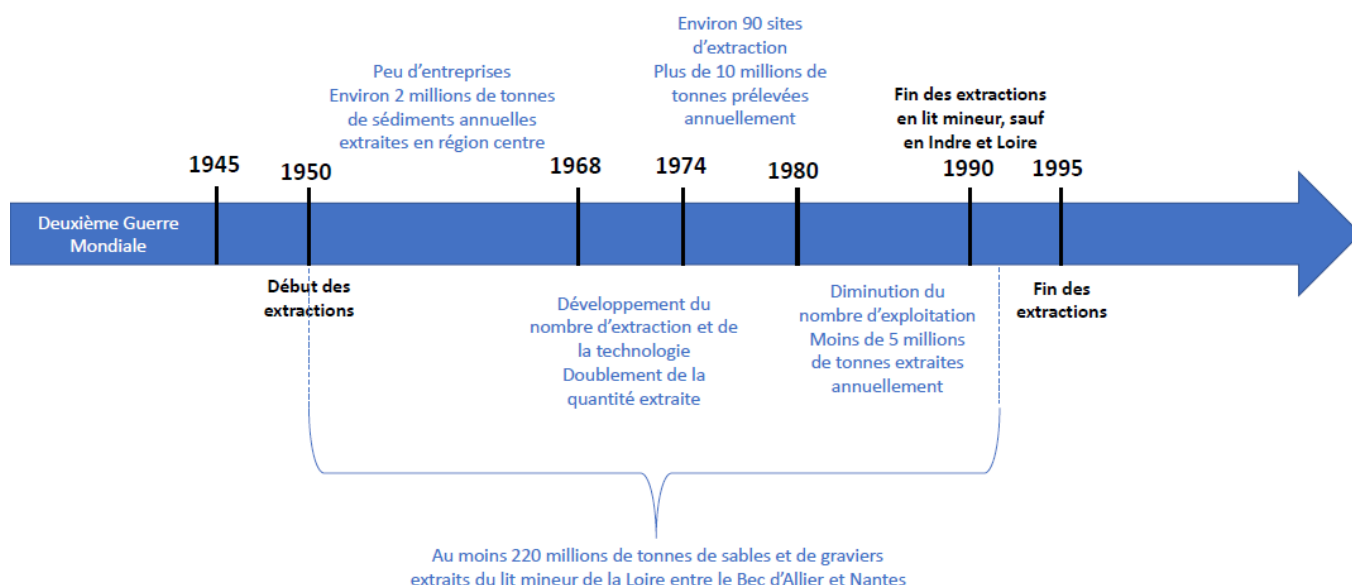


Figure 1 : Frise chronologique de l'évolution de l'activité des extractions de granulats dans le lit mineur de la Loire (Source : Latapie, 2011)

Selon Clavel et al. (1978), les conséquences sont dans un premier temps « *morpho-dynamiques : modifications du lit, création ou aggravations d'obstacles* », ce qui perturbe la migration des poissons et le transport sédimentaire, avec notamment « *l'aggravation du déficit sédimentaire, ce qui a favorisé l'incision du lit* » (Nabet, 2013). Les fosses d'extraction de sable mises en place sont continuellement soumises à l'érosion et au dépôt, ce qui affecte l'hydrodynamique locale autour de leur portée et entraîne également leur migration en aval (Barman et al., 2019). Ces fosses engendrent un abaissement de la ligne d'eau qui est aussi présent à l'étiage, ce qui provoque par exemple « *la déstabilisation de certains ouvrages d'art (digues et pont) ; la non-recharge des nappes phréatiques ; le développement de la végétation dans les chenaux secondaires et donc la réduction de la largeur active* » (Latapie, 2011), différentes conséquences qui résultent donc de l'incision du fond du lit du cours d'eau. Nabet (2013) ajoute qu'une différence topographique se crée entre le chenal principal et le chenal secondaire.

La Loire est un cours d'eau très marqué par les activités anthropiques. Son tracé ne cesse d'évoluer au cours du temps en réponse à son fonctionnement, à ses besoins, et en conséquence des pressions qu'elle a subies. « *Suite à l'arrêt des extractions en lit mineur, de nombreuses études et programmes de recherche ont été initiés afin de parfaire les connaissances sur le fleuve et de comprendre les modifications observées.* » (Latapie, 2011). Ce projet de fin d'études s'inscrit donc dans la poursuite de ces travaux en regardant parmi les changements géomorphologiques observables, les modalités d'inversions de chenaux, à quoi sont-elles dues, et si ce changement morphologique latéral est aussi une conséquence des extractions de sédiments dans le lit mineur de la Loire Moyenne.

II. Matériels et méthodes

2.1. Présentation générale de la Loire et de son bassin versant

La Loire est un fleuve parcourant plus de mille kilomètres, avec un ordre de Strahler égal à 8 et un bassin versant de plus de 115 000 km² (Universalis), ce qui représente « *près de 1/5^{ème} du territoire métropolitain français* » (Ramond, 2015). La Loire est le plus long fleuve de France et est présentée comme le dernier fleuve encore « sauvage » puisqu'il présente toujours un relatif espace de liberté et peut naturellement créer de fortes modifications paysagères. Riche en biodiversité et en histoire, la Loire fait partie du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis le 30 novembre 2000 (Dupont, 2016). Elle prend sa source au mont Gerbier-de-Jonc en Ardèche à 1 408 m d'altitude et rejoint son estuaire à Saint-Nazaire (Universalis) (Figure 2). Ses principaux affluents sont, respectivement de l'amont vers l'aval, l'Allier, le Cher, l'Indre, la Vienne et le Maine (Wintenberger, 2015). Le bassin ligérien est constitué d'une lithologie hétérogène avec des granites et des roches métamorphiques dans le Massif Central, une succession de formations sédimentaires carbonatés et siliceuses dans le bassin parisien, et dans le Massif Armoricain, une « *structure géologique complexe composée de dépôts sédimentaires de l'Ere Primaire et de roches métamorphiques* » (Wintenberger, 2015).

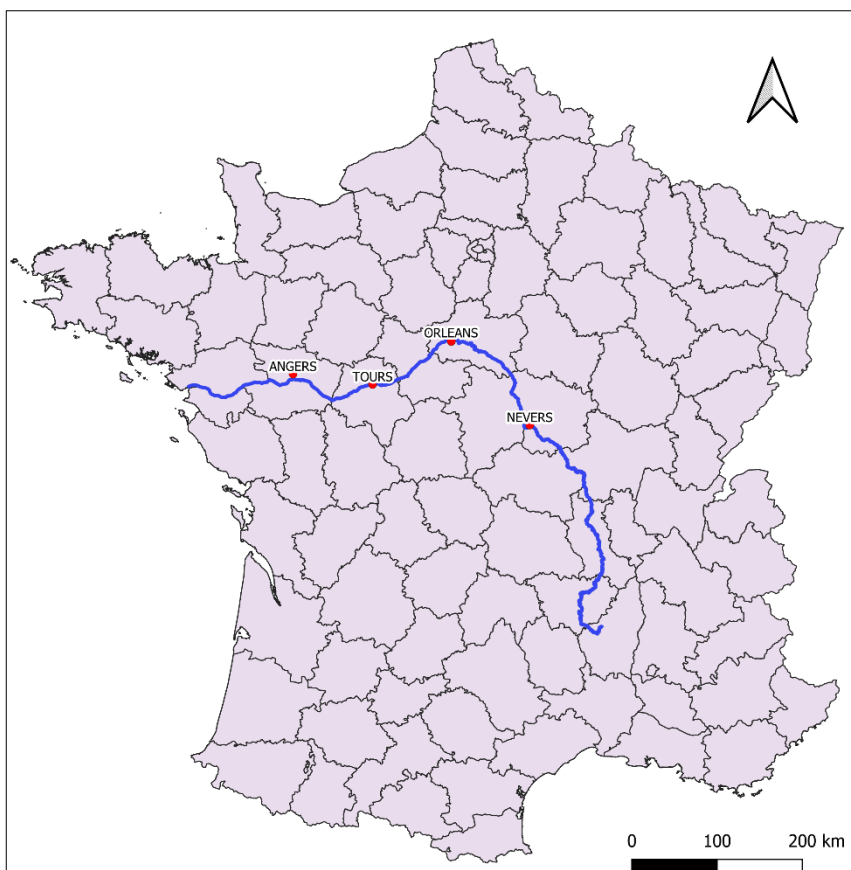


Figure 2 : La Loire, le plus long fleuve de France (Source : BD CARTAGE IGN, BD TOPO IGN ; Auteur : Illona Doyon)

« L'étendue du bassin versant explique l'importante variabilité saisonnière et interannuelle des débits de la Loire et leur complexité étant donné la variété des influences géologiques et climatiques auxquelles le bassin est soumis » (Ramond, 2015). En amont de la Loire, de fortes altitudes sont présentes et les précipitations importantes peuvent exercer des influences cévenoles dans cette zone du bassin (Ramond,

2015). À la suite de sa confluence avec l'Allier, la Loire ne rencontre pas d'autres affluents jusqu'au Bassin parisien et est alimentée par sa nappe alluviale (Ramond, 2015).

