

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne,  
École Doctorale de Géographie de Paris (ED 434),  
Laboratoire de Géographie Physique (LGP UMR 8591, CNRS)

---

# La Loire en crue : dynamiques hydrogéomorphologiques et réponses des sociétés riveraines depuis l'époque médiévale (Loire nivernaise et bourbonnaise)

---

Thèse présentée par **Evan Mesmin**

Sous la direction d'**Emmanuèle Gautier** et de **Gilles Arnaud-Fassetta**

Soutenue publiquement le 29 avril 2025 en vue de l'obtention du grade de docteur de  
l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Discipline : Géographie

Membres du jury

<b>Jean-Marc Antoine</b> – Professeur des Universités, Université Toulouse 2 Jean Jaurès	<b>Rapporteur</b>
<b>Gilles Arnaud-Fassetta</b> – Professeur des Universités, Université de Paris	<b>Directeur</b>
<b>Nathalie Carcaud</b> – Professeure des Universités, Agrocampus Ouest	<b>Examinatrice</b>
<b>Annie Dumont</b> – Ingénieur de Recherches, Ministère de la Culture DRASSM	<b>Examinatrice</b>
<b>Emmanuèle Gautier</b> – Professeure des Universités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	<b>Directrice</b>
<b>Laurent Lespez</b> – Professeur des Universités, Université Paris Est-Créteil	<b>Examineur</b>
<b>Pierre-Gil Salvador</b> – Professeur des Universités, Université de Lille	<b>Rapporteur</b>



*à mes parents*



# Résumé

La Loire est le fleuve le plus long de France avec un bassin versant dont la surface constitue un cinquième du territoire français métropolitain. Pour autant, la connaissance relative aux crues passées de la Loire demeure très lacunaire. En réponse, cette thèse consiste à renseigner avec précision les fluctuations de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire. Il s'agit également d'étudier les réponses des sociétés riveraines à cette activité entre Digoin et Nevers. La réalisation de ces objectifs repose sur une approche interdisciplinaire articulée autour de deux axes. Le premier vise à reconstituer l'activité hydrogéomorphologique passée de la Loire au cours du dernier millénaire à partir des archives documentaires et sédimentaires. Une chronologie inédite de 781 crues de la Loire a été reconstituée de 1380 à 2023. La détermination de l'intensité de chaque événement et l'utilisation d'indices de crue ont permis de caractériser dix périodes de forte et huit de faible activité hydrologique. L'étude stratigraphique des remblaiements sédimentaires des paléochenaux de la Loire témoigne d'une histoire hydrosédimentaire liée aux fluctuations climatiques passées : la période de l'Optimum Climatique Médiéval (X<sup>e</sup> – XIII<sup>e</sup> s.) se caractérise par une activité plutôt calme, bien plus intense par la suite au cours du Petit Âge Glaciaire (XIV<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> s.). La stratigraphie des paléochenaux a également permis la détection du passage de nombreuses crues, probablement les plus intenses. Cette signature exclusive des événements extrêmes s'explique par un transport sédimentaire fin très faible sur la Loire limitant, voire excluant, des dépôts en plaine proximale et distale. Cette configuration a été aggravée au cours des derniers siècles par l'aménagement du fleuve et l'incision du plancher alluvial.

Le second axe vise à étudier les réponses des sociétés riveraines de la Loire vis-à-vis de son activité hydrogéomorphologique. Les communautés urbaines de Nevers et Decize aménagèrent le lit de la Loire dès le XIV<sup>e</sup> s. afin de limiter la vulnérabilité de leurs ponts face aux crues, mais aussi et surtout aux migrations de la Loire. Si la temporalité des aménagements ne semble pas répondre aux différentes périodes d'activité hydrologique, certains événements marquèrent tout de même ces sociétés, en particulier ceux de 1586, 1789 et 1790. En contexte rural, l'étude des cartes anciennes et du MNT Lidar témoigne d'une adaptation des sociétés riveraines aux contraintes fluviales. Si les berges de Nevers et Decize sont fortement aménagées dès le XIV<sup>e</sup> s., l'aménagement général du lit de la Loire s'étend en contexte rural et ne s'accélère véritablement qu'à partir du milieu du XVIII<sup>e</sup> s., principalement pour servir les besoins de la navigation. Les conséquences sédimentaires et hydrogéomorphologiques des aménagements sont enregistrées dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Celui-ci entraîne une très forte incision du plancher alluvial du XVIII<sup>e</sup> s. à nos jours. La combinaison de l'effet des aménagements, de l'incision et de la diminution générale de l'activité hydrologique à partir du milieu du XX<sup>e</sup> s., provoque une très forte contraction de la bande active.

**Mots-clés :** Loire, crue, Petit Âge Glaciaire, archives historiques, archives sédimentaires, activité hydrologique.

# Abstract

The Loire River is the longest one in France, with a watershed covering a fifth of the metropolitan territory. However, knowledge of its past floods remains very poorly known. In response, the aim of this thesis is to study the hydrogeomorphological activity fluctuation of the Loire River on the one hand, and on the other hand to study the responses of riparian societies to this activity between Digoin and Nevers over the last millennium. This thesis is based on an interdisciplinary approach and two axes. The first is to reconstruct the past hydrological activity of the Loire River based on documentary and sedimentary archives over the last millennium. An unpublished chronology of 781 Loire floods has been reconstructed from 1380 to 2023. The intensity of each event has been determined and we identified 10 periods of high hydrological activity and 8 of low activity by using flood indices. The stratigraphic study of the Loire River paleochannels sedimentary fill reveals a hydrosedimentary history linked to past climatic fluctuations: the Medieval Climatic Optimum period (10<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> c.) is characterized by a relative quietness of this activity, much more intense thereafter during the Little Ice Age (14<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> c.). Paleochannel stratigraphy has also revealed the passage of numerous floods, probably the most intense. This exclusive signature of extreme events can be explained by the very low level of fine sediment transport on the Loire, and the consequent scarcity of deposits on the proximal and distal plains. This configuration has been exacerbated over the last few centuries by human impacts.

The second axis focuses on the Loire River riparian societies responses to its hydrogeomorphological activity. The Nevers and Decize urban communities managing the Loire riverbed as early as the 14<sup>th</sup> c. in order to reduce their vulnerability to the flooding and wandering. The timing of these engineering workings does not seem to correspond to the different hydrological activity periods. But some events affected these societies, in particular those of 1586, 1789 and 1790. The study of old maps and Lidar DTM shows that riparian societies in a rural context also adapted to the river's constraints. While engineering working are present on the rivers banks of Nevers and Decize from the 14<sup>th</sup> c., their number increased in rural areas and extended to the entire study area from the mid-18<sup>th</sup> c., mainly to serve the needs of navigation. The sedimentary and hydrogeomorphological consequences can be observed from the mid-18<sup>th</sup> c. We observed an important incision of the alluvial floor from the 18<sup>th</sup> c. to the present day. The combination of the effects of engineering working, incision and a general reduction in hydrological activity from the mid-XX<sup>th</sup> c., has led to a sharp contraction of the active band.

**Key words** : Loire River, flood, Little Ice Age, documentary archive, sedimentary archive, hydrological activity.

# Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas vu le jour sans l'aide précieuse de nombreuses personnes, amis, collègues, proches ou rencontrées au fil de cette aventure, et qui ont apporté leur expertise, leurs conseils éclairés, leur accompagnement attentif ou encore leur soutien indéfectible au fil des années.

J'aimerais remercier en premier lieu mes deux encadrants Emmanuèle Gautier et Gilles Arnaud-Fassetta. Merci Emmanuèle pour ta confiance, confiance que tu m'as accordée dès le Master 1 en me proposant aux côtés de Thomas Dépret un travail de recherche sur le Cher. Confiance renouvelée lorsque j'ai émis l'idée (ou que tu as émis l'idée, j'ai oublié ...) de se lancer sur une thèse. Confiance d'autant plus importante que je ne connaissais de la Loire que le nom ! Et finalement c'est cette grande confiance et cette liberté que tu accordes volontiers à tes doctorant.e.s qui m'ont permis de m'épanouir pleinement dans la réalisation de cette thèse. Merci pour ta bonne humeur, ta bienveillance, ton énergie, du labo au terrain et ta passion pour le partage. Merci Gilles pour la confiance que tu m'as également accordée dans le cadre de cette aventure. Confiance accordée alors qu'on ne se connaissait encore finalement que très peu en ce début de thèse. Parmi les quelques phrases échangées avant le début de la thèse, je retiens tes encouragements à continuer dans la recherche lors de ma soutenance de mémoire de Master 2. Au cours de cette thèse, les discussions partagées avec toi ont toujours été très enrichissantes et ont contribué à beaucoup de remises en question (scientifiques, bien sûr). Je n'attends à présent que de découvrir le troisième plus grand cours d'eau français !

Je souhaite ensuite remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de recherche, merci à Nathalie Carcaud, Jean-Marc Antoine, Annie Dumont, Laurent Lespez et Pierre-Gil Salvador.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aide financière et administrative de divers contributeurs. Je remercie ainsi l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et l'École Doctorale de Géographie de Paris pour leur confiance et l'obtention d'une bourse doctorale. Merci également au Labex Dynamite et à la Zone Atelier Loire auprès desquels j'ai pu bénéficier de plusieurs projets de recherches financés et enfin de l'ANR Dignes. Merci également au Laboratoire de Géographie Physique pour les ressources financières et techniques.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous les membres du LGP. C'est une grande chance que d'avoir pu évoluer depuis plus de sept ans maintenant dans un environnement de travail si convivial, passionné et bienveillant. Tout d'abord, un grand merci à Thomas Dépret pour les deux stages de Master, ainsi que l'aide apportée avant et au cours de ma thèse, mais aussi et surtout pour nos longues discussions sur ce que sont les avantages et les galères d'une thèse et de ses suites. Ce sont ces discussions qui m'ont permis d'aborder cette aventure en sachant à peu près dans quoi je tombais, sans quoi, elle aurait été tout autre. Merci pour la gestion administrative patiente et hors pair assurée par Michèle Pennec et Florence Portal. Un très grand merci à Ségolène Saulnier-Copard pour toute l'aide accordée, ta

gentillesse, ta bienveillance et d'avoir assuré à toi seule la continuité du fonctionnement de la plateforme sédimento lors du déménagement de Meudon à Thiais ! Merci à Clément Vermoux pour ta disponibilité et ta motivation sur le terrain. Merci à Frédéric Gob pour l'aide et le soutien que tu m'as accordé. Merci à Denis Mercier également pour le soutien et pour avoir défendu mon projet de thèse à l'École Doctorale de Géographie de Paris. Merci à Delphine pour l'aide accordée à toutes mes diverses questions statistiques. Et finalement merci à tous les autres membres du labo, Valentine, Agnès, Nicole, Laurent, Salomé, Julie, Franck, Damien, Sébastien, Sarah, Aline, Vladimir, Charles pour les discussions des plus enrichissantes aux plus drôles de la salle café aux verres de fin de journée, c'est celles-ci qui font le plus de bien.

Et puis évidemment merci à tous les doctorant.e.s. Si le LGP est un environnement de travail idéal, c'est aussi un lieu où j'ai pu rencontrer de belles personnes que ce soit dans la salle des docs, autour d'un verre ou lors des week-ends à la Bazoches ou au bord d'une piscine. Merci à tous mes compagnons de route, notamment aux « anciens », Mélody, Yohan, Stoïl, Hippolyte, Laurence, Lucile, Quentin, dont les très beaux débuts de carrières prouvent qu'en plus d'être drôle, ce sont quand même des braves gens très intelligents, déterminés et inspirants ! Merci à mes camarades de bureaux et de promo doctorale, Élise, Audrey et Manon. C'est une chance que d'avoir pu travailler entouré de personnes aussi sympas, bienveillantes et drôles. Et merci à tous les plus jeunes doctorants Léa, Gabriel, Éva, Lucas, Thomas, Marina, Charlie, Guillaume, Émilie, Alexandre, Salomé, Amaury et Philippe qui nous montrent tous les jours par leur motivation, leur pugnacité et leurs talents inégalés dans tous les domaines de recherches, que la concurrence future sera rude ...

Un grand merci aux étudiant.e.s qui ont contribué de différentes manières à ce travail lors de leurs stages au LGP, notamment Charlie Hureau, Enora Cordeau, Gwell Cusnaru, Alice Deudon, Anastasia Gueguen, Colombe Guerry, Laura Karam, Pénélope Santerre et Iris Xifaras. J'espère ne pas vous avoir trop dégouté des analyses sédimentaires et du géoréférencement cartographique. Un très grand merci évidemment à Guillaume Martins, premièrement pour m'avoir accompagné sur les premiers terrains de thèse et deuxièmement pour n'en avoir pas eu assez et avoir signé pour un sujet de mémoire de Master 1 sur la Loire à mes côtés et à ceux d'Emmanuèle (complètement fou le garçon). Je suis vraiment reconnaissant d'avoir pu travailler avec quelqu'un d'aussi motivé et enthousiaste.

Un grand merci à Annie Dumont et Marion Foucher de m'avoir invité à deux reprises sur vos terrains de prospection archéologique subaquatique (bien que la première fois la crue inattendue de la Loire en plein mois de juillet en ait décidé autrement). Il est toujours impressionnant de littéralement toucher du doigt au fond de l'eau des aménagements tout juste découverts et datés de plusieurs siècles. Merci Annie de m'avoir invité au séminaire ZAL - Artheis « Le fleuve aménagé » et dont les échanges avaient été très riches d'enseignement. Merci Marion pour les discussions, les avis, les réponses à mes

questions et plus largement toute l'aide que tu m'as accordée plus que volontiers à plusieurs reprises et qui a été déterminante dans ce parcours de thèse !

Je souhaite remercier toutes les structures qui ont contribué directement à ce travail de recherche, notamment les membres des archives de Nevers et de la Nièvre pour leur travail et leur efficacité. Je remercie également les membres de la Réserve Naturelle de la Loire Bourguignonne, en particulier Nathalie Lecrivain et Hélène Chevalier pour l'accueil chaleureux et l'intégration aux réunions de consultation de la réserve. Il est toujours plus plaisant de faire de la recherche en restant ancré dans la réalité. Merci également à tous les agriculteurs qui ont toujours donné accès avec grande volonté à leurs parcelles et qui connaissent les crues de la Loire sur le bout des doigts permettant de remettre en question 2/3 PPRIs. Merci aux équipes d'EPOC, en particulier Isabelle Billy, Olivier Ther et Louise Monnier pour les mesures XRF réalisés plus qu'efficacement ! Merci à l'équipe du SUERC, David Sanderson, Allan Cresswell et Loic Martin pour l'accueil très chaleureux à East Kilbride en Écosse et pour les mesures OSL. Merci également aux autres personnes ou structures qui ont contribué un peu plus indirectement à cette thèse, notamment à Nathalie et Laurent Noguès pour l'accueil dans leur humble demeure de Champendu à Azy Le Vif.

Merci à l'équipe de sportif composée d'Audrey et Guillaume, même si certains de nos entraînements (les meilleurs) ont plusieurs fois plus ressemblé à des discussions de comptoirs qu'à autre chose.

Enfin, merci à l'équipe très efficace de relectures finales : Lisa, Marion, Charlie et Guillaume sans quoi le nombre de coquilles aurait été encore bien plus important !

Afin de clore cette longue liste, je souhaite exprimer mes derniers remerciements et ma gratitude la plus vive à mes proches. Le plus grand privilège est d'avoir grandi au sein d'une famille qui cultive la curiosité. Merci papy, mamie, papa, maman et Marie (si tu as besoin d'une intervention sur les crues de la Loire en petite ou moyenne section tu me dis). Enfin, merci Lisa pour ton énergie, ta patience, ton soutien, merci pour tout.

# Sommaire

<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Remerciements</b>	<b>7</b>
<b>Sommaire</b>	<b>10</b>
<b>Avant-Propos</b>	<b>12</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>Partie I. Présentation du contexte scientifique, des objets d'étude, du matériel et des méthodes</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre 1. Étudier les interactions entre hydrosystème, climat et société dans le bassin ligérien : état des connaissances, enjeux et implications méthodologiques</b>	<b>25</b>
1. Interactions entre hydrosystèmes, climat et sociétés	26
2. La Loire, entre connaissances et lacunes	33
3. Nécessité d'une approche interdisciplinaire	37
<b>Chapitre 2. Cadres de la zone d'étude</b>	<b>49</b>
1. Cadre hydrologique actuel	50
2. Cadre géologique, lithologique et morphologique	57
3. Les sociétés ligériennes et la Loire	67
<b>Chapitre 3. Les sites d'étude</b>	<b>79</b>
1. Deux sites ruraux : Uxeloup et Thareau	80
2. Les trois sites urbains : Nevers, Decize et Digoïn	88
<b>Chapitre 4. Matériels et méthodes</b>	<b>97</b>
1. L'exploitation des sources documentaires	98
2. Étude cartographique de la plaine alluviale ligérienne	110
3. Étude stratigraphique et sédimentologique des paléochenaux et de leur remblaiement	122
<b>Partie II. Étude de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire</b>	<b>135</b>
<b>Chapitre 5. Variations de l'activité hydrologique de la Loire depuis le XIVe s.</b>	<b>139</b>
1. Recensement des crues de la Loire	140
2. Détection de périodes de forte et de faible activité hydrologique	146
3. Comparaison de l'activité de la Loire avec les autres bassins versants	151
4. Étude des relations entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique de la Loire	155
5. L'évolution de la saisonnalité des crues de la Loire	159
6. Les conditions de l'enregistrement et du recensement des crues	161

**Chapitre 6. L'enregistrement sédimentaire de l'activité hydrologique de la Loire** \_\_\_\_\_ **165**

1. Le paléochenal LEV : un enregistrement riche d'évènements \_\_\_\_\_ 166
2. Le paléochenal UXE : un enregistrement moins dense, mais plus ancien \_\_\_\_\_ 176
3. Le paléochenal OIE : un enregistrement d'évènements très succinct \_\_\_\_\_ 188
4. Un enregistrement conforme à ceux des rivières françaises et européennes \_\_\_\_\_ 200
5. Enseignements sur les conditions générales de la construction de la plaine alluviale au cours du dernier millénaire \_\_\_\_\_ 202

**Partie III. Réponses des sociétés à l'activité hydrogéomorphologique ligérienne** \_\_\_\_\_ **213**

**Chapitre 7. Les communautés urbaines face aux contraintes fluviales depuis le XIVe s.** \_\_\_\_\_ **217**

1. Les communautés urbaines et les crues de la Loire \_\_\_\_\_ 218
2. Les communautés face aux divagations de la Loire \_\_\_\_\_ 234

**Chapitre 8. Les sociétés rurales face à la dynamique fluviale de la Loire** \_\_\_\_\_ **263**

1. L'habitat dans et en limite du lit majeur de la Loire \_\_\_\_\_ 264
2. L'évolution de l'habitat rural face à l'érosion depuis le XVIII<sup>e</sup> s. \_\_\_\_\_ 272
3. Les plaintes des riverains vis-à-vis de la dynamique fluviale \_\_\_\_\_ 276

**Chapitre 9. Réponses morphologiques de la Loire à l'évolution hydro-climatique, à l'aménagement et aux activités anthropiques entre 1755 et 2023** \_\_\_\_\_ **281**

1. Évolution générale en plan de la Loire entre 1755 et 2023 \_\_\_\_\_ 282
2. Évolution verticale du lit de la Loire \_\_\_\_\_ 287
3. Trois secteurs d'évolution distincts \_\_\_\_\_ 288
4. Les conséquences de l'aménagement de la plaine \_\_\_\_\_ 293
5. Les extractions de granulats \_\_\_\_\_ 305
6. La part du facteur hydrologique face au facteur anthropique \_\_\_\_\_ 306

**Conclusion générale** \_\_\_\_\_ **311**

**Perspectives de recherche** \_\_\_\_\_ **317**

**Bibliographie** \_\_\_\_\_ **321**

**Sources** \_\_\_\_\_ **348**

**Liste des Figures** \_\_\_\_\_ **351**

**Liste des Tableaux** \_\_\_\_\_ **356**

**Annexes** \_\_\_\_\_ **357**

**Table des matières** \_\_\_\_\_ **369**

# Avant-Propos

## Abréviations

IGN : Institut de Géographie National

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minier

AN : Archives Nationales

AD : Archives Départementales

AM : Archives Municipales

PAG : Petit Âge Glaciaire

OCM : Optimum Climatique Médiéval

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

MNT : Modèle Numérique de Terrain

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ERT : *Electrical Resistivity Tomography*

BSS : Banque du Sous-Sol (BRGM)

## Sources documentaires historiques

Les sources archivistiques seront présentées suivant leur origine, leur cote, et lorsque cela est possible, leur folio, sous la forme suivante : AM Decize, CC/9, fol 74. Le contenu des archives documentaires a été retranscrit suivant les manières recommandées par l'ouvrage de diplomatique de **Barbiche et al. (1993)**. En ce sens, les abréviations présentes dans les textes seront restituées entièrement et les lettres retranscrites en *italique*. Par exemple, l'abréviation « pluSs » interprétée comme le mot « plusieurs » sera retranscrite « *plusieurs* ».

## Figures

Toutes les figures ont été réalisées par l'auteur de cette thèse, sauf mention du contraire.

# Introduction générale

La Loire est le fleuve le plus long de France avec un bassin versant dont la surface constitue un cinquième du territoire français métropolitain. Pour autant, notre savoir relatif aux crues de la Loire souffre d'une double lacune : des connaissances peu étendues dans le passé et des projections très incertaines pour le futur. Ces lacunes constituent un certain obstacle pour la prise en compte du risque inondation, ainsi que pour la gestion des eaux ligériennes. La Loire présente depuis le début des années 1990 une activité hydrologique plutôt calme, contrairement à nombre de cours d'eau de France et d'Europe (**Blöschl et al., 2020**). Cette période de calme hydrologique est-elle « normale » ou anormale et comment l'expliquer ? Doit-on s'attendre à des événements dont nous oublions l'intensité potentielle au fur et à mesure de leur absence prolongée, telle que ce fut le cas en Allemagne en juillet 2021 ou à Valence en octobre 2024 ?

Les travaux du GIEC sont clairs sur ce point : le changement climatique actuel, caractérisé par un réchauffement généralisé, modifie tous les régimes hydrologiques à travers le monde, mais de différentes manières (**IPCC, 2013 ; Hall et al., 2014 ; Blöschl et al., 2017 ; IPCC, 2023**). On observe notamment un allongement temporel significatif des périodes de basses eaux et d'étiages dont les périodes de sécheresse de plus en plus longues sont les responsables (**IPCC, 2008**). Sur la Loire, les modélisations prévoient une diminution des débits moyens et des débits d'étiage provoqués par l'augmentation significative des températures et de l'évapotranspiration (**Moatar et al., 2010 ; EPTB Loire, 2017**). Les prévisions concernant le devenir des crues en Europe de l'ouest sont cependant plus contrastées (**Arnell et Gosling, 2016 ; IPCC, 2023**), notamment sur la Loire (**Moatar et al., 2010 ; EPTB Loire, 2017**). Les modélisations de **Bertola et al. (2020)** réalisées à l'échelle de l'Europe indiquent que la partie amont du bassin ligérien pourrait subir une diminution de l'intensité de ses crues, tandis que l'inverse se produirait à l'aval. Ainsi, aujourd'hui aucune étude n'est parvenue à estimer avec un niveau de certitude acceptable l'évolution future de l'activité hydrologique de la Loire, que ce soit en termes d'intensité ou de saisonnalité. Cette difficulté trouve son origine dans les multiples facteurs climatiques jouant sur le régime hydrologique ligérien, dans la difficulté de modéliser les précipitations extrêmes futures, mais également en raison du manque de connaissances sur les évolutions hydrologiques passées de la Loire et plus largement des rivières de plaine de l'ouest de l'Europe. Qui plus est, la magnitude peut évoluer indépendamment de la fréquence des crues, contraste parfaitement exposé dans les Alpes par **Wilhelm et al. (2022b)**. Leur étude sédimentaire des dépôts de crues souligne que les augmentations des températures passées provoquent une baisse du nombre de crues ordinaires mais une augmentation des crues exceptionnelles. En contexte méditerranéen, l'étude de **Blöschl et al. (2019)** a bien démontré la baisse attendue dans le futur de la fréquence des crues, conséquence du changement climatique actuel. En revanche, **Tramblay et al. (2021)** souligne que celui-ci risque

également d'augmenter la magnitude de ces crues, provoquée par une intensification des pluviométries extrêmes (**Tramblay et Somot, 2018**).

S'il reste encore difficile d'estimer l'évolution future de la fréquence des crues, de leur intensité ou plus largement du régime hydrologique de la Loire, penchons-nous alors vers son évolution passée : comment le système fluvial ligérien a-t-il réagi aux fluctuations climatiques passées ? En dehors du changement climatique actuel, le dernier millénaire vit l'occurrence de deux périodes climatiques distinctes : l'Optimum Climatique Médiéval (OCM) caractérisé par un léger réchauffement du X<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> s. (**Mann et al., 2009**) et le Petit Âge Glaciaire (PAG) caractérisé cette fois-ci par un léger refroidissement de 1°C ( $\pm 0,4$ ) par rapport à l'OCM (**Jones et al., 2001** ; **Diaz et al., 2011**). Ces variations climatiques eurent des conséquences marquées en Europe aussi bien sur les écosystèmes que sur les sociétés humaines ou encore sur les systèmes fluviaux. En effet, alors que la période de l'OCM correspond à une activité hydrogéomorphologique des cours d'eau plutôt calme en Europe de l'ouest, celle du PAG y provoque une intensification. De précédentes études sur la Loire de l'amont du cours d'eau (**Steinmann, 2015** ; **Defive et al., 2017**) à son aval (**Carcaud, 2004** ; **Castanet, 2008**) ont déjà renseigné cette intensification générale de l'activité hydrogéomorphologique au cours du PAG. Or, l'étude de **Blöschl et al. (2020)** a démontré combien à l'échelle de toute l'Europe l'activité hydrologique des cours d'eau fut hétérogène du XVI<sup>e</sup> s. à nos jours. Cette hétérogénéité n'est pas connue sur la Loire. La connaissance relative aux anciennes crues et inondations y demeure en effet très lacunaire, principalement fondée sur un recensement des crues survenues au cours des deux derniers siècles « seulement ». **Champion (1858)** a bien réalisé une étude exemplaire des crues à l'échelle de la France, comprenant la Loire dont le recensement de ses crues est resté inégalé à ce jour. Celle-ci demeure tout de même encore très incomplète, notamment pour la première moitié du PAG. Ce recensement fut complété de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. à nos jours par **Lang et al. (2012)** pour les rivières françaises. Les travaux d'hydrologie de **Dacharry (1974)** et **Ramond (2015)** ont également bien rendu compte de l'évolution du régime de crue de la Loire du milieu du XIX<sup>e</sup> s. à nos jours. Malgré ces différents travaux, aucune reconstitution du régime de crue de la Loire ne fut effectuée au-delà du milieu du XIX<sup>e</sup> s. Plus largement, c'est l'activité hydrologique de tout le centre et l'ouest de la France qui demeure encore très peu documenté.

Alors de quelles manières le système fluvial ligérien a-t-il réagi aux périodes de réchauffement de l'OCM et de refroidissement du PAG ? Rendre compte des variations du régime de crue au cours du dernier millénaire et de ses liens avec les variations climatiques et atmosphériques est essentiel pour mieux prévoir les changements futurs. Ainsi, ces enjeux et ces questionnements rendent nécessaire une connaissance fine des événements passés et de leurs effets, nécessitant un allongement de l'échelle temporelle d'étude de la variabilité du régime de crue de la Loire.

Mais avant d'aller plus loin, il faut prendre en compte un facteur ayant largement influencé l'évolution des systèmes fluviaux et ayant également subi ou profité des fluctuations climatiques : les sociétés humaines. Malgré la dénomination de « fleuve sauvage » popularisée par Philip d'Édimbourg lors de sa visite au Bec d'Allier en 1988 puis reprise par l'association de défense « SOS Loire Vivante »<sup>1</sup>, les études ligériennes ont déjà bien démontré à quel point la Loire était un cours d'eau anthropisé et ce dès l'âge du Fer (Carcaud, 2004). En effet, afin de faire face aux crues et aux divagations de la Loire, les sociétés aménagèrent durablement son lit. Dion (1961) consacra son étude géohistorique aux aménagements les plus emblématiques de la Loire : les levées, ou turcies dont la dénomination est propre à la Loire. Dès le Moyen Âge, les levées ont deux buts principaux : protéger les vals des inondations et surtout limiter les divagations de la Loire afin d'assurer la navigation (Dion, 1961 ; Burnouf et Carcaud, 1999 ; Temam, 2012). Plus long cours d'eau du Royaume de France, la Loire y tient en effet une place importante, permettant de le traverser en quasi-totalité d'est en ouest. Au XIII<sup>e</sup> s., une communauté des « marchands fréquentant la Loire » s'organise avec des représentants de Roanne à Angers (Mantellier, 1864-1869). Leur but : défendre leurs intérêts et assurer la bonne navigabilité du fleuve, notamment par la réalisation d'ouvrages. Aujourd'hui, la Loire est enserrée par ses levées de Gien à son embouchure. Celles-ci sont cependant bien plus discontinues à son amont. Les multiples travaux historiques et archéologiques ont démontré la pluralité d'ouvrages présents dans le lit de la Loire qui ne se limitent pas qu'aux levées, ainsi que des différentes activités et exploitations du milieu (Burnouf et Leveau, 2004 ; Carcaud, 2004 ; Garcin et al., 2006 ; Dumont et al., 2022). D'autres études ont démontré les conséquences de ces aménagements sur le fleuve à l'aube des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. : contraction de la bande active, diminution de sa sinuosité, variation du nombre d'îles et incision du plancher alluvial (Carcaud, 2004 ; Larue, 2004 ; Gautier et al., 2007 ; Temam et Grivel, 2009 ; Grivel et al., 2011 ; Nabet et al., 2016). En somme, les activités anthropiques amenèrent volontairement et involontairement à une métamorphose complète du système fluvial ligérien. Néanmoins, une grande partie de ces études et de leurs conclusions ne concernent que la Loire moyenne et son aval.

En effet, le cours de la Loire long de plus d'une centaine de kilomètres de Digoin au Bec d'Allier et qui constitue la zone d'étude de ce présent travail (Figure i.1), a été exclu de la grande majorité des recherches, qu'elles aient été historiques, géographiques ou archéologiques. Pourtant, la dynamique ligérienne soulève de nombreuses interrogations concernant cet espace de transition, à cheval entre Loire nivernaise et bourbonnaise, entre contreforts du Massif Central et bassin Parisien, et surtout entre influence océanique et méditerranéenne. Les crues de la Loire peuvent être aussi bien provoquées par des dépressions océaniques provenant de l'Atlantique, que par des remontées cévenoles, comme ce fut le cas les 16 et 17 octobre 2024. Cette crue cévenole présenta un taux de retour supérieur à 50 ans en tête de bassin, dépassant la crue de référence de 1980. Bien que l'écrêtage du barrage de Villerest réduisît

---

<sup>1</sup> Article de Claire Legros paru dans Le Monde le 23 juillet 2024 : « Roberto Epple, hydrobiologiste : « De la Loire vivante aux bassines, les luttes pour l'eau représentent un espace démocratique irremplaçable ».

l'intensité de cette crue à un événement « commun » à Roanne, Nevers, Orléans ou encore Tours, elle constitua une pique de rappel sur l'occurrence de crue cévenole rapide et intense sur la Loire.



**Figure i.1.** Carte de localisation de la zone d'étude.

De plus, et comme le suggère la discontinuité des levées, l'aménagement général de ce secteur diffère de l'aménagement de la Loire à l'aval du Bec d'Allier. La thèse de **Temam (2012)** est la seule étude faisant un état des lieux de l'aménagement des vals sur ce secteur à partir du XVIII<sup>e</sup> s. Les deux premières levées de la zone d'étude sont réalisées à Nevers au XVII<sup>e</sup> s., mais il faut attendre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. pour voir la réalisation des premières levées rurales. Aujourd'hui, le cours de la Loire à l'amont du Bec d'Allier est bien moins contraint par les levées qu'à son amont. Cette configuration permet d'offrir la possibilité d'analyser la réponse du fleuve d'une part aux grandes crues et d'autre part, aux aménagements sur le dernier millénaire. Mais un questionnement subsiste : quel fut l'historique de l'aménagement plus ancien, notamment durant la période médiévale alors que de nombreux secteurs à l'aval se dotaient déjà de levées ? Et finalement, en l'absence de levée continues, par quelles manières les sociétés riveraines de la Loire se sont-elles accommodées des différentes contraintes du fleuve depuis l'époque médiévale ?

## ❖ Objectifs de recherche

À partir du contexte et des différents enjeux précédemment énumérés, deux objectifs principaux guident ce travail de thèse.

Le premier objectif est de **reconstituer l'activité hydrogéomorphologique passée de la Loire entre Digoin et Nevers au cours du dernier millénaire** comprenant notamment les périodes de l'OCM et du PAG. Pour ce faire, plusieurs approches peuvent être mises en place. La première sélectionnée est l'exploitation des archives documentaires. Celle-ci offre l'avantage de pouvoir relever et étudier les crues de différentes intensités, des événements communs aux plus extrêmes. Le but sera donc d'effectuer le recensement le plus exhaustif possible des crues de la Loire et de renseigner leur intensité et leur saisonnalité, ou mois d'occurrence, afin d'étudier la variabilité de l'activité hydrologique de la Loire et la variabilité de son schéma saisonnier du PAG à nos jours. La disponibilité et la richesse des archives documentaires de la zone d'étude permettent de réaliser cette étude détaillée à partir de la fin du XIV<sup>e</sup> s. La définition précise de périodes de forte activité hydrologique et de périodes plus calmes sera comparée à celles des autres bassins fluviaux déjà étudiés en France et en Europe, puis fera l'objet d'une recherche des facteurs responsables de cette variabilité historique.

