

Table des matières

I- Introduction générale	3
II- Présentation de la structure d'accueil	4
III- BONNY-SUR-LOIRE	4
1. Introduction	4
2. Site d'étude	7
2.1. <i>Localisation et enjeux</i>	7
2.2. <i>Morphologie du secteur</i>	7
2.3. <i>Bassin-versant et contexte géologique du secteur</i>	8
2.3.1. <i>Caractéristiques du bassin versant de la Loire</i>	8
2.3.2. <i>Caractéristiques de la Loire moyenne</i>	8
2.3.3. <i>Caractéristiques spécifiques du secteur</i>	8
2.4. <i>Contexte hydrologique</i>	10
2.5. <i>Indices</i>	11
3. Matériels et méthodes	11
3.1. <i>Mesures hydrographiques et topographiques</i>	11
3.2. <i>Évolution de la forme en plan</i>	13
3.3. <i>Évolution de la forme en coupe</i>	13
3.4. <i>Évolution longitudinale</i>	14
3.5. <i>Érosion de berge et hydrologie</i>	15
3.6. <i>Calculs divers</i>	16
3.6.1. <i>Indice de sinuosité</i>	16
3.6.2. <i>Rc/W</i>	16
3.6.3. <i>Ratio d'aspect</i>	17
3.6.4. <i>Forces tractrices</i>	17
4. Résultats	18
4.1. <i>Évolution de la forme en plan</i>	18
4.1.1. <i>Tronçon de 4 km</i>	18
4.1.2. <i>Zoom sur la berge</i>	19
4.1.3. <i>Évolution berge / île</i>	20
4.4. <i>Érosion de berge et hydrologie</i>	29
4.5. <i>Calculs divers</i>	30
4.5.1. <i>Indice de sinuosité</i>	30
4.5.2. <i>Rc/W</i>	30
4.5.3. <i>Ratio d'aspect</i>	30
4.5.4. <i>Forces tractrices</i>	30
5. Discussion	31
6. Conclusion	32
IV- Bibliographie	33
ANNEXES	34

I- Introduction générale

Ce stage s'inscrit dans une quatrième année d'école d'ingénieur, à Polytech Tours, dans la spécialité Ingénierie des Milieux Aquatiques. Durant ces trois mois de stage au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), différents composants de cet établissement ont pu être découverts, mais un sujet précis associé à différentes missions était attribué, il est expliqué dans le paragraphe suivant.

Sur la commune de Bonny-sur-Loire, située dans le département du Loiret, la berge rive droite de la Loire en amont du pont de la RD926 reliant Bonny-sur-Loire à Beaulieu-sur-Loire subit une érosion régulière inquiétante au regard des enjeux présents, depuis le milieu du XX^{ème} siècle. Les services de la DREAL (Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) Centre-Val de Loire ont étudié l'évolution du fleuve, dans le cadre de la gestion du domaine public fluvial de la Loire moyenne. La finalité était d'informer la DDT (Direction Départementale des Territoires) du Loiret, gestionnaire du lit de la Loire, de l'évolution prévisible du fleuve dans ce secteur. Des menaces à court terme ont été mises en évidence pour le captage d'alimentation en eau potable des communes de Bonny-sur-Loire et Ousson, mais également à moyen terme pour la culée rive droite du pont de la RD926. Ces deux zones constituent des enjeux qu'il convient de protéger. Le gestionnaire de la route est le conseil départemental du Loiret qui propose pour préserver les enjeux de mettre de l'enrochement. Cette solution est en opposition avec les choix de gestion actuelle du Domaine Public Fluvial par l'état, celui-ci favorisant la préservation des processus d'érosion de berge et de divagation latérale. La longueur d'enrochement nécessaire serait certainement supérieure à 200 m linéaire ce qui nécessite une autorisation Loi sur l'eau qui est une procédure lourde et le coût d'un tel enrochement serait important.

C'est dans ce contexte que le Laboratoire Régional de Blois du Cerema a été sollicité par la DDT du Loiret pour analyser l'état des connaissances, la vulnérabilité du pont et proposer un programme d'investigations complémentaires afin d'étudier des solutions au problème conciliant les enjeux socio-économiques liés aux infrastructures menacées et à la préservation de la dynamique fluviale. Dans ce cadre, plusieurs mesures ont été réalisées en mai 2019, notamment des levés bathymétriques mono-faisceau et topographiques sur un tronçon de 3 km de la Loire. Ces mesures de suivi de la dynamique fluviale ont été complétées par des mesures spécifiques au droit des infrastructures menacées : levés multifaisceaux, inspection au sonar latéral, mesures de courantométrie *aDcp*. Les mesures topo-bathymétriques, consistant en 13 profils en travers, suivent en partie des profils topo-bathymétriques déjà suivis en 2016, ce qui permet une analyse diachronique de l'évolution morphologique du secteur. Le contexte d'évolution morphologique dans ce secteur de Bonny-sur-Loire est complexe. C'est pourquoi l'équipe du Cerema souhaite s'appuyer sur les nouvelles données acquises en 2019 ainsi que sur une étude bibliographique pour étudier et comprendre les processus d'évolution morphologique de la forme en plan de la Loire dans ce secteur. L'objectif est de comprendre le fonctionnement morphologique de la Loire dans cette zone afin de définir des solutions pertinentes et réellement adaptées pour préserver au mieux la dynamique fluviale et les infrastructures. C'est dans cet objectif que le stage réalisé au Cerema s'inscrit.

Les missions à réaliser lors de celui-ci sont donc :

- Analyser les données de topo-bathymétrie mono- et multifaisceaux, de courantométrie et d'imagerie au sonar latéral ;
- Comparer les données 2019 aux données antérieures disponibles ;
- Confronter les analyses issues des mesures et celles issues de l'analyse diachronique des photos aériennes en lien avec l'hydrologie de la Loire entre ces différentes campagnes de mesures ;
- Réaliser une étude bibliographique sur les connaissances actuelles des processus d'érosion de berge selon 1) l'influence de la forme en plan (formation des méandres) et 2) l'influence des formes du lit (dynamique des barres sédimentaires) ;
- Rédiger un rapport comportant :
 - Une synthèse bibliographique portant sur l'évolution en plan des rivières en lien avec l'érosion de berge : évolution des méandres et influence des formes du lit ;
 - Analyse de l'évolution morphologique du tronçon de la Loire étudié et comparaison avec les processus identifiés dans la synthèse bibliographique.

Ce rapport de stage présente en premier lieu la structure d'accueil, puis se focalise sur le cas d'étude de Bonny-sur-Loire pour répondre aux objectifs du stage. Cette partie est composée par une introduction, une

section matériels et méthodes, ainsi que par les parties résultats et discussion. Une partie décrivant les activités réalisées sur le terrain sans lien direct avec le sujet du stage, mais permettant d'acquérir des aptitudes concernant des techniques et des outils de mesure, est présente en annexe (Annexe 1).

II- Présentation de la structure d'accueil

Placé sous la cotutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les Collectivités Territoriales, le Cerema est un établissement public de ressources d'expertises scientifiques et techniques intervenant en appui à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques portées par les services de l'État et les collectivités territoriales, pour le compte essentiellement des DREAL, des DDT, des collectivités, et parfois de partenaires privés. Il intervient dans les grands domaines techniques des deux ministères (aménagement, habitat, politique de la ville, transport, mobilité, sécurité routière, environnement, ville durable, bâtiments, risques, infrastructures publiques) et propose une très large palette d'interventions : recherche appliquée, innovation, expérimentation, veille technologique, méthodologie, expertise, ingénierie avancée. Sa spécificité repose sur un ancrage territorial fort et sur sa capacité à faire le lien entre les administrations centrales, les services déconcentrés de l'État et les collectivités territoriales. Cet établissement public regroupe près de 2 800 agents répartis sur le territoire national et se compose de :

- 3 directions techniques chargées de piloter et coordonner l'activité du Cerema dans leur domaine d'expertise respective notamment par l'élaboration et la mise en œuvre de programmes pour l'État et les collectivités contribuant ainsi à la stratégie de l'établissement ;
- 8 directions territoriales ayant une connaissance historique des problématiques et contextes locaux où elles assurent un rôle d'expertise et d'accompagnement des acteurs du territoire pour la réalisation de leurs projets dans les champs thématiques à enjeux sur ces mêmes territoires.

La Direction Territoriale Normandie-Centre se compose de deux sites, un site principal à Rouen et une antenne à Blois où a été effectué le stage. Le Laboratoire Régional de Blois travaille depuis de nombreuses années sur la thématique des risques naturels et des ouvrages ayant une interaction forte avec le milieu aquatique, fluvial notamment (digues, appuis d'ouvrages d'art en rivière). Le Laboratoire de Blois s'est doté d'outils et d'équipes spécialisées (bathymétrie, équipe et matériels de sondages intervenant en milieu aquatique) et d'un savoir-faire important. Les équipes interviennent pour des missions opérationnelles d'études et d'expertises ainsi que des missions de recherche et de développement. Un Pôle de compétence et d'innovation "Connaissance des ouvrages hydrauliques et de la morpho-dynamique fluviale", a été mis en place en 2010 et l'unité "Risques hydrauliques – Surveillance des ouvrages et des milieux" (RH_SOM), qui m'a accueillie pour ce stage, est au cœur de ce pôle.

L'unité Risque Hydraulique – Surveillance des Ouvrages et des Milieux, intervient dans des domaines tels que l'hydrologie, la modélisation hydraulique, la cartographie de zones inondables, la prévision de crues, la surveillance des ouvrages et des milieux. L'équipe de Surveillance des Ouvrages et des Milieux procède à des mesures hydrographiques et procure une expertise en hydromorphologie fluviale, c'est-à-dire l'étude des processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau et des formes fluviales qui en résultent, afin de comprendre l'évolution morphologique des cours d'eau, connaissances nécessaires dans l'aménagement et la gestion des milieux fluviaux et des ouvrages. L'équipe possède une chaîne d'acquisition et les compétences techniques dédiées à la réalisation de mesures de bathymétrie (sondeurs monofaisceau et multifaisceaux), d'imagerie acoustique (sonar à balayage latéral), de courantométrie (micro-moulinet, *aDcp*) et de topographie (Système GNSS, station totale robotisée). Les partenaires sont les collectivités territoriales (Conseils Départementaux, Communautés Urbaines), les sociétés privées (autoroutes, bureau d'études), les services d'État (DREAL, DDT, IFSTTAR, DRAC, VNF) ainsi que des structures académiques (Université de Tours et de Paris).

III- BONNY-SUR-LOIRE

1. Introduction

En amont du pont de Bonny-sur-Loire, la berge en rive droite de la Loire subit une érosion de 5 à 6 m par an. Cette érosion menace à court et moyen terme un captage d'eau potable et la culée d'un pont. Il convient de comprendre les processus en jeu dans l'érosion de cette berge afin de trouver une solution conciliant protection des enjeux et préservation de la dynamique fluviale, notamment la divagation latérale.

L'érosion latérale peut être causée par différents mécanismes, qui impliquent d'une part l'érosion des sédiments par les contraintes hydrauliques, et d'autre part des mécanismes liés au poids de la berge, à sa géométrie (angle de repos), et au degré de cohésion des sédiments qui la composent (Jourdain, 2017).

Il existe ainsi deux principaux types d'érosion de berge (Klösch *et al.*, 2015 ; Jourdain, 2017). La première est l'érosion fluviale qui a lieu le long du pied de berge pendant les bas débits, menant à des écroulements de masse et le transport en aval du matériel tombé. Les écroulements de masse de ce type sont déclenchés par sapement de la berge au niveau de l'élévation de la ligne d'eau. L'effet de sape peut être accentué par des écoulements chargés en sédiments qui peuvent avoir un rôle d'abrasion. Le second type d'érosion est constitué par l'écoulement de masse sans érosion fluviale le long de la ligne d'eau, pendant les hauts débits, généralement limitée au haut de berge, où l'on retrouve généralement des sédiments sableux (Klösch *et al.*, 2015). L'érosion fluviale est continue, en revanche, les écroulements de masse impliquent des mécanismes discontinus (Abderrezak *et al.*, 2014). Les écroulements de masse peuvent s'effectuer par des mécanismes variés, qui peuvent être planaires, rotatifs ou en porte-à-faux (*cantilever*) (Fig. 1).

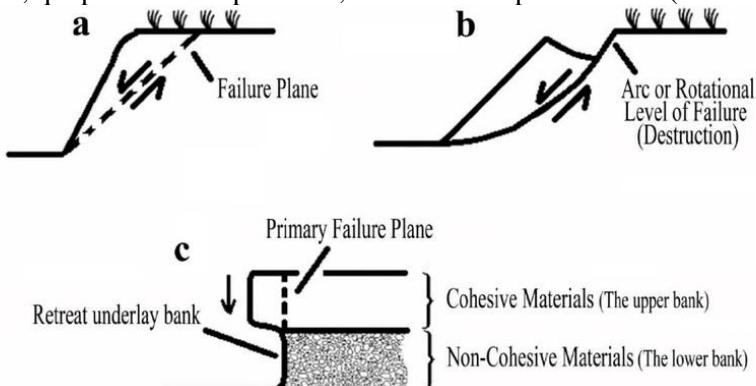


Figure 1: Mécanismes des écroulements de masse: (a) planaire, (b) rotatif, (c) cantilever (Source : Moghaddas *et al.* (2012))

L'occurrence d'un des mécanismes dépend de plusieurs facteurs, mais les plus importants sont la configuration des matériaux de la berge (un seul type de matériaux ou plusieurs couches), les caractéristiques du sol (cohésif ou non), la forme de la berge et la pression de la nappe phréatique (Abderrezak *et al.*, 2014). Le degré de cohésion des berges s'évalue selon la proportion de sédiments cohésifs (tels que les argiles) et leur position. En effet, si la partie supérieure de la berge est cohésive mais le pied de berge non cohésif, les processus d'érosion peuvent être actifs. L'état cohésif, comprenant des particules de taille inférieure à 100 µm, est différencié de l'état granulaire. De manière générale, les berges cohésives sont moins sujettes à l'érosion. L'érodabilité est considérée forte si des sédiments sableux à caillouteux (donc non cohésifs) dominent sur au moins le quart inférieur de la berge (Malavoi et Bravard, 2011). De plus, plus la hauteur et la pente de la berge sont élevées, plus celle-ci peut être soumise à un fort effet gravitaire et ainsi être facilement érodable. La stabilité de la berge varie également avec l'exposition à de nombreuses influences hydrologiques qui affectent les contraintes de cisaillement (le stade fluvial, la pluviométrie et la distribution de l'eau interstitielle et du poids des sédiments qui en résulte, la pression hydrostatique exercée par la colonne d'eau sur la surface de la berge) (Klösch *et al.*, 2015). Ainsi, les conductivités hydrauliques non saturées sont plus faibles lorsque la conductivité hydraulique diminue avec une plus grande quantité d'eau et une succion matricielle qui augmente. Ces faibles conductivités hydrauliques retardent le drainage de la berge après le pic de débit. Comme les conductivités hydrauliques saturées sont plus faibles que les vitesses d'abaissement de la rivière, la nappe peut être élevée au-dessus du niveau de la rivière, ce qui résulte en une plus forte pression interstitielle le long du plan de défaillance potentielle sous la nappe phréatique et en une réduction de la succion matricielle, et ainsi de la cohésion, alors que la pression hydrostatique exercée par la rivière sur la berge diminue voire disparaît. Ces conditions font que l'écoulement de berge est plus à même d'intervenir après un pic de débit (Klösch *et al.*, 2015).

La végétation influence également l'érosion latérale, influence d'autant plus importante que les berges sont peu cohésives (Piégay *et al.*, 2003). D'après Malavoi et Bravard (2011), les berges non végétalisées ont un taux d'érosion cinq fois supérieur aux berges végétalisées, et il serait 30 fois plus fréquent qu'une forte érosion ait lieu sur ces berges non végétalisées. Les racines de la végétation augmentent la cohésion des sédiments, ce qui retarde la défaillance de masse. Néanmoins, le poids et la hauteur de la végétation peuvent également favoriser cette défaillance de masse par un phénomène de surcharge (Jourdain, 2017). De plus, dans les zones déboisées, les racines restantes peuvent renforcer le sol en augmentant sa cohésion apparente et la résistance au cisaillement. Mais, dans une moindre mesure, elles

peuvent créer des passages pour l'eau dans la berge, augmentant la pression pores-eau, et ainsi augmentant le risque d'écoulement de masse (Abderrezak *et al.*, 2014). L'effet global de la végétation sur l'érosion latérale dépend ainsi du type de végétation présente (nature, âge) ainsi que de la hauteur de la berge (Jourdain, 2017). En effet, si la taille du système racinaire est inférieure à la hauteur des berges, ces dernières seront davantage susceptibles de s'éroder. Les végétaux les plus efficaces pour la protection contre l'érosion changent ainsi selon les caractéristiques de la berge et sa granulométrie. Par exemple, une végétation arborée permettra à de hautes berges de se stabiliser, tandis qu'une végétation herbacée sera plus adaptée dans le cas de berges basses (Piégay *et al.*, 2003).

En plus de l'hydrologie et des propriétés intrinsèques de la berge l'érosion peut survenir préférentiellement selon certaines configurations morphologiques. En effet, dans les rivières méandriformes, généralement caractérisées par une faible pente, l'érosion survient au niveau de la berge concave (extrados), où la vitesse d'écoulement est plus forte, tandis qu'un dépôt s'effectue le long de la berge convexe (intrados), ce qui permet au fil du temps la migration du méandre. La migration des méandres est la combinaison d'une translation vers l'aval, d'une extension latérale, d'une expansion, et d'une rotation. Les méandres peu sinuieux migrent rapidement vers l'aval. Lorsque la sinuosité augmente, la translation vers l'aval diminue, et les boucles de méandres s'étendent latéralement avec la tête tournant vers l'aval puis vers l'amont (Chen et Duan, 2006). Ces processus d'érosion et de dépôt surviennent à la suite d'écoulements caractéristiques survenant dans ces inflexions, composés à la fois d'écoulements longitudinaux et transversaux. Les méandres sont ainsi formés par un processus continu d'érosion, de transport et de dépôt. Lorsqu'une rivière contourne un coude, la majeure partie des écoulements est dirigée vers l'extérieur. Cela entraîne une vitesse accrue due à une moindre friction et à la force centrifuge, et donc à une érosion accrue (grâce à l'action hydraulique et à l'abrasion). Cette morphologie méandriforme est associée également au développement d'une barre de méandre au niveau de l'intrados. L'évolution des cours d'eau méandriformes peut être très variée, avec des processus tels que les raccourcissements ou les rescindements (Fig. 2) modifiant largement la morphologie du cours d'eau.

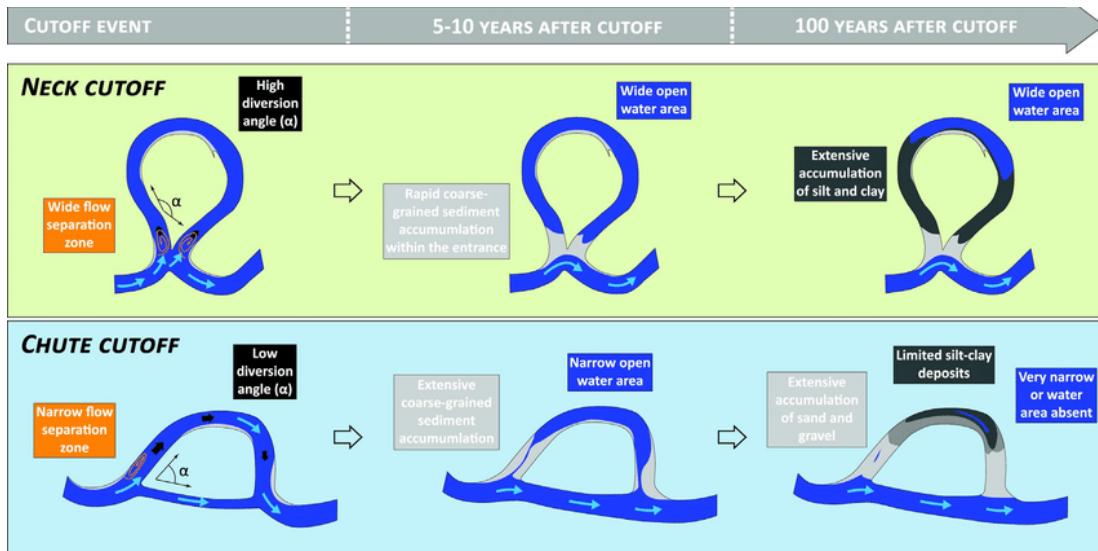


Figure 2: Processus de raccourcissement (chute cutoff) et de rescindement (net cutoff) (Source: Dépret, 2017)

D'autre part, les formes du lit pouvant dévier les écoulements peuvent favoriser l'érosion de berge, notamment les barres sédimentaires. On peut distinguer un grand nombre de types de barres, mais elles peuvent être divisées en 2 groupes : libres (migrent dans le chenal, ex : barres alternées) et forcées (positionnées selon les formes en plan, peuvent être associées à l'élargissement du chenal, ex : barres de milieu de chenal, barres de méandre). Les barres de milieu de chenal s'observent dans les rivières rectilignes et méandriformes. Dans les rivières méandriformes, elles peuvent promouvoir le développement de boucles de méandres après attachement de la barre à une des berges. Dans les cours d'eau en tresses, les barres de milieu de chenal initient la bifurcation du chenal en déviant l'écoulement. Elles montrent un développement assez rapide et il a été montré qu'elles sont associées à une érosion et un élargissement excessif de chenal (Klösch *et al.*, 2015). En effet, il a notamment été montré que des événements morpho-dynamiques à courte échelle de temps tels que l'accrétion des barres de milieu de chenal ont un rôle sur l'élargissement du chenal

(Klösch *et al.*, 2015). Les résultats de Klösch *et al.* (2015) montrent que la majeure partie de l'accrétion a eu lieu le long des deux côtés de la barre, mais pas dans la direction d'écoulement. La barre s'est agrandie vers la berge, accompagnée par un retrait de la berge à la même position longitudinale. L'érosion de la berge ayant lieu sur une plus grande section que l'accrétion correspondante. L'accrétion de la barre réduit le bras et déplace le thalweg vers la berge, la réduction de la section d'écoulement a augmenté les vitesses et la contrainte de cisaillement du lit, ce qui peut indiquer des conditions hydrauliques causant l'érosion fluviale.