On peut diviser la Loire en trois secteurs : la Loire amont, partant de la source et allant jusqu'au Bec d'Allier (à Nevers), la Loire Moyenne, du Bec d'Allier au Bec de Maine (à Angers), et puis la Loire aval qui s'écoule du Bec de Maine à son embouchure (Figure 2). À l'amont, le fleuve passe « *dans des gorges caractérisées par une pente de 3,8 ‰ permettant le transport d'une charge sédimentaire grossière jusqu'au barrage de Grangent.* » (Wintenberger, 2015). La Loire arrive ensuite en plaine qui lui permet de prendre un style méandrique et sa pente diminue et se stabilise à 0,7 ‰ (Wintenberger, 2015). À partir de la confluence avec l'Allier, la Loire présente un style fluvial en anabranchement. Ce changement de morphologie est une conséquence de l'apport sédimentaire de l'Allier, qui « *délivre une charge de fond significative* » (Wintenberger, 2015).

Ce genre de système composé d'un lit avec des barres sédimentaires très mobiles, particulièrement en cas de crue, a été perturbé par les activités anthropiques. La Loire a d'abord été très impactée par la navigation. Ce fleuve a en effet permis de connecter la France avec les pays de l'Atlantique et de la Méditerranée, mais aussi les villes et régions françaises entre elles, et donc de faire fonctionner l'économie nationale. Un grand nombre de produits divers et variés ont parcouru ce cours d'eau : « *les marchandises venues du bassin méditerranéen, les bois du Morvan, le charbon du Forez, les faïences du Nivernais ou encore le vinaigre de l'Orléanais* » (Grivel et al., 2018). Des espaces portuaires ont alors été aménagés : « *des ports de fortune composés d'une cale, appelés « chantiers », parsèment le corridor ligérien et constituent des lieux de chargement ponctuel en matériaux (bois, charbon, briques) et en produits agricoles (céréales, vin). Pour permettre cette fonctionnalité économique continue, le fleuve est aménagé et entretenu par les sociétés riveraines. Les ouvrages de navigation deviennent omniprésents dans le paysage fluvial ligérien* » (Grivel et al., 2018). Audrey Latapie (2011) souligne également cette anthropisation de la Loire en précisant que « *pour améliorer la navigabilité, notamment pendant l'étiage, des duits, chevrettes, épis et enrochements sont construits afin de concentrer les écoulements et favoriser l'auto-curage du chenal navigable* » (Figure 3). Les chevrettes et les duits sont deux systèmes de digues submersibles permettant d'orienter les écoulements de manière préférentielle (Grivel et al., 2018). On retrouve également du Bec d'Allier à Orléans, « *les grandes levées de la Loire : système d'endiguement généralisé et continu permettant la navigation entre les sites portuaires* » (Grivel et al., 2018). On peut donc associer à la première pression anthropique subie par la Loire, qui est la navigation, l'endiguement. La navigation sur ce cours d'eau s'est accompagnée de la mise en place de digue le long de celui-ci, ce que souligne Coraline Wintenberger (2015) : « *La Loire Moyenne (du Bec d'Allier au Bec de Maine) est endiguée de façon quasiment continue* ».

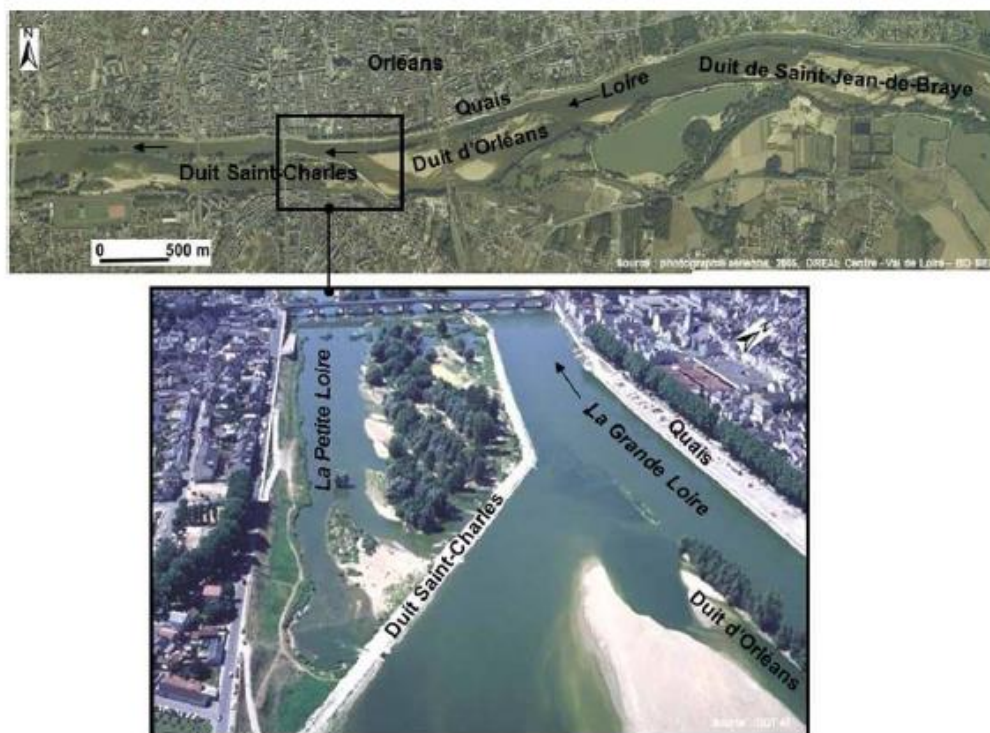


Figure 3 : Exemple de duits à Orléans dans la Loire (Source : Grivel et al., 2018)

À ces pressions conséquentes sur la Loire s'est ajoutée l'extraction de granulats. Après la Seconde Guerre mondiale, une reconstruction massive s'organise dans l'urgence. Ayant un cours sablo-graveleux, la Loire représente une ressource importante de proximité et devient victime du besoin matériel (sable et graviers), tout comme ses affluents (Dambre, 1996). L'exploitation du fleuve perturbe son fonctionnement et donne lieu à l'incision de son lit, ce qui signifie que le cours d'eau s'enfonce dans ce dernier, et s'accompagne d'un « *abaissement de la ligne d'eau à l'étiage* » (Dambre, 1996). Ce phénomène induit un rétrécissement de la largeur d'écoulement, ce qui provoque l'abandon du ou des chenaux secondaires car la masse d'eau migre vers le chenal principal. Ainsi, la ligne d'eau augmente en hauteur quand le fleuve n'est pas à l'étiage. Cette incision impacte les ouvrages d'art situés sur le fleuve et les fragilise, comme le pont Wilson qui s'est effondré à Tours en 1978 (Figure 4).



Figure 4 : Effondrement du Pont Wilson le 9 avril 1978 (Source : La Nouvelle République, Pierre Fitou)

L'objectif est de déterminer les causes et les modalités des inversions de chenaux. Ceci s'inscrit dans la compréhension de l'évolution morphologique des cours d'eau pour mieux anticiper leurs déplacements, sur une période de l'ordre d'un événement hydrologique.

2.2. Recensement des sites d'études

Cette détermination est réalisée via une analyse par orthophotographies. Une orthophotographie est « *obtenue par une prise de vue aérienne* » (Herisoa, 2018). L'utilisation de cet outil est d'autant plus pertinente que la prise de photographie aérienne s'est développée entre la Première et la Seconde Guerre mondiale grâce au développement de l'aviation (Herisoa, 2018). Ces photographies aériennes sont donc la source de données la plus brute, c'est-à-dire sans interprétation ou sans traitement, pour la morphologiques des cours d'eau, couvrant la plus grande période temporelle.

Pour déterminer les sites sur lesquelles va porter ce projet de fin d'études, la liste établie par Audrey Latapie (2011) recensant les sites d'extraction de granulats dans le lit de la Loire Moyenne sert de point de départ. La remontée manuelle de la Loire Moyenne avec Remonterletemps.ign.fr permet de faire une première comparaison des chenaux présentant une bascule, avec des sablières ou non, mais aussi de mettre en évidence l'évolution morphologique des chenaux dans le temps. Une bascule de chenal est reconnaissable après identification du chenal principal et secondaire. Cette reconnaissance peut s'effectuer par mesure de débit dans chaque canal d'écoulement, mais cela n'étant pas possible dans le cadre de ce projet, seule une détermination visuelle peut être effectuée. La transparence de l'eau est donc utilisée en supposant que, plus la couleur de l'eau est foncée et opaque, plus le chenal est profond, et donc permet potentiellement le passage d'un plus gros débit d'eau. On peut également différencier un chenal principal d'un secondaire si l'un des deux n'est pas en eau, à l'étiage plus particulièrement. Le chenal ne permettant pas d'écoulements lors de bas débits, est qualifié de secondaire.

Les orthophotos permettent une sectorisation du cours d'eau, avec une numérisation possible des îles pour voir leur évolution spatiale dans les chenaux, pour ainsi faire des différentiels et des comparaisons dans les années. Après un premier relevé, plusieurs sites sont sélectionnés pour l'études. Chacun d'entre eux présente un intérêt particulier, et celui-ci sera détaillé au cours de leur présentation.

2.3. Présentation des sites d'études

2.3.1. Site 1 – Neuvy sur Loire

Le premier site est localisé à Neuvy sur Loire. Initialement, le chenal principal était situé le long de la rive gauche, et il est aujourd'hui le long de la rive droite du cours d'eau (Figure 5). Ce site a été retenu pour la bascule clairement apparente, mais aussi pour la déconnexion engendrant un changement morphologique du chenal originalement principal.