Afin d'allonger temporellement l'étude de l'activité hydrologique de la Loire au-delà du XIV<sup>e</sup> s., une approche géomorphologique et sédimentaire a également été mise en place. Pour ce faire, nous allons nous concentrer sur l'étude des remblaiements des paléochenaux de la Loire. Par une étude stratigraphique, le but est de voir de quelles manières ces derniers ont enregistré la signature du passage des crues de la Loire et comment se caractérisent ces signatures. Les résultats seront confrontés aux informations historiques pour les périodes qui le permettent, en l'occurrence du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours. Plus largement, l'analyse des diverses informations obtenues vont également permettre de renseigner la construction et l'évolution géomorphologique de la plaine : de quelles manières les crues de la Loire, notamment celles de forte magnitude, participèrent-elles à sa construction ou à sa destruction ? Renseigner ces évolutions c'est aussi mieux renseigner l'environnement dans lequel les sociétés ligériennes se sont établies et ont elles-mêmes évolué. Associées aux résultats de l'objectif suivant, les données stratigraphiques vont également nous permettre d'éclairer les différentes modalités de la mobilité du fleuve : comment se caractérise cette mobilité dans le temps et dans l'espace ? Ce point est notamment essentiel pour mieux comprendre les stratégies d'aménagements des sociétés riveraines.

Le second objectif est de **comprendre les manières dont les sociétés riveraines de la Loire répondirent aux contraintes ligériennes que sont ses crues et ses migrations au cours du dernier millénaire**. Pour ce faire, une approche géohistorique a été mise en place avec l'exploitation des mêmes archives documentaires employées dans le cadre du premier objectif. En effet, leur richesse informationnelle permet d'aller au-delà de l'étude de l'aléa et d'étudier les manières dont les sociétés, notamment urbaines, ont composé avec cet aléa, ainsi qu'avec la capacité érosive et les migrations de la

Loire dès le XIV<sup>e</sup> s. Ces documents, associés aux cartes anciennes disponibles dès la fin du XVII<sup>e</sup> s. permettront de réaliser une étude fine de l'aménagement des différents sites urbains et ruraux étudiés. Ces espaces ruraux ne bénéficient cependant pas de la même disponibilité documentaire. Le matériel employé est donc essentiellement constitué de cartes anciennes, ainsi que du MNT Lidar. Afin de répondre au questionnement général de cet objectif et grâce au matériel disponible, l'étude des réponses des sociétés riveraines de la Loire aux contraintes ligériennes sera réalisée à deux échelles temporelles. Premièrement à un pas de temps court : quelles ont été les réponses aux passages de l'évènement de crue ou de la migration du fleuve ? Dans un second temps à un pas de temps plus étendu : comment les sociétés ont-elles composé sur le long terme (de l'ordre de la dizaine d'années ou du siècle) avec les contraintes fluviales ? Celles-ci ont-elles amené à des trajectoires d'aménagement en particulier ? Les réponses se feront également à deux échelles spatiales. En contexte urbain, nous nous focaliserons sur des sites portuaires en particulier, points nodaux des relations entre les sociétés et leur environnement ligérien : Nevers, Decize et Digoin. En contexte rural, l'échelle d'étude sera plus étendue, à l'échelle de la zone d'étude dans son entièreté. Le choix de ces différentes échelles temporelles et spatiales répond à l'ambition d'obtenir un éventail large des relations entre les sociétés ligériennes et leur environnement fluvial, ainsi que des réponses aux évènements de crue et aux migrations du fleuve.

Les réponses aux questions précédentes devraient nous permettre de répondre à deux questionnements plus généraux : la période de dégradation climatique du PAG, et plus particulièrement les différentes périodes d'activité hydrogéomorphologiques, ont-elles amené à des réactions particulières de la part des sociétés riveraines du fleuve ? Enfin, que l'aménagement ait été réalisé dans un but de protection des inondations, de limitation de l'action érosive de la Loire ou de contrainte de ses déplacements, quelles furent les conséquences réelles de leurs réalisations sur le système fluvial ? Les cartes anciennes disponibles dès la fin du XVII<sup>e</sup> s. et la diversité des sites d'étude disponibles nous offrent la possibilité d'étudier la part de l'activité hydrologique et celle des aménagements dans l'évolution géométrique du fleuve du PAG à nos jours.

Par ces questionnements précédemment émis, cette thèse s'intègre pleinement dans les axes de recherches de la Zone Atelier Loire (LTSER Zone Atelier Loire), du Labex Dynamite, de l'ANR Dignes et du Laboratoire de Géographie Physique à partir desquels nous avons pu bénéficier de soutiens financiers et matériels.

### ❖ Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée autour de trois parties et neuf chapitres. La **première partie** de la thèse expose le contexte scientifique, les objets d'étude, le matériel et les méthodes mises en place. Au sein de celle-ci, le **premier chapitre** présente l'état des questionnements ayant inspiré ce travail de thèse et justifie la mise en place d'une approche interdisciplinaire. Le **deuxième chapitre** précise le contexte géographique et historique de l'étude. Au sein de la zone d'étude, cinq sites d'études ont été sélectionnés

comme nous le présentons dans le **troisième chapitre**, avec deux sites en contexte rural afin de mettre en place l'approche géomorphologique et sédimentaire et trois en contexte urbain, mieux adapté à l'approche géohistorique. Le **quatrième chapitre** détaille les différentes approches et méthodologies mises en place dans le cadre de cette thèse, de l'utilisation des archives documentaires à la détection des témoins sédimentaires des évènements de crues, en passant par l'exploitation des informations géographiques issues des cartes anciennes, photographies aériennes et MNT Lidar.

La **deuxième partie** vise à répondre au premier objectif : renseigner l'activité hydrogéomorphologique de la Loire, premièrement à partir des archives documentaires avec le **cinquième chapitre**, puis à partir des archives sédimentaires au sein du **sixième chapitre**. Ces archives sédimentaires doivent également nous renseigner sur la mobilité du fleuve et plus largement sur la construction de la plaine alluviale.

Enfin, la **troisième partie** de la thèse doit répondre au second objectif concernant les relations entre les sociétés riveraines et les contraintes ligériennes. Le **septième chapitre** vise notamment à étudier ces relations en contexte urbain, plus particulièrement sur les sites de Nevers, Decize et Digoin à partir des archives documentaires particulièrement riches depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s. L'objectif du **huitième chapitre** est similaire, mais cette fois-ci en contexte rural. En l'absence d'archives documentaires, le matériel employé repose majoritairement sur les cartes anciennes et le MNT Lidar. Enfin, le **neuvième chapitre** synthétise les conséquences des activités anthropiques et plus particulièrement de l'aménagement de la Loire sur l'évolution en plan et verticale de la bande active ligérienne, ainsi que sur ses îles depuis le milieu du XVIII<sup>e</sup> s.



# Partie I

---

## Présentation du contexte scientifique, des objets d'étude, du matériel et des méthodes

---



*De gauche à droite : rive concave de la Loire à Gannay-sur-Loire (08/07/2022), inondation de la Loire à Orléans lors d'une crue le 7 février 2021, Loire à l'étiage à Nevers (19/05/2022).*

---

Le **premier chapitre** de cette **première partie** vise tout d'abord à présenter le contexte scientifique dans lequel s'inscrit ce présent travail, puis à justifier le choix de la zone d'étude à l'amont du Bec d'Allier, ainsi que la nécessité de la mise en place d'une approche interdisciplinaire. Le **deuxième chapitre** présentera les caractéristiques géographiques, géologiques, géomorphologiques et historiques de cette zone, tandis que le **troisième chapitre** s'intéressera aux spécificités des différents sites d'étude, qu'ils soient urbains ou ruraux. Enfin, le **quatrième chapitre** sera l'occasion de présenter les différentes caractéristiques de l'approche interdisciplinaire mise en place et plus particulièrement le matériel et les méthodes propres à l'approche géohistorique, à l'étude cartographique diachronique puis à l'approche géomorphologique et sédimentologique.

---



# Chapitre 1

## **Étudier les interactions entre hydrosystème, climat et société dans le bassin ligérien : état des connaissances, enjeux et implications méthodologiques**

Ce premier chapitre a pour but de contextualiser et de justifier les différents questionnements de cette thèse au regard des études précédemment réalisées dans le bassin ligérien ainsi que dans les domaines scientifiques auxquels nos questionnements se rattachent.

Comme énoncé en introduction, cette étude s'intéresse aux effets de deux périodes climatiques particulières sur la Loire, l'Optimum Climatique Médiéval (X<sup>e</sup> – XIII<sup>e</sup> s.) et le Petit Âge Glaciaire (XIV<sup>e</sup> – XX<sup>e</sup> s.), ainsi qu'aux réponses des sociétés vis-à-vis des changements hydrogéomorphologiques induits. Les effets de ces périodes, respectivement de léger réchauffement et de léger refroidissement, sur les hydrosystèmes et les sociétés en Europe de l'Ouest ont déjà fait l'objet de nombreuses études. Plusieurs zones d'ombre subsistent tout de même, notamment dans la moitié nord de la France, ainsi que dans le bassin ligérien. La totalité des études ligériennes n'en demeure pas moins un ancien et riche champ d'études. Nombre de monographies et de recherches inter et pluridisciplinaires ont permis d'atteindre une connaissance fine de l'hydrosystème ligérien et des interactions entre les sociétés ligériennes et leur environnement fluvial depuis l'époque médiévale. Cependant, une large partie de ces études s'est concentrée à l'aval de la zone d'étude, notamment en Loire moyenne, délaissant la Loire à l'amont du Bec d'Allier, comprenant la zone d'étude et dont le fonctionnement diffère du reste de la Loire à son aval. Afin d'explorer et d'améliorer les connaissances sur l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire, ainsi que sur les réponses des sociétés riveraines à cette activité passée, la mise en place d'une approche interdisciplinaire s'impose. En s'inspirant des études précédentes, différentes méthodes empruntées aux disciplines géographiques, historiques et sédimentologiques seront employées.

# 1. Interactions entre hydrosystèmes, climat et sociétés

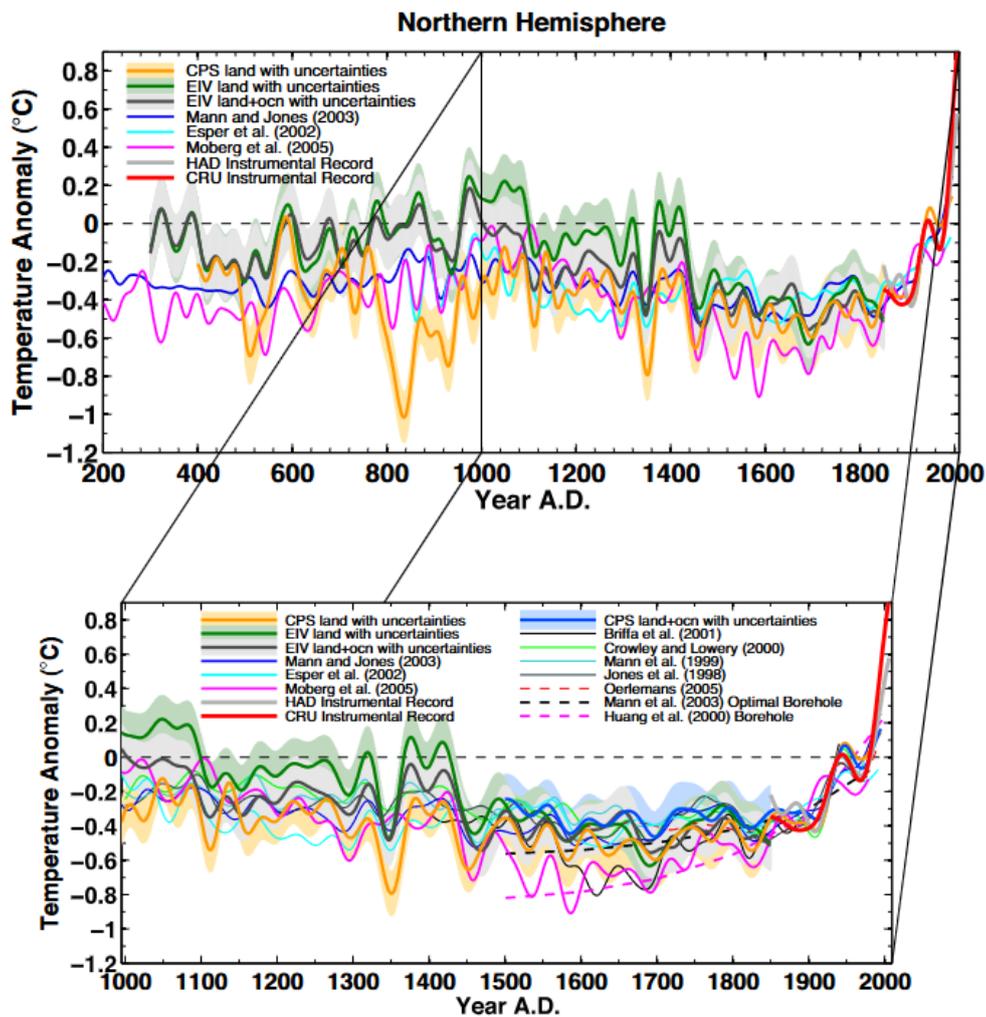
Les changements climatiques, se caractérisant par des modifications de précipitation et de température, influencent très largement les cours d'eau, notamment par leur action sur les débits liquides et solides (Amoros et Petts, 1993), deux paramètres clés du fonctionnement des hydrosystèmes (Schumm, 1977). La fréquence des crues, déterminée en grande partie par la fréquence des précipitations, joue un rôle majeur dans la définition des modèles d'érosion des chenaux fluviaux et de dépôt (Rumsby et Macklin, 1994 ; Hudson-Edward, 2007). En effet, les cours d'eau tendent constamment à établir une combinaison « dynamiquement stable » entre deux types de variable, les variables de contrôle et de réponse (Schumm, 1977 ; Malavoi et Bravard, 2010), processus conceptualisé par une balance par Lane (1955). Afin que le système tende vers un équilibre dynamique, une modification des variables de contrôle, que sont les débits liquides et solides, engendre un ajustement des variables de réponses, notamment la géométrie du lit : pente, largeur, sinuosité, etc. (Malavoi et Bravard, 2010). En bref, les changements climatiques provoquent un changement dans l'apport des débits liquides et solides, entraînant alors en réponse une modification physique du système fluvial, allant parfois jusqu'à la métamorphose des formes fluviales. Le réajustement morphodynamique du cours d'eau se répercute directement sur une autre variable de contrôle du système fluvial : les sociétés humaines (Hudson-Edward, 2007).

Ces différents constats précédemment établis par la littérature nous permettent d'introduire la question suivante : quelles furent la ou les actions des changements climatiques sur les systèmes fluviaux au cours du dernier millénaire et quelles furent les réponses des sociétés aux changements physiques des rivières ?

## 1.1. Les systèmes fluviaux face aux variations climatiques au cours du dernier millénaire

Pourquoi s'intéresser au dernier millénaire ? Les changements climatiques occurrents des deux derniers millénaires se caractérisent par la succession de plusieurs périodes de réchauffements et de refroidissements. La première, l'Optimum Climatique Romain, ou *Roman Warm Period*, s'établit du I<sup>er</sup> au début du IV<sup>e</sup> s. et se caractérise par un certain réchauffement généralisé à l'échelle de l'hémisphère nord (Ljungqvist, 2010). S'en suit un refroidissement caractérisant la période de la *Dark Ages Cold Period* ou également dénommée *Late Antique Little Ice Age* (Büntgen et al., 2016), sans traduction officielle en français. Bien que ses contours soient flous, son cœur temporel se situe entre le VI<sup>e</sup> et le VII<sup>e</sup> s. (Büntgen et al., 2022), avec des limites parfois étendues du V<sup>e</sup> au VIII<sup>e</sup> s. (Helama et al., 2017). Ces périodes climatiques ont eu des effets déterminants sur les sociétés européennes (Büntgen et al., 2011), ainsi que sur les systèmes fluviaux (Gregory et al., 1995). Bien qu'il soit envisageable d'appréhender leurs effets sur la Loire, étudier leurs répercussions sur les sociétés requiert la mise en place d'une approche archéologique, absente de cette thèse. En revanche, l'approche géohistorique par le matériel employé et dont nous traiterons de manière approfondie par la suite, permet de s'intéresser

plus précisément aux périodes plus récentes : les périodes de léger réchauffement de l'Optimum Climatique Médiéval (X<sup>e</sup> – XIII<sup>e</sup> s.) et de refroidissement du Petit Âge Glaciaire (XIV<sup>e</sup> – XX<sup>e</sup> s.). Nous allons voir que celles-ci provoquent des effets différents, mais bien marqués sur les dynamiques hydrogéomorphologiques des rivières françaises et européennes. Si de nombreuses études se sont déjà affairées à caractériser et à temporaliser ces effets, il subsiste encore de nombreuses zones d'ombre, notamment au sujet de leurs répercussions sur les sociétés riveraines.



**Figure 1.1.** Compilation de plusieurs reconstitutions des anomalies de températures du III<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s. dans **Mann et al. (2008)**.

### 1.1.1. La « douceur climatique » et le « calme hydrologique » de l'Optimum Climatique Médiéval

L'Optimum Climatique Médiéval (OCM), ou *Medieval Climate Anomaly* en anglais, constitue une période d'adoucissement climatique qui se met en place entre le X<sup>e</sup> s. et le XIII<sup>e</sup> s. (**Mann et al., 2009 ; Diaz et al., 2011**). Dès les années 1960, **Lamb (1965)** caractérise cette période par un climat doux à l'échelle mondiale entre 1000 et 1200, redéfini entre 1150 et 1300 en Europe dans une de ses études plus tardives (**Lamb, 1984**). La température générale y était 1°C (± 0,4) plus élevée que durant

la période suivante du Petit Âge Glaciaire (PAG) (**Jones et al., 2001 ; Diaz et al., 2011**). La période de l'OCM concorde avec des phases d'activités hydrologiques plutôt calmes à travers la France et l'Europe. Ce constat repose très majoritairement sur des données morpho-sédimentaires, les données historiques n'étant que peu disponibles pour ces périodes comme nous le verrons par la suite. L'activité hydrogéomorphologique se montre ainsi assez calme dans le bassin du Rhône (**Arnaud-Fassetta, 2007 ; Berger, 2015**), de même que sur la Loire (**Castanet, 2008 ; Defive et al., 2017**), dans les Alpes (**Brochier et al., 2007 ; Sabatier et al., 2017 ; Wilhelm et al., 2022**), dans le bassin du Tech (**Carozza et al., 2012**), ou plus généralement dans le reste de l'Europe (**Thorndycraft et Benito, 2006 ; Macklin et al., 2010 ; Toonen, 2013 ; Peng et al., 2020**). Ce calme hydrogéomorphologique s'expliquerait par un nombre d'évènements de crue plus faible et des conditions climatiques plus douces au général, limitant l'érosion des versants et par conséquent l'apport sédimentaire, propice à une certaine stabilité des chenaux (**Bravard, 1989**). Toutefois, ce calme reste contrasté. L'étude de **Wilhelm et al. (2022b)** démontre par exemple que si le nombre d'évènements de crue était bien plus faible durant l'OCM que durant le PAG à l'échelle de tous leurs sites d'étude alpins, l'observation est plus contrastée concernant les crues extrêmes. Certains sites observèrent une augmentation du nombre d'évènements extrêmes pendant l'OCM, qu'ils expliquent justement par le réchauffement général. Autre exemple dans le bassin de la Seine, **de Milleville (2023)** expose une sédimentation détritique de plusieurs petites rivières qui contraste avec le calme climatique de l'OCM, et qui s'explique par l'accentuation de la mise en valeur agricole, notamment céréalière, permise justement et partiellement par cette amélioration climatique, constat également observé dans le reste de l'Europe (**Gregory et al., 1995**).

### **1.1.2. Un regain généralisé de l'activité hydrogéomorphologique au cours du Petit Âge Glaciaire**

Le Petit Âge Glaciaire ou *Little Ice Age* (LIA) débute à la charnière des XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> s. et contraste avec la période précédente se caractérisant cette fois-ci par un refroidissement général (**Mann, et al., 2008 ; Mann et al., 2009 ; Figure 1.1**). Si certaines études, dont l'étude pionnière de **Lamb (1977)** et le rapport du GIEC (**IPCC, 2013**) considèrent que ce refroidissement toucha l'ensemble de la planète, c'est dans l'hémisphère nord que nous disposons du plus de données (**Wanner et al., 2022**). **Neukom et al. (2019)** précise que, contrairement au réchauffement actuel, le refroidissement du PAG ne fut homogène ni dans le temps ni dans l'espace à l'échelle de la planète. Les limites temporelles de cette période, comme les précédentes par ailleurs, varient d'un espace à l'autre et d'une méthode d'analyse à l'autre (**Carozza et al., 2014 ; Wanner et al., 2022**). En France, il est communément admis que le Petit Âge Glaciaire s'étendit du XIV<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s. et se caractérisa par des températures générales plus fraîches, par des hivers plus rigoureux et des étés plus humides que durant l'OCM et la période de réchauffement actuelle (**Le Roy Ladurie, 1967, 2004, 2006**). L'étude des dates de vendange bourguignonnes témoigne également d'un refroidissement général sur la zone d'étude (**Chuine et al., 2004 ; Ladurie et al., 2006 ; Labbé et al., 2019**). Ces reconstitutions restent néanmoins cantonnées à l'est de la Bourgogne et l'évolution climatique de la vallée de la Loire que ce soit à l'amont ou à l'aval

du Bec d'Allier reste inconnue. C'est ce qui motiva la mise en place de la thèse de Charlie Hureau (**Hureau, en cours**) et dont l'objectif est de reconstruire les paléoclimats dans le bassin versant de la Loire au cours de l'OCM et du PAG à partir d'approches dendroclimatologique et dendroisotopique.

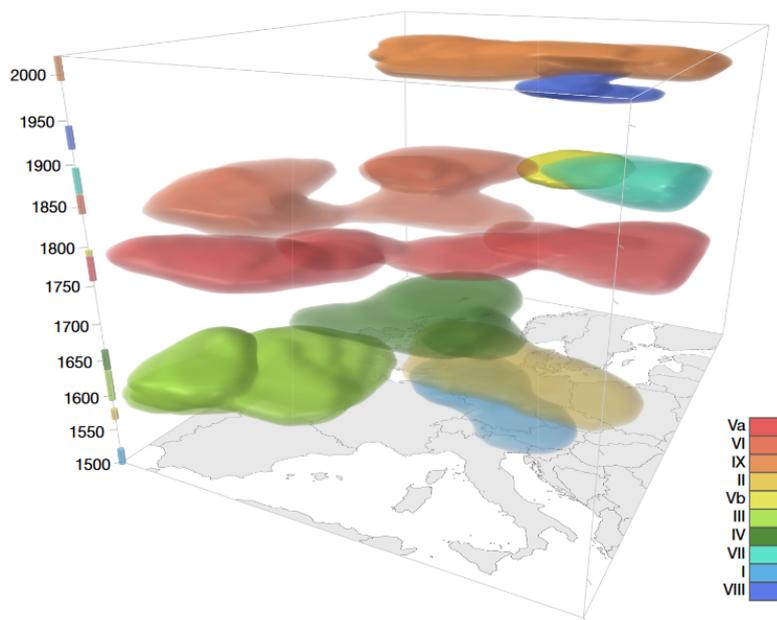
Contrairement à l'OCM, les effets du PAG sur les rivières sont bien plus généralisés, correspondant à une intensification de l'activité hydrogéomorphologique. Dès les années 1980, une nette augmentation de l'activité fluviale dans les hauts bassins alpins entre les XIV<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. est mise en relation avec l'activité climatique dégradée du PAG (**Peiry, 1987, 1988 ; Bravard, 1989 ; Salvador, 1991 ; Gautier, 1992 ; Bravard et Peiry, 1993 ; Bravard et Petit, 1997 ; Descroix et Gautier, 2002**). Cette activité est caractérisée par une augmentation du nombre de crues de forte ampleur, provoquant une aggradation des lits accompagnée d'une métamorphose fluviale, passant d'un style à méandre vers des styles plus dynamiques à tressage (**Bravard, 1989 ; Gautier, 1992 ; Berger et al., 2008 ; Salvador et Berger, 2014**). Dans le Massif Central, la période du PAG se caractérise également par une forte activité hydrosédimentaire générale (**Cubizolle, 1997 ; Cubizolle et al., 2001 ; Gob et al., 2008 ; Jacob-Rousseau et Astrade, 2014 ; Delile et al., 2016**), de même que dans les Pyrénées (**Antoine, 2012**). Ces observations se vérifient aussi en plaine. Une forte période d'activité hydrosédimentaire est notamment détectée sur la Seine (**Chaussé et al., 2008**), ainsi que sur ses affluents (**Pastre et al., 2019**) et plus particulièrement en tête de bassin (**Pastre et al., 2002**). Dans le cas de plusieurs de ses affluents, les effets du PAG sont amplifiés par les activités humaines et en particulier par la mise en labour des pentes provoquant une érosion importante (**Pastre et al., 2015, 2019 ; de Milleville, 2023**). Des périodes de forte activité hydrogéomorphologiques sont également détectées dans la vallée du Rhône (**Arnaud-Fassetta, 2007**), dans la plaine du Roussillon (**Carozza et al., 2006**) et dans la plaine inférieure du Tech (Méditerranée occidentale). **Carozza et al. (2012)** y identifient à la charnière de la fin du XIII<sup>e</sup> et du XV<sup>e</sup> s. le passage d'un régime peu dominé par les crues à un régime dominé par les crues responsables d'une augmentation des taux de sédimentations, un élargissement de la plaine d'inondation et des avulsions répétées. Une forte activité hydrosédimentaire est aussi détectée sur la Garonne (**Lescure, 2015**), constat partagé par la thèse de **David (2016)** qui note que les crues répétées du PAG remobilisèrent les sédiments stockés dans la plaine, rendant l'étude des dépôts difficile. Enfin, même constat dans le bassin versant de la Loire où le PAG correspond à un regain de l'activité hydrogéomorphologique de l'amont à l'aval (**Cubizolle, 1997 ; Ballut, 2000 ; Cubizolle et al., 2001 ; Straffin et Blum, 2002 ; Castanet, 2008 ; Piana et al., 2009 ; Steinmann, 2015 ; Piana et al., 2016 ; Defive et al., 2017**). **Castanet (2008)** identifie une période de forte activité hydrologique de 1450 à 1900, tandis que **Defive et al. (2017)** en identifient plusieurs au sein du PAG : de 1300 à 1425, puis de 1580 à 1700 et une dernière de 1800 à 1900. Sur l'Allier, **Ballut (2000)** souligne une augmentation de la fréquence des crues, davantage chargées en sables et en matériaux issus des versants durant le PAG. **Straffin et Blum (2002)** et la thèse de **Steinmann (2015)** démontrent que l'apport solide plus abondant au cours du PAG provoque une métamorphose de la Loire d'un système à chenal unique vers un système

en tresse à l'amont et l'aval direct de la Loire nivernaise et bourbonnaise. Ces différentes évolutions ont également été vérifiées en Europe (e.g. **Brown, 1998** ; **Thorndycraft et Benito, 2006** ; **Toonen et al., 2017** ; **Peng et al., 2019** ; **Peng et al. 2020**) ou même sur le continent nord-américain (**Munoz et al., 2015**).

Cependant, le PAG est loin de constituer une période climatiquement homogène. La pluviométrie et surtout les températures observèrent de nombreuses fluctuations (**Amann et al., 2015** ; **Camenish, 2015**), comme le présentent avec détail et par saison **Wanner et al. (2022)**. En Europe, trois périodes en particulier sont particulièrement froides au cours du PAG en raison d'une baisse des radiations solaires (**Luterbacher et al., 2016**) : lors des minima solaires de Spörer ( $\approx 1420 - 1550$ ), Maunder ( $\approx 1645 - 1720$ ) et Dalton ( $\approx 1780 - 1825$ ). Ces périodes furent également anormalement froides en Bourgogne (**Le Roy Ladurie et al., 2006** ; **Labbé et al., 2019**). Or, **Benito et al., (2004b)** et **Macdonald et Sangster (2017)** ont démontré que ces périodes de refroidissement ont probablement joué sur les régimes de crues, ce qui est le cas respectivement dans les bassins ibériques et du Royaume-Uni. S'y ajoutent d'autres facteurs climatiques et atmosphériques intervenant dans l'occurrence de périodes de forte activité hydrologique en Europe de l'Ouest telle que celle de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) (**Guimarães Nobre et al., 2017** ; **Rapuc et al., 2019** ; **Santisteban et al., 2019** ; **Schillereff et al., 2019** ; **Peña and Schulte, 2019** ; **Schulte et al., 2019**) ou l'oscillation atlantique multidécennale (AMO) (**Mann et al., 2009** ; **Macdonald et Sangster, 2017** ; **Barriendos et al., 2019**).

Cette variabilité climatique influe sur les cours d'eau qui n'observent pas non plus d'activité hydrologique homogène au cours du PAG (**Blöschl et al., 2020**). Si certaines études identifient bien plusieurs périodes de forte activité hydrologiques au sein du PAG (e.g. **Jacob-Rousseau, 2014** ; **Delile et al., 2016** ; **Defive et al., 2017**), ce sont celles qui exploitent les archives documentaires qui en rendent le mieux compte. En France, la reconstruction des régimes de crue au cours du PAG à l'aide de documents historiques est inégale. Par exemple, le bassin du Rhône bénéficie du plus grand nombre d'études (e.g. **Barriendos et al., 2003** ; **Jacob-Rousseau, 2003** ; **Cœur, 2008** ; **Thoumas, 2019** ; **Delizeau et al., 2014** ; **Pichard et al., 2017**) s'ajoutant aux informations issues des études sédimentaires déjà riches. C'est également le cas pour les rivières du Languedoc (**Antoine et Desailly, 1994** ; **Blanchemanche, 2009** ; **Berger et al., 2010**), celles des Pyrénées (**Desailly, 1990** ; **Antoine, 2011**) ou encore celles des Alpes (**Miramont and Guilbert, 1997** ; **Wilhelm et al., 2013**). Le travail de **Blöschl et al. (2020)** eut pour but de rassembler toutes les données historiques des rivières et fleuves européens de 1500 à nos jours afin de détecter des périodes de forte activité hydrologique illustrant très bien la variabilité de l'activité hydrologique des cours d'eau européens suivants les périodes et les espaces (**Figure 1.2**). De plus, il ressort que si les périodes de forte activité hydrologique semblent se produire durant les phases les plus fraîches du PAG, la période de forte activité hydrologique récente ( $\approx 1990 - 2020$ ) s'établit en contexte de réchauffement important, probablement provoquée par une augmentation de l'humidité (**Brönnimann et al., 2022**). Néanmoins, les informations sur les crues de la Loire utilisées

dans le travail de **Blöschl et al. (2020)** sont celles de **Champion (1858)**, très incomplètes. En conséquence, les résultats propres à la Loire ressortent comme étant peu significatif et l'insuffisance des connaissances demeure sur l'activité ligérienne du PAG à nos jours.



**Figure 1.2.** Spatialisation et chronologie des périodes de forte activité hydrologique détectées de 1500 à nos jours (dans **Blöschl et al., 2020**). Les couleurs indiquent le rang d'intensité : le rouge étant le plus élevé et le bleu le moins élevé.

Ainsi, nombre d'études ont permis de comprendre que les périodes de l'OCM et du PAG eurent des effets distincts sur les systèmes fluviaux en Europe et en France. Si celle de l'OCM apparaît comme calme, la période du PAG correspond à une augmentation générale de l'activité hydrogéomorphologique. Toutefois, ce regain d'activité ne fut pas homogène du XIV<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s. L'activité hydrologique détaillée des rivières du nord-ouest de la France, ainsi que celle de la Loire, demeure encore peu connue pour cette période. Alors quelles furent les phases hydrologiques les plus intenses et les moins intenses au cours du PAG, et quelles en furent les causes ? Connaître les causes de ces phases pourrait permettre de mieux comprendre les réponses générales des rivières de plaine de l'ouest de l'Europe aux fluctuations climatiques passées et peut être de participer à l'amélioration des projections futures (**Brönnimann et al., 2022**). Nous nous intéresserons également aux effets sur les sociétés des réponses des hydrosystèmes aux changements climatiques.