De plus, Abderrezak *et al.* (2014), ont trouvé que la stratégie optimale pour créer la plus forte érosion de berge est sous forme d'îles formant des épis naturels déviant les écoulements vers la berge. Lors des plus faibles débits, les écoulements sont déviés vers la berge ce qui forme une contrainte de cisaillement limite en pied de berge causant de l'érosion. En revanche, lors des plus forts débits, l'érosion est majoritairement fluviale avec des écoulements parallèles à la berge. Ces deux processus ont augmenté l'angle de la berge jusqu'à ce que les écroulements de masse soient possibles. L'ONEMA attribue un angle optimal de stabilité des berges de 30 %, néanmoins celui-ci change en fonction de la nature des sédiments les constituant.

2. Site d'étude

2.1. Localisation et enjeux

Le site d'étude se situe en région Centre-Val-de-Loire, dans le département du Loiret, et plus précisément sur la commune de Bonny-sur-Loire (Fig. 3).

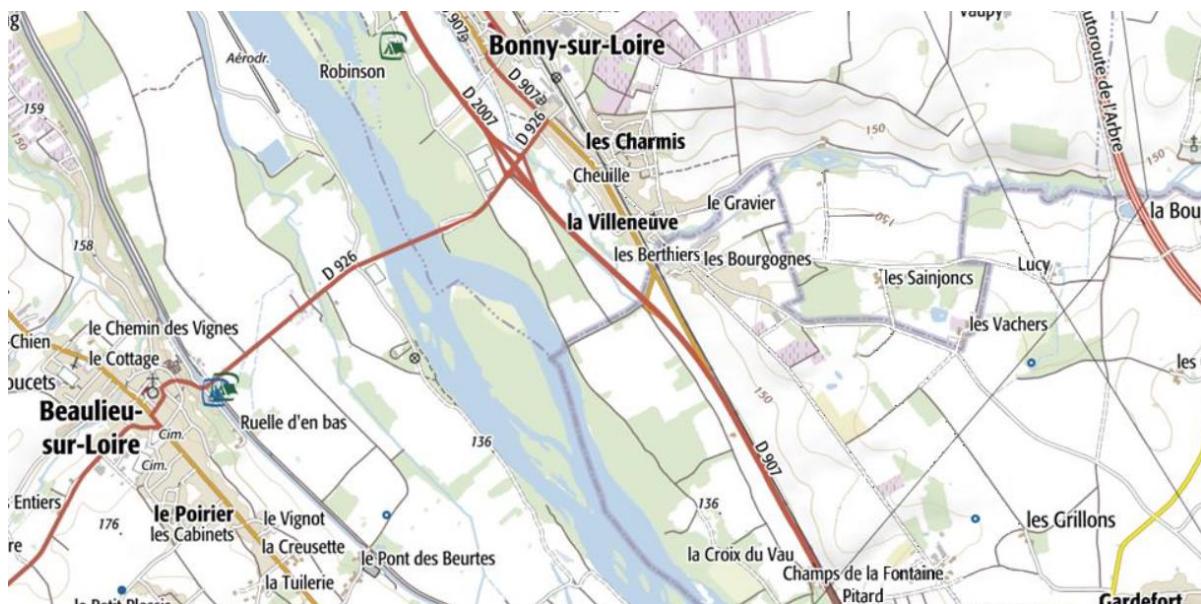


Figure 3: Localisation de Bonny-sur-Loire (Source: IGN)

La route départementale 926 franchit la Loire par le pont de Bonny-sur-Loire pour rejoindre Beaulieu-sur-Loire. La problématique d'érosion de berge est présente en amont de cet ouvrage, en rive droite de la Loire.

Plusieurs enjeux sont présents au sein du lit majeur de la Loire dans le secteur de Bonny-sur-Loire. Ces derniers sont représentés en Annexe (2) ; détails (Fig. 15). Les enjeux les plus susceptibles d'être affectés par l'érosion de la berge en rive droite en amont du pont sont le captage d'eau potable alimentant le syndicat de Bonny-Ousson et le pont de la RD 926, plus précisément sa culée en rive droite. Il s'agit d'un pont suspendu comprenant trois travées de 120 m de portée, et supportant une chaussée de 6 m de largeur. Il a initialement été construit de 1883 à 1902 puis reconstruit de 1947 à 1950, après sa destruction en 1940.

2.2. Morphologie du secteur

Le secteur de Bonny-sur-Loire présente au niveau fluvial deux zones différenciables d'un point de vue morphologique, séparées par le pont de la RD926. En effet, en amont du pont, la Loire présente un style fluvial à chenaux multiples, composé par plusieurs îles dont la plus grande est l'île Bon, d'une longueur d'environ 1400 m et d'une largeur d'environ 310 m. Le chenal principal se situe en rive droite, plusieurs chenaux secondaires sont présents en rive gauche. En aval du pont, en revanche, se trouve un chenal unique. Dans le secteur, la végétation rivulaire est présente en amont, remplacée par des parcelles agricoles le long de la rive gauche et en rive droite juste en amont du pont. À ce niveau, la berge est de forme concave.

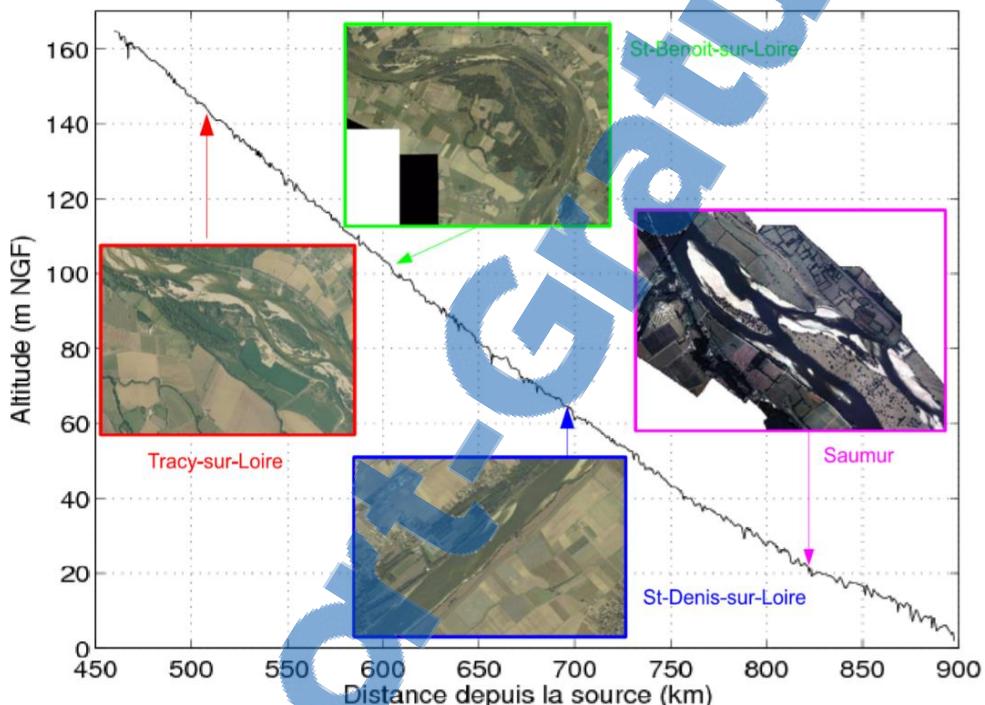
2.3. Bassin-versant et contexte géologique du secteur

2.3.1. Caractéristiques du bassin versant de la Loire

La Loire est un fleuve de 1 012 km, drainant un bassin versant d'une superficie de 117 800 km². Elle prend sa source au Mont Gerbier-de-Jonc en Ardèche et finit sa course dans l'Océan Atlantique à St-Nazaire. Trois secteurs distincts peuvent être définis sur l'entièreté de son parcours : la Loire supérieure dans la partie amont, la Loire moyenne, du Bec d'Allier au Bec de Maine, et enfin la Basse Loire en aval de ce secteur (Latapie, 2011). On peut également décomposer le bassin-versant de la Loire en cinq sous-bassins, représentés par les cinq principaux affluents qui sont : la Maine, l'Allier, le Cher, l'Indre et la Vienne.

2.3.2. Caractéristiques de la Loire moyenne

Bonny-sur-Loire se situe dans le secteur de la Loire moyenne. Ce dernier comprend une grande diversité de styles fluviaux, présentant parfois un lit unique, des méandres ou des chenaux multiples. Audrey Latapie (2011) propose ainsi de définir son style par « mixte tressage-anastomose ». En effet, les caractéristiques de l'anastomose se retrouvent par des îles séparant des chenaux multiples stables depuis des siècles. Tandis que certains secteurs présentent des bancs peu végétalisés et instables plus représentatifs de cours d'eau en tresses. Le profil en long de la Loire moyenne est présenté ci-dessous (Fig. 4).



Le profil en long montre une alternance de faibles pentes et de fortes pentes, qui caractérisent la présence de seuils rocheux naturels. Ces seuils provoquent des ruptures de pente de la ligne d'eau d'étiage, une accélération du courant et une déviation de l'écoulement (Latapie, 2011).

2.3.3. Caractéristiques spécifiques du secteur

Le bassin versant de la Loire à Bonny-sur-Loire possède une superficie de 35 100 km². La Loire s'écoule du Sud-Est vers le Nord-Ouest. La géologie du secteur se visualise sur la carte géologique à 1/50 000 de Gien (Gigout, 1977) du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) (Fig. 5).

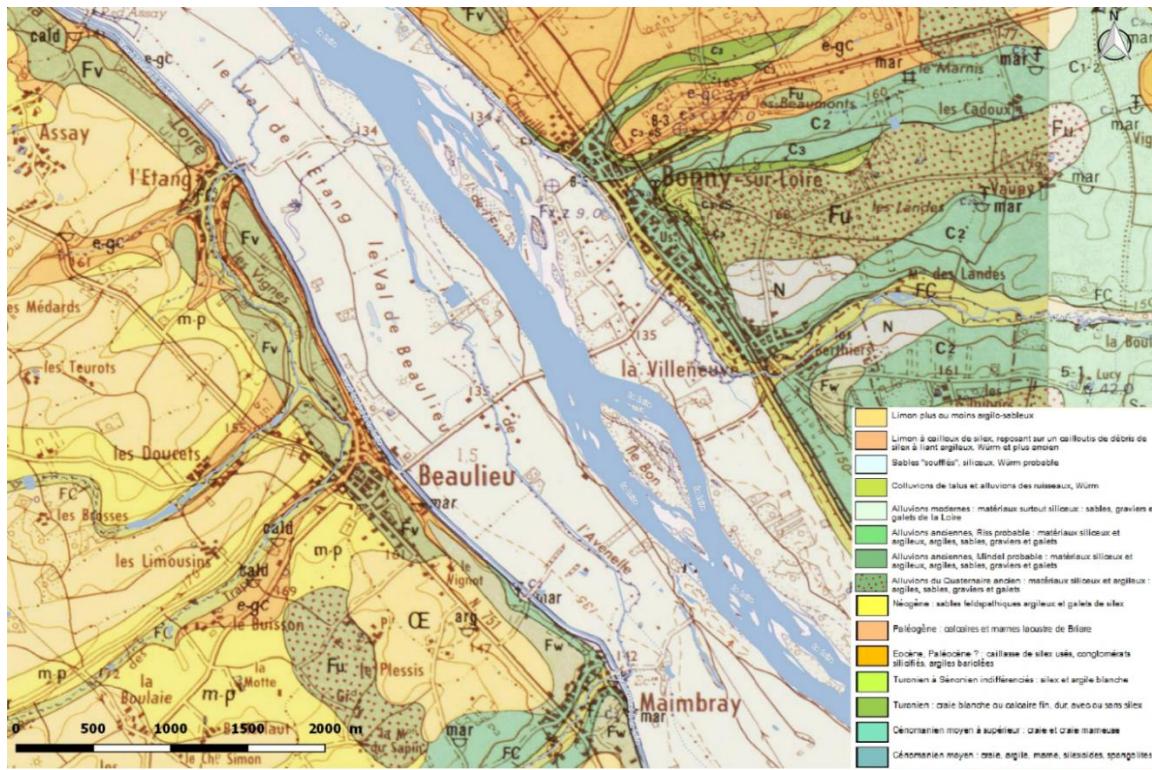


Figure 5: Carte géologique du BRGM (Source: Gigout, 1977)

Sur cette carte, il est possible d'aisément reconnaître le lit majeur de la Loire, caractérisé sur la carte par les « alluvions modernes : matériaux surtout siliceux : sables, graviers et galets de la Loire » (Fz). La largeur du lit majeur dans ce secteur est comprise entre 1500 et 2 200 m.

Afin de connaître plus en détail la composition lithologique dans le secteur, des logs numérisés de sondages sont référencés dans la banque du sous-sol (BSS) du BRGM (Annexe 3). Trois sondages sur la rive droite en amont du pont sont notamment disponibles (voir localisation Fig. 6), dont un constituant l'actuel captage en eau potable (BSS001DZEP). De plus, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Blois a réalisé en 1969 un sondage dans ce secteur (ST126, localisé sur la Figure (6) également. La coupe géologique résultante est présentée en Annexe (4).

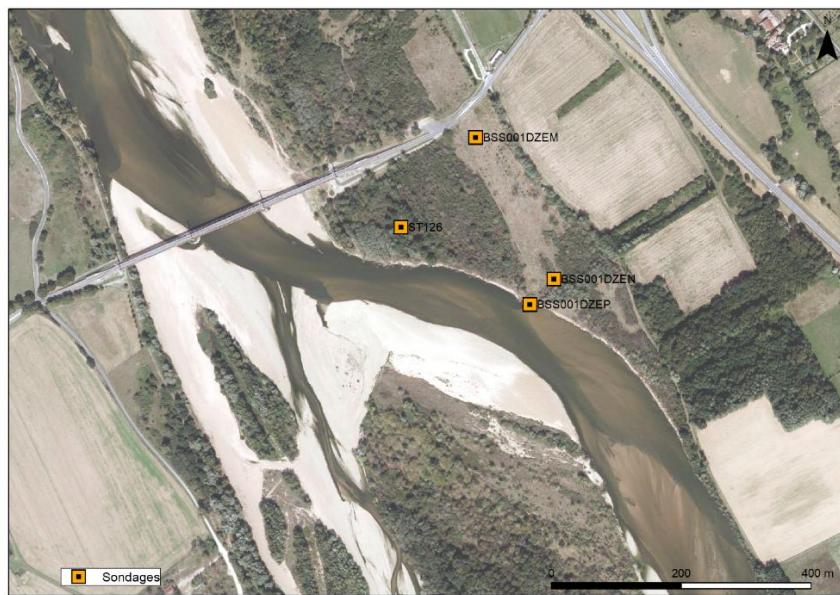


Figure 6: Localisation des sondages (Source: production personnelle)

Ces coupes géologiques permettent de remarquer que la limite entre les alluvions de Loire datant de l'Holocène et la formation crayeuse du Turonien se situe entre 6 et 8 m de profondeur, ce qui correspond à

une altitude de 127 à 128 m NGF. La couche supérieure constituée des alluvions de Loire est composée plus en surface par une couche limono-sableuse voire de sable fin, puis en augmentant en profondeur par des sables plus grossiers ainsi qu'une certaine proportion de graviers (substrat sablo-graveleux). Le sondage réalisé au niveau du captage montre à partir d'un peu plus de 3 m de profondeur (130,98 m NGF) la présence de particules grossières notamment des graviers grossiers et des galets.

La composition du sol au niveau du pont de Bonny-sur-Loire a également été représentée sur le profil en long de l'ouvrage (Annexe 5).

2.4. Contexte hydrologique

La Loire possède un régime hydrologique caractérisé par une variabilité intermensuelle et interannuelle, avec une alternance d'étiages prononcés et de fortes crues (Latapie, 2011). Les étiages surviennent durant la période estivale, les hautes eaux durant la période hivernale. Le bassin-versant de la Loire est majoritairement sujet à trois types de crue : les crues cévenoles d'origine méditerranéenne, rapides et intenses ; les crues océaniques apportant un grand volume d'eau et atteignant graduellement des débits importants ; les crues mixtes qui se produisent en réponse aux deux événements climatiques précédents. Les crues surviennent d'octobre à juin avec des crues d'hiver et des crues de printemps.

L'hydrogramme de la Loire à la station de Gien, proche de Bonny-sur-Loire, est représenté (Fig. 7).

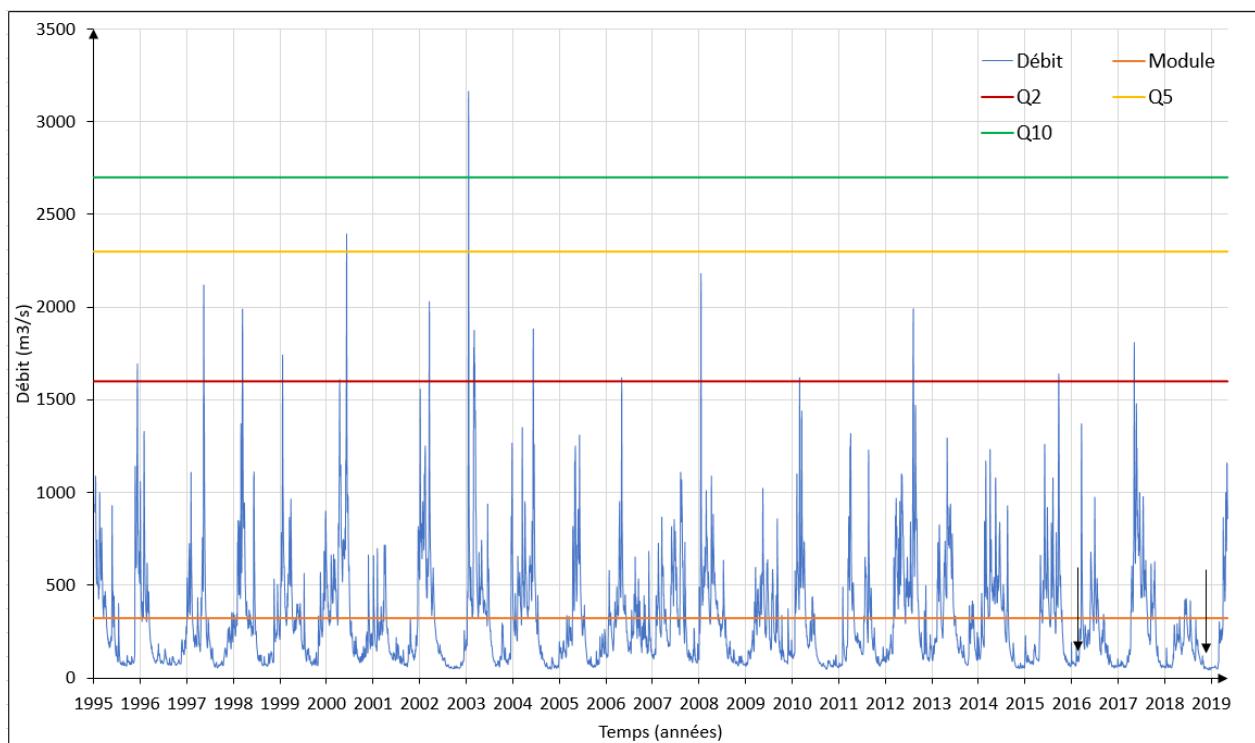


Figure 7: Hydrogramme de la Loire à la station de Gien entre 1996 et 2019 (Source: production personnelle)

Les débits caractéristiques à cette station sont :

- Module 323 m³/s ;
- Crue biennale 1600 m³/s ;
- Crue quinquennale 2300 m³/s ;
- Crue décennale 2700 m³/s.

Le débit de crue biennale est dépassé 16 années sur les 24 années de mesure. Le débit de crue quinquennale, quant à lui, a seulement été dépassé 2 fois, en mai 2001 et en 2003, où le débit de crue de retour 10 ans a également été dépassé (décembre 2003) avec une valeur maximale de 3 160 m³/s.

Concernant l'hydrologie lors des années des levés des profils topo-bathymétriques (2016 et 2019), l'année 2019 a connu des débits moindres par rapport à l'année 2016, avec des débits inférieurs au module sur la majeure partie de l'année, et ne dépassant pas le débit de crue de retour 2 ans (Fig. 8). Les différentes mesures hydrographiques effectuées par le Cerema en 2019 ont été réalisées du 21 au 24 mai, dates

auxquelles le débit était en moyenne de 132 m³/s (entre 125 m³/s et 139 m³/s). Les mesures hydrographiques de 2016, quant à elles, ont été réalisées le 26 et 27 octobre, dates auxquelles le débit était en moyenne de 101 m³/s (94,3 m³/s et 107 m³/s).

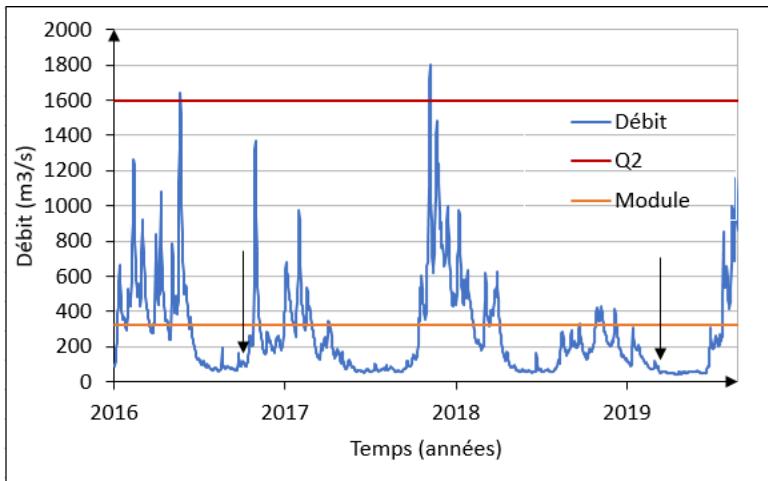


Figure 8: Hydrogramme de la Loire à la station de Giens de 2016 à 2019 (Source: production personnelle)

On remarque que la période de l'hiver 2018 à fin 2019 présente des débits faibles par rapport aux autres années. Sur la période, le Q₂ est dépassé en 2016 et fin 2017, mais les pics ne dépassent pas environ 1 800 m³/s. Les deux périodes de mesures, de 2016 et de 2019, sont assez comparables en matière de débit. Néanmoins, les mesures ont été réalisées à la suite d'une histoire hydrologique différente. En 2016, elles ont été réalisées suite à une période d'étiage précédée d'une crue. En 2019, elles interviennent en début de période d'étiage, précédées par de faibles débits pour la période hydrologique (module), la dernière crue étant survenue plus d'un an auparavant.