Figure 5 : Site 1 - Neuvy sur Loire - En 1949 à gauche et 2000 à droite (@ Remonterletemps.ign.fr)

Un dépôt de sable est visible en amont de l'île à partir des années 1950. Ce dernier se transforme progressivement en île, c'est-à-dire que la végétation s'implante, à partir de 1958. Un pont apparaît en amont entre 1978 et 1981, et les dépôts sédimentaires en amont de l'île sont de plus en plus importants. La bascule semble s'être produite entre 1985 et 1990. De nouvelles îles s'implantent dans le chenal originalement principal à partir de 1990.

Pour ce site, quatre orthophotos (chacune représentant une année) sont utilisées pour la caractérisation de la bifurcation : 1982, 1985, 1990 et 1993 (Annexe 2).

2.3.2. Site 2 – Beaugency

Le second site se situe à Beaugency où la bifurcation des chenaux aurait eu lieu entre 1956 et 1964. Cette bascule marquée par un ensablement progressif du chenal rive sud, est accompagnée de la création d'un chenal en rive nord (Figure 6). Quatre orthophotos sont retenues pour l'analyse : 1955, 1956, 1964 et 1968 (Annexe 2).

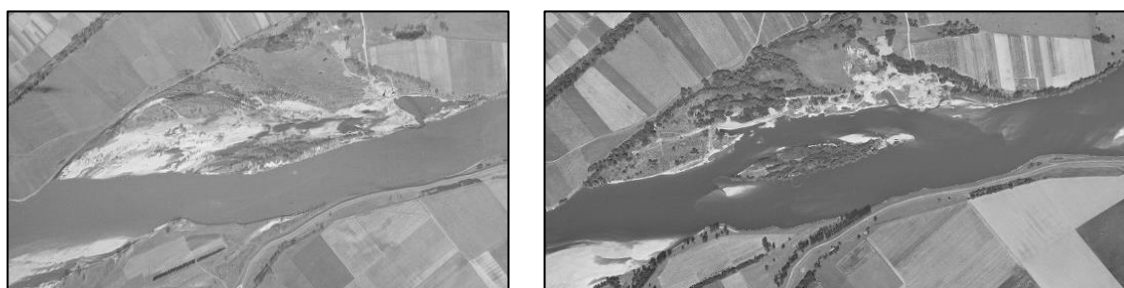


Figure 6 : Site 2 - Beaugency - En 1955 à gauche et 1968 à droite (@ Remonterle temps.ign.fr)

2.3.3. Site 3 – Montlouis sur Loire

L'île Courtemanche est localisée à Montlouis sur Loire et au milieu d'une bascule de chenal qui s'est produite entre 1969 et 1974 (Figure 7). Une sablière est présente et visible de 1967 à 1969. Ce site a été étudié par Julien Bocchino (2022).



Figure 7 : Site 3 - Montlouis sur Loire - En 1969 à gauche et 1981 à droite (@ Remonterletemps.ign.fr)

Les orthophotos utilisées pour l'analyse de ce site correspondent aux années 1956, 1967, 1968, 1969 et 1974 (Annexe 2).

2.3.4. Site 4 – Saint Pierre des Corps

Un autre basculement de chenal a eu lieu dans la commune de Saint Pierre des Corps. Le chenal principal se trouvait initialement au sud de l'île aux Vaches. En 1968, une sablière est visible dans le chenal nord, en amont de l'île, et reste présente au moins jusqu'en 1981 (Figure 8). Un pont temporaire a également été implanté en aval de l'île dans le chenal nord en 1969 pour la construction du pont autoroutier en aval de l'île. Ce pont temporaire a permis le transport de sédiments prélevés directement dans l'île, dans la moitié sud aval, et n'est plus effectif en 1974. Le pont autoroutier est finalisé en 1972. Cinq orthophotos sont utilisées pour le traitement SIG : 1956, 1969, 1972, 1981 et 1986 (Annexe 2).



*Figure 8 : Site 4 - Saint Pierre des Corps - Respectivement en 1967, 1974 et 2002
(@ Remonterletemps.ign.fr)*

Ce site est d'autant plus intéressant car le développement de l'île aux Vaches est associé au développement d'une mosaïque d'habitat importante, qui est induit par l'incision globalisée avec l'érosion régressive du lit de la Loire.

2.3.5. Site 5 – Rigny-Ussé

Le dernier site retenu pour l'étude se situe à Rigny-Ussé. La bifurcation observée s'est effectuée de part et d'autre de l'île Sainte Barbe. Le chenal principal se trouvait au nord de l'île, un rétrécissement de l'écoulement dans ce chenal est constaté en 1972, et l'ensablement total de ce même chenal est effectué en 1978 (Figure 9). Quatre orthophotos sont retenues pour l'analyse de cette île : 1950, 1972, 1978 et 1981 (Annexe 2).



Figure 9 : Site 5 - Rigny-Ussé - En 1959 à gauche et en 1981 à droite (@ Remonterletemps.ign.fr)

2.4. Géoréférencement et suivi des îles

A la suite du recensement des sites d'études, les orthophotos fournies par dalle sur Remonterletemps.ign.fr sont téléchargées pour ensuite être utilisées sur QGIS, un système d'information géographique. Ces orthophotos sont sélectionnées par années, sur les sites choisis, en fonction de la période où s'est produit le changement morphologique recherché, et aussi en fonction des campagnes photographiques qui ont été menées. Toutes les années ne sont de fait pas disponibles pour chaque site.

Une fois les orthophotos téléchargées, leur géoréférencement est nécessaire. Il s'agit d'orienter correctement la photographie, dans le système de coordonnées choisi, ici Lambert 93, pour que toutes les données visibles sur le raster soient à l'échelle et comparables avec d'autres images. Pour cela, une carte du réseau routier de chaque site provenant de la BD ORTHO est téléchargée pour bénéficier de points de repères dans l'espace, et ainsi procéder au géoréférencement des orthophotos.

Chaque site d'études fait ensuite l'objet de mesures via le logiciel QGIS de façon à obtenir les métriques suivantes : longueur de l'île, largeur de l'île au barycentre de celle-ci, à la moitié amont et à la moitié aval, distance entre la rive gauche du fleuve et le barycentre de l'île, et la largeur du lit mineur de la Loire au barycentre de l'île, un kilomètre en amont, puis un kilomètre en aval de ce dernier. Coraline Wintenberger (2015) a montré que ce sont les évolutions rapprochées qui conduisent à la formation d'une île, c'est pourquoi on réalise des répliques. Toutes ces mesures sont effectuées en mètre et pour chaque année d'étude. Les mesures de largeur de l'île sont prises perpendiculairement à l'axe de la longueur de l'île. La distance entre le barycentre et la rive gauche est mesurée perpendiculairement à l'écoulement, tous comme la largeur du lit mineur de la Loire. Le contour des îles est également représenté.

L'ensemble des données récoltées est ensuite traité avec le logiciel Excel dans l'optique de déterminer une tendance ou non dans l'évolution morphologique au sein du cours d'eau. Dans cette analyse, les années d'études étant différentes entre chaque site, pas au même nombre, et avec un laps de temps différent entre chacune d'entre elles, des annotations sont attribuées pour aider à la compréhension des résultats produits. Dans ces annotations figurent :

- E1 : correspond à « l'année étudiée 1 » d'un site
- E2 : correspond à « l'année étudiée 2 » d'un site
- E3 : correspond à « l'année étudiée 3 » d'un site

- E4 : correspond à « l'année étudiée 4 » d'un site
- E5 : correspond à « l'année étudiée 5 » d'un site

Des comparaisons sont effectuées entre les sites, entre les années d'études, et intrinsèquement à chaque site. Une étude des données hydrologiques du cours d'eau, grâce à la banque hydro (hydro.eaufrance.fr), pendant la période étudiée de chaque site est aussi menée pour faire ressortir des événements hydrologiques, comme des crues, qui affecteraient la morphologie de la rivière. Cette analyse globale met en évidence les éventuels déplacements des îles et par conséquent les modifications morphologiques qui ont lieu dans le lit de la Loire, en révélant potentiellement leur(s) cause(s) et modalité(s).

III. Résultats

3.1. Site 1 – Neuvy sur Loire

Concernant le premier site, de légères modifications morphologiques de l'île sont observables, notamment en largeur avec un élargissement progressive de l'île en amont et à son barycentre, accompagné d'un affinement de la partie avale. Ces évolutions ne sont cependant pas significatives au regard de la largeur du lit de la Loire qui fait environ 510 mètres. L'évolution en largeur de l'île ne représente au plus que 2 % de la largeur du lit mineur (Figure 10).