## 1.2. Dégradation climatique, activité hydrogéomorphologique et sociétés

De nombreuses études historiques, géohistoriques et climatologiques (e.g. **Le Roy Ladurie, 2004, 2006 ; Garnier, 2010 ; Pfister et Wanner, 2021**) ont démontré les effets positifs et négatifs des différentes fluctuations climatiques passées sur les sociétés, en particulier au cours des périodes de l'OCM et du PAG. L'adoucissement de l'OCM favorisa par exemple l'expansion scandinave de l'Islande à l'Amérique du Nord en passant par le Groenland (**Xoplaki et al., 2011**). Le climat de l'OCM

expliquerait en partie également le « beau Moyen Âge » ou le « beau XIII<sup>e</sup> s. », paroxysme du progrès médiéval occidental et siècle de prospérité reposant sur les hausses des rendements agricoles permises par le climat (**Le Roy Ladurie, 2004 ; Savy, 2012 ; Septsault, 2022**). À l'inverse, la période du PAG éprouva les sociétés en Europe de l'ouest avec des conditions climatiques moins favorables à la production agricole, ce qui put, selon certains auteurs, déstabiliser l'économie et par conséquent les gouvernements (**Pfister et Brázdil, 1999 ; Le Roy Ladurie, 2004 ; Litzemberger, 2015 ; Stoffel et al., 2022**). Les sociétés durent faire face à des hivers très rudes, ceux de 1608, 1709 ou encore 1789 provoquèrent famines, épidémies et augmentations des décès. Dans son récent ouvrage, **Brook (2024)** expose au XVII<sup>e</sup> s. un système économique et administratif de la Chine des Ming fragile, déstabilisé par une série d'événements climatiques entraînant plusieurs famines et dont le Petit Âge Glaciaire serait responsable. Cette déstabilisation et le manque de résilience de l'état face aux conséquences climatiques du PAG entraîne finalement la fin de la dynastie Ming.

Cependant, les sociétés durent faire face aux doubles conséquences du changement climatique du PAG. Les effets directs de l'évolution du climat sur les sociétés peuvent être distingués des conséquences du PAG sur les hydrosystèmes eux-mêmes. Dès les années 1980, **Bravard (1989)** démontre que la métamorphose des rivières alpines au cours du PAG transforma dans les Alpes certains lits fluviaux étroits et incisés en lits en tresses, ce qui fit perdre aux communautés riveraines plusieurs ponts, moulins et terres cultivables. Dans la vallée de l'Allier, les migrations latérales et la création de nouveaux chenaux exacerbées au XVI<sup>e</sup> s. provoquèrent des pertes de terrain et bouleversèrent les limites de parcelles générant des conflits (**Burnouf et al., 2001**). En 2011 était publié un numéro spécial de la revue Sud-Ouest Européen intitulé « Aléas, vulnérabilités et adaptations des sociétés du passé » destiné à étudier les réponses des sociétés du sud-ouest de la France aux fluctuations climatiques passées, principalement le PAG, ainsi qu'aux changements hydrogéomorphologiques (**Antoine et Carozza, 2011**). Ce qui en ressort c'est une diversité d'adaptation, ou d'accommodation (**Antoine, 2011**), face aux changements hydrogéomorphologiques contemporains du PAG, de l'aménagement du lit à la réorganisation des territoires (**Carozza et Puig, 2011 ; Valette, 2011**). Deux ans plus tard, un numéro spécial de la revue *Méditerranée* est entièrement dédié à l'étude du PAG, de ses limites temporelles, de ses caractéristiques et de ses conséquences sur les hydrosystèmes et les sociétés cette fois-ci sur tout le pourtour méditerranéen (**Carozza et al., 2014**).

Si les travaux précédents permirent de mieux comprendre les réponses des hydrosystèmes et des sociétés méditerranéennes au PAG, de nombreuses lacunes subsistent. Qu'en est-il des réponses des sociétés dans le reste de la France, notamment sur les larges rivières telles que la Seine ou la Loire ? Temporellement, les connaissances sont également inégales. Si la fin du PAG (XVIII<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> s.) est la mieux connue, ses premiers siècles (XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s.) le sont bien moins (**Le Roy Ladurie, 2004**), souffrant d'une disponibilité documentaire généralement réduite. De par les méthodes et les matériaux disponibles, cette étude a pour but de réduire ces lacunes, en particulier sur les siècles les plus méconnus.

Sur la Loire, nombre d'études précédentes s'y sont déjà afférees, mais comme nous allons le voir, principalement à l'aval de la zone d'étude.

## **2. La Loire, entre connaissances et lacunes**

Les études ligériennes constituent un ancien et large champ d'études, ouvert dès le milieu du XIX<sup>e</sup> s. Mais c'est véritablement à partir de la fin des années 1990 que les études se multiplient. Celles-ci couvrent alors de nombreux questionnements et approches, de l'histoire à la géographie en passant par la géomorphologie et l'archéologie. Les différentes avancées de ce champ pluridisciplinaire permirent de renseigner efficacement les dynamiques hydrogéomorphologiques quaternaire, ainsi que les relations partagées entre les sociétés et leur environnement ligérien de l'Antiquité à nos jours. Néanmoins, les différentes études sont réparties très inégalement à travers le cours de la Loire et notre secteur d'étude situé à l'amont du Bec d'Allier en est encore très largement dépourvu, justifiant en partie le choix de la zone d'étude située entre Digoin (Saône-et-Loire) et le Bec d'Allier (Nièvre).

### **2.1. Des dynamiques hydrogéomorphologiques et des relations entre les sociétés et leur environnement bien connues en Loire moyenne et aval**

Les études sur l'hydrologie de la Loire, son transport sédimentaire et son hydrogéomorphologie voient le jour dès le milieu du XIX<sup>e</sup> s. Ce développement est le fruit de la commande du gouvernement en réaction à l'urgence de mieux comprendre les dynamiques fluviales de la Loire et de l'Allier suite aux crues catastrophiques de 1846, 1856 et 1866 (**Robert, 1845 ; Comoy, 1861, 1868**). Le fleuve fait ensuite l'objet de plusieurs monographies potamologiques dès le début du XX<sup>e</sup> s. avec les travaux d'**Imbart de la Tour (1900)**, **Gallouedec (1910)**, **Babinet et Maillet (1919)** ou encore **Dion (1934)**. La thèse de Roger Dion de 1934 portant sur le val de Loire fut complétée par son histoire (ou plutôt sa « géohistoire ») des levées de la Loire dont la première version fut publiée en 1961, qualifiée de « chef-d'œuvre » par **Dacharry (1974)** et dont les hypothèses, remarques et conclusions seront plusieurs fois reprises, comparées et questionnées dans le cadre de ce présent travail. Ce travail géohistorique d'ampleur fut un des premiers en France et le premier sur la Loire. À partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s., plusieurs travaux de recherches sont publiés, que ce soit sur l'activité hydrologique de la Loire (**Pardé, 1964 ; Dacharry, 1974**), sur son hydrogéomorphologie (**Babonaux, 1970**) ou encore son transport sédimentaire (**Brossé, 1982**). Toutes ces différentes études furent mises à jour à partir des années 1990 qui voient un certain renouveau des études ligériennes dynamisées par la mise en place des Programmes Environnement Vie et Société du CNRS, et de différents programmes archéologiques et géoarchéologiques (**Burnouf et al., 2001**), notamment le PCR « Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges (**Carcaud et Garcin, 2001**) ». Puis, les recherches du bassin bénéficient à partir de 2001 de la création de la Zone Atelier du Bassin de la Loire (CNRS-INEE) ayant toujours aujourd'hui pour objectif de soutenir l'étude transdisciplinaire de l'hydrosystème et de sa coévolution avec les sociétés humaines au cours de l'Holocène (**Servain et al., 2023**). Ces structures ont permis le développement

des connaissances dans les domaines de l'hydrologie, de l'hydrogéomorphologie ou encore des relations entre les sociétés riveraines et leur environnement ligérien, et permirent de réviser les thèses et hypothèses plus anciennes (**Burnouf et al., 2001**).

Les dynamiques hydrogéomorphologiques de la Loire au cours du Quaternaire ont fait l'objet de plusieurs études, à l'amont de la zone d'étude dans le bassin supérieur par **Defive et al. (2017)**, à l'amont direct de la zone d'étude par la thèse de **Steinmann (2015)** et les travaux de l'équipe de **Straffin et al. (1999)**, **Colls et al. (2001)**, **Straffin et Blum (2002)**, ainsi qu'à l'aval en Loire moyenne par les travaux de **Carcaud (2004)**, puis par la thèse de **Castanet (2008)**. Ces recherches mirent en valeur de nombreuses métamorphoses fluviales et des périodes d'activités hydrosédimentaires distinctes contribuant à la construction de la plaine alluviale. Cependant, le dernier millénaire incluant la période du PAG reste dépourvu d'étude à part entière. C'est à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> s. que l'évolution des dynamiques hydrogéomorphologiques de la Loire, principalement à l'amont du Bec d'Allier, sont mieux connues (**Gautier et al., 2001** ; **Gautier et Grivel, 2006** ; **Gautier et al., 2007** ; **Grivel, 2008** ; **Nabet, 2013**), ainsi que sur certains de ses affluents, notamment le Cher (**Dépret, 2014**). L'activité hydrologique de la Loire de la sortie du PAG à nos jours est également bien renseignée grâce au travail de **Geneslay (1971)** et surtout de **Dacharry (1974)**, mis à jour par la thèse de **Ramond (2015)**. Parmi les différentes fluctuations hydrologiques soulignées, **Bomer (1972)**, **Grivel (2008)** et **Grivel et Gautier (2012)** remarquent une disparition des crues exceptionnelles sur la Loire moyenne au cours du XX<sup>e</sup> s. et **Gautier et al. (2007)**, **Grivel (2008)** et **Nabet (2013)** une disparition des crues d'été depuis 1925 et plus largement une saisonnalité des crues recentrée sur l'hiver. La saisonnalité des crues demeure inconnue au-delà du milieu du XIX<sup>e</sup> s. Aucune de ces études n'a tenté de reconstituer le régime de crue de la Loire sur le temps long, les études hydrologiques ligériennes reposant toutes sur l'exploitation des données de stations hydrologiques disponibles pour les plus anciennes à partir de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. à Blois (**Dacharry, 1974** ; **Ramond, 2015**).

La quasi-totalité des études précédemment citées intègre de près ou de loin l'influence anthropique sur l'hydrosystème ligérien. Dès la première moitié du XX<sup>e</sup> s., **Dion (1961)** pose les jalons des relations entre Loire et sociétés depuis l'époque médiévale à travers l'édification d'ouvrages fluviaux que ce sont les *turcies*, ou levées. Plusieurs études suivirent jusqu'à très récemment, empruntant aux approches historiques, géographiques, archéologiques, mais aussi géomorphologiques, sédimentologiques et palynologiques que ce soit sur la Loire (**Miejac, 1999** ; **Burnouf et al., 2001** ; **Carcaud et Burnouf, 2001** ; **Burnouf et al., 2002** ; **Carcaud et al., 2002** ; **Burnouf et Leveau, 2004** ; **Carcaud, 2004** ; **Garcin et al., 2006** ; **Castanet, 2008** ; **Gautier et al., 2007** ; **Miejac et al., 2009** ; **Thonnet, 2021** ; **Dumont et al., 2022**) ou sur ses affluents (**Cubizolle, 1997** ; **Ballut, 2000** ; **Cubizolle et al., 2001** ; **Dépret, 2014** ; **Vayssière, 2018**).

Parallèlement, les études archéologiques, notamment subaquatiques, ont été jusqu'à présent très nombreuses, notamment celles menées par l'équipe d'Annie Dumont (**Dumont et al., 2022**) et dont plusieurs résultats vont retenir notre attention dans le cadre de ce travail. Leurs prospections annuelles permirent le recensement et l'étude de plusieurs dizaines de structures archéologiques témoins de l'exploitation de l'environnement par les sociétés riveraines : ponts, pêcheries, digues, épaves, et divers autres aménagements fluviaux à l'amont et à l'aval de la zone d'étude (e.g. **Dumont, et al., 2007 ; Dumont et al., 2008 ; Dumont, 2010 ; Dumont et al., 2010 ; Dumont et al., 2022 ; Dumont et al., 2023b**).

Les recherches exposent toutes une anthropisation précoce du milieu et les travaux de la Zone Atelier s'attachent à en reconstituer finement la temporalité. Les exploitations et aménagements réalisés au sein du lit ou de la plaine alluviale par les sociétés modifièrent le système fluvial de manières irréversibles en Loire aval et moyenne, et ce dès l'âge du fer et l'antiquité (**Carcaud, 2004**). Les plaines sont défrichées et différentes structures mises en place (pêcheries, moulins, digues, etc.) témoignent d'une exploitation optimale du milieu fluvial (**Burnouf et al., 2001**). C'est dans ce cadre que les turcies, ancêtres des levées, prirent place dans le paysage ligérien dès le début du Moyen Âge (**Dion, 1961 ; Burnouf et Carcaud, 1999**). **Burnouf et Carcaud (1999)** soulignent que dès le XV<sup>e</sup> s. naît en Loire moyenne et angevine une véritable politique d'aménagement de la Loire et de ses affluents. Cet aménagement sert à plusieurs desseins, dont la navigation. En effet, plus long cours d'eau du Royaume, la Loire y tient une place importance, permettant de le traverser en quasi-totalité d'est en ouest. Les cités riveraines portuaires et de franchissement, points nodaux de cet aménagement ligérien, ont fait l'objet d'études approfondies, toutes situées à l'aval du Bec d'Allier. Les prospections de l'équipe d'Annie Dumont ont par exemple reconstitué à la Charité-sur-Loire l'évolution hydrogéomorphologique de la Loire en lien avec les successions des différents ponts, fruits de la constante adaptation de la communauté aux changements de tracé et de largeur du fleuve (**Dumont et al., 2014 ; Dumont et al., 2016**). À Tours, les différentes études ont également renseigné le développement urbain de la cité en adaptation aux contraintes imposées par la Loire de l'Antiquité à nos jours (**Noizet, 2003 ; Noizet et al., 2004 ; Morin et al., 2014 ; Rigot et al., 2023**), tout comme à Blois (**Morin et al., 2024**).

Les effets concrets de contrainte des aménagements sur l'hydrosystème lui-même a donné lieu à plusieurs études en Loire moyenne (**Temam et Grivel, 2009 ; Grivel et al., 2011 ; Nabet et al., 2016**), voire sur tout son cours (**Larue, 2004**), mais seulement focalisée du XVIII<sup>e</sup> s. ou du XIX<sup>e</sup> s. à nos jours. Or, les travaux archéologiques et géohistoriques réalisés en contexte urbain ont bien montré que les communautés de Tours ou la Charité-sur-Loire par exemple modifièrent le cours de la Loire dès l'Antiquité et la période médiévale. Est-ce également le cas sur la zone d'étude et sous quelle(s) forme(s) ? et surtout, quelles furent les conséquences sur le système fluvial ligérien ?

## 2.2. Une partie délaissée à l'amont du Bec d'Allier : quelles relations entre les sociétés et leur environnement ligérien ?

Nombre des études précédemment citées se sont consacrées à améliorer les connaissances dans les différents domaines cités à l'aval de la zone d'étude et principalement en Loire moyenne. La zone d'étude, située à l'amont du Bec d'Allier entre Digoin et Nevers ne bénéficie pas de la même profusion d'études universitaires et de nombreux questionnements restent en suspens.

La thèse de **Temam (2012)** eut pour objectif d'étudier l'aménagement et l'évolution des stratégies d'aménagement par les ingénieurs en Loire nivernaise du XVIII<sup>e</sup> s. à nos jours. Aucune étude ne s'est cependant portée sur l'aménagement du val bourbonnais et nivernais (à l'amont du Bec d'Allier) au-delà du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Concernant les prospections archéologiques, seules quelques-unes ont été menées à Nevers autour du lit de la Loire sans qu'elles n'aient permis d'étudier de structures (**Dumont et al., 2022**). D'autres sur le site d'Uxeloup ont révélé l'existence de plusieurs mottes castrales, potentiellement en lien avec les déplacements passés de la Loire (**Garcia et Dumont, 2014**). Plusieurs furent également menées à l'amont de la zone d'étude (**Dumont et al., 2007, 2008**). Associées aux travaux de **Steinmann (2015, 2017)**, ces recherches démontrent que même sur une zone (Digoin – Baugy, Saône-et-Loire) dépourvue d'aménagements lourds tels que les levées, le facteur de contrôle anthropique prend l'ascendant sur le facteur de contrôle climatique à partir du Moyen Âge dans l'évolution de la plaine alluviale de la Loire. Les travaux de **Dion (1961)** ne se sont par ailleurs que très peu portés à l'amont du Bec d'Allier, probablement en raison de l'absence de levée, mais c'est précisément cet aspect qui nous intéresse ici. Si la période de développement des levées (mi XVIII<sup>e</sup> s. – XIX<sup>e</sup> s.) est assez bien connue, quoique certaines informations aient besoin d'être clarifiées comme nous le verrons, qu'en est-il de l'aménagement des vals de la Loire à l'amont du Bec d'Allier pré-levées ? Ces vals étaient-ils aménagés ? Si oui depuis quand, comment et pourquoi ? Et les trajectoires d'aménagement furent-elles comparables à celles de la Loire moyenne et aval ?

Marion Foucher, dans le cadre des prospections thématiques d'archéologie subaquatique annuelles et de son postdoctorat, commença à mener l'enquête à Nevers avec des premiers résultats significatifs entre la fin du XIV<sup>e</sup> s. et le début du XV<sup>e</sup> s. (**Foucher, 2020 ; Foucher, 2023b**), notamment dans le cadre des réponses de la communauté de Nevers aux divagations de la Loire (**Foucher, 2023c**). Ce premier exemple de Nevers nous montre que même à l'amont du Bec d'Allier où le commerce fluvial fut moins développé (cf. **chapitre 2**), les communautés urbaines s'adaptent à l'activité hydrogéomorphologique du fleuve dès le XIV<sup>e</sup> s. Cette thèse est l'occasion de compléter ces observations d'une part temporellement du XIV<sup>e</sup> s. jusqu'au XIX<sup>e</sup> s., et d'autre part spatialement avec d'autres cas d'étude en contexte urbain et rural qui seront présentés dans le **troisième chapitre**.

En conclusion, si la Loire bénéficie d'une grande quantité d'études, il subsiste encore de nombreuses lacunes auxquelles ce travail de thèse doit répondre. Premièrement, aucune étude exhaustive

des crues passées de la Loire et de l'évolution du régime de crue sur le long terme n'a encore été effectuée. C'est ici l'occasion de réaliser le premier recensement exhaustif des crues ligériennes du Moyen Âge à nos jours. Deuxièmement, la grande majorité des études ligériennes traitant des dynamiques hydrogéomorphologiques l'ont été en Loire moyenne et aval, la zone d'étude en étant quasi totalement dépourvue et notamment d'études sur la construction de la plaine alluviale. Ces deux premiers points doivent nous permettre de mieux comprendre la réponse de l'hydrosystème ligérien aux fluctuations climatiques passées au cours du dernier millénaire et notamment ses réponses à l'OCM et au PAG. Enfin, les études précédentes concernant les relations entre les sociétés riveraines et leur environnement ligérien l'ont également été majoritairement à l'aval de la zone d'étude. Dans un contexte général de très faible développement des levées avant le milieu du XVIII<sup>e</sup> s., il sera intéressant d'étudier les modalités de l'aménagement et plus largement des relations entre les sociétés riveraines, qu'elles soient urbaines ou rurales, et leur environnement ligérien dans des vals où elles restent encore très méconnues.

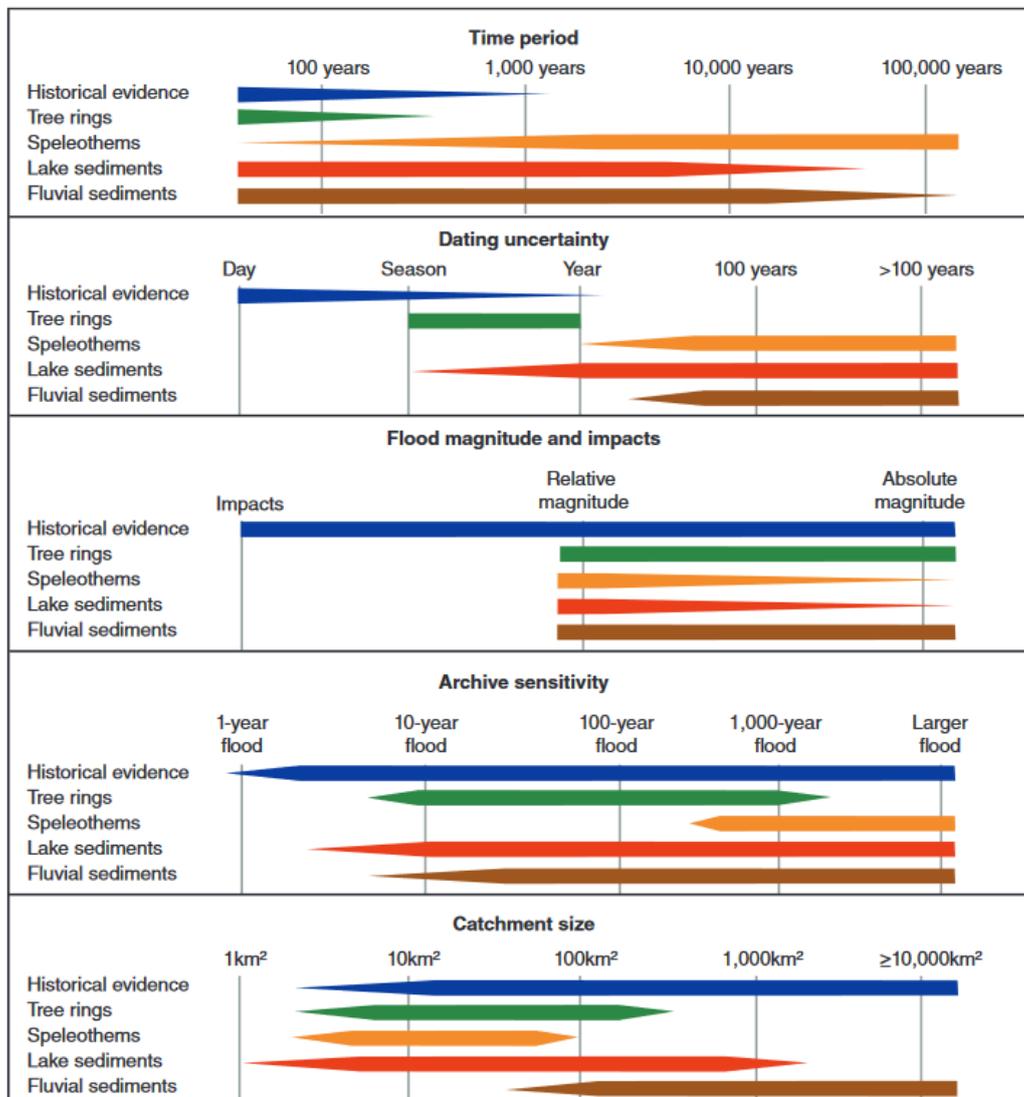
À l'image du champ d'études ligérien dans son ensemble, ces différents questionnements se tiennent aux croisements des disciplines géographiques, géomorphologiques, historiques et archéologiques. Ainsi, les réponses que doit apporter ce travail de thèse reposent sur la mise en place d'une approche interdisciplinaire.

### 3. Nécessité d'une approche interdisciplinaire

Afin de pallier aux lacunes de connaissances en contexte ligérien et répondre aux différents questionnements émis en introduction, la mise en place de plusieurs méthodes et approches empruntées à différentes disciplines s'impose.

Les travaux de **Wilhelm et al., (2018a)** et **Schulte et al. (2019)** ont établi un état des lieux des différentes méthodologies utilisables pour l'étude des événements de crues passés, de leur impact hydrogéomorphologique sur le bassin versant ainsi que sur les sociétés. Celles-ci empruntent à la sédimentologie (**Baker, 2008**), à la dendrologie (**Ballesteros-Canovas et al., 2015**), mais peuvent également reposer sur l'utilisation des spéléothèmes ou l'utilisation d'archives documentaires. Ces différentes méthodes et approches permettent d'obtenir des informations à différents degrés de précision, et recourent des temporalités qui varient également (**Figure 1.3**). La multiplicité des approches et des études à travers le monde a amené à la création en 2015 du *Floods Working Group* (PAGES) prônant une utilisation complémentaire des différentes méthodologies (**Schulte et al., 2019**). Néanmoins, dans le cadre de la Loire et plus particulièrement de la zone d'étude, certaines des méthodes doivent être mises de côté. Comme nous le verrons dans le **deuxième chapitre**, l'activité pastorale en bord de Loire associée à une sécurisation de la navigation a entraîné une réduction, voire une suppression totale, de la ripisylve ligérienne au cours du dernier millénaire (**Gautier et al., 2007**). En conséquence, les arbres anciens sont très rares rendant l'approche dendrologique inopérante dans le cadre de cette

étude. De même, en l'absence de grottes abritant des spéléothèmes, de lacs, étangs ou toute autre surface humide suffisamment ancienne, nous avons orienté notre recherche vers l'étude des archives fluviales et des documents historiques afin de retracer l'histoire hydrogéomorphologique de la Loire.



**Figure 1.3.** Diagramme conceptuel avec les caractéristiques principales des différents proxies dans le cadre d'étude des crues passées (dans **Wilhelm et al., 2018a**).

La décision de la mise en place de cette approche interdisciplinaire se justifie également par le fait qu'elle répond parfaitement au second objectif principal de cette thèse. L'exploitation des archives documentaires appuyée par l'étude des cartes anciennes et du MNT Lidar doit nous permettre d'étudier des relations entre les sociétés et leur environnement par une approche géohistorique.

### 3.1. L'histoire hydrologique de la Loire par les archives documentaires

Cette présente étude n'est pas la première à exploiter les archives documentaires afin d'étudier l'évolution passée du régime de crue de la Loire, sujet qui constitue un vaste champ de recherche. Nombre d'entre elles ont déjà démontré l'utilité des sources écrites (**Brázdil et al., 2006 ; Glaser et al.,**

2010 ; Brázdil et al., 2012 ; Antoine et Gazelle, 2013 ; Kjeldsen et al., 2014 ; Benito et al., 2015 ; Salinas et al., 2016 ; Blöschl et al., 2020), ou même des marques de crue (Macdonald, 2006 ; Renard, 2023) pour le recensement des crues anciennes. Les documents utilisés par les études précédentes sont très variés : annales et chroniques, journaux et témoignages personnels, documents administratifs et/ou gouvernementaux, documents d'ingénieurs, journaux et observations in situ à partir du XVIII<sup>e</sup> s. et surtout du XIX<sup>e</sup> s., etc. (Brázdil et al., 2012). Alors qu'est-ce qui justifie leur utilisation ? Les sources écrites permettent d'obtenir des informations sur les événements de crue avec une grande précision temporelle du Moyen Âge à nos jours (Figure 1.3). C'est la seule méthode, notamment parmi celles présentées dans la Figure 1.3, qui permet d'enregistrer la plus grande variété d'événements de crue en fonction de leur intensité, des événements ordinaires aux crues exceptionnelles (Wilhelm et al., 2018a).

Le nombre d'études très important à l'échelle de la France et de l'Europe témoigne à lui seul de l'utilité de ces sources écrites. C'est à partir des années 1990 que les études sur les crues historiques à partir des archives documentaires se multiplient en France. Ces reconstitutions de régime de crue passé restent cependant essentiellement localisées dans le sud de la France. C'est notamment le cas du bassin du Rhône qui bénéficie du nombre d'études le plus important (e.g. Bravard, 1989 ; Salvador, 1991 ; Lang et al., 1998 ; Barriendos et al., 2003 ; Jacob-Rousseau, 2003 ; Cœur, 2008 ; Mélo et al., 2015 ; Thoumas, 2019 ; Delizeau et al., 2014). Le travail de Pichard et al. (2017) est de loin le plus remarquable, seul en France à remonter jusqu'au XIII<sup>e</sup> s. avec le recensement de plus de 1500 événements au moyen de l'analyse de plusieurs milliers de références documentaires. Face au nombre très important de données, les auteurs durent utiliser un indice de crue afin de dégager des périodes de forte et de faible activité hydrologique par le calcul, indice que nous réutiliserons dans cette thèse. On retrouve également plusieurs études sur les crues historiques des bassins du Languedoc (Antoine et Desailly, 1994 ; Blanchemanche, 2009 ; Berger et al., 2010), de la Garonne (Antoine, 2006, 2012) des Pyrénées (Antoine, 1992 ; Desailly, 1990 ; Antoine, 2011) ou encore des Alpes (Miramont et Guilbert, 1997 ; Wilhelm et al., 2013, 2022a, b). À l'image du bassin ligérien, la moitié nord de la France est bien plus dépourvue d'étude sur les crues anciennes. Le bassin parisien ne dispose par exemple encore à ce jour d'aucune étude dédiée. Isolement, l'Orne a été étudié par Desarthe (2007), la Meurthe et la Moselle par Delus et al. (2021), et une certaine partie des rivières de l'ouest de la France par Desarthe (2013). Le nombre d'événements recensés reste tout de même bien inférieur à celui de la moitié sud de la France. À l'Est, le projet d'étude Transrisk (2008-2011 puis 2014-2017) a eu pour résultat la création d'une base de données pour les rivières du fossé rhénan et la Moselle<sup>2</sup>, mais aucune publication n'en a encore fait état. Ainsi, il existe un réel besoin d'améliorer la connaissance sur les crues passées dans la moitié nord de la France. En outre, en plus de ne disposer que de très peu d'études, aucune ne comprend la totalité de la période du PAG en compte comme Pichard et al. (2017) ont pu le faire, la plupart ne remontant pas au-delà du XVIII<sup>e</sup> s. On trouve également de très nombreuses études

---

<sup>2</sup> <https://anr.fr/Projet-ANR-13-FRAL-0012>

dans toute l'Europe. Il serait fastidieux d'en réaliser une liste exhaustive ici, alors que d'autres le firent déjà, notamment **Kjeldsen et al. (2014)**. De l'Europe centrale (**Brázdil et al., 2005**), à la Péninsule ibérique (**Benito et al., 2004a ; Barriendos and Rodrigo, 2006 ; Barriendos et al., 2019**) en passant par le Royaume-Uni (**Macdonald and Sangster, 2017**) ou encore par le nord de l'Europe (**Retsö et al., 2015**), ces études identifièrent de nombreuses périodes plus ou riches en crue à des temporalités variables. L'article de **Blöschl (2020)** précédemment cité (**Figure 1.2**) constitue aujourd'hui l'étude la plus complète à l'échelle de l'Europe. Le nombre important de données déjà récoltées à l'échelle de l'Europe et de leur précision a permis à ce groupe de travail d'identifier plusieurs périodes de forte activité hydrologique à l'échelle de toute l'Europe. Dans ce cadre, leurs résultats seront plusieurs fois comparés à ceux de cette présente étude.

Cette approche comporte néanmoins plusieurs limites. L'utilisation des archives historiques ne peut permettre de remonter au-delà du XIV<sup>e</sup> s., ou au mieux du XIII<sup>e</sup> s., avec précision en raison du faible nombre de documents et d'informations, ce qui constitue la limite principale. En résultent très peu d'informations liées aux crues avant le XIII<sup>e</sup> s. en France. **Leguay (2002)** ne cite que 27 crues connues en France entre le III<sup>e</sup> et le X<sup>e</sup> s., dont une grande partie est donnée par l'évêque Grégoire de Tours au VI<sup>e</sup> s. **Alexandre (1987)** en mentionne 23 pour toute la France entre le X<sup>e</sup> et la fin du XII<sup>e</sup> s. Enfin, l'œuvre de **Champion (1858)**, de loin la plus complète, cite entre le VI<sup>e</sup> et le XII<sup>e</sup> s. seulement 20 évènements sur la Seine, 4 sur le Rhône, 18 sur la Loire, 10 sur le Rhin et même aucun sur la Garonne. C'est véritablement à partir du XIII<sup>e</sup> s. que les informations commencent à se faire plus nombreuses grâce au développement général de l'écrit en France et en Occident (**Gauvard, 2014**) et à celui du détail des sources narratives (**Leguay, 2002**). La seconde limite d'importance est l'effet documentaire. Les périodes apparaissent-elles riches en crues parce que l'activité hydrologique fut réellement plus active ou simplement parce que seuls les documents de cette période furent conservés ? Ce questionnement essentiel et qui sera d'importance dans ce présent travail n'a pas toujours été observé dans les études précédentes. Le développement des indices de crue par **Pichard et al. (2017)** et **Blöschl et al. (2020)** répond en partie à ce problème, afin d'éviter de réaliser une somme simple des évènements de crue trop dépendant de la disponibilité des documents. Enfin, la dernière limite, qui sera plus longuement discutée dans le **cinquième chapitre**, est la ou les conditions de mise à l'écrit et de conservation des documents utilisés. Tous les sites ne disposent pas du même enregistrement documentaire pour plusieurs raisons différentes. Nous avons par exemple fait face à un enregistrement très faible des crues du Cher au cours d'une précédente étude à Montluçon et Saint-Amand-Montrond (département de l'Allier) (**Mesmin, 2020**). En raison d'une vulnérabilité faible des sites d'étude face aux crues du Cher, les évènements hydrologiques ne furent que peu mis à l'écrit. Nous verrons que dans le cas de ce présent travail nous disposons d'un enregistrement important qui s'explique suivant plusieurs facteurs, dont une certaine vulnérabilité continue face aux crues de la Loire.

Ainsi, si l'utilisation des archives documentaires nous permet de réaliser un recensement précis des crues de la Loire, celui-ci ne pourra pas aller au-delà du XIV<sup>e</sup> s. Afin de le compléter et de répondre aux différentes limites de l'approche historique, une approche sédimentaire est également mise en place.