2.5. Indices

Les travaux de thèse réalisés d'Audrey Latapie ont permis d'attribuer certaines caractéristiques aux tronçons de la Loire moyenne. A une échelle assez large, ses travaux indiquent une tendance potentielle à la sédimentation du Bec d'Allier à Bonny-sur-Loire. De plus, dans ce secteur à chenaux multiples, la largeur de la bande active s'est réduite depuis 1955 dû à la végétalisation des chenaux secondaires. Finalement, les tronçons présentant de l'incision sont majoritairement situés à l'aval d'ouvrages, comme le pont de Bonny-sur-Loire qui engendre un volume érodé de 700 000 m³ sur le tronçon aval. Pour le secteur de Bonny-sur-Loire, le D₅₀ est estimé à 3,1mm. Le tronçon amont du pont long de 3,2 km présente une bande active de 300 m de large, une pente de 0,571 m/km et une sinuosité de 1,03. Le tronçon aval du pont, d'une longueur d'environ 2 km, possède une bande active de 226 m, une pente de 0,559 m/km et une sinuosité de 1,00.

3. Matériels et méthodes

3.1. Mesures hydrographiques et topographiques

Les mesures 2019, effectuées par le Cerema, ont eu lieu du 21 au 24 mai dans le lit mineur de la Loire. Elles comprennent des mesures bathymétriques, courantologiques, d'imagerie acoustique et topographiques.

Les mesures hydrographiques sont réalisées à partir d'une embarcation de type pneumatique (SILLINGER UM 380) capable d'accueillir l'ensemble de la chaîne d'acquisition nécessaire à la réalisation des mesures, notamment un système de positionnement GNSS RTK.

Une série de 13 profils en travers (Fig. 9) a été réalisée avec un sondeur monofaisceau afin d'obtenir des coupes de la topographie du fond de la rivière à ces différents endroits. Il s'agit d'un sondeur monofaisceau ODOM MK3 permettant de sonder les fonds en milieu aquatique en émettant des signaux acoustiques à la verticale du bateau. Il possède 2 fréquences d'émission de 33 kHz et 200 kHz lui permettant d'acquérir de la mesure dans des milieux plus ou moins turbides et à des profondeurs plus ou moins importantes. Les profils en travers n°1, n°3, n°5, n°7, n°12 et n°13 ont été réalisés au même emplacement que des mesures réalisées en 2016 par la DREAL, ce qui permettra leur comparaison.

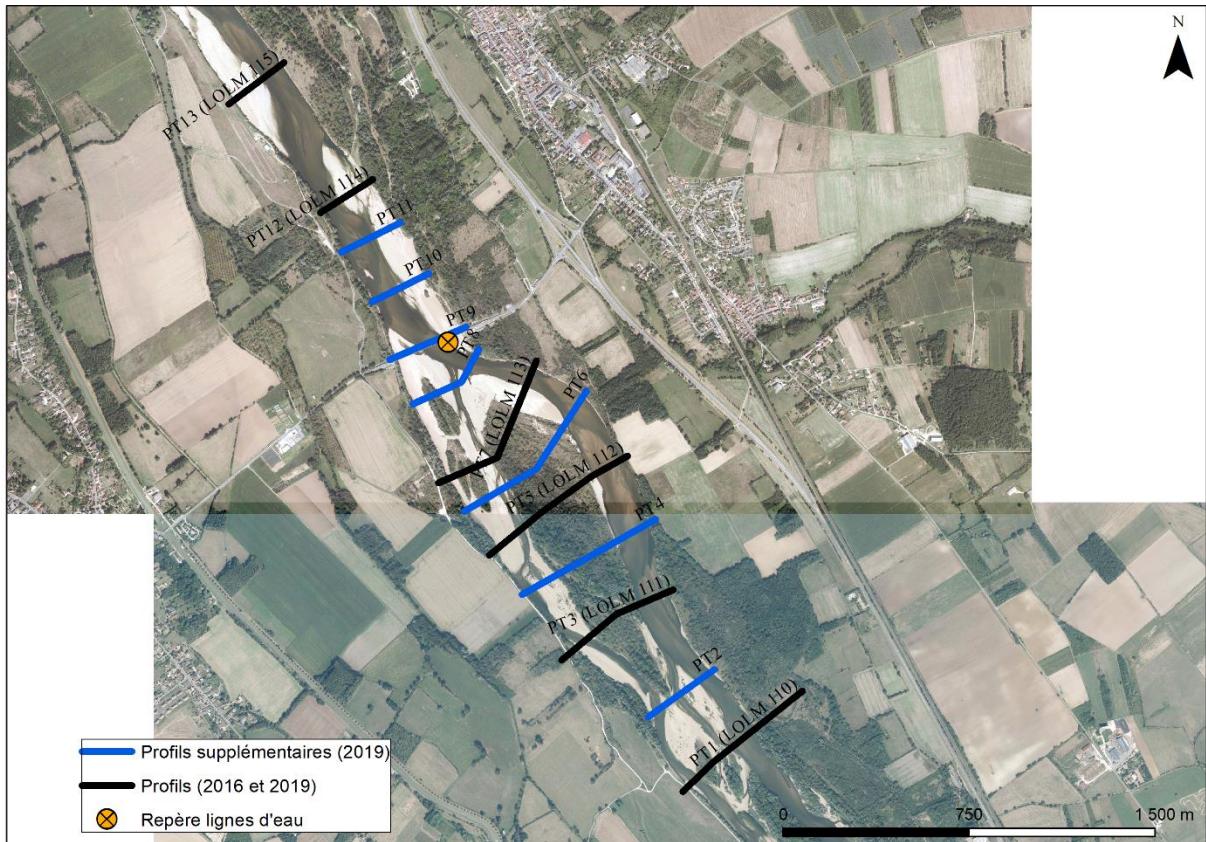


Figure 9: Localisation des profils en travers et du repère de ligne d'eau (Source: production personnelle)

Un levé bathymétrique surfacique a été effectué le long de la berge en rive droite afin de caractériser le pied de berge en érosion sur un linéaire d'environ 700 m et une largeur d'environ 30 m, et sous le pont de Bonny-sur-Loire sur toute la largeur du lit mineur. Il a été réalisé avec un sondeur multifaisceaux (SMF) ODOMES3 de fréquence 240 kHz. Associé à la centrale inertielle et aux doubles antennes GNSS, le principe de fonctionnement rejoint celui du sondeur SMF R2Sonic 2020 présenté dans l'Annexe (1) de ce rapport.

Les vitesses d'écoulement de la Loire ont été mesurées au niveau des profils en travers n°6 et n°7, ainsi que directement à l'amont du pont de Bonny-sur-Loire. Pour cela, un courantomètre à effet Doppler (*aDcp*) a été utilisé, plus précisément l'*aDcp* (Acoustic Doppler Current Profiler) Teledyne RiverRay. Il mesure les vitesses et les directions du courant. La méthodologie consiste à effectuer avec l'*aDcp* plusieurs allers-retours en travers de la rivière. Il mesure alors différentes vitesses dans la section levée. Il connaît sa vitesse par rapport au fond de la rivière, la vitesse des particules dans l'eau par rapport à lui-même et il calcule alors la vitesse des écoulements par rapport au fond. Le détail du fonctionnement de l'*aDcp* a été décrit en Annexe (1) de ce rapport.

Une imagerie acoustique a également été réalisée le long de la berge érodée, à l'aide d'un sonar latéral (SONAL). Il s'agit plus précisément du sonar à balayage latéral C-max2. Ce sonar latéral réalise, à l'aide d'ondes sonores émises à haute fréquence (de 325 à 780 kHz), des images acoustiques détaillées de la réflectivité des fonds immergés (exploitation de l'amplitude du signal reçu). Ces images sont obtenues en balayant un faisceau sonore étroit, en incidence rasante sur le fond. L'écho recueilli au cours du temps est une représentation de la réflectivité du fond et surtout de la présence d'irrégularités ou de petits obstacles (nature du fond, anomalie au droit d'ouvrages hydrauliques, etc.). Ce signal enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar constitue, ligne après ligne, une image acoustique du fond.

Finalement, la topographie des berges et des barres sédimentaires a été réalisée avec un récepteur GNSS, ou avec une station totale robotisée quand la réception GNSS était masquée soit par l'ouvrage, soit par la végétation. Le système de positionnement GNSS couplé à un récepteur GNSS Trimble R6 est un système de navigation global par satellite (GPS + GLONASS) RTK (en temps réel) corrigé par le réseau d'augmentation de précision Orphéon. Le système de positionnement optique, quant à lui, présente une station totale Trimble S6 et permet d'effectuer des mesures sous un ouvrage quand les satellites sont masqués et que le positionnement GNSS est impossible. Il est à noter que la densité de la végétation peut contrarier la mesure.

Le système géodésique utilisé au cours de cette étude est le RGF93 et sa projection le LAMBERT 93. Le système d'altitude utilisé est le réseau NGF IGN 1969.

3.2.Évolution de la forme en plan

La description morphologique de la forme en plan est basée sur deux documents existants : *Note de problématique relative à l'érosion en rive droite* (juin 2018), Arnaud BONTEMPS, Nicolas AUGER (CEREMA) ; *Evolution de la Loire au droit de Bonny-sur-Loire*, Stéphane BRAUD (DREAL Centre-Val de Loire).

Tout d'abord, une approche assez large sur un tronçon de 4 km est effectuée, à partir de 1850 et jusqu'à 2019. Cette analyse diachronique s'appuie sur 2 campagnes aériennes du SIEL (2015, 1995), sur les cartes historiques de 1850, ainsi que sur une orthophotographie de l'IGN de 1949. Les tracés des berges visibles en couleur sur ces différentes cartes ont été réalisés par la DREAL.

Par la suite, une approche à échelle plus petite, ciblée sur la zone affectée par l'érosion, est effectuée et prend en compte les données des tracés de berge s'appuyant sur les campagnes aériennes du SIEL de 1995 (orthophotographie de taille de cellule 0,5 m X 0,5 m), 2005 (1 m X 1 m) et 2015 (0,5 m X 0,5 m), ainsi que sur les données topographiques collectées par le Cerema en 2018 et en 2019. Ainsi, pour ces deux années, le tracé des berges ne s'est pas effectué de façon visuelle mais grâce à ces mesures topographiques, en prenant en compte pour le tracé les points correspondant au haut de berge. La précision est ainsi accrue pour ces deux années. En effet, le réseau RTK Orphéon a été utilisé pour augmenter la précision des mesures effectuées par le Cerema. Orphéon indique une précision de positionnement centimétrique pour un écart type de 1σ : Comprise entre 1 et 2 centimètres en planimétrie ; Comprise entre 2 et 3 cm en altimétrie. Les conditions de levé influent beaucoup sur la précision (atmosphère, multitrajet, matériel, opérateur, etc.) mais la précision reste inférieure à 5 cm.

Afin de réaliser la cartographie, j'ai utilisé l'application de SIG ArcMap 10.6.1.. Des mesures de distance sont effectuées parallèlement au sens général d'écoulement de la Loire sur ce tronçon. La distance d'érosion dans cette direction, c'est-à-dire vers l'aval et vers la culée du pont, a été calculée entre 1995 et 2005, 2005 et 2015 et de 2015 à mai 2019 (date des relevés). Cela a permis d'établir des taux d'érosion en mètres par an pour chacune de ces trois périodes.

De plus, une cartographie de l'évolution de la berge en érosion et de la barre sédimentaire au niveau de l'île Bon a été effectuée à partir des orthophotographies du SIEL de 1998 (taille de cellule : 0,014 m X 0,014 m), 2002 (1 m X 1 m), 2005 (1 m X 1 m) et 2015 (0,5 m X 0,5 m). La cartographie s'est effectuée sous ArcMap 10.6.1. Le tracé de la berge ainsi que du contour de l'île a été effectué visuellement pour chaque année à partir de ces orthophotographies. Il convient néanmoins de tenir compte de la résolution relativement faible et variable de ces photographies qui peut influencer les résultats des tracés. De même, le niveau d'eau présent le jour de la prise de chaque photographie peut mener à des inexactitudes quant aux résultats des cartographies. Finalement, la présence de végétation en berge peut également impacter la visualisation exacte de l'emplacement des berges. À partir de ces tracés, il a été possible de comparer 1998 à 2002, 2002 à 2005 et 2005 à 2015. Grâce au logiciel, il a ensuite été possible de connaître la superficie de chaque surface représentant la différence entre deux dates.

Finalement, une seconde cartographie a été jugée nécessaire afin d'avoir moins de biais possibles dans les résultats et une plus large gamme d'années. Les données de la DREAL permettent de connaître le tracé des berges et des îles depuis 1850, les tracés correspondant uniquement à la partie boisée de l'île. Il n'est donc pas possible de continuer la cartographie effectuée précédemment, mais une nouvelle est réalisée concernant cette fois-ci l'évolution de la berge en érosion et de l'île Bon boisée. Les pertes et gains ont ainsi été représentés sous ArcMap 10.6.1. pour les années 1850-1947, 1947-1949, 1949-1969, 1969-1995 et 1995-2015. De la même façon, les données surfaciques ont pu être représentées sur un graphique après avoir été inscrites dans un tableur.

3.3.Évolution de la forme en coupe

Comme précisé précédemment, les profils topo-bathymétriques de 2016 proviennent du SIEL de la DREAL Centre-Val-de-Loire, les profils de 2019 ont été effectués par le Cerema (cf. localisation Fig. 9).

Une première approche présentant des résultats bruts est effectuée, notamment la localisation des zones d'érosion et de dépôts et les variations d'altitudes associées. Chaque profil en travers a été décrit précisément (non présenté), puis une approche unité morphologique par unité morphologique a été effectuée. Les profils en travers de 2019 ne couvrent pas la partie boisée des îles, la description de ces dernières s'effectue donc selon les données de 2016.

Afin d'avoir une vision plus synthétique, ces données descriptives ont été intégrées dans un tableau présentant pour chaque année, la cote maximale de la plaine alluviale en rive gauche et en rive droite ainsi que de l'île Bon si elle est disponible, et la cote minimale du chenal principal et du chenal secondaire. Elles serviront par la suite à l'étude de l'évolution longitudinale et notamment à la détermination de la pente des chenaux.

De plus, dans les secteurs à chenaux multiples, la différence d'altitude entre le chenal principal et les chenaux secondaires a été calculé pour chaque année et chaque profil, ainsi que la moyenne pour chaque année. De la même façon, la différence d'altitude entre 2016 et 2019 a été calculée pour le chenal principal et le chenal secondaire pour chacun des profils, avec une moyenne par chenal. Un chiffre négatif indiquant une érosion entre ces deux dates. Cela permet d'apprécier l'ordre de grandeur des différences visibles entre les années, et de potentiellement pouvoir y attribuer des processus.

3.4. Évolution longitudinale

Premièrement, les données d'altitude récoltées lors de l'analyse de la forme en coupe ont permis de représenter la pente des chenaux mais aussi de l'île et des plaines alluviales pour 2016 et 2019, sur des graphiques réalisés sous le logiciel Excel. Il a été possible de connaître les valeurs de pente du chenal principal et du chenal secondaire en affichant les courbes de tendance linéaires, à partir des cotes minimales du thalweg. Néanmoins, il convient de prendre en considération le nombre relativement faible de profils en travers et donc la part d'incertitude de l'ordre de 0,0001m/m reliée à ces valeurs de pente. C'est d'ailleurs pour vérifier ces valeurs que les lignes d'eau du même jour à deux endroits distincts de près de 8 km ont été utilisées. En effet, les données de lignes d'eau obtenues sur le SIEL de la DREAL Centre-Val-de-Loire ont été recueillies au repère : « BONNY-SUR-LOIRE "Pont de Bonny" culée RD M » et également au repère « BRIARE "Pont de Chatillon" culée RD M » situé 7,9 km en aval du premier repère. Les valeurs d'altitude de ligne d'eau de ces deux repères à la même date (04 août 2015) ont été utilisées pour calculer la pente selon la formule générale :

$$\alpha = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (\text{Équation 1})$$

La pente a de nouveau été déterminée en ajoutant les valeurs d'élévation des chenaux (principal et secondaire) des autres profils réalisés seulement en 2019, afin d'avoir une vision longitudinale plus précise des chenaux en 2019. De la même façon que la première fois, la pente a été calculée par le logiciel Excel lors de l'affichage de la courbe de tendance linéaire.

Les lignes d'eau peuvent apporter des informations sur le secteur. En effet, une diminution d'altitude de la ligne d'eau d'étiage peut montrer un enfoncement du lit (incision) et ainsi une déconnexion des plaines alluviales et la présence de hautes berges. Les données de niveau d'eau obtenues sur le SIEL de la DREAL Centre-Val-de-Loire ont été recueillies au repère : « BONNY-SUR-LOIRE "Pont de Bonny" culée RD M » localisé sur la Figure (9).

Les lignes d'eau à l'étiage sont celles qui représentent le mieux la morphologie du fond, tandis que les autres lignes d'eau (module, crue) ne sont pas aussi informatives sur la pente du lit. Ainsi, des données de lignes d'eau ont été obtenues à partir de 1988 et jusqu'à 2015. L'évolution des lignes d'eau à l'étiage entre ces deux dates a pu être représentée sur un graphique.

Par la suite, ces valeurs d'élévation de lignes d'eau ont pu être associées au débit journalier correspondant à la date de mesure, à partir de 1996, car la banque hydro à la station de Gien ne recense pas de données de débit antérieures. Le débit et la ligne d'eau correspondante ont ainsi pu être représentés sous forme de graphique en fonction du temps, ce qui permet de déceler d'éventuelles irrégularités. Le cas échéant, il convient de trouver un facteur explicatif de celles-ci. Dans le cas présent, il s'est avéré utile de s'intéresser aux photographies aériennes au fil du temps recueillies sur Géoportail (remonter le temps) permettant de distinguer l'évolution du chenal due à la présence de barres sédimentaires, au niveau du pont. Les valeurs remarquables sur le graphique débit/ligne d'eau en fonction du temps se situant à partir de 2011,

il a été jugé utile de regarder les photographies de 2011, 2013 et 2015, mais également des photographies plus anciennes (1990 et 2000) afin de voir les différences. La largeur du chenal à cet endroit a été calculée après avoir exporté les photographies aériennes sous ArcMap 10.6.1., pour chacune des années citées précédemment. Ne s'agissant pas d'orthophotographies et ayant donc dû être géolocalisées manuellement, il existe une part importante d'incertitude dans les valeurs. De plus, la résolution des photographies est dans l'ordre chronologique : 2,2 m X 2,5 m ; 2,9 m X 2,9 m ; 2,5 m X 2,5 m ; 1,7 m X 1,7 m ; 1 m X 1 m.

Ensuite, une étape consiste à associer la valeur d'élévation de lignes d'eau relevée grâce au SIEL de la DREAL à la hauteur d'eau donnée par la banque hydro. Pour ce faire, une valeur de ligne d'eau a été choisie (04 août 2003) et, connaissant l'heure exacte de la mesure, il a été possible de trouver la hauteur d'eau correspondante sur la banque hydro. Une relation a ainsi pu être établie malgré la différence de l'échelle utilisée pour ces deux types de mesures. Il a par la suite été possible de déterminer pour chaque débit de référence (QMNA₅, étiage, module, Q₂, Q₅, Q₁₀) l'altitude atteinte par l'eau (voir Tab. 1). En effet, la banque hydro donne ces valeurs de débits. La valeur d'étiage correspond au débit mensuel moyen d'étiage, afin de prendre en considération une valeur plus fréquente que le QMNA₅ atteinte par la Loire dans le secteur. Il convient ensuite de trouver la hauteur d'eau associée à ce débit, toujours sur la banque hydro, et d'y appliquer la relation trouvée précédemment. Cela donne alors l'altitude de la ligne d'eau atteinte en NGF IGN 1969, pouvant ainsi être comparée aux altitudes de la topo-bathymétrie des profils en travers. Ces valeurs seraient d'une plus grande précision si une station fournissait des données de débit au même emplacement que le repère de niveau d'eau de Bonny-sur-Loire.

	Débit (m ³ /s)	Altitude
QMNA5	46	130,372
Étiage	77,3	130,588
Module	323	131,658
Q ₂	1600	134,458
Q ₅	2300	135,188
Q ₁₀	2700	135,388

Tableau 1: Débits caractéristiques et altitude atteinte en NGF IGN 1969

La même méthode a également permis de déterminer le degré de submersion des îles, c'est-à-dire le débit pour lequel elles sont submergées. Leur altitude a été basée sur la valeur maximale que l'île Bon atteint dans les profils en travers, soit dans le profil n°7, où l'île atteint une altitude de 135,8 m. La relation inverse a alors été appliquée afin de connaître la hauteur d'eau correspondante dans la banque hydro, puis de trouver le débit correspondant à cette hauteur d'eau.

Il s'est également avéré intéressant de connaître la connexion des chenaux principaux et secondaires selon le niveau d'eau atteint lors de ces débits de référence. Ainsi, la cote minimale du chenal secondaire dans les 8 premiers profils de 2019 a été comparée à la cote atteinte lors de l'étiage (débit moyen de 77,3 m³/s), et ensuite plus particulièrement lors du QMNA₅ (44 m³/s). Si la cote minimale du chenal est inférieure dans le profil en travers à la cote atteinte par la ligne d'eau, il s'avère que le chenal est en eau pour ce débit. La même opération a été réitérée pour le module. Il n'a pas été nécessaire de s'intéresser aux débits de crue, sachant que les chenaux seraient nécessairement connectés pour ces débits, car connectés au module. Ensuite, afin de connaître le débit minimal pour lequel chacun des profils présente un chenal secondaire en eau, la cote maximale du chenal secondaire a été choisie puis calculée en hauteur d'eau banque hydro ce qui a permis de trouver cette valeur et de pouvoir y associer le débit correspondant.

Afin de modéliser le niveau d'eau correspondant à différents débits (étiage, module, crue), il a été possible d'utiliser des valeurs précises d'altitude de lignes d'eau d'étiage, module et crue sur plusieurs années, relevées sur le SIEL. De plus, le profil topo-bathymétrique n°7 a été utilisé pour modéliser sur AutoCAD la berge en rive droite de 2016, berge qui est soumise à l'érosion. Une deuxième modélisation a été réalisée en utilisant cette fois-ci les valeurs de débits caractéristiques (QMNA₅, module, Q₂, Q₅, Q₁₀) et la hauteur de ligne d'eau correspondante, trouvée comme expliqué précédemment.

3.5. Érosion de berge et hydrologie

Les données d'hydrologie ont été recueillies sur la banque hydro à la station contenant les données nécessaires la plus proche de Bonny-sur-Loire : la station de Gien (code : K4180010 La Loire à Giens). Des données de débit existent à cette station depuis 1996, ce qui a permis de réaliser un hydrogramme journalier du débit de la Loire dans cette zone jusqu'à 2019 (cf. Fig. 7).