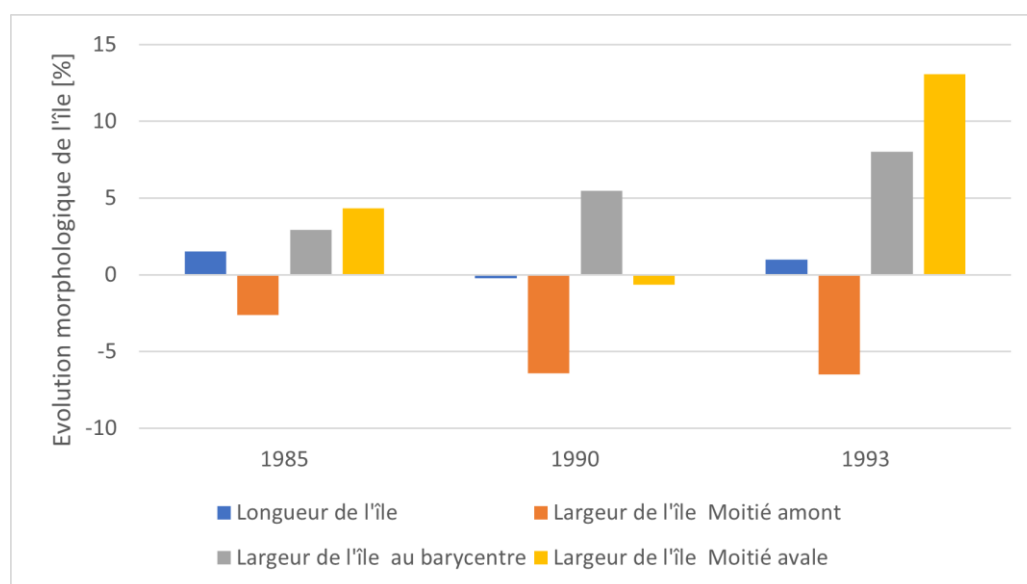


Figure 10 : Evolution morphologique de l'île de Neuvy sur Loire par rapport à la première année d'études (1982) (@Illona Doyon)

L'île semble cependant se déplacer. On peut en effet constater sur la figure 11 que la position de son barycentre évolue en allant vers le Nord-Est, c'est-à-dire vers la rive droite du cours d'eau. Cette direction, contradictoire vis-à-vis de la bifurcation engendrant le positionnement du chenal principal le long de la rive droite, s'explique par le changement morphologique de l'île qui s'élargit, et induit donc un déplacement de son barycentre.

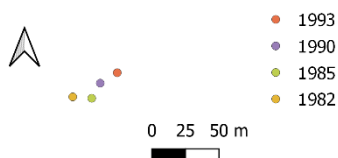


Figure 11 : Déplacement du barycentre de l'île de Neuvy sur Loire (@Illona Doyon, QGIS)

La Loire a un débit moyen de 835 m³/s (Latapie, 2011). Il a été relevé en mai 1983 un événement hydrologique important avec un débit de 1 720 m³/s (hydro.eaufrance.fr) qui a donc pu remobiliser les sédiments, et il a été suivi d'une période de très bas débits observée à partir d'août 1988 à janvier 1990, avec un débit minimum de 58,4 m³/s (hydro.eaufrance.fr), laissant place à l'installation de la végétation.

3.2. Site 2 – Beaugency

On observe un rétrécissement important de l'île, principalement en longueur avec une perte de 20 % de sa longueur entre 1968 et 1995 (Figure 12). De plus, l'île se décroche progressivement de la rive droite, laissant place au passage des écoulements. Le décrochement est effectif en 1964, et a potentiellement été aidé par la crue d'avril caractérisée par un débit de 1 010 m³/s (hydro.eaufrance.fr). Une deuxième crue importante se produit en mai 1966 avec un débit de 1 690 m³/s (hydro.eaufrance.fr), puis un dernier événement hydrologique survenu en janvier 1968 a probablement gravé le nouveau passage dans un chenal au nord de l'île avec un débit de 2 170 m³/s (hydro.eaufrance.fr).

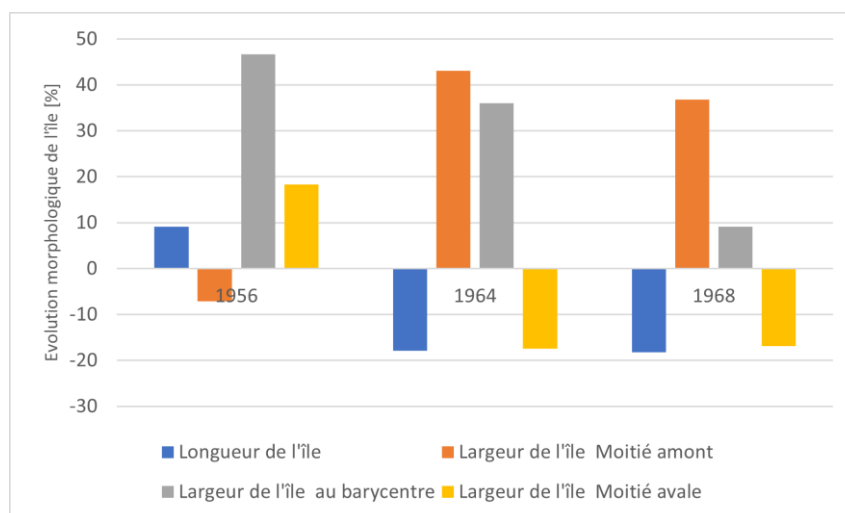


Figure 12 : Evolution morphologique de l'île de Beaugency (@Illona Doyon)

Les données statistiques du graphe sont données par rapport à la morphologie de l'île à l'année de référence qui est la première année d'étude pour ce site : 1955.

D'après la représentation du contour de l'île en fonction des années (Figure 13), celle-ci semble se stabilisée à partir de 1964, soit après la création du chenal nord. Cette stabilité laisse place à la densification de la végétation.

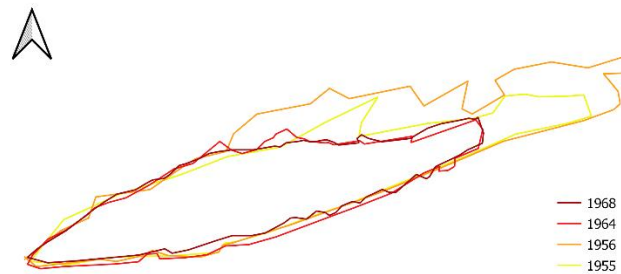


Figure 13 : Contour de l'île de Beaugency en fonction des années (@Illona Doyon, QGIS)

3.3. Site 3 – Montlouis sur Loire

Le site de Montlouis sur Loire a subi un fort rétrécissement de sa largeur, et en particulier de sa largeur avale avec une diminution de 80 % au cours du temps (Figure 14 et 15). Ce phénomène est dû à l'activité d'une gravière implantée en 1967.

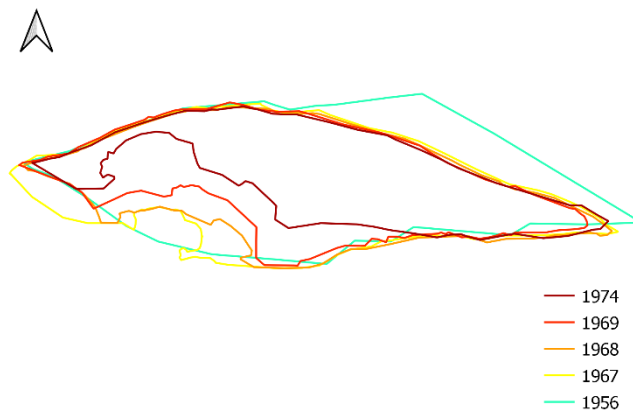


Figure 14 : Contour du site de Montlouis sur Loire (@Illona Doyon, QGIS)

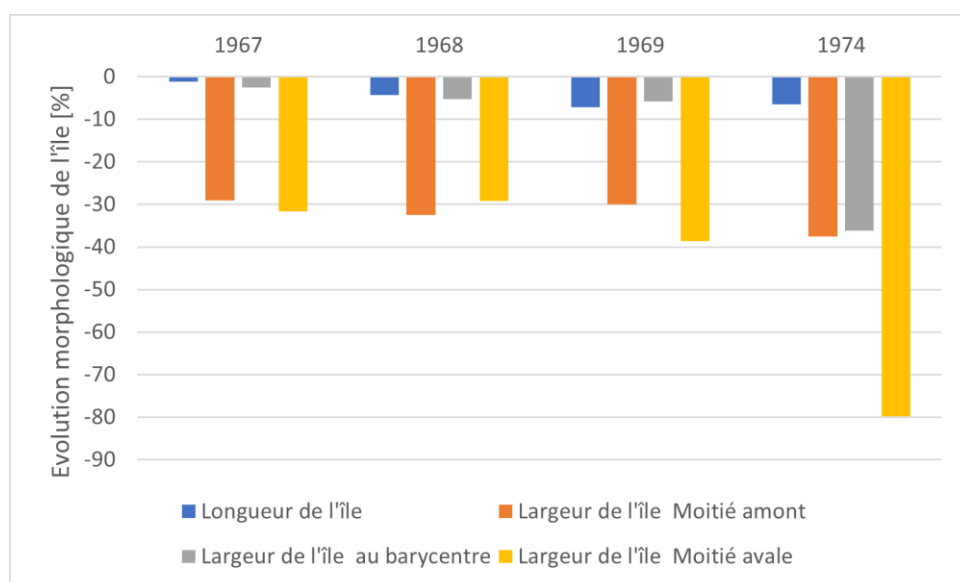


Figure 15 : Evolution morphologique de l'île par rapport à l'année 1956 (@Illona Doyon)

Au sein de son étude, Julien Bocchino a réalisé une analyse détaillée de l'évolution morphologique de ce site, en incluant la décomposition de sa nature (Figure 16). Cette représentation facilite la constatation de l'évolution de la végétation sur l'île qui s'est reconstituée entre le début des extractions et la stabilisation nouvelle de l'île. On peut aussi remarquer la présence d'un épis, construit en 1970, qui vient concentrer les écoulements dans le chenal secondaire, ce qui favorise également l'érosion de celui-ci. Une plus grande quantité d'eau peut alors s'écouler dans ce chenal, ce qui force davantage son agrandissement et repousse l'île vers la berge nord. Les écoulements étant déviés dans le chenal sud, le chenal nord accueille un débit moins important, l'énergie des écoulements diminue et des dépôts sédimentaires s'opèrent. Ceci permet à l'île de se connecter à la rive droite et de retrouver la stabilité perdue à cause de la modification morphologique engendrée par les extractions de sable.