### 3.2. Complémentarité de l'approche stratigraphique et sédimentologique

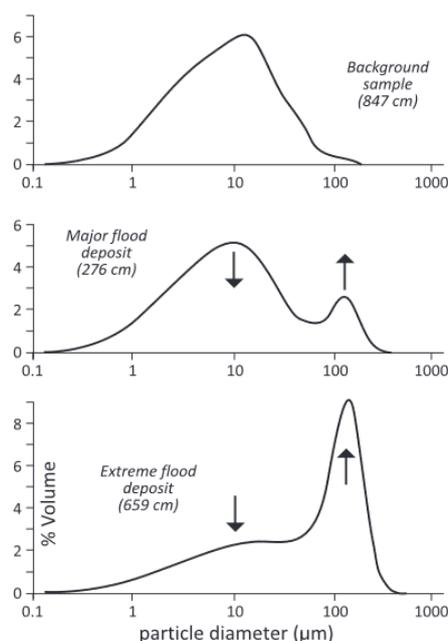
L'exploitation des archives sédimentaires doit nous permettre de compléter les données précédemment acquises via les sources documentaires et d'allonger l'échelle temporelle d'étude de l'activité hydrologique passée de la Loire au-delà du XIV<sup>e</sup> s. (**Figure 1.3**). Cette approche va également nous permettre de mieux renseigner l'environnement hydrogéomorphologique, ainsi que son évolution, dans lequel les sociétés ligériennes se sont établies et ont elles-mêmes évolué. Quel fut par exemple le rôle des crues sur la construction de la plaine alluviale ?

Les études exploitant les archives sédimentaires afin de renseigner l'activité hydrologique des rivières au cours du dernier millénaire sont très nombreuses (**Baker, 2008 ; Baker et al., 2021**) et une grande partie de celles qui nous intéresseront dans le cadre de cette thèse a été précédemment citée dans la première sous-partie. Celles associant et mettant en dialogue données historiques et sédimentaires le sont moins. Une grande partie d'entre-elles ont été réalisées en contexte lacustre, milieu pouvant offrir une conservation continue des dépôts et une résolution temporelle élevée grâce aux dépôts varvés (**Schillereff et al., 2014 ; Wilhelm et al., 2018a ; Wilhelm et al., 2018b ; Baker et al., 2021**). Ce type d'étude a permis de renseigner avec une grande précision l'activité hydrologique des rivières alpines au cours de l'Holocène et de la mettre en lien avec les fluctuations climatiques passées (e.g. **Wirth et al., 2013 ; Pierre et al., 2017 ; Wilhelm et al., 2022a, 2022b**). Les caractéristiques de la zone d'étude excluent une approche en contexte lacustre, mais permettent de tenter une étude de l'activité hydrologique à haute résolution à partir des dépôts sédimentaires en contexte fluvial. L'objectif est d'étudier la signature sédimentaire des événements de crues passées au sein du lit majeur des rivières (**Jones et al., 2010**). Plusieurs types d'environnement fluviaux peuvent être adaptés dans le cadre de cette approche suivant l'environnement (rivière de gorge, rivière de plaine, etc.) et le style fluvial du cours d'eau concerné (**Baker et al., 2008 ; Wilhelm et al., 2018a**). Dans le cadre de cette étude et en contexte ligérien dont le style fluvial se caractérise par un système à chenal unique méandrique, ce sont les paléochenaux qui vont principalement nous intéresser.

En effet, lors d'une crue et du débordement des eaux hors du lit mineur, les sédiments sont déposés au sein du lit majeur, principalement ceux qui sont transportés par suspension (**Knighon, 1984**). En raison de l'étendue importante du lit majeur de la Loire (de 2 à 5 km), nous ne pouvons pas nous permettre dans le cadre de cette thèse de réaliser des transects d'étude dans toute sa largeur, comme ce put être fait sur de plus petits cours d'eau afin de renseigner l'activité passée de la rivière et/ou l'évolution de la construction de la plaine alluviale (e.g. **Vayssière, 2018 ; de Milleville, 2023 ; Ostrowski et al., 2023**). Nous devons donc nous tourner vers des points, des secteurs d'étude plus

restreints ayant enregistré cette activité. Lors des débordements, les dépressions présentent au sein du lit majeur constituent des pièges à sédiments qui s'y accumulent. Au sein de la zone d'étude, la très large partie de ces dépressions présentent au sein du lit majeur correspondent à des paléochenaux de la Loire, héritage de ses migrations et de son activité passée. Ces paléochenaux peuvent alors offrir la possibilité d'étudier en un point donné l'enregistrement des crues passées à partir de leurs traces sédimentaires piégées.

L'intérêt pour l'enregistrement par les paléochenaux de l'activité passée des cours d'eau a donné lieu à de nombreuses études (e.g. Jones et al., 2010 ; Toonen, 2013 ; David, 2016 ; Salvador, 2016 ; Munoz et al., 2018 ; Vayssière, 2018 ; Peng et al., 2019 ; Baker et al., 2021). Cette approche permet notamment à plusieurs travaux de rapprocher des événements identifiés à partir de la bibliographie ou des archives documentaires de traces sédimentaires laissées par le passage de ces crues (Sheffer, 2003 ; Toonen, 2013 ; Toonen et al., 2015 ; Toonen et al., 2017). Toonen et al. (2016) réussirent par exemple à établir une correspondance entre les témoins archivistiques et sédimentaires d'une trentaine d'évènements de crues du Rhin du XVII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> s.



**Figure 1.4.** Distribution granulométrique schématique des dépôts de crues "majeures" et "extrêmes" (dans Toonen et al., 2015).

Dans chacune de ces études, l'objectif est d'associer un dépôt de crue observé dans des carottages réalisés en contexte lacustre (Parris et al., 2010), ou au sein des paléochenaux en contexte fluvial (Toonen et al., 2015). Après avoir réalisé des carottages, l'enregistrement sédimentaire est analysé par granulométrie laser à un pas fin (1 ou 2 cm en général), ce qui doit permettre de détecter les dépôts de crues, notamment par leur queue granulométrique grossière. Plus le dépôt est en théorie grossier, plus l'évènement responsable de celui-ci peut être considéré comme intense (Figure 1.4) (Toonen et al., 2015), bien que cette association soit encore sujette à de nombreuses difficultés (Peng

**et al., 2019**). Toutefois, ce constat théorique souvent acquis en contexte lacustre (**Wilhelm et al., 2018b**), l'est bien moins en contexte fluvial en raison du dynamisme des systèmes fluviaux. Il est en effet nécessaire de sélectionner un paléochenal ayant conservé une distance stable dans le temps avec les chenaux actifs. Dans le cas contraire, l'épaisseur plus ou moins importante d'un dépôt par rapport à un autre peut aussi bien être le témoin d'une différence d'intensité de l'évènement en cause que d'une évolution de l'environnement fluvial. La mise en place de cette approche doit donc s'accompagner d'une étude de l'évolution de l'environnement fluvial passé afin de pouvoir analyser efficacement les données issues des paléochenaux (**Toonen et al., 2015 ; Wilhelm et al., 2018b**).

De plus, afin d'obtenir un enregistrement complétant les données issues de l'approche historique, il est nécessaire de sélectionner un paléochenal assez ancien pour avoir enregistré l'activité hydrologique de la Loire depuis l'époque médiévale au moins et au mieux quelques siècles auparavant afin d'avoir un enregistrement sédimentaire au cours de l'OCM, durant la transition avec le PAG et au cours du PAG. Le nombre d'études ayant mis en place cette approche en contexte fluvial à haute résolution entre archives sédimentaires et historiques reste peu élevé en France. Aucune n'a par exemple été effectuée dans les grands bassins de rivières de plaines. En contexte ligérien dynamique avec des déplacements latéraux nombreux et parfois intenses (**Castanet, 2008 ; Steinmann, 2015**), la mise en place de cette approche va constituer un certain challenge, dont le premier sera la sélection même des paléochenaux à étudier.

Ainsi, l'étude des archives sédimentaires doit nous permettre de compléter les résultats issus de l'étude des archives documentaires. La mise en place de cette approche sédimentaire en contexte ligérien constitue un certain défi. La sélection des paléochenaux assez anciens au sein d'un environnement stable dans le temps est la première étape primordiale. Néanmoins, dans le cas où la mise en dialogue entre les archives sédimentaires et documentaires n'est pas possible faute de résultats satisfaisants via l'une des deux approches, les données issues des paléochenaux nous permettront tout de même d'identifier des périodes plus ou moins riches en crues. Ces données nous permettront de compléter les inventaires et les conclusions déjà réalisés dans le bassin de la Loire et plus largement dans la moitié nord de la France.

### **3.3. Une approche géohistorique pour servir à l'étude des réponses des sociétés à l'activité ligérienne**

L'enjeu d'étudier les relations entre les sociétés riveraines et leur(s) cours d'eau implique la mise en place d'une troisième approche : l'approche géohistorique. L'effet des activités humaines sur les hydrosystèmes est tangible dès le début de l'Holocène et du Néolithique (**Gregory et al., 1995 ; Dufour et Lespez, 2024**). La période antique et médiévale apparaît ensuite en Europe comme une intensification des influences des sociétés humaines sur les hydrosystèmes (**Gregory et al., 1995 ; Burnouf et Leveau, 2004 ; Dufour et Lespez, 2024**). Les sociétés riveraines des rivières aménagent très largement les cours d'eau en France et en Europe en réponse aux contraintes fluviales afin de

maintenir ou développer leurs activités (agricole, commerciale, etc.). Il devient dès lors très difficile de démêler les facteurs anthropiques et climatiques dans le cadre de l'étude de l'activité hydro-sédimentaire des rivières (**Brown et al., 2018**), les effets des activités humaines égalisant ou dépassant largement les effets climatiques sur les hydrosystèmes (**Gregory et al., 1995**). **Carcaud (2004)** a par ailleurs clairement démontré comment le val de Loire était devenu un *anthroposystème* dès l'Âge du Fer ou l'époque gallo-romaine, autrement dit un sous-système *naturel* (l'hydrosystème) co-évoluant avec un sous-système *social* (les sociétés humaines riveraines). Sur de plus petites rivières, **Dufour et Lespez (2024)** parlent d'organismes hybrides : ces rivières restent animées par des flux obéissant à des lois physiques ou biologiques, mais leur matérialité, leur agencement et leurs conditions de fonctionnements reposent sur plusieurs millénaires de modifications anthropiques. L'étude du système fluvial et de son évolution dans le temps ne peut donc pas se faire sans celle de ses interrelations avec les sociétés humaines riveraines.

L'approche géohistorique répond à cette nécessité et a déjà permis d'améliorer nos connaissances des interrelations entre les hydrosystèmes et les sociétés humaines sur de nombreux cours d'eau comme le montre les sommes récentes des travaux de **Valette (2019)** et **Jacob-Rousseau (2024)**. Bien que le terme et l'approche ait été inventé et ses contours définis par Fernand Braudel au milieu du XX<sup>e</sup> s. (**Grataloup, 2015**), ce n'est qu'à partir de la fin des années 1990 et surtout depuis les décennies 2000 et 2010 que la démarche géohistorique s'est fortement développée, majoritairement employée par les géographes (**Massard-Guilbaud, 2002** ; **Antoine et al., 2009** ; **Valette, 2019** ; **Jacob-Rousseau, 2024**). Aujourd'hui, l'approche géohistorique est un incontournable dans le domaine de la Géographie en France et nombre de cours d'eau français ont déjà pu en bénéficier, la Loire avec le travail de Roger Dion en étant un exemple parfait. Cette compréhension des interrelations passées entre les sociétés et les systèmes fluviaux sert également à des desseins plus pratiques, notamment dans le cadre de la restauration des cours d'eau (**Lespez et al., 2015** ; **Brown et al., 2018**) ou des zones humides (**Valette et al., 2024**).

Dans le cadre de cette thèse, l'approche géohistorique nous permet d'étudier ces interrelations sur la Loire : quelles furent les réponses des sociétés riveraines de la Loire aux contraintes ligériennes, plus particulièrement à ses crues et à ses divagations ? Dans le cadre où les études précédentes mirent en évidence une intensification de l'activité hydrogéomorphologique au cours du PAG, cette période constitua-t-elle sur la zone d'étude une crise fluviale avec laquelle les sociétés riveraines durent composer ? Et si tel est le cas, ces sociétés y ont-elles répondu d'une quelconque manière ?

Faire de la géohistoire oui, mais à partir de quelle(s) ressource(s) ? Jusqu'alors, les archives documentaires ont fourni la part fondamentale des résultats géohistoriques produits (**Jacob-Rousseau, 2024**). Elles le font également pour ce présent travail. Dans ce cadre, le développement des comptabilités urbaines au bas Moyen Âge (**Menjot, 2019**), dans un contexte de développement général de l'écrit

(Gauvard, 2014), nous est particulièrement essentiel. Ces documents permettent avant tout d'obtenir des informations détaillées sur les communautés urbaines elles-mêmes. Par *communauté* nous renvoyons au groupement des habitants, dans notre cas de Nevers et Decize, dont les *communes* bénéficient de charte de franchise au XIII<sup>e</sup> s. leur conférant une certaine autonomie organisationnelle, notamment par la possibilité d'établir une administration municipale (Morsel, 2018). La mise en place d'une comptabilité communale qui en résulte permet également, et ce qui nous intéresse principalement ici, d'obtenir des informations sur l'activité hydrologique des sites urbains en question, tournée vers le fleuve (Foucher, 2020). Cependant, ces documents comptables, bien que souvent très riches en informations et encore rarement exploités dans le cadre d'études géohistoriques, ne nous éclaire que pour les sites urbains eux-mêmes, dans un contexte général de la France médiévale et moderne où 85 % à 90 % de la population résident dans les campagnes (Fossier, 1991 ; Bély, 2013). Les espaces ruraux, et plus particulièrement la classe paysanne (Fossier, 1991), ne bénéficient pas de la même disponibilité documentaire médiévale et moderne. C'est à partir des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> s., grâce à la documentation des ingénieurs et des premières ressources cartographiques, qu'une géohistoire des espaces ruraux devient plus accessible (Cœur, 2008). Ces cartographies anciennes, présentes pour notre zone d'étude dès la fin du XVII<sup>e</sup> s., vont avoir un double rôle : celui de nous renseigner sur l'évolution des aménagements et celui de nous renseigner sur l'évolution planimétrique du cours d'eau lui-même, comme ce put être déjà réalisé à l'amont de la zone d'étude (Steinmann, 2015 ; Steinmann et al., 2017), à l'aval (Gautier et Grivel, 2006 ; Temam et Grivel, 2009 ; Grivel et al., 2018) ou sur d'autres cours d'eau tel que le Cher (Dépret, 2014), la Charente (Duquesne et Carozza, 2019 ; Duquesne, 2021 ; Duquesne et Carozza, 2025), la Seine et son bassin versant (Lescure et al., 2011 ; Lestel et al., 2021), la Garonne (David, 2016 ; David et al., 2020), dans le bassin versant de l'Adour (Blanpied, 2019 ; Blanpied et al., 2020) et ailleurs en Europe (Hohensinner et al., 2013 ; Valette et al., 2013 ; Groparu, 2020). Le nombre important de ces études illustre la richesse et la diversité des informations pouvant être extraites de ces analyses diachroniques. Toutefois, pour plusieurs raisons qui seront détaillées dans le **quatrième chapitre**, la précision des représentations des cartes anciennes est très variable. Afin de répondre à ce problème, nous utiliserons également un modèle numérique de terrain (MNT) Lidar qui ouvre la possibilité de relever et d'étudier des aménagements anthropiques dans le lit majeur et mineur de la Loire afin de compléter les données cartographiques, notamment temporellement en ouvrant la possibilité de relever des informations antérieures à l'âge des cartographies anciennes.

Ainsi, l'étude géohistorique repose sur une l'exploitation de sources documentaires, qu'elles soient cartographiques ou textuelles. L'étude du MNT Lidar est également essentielle à ce travail, notamment pour vérifier les informations issues de ces documents, en particulier concernant les aménagements. Ces différents matériels permettent de sélectionner des sites d'étude diversifiés, en contexte urbain ou rural, afin d'obtenir un éventail large des relations entre les sociétés ligériennes et leur environnement fluvial, ainsi que des réponses apportées aux crues et aux divagations du fleuve.

## Conclusion du chapitre

Ce travail de thèse doit répondre à plusieurs lacunes, premièrement en renseignant l'activité hydrologique passée de la Loire au cours du dernier millénaire caractérisé par la succession de deux périodes climatiques bien distinctes : le réchauffement de l'Optimum Climatique Médiévale (OCM) (X<sup>e</sup> – XIII<sup>e</sup> s.) et le refroidissement du Petit Âge Glaciaire (PAG) (XIV<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> s.). Si les impacts de ces périodes climatiques ont été renseignés sur de nombreux cours d'eau, plusieurs points restent à préciser. La période du PAG coïncide avec une intensification de l'activité hydrogéomorphologique générale. Néanmoins, cette période n'est pas climatiquement homogène et se caractérise par des sous-périodes plus ou moins froides, plus ou moins pluvieuses. Les effets de cette hétérogénéité climatique sur l'activité hydrologique des cours d'eau au cours du PAG n'a encore été que peu renseignée avec précision. L'activité hydrologique de cette période reste notamment très méconnue dans le bassin de la Loire au-delà du XIX<sup>e</sup> s., et plus largement dans toute la moitié nord de la France. Alors comment se caractérisèrent les effets de l'OCM et du PAG sur la Loire nivernaise et bourguignonne, et comment les sociétés riveraines composèrent avec ? Ces sociétés durent en effet s'adapter à la fois à ces changements climatiques et à la fois aux effets de ces changements climatiques sur leur environnement fluvial (métamorphose fluviale, augmentation de la fréquence des crues, etc.). Le choix de la zone d'étude se justifie en partie par sa mise de côté par les études précédentes.

L'objectif de cette thèse est donc de développer les connaissances des relations entre l'activité hydrogéomorphologique des rivières, les variations climatiques et les sociétés riveraines sur une zone d'étude encore largement sous-explorée. Pourtant, comme nous le verrons dans les **deuxième** et **troisième chapitres**, la zone d'étude bénéficie de nombreux avantages dans le cadre de cette étude et notamment d'une diversité de sites d'études, qu'ils soient aussi bien urbains ou ruraux. Cette diversité permet d'avoir une fresque plus large des relations entre les sociétés et leur environnement, et notamment de l'aménagement fluvial au cours du dernier millénaire. Parmi les sites urbains sélectionnés, le plus à l'aval, Nevers, constitue une capitale régionale (bien que le terme puisse être anachronique) depuis au moins le haut Moyen Âge, tandis que Decize constitue un port d'importance dès la période médiévale et Digoin un point nodal du dynamisme ligérien aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. avec la construction de plusieurs canaux. L'importance de ces sites permet, en partie, une bonne conservation des archives documentaires, exceptionnelles dans le cas des archives de Nevers, comme nous le verrons plus en détail dans le **quatrième chapitre**. Hors de ces sites urbains, la plaine alluviale offre également une grande diversité de sites ruraux, entre sites largement impactés par les aménagements entre Decize et Nevers à des sites moins modifiés, en apparence du moins, à l'amont de Decize où la navigation fut moins importante. Dans les deux cas de figure, de nombreux paléochenaux ont été conservés dans la

plaine, laissant à notre portée un grand choix de sélection pour l'étude l'activité hydro-sédimentaire passée de la Loire.

Afin de répondre aux différents questionnements et lacunes, la mise en place d'une approche interdisciplinaire s'est imposée. L'exploitation intégrée des archives documentaires et sédimentaires doit nous permettre de renseigner l'activité hydrologique et hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire tout en répondant aux limites inhérentes à chacune de ces sources. Enfin, il s'agit également de faire une géohistoire des relations entre les sociétés et leur environnement ligérien au cours de ce dernier millénaire, et plus particulièrement des réponses des sociétés riveraines à leur environnement, lui-même influencé par les fluctuations climatiques passées. Il s'agit dès à présent de présenter le contexte géographique et historique de notre étude et d'exposer les particularités de la zone d'étude par rapport au reste du cours ligérien.



# Chapitre 2

## Cadres de la zone d'étude

La zone d'étude s'étend de la confluence de la Loire avec l'Arroux (commune de Digoin, Saône-et-Loire), jusqu'au Bec d'Allier où la Loire rejoint son affluent principal, l'Allier (**Figure 2.1**). Cette zone d'étude, longue de plus d'une centaine de kilomètres, est à cheval entre Loire Bourbonnaise et Loire Nivernaise. Le régime hydrologique, la géologie ou encore la géomorphologie de la plaine diffèrent sensiblement entre l'amont et l'aval. L'objectif de ce chapitre est de présenter les caractéristiques du cadre physique de la zone d'étude, ainsi que celui des relations entre la Loire et ses sociétés riveraines dépendantes de ce cadre. Le fonctionnement hydrologique de la Loire bourbonnaise et nivernaise, caractérisé par une grande variabilité et un régime contrasté sera tout d'abord présenté. Suivra ensuite la présentation du cadre géologique, ainsi que la géomorphologie de la plaine alluviale de la Loire, héritée des dynamiques quaternaires. Enfin, nous terminerons avec les rapports entre les sociétés et leur environnement partagés de contraintes respectives.



Figure 2.1. Bassin versant de la Loire et localisation de la zone d'étude.

# 1. Cadre hydrologique actuel

## 1.1. Les climats du bassin versant

On retrouve deux grands types de climats sur la zone d'étude et à l'amont de celle-ci : un climat océanique dégradé dans les plaines et un climat semi-continentale à montagnard sur le Massif du Morvan et sur le Massif Central (**Joly et al., 2010**) (**Figure 2.2**). Le bassin versant à l'amont du bec d'Allier côté Loire et côté Allier constitue une des zones les plus arrosées de France métropolitaine. La pluviométrie moyenne par an peut atteindre des valeurs très élevées dans les zones proches de ces massifs avec des maxima pluviométriques de 900 à plus de 1400 mm/an concentrés sur les hauteurs du Massif Central, au niveau du Forez (entre Clermont-Ferrand et Roanne) et du Velay (à l'est du Puy-en-Velay), ainsi que dans le Massif du Morvan. La concentration pluviométrique dans le Morvan peut être si importante, que les affluents de la Loire drainant le massif peuvent devenir, notamment en hiver, les principaux contributeurs à l'augmentation des débits de la Loire (**Ramond, 2015**). À l'inverse, les Limagnes sont les zones les moins arrosées, mais avec des minimas qui restent tout de même importants, entre 600 à 900 mm/an.

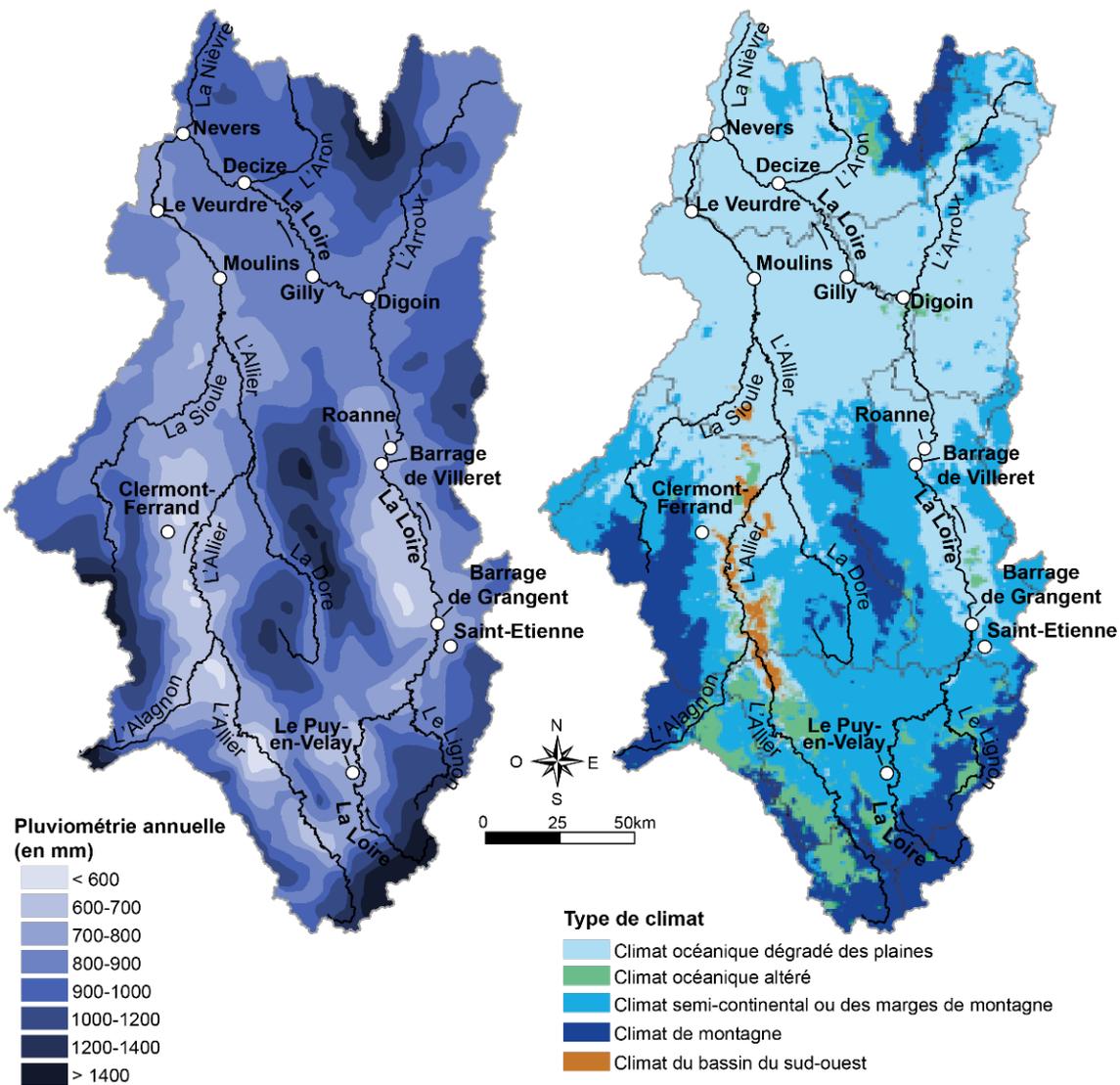
Ces valeurs pluviométriques élevées peuvent être provoquées aussi bien par le passage de dépressions océaniques provoquant de longs épisodes pluvieux et répétés, que par des épisodes cévenols intenses, voire très intenses. Les 16 et 17 octobre 2024 par exemple, un épisode cévenol d'intensité exceptionnelle provoque une crue de la Loire qui le fut tout autant, supérieure à un taux de retour cinquantennal. L'écrêtage de la crue par le barrage de Villerest réduisit nettement le débit, l'évènement présentant un taux de retour inférieur à cinq ans sur la zone d'étude.

## 1.2. Un régime hydrologique contrasté

Les études hydrologiques de **Dacharry (1974)** et **Ramond (2015)** présentent le régime hydrologique général de la Loire comme irrégulier, partagé entre excès et abondance. Ces caractéristiques se vérifient également sur la zone d'étude.

### 1.2.1. Le régime hydrologique de la Loire

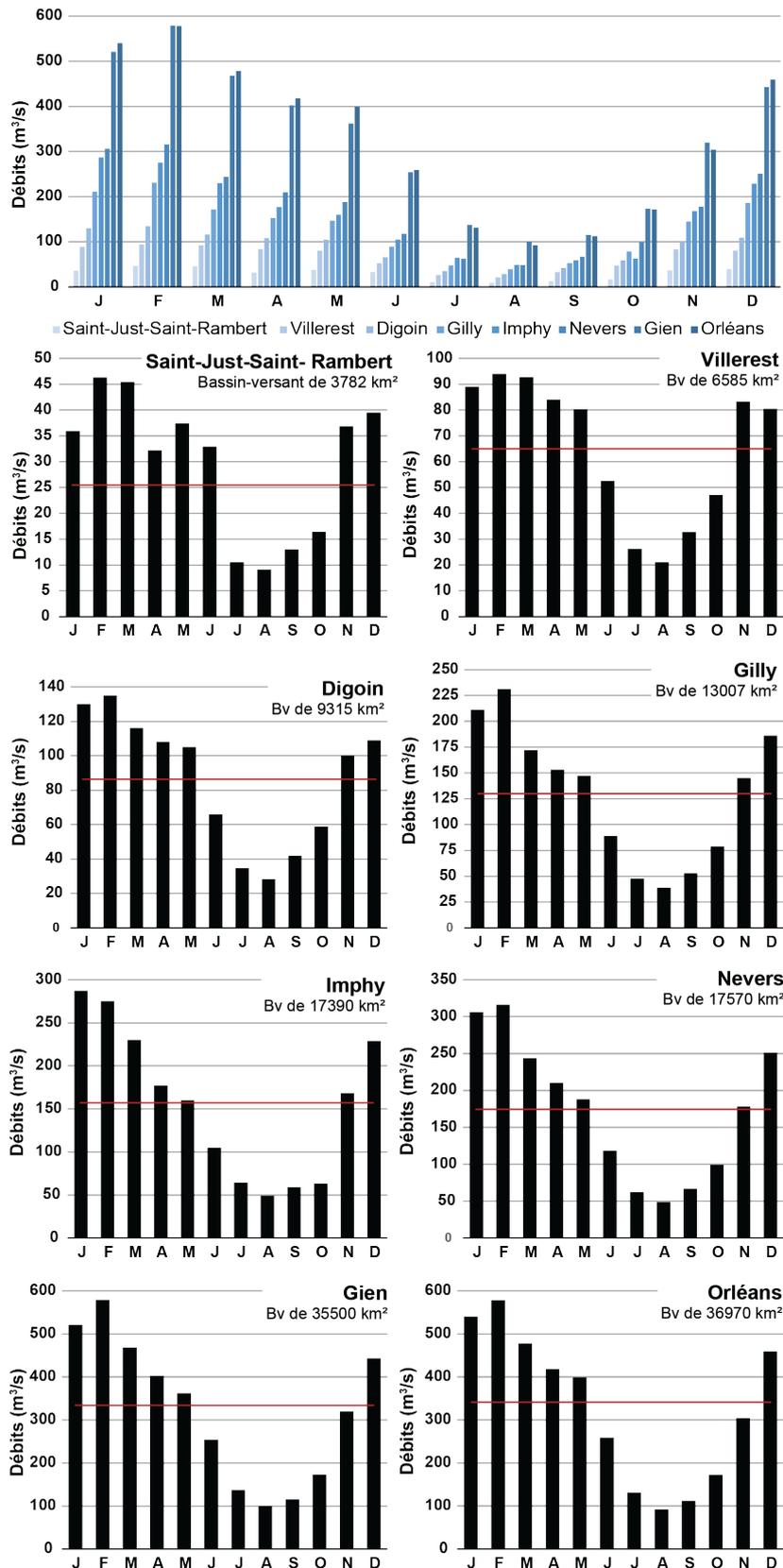
À l'amont de la zone d'étude, le module de la Loire est de 86 m<sup>3</sup>/s (station de Digoin ; bassin versant de 9 315 km<sup>2</sup>) et double à l'aval atteignant 174 m<sup>3</sup>/s (station de Nevers ; bassin versant de 17 570 km<sup>2</sup>) (**Figure 2.3**). L'influence nivale est encore perceptible sur la station de Saint-Just-Saint-Rambert, et dans une moindre mesure sur celles de Villerest et Digoin, avec des débits moyens mensuels encore élevés en avril, mai et juin puis est effacée par l'importance des apports pluviométriques d'hiver (**Figure 2.3**).



**Figure 2.2.** Pluviométrie annuelle sur le bassin versant de la Loire et de l'Allier à l'amont du Bec d'Allier (Météo France), et répartition des différents types climatiques (modifié de **Joly et al., 2010**).

### 1.2.2. Le régime hydrologique de la Loire

À l'amont de la zone d'étude, le module de la Loire est de  $86 \text{ m}^3/\text{s}$  (station de Digoin ; bassin versant de  $9\,315 \text{ km}^2$ ) et double à l'aval atteignant  $174 \text{ m}^3/\text{s}$  (station de Nevers ; bassin versant de  $17\,570 \text{ km}^2$ ) (**Figure 2.3, Tableau 2.1**). L'influence nivale est encore perceptible sur la station de Saint-Just-Saint-Rambert, et dans une moindre mesure sur celles de Villerest et Digoin, avec des débits moyens mensuels encore élevés en avril, mai et juin puis est effacée par l'importance des apports pluviométriques d'hiver (**Figure 2.3**). Le régime hydrologique de la Loire sur la zone d'étude est donc qualifié de régime simple de type pluvio-évaporal, avec des hautes eaux allant de novembre à mai, et des maxima en janvier et février (**Figure 2.3**). La longue durée des basses eaux s'étalant de juin à octobre est un élément structurant du fonctionnement hydrogéomorphologique actuel du fleuve.



**Figure 2.3.** Débits mensuels moyens de Saint-Rambert à Orléans. Les moyennes ont été calculées sur la période de 1993 à 2023, et de 2001 à 2023 pour les stations de Saint-Rambert, d'Imphy et d'Orléans. En rouge les modules de chaque station (HydroPortail).