L'érosion de la berge a été mesurée parallèlement au sens général d'écoulement de la Loire, comme expliqué dans la partie Évolution de la forme en plan. Un taux d'érosion a ainsi pu être établi entre 1995 et 2005, 2005 et 2015 et 2015 à mai 2019. Afin de relier le taux d'érosion de la berge à des événements hydrologiques, il convient d'effectuer des tests sur les données. Pour cela, il est possible de s'inspirer de la thèse de Camille Jourdain qui s'intéresse à la relation entre l'hydrologie et la destruction de la végétation, qui est elle-même reliée à l'érosion de berge. Elle a déterminé un débit seuil de destruction de la végétation aux alentours de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que les débits les plus efficaces étaient supérieurs à $350 \text{ m}^3/\text{s}$, voire $500 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la destruction de plus grandes surfaces.

Ainsi, des tranches de débit ont été établies. Ces dernières se sont inspirées de celles utilisées par Camille Jourdain dans sa thèse, en se basant sur des valeurs de débit caractéristiques du secteur. Ainsi, sachant qu'un débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ est une valeur proche du module de la Loire à cette station, et qu'un débit de $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ reste inférieur au débit de crue de retour 2 ans ($1\,600 \text{ m}^3/\text{s}$), ces deux valeurs ont été utilisées, le but étant de séparer les débits faibles des débits moyens, et les débits moyens des débits de crue. De plus, la valeur de débit $500 \text{ m}^3/\text{s}$ représente un débit supérieur au module mais ne correspondant pas à une crue, elle est donc également intéressante afin de potentiellement trouver un seuil d'érosion différent du module ou du débit de crue. Les tranches de débit sont donc : inférieur à $300 \text{ m}^3/\text{s}$, entre $300 \text{ m}^3/\text{s}$ et $500 \text{ m}^3/\text{s}$, entre $500 \text{ m}^3/\text{s}$ et $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ et supérieur à $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Le nombre de jours compris dans ces intervalles est calculé (Annexe 6) puis ramené à un pourcentage permettant une comparaison avec les taux d'érosion.

3.6. Calculs divers

3.6.1. Indice de sinuosité

L'indice de sinuosité (i) correspond au rapport entre la longueur développée (L) et la longueur à vol d'oiseau (l) du cours d'eau. Il a été calculé sur le tronçon de 4 km représenté lors de l'analyse de la forme en plan, à partir d'une orthophotographie de 2015 provenant du SIEL, en mesurant sous ArcMap 10.6.1. les longueurs, avec L égale à la longueur développée du chenal principal. La valeur de l'indice permet de déterminer si le cours d'eau est rectiligne ($i < 1,05$), sinueux ($1,05 < i < 1,5$) ou méandriforme ($i > 1,5$).

3.6.2. Rc/W

Malavoi et Bravard (2011), affirment que l'érosion d'un méandre est maximale lorsque le rapport rayon de courbure du méandre sur la largeur à plein bord est compris entre 2 et 3. Il apparaît ainsi intéressant de calculer ce rapport au niveau de la zone d'étude de Bonny-sur-Loire et plus précisément au niveau de la berge en érosion (profil en travers n°7). Le rapport Rc/W est tout d'abord calculé sur l'ensemble du chenal pour l'année 2015. Le Q_2 est utilisé pour avoir une idée de la largeur à plein bord (W), ce qui est cohérent compte tenu du niveau d'eau atteint lors de ce débit de crue. Ainsi, en se référant au Tableau (1) on remarque que le Q_2 atteint une altitude de 134,46 m, ce qui correspond au niveau du profil n°7 de 2016 à une largeur à plein bord de 663 m. Le rayon de courbure (explication Fig. 10) de 2015 est de 464 m, ce qui a pu être déterminé grâce à l'orthophotographie de 2015 et au logiciel ArcMap 10.6.1., dans lequel un cercle suivant le contour de la berge a été tracé, cercle dont le rayon a été calculé par rapport à son périmètre.

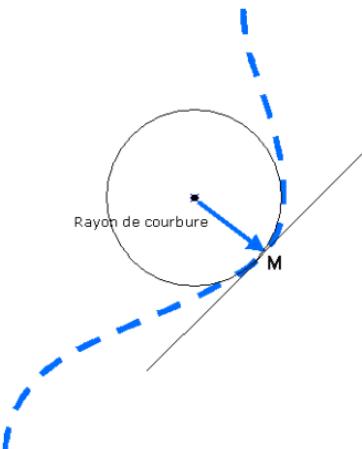


Figure 10: Schéma explicatif du rayon de courbure d'un méandre (en bleu pointillés) (Source: Abuhadrous, 2005)

Néanmoins, les valeurs apparaissant anormalement faibles, il est apparu qu'il était peut-être plus intéressant de considérer dans le calcul la largeur à plein bord du chenal principal seulement. Ainsi, W devient au niveau du même profil, égal à 310 m. Les mêmes calculs ont été effectués pour la forme du chenal en 2019. Les largeurs à plein bord n'ont pas évolué. Néanmoins, R_c a changé et a été calculé cette fois-ci non pas grâce à une photographie aérienne mais grâce à l'emplacement des points de la topographie de la berge réalisée en mai 2019. Le rayon de courbure s'élève ainsi à 557 m.

3.6.3. Ratio d'aspect

Le ratio d'aspect d'une rivière constitue le rapport entre sa largeur et sa profondeur. Un ratio d'aspect (ou β ratio) élevé peut indiquer un potentiel à la formation de barres sédimentaires au sein du chenal. Dans les rivières naturelles, une valeur de l'ordre de 50 peut indiquer le début d'un tressage (Crosato et Mosselman, 2009).

La largeur évolue avec l'hydrologie et la profondeur évolue avec la morphologie du fond. Afin de déterminer le potentiel d'apparition de barres sédimentaires dans le chenal principal, les β ratio ont été calculés pour des configurations hydrologiques différentes. La largeur a été calculée pour deux débits : Q_2 ~ débit plein bord, module. Les profondeurs ont été calculées sur les profils 2019 sur la largeur en eau selon le débit et deux profondeurs ont été appliquées : la profondeur maximale ou la profondeur moyenne. Les quatre β ratio ainsi calculés sont :

- Configuration 1 : Q_2 – profondeur maximale
- Configuration 2 : module – profondeur maximale
- Configuration 3 : Q_2 – profondeur moyenne
- Configuration 4 : module – profondeur moyenne

3.6.4. Forces tractrices

Les forces tractrices ont été déterminées dans chaque profil dans le chenal principal et secondaire à la fois pour un débit correspondant au Q_2 mais également pour le module. La force tractrice se détermine grâce à la formule suivante :

$$\tau_0 = \rho g R h \varphi \quad (\text{Équation 2})$$

Où τ_0 est la force tractrice en N/m^2 , ρ la masse volumique de l'eau en kg/m^3 , g la constante gravitationnelle en N/kg , Rh le rayon hydraulique pouvant être assimilé à la profondeur pour des rivières de grande taille (ce qui a été fait ici) et variant selon le débit, et φ la pente du cours d'eau en m/m choisie conformément aux résultats trouvés.

Une fois ces valeurs de forces tractrices déterminées, il convient de calculer les forces tractrices critiques pour des gammes de taille de sédiments. Les sédiments choisis correspondant à ceux trouvés dans la Loire ainsi que leur gamme de taille et leur masse volumique sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tab. 2).

	Taille (m)			ρ_s (kg/m^3)
	min	moyenne	max	
Sables	5,00E-05	0,001	0,002	2650
Graviers	0,002	0,026	0,05	2650
Galets	0,05	0,15	0,25	2650

Tableau 2: Taille minimale, moyenne et maximale, ainsi que masse volumique de différents sédiments

Les forces tractrices critiques vont ainsi être calculées pour des sables fins, moyens et grossiers, et de même pour les graviers et les galets. La masse volumique de ces solides est également indiquée dans le Tableau (2) car utile au calcul de la force tractrice critique. En effet, la formule est la suivante :

$$\tau_c = \theta (\rho_s - \rho) g D_{50} \quad (\text{Équation 3})$$

Où τ_c est la force tractrice critique en N/m^2 , θ est la contrainte adimensionnelle de cisaillement ou paramètre de Shields, choisi entre 0,03 et 0,06, avec une valeur généralement utilisée de 0,047 dans le cas de rivières sablageuses, ρ_s la masse volumique des sédiments en kg/m^3 , ρ la masse volumique de l'eau en kg/m^3 , g la constante gravitationnelle en N/kg , et D_{50} la médiane de taille des particules du lit.

Le choix a ici été fait de calculer chaque force tractrice critique pour les trois valeurs de θ , afin de voir l'influence de la variation de ce paramètre sur la valeur de la force tractrice critique. Sous un tableur Excel, il a ensuite été possible de savoir pour chaque classe de sédiments, pour chaque profil, pour chaque θ et pour un débit correspondant au Q_2 ou au module, si les sédiments étaient susceptibles d'être mobilisés. Un mouvement se traduit par une force tractrice supérieure à la force tractrice critique.

4. Résultats

4.1. Évolution de la forme en plan

4.1.1. Tronçon de 4 km

Tout d'abord, une approche assez large sur un tronçon de 4 km est effectuée, à partir de 1850. La description s'appuie sur les cartes de 1850 (Fig. 11), 1949 (Fig. 12), 1995 (Fig. 13) et 2015 (Fig. 14).

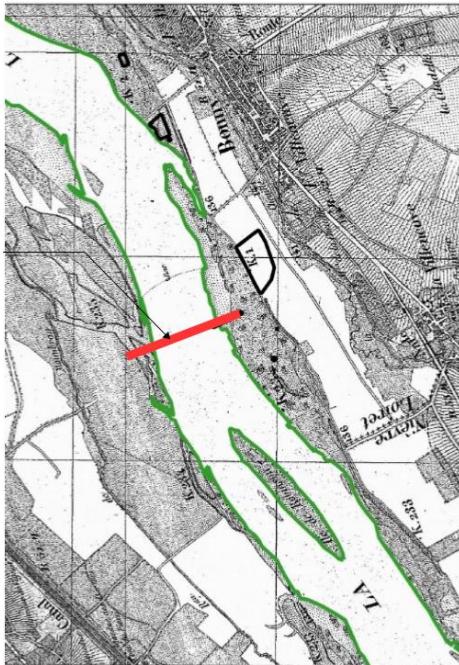


Figure 11: Carte de 1850 (Source: carte historique)

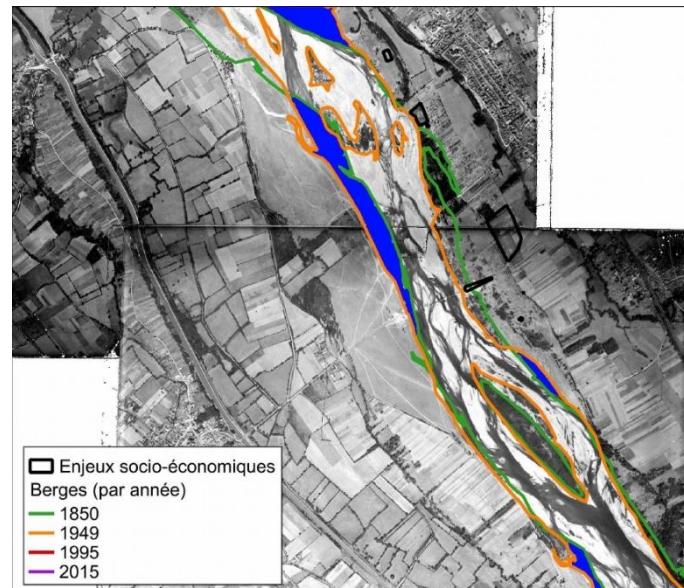


Figure 12: Carte de 1949 (Source: SIEL)

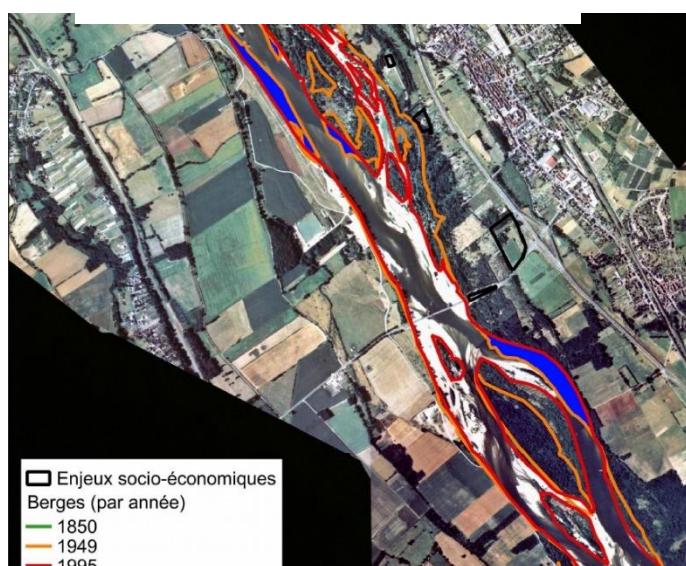


Figure 13: Carte de 1995 (Source: SIEL)

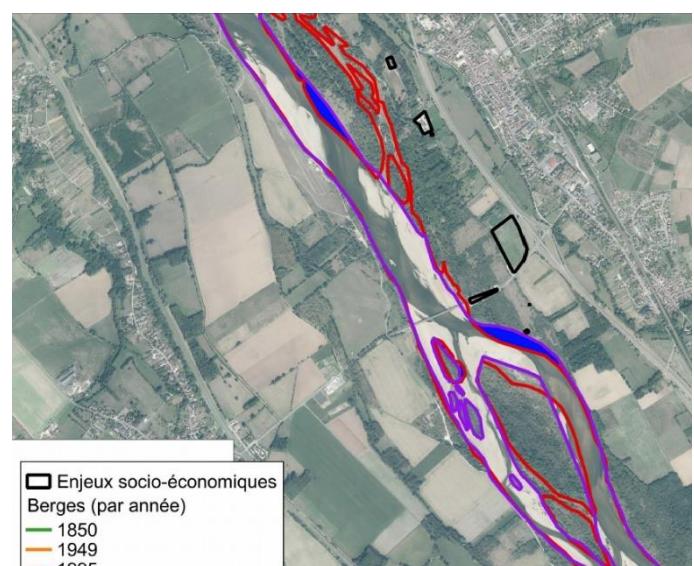


Figure 14: Carte de 2015 (Source: IGN)

En 1850, le pont de Bonny-sur-Loire n'était pas encore présent. Néanmoins, en tenant compte de son futur emplacement (indiqué en rouge sur la carte), il est possible de voir qu'en amont du secteur, la Loire présente un style fluviatile à chenaux multiples, avec deux chenaux séparés par une île : l'île Bon déjà présente à cette époque. En aval, la Loire présente un style sinueux avec un chenal unique.

En 1949, à l'amont du pont, la largeur de la bande active est restée stable. La berge en rive gauche est également restée stable. En revanche, l'érosion de la berge en rive droite est déjà visible. De plus, l'île Bon s'est élargie, plus particulièrement du côté de la rive droite. En aval du pont, la largeur de la bande active est également stable. Des îles végétalisées se sont formées ce qui a mené à la création de plusieurs chenaux d'écoulement. Les berges ont subi de fortes érosions, sur plus d'un kilomètre, en rive gauche à l'aval direct du pont puis en rive droite plus en aval.

En 1995, une chenalisation a eu lieu au sein du secteur que ce soit à l'amont ou à l'aval, tout comme une réduction de la bande active. En amont du pont de la RD926, la rive gauche est à nouveau restée stable. Cependant, l'érosion en rive droite a été très active et est plus conséquente qu'auparavant, elle s'est également décalée vers l'aval. L'île Bon s'est à nouveau élargie en direction de la rive droite. En aval du pont, l'érosion se concentre dans le chenal principal qui est en rive gauche. Il y a également une forte végétalisation de la partie droite du lit mineur ce qui explique la concentration des écoulements dans le chenal gauche et l'érosion résultante de la berge.

En 2015, en amont du pont de Bonny-sur-Loire, les écoulements se concentrent majoritairement dans le bras en rive droite. La berge en rive gauche est restée stable une nouvelle fois. L'érosion de la rive droite se poursuit toujours et progresse encore vers l'aval, alors que l'élargissement de l'île Bon s'effectue à ce niveau également. Dans le bras gauche, des opérations d'entretien par la DDT ont eu lieu, afin de maintenir le chenal actif. En aval du pont, une chenalisation s'est effectuée dans le bras gauche qui est maintenant devenu un chenal unique rectiligne, qui s'est élargi. La rive gauche est restée stable.

En résumé, de 1850 à nos jours, le style fluviatile en aval du pont a varié tandis que celui en amont est resté à chenaux multiples. La largeur de la bande active est toujours restée faible au niveau du pont. En amont, le chenal principal était en rive gauche jusqu'à 1965, et a basculé en rive droite depuis. L'île Bon est présente dès 1850. Elle s'est élargie au cours du temps, notamment vers la rive droite. La berge en rive gauche est restée étrangement stable au fil des années. La berge en rive droite, quant à elle, a subi une érosion s'accentuant dans le temps et se décalant vers l'aval.

4.1.2. *Zoom sur la berge*

Une vision plus rapprochée de la berge présentant une problématique d'érosion est présentée. La carte ci-dessous (Fig. 15) présente l'évolution de la berge de 1995 à 2019, ainsi que les enjeux présents.

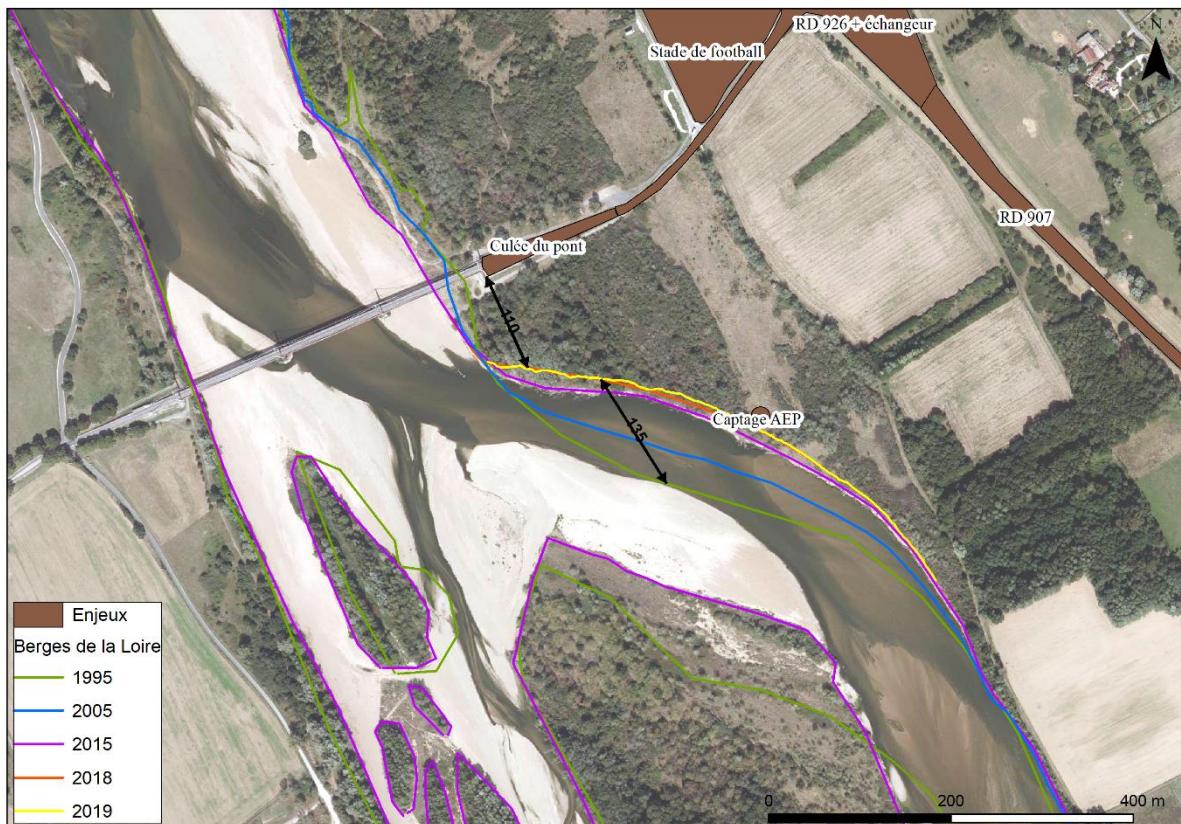


Figure 15: Tracé des berges de 1995 à 2019 et enjeux (Source: production personnelle)

En mai 2018, le pied du talus du forage AEP se trouvait à 5 m de la berge. À ce même niveau, la berge a reculé de 85 mètres entre 1995 et 2018, soit un taux annuel moyen d'érosion compris entre 3 et 4 m. À ce rythme, il était supposé que la berge aurait atteint le forage AEP en mai 2020. Néanmoins, le tracé des berges de mai 2019 n'a quasiment pas changé par rapport à 2018, avec très peu voire pas d'érosion de berge. Un retrait de 5 m environ est visible légèrement en aval du captage AEP, cependant, cela ne permet pas d'affirmer que la berge a subi une érosion à ce niveau, car le levé de haut de berge n'y a pas été effectué en 2018. Compte-tenu de l'absence d'érosion sur les autres parties de la berge et de la relative homogénéité dans l'érosion sur la longueur de la berge les autres années, il est même peu probable qu'une érosion de 5 m y ait eu lieu. De plus, la culée du pont est actuellement située à 110 mètres en aval de la berge érodée. Dans ce secteur, la berge s'est translatée vers l'aval d'environ 135 mètres entre 1995 et 2019, soit un taux annuel moyen d'érosion compris entre 5 et 6 m par an. Si la translation se poursuit au même rythme, l'érosion pourrait atteindre la culée de l'ouvrage dans environ 20 ans. L'intérêt de l'étude est donc de comprendre le fonctionnement pour savoir si la tendance va se poursuivre ou si une autre évolution est possible. Le taux annuel d'érosion est présenté pour trois périodes distinctes dans le tableau ci-dessous (Tab. 3).

Période	Érosion (m)	Taux (m/an)
1995-2005	55	5,5
2005-2015	63	6,3
2015-2019	17	4,3

Tableau 3: Longueur et taux d'érosion selon les différentes périodes

4.1.3. Évolution berge / île

Grâce aux orthophotographies de 1998, 2002, 2005 et 2015 (intervalle de temps plus court que les descriptions de la morphologie en plan effectuées précédemment), il a été possible de visualiser la progression de la berge ainsi que de l'île Bon, et plus particulièrement ici de la barre sédimentaire forcée au niveau de celle-ci. L'objectif est de voir si ces évolutions pourraient potentiellement être corrélées. Les gains et pertes de sédiments entre ces différentes dates sont représentés sur les cartes suivantes (Fig. 16 à 18).