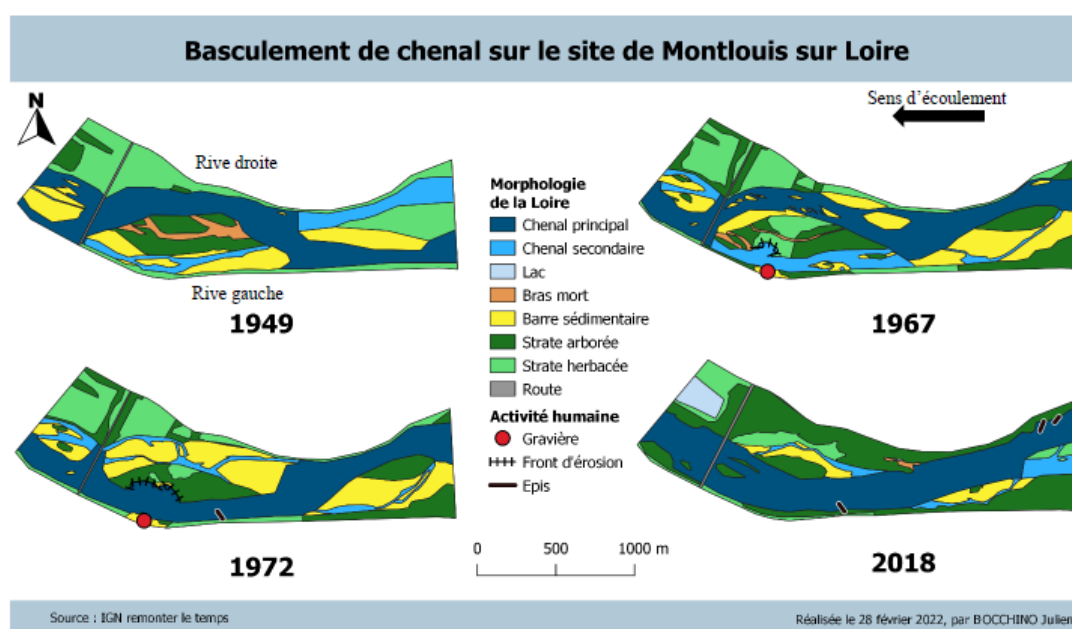


Figure 16 : Etude du basculement de chenal sur le site de Montlouis sur Loire, avec description des éléments composant le site (@Julien Bocchino, 2022)

Dans ce cas, la bascule de chenal a eu lieu suite à l'activité d'extraction qui a incisé le fond du lit du chenal. Ce phénomène a aussi été favorisé par l'épis implanté en amont dans ce même chenal. Ces circonstances induisent une augmentation des écoulements dans le chenal, engendrant ensuite une érosion de ces extrémités permettant son élargissement.

3.4. Site 4 – Saint Pierre des Corps

Premièrement, ce site d'études montre de fortes variations morphologiques (Figure 17). La longueur de l'île diminue en premier, en particulier en amont, et cela suite à l'implantation du gravier dans le chenal nord en amont de l'île en 1968. Les extractions vont donc provoquer une incision du chenal nord et perturber l'équilibre de l'île, notamment en modifiant sa forme, tout en permettant d'ores et déjà des écoulements plus prononcés dans le chenal nord. De plus, la construction du pont autoroutier en aval de l'île génère des prélèvements de sédiments directement sur la partie aval de l'île. Cette action est accompagnée d'une destruction de la végétation présente sur cette zone avec un déracinement des espèces ligneuses (Figure 8). La coexistence de ces événements fragilise l'île et entraîne sa division. Ce changement morphologique majeur

intervient entre 1972 et 1981 et est caractérisé par une diminution d'environ 90 % de la largeur aval de l'île (Figure 18).

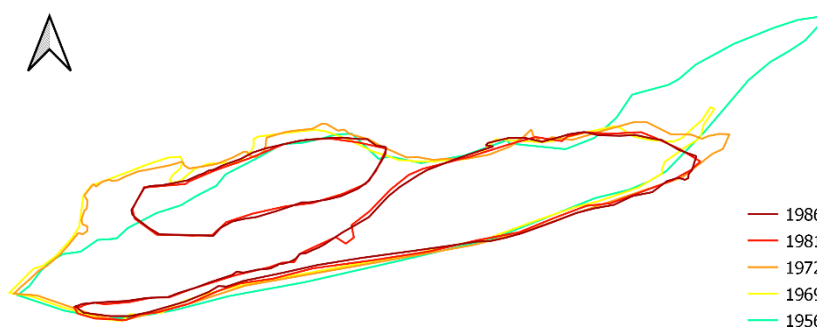


Figure 17 : Evolution morphologique du site de Saint Pierre des Corps (@Illona Doyon, QGIS)

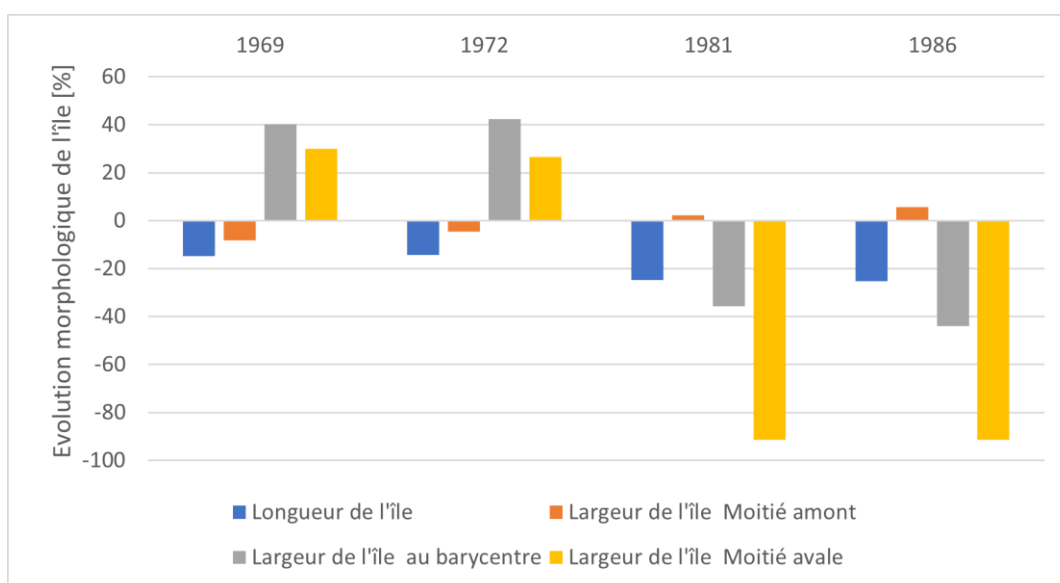


Figure 18 : Evolution morphologique du site de Saint Pierre des Corps par rapport à l'année 1956 (@Illona Doyon, QGIS)

L'île aux Vaches est donc constituée d'une partie longue et fine en aval, qui se stabilise grâce aux dépôts sédimentaires qui s'opèrent entre l'île et la rive sud, mais aussi dans le canal de division. Les écoulements ayant été majoritairement redirigés dans le chenal nord suite à son incision, l'énergie du cours d'eau s'est affaiblie dans les autres chenaux et le transport de sédiments est donc moindre.

La cause principale de la bifurcation est par conséquent similaire à celle du site de Montlouis sur Loire : l'extraction de granulats. Le site de Saint Pierre des Corps expose tout de même l'importance de la végétation dans la stabilité des îles.

3.5. Site 5 – Rigny-Ussé

On constate une perte de longueur à l'aval de l'île (Figure 19). C'est une conséquence de l'érosion car le débit est de plus en plus important dans le chenal au sud de l'île, la bascule s'étant déjà produite. L'énergie du cours d'eau est par conséquent plus grande, il cherche donc à transporter plus de sédiments. La

diminution de la longueur de l'île par l'aval entraîne un rétrécissement de la largeur de la moitié aval de l'île. Ces changements s'opèrent relativement progressivement, sans traduire de modification brusque dans le lit de la Loire (Figure 20).