**Tableau 2.1.** Données hydrologiques par station. \* : données non disponibles.

Station hydrologique	Saint-Just-Saint-Rambert*	Villerest	Digoin	Gilly	Imphy	Nevers	Gien	Orléans
<b>Bassin versant (km<sup>2</sup>)</b>	3782	6585	9315	13007	17390	17570	35500	36970
<b>Période de calcul</b>	2015-2024	1993-2024	1965-2024	1969-2024	2001-2024	1955-2024	1996-2024	1993-2024
<b>Module (m<sup>3</sup>/s)</b>	25,1	65	86	129	155	174	322	330
<b>Q<sub>1</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	.	234	315	520	549	654	996	835
<b>Q<sub>5</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	.	939	981	1250	1260	1460	2020	2000
<b>Q<sub>10</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	.	1171	1200	1500	1480	1560	2350	2360
<b>Q<sub>20</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	.	1400	1410	1740	1690	1950	2660	2730
<b>Q<sub>50</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	.	1690	1680	2040	.	2050	3130	3210

### 1.2.3. La variabilité interannuelle du régime hydrologique de la Loire

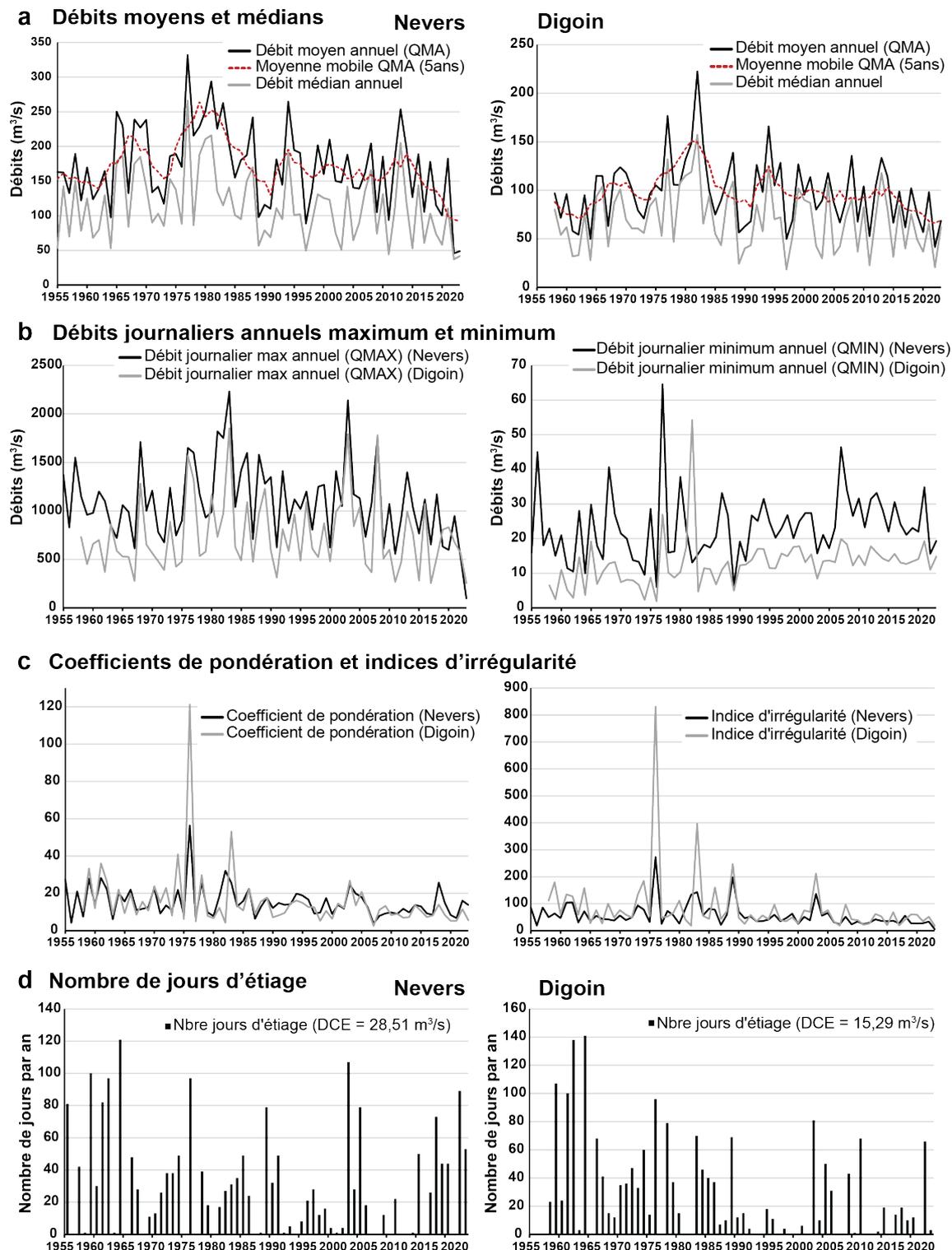
La variabilité interannuelle du régime hydrologique de la Loire est importante, notamment sur la zone d'étude. **Dacharry (1974)** va même jusqu'à qualifier le régime de torrentiel. Aux stations hydrologiques de Nevers et Digoin, les débits moyens et médians annuels peuvent beaucoup varier d'une année sur l'autre entre 1955 et 2023 (**Figure 2.4**). De plus, les coefficients de pondération<sup>3</sup> atteignent plusieurs fois des valeurs supérieures à 20, et les indices d'irrégularité<sup>4</sup> des valeurs supérieures à 100, que ce soit à l'amont ou à l'aval de la zone d'étude (**Figure 2.4**). Ces valeurs importantes sont à mettre en relation avec les longues basses eaux, ainsi que les étiages de la Loire, qui peuvent être aussi longs et marqués en raison de l'influence méditerranéenne à l'amont de la Loire et l'absence de réserves hydrologiques dans le Massif Central (**Valadas, 1984**). La variabilité interannuelle du régime hydrologique, et plus particulièrement la longue saison de basses eaux, associée à des étiages réguliers, a exercé des contraintes importantes sur les sociétés dans le passé, notamment dans le cadre des exploitations multiples des ressources ligériennes, et notamment la navigation.

Afin de limiter ces contraintes, deux barrages en amont de la zone d'étude sont mis en service au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. Le barrage de Grangent est mis en service en 1957 avec une capacité de 57,4 millions de m<sup>3</sup>, tandis que le barrage de Villerest est mis en service en 1984 avec une capacité de 235 millions de m<sup>3</sup>. Aujourd'hui, ces barrages ont quatre objectifs : réduire l'intensité des étiages, écrêter les débits de crue (ce que le barrage de Villerest fit pour les crues de 2003, 2008 et 2024), assurer un débit minimum nécessaire au bon fonctionnement des centrales nucléaires de Belleville (Cher) et de Dampierre (Loiret), et enfin produire de l'énergie électrique. En réponse à l'artificialisation du régime hydrologique, la variabilité du régime hydrologique diminue, notamment avec la diminution du nombre de jours d'étiage. Cependant, le nombre de jours d'étiages observe une nouvelle tendance à

<sup>3</sup> Module mensuel le plus élevé divisé par le module mensuel le plus bas, par an.

<sup>4</sup> Débit instantané le plus élevé divisé par le débit instantané le plus bas, par an.

la hausse depuis les dix dernières années à la station de Nevers en raison de sécheresses prolongées et d'une diminution de la pluviométrie sur le Massif du Morvan (**Figure 2.4**).



**Figure 2.4.** Paramètres hydrologiques. **a** : débits moyens et médians aux stations de Nevers et Digoin. **b** : débits journaliers annuels max et min (QMAX) aux stations de Nevers et Digoin. **c** : coefficients de pondération et indices d'irrégularité calculés à partir des débits aux stations de Nevers et Digoin. **d** : nombre de jours d'étiages aux stations de Nevers et Digoin correspondant aux nombres de jours dont les débits sont inférieurs au débit caractéristique d'étiage (DCE) (**HydroPortail**).

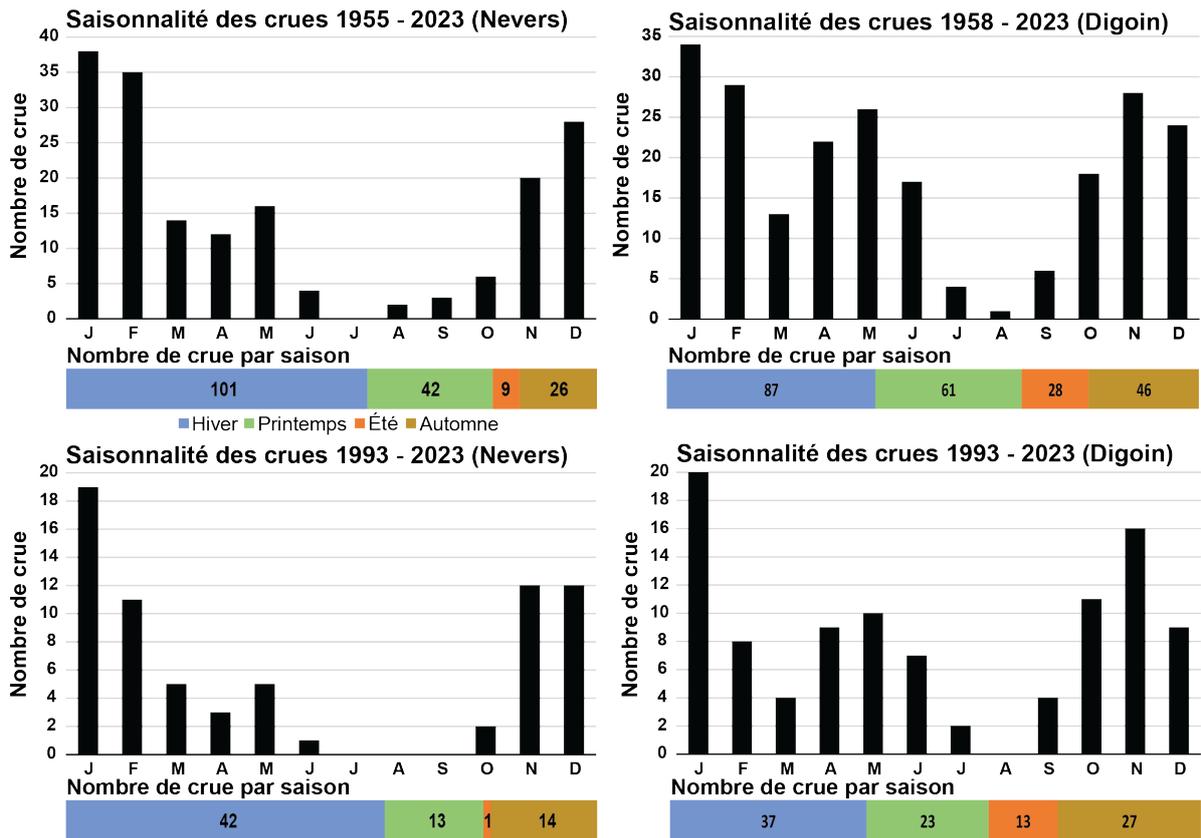
### 1.3. Fonctionnement général des crues de la Loire

#### 1.3.1. Les trois grands types de crues

Trois grands types de crues peuvent se produire dans le bassin de la Loire (**Pardé, 1964 ; Dacharry, 1974 ; Ramond, 2015**). Les premières, dites océaniques, résultent du passage de dépressions provenant de l'Atlantique, hivernales pour la plupart. Les épisodes pluvieux déclencheurs sont longs et une grande partie du bassin est généralement touchée. Les pluies longues et répétées de l'hiver puis du printemps 2023/2024 provoquèrent par exemple quatre crues entre novembre 2023 et mai 2024, avec des pics de crue de 846 à 1310 m<sup>3</sup>/s à la station de Nevers. Les secondes, dites cévenoles ou « méditerranéennes », sont engendrées par des remontées de masses d'air chaud provenant de la Méditerranée. Elles se produisent à la suite de précipitations orageuses le plus souvent à la fin de l'été et en automne, et n'affectent généralement que la partie amont du bassin. Si ces crues ne sont pas soutenues par les apports d'affluents à l'aval, elles peuvent rapidement s'affaiblir. Les dernières crues d'ampleur sont survenues en décembre 2003, novembre 2008 ou encore octobre 2024. La crue du 2 au 4 décembre 2003 est de 1900 m<sup>3</sup>/s à la station de Gilly, avec une pluviométrie de 260 à 410 mm en 72 h enregistrée sur l'amont du bassin. Ces crues de type cévenol sont brèves, mais souvent intenses. Ce dernier caractère est par ailleurs renforcé par les fortes pentes dont disposent le fleuve et ses affluents dans cette partie du bassin. Le dernier type de crues est qualifié de mixte. Il correspond à la combinaison de crues océaniques et cévenoles. Plus rares, elles affectent l'ensemble du bassin et peuvent être catastrophiques à l'image des trois crues de 1846, 1856 et 1866. À titre d'exemple, la crue de septembre 1866 atteint probablement 4500 m<sup>3</sup>/s à la station de Nevers (**Dacharry, 1996 ; Duband, 1996**), constituant le débit le plus élevé connu à cette station. La dernière crue de ce type a touché le bassin en 1907.

#### 1.3.2. La saisonnalité actuelle des crues de la Loire

La saisonnalité des crues de la Loire diffère légèrement entre l'amont (station de Digoin) et l'aval (station de Nevers) de la zone d'étude (**Figure 2.5**). Si les crues d'hiver sont les plus nombreuses sur les deux stations, et plus largement sur l'entièreté du cours de la Loire, celles-ci représentent plus de 50 % des événements en aval. Le régime de crue est moins centré autour de l'hiver à l'amont de la zone d'étude car les crues de printemps et d'automne sont présentes en plus grande proportion, que ce soit sur la période 1955/1958 – 2023 ou 1993 – 2023. Enfin, les crues d'été sont les moins nombreuses, voire quasi absentes à l'aval : une seule crue d'été a été recensée sur la période 1993 – 2023 à Nevers. Ces différences s'expliquent tout d'abord par la distance qui sépare les deux stations, plus de 100 km, et par les confluences de la Loire avec ses affluents drainant le Massif du Morvan entre Digoin et Nevers, principaux contributeurs du débit de la Loire en hautes eaux, donc en hiver. Le rôle du Morvan se réduit en période d'étiage laissant place à une influence plus importante des débits provenant de l'amont (**Ramond, 2015**), expliquant la différence du nombre d'événements entre l'amont et l'aval en été.



**Figure 2.5.** Saisonnalité des crues aux stations de Digoin (amont de la zone d'étude) et Nevers (aval de la zone d'étude). Hiver : janvier, février et décembre ; Printemps : mars, avril et mai ; Été : juin, juillet, août et septembre ; Automne : octobre et novembre (HydroPortail).

## 1.4. La variabilité du régime de crue depuis le XIX<sup>e</sup> s.

### 1.4.1. Variabilité de l'activité des crues

Comme énoncé dans le **chapitre 1**, peu d'étude s'est intéressée aux reconstructions du régime de crue de la Loire sur le long terme. Néanmoins, les travaux de **Dacharry (1974)** et **Ramond (2015)**, et dans une moindre mesure **Grivel (2008)**, purent exploiter les données de la station de Blois qui remontent à la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. et caractériser une évolution de l'activité hydrologique de la Loire du XIX<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s. **Ramond (2015)** observe une certaine variabilité de l'activité hydrologique de la Loire depuis les années 1860 à la sortie du Petit Âge Glaciaire, et plus particulièrement une disparition des grandes crues (> 3000 m<sup>3</sup>/s) à Blois. De plus, **Grivel (2008)** et **Ramond (2015)** observent une relative stabilité du nombre d'occurrences des débits à pleins bords entre 1825 (**Grivel, 2008**), ou 1863 (**Ramond, 2015**), et 1981. Ce nombre diminue cependant fortement pour la période récente entre 1982 et 2011, s'accompagnant d'une modification de leur saisonnalité (**Ramond, 2015**). La variabilité du régime de crue au-delà du milieu du XIX<sup>e</sup> s. reste jusque-là inconnue, que ce soit sur la Loire ou sur ses affluents.

#### 1.4.2. Variabilité saisonnière des crues

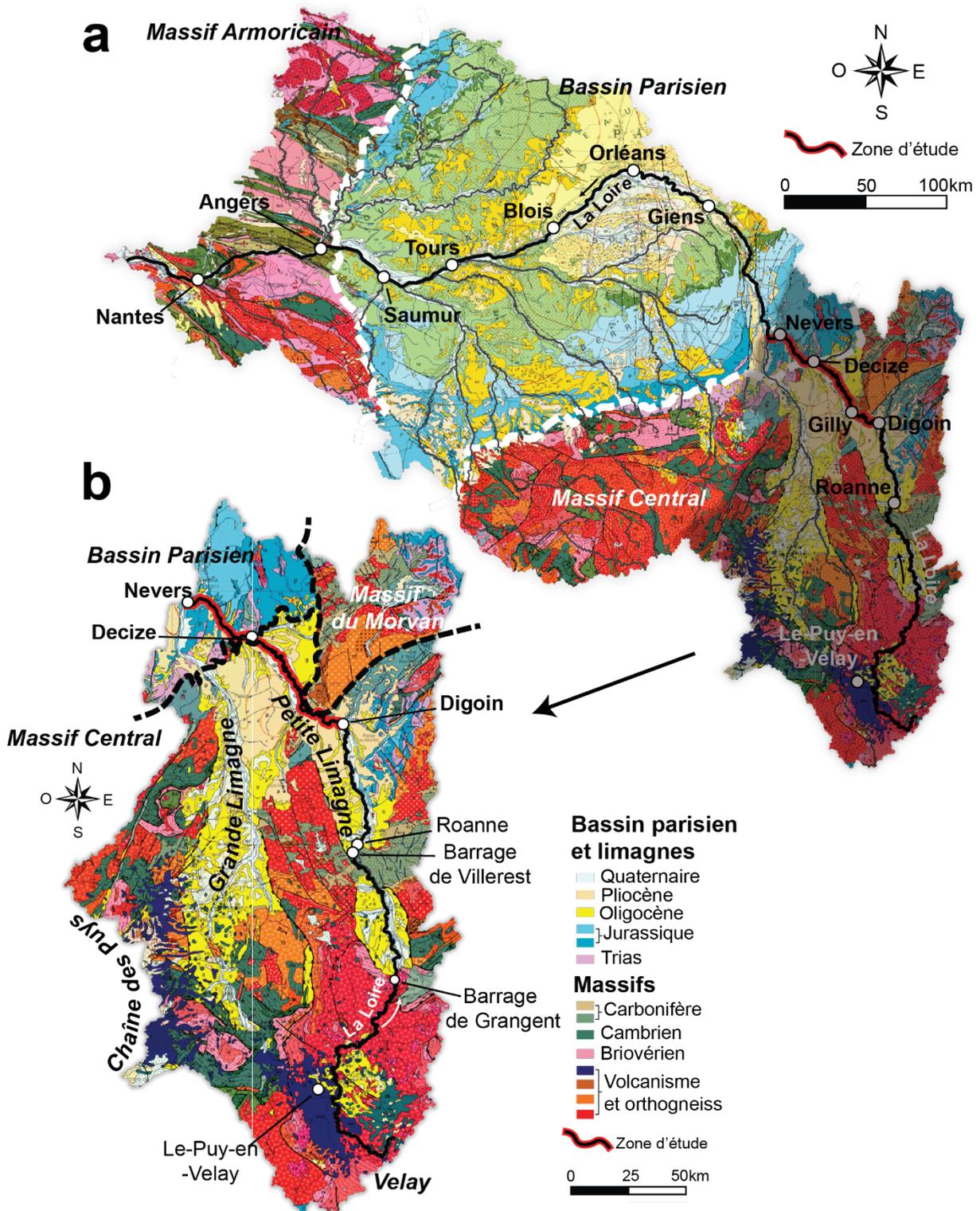
Le régime de crue de la Loire présente des variabilités saisonnières interséculaires à interannuelles nettes depuis le XIX<sup>e</sup> s. (**Babonaux, 1970 ; Dacharry, 1974, 1996**). Selon **Ramond (2015)**, c'est au cours de la seconde partie du XX<sup>e</sup> siècle que cette variabilité a diminué, laissant place à un regroupement des événements de crue entre décembre et mars. En effet, si les crues d'hiver s'imposent, les crues d'été ont tendance à diminuer, voire à disparaître, depuis la première partie du XX<sup>e</sup> s. (**Grivel, 2008 ; Nabet, 2013 ; Ramond, 2015**). Aujourd'hui, les crues d'été sont très rares dans la partie moyenne et aval de la Loire, ce qui n'était pas le cas pour les siècles précédents (**Dacharry, 1974**). Il est aussi à noter qu'avec le changement climatique actuel, et plus particulièrement le réchauffement global, les quantités de précipitations neigeuses sont moins abondantes qu'auparavant sur le Massif Central et le Morvan, contribuant à la diminution des crues de printemps lors de la fonte et donc à la variabilité saisonnière du régime de crue. Enfin, l'artificialisation du cours à l'amont diminue aussi l'irrégularité saisonnière, notamment en stockant l'eau des crues afin d'assurer un niveau suffisamment important afin de modérer les étiages, limitant alors les crues lors en saison de basses eaux (**Ramond, 2015**). Cependant, si selon les travaux précédents le régime saisonnier de crue semble moins irrégulier qu'auparavant, son évolution future reste difficile à anticiper (**Moatar et al., 2010**), notamment en raison des différentes influences climatiques touchant le bassin, qu'elles soient méditerranéennes ou océaniques. Cette difficulté d'anticipation s'explique à la fois par les multiples influences climatiques des crues de la Loire, ainsi que par un manque de connaissance sur les évolutions du régime de crue de la Loire sur le long terme. Bien que cette étude ne soit qu'une contribution à l'édifice, la reconstruction du régime de crue passé vise précisément à tenter d'améliorer la prévision de l'évolution future.

Ainsi, le régime hydrologique contrasté de la Loire se caractérise par une variabilité annuelle, décennale et séculaire importante depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> s. et tend encore à évoluer au cours de ces dernières années. Ce régime a fort probablement également varié durant la période du PAG. Il reste à comprendre de quelle(s) manière(s).

## 2. Cadre géologique, lithologique et morphologique

### 2.1. Une zone d'étude à l'interface entre le Massif Central et le bassin Parisien

La zone d'étude se retrouve à l'interface de deux structures géologiques majeures : le bassin Parisien et le Massif central (**Figure 2.6**). La Loire prend ses sources dans le Massif Central, produit de l'orogénèse hercynienne (-540 à 280 Ma) au Paléozoïque. Au Cénozoïque, la surrection des Pyrénées et des Alpes induit une érosion de la plus grande partie des sédiments déposés au cours du Cénozoïque. Cette érosion est accompagnée par la création de deux bassins d'effondrement nord-sud et dont la formation a été poursuivie par l'édification de volcans sur les plateaux du Massif Central.

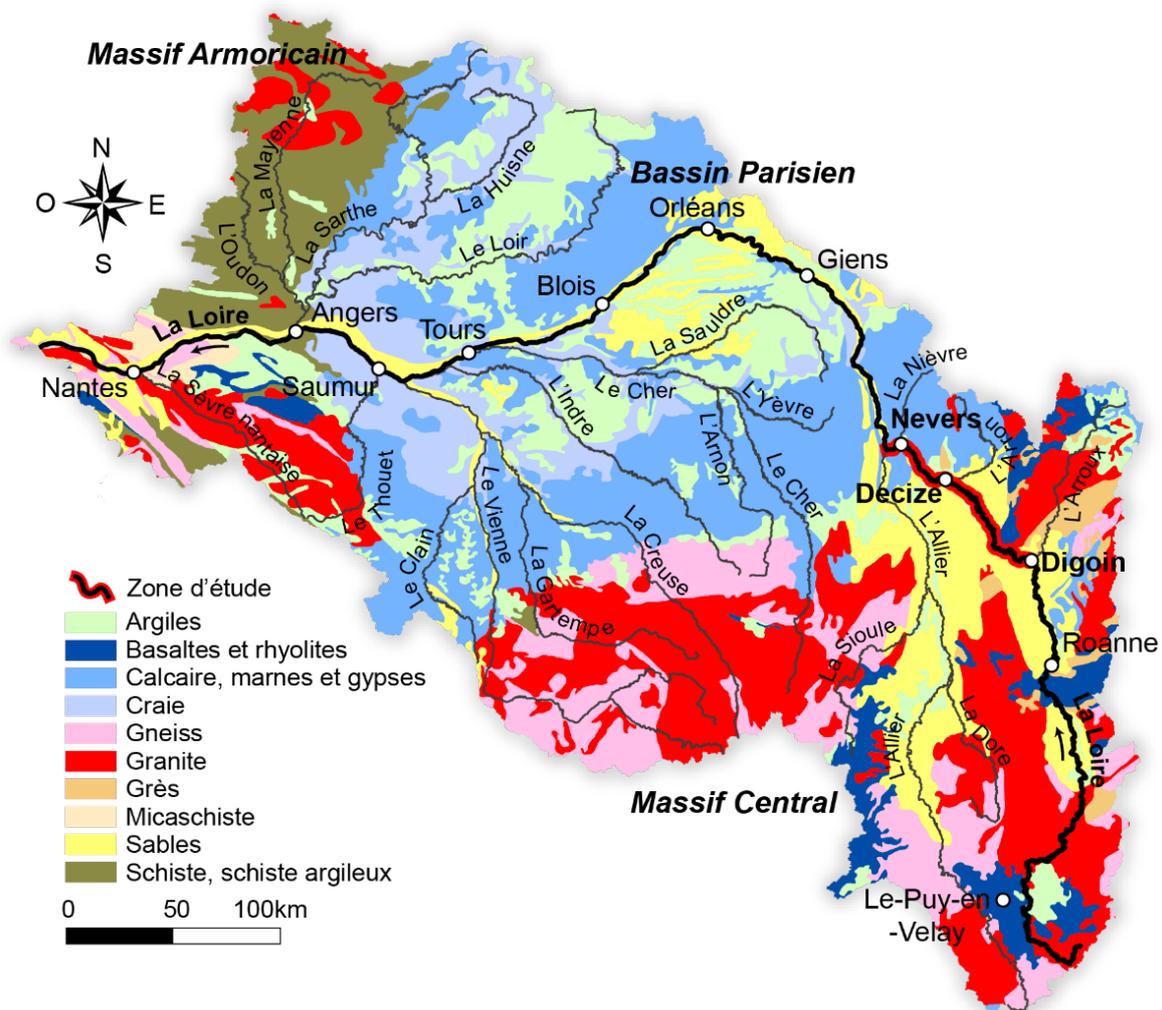


**Figure 2.6.** Géologie du bassin versant de la Loire. **a** : à l'échelle de tout le bassin versant. **b** : à l'échelle du bassin versant de la zone d'étude (BRGM).

Ces bassins d'effondrement appelés Limagnes (Grande et Petite Limagne comprenant respectivement les vallées de l'Allier et de la Loire) se sont formés à l'Oligocène avec une profondeur allant jusqu'à 2500 m. Ces fossés sont comblés par l'apport de sédiments successifs en provenance du Massif Central. Aujourd'hui, la lithologie des deux Limagnes est largement dominée par les sables

(**Figure 2.7**), sables, nous allons le voir, que l'on ne manquera pas de retrouver tout au long de cette thèse. La jonction des deux Limagnes se font au niveau de la zone d'étude et matérialise la limite entre le Massif Central et le bassin Parisien (**Figure 2.6**). C'est aussi durant le Cénozoïque que le bassin Parisien voit la naissance d'une mer épicontinentale qui va subir plusieurs incursions marines successives, puis redevient continental il y a 20 Ma avec la formation d'un grand lac dans lequel se dépose le calcaire de Beauce (**Nehling, 2010**).

L'évolution des caractéristiques géologiques et lithologiques d'amont en aval de la zone d'étude participe à la différenciation de trois secteurs distincts, influençant le cours et le fonctionnement de la Loire.



**Figure 2.7.** Lithologie du bassin de la Loire (BRGM).

## 2.2. Trois secteurs géologiques et géomorphologiques distincts

Depuis ses sources, la Loire se fraye un chemin dans les montagnes cristallines du Massif Central (**Figure 2.6**, **Figure 2.8**). À partir de Roanne, à l'amont de Digoin, la Loire passe de torrent à fleuve de plaine au sein des dépôts détritiques et lacustres de la Petite Limagne (**Figure 2.7**). Grande et Petite

Limagnes sont séparées par les reliefs des Monts du Forez. À l'amont de Digoin, les pentes sont encore très fortes, entre 1,13 ‰ entre Digoin et le barrage de Grangent et 5,59 ‰ entre le barrage et la source (Figure 2.9). À partir de Digoin, et jusqu'au Bec d'Allier, la zone d'étude peut être séparée en trois secteurs géologiques et morphologiques distincts (Tableau 2.2).

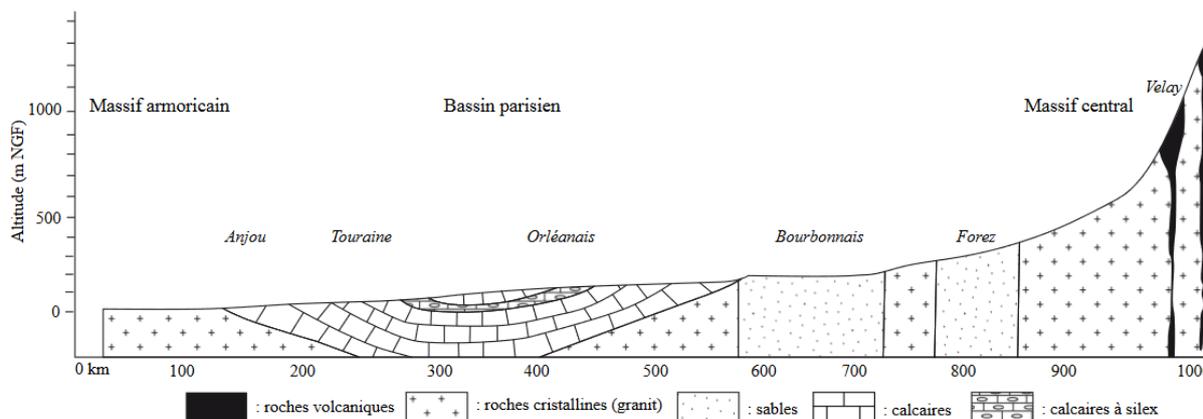


Figure 2.8. Principales lithologies et pente du cours de la Loire (d'après Lino et al., 2000).

Tableau 2.2. Paramètres morphométriques de la plaine alluviale de la Loire.

Secteur	Digoin - Diou	Diou - Decize	Decize - Bec d'Allier	Bec d'Allier - Pouilly-sur-Loire
Pente (‰)	0,47	0,48	0,41	0,43
Largeur plaine alluviale (en km)	1,8	4,3	2,2	2,4
Longueur du cours (en km)	29	54	42	42
Sinuosité	1,53	1,38	1,31	1,13

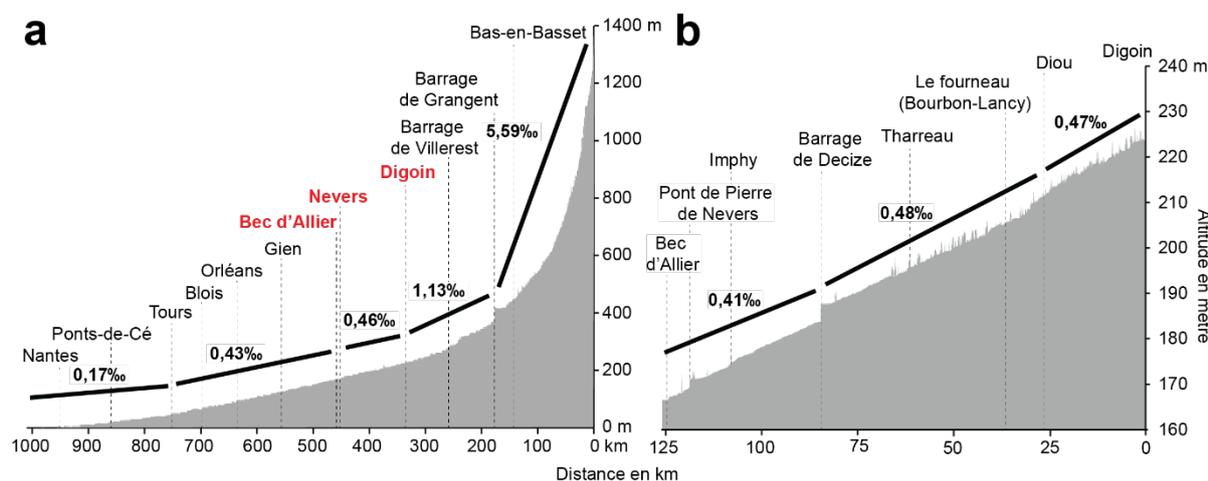


Figure 2.9. a : pente générale du cours de la Loire. b : pente du cours de la Loire sur la zone d'étude.

### **2.2.1. Digoin – Diou : avancée des plateaux autunois**

À partir de Digoin, limite amont de la zone d'étude, la Loire est contrainte par l'avancée extrême des plateaux autunois au pied de hautes corniches schisteuses et calcaires sur une vingtaine de kilomètres jusqu'au seuil de Gilly-Diou (**Babonaux, 1986**) (**Figure 2.6**). De direction sud-nord à l'amont de Digoin, elle prend une direction est, sud-est – ouest, nord-ouest de Digoin à Gilly - Diou. Le lit majeur est large de 2 à 3 km sur ce secteur, un peu plus étendu que les 2 km en moyenne dans la plaine de Roanne. Avec une valeur de 1,53, le cours de la Loire présente sa sinuosité la plus importante de toute la zone d'étude sur une pente de 4,47 ‰ (**Tableau 2.2**).