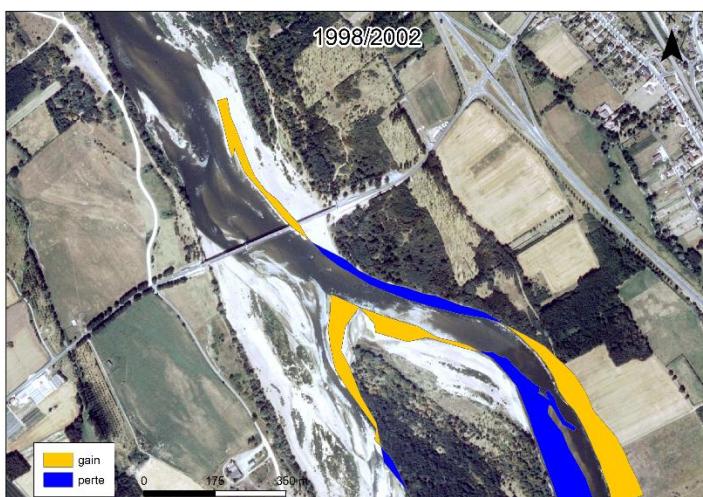


Figure 16: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1998 et 2002 (Source: production personnelle)

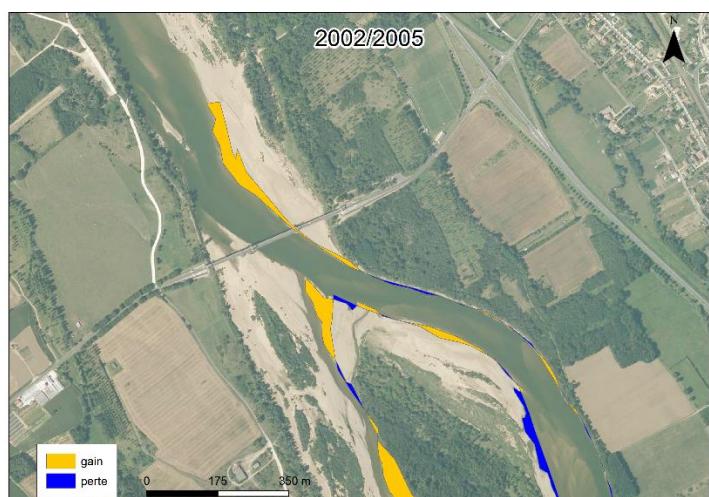


Figure 17: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 2002 et 2005 (Source: production personnelle)

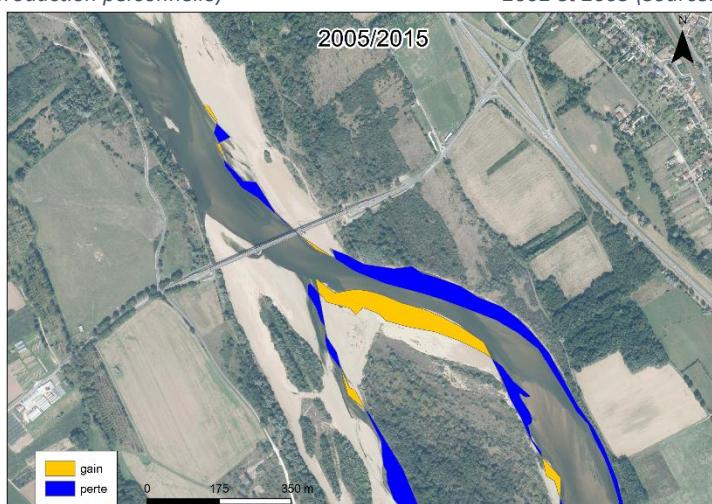


Figure 11: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 2005 et 2015 (Source: production personnelle)

De 1998 à 2002, on observe une accréition conséquente sur le côté aval de la barre sédimentaire, s'levant à 17 804 m² (côté rive gauche et droite), et plus précisément à 6 939 m² du côté rive droite. L'érosion de la berge rive droite en amont du pont a eu lieu à hauteur de 9 964 m², sur une longueur d'environ 528 m. Plus en amont, la barre a subi une forte perte de sédiments alors que la rive droite au même niveau a connu un gain de sédiments tout aussi fort.

De 2002 à 2005, les modifications en termes de pertes et gains dans le chenal principal se sont montrées plus faibles. Du côté rive droite et en face de la zone où la berge s'érode, la barre a subi une accréition de 2 003 m². La berge s'est quant à elle érodée de 831 m² sur 470 m de long.

De 2005 à 2015, sur une période donc plus longue, on observe une forte accréition sur la zone de la barre à laquelle nous nous intéressons, à hauteur de 17 606 m² tandis qu'une érosion de la berge rive droite s'est produite sur 25 233 m². Cette valeur comprend la totalité de la rive, si l'on s'intéresse seulement à la zone de berge érodée de manière générale, elle descend à environ 17 230 m².

D'après ces données, il semble y avoir une corrélation entre les gains survenus lors de l'accréition de la barre forcée sur l'île Bon et les pertes dues à l'érosion sur la rive correspondante. Cette relation se visualise sur ce graphique (Fig. 19).

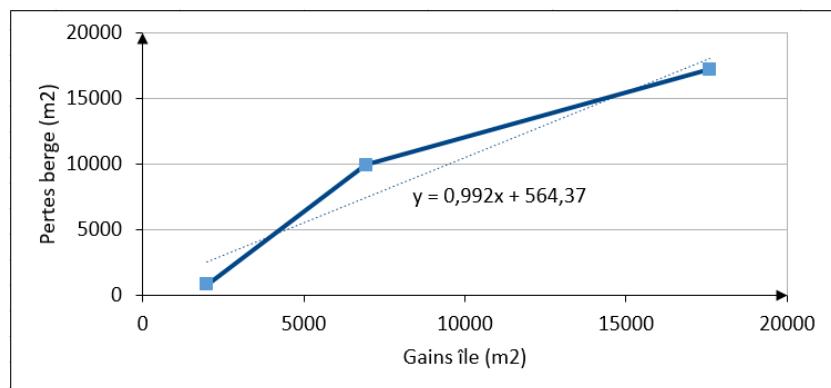


Figure 19: Graphique représentant les surfaces de perte de sédiments en fonction des surfaces de gains de sédiments entre la barre sédimentaire et la berge (Source: production personnelle)

La courbe de tendance montre même une relation quasi linéaire, néanmoins, il conviendrait d'avoir plus de valeurs pour établir une tendance significative.

Des données de la DREAL permettent de connaître le tracé des berges et des îles depuis 1850, néanmoins, les tracés correspondent uniquement à la partie boisée, donc à l'île en elle-même. Il n'est donc pas possible de continuer la cartographie effectuée précédemment, mais il peut être utile de voir si la relation entre l'accréition et l'érosion de la berge observée est également visible en prenant en compte seulement la partie boisée de l'île Bon. Les pertes et gains ont ainsi été représentés à des intervalles différents, visibles sur les cartes (Fig. 20 à 24).

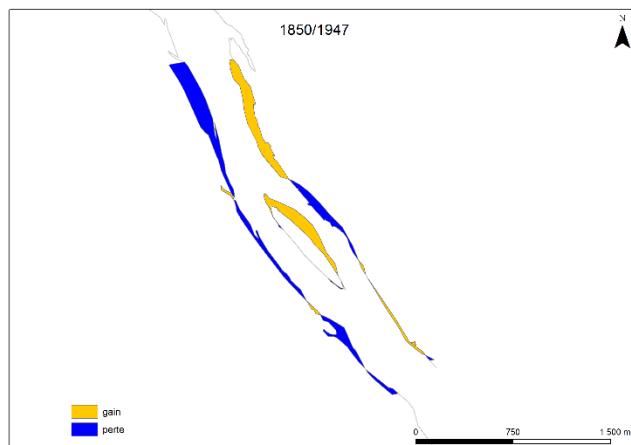


Figure 20: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1850 et 1947 (Source: production personnelle)

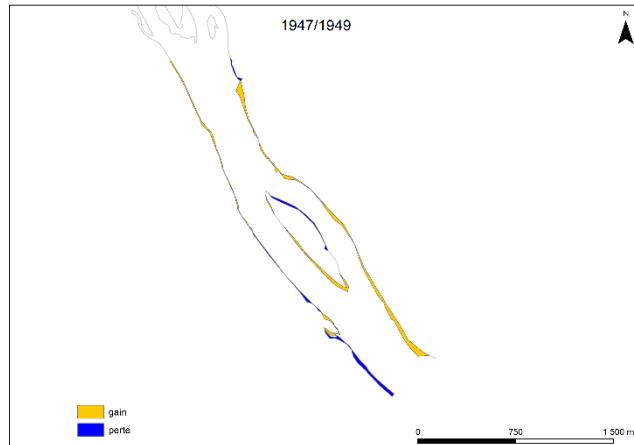


Figure 21: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1947 et 1949 (Source: production personnelle)

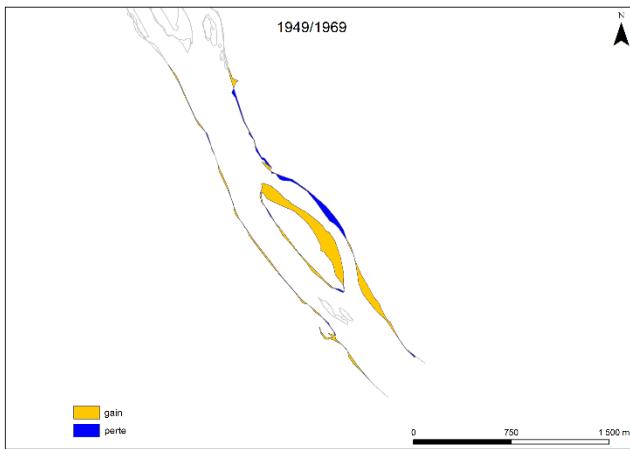


Figure 22: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1949 et 1969 (Source: production personnelle)

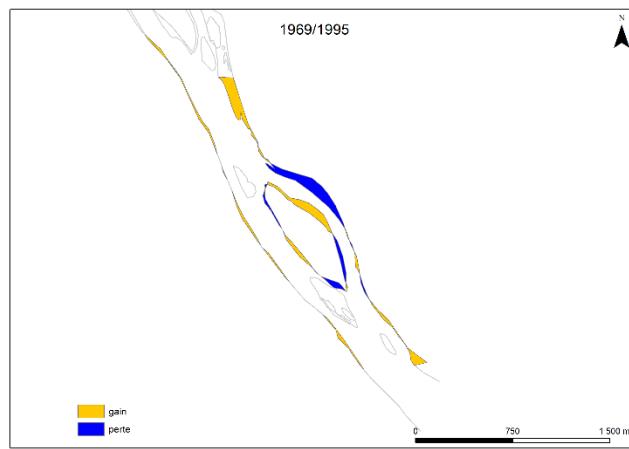


Figure 23: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1969 et 1995 (Source: production personnelle)

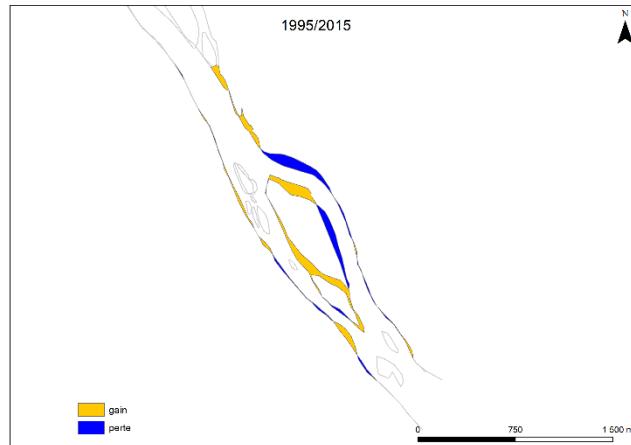


Figure 24: Représentation des gains et des pertes de sédiments entre 1995 et 2015 (Source: production personnelle)

Sur la période de 1850 à 1947, c'est-à-dire de presque 100 ans, l'île a subi une accréition de 47 271 m². La berge en rive droite, quant à elle, s'est érodée à hauteur de 29 302 m². De fortes pertes et gains sont visibles en aval du pont.

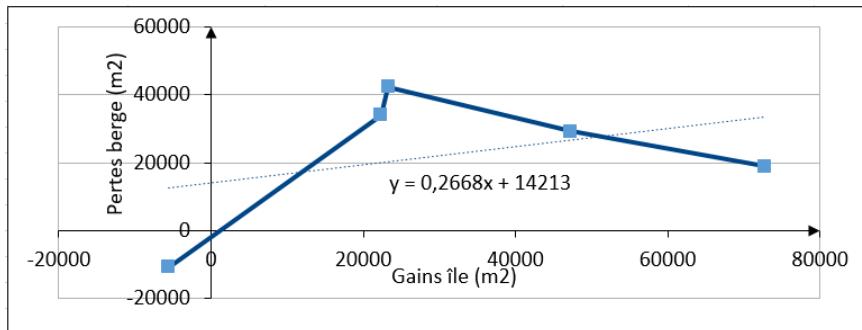
De 1947 à 1949, on assiste à une inversion de tendance. En effet, l'île Bon s'est érodée alors qu'un dépôt de sédiments est visible sur la berge opposée. L'érosion sur l'île était de 5 601 m², et les dépôts sur la berge de 10 802 m². En aval, le chenal s'est légèrement rétréci, par un dépôt de sédiments sur chaque berge. La berge en rive gauche est restée relativement stable.

De 1949 à 1969, les quantités mobilisées sont importantes. L'île s'est élargie, y compris légèrement côté rive gauche. L'accréition côté rive droite s'élève à 72 710 m², tandis que la berge s'est érodée de 18 941 m². En aval, les quantités de matières mobilisées sont faibles. La berge en rive gauche est restée également assez stable, subissant un très léger dépôt de sédiments sur toute la longueur.

De 1969 à 1995, l'île a subi un dépôt de sédiments d'une superficie de 23 250 m², et la berge s'est érodée à hauteur de 42 243 m². L'érosion de berge se décale toujours vers l'aval. De la même façon que lors des périodes précédentes, la berge en rive gauche reste stable. En aval, un dépôt a lieu au niveau des deux berges, principalement en rive droite.

Plus récemment, de 1995 à 2015, on remarque encore plus le décalage vers l'aval de l'érosion. Il est également visible que l'île fait l'objet d'un dépôt de sédiments sur sa partie droite aval, cela était déjà visible pendant la période précédente, alors que sur les autres photographies, on voit que l'accréition a lieu sur la partie entière droite de l'île. Ici, les dépôts atteignent une valeur de 22 350 m² et l'érosion de la berge juste en amont du pont s'élève à 34 062 m².

Le graphique suivant (Fig. 25) montre la relation existant entre les surfaces déposées ou érodées de la partie boisée de l'île Bon et les surfaces mobilisées au niveau de la berge.



Ici, la relation entre les dépôts ou pertes survenus sur l'île et l'érosion ou le dépôt sur la berge n'est plus linéaire. Pour les deux derniers points (1949/1969 et 1850/1947), la quantité de dépôt sur l'île est très importante mais l'érosion survenue sur la berge en rive droite n'est pas aussi conséquente, alors que pour les autres années, les transferts de sédiments sur la berge sont plus importants que sur l'île.

4.2. Évolution de la forme en coupe

Les profils topo-bathymétriques de 2016 et 2019 permettent une caractérisation morphologique de la Loire à Bonny-sur-Loire, ainsi qu'une comparaison permettant de distinguer l'évolution du lit entre ces deux dates. Les profils en travers sont donnés en Annexe (7). Les profils 1 à 7 se situent en amont du pont de Bonny-sur-Loire, dans un secteur où le style fluviatile est à chenaux multiples, avec la présence notamment d'une grande île, l'île Bon. Le chenal principal se trouve dans la partie rive droite. Les profils 12 et 13, quant à eux, se situent en aval du pont, dans un secteur à chenal unique.

Plaine alluviale en rive gauche

Cette zone n'a pas été couverte par les levés de 2019. Dans le profil le plus en amont (profil n°1), la rive gauche présente en 2016 une élévation maximale de 136 m, puis de 136,8 m au niveau du profil n°3. Plus en aval, au niveau du profil n°5, la rive gauche présente, toujours en 2016, une élévation maximale de 135,1 m. Au niveau du profil n°7, elle présente une élévation maximale de 135,3 m. Puis, à l'aval du pont, au profil n°12, il est possible de voir que la rive gauche atteint une élévation maximale de 134,9 m. Finalement, au niveau du profil n°13, elle atteint une élévation maximale de 134,5 m.

Plaine alluviale en rive droite

Cette zone n'a également pas été couverte par les levés de 2019. Au niveau du premier profil, les levés de 2016 décrivent la zone boisée en rive droite au-delà de 382 m de distance cumulée. Ainsi, elle présente une élévation maximale de 136,6 m à une distance cumulée à la rive gauche de 620 m et une morphologie relativement plane avec une altitude d'environ 133 m de 470 m à 597 m de distance cumulée. Puis, dans le profil n°3, la zone rive droite présente une élévation maximale de 134,6 m. Au niveau du profil n°5, la plaine alluviale en rive droite est constituée de parcelles agricoles et présente une élévation maximale de 135,6 m. Puis, le profil n°7 décrit la zone non boisée en rive droite au-delà de 650 m. Cette zone présente une élévation maximale de 134,2 m. A l'aval du pont, la rive droite atteint une élévation maximale de 134 m pour le profil n°12. Finalement, au niveau du profil n°13, l'élévation maximale est de 133,2 m.

Îles boisées

Ces zones n'ont généralement pas été couvertes par les levés de 2019. Au niveau du profil n°1, le profil topo-bathymétrique caractérise l'amont d'un îlot boisé, large d'environ 79 m, de 97 m jusqu'à 176 m de distance cumulée à la rive gauche. Cette zone comporte en 2016 une élévation maximale de 134,8 m à une distance cumulée de 114 m. L'élévation présente une diminution au centre de l'îlot, avec une hauteur minimale de 134,1 m à une distance cumulée de 136 m. Un second îlot est reconnaissable sur les photographies aériennes ainsi que sur les profils, à une distance cumulée de 208 m à 245 m (largeur de 37 m). Il a été couvert par les levés de 2016 et de 2019. Cet îlot subit une accrétion entre 2016 et 2019, avec une hauteur de dépôts maximale de + 0,4 m. L'élévation maximale mesurée en 2016 est de 133,8 m à une distance cumulée à la rive gauche de 225 m. Elle est de 134,2 m à une distance cumulée de 215 m en 2019.

Au niveau du profil n°3, une île boisée, l'île Bon, est présente de la distance cumulée à la rive gauche 165 m jusqu'à 381 m, s'étendant donc sur 216 m de largeur. Cette zone comporte une élévation

maximale de 135,8 m à une distance cumulée à la rive gauche de 300 m. L'élévation est très variable, avec une hauteur minimale de 131,7 m à une distance cumulée de 342 m. En s'intéressant aux photographies plus anciennes (années 90 et avant), on peut s'apercevoir que cette baisse d'élévation correspond à un ancien sous-chenal d'écoulement qui séparait l'île en deux.

Puis, au niveau du profil n°5, l'île Bon s'étend sur environ 315 m de largeur de 192 m à 507 m de distance cumulée à la rive gauche. Elle comporte une élévation maximale de 135,6 m à une distance cumulée de 255 m. Une perte de sédiments semble s'opérer de chaque côté de l'île.

Dans le profil n°7, l'île Bon est toujours présente de 250 m à 464 m de distance cumulée à la rive gauche, soit une largeur de 214 m. Elle comporte une élévation maximale de 135,2 m à une distance cumulée de 363 m, et une élévation minimale de 132,7 m en trois zones distinctes. La partie droite de l'île a subi une érosion sur 22 m de largeur, jusqu'à une distance cumulée de 432 m, à hauteur de - 0,4 m au maximum. Des îlots végétalisés sont également présents sur ce profil sur une largeur de 115 m (70 m à 185 m de distance cumulée). La comparaison des profils 2016-2019 révèle de l'érosion au niveau de leurs berges, mais une zone de dépôt sur la partie la plus élevée, pouvant atteindre +0,4 m. L'élévation maximale en 2019 est de 134,1 m à une distance cumulée de 102 m. Elle est de 133,9 m en 2016 à la même distance cumulée. Cela constitue une augmentation de la cote minimale de 0,2 m de 2016 à 2019.

Chenal en rive gauche

Sur le profil n°1, le chenal secondaire se situe entre 39 m et 97 m de distance cumulée à la rive gauche, il présente ainsi une largeur de 58 m. La comparaison des profils 2016-2019 révèle de l'érosion au sein de ce chenal. En rive gauche, les hauteurs de pertes peuvent atteindre - 1,9 m, avec une hauteur de pertes minimum de - 0,5 m vers le centre du chenal. La cote minimale a été mesurée en 2019 à 131 m, à une distance cumulée de 67 m. En 2016, la cote minimale mesurée, de 131,9 m, se localise à une distance cumulée de 61 m. La cote minimale de ce chenal a ainsi diminué de 0,9 m de 2016 à 2019, le chenal s'est donc érodé. Un sous-chenal d'une largeur de 32 m est présent de 176 m à 208 m de distance cumulée, et subit une érosion d'une hauteur maximale de -1 m. La cote minimale mesurée en 2016 est de 131,9 m, à une distance cumulée à la rive gauche d'environ 190 m. En 2019, la cote minimale mesurée, de 130,9 m, se localise à une distance cumulée de 197 m. La cote minimale de ce chenal a ainsi diminué de 1 m entre 2016 et 2019, ce qui indique une érosion du même ordre de grandeur que celle se retrouvant dans le premier chenal secondaire en rive gauche.

Sur le profil en travers n°3, le chenal en rive gauche se situe entre 52 m et 165 m de distance cumulée à la rive gauche, présentant ainsi une largeur de 113 m. La comparaison des profils 2016-2019 révèle de l'érosion au sein de ce chenal. L'érosion s'intensifie de la rive gauche vers la rive droite, avec des hauteurs de pertes pouvant atteindre - 1 m. La cote minimale a été mesurée en 2019 à 130,9 m, à une distance cumulée de 117 m. En 2016, la cote minimale mesurée, de 131,8 m, se localise à une distance cumulée de 75 m. La cote minimale de ce chenal a ainsi diminué de 0,9 m entre 2016 et 2019, le chenal s'étant érodé entre ces dates. De plus, on remarque notamment que sur cette partie du profil, on a en 2016 un fond relativement plan avec une altitude homogène sur la section, tandis qu'en 2019, la section devient plus asymétrique.