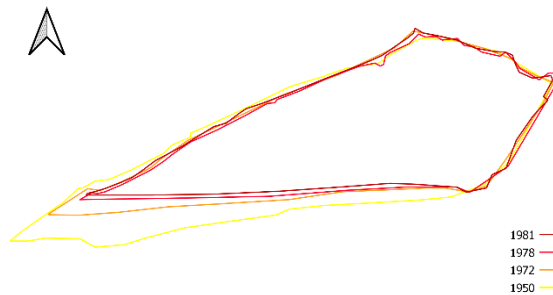


Figure 19 : Contour de l'île de Rigny-Ussé au cours du temps (@Illona Doyon, QGIS)

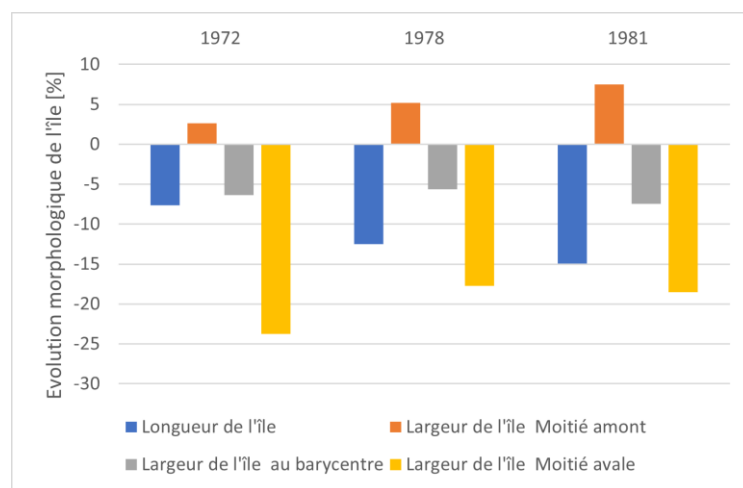


Figure 20 : Evolution morphologique du site de Rigny-Ussé par rapport à la première année d'étude (1950) (@Illona Doyon)

La bascule de chenal semble avoir été initiée par la modification de l'île située en amont du site d'études (Figure 21). Cette dernière s'est développée vers l'aval, obstruant ainsi le canal principal pour les écoulements. Ne permettant plus à l'eau de se diriger facilement au nord de l'île, le chenal initialement principal, est comblé progressivement.



Figure 21 : Obstruction des écoulements vers le chenal nord par le déplacement de l'île située en amont (@Remonterletemps.ign.fr, 1972)

Aucun acteur extérieur au cours d'eau ne semble être intervenu en amont. Les processus qui se sont mis en place au cours de cette période correspondent probablement aux suivants : un dépôt sédimentaire

s'opère entre les deux îles car les écoulements passent davantage dans le chenal nord en partant de l'île précédente (Figure 22 – 1959), la végétation s'implante sur cette barre sédimentaire ce qui la stabilise et lui permet de se connecter à l'île située en amont (Figure 22 – 1968 et 1978), puis l'incision du cours d'eau s'intensifie dans le chenal sud ce qui dévie la majorité des écoulements vers ce chenal, et l'écoulement entre les deux îles n'étant plus possible comme en 1950 (Figure 22), le chenal localisé au nord de l'île se comble (Figure 22 – 1978).

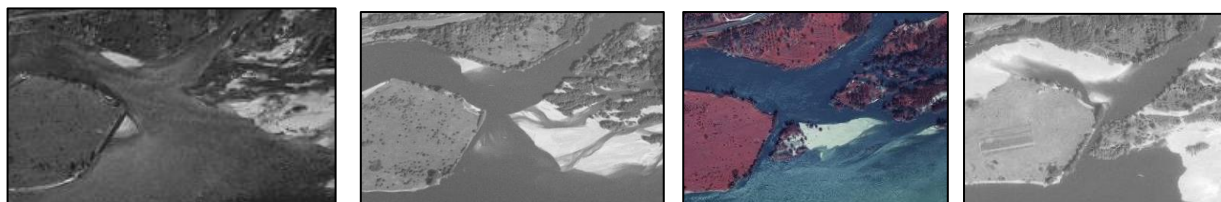


Figure 22 : Obstruction progressive du chenal principal (@Remonterletemps.ign.fr, respectivement 1950, 1959, 1968 et 1978)

La cause principale de la bascule de chenal est ici l'incision du lit de la Loire. Des évènements hydrologiques sont possiblement intervenus dans ce processus (aucune donnée n'est disponible).

3.6. Une tendance générale ?

Ce premier graphe (Figure 23) montre l'évolution de la distance entre la rive gauche et le barycentre de l'île par rapport à la première année d'étude de chaque site (E1). Aucune tendance n'est affichée concernant le déplacement du barycentre de l'île. Seul le barycentre de l'île aux Vaches de Saint Pierre des Corps présente un éloignement très fort, puis revient proche de sa position en E1. Ce rapprochement important qui se produit en E4 et E5 résulte de la division de l'île. En dehors de ce cas particulier, on peut plus simplement dire que les îles sont mobiles.

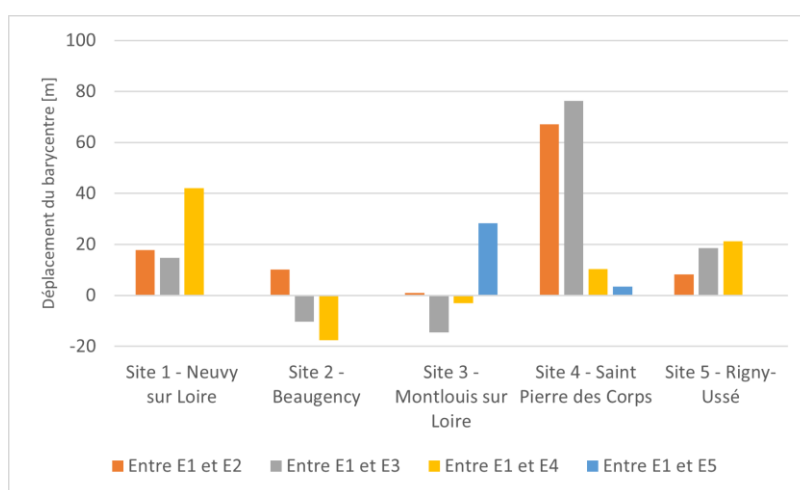


Figure 23 : Variation de la distance entre la rive gauche et le barycentre de l'île de chaque site étudié par rapport à la première année d'étude de chaque site (E1) (@Illona Doyon)

Les déplacements les plus importants sont principalement survenus entre 1990 et 1993 pour le premier site, entre 1956 et 1964 pour le deuxième, entre 1969 et 1974 pour le troisième, entre 1956 et 1969 puis entre 1972 et 1981 pour le quatrième site, et enfin entre 1972 et 1978 pour le dernier site d'études

(Figure 24). La période entre 1972 et 1974 est donc commune à trois des sites : Montlouis sur Loire, Saint Pierre des Corps et Rigny-Ussé. De plus, ces trois communes sont localisées en Indre-et-Loire. Aucune donnée hydrologique n'est disponible sur cette période sur la banque hydro et aucune crue importante ne semble avoir eu lieu. Il n'y a donc pas de corrélation hydrologique entre ces déplacements.

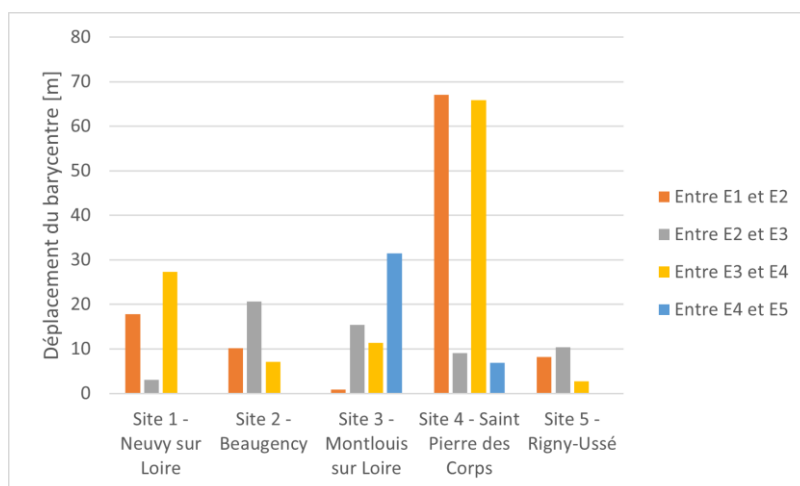


Figure 24 : Evolution de la distance entre la rive gauche et le barycentre de l'île pour chaque site entre deux années d'études consécutives (@Illona Doyon)

Concernant l'évolution de la largeur du lit mineur de la Loire (Figure 25), une diminution 14% est visible à Beaugency, ce qui représente environ 60 mètres, et est due au décrochage de l'île : la végétation en rive droite s'est fortement développée et a ainsi provoqué la réduction du lit mineur. Cependant, l'augmentation des écoulements dans le chenal créé au nord de l'île a favorisé l'érosion du chenal en rive droite, ce qui explique l'élargissement qui a suivi.

L'évolution de la largeur du lit mineur de la Loire au barycentre de l'île de chaque site d'études ne met pas de tendance en évidence.

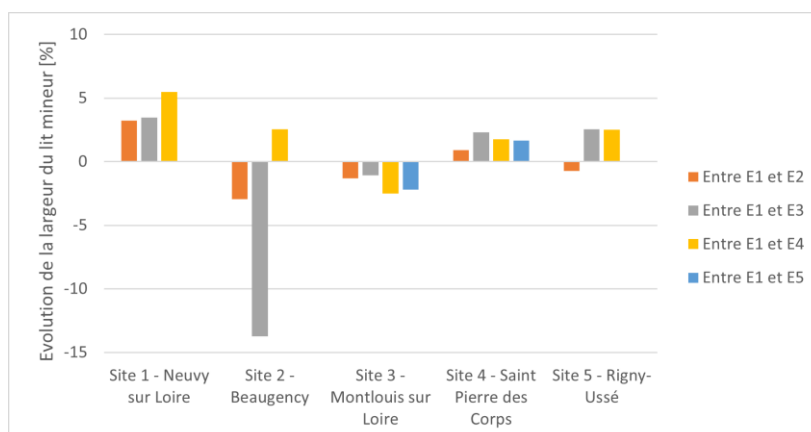


Figure 25 : Evolution de la largeur du lit mineur de la Loire au barycentre de l'île de chaque site par rapport à leur première année d'études (E1) (@Illona Doyon)

Globalement, aucune tendance n'est observable entre les sites d'études. Chacun évolue indépendamment des autres, sans relation temporelle ou hydrologique.