### **2.2.2. Diou – Decize : jonction des Limagnes**

À partir de Diou, la Loire sort de l'influence des plateaux autunois et prend une direction sud-sud-est – nord-nord-ouest en suivant les cassures nivernaises dans l'axe majeur du fossé d'effondrement de la Grande Limagne en Sologne Bourbonnaise (**Babonaux, 1986**), à la jonction entre Petite et Grande Limagnes (**Nehling, 2010**). Moins contrainte par les roches des dépôts sédimentaires de l'Oligocène et du Pliocène, le lit majeur s'étend dans ce secteur en moyenne sur 4 à 6 km. Tout en restant encore importante avec une valeur de 1,38, la sinuosité de la Loire commence à baisser sur une pente de 0,48 ‰ (**Tableau 2.2**).

### **2.2.3. Decize – Bec d'Allier : Bassin Parisien**

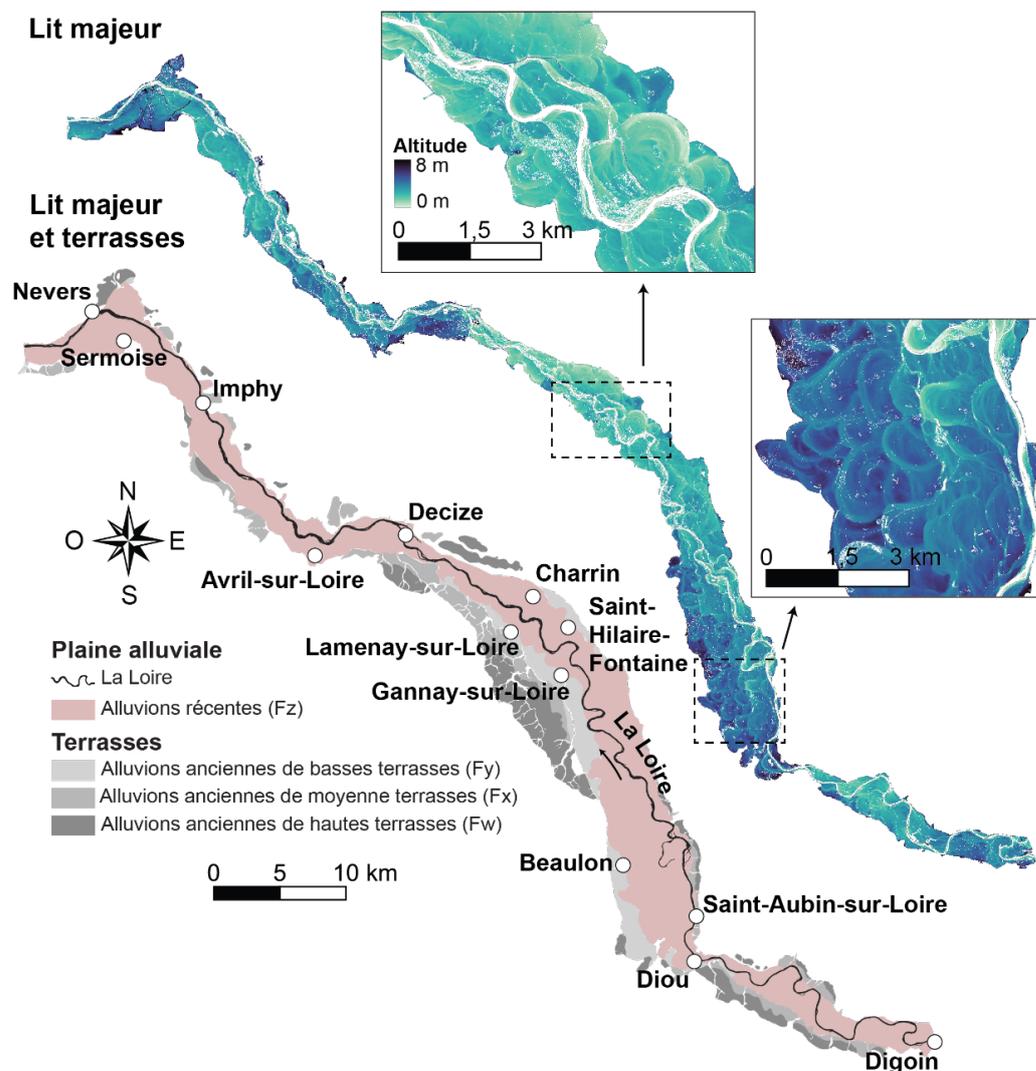
La Loire quitte la région géologique du Massif Central à Decize pour pénétrer dans celle du bassin Parisien qu'elle ne quittera qu'aux abords du Massif Armoricain. Entre Decize et Nevers, la Loire traverse alors des formations du Trias (grès, calcaires et argiles) déposés il y a 250 à 200 Ma, puis les auréoles concentriques et relativement régulières de terrains jurassiques (calcaires et marnes) datés de - 200 à -145 Ma. Une butte escarpée de calcaire infraliasique, où s'accroche la vieille ville de Decize, matérialise le contact entre le bassin Parisien et la Limagne. Recoupant des terrains plus résistants que sur le secteur précédent, la plaine alluviale se resserre et s'étend entre 1 et 3 km. Bloquée par les formations jurassiques résistantes à Nevers, la Loire oblique vers l'ouest pour confluer avec l'Allier. La plaine alluviale est plus étendue à Nevers atteignant quasi 4 km avec un cours de moins en moins sinueux et sur une pente de plus en plus faible (**Tableau 2.2**). À l'aval du Bec d'Allier et à la sortie de la zone d'étude, la Loire change totalement de direction en prenant une direction nord-nord-ouest. Sa pente continue de diminuer progressivement et la largeur de son cours se stabilise (**Tableau 2.2**).

## **2.3. Géomorphologie actuelle et passée de la plaine alluviale de la Loire**

### **2.3.1. Tracé actuel de la Loire**

La Loire adopte sur la zone d'étude un style fluvial méandriforme à chenal unique. Ce style n'empêche pas la présence de nombreuses îles, environ 2,5 îles par kilomètre, restant néanmoins bien

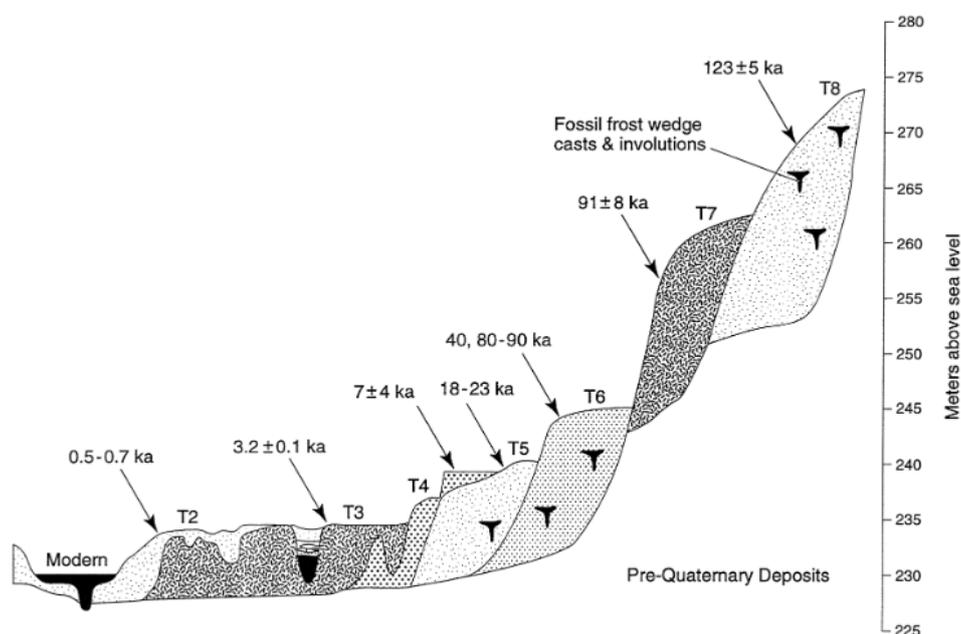
moins nombreuses et surtout bien moins étendues qu'à l'aval de la zone d'étude (Grivel, 2008 ; Nabet, 2013). La zone d'étude est une zone de transition de style fluvial puisque le style méandrique disparaît quasi totalement dès quelques kilomètres à l'amont de Nevers avec une sinuosité bien plus faible (Figure 2.10), altéré par l'aménagement du lit majeur réalisé par les sociétés humaines au cours des derniers siècles. Cette Loire au cours méandrique évolue dans une plaine alluviale présentant différentes gammes de largeurs, de 1,8 à 4,3 km en moyenne comme nous avons pu le voir précédemment (Tableau 2.2). De nombreux paléochenaux aux tailles et aux formes différentes ont été conservés au sein du lit majeur (Figure 2.10), témoin des nombreuses migrations de la Loire et des métamorphoses fluviales (Steinmann, 2015). Ce lit majeur est par ailleurs encadré de plusieurs terrasses quaternaires à la répartition inégale (Figure 2.10), témoins de l'activité hydro-sédimentaire quaternaire de la Loire. Les études morpho-sédimentaire des terrasses et du remblaiement sédimentaire du lit majeur permirent aux études précédentes de démontrer que la Loire oscilla entre plusieurs styles fluviaux au cours du Quaternaire.



**Figure 2.10.** Plaine alluviale actuelle et répartition des terrasses alluviales de la Loire sur la zone d'étude (BRGM). Le MNT est un modèle d'élévation relative sans la pente du cours d'eau.

### 2.3.2. Les terrasses quaternaires ligériennes

La majorité des terrasses quaternaires de la zone d'étude, bien moins étendue et conservée qu'à l'amont de celle-ci, se situent essentiellement en rive gauche. À partir de Decize et jusqu'au Bec d'Allier, les terrasses sont très érodées (**Figure 2.10**). Celles-ci n'ont pas été datées par le BRGM (**Roger et al., 2010**). En revanche, une équipe conduite par Eric C. Straffin a mené à la fin des années 1990 - début 2000 plusieurs études visant à caractériser la répartition, la datation et les processus de formation de ces terrasses en Loire amont (secteur de Digoin) (**Straffin et al., 1999 ; Straffin, 2000 ; Colls et al., 2001 ; Straffin et Blum, 2002 ; Arnold et al. 2003**). Ces travaux ont été complétés par la thèse de **Castanet (2008)** en Loire moyenne (val d'Orléans) et par celle de **Steinmann (2015)** à l'amont de Digoin. **Straffin et al. (1999)**, **Colls et al. (2001)**, **Straffin et Blum (2002)** puis **Steinmann (2015)** identifient sept niveaux de terrasses dans le secteur de Digoin (**Figure 2.11**).



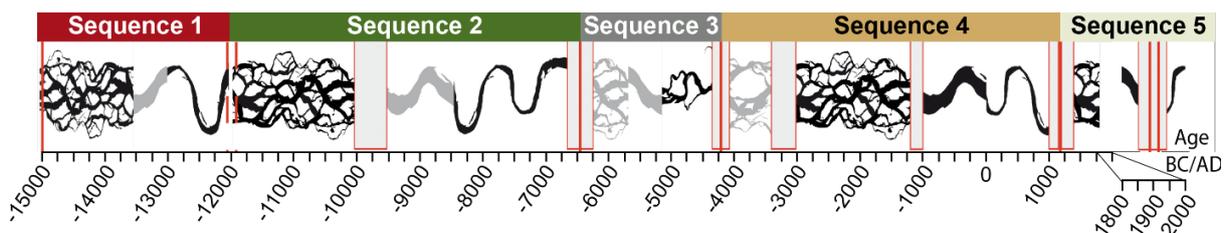
**Figure 2.11.** Schéma de la stratigraphie des terrasses de la Loire dans le secteur de Digoin, et âges obtenus par méthode de l'OSL (d'après **Colls et al., 2001**).

Une première terrasse (T8) est mise en place à 123 ( $\pm 5$ ) ka BP. Trois autres terrasses se mettent en place au cours du Pléistocène avec la terrasse T7 à 91 ( $\pm 8$ ) ka BP, T6 entre 90 et 40 ka BP, puis T5 entre 23 et 18 ka BP. La formation des terrasses de la Loire au cours du Pléistocène s'explique selon **Colls et al. (2001)** et **Straffin et Blum (2002)** par les variations climatiques inhérentes aux successions de phases glaciaires et interglaciaires du Quaternaire. **Straffin et Blum (2002)** et **Steinmann (2015)** identifient par la suite trois séquences sédimentaires mises en place pendant l'Holocène et composantes du lit majeur actuel : les formations T4, T3 et T2. La première T4 est datée à 7 ( $\pm 4$ ) ka BP, la seconde T3 à 3,2 ( $\pm 0,1$ ) ka BP, puis enfin la dernière et la plus récente T2 à 0,5-0,7 ka BP, mise en place au cours du Petit Âge Glaciaire. Ainsi, à partir des études de **Straffin (2000)**, puis de **Steinmann (2015)**, nous pouvons déterminer que la plaine alluviale actuelle (formation Fz ; **Figure 2.10**) serait formée des dépôts

holocènes, les basses terrasses (formation Fy) présentes sur la zone d'étude correspondraient aux terrasses T5, les moyennes terrasses (formation Fx) présentes sur la zone d'étude correspondraient aux terrasses T6 et les hautes terrasses (formation Fw) aux terrasses T7 (**Figure 2.10, Figure 2.11**).

### 2.3.3. Les métamorphoses fluviales quaternaires

L'étude des différentes terrasses et séquences a révélé plusieurs métamorphoses fluviales du cours de la Loire à l'amont de la zone d'étude au cours du Quaternaire. **Straffin et al. (1999)** présentent schématiquement deux modes de fonctionnement morpho-sédimentaire de la Loire : un système fluvial en tresse avec des dépôts fins durant les périodes glaciaires, et un système à chenal unique méandrique à dépôts graveleux durant les périodes interglaciaires, dont celle de l'Holocène. **Steinmann (2015)** complète les conclusions de cette étude en précisant l'évolution morpho-sédimentaire de la Loire depuis 15000 ans cal. BP par l'identification de cinq « séquences » présentant plusieurs métamorphoses (**Figure 2.12**). Chaque début de séquence fait suite à une phase d'incision, puis la Loire présente un style très dynamique en tressage avant d'évoluer vers un style méandrique ou anastomosé moins dynamique. Chaque début de ces séquences correspond par ailleurs à une phase d'activité hydrologique accrue en Loire moyenne observée par **Castanet (2008)**. Si nous nous penchons plus particulièrement sur les deux mille dernières années, la Loire à l'amont de la zone d'étude adopte un système fluvial à chenaux uniques méandriques de 3000 ans cal. BP à 1000 ans cal. BP (**Straffin et Blum, 2002 ; Steinmann, 2015**). À partir du PAG, le style de la Loire se métamorphose et adopte un style à chenaux multiples que ce soit à l'amont de la zone d'étude (**Straffin et Blum, 2002 ; Steinmann, 2015**) ou à l'aval en Loire moyenne (**Castanet, 2008**) (**Figure 2.12**). Depuis le XIX<sup>e</sup> s. et la fin du PAG, la Loire retrouve à nouveau un style à chenal unique méandrique.



**Figure 2.12.** Synthèse des métamorphoses fluviales de la Loire à l'amont de Digoïn (modifiée de **Steinmann et al., 2017**). Les parties en noir correspondent à un style fluvial identifié ou « très fortement soupçonné » et les parties grisées sont supposées.

**Steinmann (2015)** explique la mise en place du style à chenaux multiples sur la Loire bourbonnaise avec des phases d'intense activité fluviale, caractérisées par une augmentation des débits liquides et solides provoqués par des périodes de refroidissement général. Néanmoins, si les fluctuations climatiques ont été responsables de ces métamorphoses fluviales tout au long du Pléistocène et de l'Holocène, **Burnouf et Carcaud (1999)** démontrent qu'à partir du Moyen Âge, l'influence des activités

humaines sur la construction de la plaine alluviale, et surtout sur le style fluvial de la Loire, surpasse celle du climat.

#### 2.3.4. Le remblaiement sédimentaire du lit majeur

Comme la carte de la lithologie avait déjà pu le suggérer (**Figure 2.7**), Le remblaiement sédimentaire du lit majeur est très majoritairement dominé par les sables sur la zone d'étude avec des épaisseurs d'alluvions variant entre 4 et 14 m (**Figure 2.13**). Tous les carottages sélectionnés au sein de la BSS et représentés sur la **Figure 2.13** ont été réalisés dans le lit majeur actuel de la Loire sur les deux sites d'études ruraux sur lesquels les carottages de la thèse ont été réalisés (cf. **chapitre 3**). Dès le XIX<sup>e</sup> s., et notamment à partir des années 1860 suite aux grandes crues de la Loire, les premières études sédimentaires de la Loire pointent directement la prépondérance des sables dans le transport alluvial de la Loire (**Figure 2.13**), ainsi que leurs origines cristallines (**Robert, 1845 ; Comoy, 1861, 1868**). La pétrographie, la minéralogie, la morphométrie et la granulométrie furent étudiées bien plus précisément plus tard par **Babonaux (1970)** et **Brossé (1982)**. Celles-ci exposent une idée claire : la Loire ne transporte essentiellement que des particules à la granulométrie égale et supérieure aux sables et très peu de sédiments fins et très fin (limons et argiles). Ce constat se vérifie directement sur les carottages de la BSS réalisés sur la zone d'étude exposant une forte proportion de sables, une fine couche de sédiments limoneux et une absence totale de formations argileuses (**Figure 2.13**).

Cette prépondérance des sables s'explique par la géologie de la tête de bassin ligérienne. Une grande partie des sables provient de l'érosion des roches granitiques (granites et granulites), métamorphiques (gneiss, micaschistes, schistes cristallins, gneiss granitisés) et des rhyolites du haut bassin cristallin du Massif Central (**Babonaux, 1970**), et dans une moindre mesure de celui du Morvan (**Brossé, 1982**), produisant des particules grossières. **Brossé (1982)** explique la faible proportion de limon et la rareté des argiles dans le transport sédimentaire par les caractéristiques du manteau d'altération, peu épais et vite érodé, des roches du Massif Central, livrant une quantité peu importante du matériel fin au fleuve. À noter qu'au sein des descriptions de la BSS (**Figure 2.13**), et suite aux analyses sédimentaires effectuées dans le cadre de cette étude, nous pensons que ce qui est désigné comme argile sur le premier ou le second mètre sous la surface puisse plutôt désigner des faciès limoneux dans plusieurs cas. Enfin, le substrat essentiellement argileux ou marneux est profond et rarement atteint avant 8 m (**Figure 2.13**). Ces formations sur lesquelles reposent les dépôts fluviaux se sont mises en place à différentes périodes. Les plus anciennes de la zone d'étude sont les marnes du carottage BSS24 qui datent du Lias (Jurassique), les argiles du BSS22 et les marnes du BSS11 datés de l'Oligo-Miocène, tandis que l'âge des autres formations n'est pas précisé.

Comme peuvent en témoigner les nombreux paléochenaux conservés, les formations majoritairement sableuses de la plaine alluviale ont permis, et permettent toujours, aux chenaux de la

Loire de se déplacer latéralement avec facilité. Cette divagation active, et parfois intense, de la Loire obligea les sociétés à aménager le lit majeur afin de sécuriser leurs activités dès le Moyen Âge.

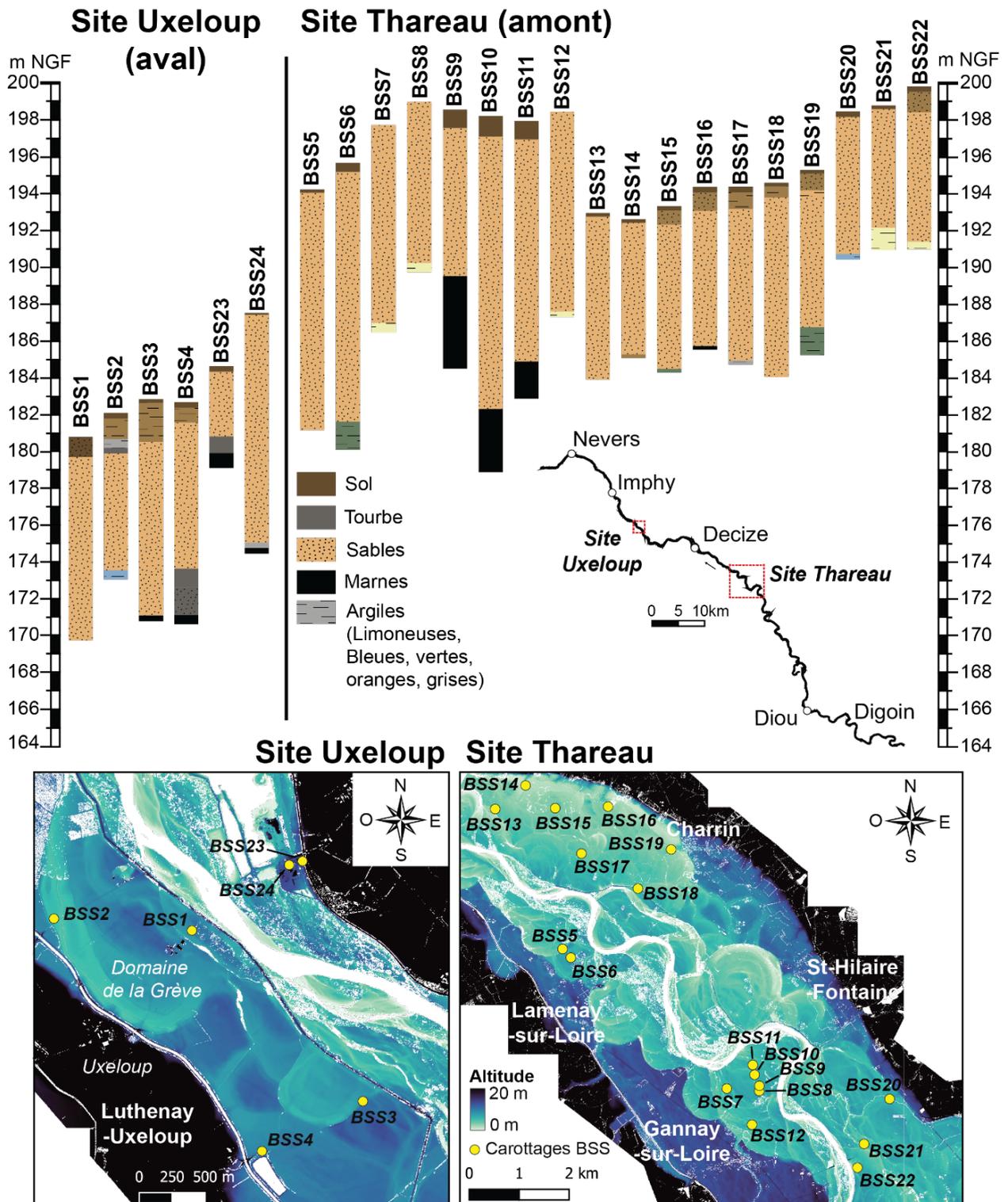


Figure 2.13. Carottages de la BSS situés sur les deux sites d'études ruraux d'Uxeloup et de Thareau.

### 3. Les sociétés ligériennes et la Loire

Les études précédentes font remonter les premières traces d'interactions socio-environnementales dans les vals de Loire au Néolithique, mais c'est véritablement à partir du Moyen Âge que les activités humaines vont devenir un des forçages les plus importants de l'évolution hydrogéomorphologique de la Loire et de sa plaine (Burnouf et Carcaud, 1999 ; Burnouf et Leveau, 2004).

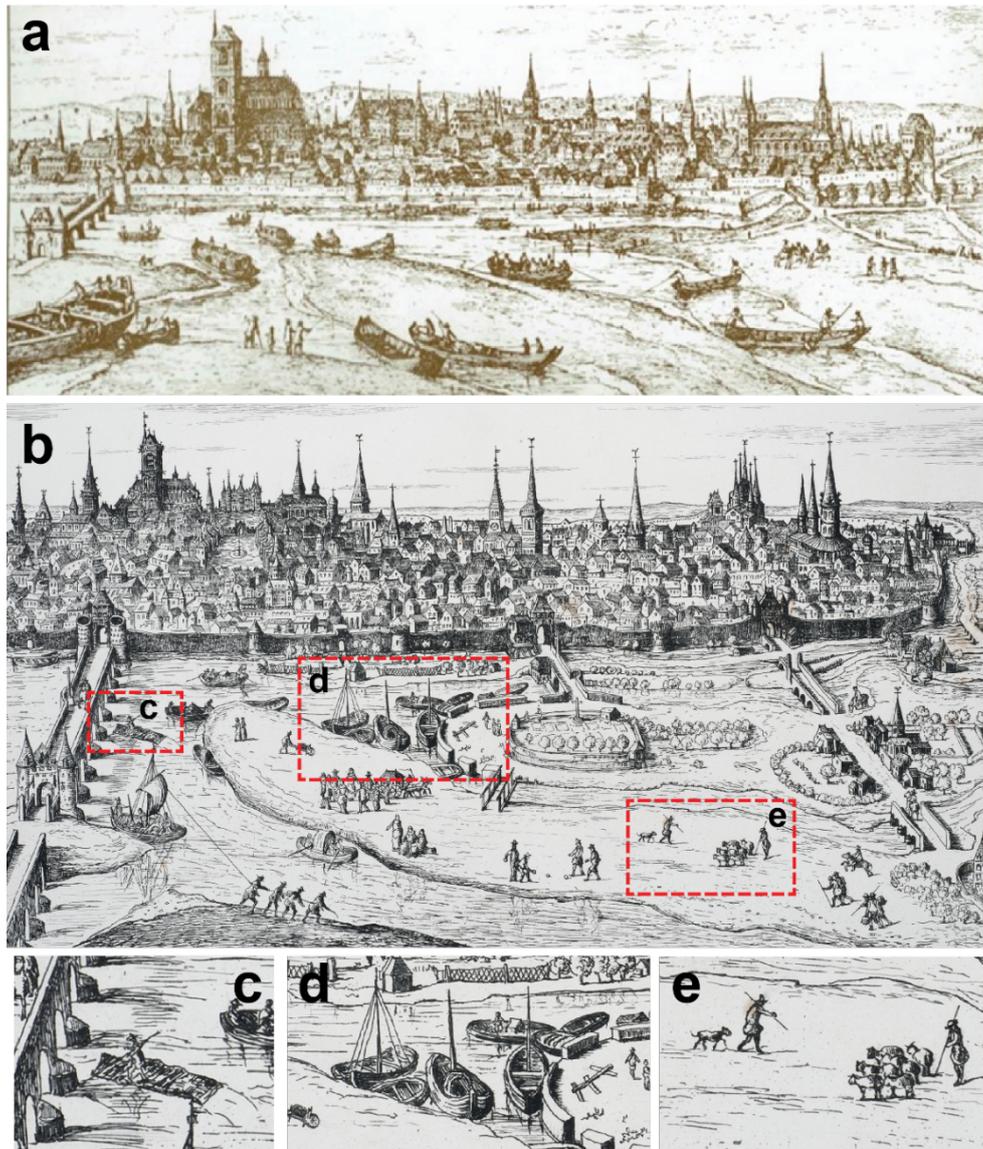
#### 3.1. L'exploitation anthropique du fleuve

##### 3.1.1. Des exploitations multiples

Nous disposons que de rares exemples de représentation graphiques des rives de la Loire sur la zone d'étude. La **Figure 2.14** comprend deux représentations des rivages de Nevers et de la Loire aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> réalisées par Amédée Jullien au XIX<sup>e</sup> s. en s'inspirant de documents plus anciens. Ce qu'Amédée Jullien représente, c'est en partie ce qu'il perçoit dans les archives et en partie ce qu'il connaît aussi des rives de la Loire à la fin du XIX<sup>e</sup> s. : la multitude des activités et des exploitations entourant le fleuve, de l'exploitation agricole, au transport, en passant par son utilisation domestique. Car en effet, « la première ressource du fleuve est sa substance », comme le fit remarquer **Rossiaud (2007)** pour le Rhône au Moyen Âge (**Ferber, 2023**) et faisant référence au fait que le cours d'eau est avant tout exploité dans un cadre domestique (**Leguay, 2002**). L'eau du fleuve est aussi essentielle à de nombreuses activités artisanales en milieu urbain : textiles, transformation du cuir, du fer, etc. Le fleuve est également exploité pour son énergie hydraulique, avec l'installation de très nombreux moulins à blé, qui encombrant souvent le lit de la rivière et amènent à de nombreux litiges. Sur la Loire (**Foucher, 2020**), comme ailleurs (**Leguay, 2002**), les moulins étaient aussi bien construits sur terre ferme que flottants, vulnérables lors des crues. Les nombreuses pêcheries retrouvées par les archéologues en amont et en aval de la zone d'étude (**Miejac et al., 2009 ; Dumont et al., 2022**), témoignent aussi de l'exploitation piscicole importante.

Plus largement, le lit fluvial est un élément essentiel de l'agriculture, que ce soit pour le maraîchage, l'élevage (pâturage sur les îles) ou la culture. Si les terres agricoles situées en plaine alluviale devaient faire face aux débordements des rivières pouvant endommager voire anéantir les récoltes, ces parcelles bénéficiaient contrairement aux autres d'un niveau d'humidité et d'une irrigation facilitée. De plus, la durée des basses eaux permettait de cultiver et de pâturer les marges latérales du fleuve et les îles pendant une période assez longue. L'exploitation agropastorale des berges et des îles a été l'un des facteurs de l'absence de forêt alluviale jusqu'au début du XX<sup>e</sup> s. (**Gautier et al., 2007**). Les autres composantes fluviales, de la ripisylve ou du transport solide, ont aussi été exploitées. Le saule fut par exemple une ressource incontournable du milieu fluvial utilisé en vannerie ou encore pour construire des clôtures, notamment pour renforcer et protéger les berges contre l'érosion (**Foucher, 2020 ; Ferber,**

2023). Les sédiments transportés et déposés par le fleuve sont utilisés en maçonnerie ou pour nettoyer le sol des rues. À partir du milieu du XX<sup>e</sup> s., les sédiments sont aussi prélevés dans le cadre d'une utilisation industrielle.



**Figure 2.14.** Activités autour de la Loire. **a** : « aspect de la ville épiscopale de Nevers du duché de Nivernois 1635 » par Amédée Jullien (1883) et d'après une gravure sur bois de Jean Boisseau de 1645 (BNF, GE DD-960). **b** : représentation de Nevers en 1566 « d'après un dessin conservé à la Bibliothèque Nationale, département des Estampes » par Jullien (1883). **c** : détail représentant un train de bois. **d** : détail représentant l'amarrage de plusieurs bateaux à une île fluviale. **e** : détail représentant le pâturage de moutons sur l'île.

À partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> et surtout du XX<sup>e</sup> s., les modalités d'exploitation du cours d'eau changent. Les usages antérieurs sont progressivement délaissés au profit des extractions de granulats et des activités de loisir (Gautier et al., 2007). Parmi toutes les activités présentes sur la Loire et précédemment décrites, une les surpasse toutes par les moyens employés par les sociétés pour l'assurer : la navigation.

### 3.1.2. La navigation et le transport

La navigation sur la Loire a constitué un enjeu majeur pour ses sociétés riveraines, structurant très fortement l'aménagement du lit majeur, contraignant de plus en plus les déplacements et l'érosion du fleuve au fil des siècles. La longue histoire de la navigation a donné lieu à de nombreuses études, et ce dès le XIX<sup>e</sup> s. avec l'œuvre de **Philippe Mantellier (1864-1869)** (réédité en 1987 par Denis Jeanson) sur la communauté des marchands ligériens et qui fut une des plus importantes. D'autres recherches se sont centrées sur l'étude et l'évolution de la navigation sur la Loire, qu'elles aient été historiques (**Dion, 1938 ; Billacois, 1964 ; Chaussard, 1970 ; de Person, 2001 ; Lecoeur, 2011 ; Brouard, 2016 ; Lecoeur, 2023**) ou archéologiques (**Serna, 2010 ; Serna, 2020**).