Au niveau du profil n°5, le chenal en rive gauche se situe entre 40 m et 192 m de distance cumulée à la rive gauche, il a ainsi une largeur de 152 m. La comparaison des profils 2016-2019 révèle de l'érosion au niveau des deux rives de ce chenal. En rive gauche, les hauteurs de pertes atteignent au maximum - 0,5 m. En rive droite, elles sont plus importantes avec des valeurs maximales de -2 m au niveau de l'île Bon. L'île semble elle-même avoir subi une érosion de ses berges. En revanche, au centre du chenal et sur une largeur de 84 m (66 m à 150 m de distance cumulée), un dépôt de sédiments est notable, ce qui correspond à l'amont d'une barre sédimentaire. La hauteur de l'accrétion peut atteindre + 0,9 m. La cote maximale a été mesurée en 2019 à 132,2 m, à une distance cumulée de 103 m. En 2016, la cote maximale mesurée, de 132 m, se localise à une distance cumulée de 93 m. La cote maximale du chenal a ainsi augmenté de 0,2 m entre 2016 et 2019. L'accrétion générale sur le haut de la barre sédimentaire n'est pas très élevée, contrairement à celle à la droite de cette barre, ce qui pourrait suggérer que celle-ci subit à la fois une accrétion et un décalage vers la droite du chenal. Cela montre que même dans les chenaux secondaires, les formes en plan telles que les barres se déplacent.

Au niveau du profil n°7, le chenal en rive gauche se situe entre 39 m et 250 m de distance cumulée à la rive gauche, ce qui représente une largeur de 211 m, et est subdivisé en deux sous-chenaux distincts séparés par des îlots végétalisées. Le premier se situe entre 39 m et 70 m de distance cumulée à la rive gauche (31 m de largeur) et a subi en son centre une accrétion d'environ +0,2 m, et en rive droite une érosion de - 0,5 m. Il présente une cote minimale de 131,8 m en 2019 à une distance cumulée de 69 m. En 2016, la cote

minimale se situe à une distance cumulée de 39 m et s'élève à 131,9 m. La cote minimale a donc diminué de 0,1 m de 2016 à 2019. Le second sous-chenal s'étend sur une largeur de 65 m, de 185 m à 250 m de distance cumulée à la rive gauche. Il présente une érosion de 2016 à 2019 en rive gauche sur une zone de 13 m. Cette érosion s'élève à - 0,5 m. Le reste de la zone a subi un dépôt de sédiments s'accentuant en rive droite avec des valeurs s'élevant à +0,7 m. Il présente une cote minimale de 130,3 m en 2016 à une distance cumulée de 243 m. En 2019, la cote minimale se situe à une distance cumulée de 196 m et s'élève à 130,7 m. La cote minimale a donc augmenté de 0,4 m de 2016 à 2019. On remarque également que la section qui était asymétrique en 2016 apparaît assez homogène en termes d'altitude en 2019.

Chenal principal

Au niveau du profil n°1, à une distance cumulée à la rive gauche de 245 m à 382 m (largeur de 137 m), se trouve le chenal principal ayant majoritairement subi une érosion sur 105 m soit environ 77 % de sa largeur. Cette érosion est d'une hauteur maximale de - 0,4 m. Un dépôt de sédiments d'environ + 0,2 m est présent à une distance cumulée de 265 m à 287 m (22 m de largeur). Il correspond à l'amont d'une barre de centre de chenal ayant tendance à se végétaliser. La cote minimale du chenal principal a été mesurée en 2019 à 130,1 m, à une distance cumulée de 363 m. En 2016, la cote minimale de 130,2 m, se localise à une distance cumulée de 372 m, et a subi un dépôt de sédiments en 2019. Toutefois, les altitudes du chenal sont en moyenne plus basses en 2019 qu'en 2016.

Au niveau du profil n°3, le chenal principal est situé de 381 m à 508 m de distance cumulée à la rive gauche, possédant ainsi une largeur de 127 m. Il subit majoritairement de l'érosion, notamment à proximité de l'île avec une hauteur maximale de pertes de - 0,7 m. L'élévation augmente en allant vers la rive droite. La cote minimale a été mesurée en 2019 à 129,4 m, à une distance cumulée de 390 m. En 2016, la cote minimale mesurée, de 130 m, se localise à une distance cumulée de 385 m. La cote minimale du chenal principal a ainsi diminué de 0,6 m entre 2016 et 2019. L'érosion à partir de 440 m est beaucoup plus faible. À une distance cumulée de 424 m à 440 m, un dépôt de sédiments est visible, d'environ + 0,3 m. De plus, une accrédition semble avoir lieu au niveau de la rive droite (absence de données 2019).

Au niveau du profil n°5, le chenal principal d'une largeur de 166 m se situe de la distance cumulée à la rive gauche 507 m à 673 m. Ce chenal subit une accrédition au niveau des points possédant une élévation moins élevée en 2016 de 567 m à 640 m de distance cumulée. Ce dépôt de sédiments s'élève à + 0,3 m au maximum. De plus, en rive gauche du chenal, un point déjà plus élevé subit une accrédition pouvant atteindre une valeur maximale de + 0,6 m à une distance cumulée de 535 m. L'élévation maximale mesurée en 2019 est de 131,3 m à une distance cumulée à la rive gauche de 531 m. Elle est de 130,9 m à une distance cumulée de 529 m en 2019. Cela représente une différence de 0,4 m. Cette accrédition survient sur une petite barre sédimentaire proche de l'île. Au niveau de la rive droite, une érosion est présente, notamment au niveau du pied de berge avec une perte de sédiments s'élevant à - 0,5 m. Par ailleurs, la berge en rive droite est très abrupte, présentant une pente de 0,67.

Puis, au niveau du profil n°7, de la distance cumulée à la rive gauche 464 m à 650 m, les profils topo-bathymétriques décrivent le chenal principal, d'une largeur de 186 m. À partir de la distance cumulée de 464 m et jusqu'à 564 m (100 m de largeur) se retrouve une barre sédimentaire forcée, fixée à l'île. Dans cette partie, une accrédition conséquente (jusqu'à + 0,7 m) est survenue au niveau des élévations les plus fortes, tandis que dans la partie où l'élévation diminue peu à peu, un départ de sédiments est visible (jusqu'à - 0,4 m), diminuant ainsi légèrement la largeur de la barre tout en augmentant sa hauteur. Dans la partie plus profonde du chenal, un dépôt est visible sur 38 m à partir de la distance cumulée à la rive gauche de 576 m. Il est en moyenne de + 0,3 m. La cote maximale en 2019 y est de 130,1 m, tandis qu'en 2016 elle est de 129,8 m. La cote maximale de cette partie subissant des dépôts a donc augmenté de 0,3 m entre 2016 et 2019. Vers la rive droite, au contraire, une érosion survient à partir de 614 m de distance cumulée. Les pertes peuvent atteindre une hauteur de - 0,4 m. La cote minimale en 2019 y est de 128,9 m, tandis qu'en 2016 elle est de 129,2 m. Cela constitue une diminution de la cote minimale de 0,3 m. Cela montre que le fond du chenal était plutôt uniforme en 2016, tandis qu'en 2019, il y a une tendance au dépôt du côté gauche ce qui suréleve cette partie par rapport à l'autre. Au niveau de la rive droite, une très forte érosion de berge s'élevant à 4,3 m est visible, toutefois la berge conserve la même pente, soit 0,75.

Après le pont de la RD926, le chenal principal devient un chenal unique. Au niveau du profil n°12, le chenal a ainsi une largeur de 250 m. La comparaison des profils 2016-2019 révèle une différence entre la rive gauche et la rive droite du chenal. Au niveau de la rive gauche, jusqu'à 84 m de distance cumulée, le lit subit un dépôt de sédiments, pouvant atteindre une hauteur maximale de + 1,2 m. L'absence de mesures en 2019 de 15 à 21 m de distance cumulée a pour conséquence de montrer sur la comparaison des profils

un dépôt de sédiments, bien que ce dernier ne soit en fait qu'un artefact. La cote minimale sur cette partie en rive gauche a été mesurée en 2016 à 128,1 m, à une distance cumulée de 44 m. En 2019, la cote minimale mesurée, de 128,6 m, se localise à une distance cumulée de 41 m. La cote minimale a donc augmenté de 0,5 m entre 2016 et 2019. La partie la plus profonde du chenal a donc subi un dépôt conséquent de sédiments. Au-delà de cette distance cumulée de 84 m, les profils topo-bathymétriques montrent un départ de sédiments s'étendant sur la quasi-totalité du reste du chenal, notamment sur la partie centrale qui était la plus élevée en 2016, sur environ 81 m, jusqu'à une distance cumulée de 165 m. Cette zone comporte une élévation maximale de 130,7 m en 2016 à une distance cumulée à la rive gauche de 117 m. En 2019, l'élévation maximale est de 130,2 m à une distance cumulée de 126 m. La cote maximale a ainsi diminué de 0,5 m. La hauteur maximale de pertes dans cette zone est de - 0,7 m. Au niveau de la rive droite, des zones d'érosion et de dépôt se succèdent, de plus faibles hauteurs qu'en rive gauche. De l'accrétion a lieu au niveau de la berge, atteignant des valeurs d'environ + 0,2 m. Une zone d'érosion est présente aux alentours de 200 m de distance cumulée à la rive gauche, atteignant - 0,5 m.

Finalement, au niveau du dernier profil, le profil n°13, le chenal a une largeur d'environ 260 m. La comparaison des profils 2016-2019 révèle de très forts processus de dépôt et de pertes de sédiments. L'accrétion est particulièrement forte au niveau de la rive gauche, et se prolonge jusqu'à 222 m de distance cumulée, pouvant atteindre une hauteur maximale de + 2,5 m. La cote minimale mesurée dans cette zone de dépôts en 2016 est de 128,6 m, à une distance cumulée de 53 m. En 2019, elle est de 129 m à une distance cumulée de 218 m. La cote minimale a ainsi augmenté de 0,4 m entre 2016 et 2019. Les parties les plus profondes du chenal ont donc subi un dépôt conséquent de sédiments. Sur les photographies aériennes de 2015, une barre sédimentaire est visible à cet endroit (au niveau de la rive gauche), où l'élévation atteint 131,2 m. Le secteur semble en effet présenter des barres alternées, migrant au fil du temps dans le chenal. Cette hauteur de dépôt semble confirmer la présence d'une barre, et non un exhaussement du lit. Au-delà de cette distance cumulée de 222 m, les profils topo-bathymétriques montrent une tendance inverse avec un départ de sédiments s'étendant sur le reste du chenal. Cette érosion atteint une hauteur maximale de - 1,5 m. En 2019, avec une élévation minimale de 128,3 m, cette zone est la plus profonde du chenal, alors qu'elle était l'une des plus élevées en 2016 avec une élévation maximale de 130,2 m. Cela correspond à une différence d'altitude de 1,9 m. De plus, la berge en rive droite a subi une forte érosion.

Afin d'avoir une vision plus représentative de certaines de ces valeurs d'altitude, les élévations maximales des deux plaines alluviales et de l'île, ainsi que les cotes minimales des chenaux ont été renseignés dans deux tableaux, correspondant aux deux années de levés : 2016 et 2019 (Annexe 8).

Il a tout d'abord été possible, à partir de ces tableaux, d'établir deux graphiques montrant l'évolution de l'altitude du chenal principal en 2016 et en 2019 et l'évolution de l'altitude du chenal secondaire pour ces deux dates également (Fig. 26). Un tableau (Tab. 4) indique également la différence d'altitude entre 2016 et 2019 pour le chenal principal ainsi que pour le chenal secondaire. Un autre tableau (Tab. 5) a été établi afin de mettre en évidence les différences d'altitude entre le chenal principal et le chenal secondaire, pour 2016 et 2019. Cela permet notamment d'avoir une idée de la connexion des chenaux.

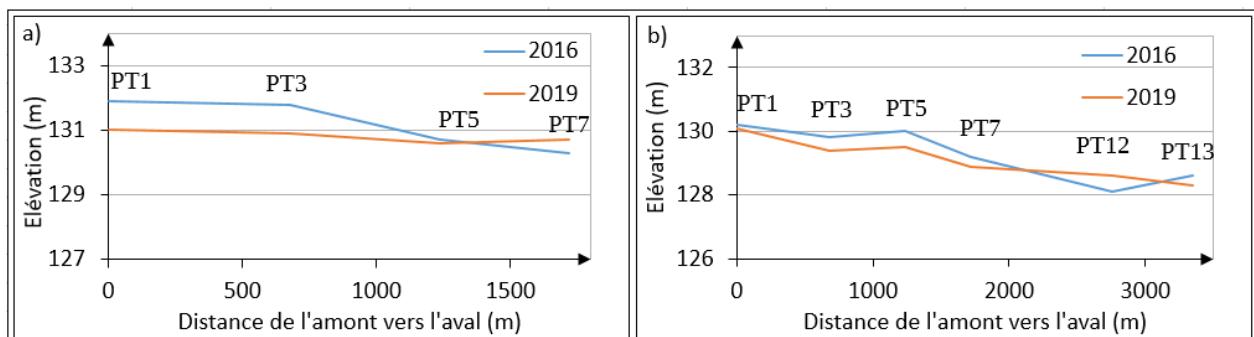


Figure 26: Graphique de l'évolution de l'altitude du chenal principal (a) et du chenal secondaire (b) en 2016 et en 2019 (Source : production personnelle)

Différence années 2016/2019		
Profil	Secondaire	Principal
PT1	-0,9	-0,1
PT3	-0,9	-0,4
PT5	-0,1	-0,5
PT7	0,4	-0,3
PT12	/	0,5
PT13	/	-0,3
Moyenne	-0,38	-0,18

Tableau 4: Différence d'altitude entre 2016 et 2019 pour le chenal principal et le chenal secondaire

Différence altitude chenaux secondaires/principaux		
Profil	2019	2016
PT1	0,9	1,7
PT3	1,5	2
PT5	1,1	0,7
PT7	1,8	1,1
Moyenne	1,33	1,38

Tableau 5: Différence d'altitude en le chenal principal et le chenal secondaire en 2016 et en 2019

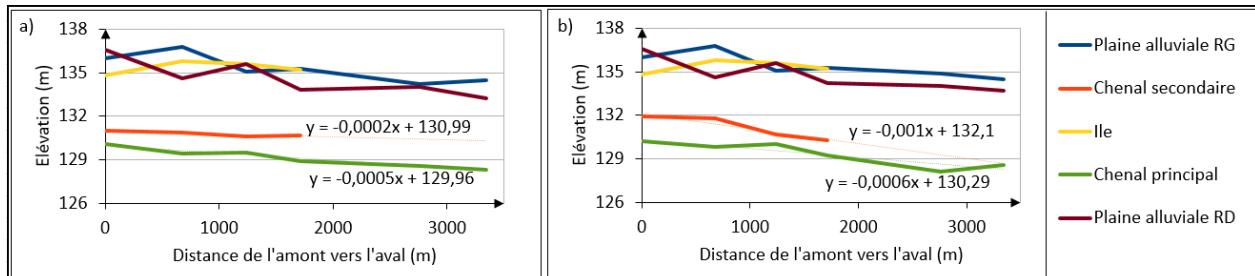
La première remarque concerne l'élévation des chenaux, qui est en général plus élevée sur les profils en 2016 qu'en 2019. Au niveau du chenal principal notamment, chacun des profils en amont du pont de Bonny-sur-Loire comporte une altitude plus élevée en 2016. Seul le profil n°12 en aval du pont montre une altitude plus faible qu'en 2019, phénomène qui s'inverse de nouveau pour le profil en travers n°13. Les différences sont assez faibles avec un maximum de 0,5 m de plus ou de moins en 2019 par rapport à 2016 et une moyenne d'environ 0,2 m de moins dans le chenal principal en 2019. Concernant le chenal secondaire, les différences d'altitude sont plus élevées au niveau du profil n°1 et du profil n°3, avec une différence maximale entre les deux années de 0,9 m de plus en 2016 qu'en 2019. Les profils n°5 et n°7 présentent quant à eux une faible différence d'altitude entre les deux années, cette dernière étant plus élevée en 2019 sur le profil n°7. La moyenne est toutefois supérieure à celle se retrouvant pour le chenal principal, avec environ 0,4 m de moins dans le chenal en 2019 par rapport à 2016.

Les différences d'altitude entre chenal principal et chenal secondaire sont assez élevées, avec une moyenne assez semblable entre les deux années, comprise entre 1,3 et 1,4 m. En 2019, la différence la plus significative se trouve au niveau du profil n°7 avec le lit du chenal secondaire 1,8 m plus haut que celui du chenal principal. Cela implique potentiellement une déconnexion du chenal secondaire lors de faibles débits.

4.3. Évolution longitudinale

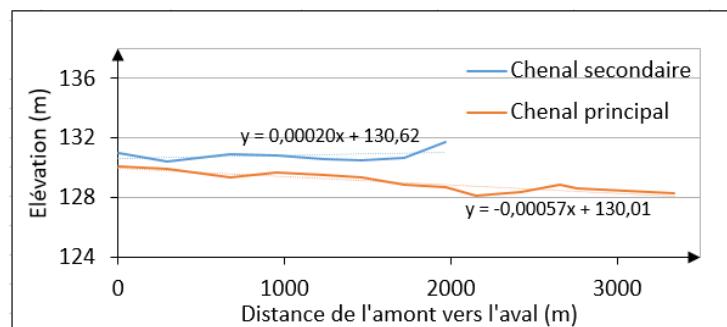
4.3.1. Pente

La pente des chenaux mais aussi l'altitude de l'île et des plaines alluviales ont été représentées pour les deux années (Fig. 27).



Compte-tenu de l'absence partielle de données en 2019 à ce niveau, l'altitude des plaines alluviales et de l'île ne varie pas ou très peu. En revanche, la pente des chenaux est différente. En 2019, la pente du chenal secondaire (0,0002 m/m) est plus faible que celle du chenal principal (0,0005 m/m). En 2016, les pentes des deux chenaux sont plus fortes, avec une pente de 0,001 m/m dans le chenal secondaire et de 0,0006 m/m dans le chenal principal, et donc une pente plus élevée dans le chenal secondaire. La pente des chenaux semble ainsi avoir diminué entre 2016 et 2019. Néanmoins, il convient de prendre en considération le nombre relativement faible de profils en travers et donc la part d'incertitude reliée à ces valeurs de pente.

C'est d'ailleurs pour vérifier cette valeur de pente que les lignes d'eau du même jour à deux endroits distincts ont été utilisées, représentant un tronçon de près de 8 km, ce qui donne une pente de 0,00047 m/m, valeur qui est cohérente. La pente a également été représentée (Fig. 28) et calculée en 2019 seulement, en ajoutant les valeurs de l'ensemble des profils.



La pente du chenal principal atteint alors une valeur de 0,00057 m/m. On remarque notamment la présence d'une baisse d'élévation du chenal au niveau du profil n°9 qui constitue le profil réalisé sous le pont.

4.3.2. Lignes d'eau

Les lignes d'eau sont étudiées dans cette section, car elles peuvent apporter de nombreuses informations sur le secteur. Une diminution de la ligne d'eau d'étiage peut notamment montrer un enfouissement du lit (incision) et ainsi une déconnexion des plaines alluviales ainsi que la présence de hautes berges. Les lignes d'eau à l'étiage sont analysées dans un premier temps. Des données sont présentes de 1988 à 2015 et recensées dans un tableau en Annexe (9). Le graphique (Fig. 29 (a)) représente ces données. Afin de savoir à quels facteurs sont dues les différences d'altitude des lignes d'eau, il convient tout d'abord de les associer à un débit. Ainsi, les lignes d'eau à l'étiage ont été associées au débit journalier à la date de mesure (tableau en Annexe (10) et Fig. 29 (b)).

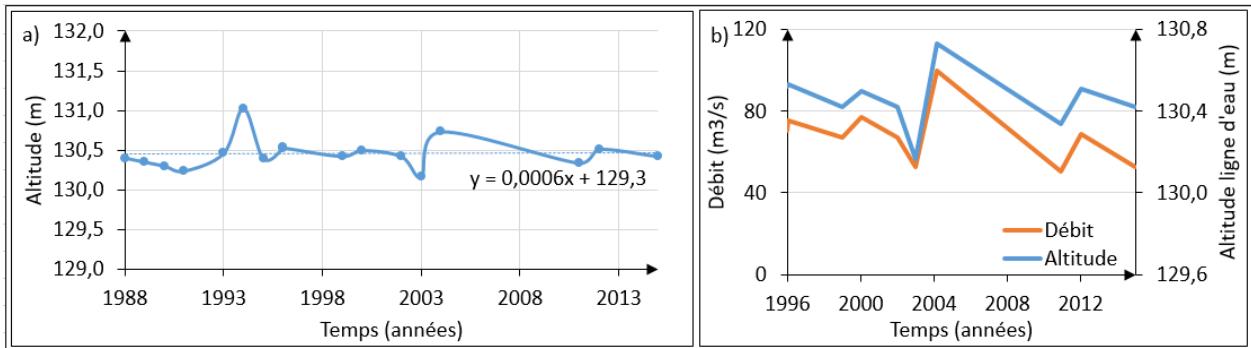


Figure 29: Graphique représentant (a) l'altitude du niveau d'eau à l'étiage de 1988 à 2015, (b) le niveau d'eau et le débit en fonction du temps (Source : production personnelle)

L'altitude du niveau d'eau à l'étiage est en moyenne de 130,46 m. Elle présente un pic en 1994, avec une altitude maximale de 131,03 m. L'altitude minimale a été mesurée en 2003 à 130,17 m. Les valeurs d'altitude sont en général assez semblables les unes aux autres. La courbe de tendance sur la Figure (29) augmente très légèrement, ce qui indique que la ligne d'eau d'étiage ne diminue pas.

Une forte corrélation se remarque entre le niveau d'eau et le débit. Néanmoins, il y a en 2003 une valeur d'altitude de ligne d'eau plus faible que le débit ne laisserait imaginer. De la même façon, en 2012 et surtout en 2015, il y a en revanche une ligne d'eau anormalement élevée par rapport au débit. La ligne d'eau semble ainsi s'élever (en tenant compte du débit) à partir de 2011. Il convient par la suite d'analyser les photographies aériennes de la zone afin de potentiellement trouver des explications concernant les changements d'altitude de lignes d'eau.

Les photographies aériennes de la zone (Annexe 11) permettent de distinguer un rétrécissement du chenal dû à la présence de barres sédimentaires, au niveau du pont en 2011, 2013 et 2015, ce qui peut expliquer la hausse de la ligne d'eau visible à cette période. La largeur du chenal au niveau du pont et donc du point de relevés est récapitulée dans ce tableau (Tab. 6).

Largeur chenal au niveau du pont	
Date	Largeur (m)
1990	226
2000	172
2011	106
2013	130
2015	120

Tableau 6: Largeur du chenal au niveau du pont de la RD926 de 1990 à 2015

Le niveau d'eau correspondant à différents débits précis (étiage, module, crue) a été modélisé (Fig. 30). Une deuxième modélisation a été réalisée avec les lignes d'eau correspondant aux débits de référence (QMNA₅, module, Q₂, Q₅, Q₁₀) représentées sur la berge présentant une problématique d'érosion (Fig. 31).