IV. Discussion

Cette étude a permis de montrer que le phénomène de bascule de chenal peut être dû aux extractions de granulats, au développement de nouvelles îles, et favorisé par les événements hydrologiques. À ces différents processus s'ajoute l'incision du cours d'eau qui influence la direction des écoulements. Une bascule de chenal peut donc avoir une origine naturelle ou anthropique. Cependant, aucune « règle » n'a pu être établie pour le déroulement d'une bifurcation.

Pour approfondir ce sujet, un nombre plus important de site d'études présentant une bascule est nécessaire en comptant un minimum de cinq à dix sites pas cas de figure, c'est-à-dire cinq à dix exemples de sites présentant une gravière, et un autre groupe de sites accueillant la formation d'une île, par exemple. Ainsi, une étude statistique plus détaillée pourrait être effectuée.

Par ailleurs, l'incision du lit principal d'une rivière est aussi un facteur de stabilisation. Les écoulements sont en effet orientés et concentrés dans un chenal majoritaire, ce qui peut provoquer des transformations au sein du lit du fleuve telles que le passage de deux chenaux à un seul chenal. Ce phénomène d'incision, dû à la forte anthropisation des cours d'eau, et de la Loire en l'occurrence, a un impact sur le milieu environnemental qui est maintenant irréversible. Son origine n'étant pas naturelle, il bouleverse fortement le fonctionnement du cours d'eau qui cherche à s'adapter. Parmi les conséquences figurent notamment un abaissement des nappes phréatiques, réduisant ainsi la ressource des plaines alluviales, et l'assèchement des écosystèmes alluviaux. La végétation est impactée par le manque de ressource en eau à proximité, ce qui peut limiter son développement. Le lit de la Loire peut alors présenter davantage de barres sédimentaires mobilisables suivant son énergie, modifiant de fait sa morphologie.

La Loire, située dans un contexte fortement anthropisé caractérisé par un ensemble d'ouvrages tels que des duits et des épis qui contraignent la migration latérale, continue d'évoluer et laisse place à des migrations. Il s'agit toujours d'un cours d'eau anabranché, constitué de méandres, d'îles et de barres sédimentaires. L'incision du lit est naturellement localisée en extrado de méandres, et ces derniers évoluent aussi dans le temps. Ils se déplacent dans l'espace de mobilité du fleuve pouvant engendrer de forts changements de direction, pouvant à leur tour impacter la direction des écoulements, potentiellement en déviant le canal d'incision du lit.

Un autre phénomène pouvant, dans ce contexte, être responsable de modifications morphologiques importantes est l'hydrologie. Les crues sont plus intenses et plus fréquentes qu'auparavant, alors que les débits en période d'étiage sont de plus en plus faibles. Une année hydrologique constituée de telles disparités ne permet pas à un cours d'eau de maintenir une stabilité dans son fonctionnement.

Bibliographie

- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (1996). LARGE WOODY DEBRIS JAMS, CHANNEL HYDRAULICS AND HABITAT FORMATION IN LARGE RIVERS. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12(2-3), 201-221. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199603\)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<201::AID-RRR390>3.0.CO;2-A)
- Barman, B., Kumar, B., & Sarma, A. K. (2019a). Dynamic characterization of the migration of a mining pit in an alluvial channel. *International Journal of Sediment Research*, 34(2), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.009>
- Barman, B., Kumar, B., & Sarma, A. K. (2019b). Dynamic characterization of the migration of a mining pit in an alluvial channel. *International Journal of Sediment Research*, 34(2), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.009>
- Bocchino, J. (s. d.). *Identification des modalités de basculement de chenal sur la Loire : Analyse par photo-interprétation d'orthophotographies.*
- Chapel, A. G. (2009). Les sites d'extraction, révélateurs d'un nouvel engagement citoyen : Le cas des sablières Lafarge en Bretagne. *VertigO, Hors série 6*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.9172>
- Claude, N. (2012). *Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablograveleuse : Influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France).*
- Clavel, P., Cuinat, R., Hamon, Y., & Romaneix, C. (1978). Effets des extractions de matériaux alluvionnaires sur l'environnement aquatique dans les cours supérieurs de la Loire et de l'Allier. *Bulletin Français de Pisciculture*, 268, 121-154. <https://doi.org/10.1051/kmae:1978015>
- Dambre, J.-L. (1996). Les extractions de matériaux dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire et de ses affluents. *La Houille Blanche*, 82(6-7), 108-113. <https://doi.org/10.1051/lhb/1996077>
- Frings, R. M., & Kleinhans, M. G. (2008). Complex variations in sediment transport at three large

- river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology*, 55(5), 1145-1171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00940.x>
- Gautier, E., Piégay, H., & Bertaina, P. (2000). A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management : Case study of the Loire and Allier rivers. *Geodinamica Acta*, 13(1), 29-43. <https://doi.org/10.1080/09853111.2000.11105360>
- Grivel, S., Nabet, F., Gautier, E., Temam, S., Gruwé, G., Gardaix, J., & Lee, M. (2018). Héritages et influences contemporaines des anciens ouvrages de navigation de la Loire moyenne (France). *VertigO, Volume 18 Numéro 3*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.23121>
- Herisoa, P. R. M. (s. d.). *ORTHOPHOTOGRAPHIE ISSUE D'UNE PRISE DE VUE AERIENNE PAR DRONE : CONCEPTION – EVALUATION ET ETUDE D'IMPACT*.
- Latapie, A. (2011). *MODELISATION DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE D'UN LIT ALLUVIAL : APPLICATION A LA LOIRE MOYENNE*. Tours.
- Leteinturier, B., Engels, P., Petit, F., Chiffaut, A., & Malaisse, F. (2000). Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le XVIIIe siècle / Changing dynamics of the Loire river in Burgundy (France) during the last 200 years. *Géomorphologie Relief Processus Environnement*, 6(4), 239-251. <https://doi.org/10.3406/morfo.2000.1069>
- Malavoi, J.-R. (2007). *Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau*.
- Moatar, F., & Dupont, N. (2016). *La Loire fluviale et estuarienne : Un milieu en évolution*. Éditions Quae.
- Nabet, F. (2013). *Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée*.
- Ramond, S. (2015). *Formation des débits et fonctionnement d'une plaine alluviale : Approches hydrologiques et géochimiques multi-scalaires*.
- Rinaldi, M., Wyżga, B., & Surian, N. (2005). Sediment mining in alluvial channels : Physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21(7), 805-828.

Wintenberger, C. (2015). *Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse Etudes in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne*. François – Rabelais de Tours.

Annexes

Annexe 1 : Répertoire des sites d'extraction entre Nevers et Saumur (Latapie, 2011)

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Chimique de la route	Cuffy	1971	G	459	Arrêtée	Arrêtée	220	Arrêtée le 31/12/1981
Beauprix	Marzy	1973	D	461	15.4	11	22	
Morini	Marzy	1972	D	464	49	35	70	
Gillet	Garchizy	1962	D	469	35	25	50	
Bonnin	Marseilles les A.	1971	G	475	15	15	15	
Piat	Beffes	1972	G	479	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en mars 1981
Decaux	La Charité	1972	D	489	21	15	30	Lit mineur et majeur
Viollet	La Charité	1972	D	489	5.25	Arrêtée	7.5	
Sirot	Mesves/Loire Ű Pouilly	1972	D	503	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	
Sogemac	Couargues	1972	G	503	50	50	50	
Sogemac	Couargues/Thouvenot	1972	G	505	161	50	230	
Thouvenot	Tracy	1966	D	506	2.8	2	5	
Sables et roches de Tracy	Tracy	1977	D	507	14	7	20	Lit mineur 2 + lit majeur 5
Lasnes	Boulleret	1970	G	524	4	4	4	Bras secondaire
Cochery	Boulleret	1979	G	524	50	50	70	extraction 12 000 T en 1982 dans bras secondaire

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Chaput	Cosnes/Loire	1930	D	521	4.9	3.5	7	
Renault	Myennes	1964	D	526	2.8	2	4	
Foucher	Neuvy/Loire	1970	D	536	35	25	100 ?	
EDF	Centrale Belleville	79-82	G et D	536	Arrêtée	Arrêtée	2380	
Ciment route	Beaulieu	1977	G		35	25	50	
Foucher	Beaulieu	1973	G		49	35	70	
Debenne	Beaulieu	1973	G		Arrêtée	Arrêtée	11.5	
CBF	Briare	1973	D	549	56	40	80	
Gauthier	Poilly Les Gien	1964	G		Arrêtée	Arrêtée	20	
Begue	St Aignan	1963	G		Arrêtée	Arrêtée	8	
Roland	St Pere	1962	D		Arrêtée	Arrêtée	35	
Fragner	St Benoît/Loire	1964	D	598	35	25	50	
Roland	Germigny des Prés	1972	D	600	Arrêtée	Arrêtée	50	
Chatouillat	Sigloy Ū Chateau-neuf	1964	G	607	50	50	50	