Avérée depuis l'Antiquité et l'époque gallo-romaine (**Mantellier, 1864-1869 ; Dion, 1961**), c'est au Moyen Âge que la navigation sur la Loire connaît un fort développement. Le fleuve présente en effet plusieurs avantages : plus long cours d'eau du royaume de France, il permet de le traverser en quasi-totalité d'est en ouest. De plus, les vents dominants d'ouest permettent une navigation dans les deux sens en poussant les bateaux jusqu'à Orléans (**Grivel, 2008 ; de Person, 2020**). Au XIII<sup>e</sup> s., les « marchands fréquentant la Loire » représentant plusieurs cités riveraines de la Loire se réunissent en communauté afin de gérer le monopole de la navigation et la défense de leurs intérêts. Le système de péage mis en place par la communauté leur permet de financer les travaux de balisage, d'entretien du fleuve et des chemins de halage (**Mantellier, 1864-1869**). Navigable jusqu'à Roanne, la Loire devient au cours du Moyen Âge et jusque durant l'Ancien Régime, une des routes commerciales principales du Royaume de France. Une grande diversité de produits (**Lecoeur, 2023**), notamment retrouvée dans les épaves (**Aubanton, 2010 ; Serna, 2020 ; Foucher et al., 2022 ; Dumont et al., 2023b**) transite à travers les nombreux ports (**Figure 2.15**) : denrées alimentaires, vins, sel, mais aussi des matériaux, houille, fer, ou encore bois, notamment par flottage sur la Loire ou depuis les affluents. Tous les ports importants sont situés depuis l'époque médiévale au moins en rive droite où il est plus facile de maintenir la Loire grâce à la géologie, moins sujette à l'érosion. En revanche, les ports secondaires se répartissent sur les deux rives. La navigation et le commerce sur la Loire atteignent leur apogée entre la fin du XVIII<sup>e</sup> s et la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. Afin d'améliorer les routes commerciales fluviales, plusieurs canaux furent construits afin de relier les différents bassins entre eux (**Figure 2.15**). Dès le XVII<sup>e</sup> s., le canal de Briare et le canal d'Orléans sont ouverts à l'aval, reliant la Loire à la Seine. En 1793, le canal du Centre relie la Loire au bassin du Rhône via la Saône. C'est au XIX<sup>e</sup> s. que le système de canaux se développe plus largement (**Lecoeur, 2023**) : tout d'abord avec la construction du canal latéral à la Loire afin de développer et de sécuriser la navigation dans le bassin de la Loire. Ensuite, avec l'ouverture du canal du Nivernais à Decize, reliant la Loire au bassin de la Seine via l'Yonne en 1842, celle du canal du Berry reliant le Cher à la Loire en 1842 ainsi que le canal de Nantes à Brest reliant le bassin de la Loire à la Bretagne. Néanmoins, c'est à la fin de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. que la navigation sur la Loire commence à rapidement périliter face à l'amélioration du système routier, puis au développement

rapide du chemin de fer en France (Lecoeur, 2023). La navigation est rapidement abandonnée et la Loire moyenne est finalement déclassée des voies navigables en 1957 (Lewis et Gautier, 2004). Cependant, les sociétés cessent d’entretenir le lit de la Loire progressivement à partir du début du XX<sup>e</sup> s., dynamique amplifiée par l’exode rural (Grivel, 2008).

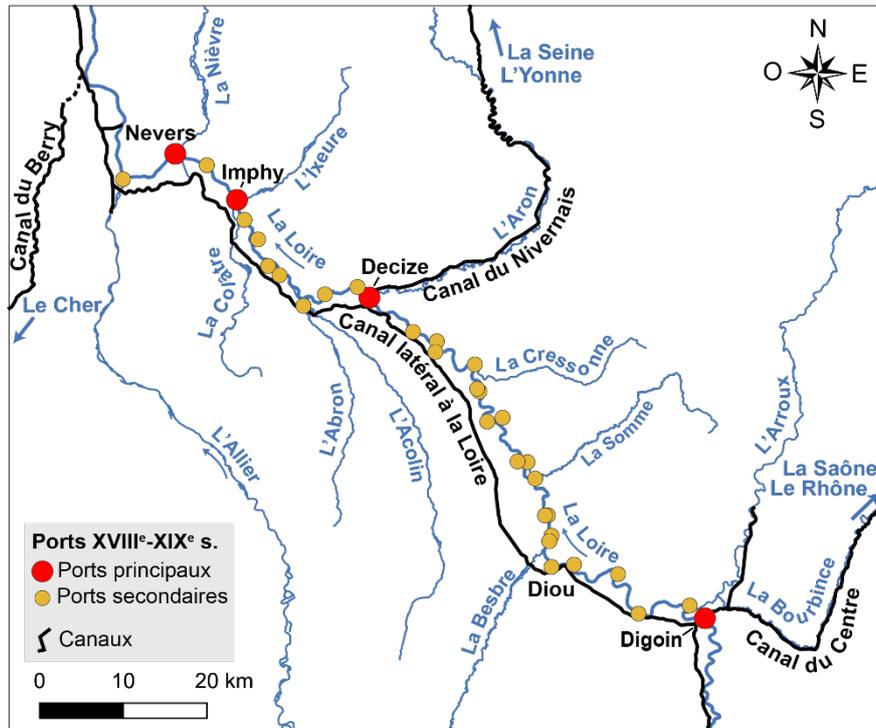


Figure 2.15. Ports et canaux de la zone d'étude.

## 3.2. Des contraintes naturelles et anthropiques

### 3.2.1. Les contraintes de la Loire : inconstances, divagations et crues

Afin d’exploiter le cours d’eau comme elles l’entendaient, les sociétés riveraines ont dû faire face aux contraintes imposées par la Loire. Guy Coquille, procureur général du duché de Nevers et originaire de Decize (1523 – 1603), décrivait la Loire à la fin du XVI<sup>e</sup> s. de la manière suivante : « *Ceste rivière fait grand dommage par son inconstance car estant sablonneuse et ses rives estant de terre légère, elle change souvent son cours et son profond, jettant grande quantité de sables es lieux où souloit estre le profond et faisant le profond es lieux où souloit estre le sable. En sorte que les mariniers ne peuvent estre experts pour la conduite du gouvernail sinon avec longue expérience et bon jugement naturel pour sçavoir discerner à l'œil après chacune creue de quelle part est le profond* » (Coquille, 1622). Vauban quant à lui décrit la Loire en 1699 comme « [...] plus grande rivière du royaume et qui a le plus de navigation, mais non la meilleure parce que sa rapidité roule beaucoup de sable et y forme quantité de bancs » (de Person, 2020). Enfin, Lavoisier note en 1780 « [...] combien la navigation de la Loire est difficile, et les accidents nombreux qui arrivent chaque année ne l'attestent que trop. Ce fleuve n'a point de courant réglé. Le sables et les cailloux qu'il amène des montagnes ou qu'il reçoit

*par l'Allier obstruent souvent son cours, et le lit habituel par lequel passent les bateaux se trouve souvent transporté d'un côté à l'autre de la rivière et à des distances considérables* » (**Mantellier, 1864-1869**).

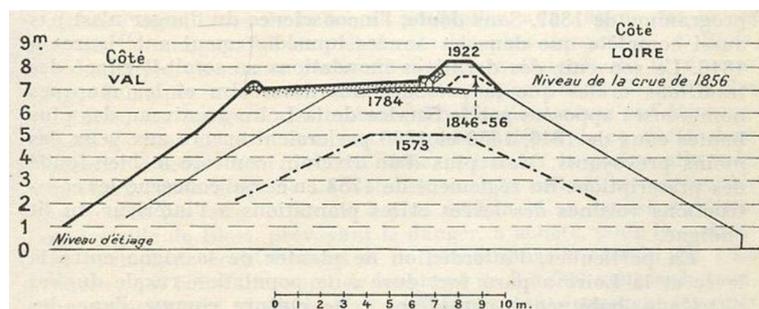
Au regard de ces citations, et des nombreux rapports des Ponts et Chaussées du XVIII<sup>e</sup> s., il est clair que la navigation sur la Loire est incertaine, premièrement en raison de l'irrégularité du régime hydrologique. Si les crues sont attendues et nécessaires à l'activité de navigation, elles peuvent la mettre en péril par leur brutalité. Les basses eaux, par leur longue durée comme nous l'avons vu précédemment, limitent la navigation et le commerce sur plusieurs semaines voire quelques mois par an. De plus, la navigation doit faire face à la mobilité du lit de la Loire, à la migration rapide des seuils et mouilles, ainsi qu'aux importants dépôts sableux (**Coquille, 1622 ; Dion, 1961**). En conséquence, les rapports des ingénieurs du XIX<sup>e</sup> s. indiquent que la durée des jours favorables à la navigation entre Digoin et Briare (à l'aval du Bec d'Allier) dépasse rarement six mois et se découpe en plusieurs petites durées de quelques jours. En raison des fenêtres temporelles restreintes, les marinières sont quelques fois obligés de partir en même temps, provoquant des arrivées de bateaux par centaines dans les ports (**Mantellier, 1864-1869**). Ainsi, les naufrages sont fréquents (**Mantellier, 1864-1869 ; Billacois, 1964 ; Serna, 2020**). Plusieurs épaves ont été retrouvées dans les lits de la Loire (**Dumont et al., 2023b**), malgré l'entretien et le balisage du cours d'eau (**Grivel, 2008 ; Mauret-Cribellier, 2020**). Les témoignages écrits, bien plus nombreux que les témoins archéologiques (**Serna, 2020**), révèlent que les crues (extrêmes) et les débâcles de glace sont les principales causes de naufrages (**de Person, 2020**). Par exemple, suite à la débâcle du 18 janvier 1789, événement sur lequel nous reviendrons dans le **septième chapitre**, les marinières déclarent la perte de 138 bateaux (**De Person, 2020**). Sur les 85 naufrages recensés par **Schemmama (2020)** à partir de l'ouvrage de **Mantellier (1864-1869)**, deux seulement le sont à l'amont du Bec d'Allier entre le XIII<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> s., dont un sur la zone d'étude à l'aval de Decize. Ce faible nombre est en partie dû à l'activité de navigation moins importante sur la zone d'étude qu'à l'aval. Au milieu du XIX<sup>e</sup> s., 1/5 seulement des marchandises (en tonnage) transitant par la Loire passait par l'amont de Decize (**Lecoeur, 2023**).

Les divagations de la Loire sont aussi dommageables pour les différents aménagements, notamment les ports et chantiers (petits ports ruraux et souvent plutôt temporaires sur la Loire) (**Temam, 2012**), ou encore ceux de franchissement. Le défi des sociétés riveraines de la Loire fut principalement de maintenir le cours de la Loire sous les ponts. Plusieurs ponts permettent de franchir la Loire dès l'époque gallo-romaine, retrouvés essentiellement en Loire moyenne (**Dumont et al., 2010**). Avant le XVIII<sup>e</sup> s., peu de ponts en pierre sont présents sur la Loire, la plupart étant donc très vulnérables face aux crues. Comme nous le verrons par la suite à Nevers et Decize, les ponts sur la Loire à l'aval de la zone d'étude ont été régulièrement emportés ou endommagés par les crues (**Dion, 1961 ; Dumont et al., 2014 ; Foucher, 2023a**). La perte d'un pont, le plus souvent par les crues ou les embâcles de glaces, ou de son utilité, à cause du déplacement du lit de la Loire, était dommageable pour la cité et les villes

alentour, mais aussi pour le commerce régional. Sur la zone d'étude, s'ajoutait à l'importance de la route fluviale, la route commerciale terrestre Paris – Lyon (« Grand Chemin d'Avignon en rive gauche » et la route Paris – Lyon en rive droite) longeant les deux rives de la Loire (Escoffier, 2007).

### 3.2.2. L'aménagement des vals : les levées de la Loire

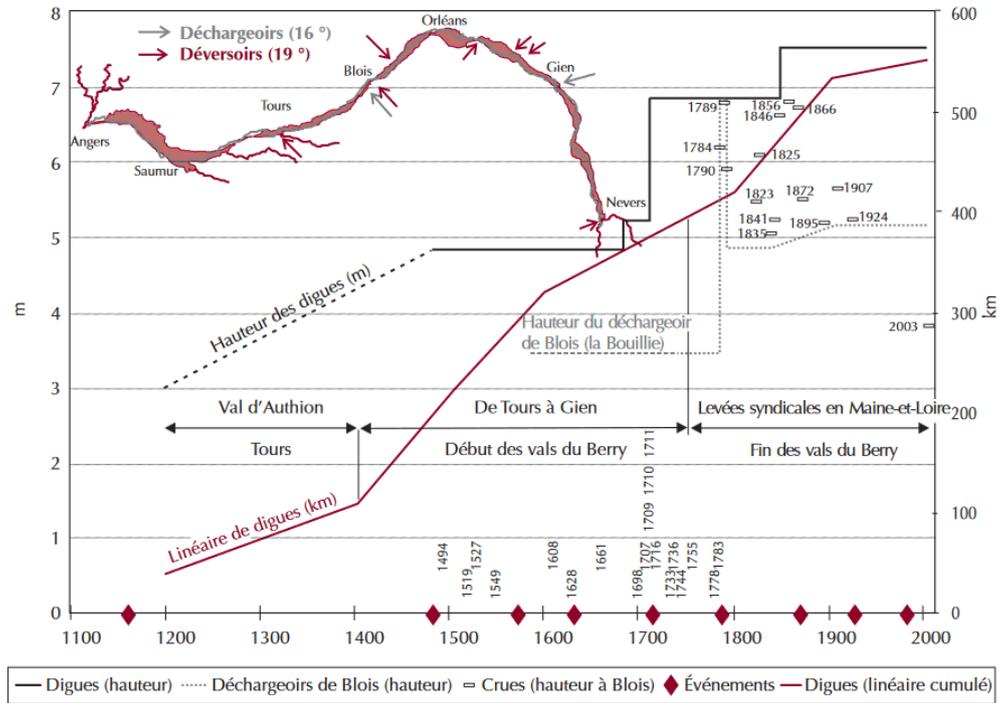
Afin de limiter l'effet des divagations ou des inondations de la Loire, les sociétés riveraines aménagent le lit majeur dès l'Antiquité en Loire moyenne ou aval (Dumont et al., 2021). On retrouve le long du cours de la Loire une grande diversité d'aménagements fluviaux suivant leur taille et leur utilité. La trajectoire d'aménagement de la zone d'étude diffère cependant nettement de la Loire moyenne et aval. C'est en effet d'abord en Loire moyenne et aval que les aménagements les plus massifs et emblématiques, les levées, sont réalisées (Figure 2.16).



**Figure 2.16.** Évolution du profil des levées de la Loire depuis le XVI<sup>e</sup> s. (dans Dion 1961).

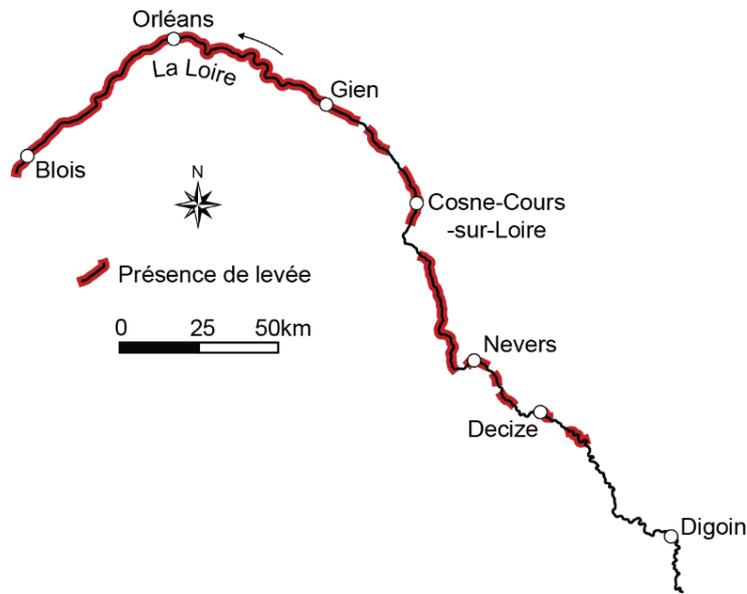
Le développement et l'évolution des turcies puis des levées en Loire moyenne et aval a été renseigné par les travaux de Dion (1961), mais reste encore flou sur de nombreux points. Durant l'Antiquité et le Moyen Âge, les populations de Loire moyenne et aval laissent leurs champs à portée des crues afin d'en piéger les dépôts, mais elles cherchèrent tout de même à les défendre des courants d'inondations. Pour ce faire, les seigneurs et grands propriétaires terriens font ériger des levées de terres, aussi appelées « turcies ». Les premiers exemples datent du IX<sup>e</sup> s. en Anjou, mais Dion (1961) n'exclut pas que des plus anciennes aient pu exister. Ces premiers aménagements étaient submersibles et peu résistants face aux crues et à partir du milieu du Moyen Âge un désir de protection plus affirmé des vals émergea. Du XII<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> s., les ouvrages devinrent alors plus importants en envergure et se développèrent de l'Orléanais à l'Anjou (Figure 2.17 ; Dion, 1961) : c'est l'émergence des premières levées. L'objectif des levées et de leur développement tout au long du Moyen Âge et de l'Ancien Régime à l'aval de la zone d'étude est de limiter la migration du lit, le nombre de chenaux et d'augmenter le tirant d'eau. À partir du XVI<sup>e</sup> s., le corps d'ingénieur du roi des Turcies et Levées est créé afin d'entretenir ces levées, ainsi que les autres aménagements fluviaux (Guillou et Maurin, 2005 ; Temam, 2012 ; Lecoeur, 2023), remplacé par les Ponts et Chaussées au XVIII<sup>e</sup> s. Jusqu'au XIX<sup>e</sup> s., les ingénieurs successifs choisiront de développer le linéaire et d'exhausser continuellement les levées sur la Loire en réponse aux différentes destructions provoquées par les crues (Figure 2.16, Figure 2.17) et avec un

objectif double : mettre toutes les campagnes riveraines de la Loire à l'abri total des débordements et servir la navigation (**Dion, 1961**).



**Figure 2.17.** Évolution au cours du temps de la hauteur des levées à l'amont de Tours et du linéaire total (approximatif) de digues sur la Loire moyenne (dans **Guillou et Maurin, 2005**).

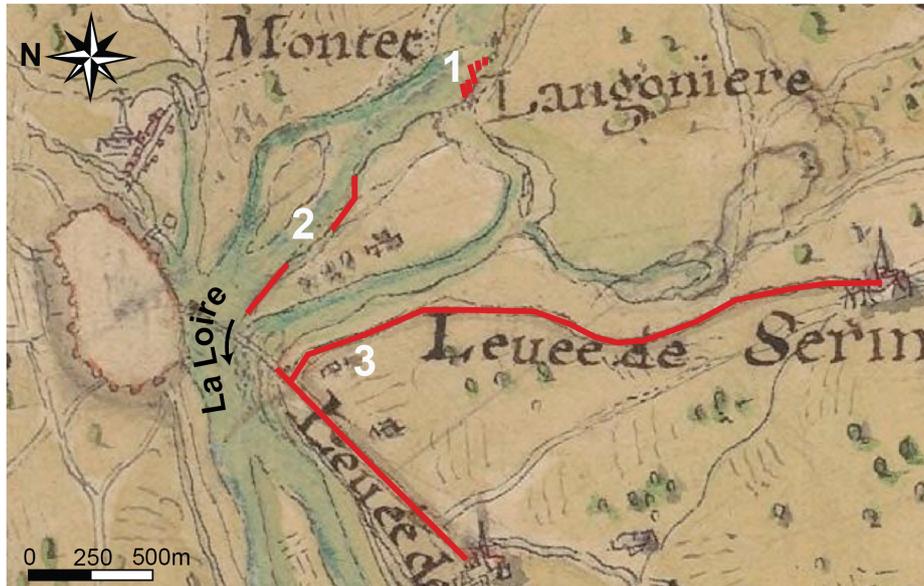
La trajectoire d'aménagement du lit majeur par les levées est très différente sur la zone d'étude. Les deux premières levées de la zone d'étude sont construites à Nevers au XVII<sup>e</sup> s., bien plus tardivement qu'à l'aval de la zone d'étude. Nous disposons de très peu d'informations sur leur date de construction précises, leur vocation, leur coût etc. Elles restent les seules levées à l'amont du Bec d'Allier jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. où la construction de nouvelles levées est entreprise. D'autres suivent ensuite au XIX<sup>e</sup> s., mais essentiellement en contexte urbain. Seules deux levées de la zone d'étude, les levées d'Uxeloup et de Charrin – Saint-Hilaire se situent en contexte rural, sans avoir été, qui plus est, rattachée au coteau. Ainsi, hors des sites urbains de Digoin, Decize et Nevers, la Loire peut allégrement inonder tout son val dans les secteurs de la zone d'étude. Aujourd'hui, le linéaire de la Loire occupé par des levées est donc beaucoup plus restreint sur la zone d'étude qu'à son aval (**Figure 2.18**). Si les recherches de **Dion (1961)** se portent très peu sur la zone d'étude, il explique en revanche le faible nombre de levée par un besoin pour les communautés rurales de capter les alluvions déposées par la Loire. Or, comme nous l'avons vu plus haut, la charge alluviale de la Loire est majoritairement sableuse, bien moins fertilisante qu'à l'aval de la zone d'étude. Ce présent travail est l'occasion d'explorer cette contradiction : pourquoi la zone d'étude dispose-t-elle de moins de levées qu'à l'aval ? De plus, si la zone d'étude ne bénéficie pas d'autant de levée qu'à l'aval, elle n'est pas dépourvue d'aménagement pour autant. Les sociétés ont en effet essayé de contraindre la Loire, plus ou moins efficacement, dès le Moyen Âge.



**Figure 2.18.** Linéaires de la Loire actuellement occupés par des levées entre Digoin et Blois.

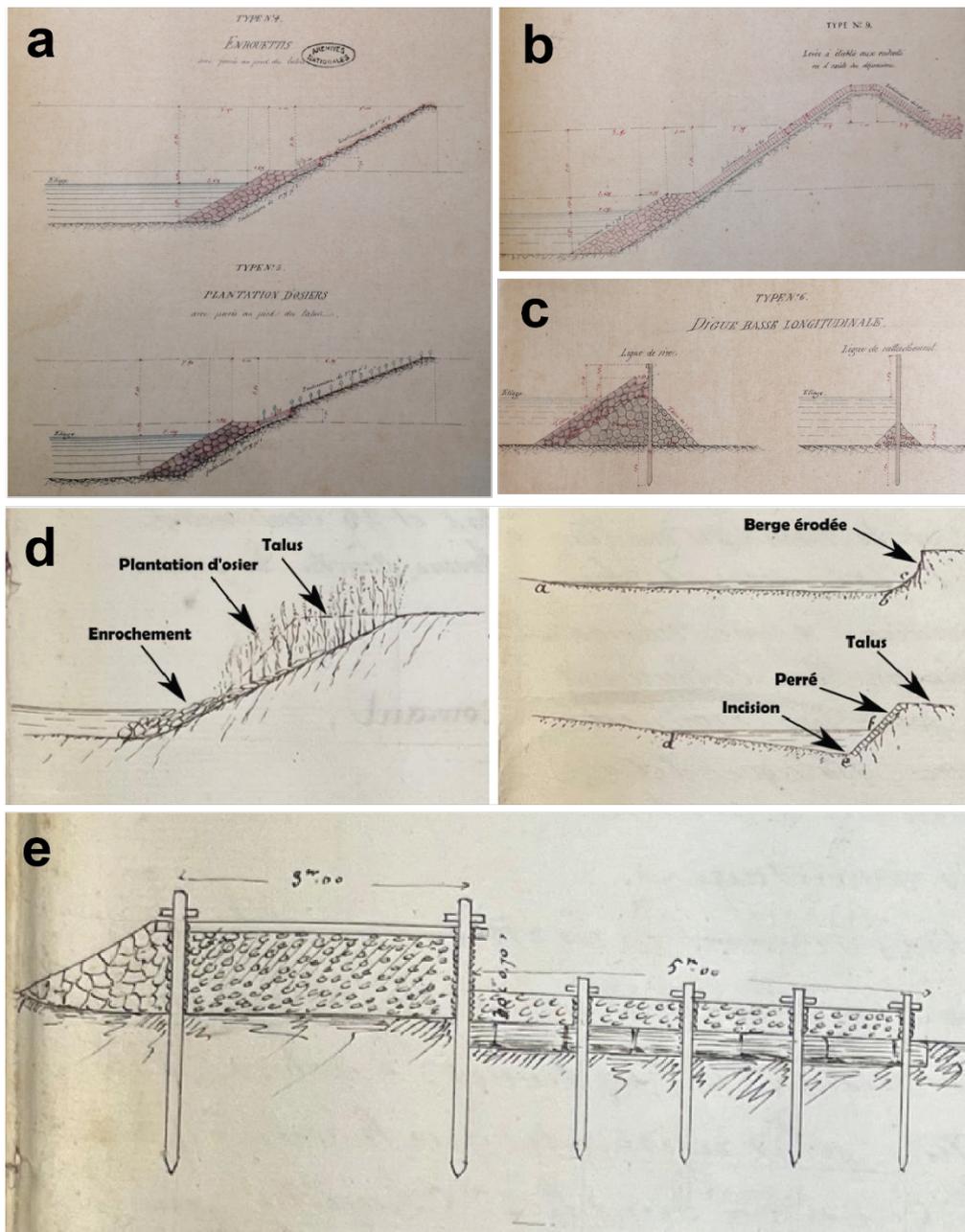
### 3.2.3. Une diversité d'aménagements

Comme en témoigne l'exemple du site de Nevers en 1692 (**Figure 2.19**), l'aménagement du lit majeur sur la zone d'étude repose sur une grande diversité de taille et de vocation des aménagements (**Figure 2.20**).



**Figure 2.19.** Exemple de plusieurs types d'aménagements présents sur le site de Nevers (1692). **1** : successions d'épis. **2** : battis. **3** : levées de Sermoise et de Saint Antoine (**carte de Mathieu de 1692**<sup>5</sup>).

<sup>5</sup> « Carte du cours de la riviere d'Allier depuis le pont du Château jusqu'à son embouchure dans la riviere de Loire et aussi partie de la Riviere de Loire depuis la Ville de Desize jusqu'à celle de la Charité faite Par l'ordre de Monsiegnur Le Peletier conseiller d'Etat, Itendant des finances et directeur general des fortifications / Par le Sr Mathieu », réalisée par Mathieu (16.. – 1733) (BNF, département Cartes et Plans, GE DD-2987 (1266B). En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53052630z>).

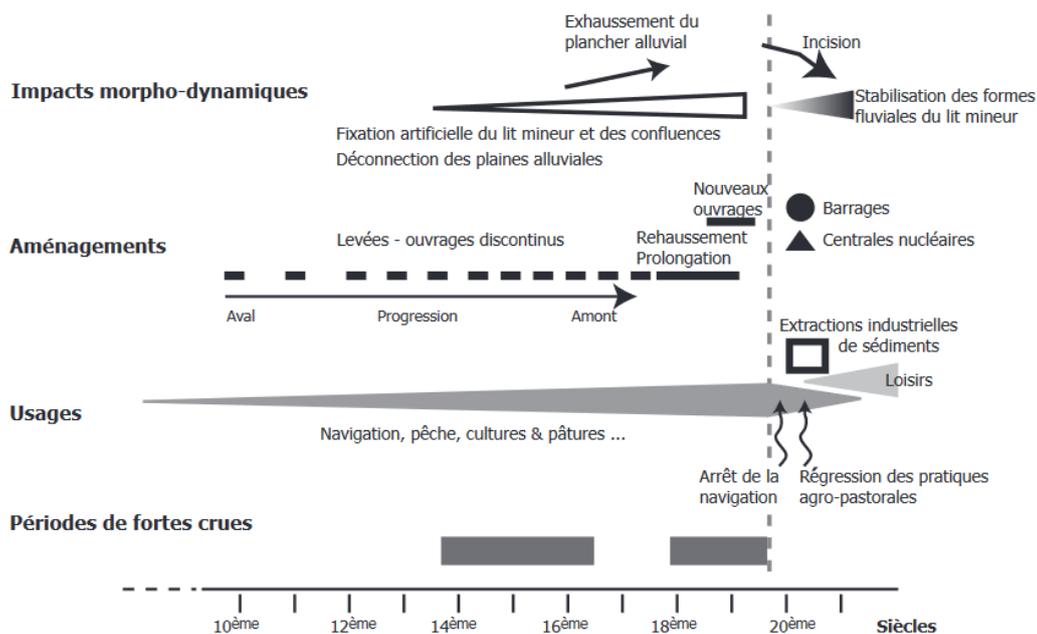


**Figure 2.20.** Différents types d'aménagements fluviaux présents sur la zone d'étude. **a** : deux différents types d'empierrements associés à des enrouettis (branchages entrelacés) ou des plantations d'osiers (AN, F/14/7557, 1859). **b** : levée (AN, F/14/7557, 1859). **c** : digue basse (AN, F/14/7557, 1859). **d** : schéma d'enrochement (gauche) et de perré (droite) (AN, F/14/6670, 1840 ; dans **Martins, 2022**). **e** : exemple d'aménagement de comblement d'un bras secondaire (AN, F/14/6670, 1840 ; dans **Martins, 2022**).

Les digues, empierrements et perrés permettent aux sociétés riveraines de contraindre la Loire à moindre coût (**Figure 2.20**), que ce soit en contexte rural ou urbain, notamment associé aux ponts et aux installations portuaires. L'emploi de digues et d'épis est très répandu afin de répondre à plusieurs objectifs : détourner et forcer le déplacement d'un bras, barrer entièrement un bras, modifier la morphologie d'une île, limiter l'érosion ou forcer l'ensablement, etc. (**Temam, 2012**). Les épis pouvaient être construits en pierres et/ou avec des fascines. À Sully-sur-Loire, l'équipe d'archéologues

menée par Annie Dumont a découvert trois structures linéaires de plusieurs centaines de mètres, dont deux datant du XVII<sup>e</sup> s. destinées à contraindre le lit de la Loire et à limiter l'érosion (**Dumont et al., 2023a**). Nommés « battis » ou « chevrettes », ces ouvrages sont formés de pieux et de planches de bois parallèles formant un coffrage rempli d'éléments sédimentaires très grossiers. Ce type d'aménagement pouvait être aussi bien utilisé parallèlement à la Loire pour limiter l'érosion (**Dumont et al., 2023a ; Foucher, 2023c**), que pour combler les bras secondaires (**Figure 2.20**). Les travaux de **Foucher (2023c)** ont révélé leur présence à Nevers au Moyen Âge afin de maintenir les bras de la Loire sous les ponts de la ville. Nous allons voir que malgré l'absence de levée avant le XVII<sup>e</sup> s., les communautés de Nevers et Decize investirent lourdement dans la réalisation de battis dès le XIV<sup>e</sup> s.

Enfin, les protections de berges (regroupant sous ce terme les différents types de perrés et d'enrochements) sont très nombreuses, permettant de contraindre la Loire à moindre coût. Si on sait qu'elles sont présentes aux abords des ports, il reste difficile de les repérer, peu présentes dans les archives documentaires et sur les cartes. De plus, nous allons que ces protections de berge correspondent à des linéaires qui peuvent largement différer, de quelques dizaines de mètres lorsqu'elles sont réalisées par des particuliers à plusieurs centaines lorsqu'elles le sont par les corps des ingénieurs.



**Figure 2.21.** Synthèse des interactions entre les sociétés et la Loire depuis le Moyen Âge (dans **Gautier et al., 2007**).

Ainsi, les usages du fleuve ont varié au cours du dernier millénaire. Ceux-ci amenèrent à un aménagement de plus en plus important des vals de Loire. Une rupture s'établit au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. L'utilisation domestique, la pêche, l'activité agropastorale, et la navigation laissent place à une utilisation tournée vers l'extraction de granulats et de loisirs (**Figure 2.21 ; Gautier et al., 2007**). Afin de sécuriser les différents usages, la Loire a été aménagée dès l'Antiquité et cet aménagement s'est accéléré au Moyen Âge pour atteindre son paroxysme aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s.

L'aménagement de la plaine n'a cependant pas été homogène sur tout son cours, et celui de la zone d'étude a été bien plus tardif et semble avoir été moins massif qu'à l'aval, son étude géohistorique ayant été en conséquence délaissée. Un des objectifs de cette thèse est de rendre compte précisément des trajectoires d'aménagement de la zone d'étude.

\*

## Conclusion du Chapitre

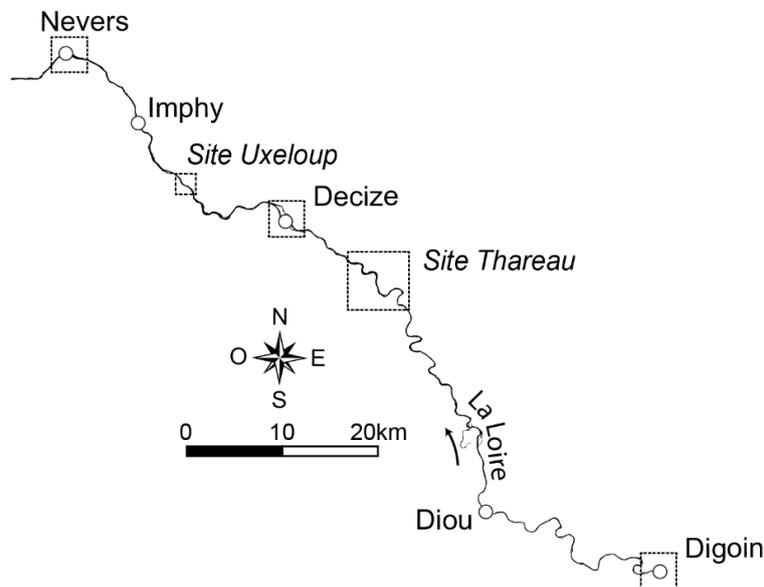
La Loire de la zone d'étude est une Loire de carrefour, située à cheval entre Bourbonnais et Nivernais, entre Massif Central et bassin Parisien, entre influence océanique et influence méditerranéenne. Elle présente un régime hydrologique contrasté et un style fluvial à chenaux uniques méandriformes, délaissant peu à peu sa sinuosité lors de son entrée dans le Bassin Parisien. Traversant la petite Limagne sous forme anastomosée ou méandriforme au grès des fluctuations climatiques passées, la Loire conserva jusqu'à aujourd'hui une capacité érosive et de divagation forte au sein d'une plaine alluviale très majoritairement sablonneuse. Cette capacité a obligé les sociétés à l'échelle de toute la Loire, dès l'Antiquité et le Moyen Âge, à aménager le lit majeur afin de limiter les déplacements de la Loire pour limiter la destruction des ponts, ports ou encore villages. La trajectoire d'aménagement de la zone d'étude semble néanmoins différente de celle à l'aval, la Loire n'étant pas enfermée entre des successions de levées sur chaque rive comme ce peut être le cas à Orléans, Blois, Amboise ou encore Tours. Pourtant, tout comme à l'aval, bien que plus modérée, la navigation sur la Loire constitue une des activités les plus importantes pour les recettes des nombreux ports et des différentes cités riveraines. Si les sociétés n'optèrent à première vue pas pour la construction de levée, elles aménagèrent tout de même le lit majeur de la Loire à l'aide d'infrastructures plus « légères ». Néanmoins, l'ouvrage de **Dion (1961)** ne s'intéressa qu'aux levées sur la zone d'étude, et la thèse de **Temam (2012)** ne traite de l'aménagement du lit majeur qu'à partir du XVIII<sup>e</sup> s. Alors la question subsiste : à quand remonte cet aménagement du lit majeur sur la zone d'étude, et quelle fut son histoire complète ? Ces infrastructures plus « légères » à première vue le furent-elles vraiment ? Et les différences de trajectoires d'aménagements trouvent-elles leurs raisons dans les caractéristiques géomorphologiques et géologiques différentes de l'aval, ou même dans une activité hydrologique différente ? Car au-delà des divagations de la Loire, les sociétés ont également dû faire face au régime hydrologique de la Loire, apparaissant comme contrasté au cours des derniers siècles, mais qui devait l'être d'autant plus au cours du Petit Âge Glaciaire. Alors sous quelles modalités ce régime évolua-t-il ? Afin de répondre à ces différentes questions et aux autres objectifs de la thèse énoncés dans le **premier chapitre**, nous avons choisi de sélectionner plusieurs sites d'étude au sein de cette zone d'étude.