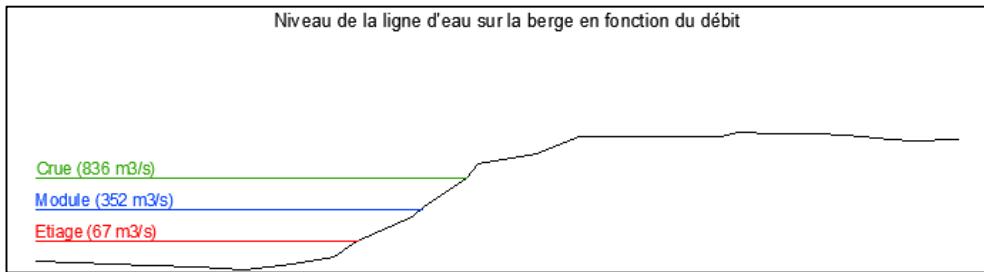


Figure 30: Représentation AutoCAD du niveau d'eau sur la berge selon différents débits (Source: production personnelle)

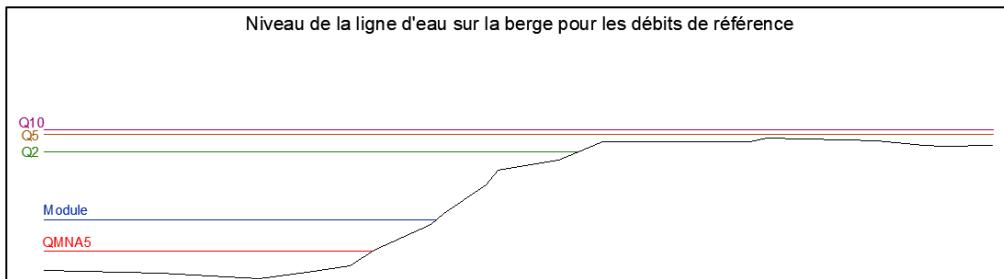


Figure 31: Représentation AutoCAD du niveau d'eau sur la berge selon les débits de référence (Source: production personnelle)

La connexion des chenaux a été analysée selon le QMNA5 (Tab. 7) et le débit d'étiage (débit moyen) (Tab. 8). La couleur verte signifie que le chenal est en eau, la couleur rouge signifie au contraire que le niveau d'eau est inférieur à la cote minimale du chenal.

Connexion des chenaux au QMNA5 en 2019		
Profil	Cote min chenal secondaire	Cote min chenal principal
PT1	131	130,1
PT2	130,4	129,9
PT3	130,9	129,4
PT4	130,8	129,7
PT5	130,6	129,5
PT6	130,5	129,4
PT7	130,7	128,9
PT8	130,1	128,7
PT9	/	128,1
PT10	/	128,4
PT11	/	128,9
PT12	/	128,6
PT13	/	128,3

Tableau 7: Connexion des chenaux au QMNA5

Connexion des chenaux à l'étiage en 2019		
Profil	Cote min chenal secondaire	Cote min chenal principal
PT1	131	130,1
PT2	130,4	129,9
PT3	130,9	129,4
PT4	130,8	129,7
PT5	130,6	129,5
PT6	130,5	129,4
PT7	130,7	128,9
PT8	130,1	128,7
PT9	/	128,1
PT10	/	128,4
PT11	/	128,9
PT12	/	128,6
PT13	/	128,3

Tableau 8: Connexion des chenaux à l'étiage

L'analyse de la connexion des chenaux au module montre que le chenal secondaire est en eau pour chaque profil. Il apparaît que le débit minimal pour lequel chacun des profils comprend un chenal secondaire en eau se situe aux alentours de 153 m³/s.

4.4. Érosion de berge et hydrologie

Depuis des années, l'idée que l'érosion de berge survient pour des débits de type crue est ancrée. On associe souvent le débit de crue de retour 2 ans (Q₂) à un débit pouvant provoquer de fortes érosions. Cependant, Camille Jourdain a déterminé un débit seuil de destruction de la végétation (et donc d'érosion de berge) aux alentours de 300 m³/s, tandis que les débits les plus efficaces étaient supérieurs à 350 m³/s, voire 500 m³/s pour la destruction de plus grandes surfaces, ce qui ne correspond pas dans le cas de son étude à des débits de crue. L'hydrologie a ici été analysée selon 3 périodes dont le taux d'érosion est connu (voir Tab. 3). La période de 2005 à 2015 est celle ayant subi le plus fort taux d'érosion, suivie par la période de 1995 à 2005, la période d'août 2015 à mai 2019 ayant subi le plus faible taux d'érosion.

Des tranches de débit ont donc été établies. Le Tableau (9) indique les pourcentages pour chaque tranche de débit et chaque période, tandis que le classement des périodes est indiqué dans le Tableau (10).

Période	< 300	300-500	500-1000	> 1000
1995-2005	62,744	18,201	15,335	3,567
2005-2015	60,159	20,153	16,950	2,410
2015-2019	67,714	17,823	11,980	2,118

Tableau 9: Pourcentage de jours selon différents intervalles

Période	< 300	300-500	500-1000	> 1000
1995-2005	2	2	2	1
2005-2015	3	1	1	3
2015-2019	1	3	3	2

Tableau 10: Classement des périodes

En comparant le taux d'érosion par période à ce tableau (Tab. 10), il est possible de voir la correspondance entre ces derniers et les tranches de débits 300 m³/s à 500 m³/s et 500 m³/s à 1 000 m³/s. La période de 2005 à 2015 est en effet celle qui présente le plus de jours où le débit était compris entre 300 m³/s et 1 000 m³/s, ainsi que le taux d'érosion le plus fort. Elle est suivie par la période de 1995 à 2005 puis 2015 à 2019. Il semblerait donc que les débits les plus impactant pour l'érosion soient compris entre 300 m³/s et 1 000 m³/s, ce qui représente dans le cas de la Loire des débits supérieurs au module mais inférieurs au Q₂, ce qui pourrait être en cohérence avec les résultats présentés dans la thèse de Camille Jourdain.

4.5. Calculs divers

4.5.1. Indice de sinuosité

L'indice de sinuosité de la Loire sur ce tronçon de 4 km est de 1,04, ce qui donne à ce tronçon une morphologie rectiligne à faiblement sinuose.

4.5.2. R_c/W

En 2015, en prenant en compte la totalité de la largeur du chenal, R_c/W= 0,70. En prenant seulement la largeur du chenal principal, ce qui paraît plus cohérent, R_c/W=1,50. En 2019, de la même façon, le rapport est respectivement égal à 0,84 pour la largeur totale et 1,80 pour la largeur du chenal principal uniquement.

4.5.3. Ratio d'aspect

Le ratio d'aspect (ou β ratio) d'une rivière peut, s'il est élevé, indiquer un potentiel à la formation de barres sédimentaires au sein du chenal. Il est ainsi intéressant de calculer ce rapport dans notre cas. 4 configurations représentatives du module ainsi que du Q₂ ont été choisies afin de calculer ce ratio, les valeurs sont données dans le tableau suivant (Tab. 11).

Profils	Ratio d'aspect (2019)			
	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4
PT1	89,7	214,7	187,1	507,6
PT3	94,1	189,4	240,4	392,7
PT5	134,9	252,8	293,4	510,3
PT7	119,2	170,3	334,8	370,1
PT12	42,8	72,2	60,3	133,9
PT13	46,4	73,2	73,1	111,3

Tableau 11: Ratio d'aspect selon 4 configurations et selon les profils

Le β ratio atteint des valeurs élevées, excepté pour les deux profils en travers situés en aval du pont dans un secteur à chenal unique. Concernant les profils en amont du pont, les configurations prenant en compte le Q₂ montrent un ratio plus important dans les profils n°5 et n°7, tandis que les configurations ayant été basées sur le module présentent un ratio supérieur pour les profils n°5 et n°1. Cela montre plus généralement que les profils en amont et notamment le profil n°5 situé en amont de la berge érodée ont un ratio d'aspect élevé qui leur fait acquérir un potentiel important à la formation de barres sédimentaires. En effet, la valeur de 50 (Malavoi et Bravard, 2011) indiquant un possible tressage, est nettement dépassée, et cela peu importe la configuration, notamment dans les profils en amont du pont.

4.5.4. Forces tractrices

La Loire est une rivière sablo-graveleuse, présentant dans le secteur étudié des sédiments hétérométriques, c'est-à-dire présentant plusieurs classes de taille. Les sables et les graviers ne présentent pas de force de cohésion comme le font les argiles, il est donc relativement aisé de déterminer les forces tractrices critiques en jeu dans le secteur. Les valeurs de forces tractrices critiques (Tab. 12) et de forces tractrices pour chaque profil en travers et pour chaque chenal (Tab. 13) sont présentées ci-dessous.

	Calcul τ_c								
	Sables			Graviers			Galets		
	min	moyen	max	min	moyen	max	min	moyen	max
$\Theta = 0,047$	0,04	0,78	1,52	1,52	19,78	38,04	38,04	114,11	190,19
$\Theta = 0,03$	0,02	0,5	0,97	0,97	12,63	24,28	24,28	72,84	121,4
$\Theta = 0,06$	0,05	1	1,94	1,94	25,25	48,56	48,56	145,68	242,8

Tableau 12: Forces tractrices critiques

Profil	τ_0 (N/m ²)			
	Chenal principal		Chenal secondaire	
	Q ₂	Module	Q ₂	Module
1	21,39	7,65	16,97	3,24
3	24,82	11,09	17,46	3,73
5	24,33	10,59	18,93	5,2
7	27,27	13,54	18,44	4,71
12	28,74	15,01	/	/
13	30,21	16,48	/	/

Tableau 13: Forces tractrices

Les forces tractrices sont plus élevées dans le chenal principal que dans le chenal secondaire. Elles ont tendance à augmenter vers les profils en aval (notamment dans le chenal principal), dû à une profondeur plus conséquente, atteignant une valeur maximale d'environ 30 N/m² au niveau du profil n°13. Connaissant à présent ces valeurs, et ayant calculé au préalable les forces tractrices critiques pour les différentes gammes de taille de sédiments se retrouvant dans la Loire, il est possible de savoir si ces différents sédiments sont susceptibles ou non d'être mis en mouvement. En guise d'exemple, le Tableau (14) détermine le déplacement ou non de chaque classe de sédiments pour un $\theta = 0,047$, dans le chenal principal du profil n°7.

	Sables			Graviers			Galets		
	min	moyen	max	min	moyen	max	min	moyen	max
τ_c	0,04	0,78	1,52	1,52	19,78	38,04	38,04	114,11	190,19
Q ₂	Déplacement	Déplacement	Déplacement	Déplacement	Déplacement	Non	Non	Non	Non
Module	Déplacement	Déplacement	Déplacement	Déplacement	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 14: Mobilisation ou non des sédiments au Q₂ et au module pour différents sédiments (profil n°7)

Sous ces paramètres, les écoulements du chenal principal du profil n°7 peuvent déplacer toute gamme de sables ou de petits graviers lors du module et du Q₂, ainsi que des graviers de taille moyenne pendant le Q₂. Il apparaît que pour les autres valeurs de θ , les résultats changent légèrement, généralement pour une taille donnée de sédiments. Cela se retrouve également dans les autres profils (taille maximale de sédiments déplacés plus élevée pour un θ de 0,03 et inversement pour un θ de 0,06). Il convient donc de garder une marge d'incertitude sur la dernière gamme de sédiments concernée par le déplacement. De plus, il est intéressant de garder à l'esprit que le tri est hétérométrique, ce qui a un impact sur la mise en mouvement des particules, qui vont être plus difficiles à mettre en mouvement. En effet, si les particules sont homométriques, la porosité va être plus élevée et les sédiments seront plus susceptibles d'être mobilisés.

5. Discussion

La Loire en amont du pont de la RD926 présente des chenaux multiples et une berge très stable en rive gauche, tandis que l'érosion en rive droite s'élève à 5 à 6 m par an. Il convient donc de trouver une explication possible à cette érosion.

Tout d'abord, la pente dans le chenal principal est élevée par rapport au reste de la Loire moyenne ainsi que par rapport au chenal secondaire. En effet, elle est d'une valeur d'environ 0,0005 m/m ce qui est cohérent avec les résultats d'Audrey Latapie. Cette pente élevée engendre une plus forte mobilisation des sédiments. Les deux chenaux possèdent des différences d'altitude pouvant être assez conséquentes, jusqu'à 2 m au maximum. Le chenal secondaire se trouve en eau à partir d'un débit minimal de 153 m³/s, valeur située entre le débit d'étiage et le module. De plus, la pente du chenal secondaire étant faible, le chenal principal est plus sollicité et concentre les écoulements et un débit important. Cela explique partiellement que l'érosion soit plus susceptible d'intervenir dans ce chenal principal en rive droite.

Le secteur étudié à Bonny-sur-Loire ne semble pas subir d'incision. En effet, l'étude des lignes d'eau d'étiage ne montre pas de diminution. De plus, les plaines alluviales sont sensiblement à la même altitude que les îles, ce qui ne montre pas de déconnexion entre ces deux unités morphologiques. Néanmoins, l'analyse de l'altitude des chenaux entre 2016 et 2019 pourrait potentiellement montrer une légère incision du lit. En effet, en 2019 le lit est légèrement plus bas qu'en 2016. Cela ne pourrait pas être comparable si les débits au moment des mesures de 2016 et 2019 différaient significativement, ce qui n'est pas le cas. Cependant, il conviendrait de réaliser des mesures sur une plus longue période avant de pouvoir affirmer que le lit subit une incision dans ce secteur. De plus, concernant les profils en aval du pont et compte tenu de l'ordre de grandeur des mobilisations de sédiments et de l'analyse des photographies aériennes et de la forme en plan, les processus d'érosion et d'accrétion attestent vraisemblablement de la présence de barres alternes migrant au fil du temps dans le chenal. Ainsi, il semblerait que ces différences d'altitude ne soient pas liées à de l'incision.

L'étude de la corrélation entre l'hydrologie et l'érosion de berge suggère que l'érosion de berge ne repose pas seulement sur des événements de crue de grande ampleur, mais peut avoir lieu pour des débits plus faibles également. Il n'est donc pas possible de miser sur une réduction des événements hydrologiques de forte ampleur afin de minimiser l'érosion de la berge.

Deux hypothèses principales peuvent être avancées pour expliquer l'érosion de la berge en rive droite en amont du pont. En effet, cette érosion est localisée et ne dépend pas uniquement de la présence de plus forts débits dans le chenal principal. Elle est majoritairement due à des configurations morphologiques particulières, citées dans la littérature comme résultant en une forte érosion de berge.

La première hypothèse serait que l'érosion de cette berge fasse partie d'un processus de formation et de translation d'un méandre. En effet, l'étude de la forme en plan montre que la berge est concave à cet endroit, et que l'érosion se décale vers l'aval tel un méandre subissant une translation. La faible sinuosité du chenal expliquerait ainsi la vitesse rapide de décalage vers l'aval (cf. Introduction). Cependant, l'érosion ne se produit pas dans un secteur considéré comme sinueux, avec un indice de sinuosité trop faible pour le désigner comme tel. De plus, le rapport Rc/W est loin des valeurs de 2 à 3 (Malavoi et Bravard, 2011) indiquant une érosion maximale du méandre.

La seconde hypothèse est que la présence de formes du lit telles que les barres sédimentaires et les îles influence les écoulements en les déviant vers la berge et en créant ainsi de l'érosion. Il a d'ailleurs été établi dans la littérature que l'accrétion des barres de milieu de chenal à courte échelle ont un rôle sur l'élargissement du chenal (Klösch et al., 2015). Cette configuration comprenant des formes du lit telles que des îles déviant les écoulements vers la berge s'est également avérée la plus efficace pour provoquer de l'érosion (Abderrezzak et al., 2014). Cette hypothèse peut être appuyée par la présence visible d'un grand nombre de barres sédimentaires dans ce secteur à chenaux multiples. De plus, le ratio d'aspect indique un très fort potentiel à la formation de barres, notamment au niveau de la berge en érosion. D'autre part, il a été montré que l'île Bon subit un dépôt de sédiments, confirmé par l'analyse de la forme en coupe entre 2016 et 2019, lorsque la berge s'érode. Ces mobilisations de sédiments s'effectuent à la même position longitudinale. Le lien entre ces deux phénomènes est ainsi très probable. La relation entre les dépôts et les pertes sur la berge est même pratiquement linéaire en prenant la partie non boisée de l'île. Cependant, cette relation linéaire ne se retrouve pas pour la partie boisée, ce qui indique que l'élargissement de l'île n'est pas la seule explication à l'érosion de la berge. Sachant également que lorsque la barre sédimentaire est submergée, elle ne dévie plus les écoulements de manière à provoquer de l'érosion de berge (Abderrezzak et al., 2014), et que l'érosion n'a pas lieu uniquement pour des débits importants, une hypothèse plus précise peut être établie. En effet, l'érosion pourrait être due à la déviation des écoulements par l'île Bon lors de débits assez importants, tandis que lors de plus faibles débits, les écoulements seraient déviés par des barres sédimentaires présentes au sein du chenal principal.

6. Conclusion

La berge de la Loire en rive droite à Bonny-sur-Loire subit une érosion, menaçant, à court et moyen termes, un captage d'eau potable et la culée d'un pont. L'objectif est de comprendre le fonctionnement morphologique de la Loire dans cette zone afin de définir des solutions pertinentes et réellement adaptées pour préserver au mieux la dynamique fluviale et les infrastructures.

Compte-tenu des résultats obtenus lors de l'analyse de la forme en plan, en coupe, et longitudinale, en relation avec l'hydrologie, ainsi que des différents calculs réalisés, deux hypothèses peuvent être établies. La première est que l'érosion de berge fait partie d'un processus de formation et de translation d'un méandre. La seconde, plus probable au vu des résultats, est que l'île Bon dévie les écoulements lors de débits importants, tandis que les barres sédimentaires présentes au sein du chenal principal exercent le même rôle lors de plus faibles débits. Afin de confirmer ou infirmer ces hypothèses, il conviendrait d'effectuer de nouvelles mesures sur une plus longue période, afin de continuer l'analyse des processus. Une nouvelle période de mesures permettrait en effet une comparaison avec la dynamique observée entre 2016 et 2019, et à terme un lien avec l'érosion de la berge.

Ce stage m'a notamment permis de développer des compétences nouvelles en terme de technicité, avec les interventions sur le terrain, mais également en termes de connaissances scientifiques concernant le sujet et donc la morphologie et la sédimentologie. Il a en effet été très utile d'effectuer l'application des connaissances scolaires dans le monde du travail, en comprenant les difficultés qui en découlent. De plus, il m'a été possible de développer une maîtrise plus accrue de certains logiciels. J'ai également pu découvrir différents aspects du milieu et du travail d'ingénieur, ainsi que du travail en équipe.

Ayant choisi de m'orienter vers ces domaines pour ce stage de 4^{ème} année, ces trois mois ont confirmé cette orientation pour une future professionnalisation.

IV- Bibliographie

- Abderrezak, K. E. K., Moran, A. D., Mosselman, E., Bouchard, J. P., Habersack, H., & Aelbrecht, D. (2014). A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers. *Journal of Hydro-environment Research*, 8(2), 95-114.
- Bontemps, A., & Auger, N. (2018). Note de problématique relative à l'érosion en rive droite (CEREMA).
- Braud, S. (2016). Evolution de la Loire au droit de Bonny-sur-Loire (DREAL Centre-Val de Loire).
- Dépret, T., Riquier, J., & Piégay, H. (2017). Evolution of abandoned channels: Insights on controlling factors in a multi-pressure river system. *Geomorphology*, 294, 99-118.
- Chen, D., & Duan, J. D. (2006). Simulating sine-generated meandering channel evolution with an analytical model. *Journal of Hydraulic Research*, 44(3), 363-373.
- Jourdain, C. (2017). *Action des crues sur la dynamique sédimentaire et végétale dans un lit de rivière à galets: l'Isère en Combe de Savoie* (Doctoral dissertation, Grenoble Alpes).
- Klösch, M., Blamauer, B., & Habersack, H. (2015). Intra-event scale bar–bank interactions and their role in channel widening. *Earth surface processes and landforms*, 40(11), 1506-1523.
- Latapie, A. (2011). *Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne* (Doctoral dissertation, Doctorat en Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Tours).
- Malavoi, J. R., & Bravard, J. P. (2011). Éléments d'hydromorphologie fluviale. Édité par l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), 2010, 224 p. En ligne sur: <http://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale>. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 5), 1.
- Mesures hydrologiques par profileur Doppler (*aDcp*), Groupe Doppler Jérôme Le Coz – Gilles Pierrefeu – Gérard Sayset – Jean-François Brochot – Pierre Marchand, *Cemagref, CNR, EDF, MEEDDAT, IRD*.
- Moghaddas, N. H., Jalilvand, R., & Soloki, H. R. (2012). The role of soil engineering in producing bank erosion and morphological changes of Sistan River. *Archives of Applied Science Research*, 4(4), 1650-1658.
- Piégay, H., Arnaud, D., & Souchon, Y. (2003). Effets de la végétation riveraine sur la géométrie des lits fluviaux: études de cas dans le Massif central (France)/Effects of riparian vegetation on river channel geometry: case studies from the Massif Central (France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 9(2), 111-127.
- Reconstruction du pont de Bonny-sur-Loire, (octobre 1950), *Ministère des travaux publics, du transport et du tourisme – Direction des routes*.
- Rinaldi, M., & Darby, S. E. (2007). 9 Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations. *Developments in Earth Surface Processes*, 11, 213-239.

ANNEXES

Annexe 1 : Activités terrain

Mesures aDcp à Chinon

La courantométrie à effet Doppler, ou *aDcp* (*Acoustic Doppler Current Profiler*) consiste à mesurer, grâce à l'effet doppler, la vitesse d'écoulement de l'eau ainsi que sa direction. L'effet doppler a été énoncé en 1842 par l'Autrichien Christian Doppler comme tel : un observateur fixe perçoit un décalage de fréquence d'une onde émise par une source mobile à une certaine vitesse. Le son parvient à l'observateur plus aigu si la source se rapproche de lui, et plus grave si elle s'en éloigne. Le décalage fréquentiel est proportionnel à la fréquence d'émission et à la vitesse radiale de la source. Ainsi, à l'aide de l'*aDcp*, un signal ultrasonore est émis puis reçu. La réflexion de ce train d'ondes par le fond correspond à un pic d'intensité acoustique dans le signal reçu. La distance du fond au capteur est alors déterminée grâce au temps de retour du signal émis, à l'angle du faisceau par rapport à la verticale et à la célérité du son dans l'eau. Le même principe est appliqué aux impulsions acoustiques servant à scruter la colonne d'eau. Selon chaque faisceau, l'écho renvoyé est découpé en séquences temporelles. Chaque séquence temporelle correspond à une cellule spatiale. L'épaisseur de cette couche d'eau est liée à la durée de la séquence correspondante. Sa distance au capteur est déterminée grâce au temps de retour du signal émis et à la célérité du son. Le découpage temporel du signal reçu permet ainsi d'établir un profil vertical des vitesses mesurées le long de chaque faisceau.