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ligérienne	Ouvrouer/Loire	1969	G et D	612	242	175	200	
Mauger	Jargeau	1975	G	619	Arrêtée	Arrêtée	15	
Ligérienne	Jargeau		G	619	Arrêtée	Arrêtée		
Montigny	Bou	1965	D	622	Arrêtée	Arrêtée	50	
Roland F.	Sandillon	1964	G	624	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Renouvellement refusé en 1979 (64 - 69 : 200m ³ /jour = 90 000 T/ an)
CBF	Sandillon	1970	G	624	Arrêtée	Arrêtée	15	70 - 76 : 50 m ³ /jour = 20 000 T/ an) - Arrêtée en 1982
Montigny	Sandillon	1964	G	624	189	135	270	1965 - 1972 = 25 000 T ; 1972 - 1977 = 110 000 T ; 1977 - 1982 = 200 000 T / an
Nioche	Checny	1965	D	628	168	120	240	1965 - 1970 = 25 000 T ; 1970 - 1976 = 35 000 T ; 1977 - 1982 = 240 000 T / an

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ligérienne	Checly	1964	D	628	112	80	60	1964 - 1976 = 40 000 T ; 1976 - 1982 = 60 000 T / an
SETC	Checly	1972	D	628	30	30	30	1972 - 1976 = 20 000 T / an ; 1976 - 1982 = 30 000 T / an
Nioche	Checly	1966	D	628	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1983, reporté sur l'autre site. 1966 - 1970 = 18 000 T/an ; 1970 - 1982 = 25 000 T/an
Morillon	St Denis en Val	1968	G	633	Arrêtée	Arrêtée	60	Arrêtée le 01/01/82 ; 1968 = 50 m ³ /jour = 20 000 T/an
Moreau	St Denis en Val	1964	G	633	40	40	40	
Morillon Corvol	St Jean Le Blanc	1964	G	636	Arrêtée	Arrêtée	60	
Ligérienne	Orléans	1964	D	636	Arrêtée	Arrêtée	60	Arrêtée en 1982 (1964 : 18 000 T/an. 1965 - 1982 : 60 000 t/an)

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Rose	Chaingy	1964	D	648	20	20	20	
Le Strat	Mareau aux Prés	1964	G	648	65	60	90	
Ligérienne	St Ay - Cléry	1964	D	651	80	60	110	
Ste Nouvelle de dragage	Baule	1972	D	661	63	50	90	1972 = 35 000 T/an
Morillon	Dry	1964	D		96	69	138	Arrêtée en 1983 ; 1964-1967 = 40 000 T/an ; 1968 - 1981 = 45 000 T/an
Jallat	Tavers	1964	D	668	5	Arrêtée	30	1964 - 1968 = 20 000 T/an ; 1968 - 1976 = 30 000 T/an ; 1976 - 1981 = 30 000 T/an
Salviam Ũ Brun	St Laurent - Nouan	1974	G	671	-	-	-	De 1974 à 1979 1 500 000 m ³ pour construction centrale St Laurent
Veyer	Avaray	1965	D	672	63	50	90	
SCREG	Avaray		D	672	-	-	15	

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Landre	St Laurent - Nouan	1958	G	676	40	40	40	
Ploux	Courbouzon	1968	D	680	56	40	220	
Dragages du Centre à Binas	Suevres	1960	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1976 (80 000 T en 1965)
Salviam Brun	Suevres	1965	D		168	115	235	
Salviam Brun	Cours sur Loire	1974	D		Arrêtée	Arrêtée		Pas extrait depuis 1980
Salviam Brun	Menars	1968	D	690	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1970 (100 000 m ³ pour Pont Cele Gaulle)
Dragues Blésoises	Vineuil	1924	G		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Fin exploitation 1968 (30 000 m ³ en 1965)
Sté Ligérienne et Orléanaise de matériaux	Blois ũ La Chaussée St Victor	1933	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	100 000 m ³ en 1965 ; arrêtée en 1968
Société Tremblay	Vineuil	1947	G		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	18 000 m ³ en 1965 ; arrêtée en 1967

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Salviam Brun	Blois	1968	D	700	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	300 000 m ³ extraits pour remblais du pont Charles de Gaulle ; arrêtée en 1970
Sté Ligérienne	Blois ũ Chouzy	1968	D	708	280	200	400	
Sablères Loire	Cande sur Beuvron	1967	G	710	50	50	70	
Mac Bean	Cande sur Beuvron	1970	G	710	Arrêtée	Arrêtée	10	
Lenoir	Veuves	1668 ?	D	720	30	30	30	
Masson (Ligérienne)	Mosne	1977	G	723	Arrêtée	Arrêtée	68	Site abandonné en 1982
Masson (Ligérienne)	Charge	1963	G		120	95	104	
Roland (DDE)	Nazelles		D					
Lechipre	Amboise	1973	G	731	50	50	60	
Ligérienne	Amboise	1963	G	732	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1982
Ploux	Noizay	1965	D		90	60	110	
Sadel	Montlouis sur Loire		G	745				

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
Ploux	Vernou / Vouvray	1977	D	750	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1981
Sadel	Montlouis	1965	G	745	Arrêtée	Arrêtée	25	Arrêtée en 1982
Sadel	Vouvray	1967	D	750	Arrêtée	Arrêtée	13	Arrêtée en 1982
St Georges	Vouvray	1970	D	750	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en 1982
St Georges	Montlouis	1973	G	745	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1982
Ligérienne	Vouvray / Montlouis	1968	G et D	750	430	270	390	
Giguret	Montlouis	1966	G	745			0.38 ?	entre 49 et 300 m ³ / an
DDE/Colas	La Ville aux Dames		G					
DDE/Brougalay	La Ville aux Dames							
Ligérienne	St Pierre des Corps	1963	G et D		Arrêtée	Arrêtée	100	Arrêtée en 1982
St Georges	Rochecorbon	1963	D	752	150	130	145	
St Georges	St Pierre des Corps	1964	D		Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée	Arrêtée en 1976
Ligérienne	Tours	1963	G et D	759	Arrêtée	Arrêtée	94	Arrêtée en 1982

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques
St Georges	Fondettes	1968	D	764	Arrêtée	Arrêtée	0	Exploité 1 an en 1968 puis en 1980. arrêté en 1982
Sagral	St Genouph	1964	G	765	Arrêtée	Arrêtée	30	Arrêtée en 1982
Sagral	Berthenay	1971	G	768	95	95	70	
Giaugue	Berthenay	1969	G	768	50	50	55	
Sté Tourangelle	St Etienne de Chigny	1963	D	771	Arrêtée	Arrêtée	8	Arrêtée en 1980
Sté Tourangelle	Cinq Mars	1963	D		-	-	16	
Sté Tourangelle	Villandry	1977	G	775	120	85	5	
Sté Tourangelle	Langeais	1966	D	782				
Sté Tourangelle	Langeais	1963		782	Arrêtée	Arrêtée	10	Arrêtée en 1980
Sté Tourangelle	St Patrice	1970	D		Arrêtée	Arrêtée	14	Arrêtée en 1982
Sagral	Bréhémont	1967	G	786	Arrêtée	Arrêtée	8	Site supprimé en 1982
Sagral	Rigny Ussé	1967	D	794	Arrêtée	Arrêtée	10	Site supprimé en 1982
Sagral	Avoine	1963	D	805	89	20	70	
DDE	La Cha- pelle/Loire			799				
Sagral	Savigny en V.	1973	G et D	809	Arrêtée	Arrêtée	10	Site supprimé en 1982

Entreprise	Commune	Année début extraction	Rive	PK	Prod. 1984	Prod. 1986	Prod. 1979	Remarques

Annexe 2 : Années d'études de chaque site

Années d'études de chaque site				
Site 1 - Neuvy sur Loire	Site 2 - Beaugency	Site 3 - Montlouis sur Loire	Site 4 - Saint Pierre des Corps	Site 5 - Rigny- Ussé
1982	1955	1956	1956	1950
1985	1956	1967	1969	1972
1990	1964	1968	1972	1978
1993	1968	1969	1981	1981
		1974	1986	



Directeur.rice de recherche :

Alex Andréault

Ilona Doyon

PFE/DAE5

Ingénierie des Milieux Aquatiques

2023-2024

Les inversions de chenaux en Loire moyenne : Origines et modalités

Résumé : La bascule de chenal est un phénomène qui modifie la morphologie des cours d'eau. Il se caractérise par le passage d'un chenal secondaire en chenal principal. Ce type de changement peut être conséquence d'impacts anthropologiques ou bien de causes naturelles. La bascule de chenal, aussi appelée bifurcation, peut s'observer dans les cours d'eau, et la Loire en présente plusieurs. Ce fleuve ayant une morphologie en anabranch, avec de nombreuses îles au sein de son lit mineur, est le support de nombreuses particularités morphologiques incluant la bascule de chenal. Soumise à une forte anthropisation, la Loire, le plus long fleuve de France, a été fortement sollicité par la navigation fluviale et les besoins en matériaux pendant la période d'après-guerre, pour sa ressource sablo-graveleuse. L'accumulation des différents impacts a favorisé l'incision de son lit. À la fois facteur de stabilisation et de modification, l'incision du lit mineur d'un fleuve modifie son fonctionnement, en orientant notamment les écoulements.

Cette étude s'intéresse au phénomène de bascule de chenal au sein du lit mineur de la Loire moyenne. Plusieurs bifurcations se sont opérées entre le bac d'Allier et le bec de Maine. L'objectif est de comprendre leur origine et leur processus de mise en œuvre.

Mots Clés : Incision, Loire moyenne, transport sédimentaire, bifurcation, bascule de chenal, chenal principal, chenal secondaire, modification morphologique, origines, modalités