Les récentes mesures effectuées par l'équipe Surveillance des Ouvrages et des Milieux et l'équipe de bathymétrie de l'Université de Tours ont révélé des erreurs de trajectoire des mesures qui peuvent engendrer des erreurs à la fois sur l'intensité des vitesses mesurées mais également sur les directions des écoulements. Les erreurs de trajectoire sont attribuées à un dysfonctionnement du compas de l'*aDcp*. Toutefois l'origine de ce dysfonctionnement est difficile à déterminer : compas de mauvaise qualité, environnement magnétique du bateau (moteur, amarrage du sondeur), navigation (vitesse moyenne et variation, direction par rapport à l'écoulement), position du sondeur par rapport au moteur ou au bateau (perturbation des flux), système d'attache du sondeur (pas solidaire du bateau). Les deux équipes utilisent des *aDcp* différents et observent pourtant des erreurs similaires, l'hypothèse est que ces erreurs ne viennent sans doute pas du matériel en lui-même (qualité du compas), mais plutôt de la chaîne d'acquisition ou de sa mise en œuvre.

Afin de déterminer l'origine des erreurs, les deux structures ont organisé une journée de mesures tests réalisée sur la Vienne à Chinon. Trois équipes se sont formées et ont chacune effectué des mesures selon le même protocole : 1) tester sur une section simple (tracé en plan rectiligne, forme en coupe peu asymétrique) différents positionnements de l'*aDcp* par rapport au bateau ; 2) tester les mêmes configurations sur une section plus complexe (inflexion de la forme en plan, forme de la section asymétrique) ; 3) réaliser les mêmes mesures sur la section simple avec un système sans bateau mais avec un drone nautique. Pour chaque test, une calibration du compas a été réalisé, des tests de fond mobile par boucle et stationnaire ont été effectués.

Calibration SMF à Nantes

La bathymétrie consiste à mesurer l'altitude du fond d'un cours d'eau, afin d'en connaître la profondeur. Le sondeur utilisé est un sondeur multifaisceaux R2Sonic 2020. Ce sondeur dispose de 256 faisceaux d'émission acoustiques répartis le long d'une fauchée perpendiculaire à l'axe du navire. Ces faisceaux permettent de déterminer un temps de parcours et donc la profondeur à laquelle se situe le fond. Il dispose d'une fréquence d'émission sélectionnable de 200 kHz à 400 kHz et jusqu'à 700 kHz en mode haute résolution. L'utilisation de ce type de sondeur permet une couverture surfacique de la zone à lever. Ces sondeurs disposent d'une ouverture angulaire limitée, leur fauchée d'émission dépend directement de la profondeur d'eau (plus il y a de profondeur, plus l'angle peut être grand). Le grand nombre de points de mesure acquis permet ainsi d'obtenir la morphologie détaillée des fonds. Il est couplé à un système GPS avec double antenne GNSS avec précision RTK ce qui assure le positionnement et le cap du bateau en temps réel, corrigé par le réseau d'augmentation de précision Orphéon. De plus, une centrale inertuelle rectifie sa position en fonction de celle du bateau. Elle permet également de conserver la position de la mesure quand l'embarcation passe sous un obstacle. Ce système permet ainsi d'assurer une continuité de cap et de position lors des masquages GPS et de compenser totalement le pilonnement, le roulis et le tangage.

La calibration du sondeur multifaisceaux doit se faire dans un secteur suffisamment profond. Trois paramètres sont calibrés : le roulis, le tangage et le cap, afin de trouver les angles de montage entre le sondeur multifaisceaux et la centrale inertuelle. Des aller-retours sur un même profil sont effectués en bateau afin de visualiser les différences d'altitude et de les corriger par la suite. Le logiciel de navigation et d'acquisition

HYPACK a été utilisé lors de la calibration. Il permet de traiter les résultats en choisissant l'angle à calibrer puis en procédant par itération en affinant peu à peu les calculs.

Mesures topographiques à Tavers

Des levés topographiques des berges de la Loire ont été effectués à Tavers (45), site localisé en amont de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux. Des palplanches avaient été installées dans le lit du fleuve pour dévier les écoulements dans un chenal secondaire en rive droite afin d'éviter l'ensablement de la prise d'eau de la centrale. Les palplanches ont provoqué le dépôt de sédiments, ayant mené à l'établissement d'îles végétalisées, qui, malgré l'arasement des palplanches, dévient toujours les écoulements. Cette configuration favorise l'érosion de la berge en rive droite et menace le tracé de la Loire à vélo. Les différents acteurs en jeu cherchent à savoir si l'érosion est uniquement due à ces îles et donc à la mise en place à l'origine de palplanches. Dans ce contexte, le Cerema a été sollicité pour comprendre les processus en jeu dans la zone. La mesure de l'altimétrie des berges s'avère intéressante, permettant de comprendre et de modéliser le profil de ces berges, ce qui permet d'en déduire leur sensibilité à l'érosion, qui augmentera notamment si la berge est verticale et haute. Cela permettra de déterminer par la suite les endroits les plus touchés par l'érosion, ce qui facilitera l'identification des causes de l'érosion.

Les levés topographiques ont été effectués grâce à un DGPS et à une station totale, permettant de relever l'altitude et de connaître de façon précise le positionnement géographique de chaque point. Il est possible de relever la topographie uniquement grâce au Système de positionnement GNSS à l'aide du récepteur GNSS Trimble R6, qui représente un système de navigation global par satellite (GPS + GLONASS) RTK (en temps réel) corrigé par le réseau d'augmentation de précision Orphéon. Néanmoins, la présence de la végétation masque les signaux, un système de positionnement optique est alors nécessaire, avec la station Totale Trimble S6.

Plusieurs profils des berges ont été réalisés, accompagnés d'une observation détaillée des berges, afin de remarquer certaines particularités pouvant expliquer l'érosion de berge. Par exemple, le profil (plus ou moins vertical) de la berge a été noté en premier lieu, et les endroits présentant des anses d'érosion ont été remarqués. De plus, à différents endroits, l'intérêt s'est porté sur les matériaux de la berge, les différents embâcles pouvant être présents dans la zone ainsi que sur la végétation rivulaire (nom, hauteur sur la berge, système racinaire visible ou non).

Annexe 2 : Localisation des enjeux à Bonny-sur-Loire (production personnelle)



Annexe 3 : Logs numérisés des sondages du BRGM

BSS001DZEM

04328X0039/F1

Log validé

Profondeur	De 0.0	à 11.0	m	Rafraîchir
------------	--------	--------	---	------------

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.50	Sol (terre végétale)	~ ~ ~ x x	Terre végétale.		133.50
6.00	Fz		Sable grossier, graviers avec argile (alluvions de la Loire).	Holocène	128.00
11.00	Craie		Craie blanche à silex noirs.	Turonien	123.00

BSS001DZEN

04328X0040/F2

Log validé

Profondeur	De 0.0	à 31.0	m	Rafraîchir
------------	--------	--------	---	------------

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.30	Sol (terre végétale)		Terre végétale.		133.70
6.80	Fz		Sable grossier, graviers avec argile (alluvions de la Loire).	Holocène	127.20
16.00	Craie		Craie blanche, tendre avec quelques silex noirs.	Turonien	118.00
17.00			Craie blanche, tendre avec quelques silex noirs abondants.		117.00
28.00			Craie blanche à grise bancs métriques de silex (23 à 27 m).		106.00
31.00			Craie gris-vertâtre, silex noirs.		103.00

BSS001DZEP

04328X0041/FAEP2

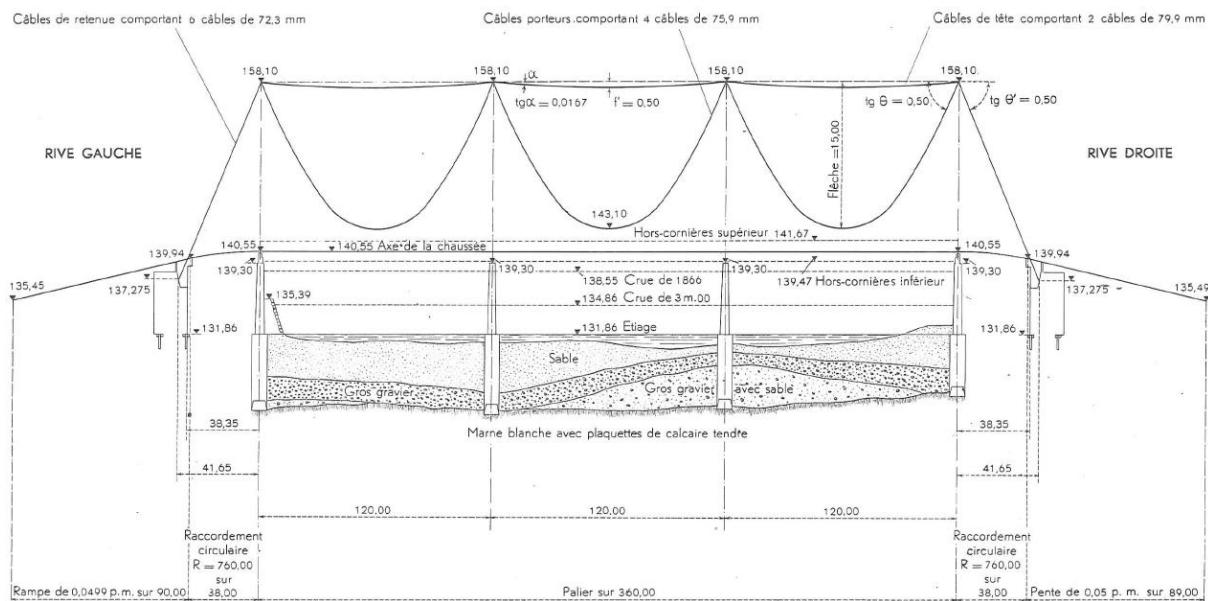
Log validé

Profondeur	De 0.0	à 30.0	m	Rafraîchir
------------	--------	--------	---	------------

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
1.00	Fz		Sable fin à moyen micacé (sable de crue).		133.00
2.00			Sable fin à moyen micacé. Nombreux galets de quartz blanc et brun.		132.00
3.00			Sable fin à moyen micacé avec très nombreux gros éléments de silex roulés.		131.00
3.02			Graviers grossiers avec gros éléments de silex roulés.		130.98
4.00			Graviers grossiers (genre gros sel) avec galets de quartz roulés.		130.00
5.00			Graviers roulés (genre gros sel) sans galets.		129.00
6.00			Sable grossier avec nombreux silex roulés et débris calcaires.		128.00
7.00			Craie crème très dure avec passages mameux crème-jaunâtre.		127.00
8.00			Craie crème très dure avec gros éléments de craie crème-grisâtre dure.		126.00
9.00			Blocs de craie dure avec rares silex.		125.00
10.00			Craie crème dure avec quelques silex noirs.		124.00
12.00			Craie crème très dure avec gros éléments de craie crème-grisâtre dure.		122.00
16.00	Craie		Blocs de craie dure avec rares silex.		118.00
17.00			Craie crème dure avec quelques silex noirs.		117.00
28.00			Craie blanche tendre avec rares silex noirs.		106.00
30.00			Craie blanche tendre avec silex abondants.		104.00
			Craie blanc-crème avec un peu de silex.		
			Craie mameuse avec rares silex.		

Annexe 4 : Log numérisé du sondage du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Blois de 1969

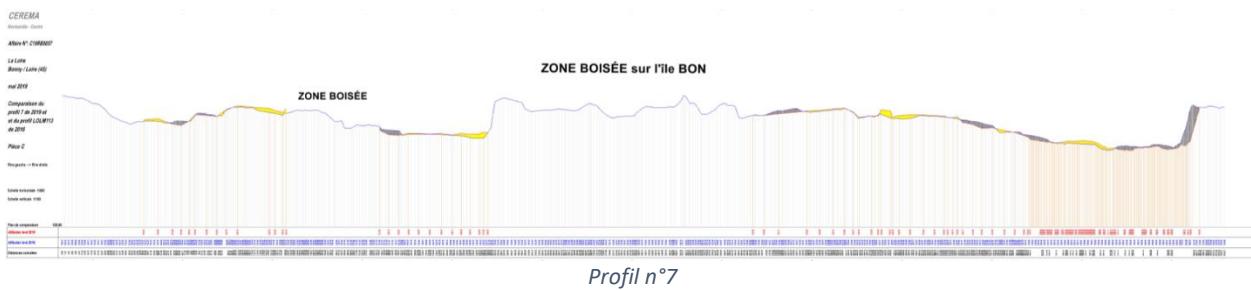
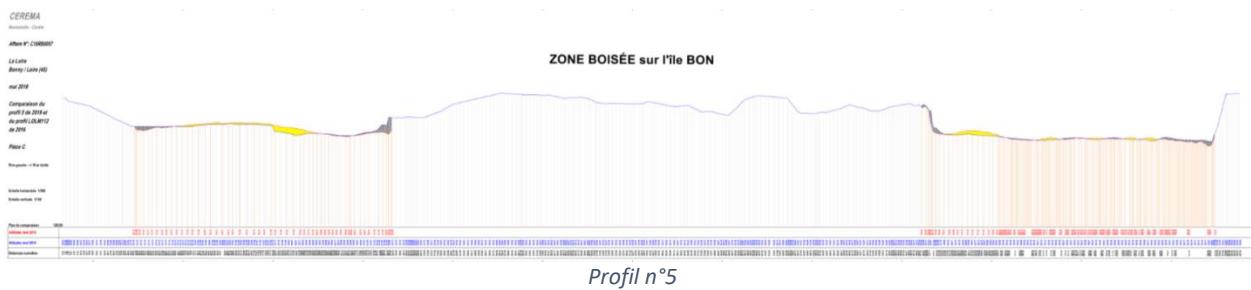
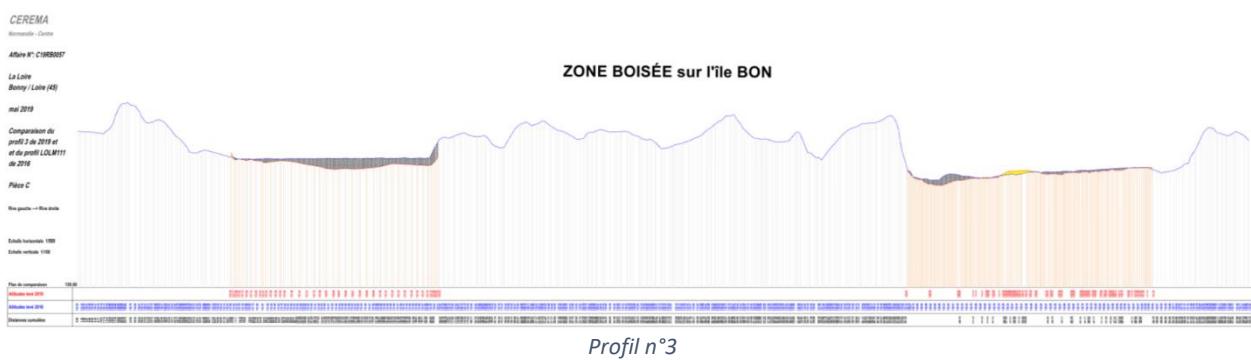
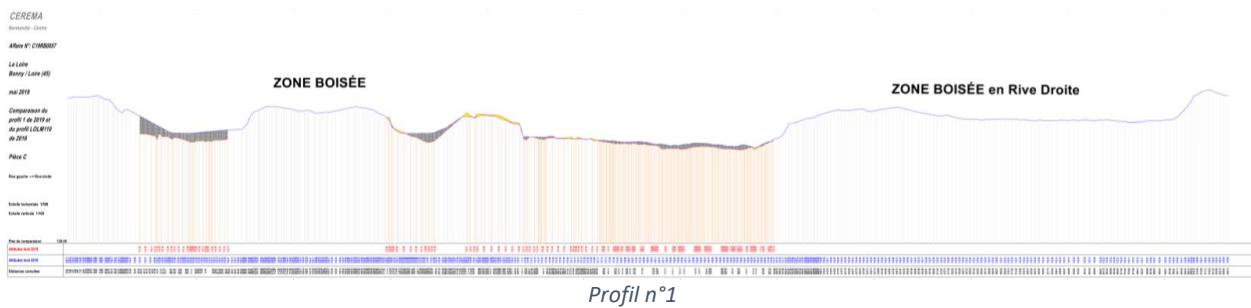
Annexe 5 : Profil en long du pont de Bonny-sur-Loire (Source: Ministère des travaux publics, du transport et du tourisme – Direction des routes, 1950)



Annexe 6 : Nombre de jours compris dans certains intervalles de débit selon les périodes

Période	Nb jours	< 300	300-500	500-1000	> 1000
1995-2005	3280	2058	597	503	117
2005-2015	3652	2197	736	619	88
2015-2019	1369	927	244	164	29

Annexe 7 : Profils en travers



mai 2019

Comparaison du
profil 12 de 2019 et
du profil LOLM114
de 2016

Pièce C

Rive gauche --> Rive droite

Echelle horizontale 1/500
Echelle verticale 1/100

Plan de comparaison	120,00
Altitudes levé 2019	120,00
Altitudes levé 2016	120,00
Distances cumulées	0,00

Profil n°12

mai 2019

Comparaison du
profil 13 de 2019 et
du profil LOLM115
de 2016

Pièce C

Rive gauche --> Rive droite

Echelle horizontale 1/500
Echelle verticale 1/100

Plan de comparaison	120,00
Altitudes levé 2019	120,00
Altitudes levé 2016	120,00
Distances cumulées	0,00

Profil n°13

Annexe 8 : Altitude des plaines alluviales, île, et chenaux selon les profils en travers, en 2016 et 2019

2016	Cote max plaine alluviale RG	Cote min chenal secondaire	Cote max île	Cote min chenal principal	Cote max plaine alluviale RD
1	136	131,9	134,8	130,2	136,6
3	136,8	131,8	135,8	129,8	134,6
5	135,1	130,7	135,6	130	135,6
7	135,3	130,3	135,2	129,2	134,2
12	134,9	/	/	128,1	134
13	134,5	/	/	128,6	133,7

2019	Cote max plaine alluviale RG	Cote min chenal secondaire	Cote max île	Cote min chenal principal	Cote max plaine alluviale RD
1	136	131	134,8	130,1	136,6
3	136,8	130,9	135,8	129,4	134,6
5	135,1	130,6	135,6	129,5	135,6
7	135,3	130,7	135,2	128,9	133,8
12	134,2	/	/	128,6	134
13	134,5	/	/	128,3	133,2

Annexe 9 : Altitude des lignes d'eau à l'étiage de 1988 à 2015

DATE	Altitude
1988	130.403
1989	130.351
1990	130.301
1991	130.239
1993	130.464
1994	131.029
1995	130.394
1996	130.527
1999	130.423
2000	130.499
2002	130.421
2003	130.166
2004	130.732
2011	130.339
2012	130.512
2015	130.423

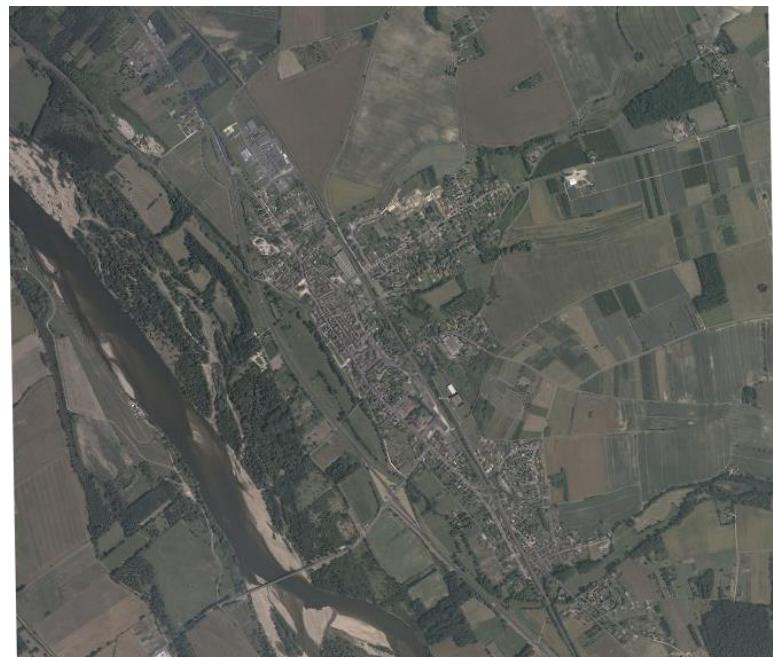
Annexe 10 : Association des lignes d'eau à l'étiage au débit le jour de la mesure

DATE	Altitude	Débit
29/09/1988	130.403	ND
24/07/1989	130.351	ND
20/08/1990	130.301	ND
01/08/1991	130.239	ND
11/08/1993	130.464	ND
20/07/1994	131.029	ND
08/08/1995	130.394	ND
05/08/1996	130.523	70.5
18/08/1996	130.532	75.3
03/08/1999	130.423	67.4
22/08/2000	130.499	77.3
05/08/2002	130.421	67
04/08/2003	130.166	53
28/09/2004	130.732	99.7
04/07/2011	130.339	50.3
20/08/2012	130.512	68.6
04/08/2015	130.423	52.6

Annexe 11 : Photographies aériennes au niveau du pont de 2011, 2013 et 2015



2011



2013



2015

Téa Piednoir
2019-2020

Titre : Synthèse bibliographique et analyse de l'évolution morphologique du lit de la Loire à Bonny-sur-Loire

Résumé : La rive droite de la Loire à Bonny-sur-Loire s'érode à hauteur de 5 à 6 m par an, menaçant un pont et un captage d'eau potable. Une synthèse bibliographique concernant l'influence des formes du lit (barres sédimentaires) et des méandres sur l'érosion de berge a été réalisée. Le secteur a été analysé selon sa forme en plan, en coupe et longitudinale, ainsi que son hydrologie. Finalement, une comparaison entre le fonctionnement morphologique du secteur et les processus identifiés dans la synthèse bibliographique a été effectuée.

Mots Clés : morphologie, sédimentologie, Loire, érosion, berge, hydrologie, méandres, barres sédimentaires

Cerema :
11 rue Laplace 41029 Blois FRANCE

Tuteur entreprise :
Coraline Wintenberger

Responsable de l'activité Surveillance des Ouvrages et des Milieux et de l'équipe d'hydrographie / Chargé d'études en hydromorphologie et sédimentologie fluviale

Tuteur académique :
Stéphane Rodrigues