# Chapitre 3

## Les sites d'étude

Cinq sites d'étude, deux en contexte rural et trois en contexte urbain, ont été sélectionnés au sein de la zone d'étude pour la mise en place des différentes approches (**Figure 3.1**). Deux raisons principales justifient le choix des sites. Premièrement, la diversité de leurs modes d'occupation en fonction de leur contexte urbain ou rural permet d'avoir une fresque plus large des relations entre les sociétés et leur environnement, et notamment de l'aménagement fluvial au cours du dernier millénaire. En second lieu, les sites urbains et ruraux permettent de mettre en place les différentes approches et méthodologies mobilisées dans le cadre de cette thèse. L'approche géomorphologique et sédimentologique est mise en place en contexte rural, dont les sites d'étude sélectionnés présentent des paléochenaux susceptibles d'avoir enregistré le passage des crues sur les deux derniers millénaires. Cet enregistrement risque cependant d'être trop perturbé en contexte urbain. À l'inverse, les cités médiévales de Decize et Nevers présentent des ressources documentaires essentielles à l'approche géohistorique, bien plus rares en contexte rural. Ce chapitre a donc pour but de présenter les différentes caractéristiques de chaque site, qu'elles soient géographiques, géologiques, morfo-sédimentaires ou historiques.



**Figure 3.1.** Localisation des cinq sites d'étude.

# 1. Deux sites ruraux : Uxeloup et Thareau

## 1.1. Site d'Uxeloup

### 1.1.1. Cadre géologique et morpho-sédimentaire du site

Le premier site d'étude rural d'Uxeloup se situe sur les communes de Luthenay-Uxeloup, Béard et St-Ouen-sur-Loire dans le département de la Nièvre (Figure 3.2, Figure 3.3). Ce site d'étude a été choisi en raison de la présence de paléochenaux antérieurs au XVII<sup>e</sup> s. et de la faible mobilité supposée de la Loire comme peuvent en témoigner les cartographies anciennes (cf. chapitre 4). Cette caractéristique peut nous assurer un enregistrement sédimentaire de l'activité hydrologique moins perturbé par les éloignements et rapprochements des chenaux actifs.

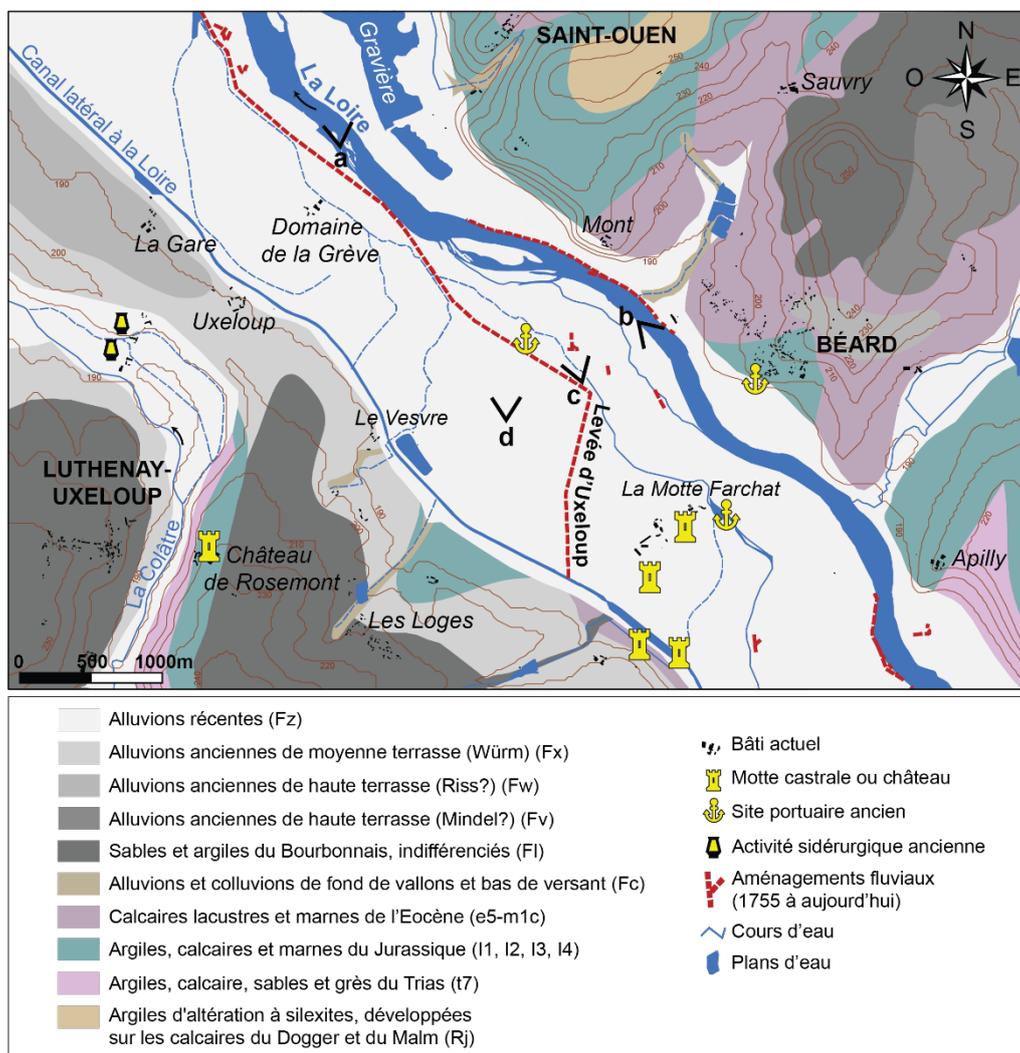
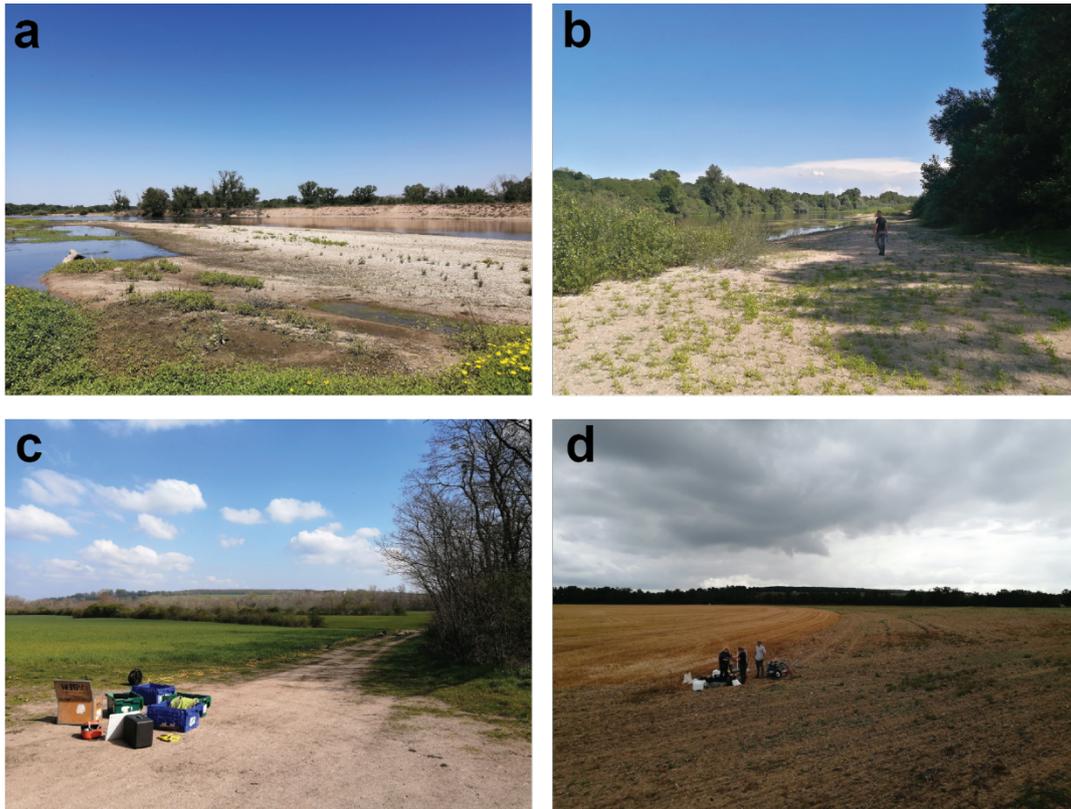


Figure 3.2. Localisation actuelle du site d'étude d'Uxeloup (BRGM, IGN). Les indicatifs a, b, c, et d correspondent aux localisations des photographies de la Figure 3.3.

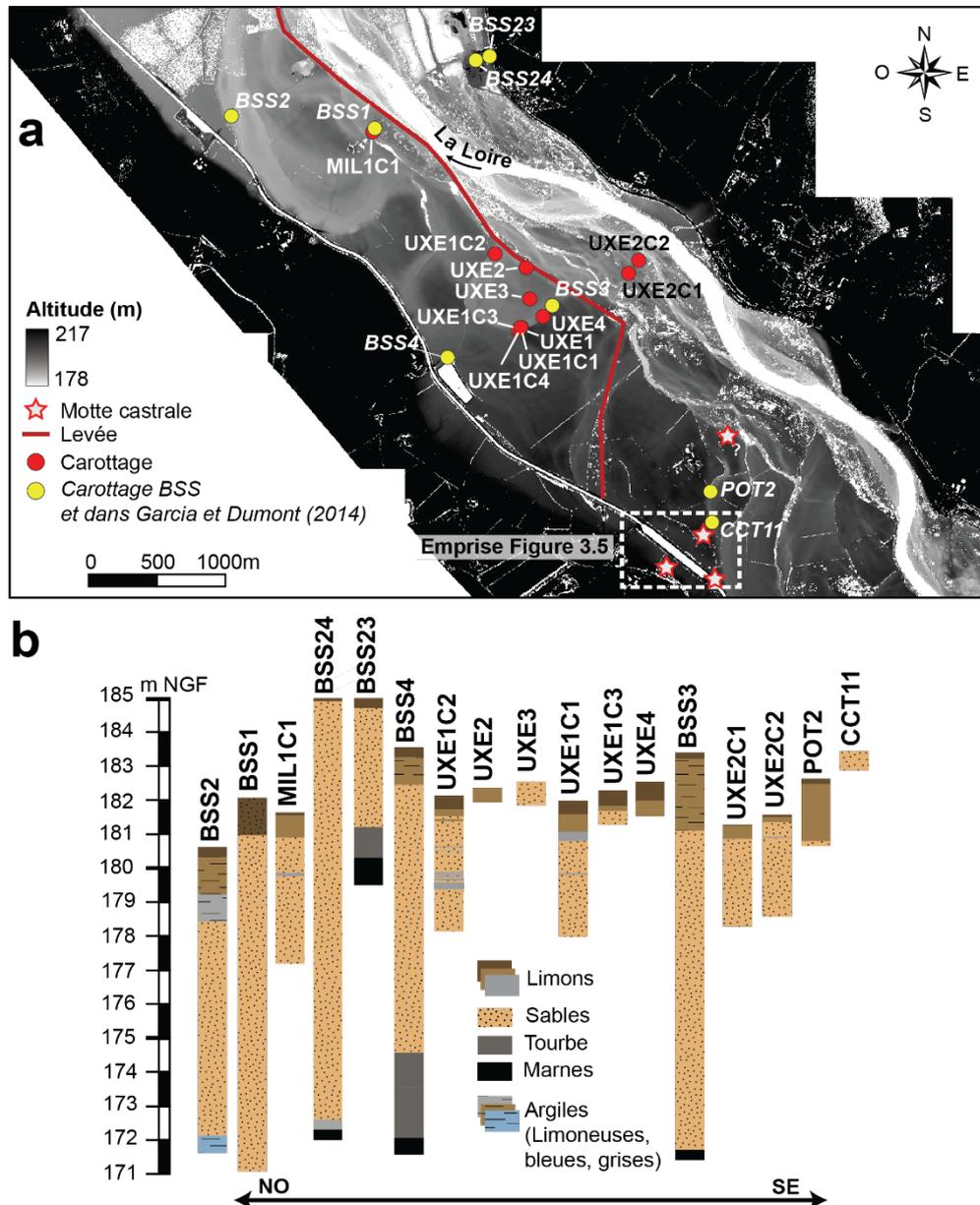


**Figure 3.3.** Photographies du site d’Uxeloup. **a** : banc actif entre un chenal principal et secondaire. **b** : banc actif de chenal principal. **c** : vue depuis le bas de la Levée vers la Loire. **d** : vue des cultures en arrière de la levée et site du carottage UXE1C1.

Le site a aussi été choisi en raison de présence de la levée d’Uxeloup. Sa présence et celle des aménagements l’ayant probablement précédé pourront aussi rendre compte de leur impact sur la sédimentation de la plaine. Cette levée intéressa également le programme ANR Digue visant à étudier et penser les transitions des systèmes d’endiguement maritimes et fluviaux au XXI<sup>e</sup> s. en France entre usages, paysage, nature et protection (Goeldner-Gianella et al., 2024).

La plaine alluviale présente sur le site d’étude une largeur moyenne de 2,02 km, deux fois moins étendue que celle de l’autre site rural de Thareau. La Loire y est contrainte en rive droite par des formations sédimentaires résistantes de l’Éocène et du Jurassique. En rive gauche, on retrouve deux niveaux de terrasses surplombées par les sables du Bourbonnais (Figure 3.2). Le lit majeur a conservé les traces de plusieurs paléochenaux de différentes formes et tailles (Figure 3.4). Le fonctionnement des paléochenaux situés près des mottes castrales au sud-est du site a été daté comme contemporain, ou plus ancien, de la construction des mottes datée du Moyen Âge (Garcia et Dumont, 2014 ; Figure 3.2, Figure 3.4, Figure 3.5). Les paléochenaux les plus éloignés de la Loire présentent un remblaiement fin d’environ 1 m ou plus, puis celui-ci est majoritairement dominé par les sables qui atteignent jusqu’à plus de 10 m d’épaisseur (Figure 3.4). Le remblaiement en sédiment fin est le plus mince sur les carottages réalisés au sein des paléochenaux les plus récents et les plus proches de la Loire.

La Loire adopte actuellement un style assez rectiligne, contrairement au site de Thareau. Elle est en effet contrainte sur le site d'Uxeloup par la géologie, l'enfoncement du lit qui atteint 4 m depuis le milieu XVIII<sup>e</sup> s. (Gautier et al., in prep) et par la présence d'aménagements, notamment la levée d'Uxeloup (Figure 3.2).

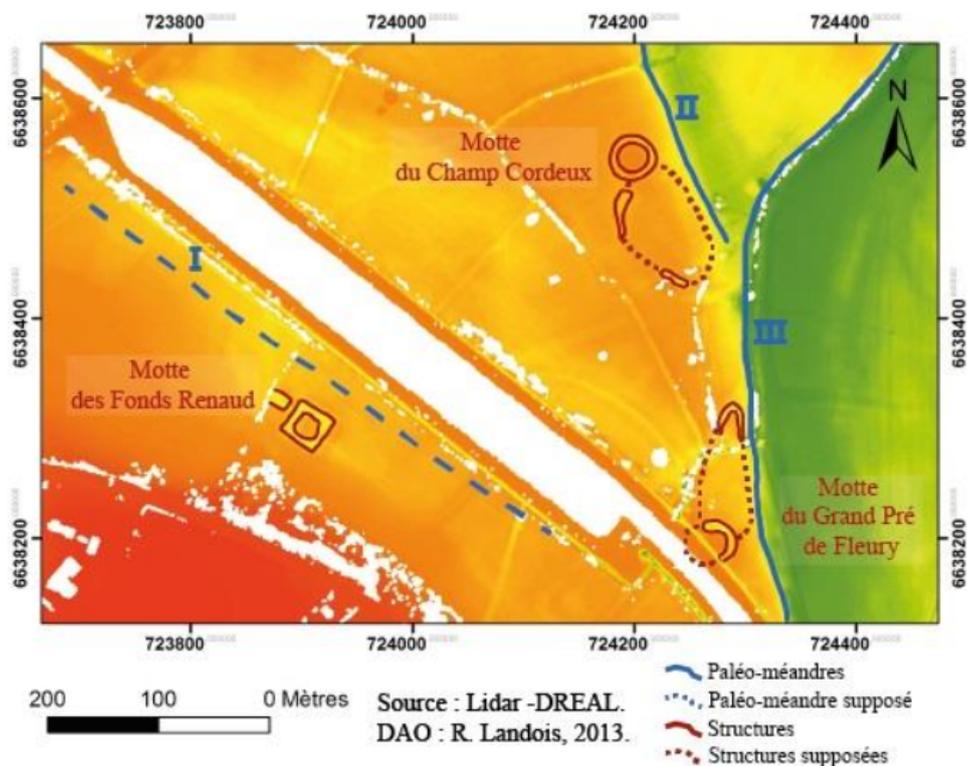


**Figure 3.4.** Carottages du site d'Uxeloup. **a** : situation des carottages et profils altimétriques. **b** : représentation simplifiée des séquences sédimentaires des carottages de la thèse, de la BSS et de Garcia et Dumont (2014). L'altitude de BSS24 est inconnue. UXE1 et UXE1C4 n'ont pas été représentés en raison de leurs similarités avec UXE1C1.

### 1.1.2. Cadre géographique et historique

Le lit majeur du site d'Uxeloup est occupé depuis au moins la période médiévale. Les prospections aériennes d'Alain Magdelaine ont mis en évidence la présence de trois mottes castrales médiévales, également visibles sur le MNT Lidar (Figure 3.5) et étudiées par Garcia et Dumont (2014).

Leur présence proche des anciens chenaux pourrait refléter une volonté de contrôler le passage et donc les redevances sur la Loire (**Garcia et Dumont, 2014**). On retrouve plusieurs aménagements fluviaux plus tardifs, dont le plus important est la levée d’Uxeloup, ou « levée de la Bure ». L’objectif de sa réalisation était de contraindre la Loire en la plaquant contre la rive droite afin d’améliorer la navigation et d’assurer l’ancien port de la Bure qui se trouvait sur la levée (**Figure 3.2, Figure 3.4**). La construction de la levée date du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (**AN, F/14/1198, F/14/1199 ; Dion, 1961**). Outre le port de la Bure, un port est avéré depuis au moins le XVII<sup>e</sup> s. au lieu-dit d’Uxeloup, destiné à l’échange de bois (**Association GenNièvre, WIKI58<sup>6</sup>**), mais il est probable qu’un plus ancien est préexisté pour le transport du bois. En effet, depuis le XV<sup>e</sup> s. au moins, la ville de Nevers se fournit en bois à Luthenay, à la Motte Farchat et à Fleury-sur-Loire, pour réparer les ponts de la ville (**AM Nevers, CC/36, 1434 ; CC/77, 1496 ; CC/87, 1512 ; CC/91, 1516 ; CC/94, 1519 ; CC/116, 1543**). La contrainte appliquée à la Loire est aussi assurée par de plus petits aménagements, comme des digues situées à l’amont et à l’aval de la Levée ou encore des protections de berges, relevées par les membres de la RNR Loire Bourguignonne<sup>7</sup>. Aujourd’hui, l’occupation de la plaine alluviale de la Loire est partagée entre espaces agricoles (céréaliers et pâtures) en arrière de la levée et espaces boisés occupant une partie de l’ancienne bande active des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s.



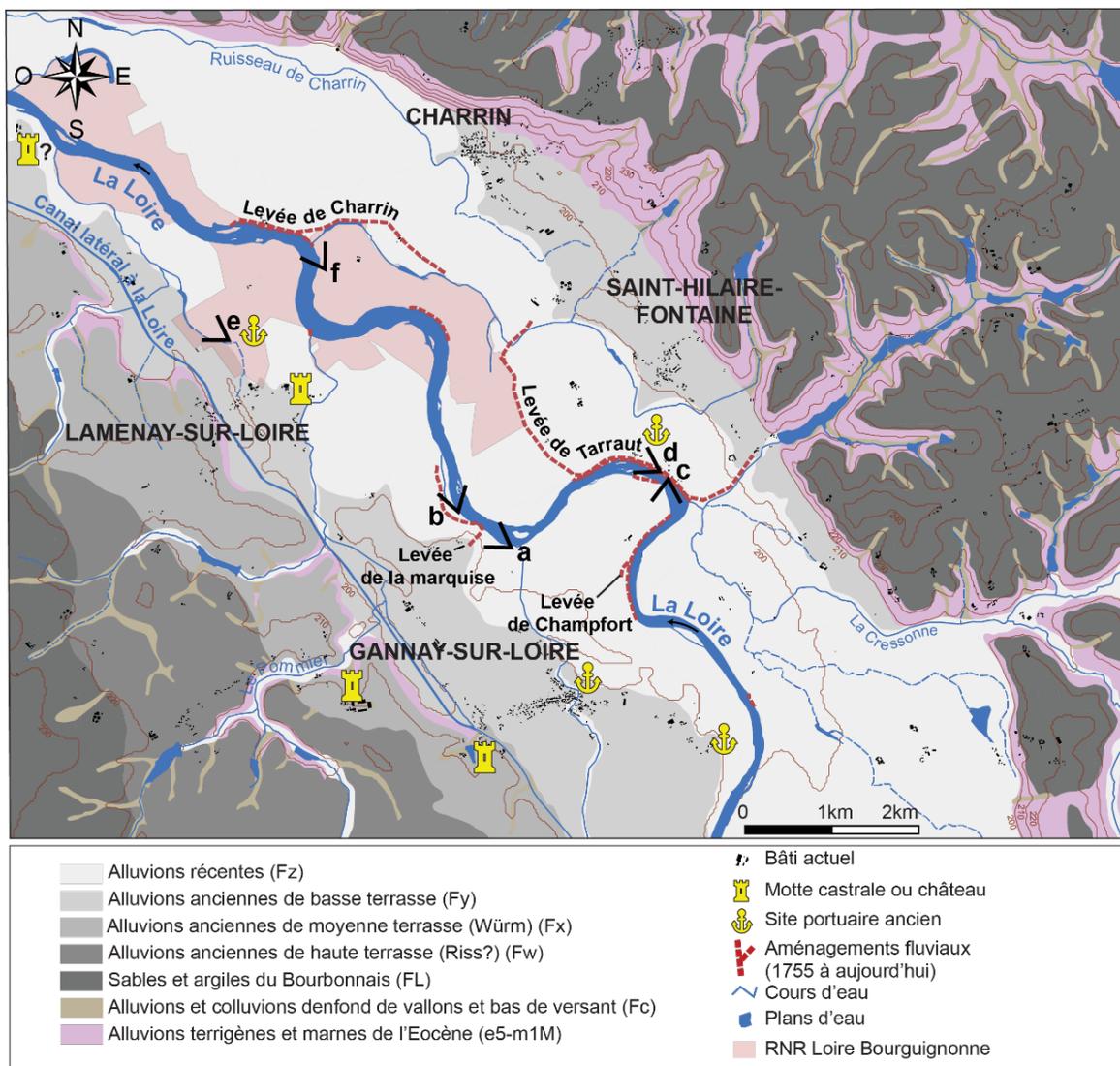
**Figure 3.5.** Mottes castrales à l’amont du site d’Uxeloup (**Garcia et Dumont, 2014**). Situation présentée en **Figure 3.4**.

<sup>6</sup> [https://www.gennievre.net/wiki/index.php/La\\_vente\\_et\\_le\\_transport](https://www.gennievre.net/wiki/index.php/La_vente_et_le_transport)

<sup>7</sup> Relevés effectués en 2019 en barque entre Digoin et Nevers.

## 1.2. Site de Thareau

Le site d'étude amont de Thareau se trouve sur les communes de Gannay-sur-Loire, St-Hilaire-Fontaine, Laménay-sur-Loire, Charrin, Cossaye et Devay à cheval entre les départements de l'Allier et Nièvre. Le site d'étude est aussi intégré dans la Réserve Naturelle Régionale de la Loire Bourguignonne (RNR Loire Bourguignonne) (**Figure 3.6**). Ce site a tout d'abord été choisi en raison de la présence importante de paléochenaux, multipliant les chances d'obtenir un enregistrement sédimentaire idéal de l'activité hydrogéomorphologique passée de la Loire. Ce site a également été sélectionné en raison de la forte mobilité de la Loire dans le passé et contre laquelle les sociétés ont lutté, comme en témoignent les nombreux aménagements et les documents conservés aux Archives nationales, constituant un cas d'étude des relations entre sociétés et hydrosystème en contexte rural. Cette mobilité reste par ailleurs encore significative aujourd'hui



**Figure 3.6.** Localisation actuelle du site d'étude de Thareau (BRGM, IGN).

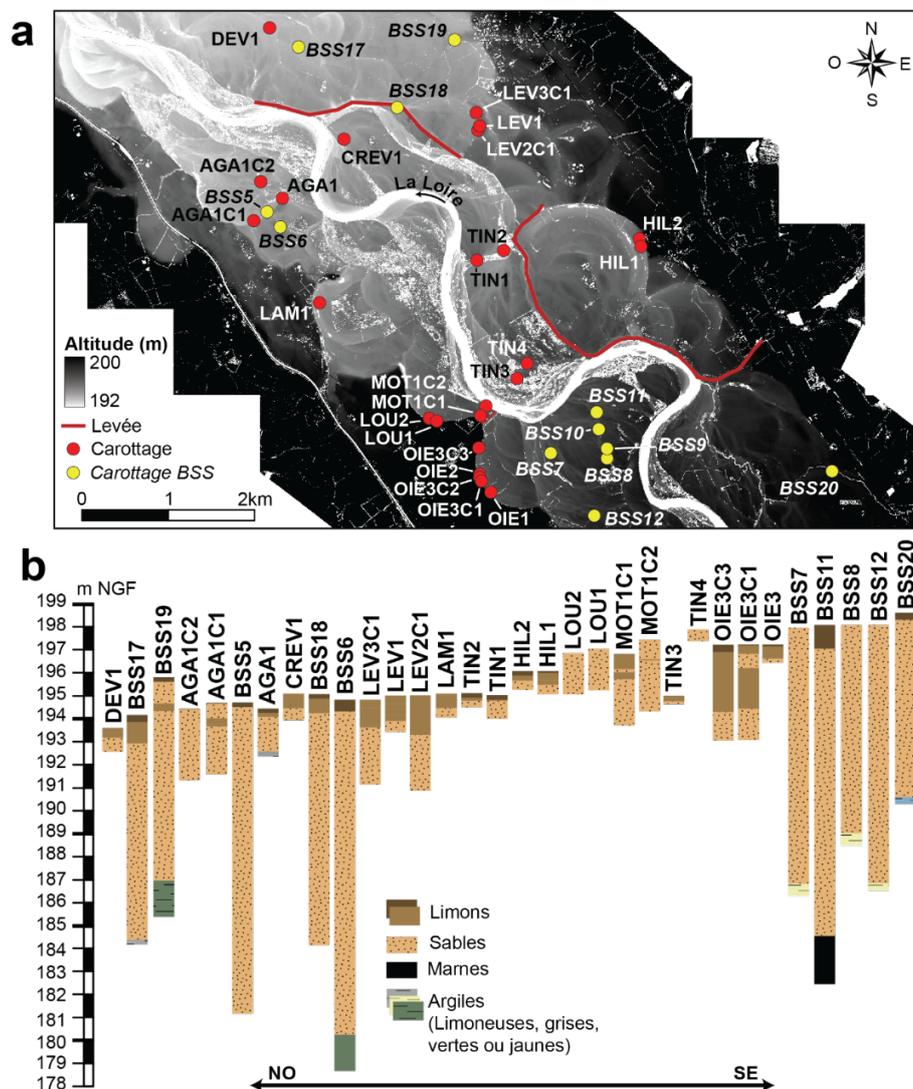
### 1.2.1. Cadre géologique et morpho-sédimentaire

La largeur de la plaine alluviale atteint 4,74 km, bien plus importante que sur le site d'Uxeloup car moins contrainte par les terrasses peu cohésives qui l'entourent. En effet, la plaine est surplombée en rive gauche de trois niveaux de terrasses et d'un quatrième niveau formé de sables du Bourbonnais. En rive droite, à la vue des empreintes en demi-cercle des paléochenaux, la Loire semble pouvoir éroder facilement le seul niveau de terrasse le plus récent (**Figure 3.6**). Les terrasses plus anciennes y ont probablement été érodées. Les sables du Bourbonnais présents en rive droite et en rive gauche forment un vaste épandage fluvio-lacustre de la Grande Limagne depuis Vichy, et de la Petite Limagne depuis le sud de Digoin, au Bec d'Allier, mis en place au cours du Pliocène précédant la formation des premières terrasses pléistocènes (**Le Griel, 1980**). En conséquence de ce contexte géologique, la Loire peut divaguer plus librement que sur le site d'Uxeloup et adopte un style sinueux avec une capacité d'érosion importante. Les crues de décembre 2023 et mars 2024 de taux de retour d'un an, et la crue d'avril 2024 de taux de retour de 6 ans ont par exemple fait reculer les berges sablonneuses au niveau de la Levée de la comtesse de 2 à 15 m environ (**Figure 3.6**). Depuis 2009, ces berges enregistrent des taux de recul allant jusqu'à 6 m en moyenne par an d'après nos relevés.



**Figure 3.7.** Photographies du site de Thareau. **a** : berge concave de la Loire. **b** : banc de chenal principal. **c** : Loire et banc de convexité vu depuis la levée de Thareau. **d** : levée de Thareau. **e** : banc actif et banc végétalisé servant de pâture pour moutons, levée de Charrin en fond. **f** : paléochenal de Laménay, ancien site portuaire (XVIII<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> s.).

La plaine a conservé de nombreux paléochenaux de différentes tailles, témoins de cette divagation (**Figure 3.8**). Tout comme pour le site d'Uxeloup, ce sont les paléochenaux les plus éloignés de la Loire actuelle qui présentent des remblaiements sédimentaires fins limoneux les plus épais (**Figure 3.8**). Les paléochenaux de LEV et OIE présentent par exemple plus d'un mètre de remblaiement limoneux, idéal pour l'étude de l'enregistrement sédimentaire des dépôts de crue. Toutefois, les paléochenaux les plus récents et les plus proches du lit mineur actuel présentent des remblaiements aux séquences majoritairement sableuses avec une très faible épaisseur de sédiments fins. L'enfoncement du lit sur le site est moins important que sur le site d'Uxeloup (**Gautier et al., in prep**), peut être en raison de la capacité de la Loire à pouvoir éroder ses berges, mais aussi en raison de présence moins importante d'aménagements à l'amont du site en comparaison de l'amont du site d'Uxeloup. Si la Loire présente une mobilité plus forte que sur le site d'Uxeloup, elle n'en reste pas moins contrainte par plusieurs aménagements, des levées aux protections de berge (**Figure 3.6**).



**Figure 3.8.** Carottages du site de Thareau. **a** : situation des carottages et profils altimétriques **b** : représentation simplifiée des séquences sédimentaires des carottages de la thèse et de la BSS. OIE2 et OI3C2 n'ont pas été représentés en raison de leurs similitudes avec OIE3C1.

### 1.2.2. Cadre géographique et historique

L'occupation de la plaine alluviale est assez similaire à celle du site d'Uxeloup. Les espaces boisés sont concentrés sur les espaces anciennement occupés par la bande active au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. Contrairement à la Loire moyenne et aval, l'habitat est dispersé au sein du lit majeur, rassemblé sur les levées de Charrin et Thareau. Les bourgs de Charrin, Saint-Hilaire-Fontaine, Laménay ou Gannay se sont en effet développés sur les terrasses les plus récentes, en limite du lit majeur (**Figure 3.6**). Les levées présentes sur le site ont donc été réalisées majoritairement pour améliorer la navigation et protéger les parcelles agricoles. Leur construction est entreprise par les Ponts et Chaussées au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. suite aux plaintes des habitants des communes de Charrin, Saint-Hilaire-Fontaine et Devay (**AN, F/14/1199/2 ; F/14/1200**). Les deux levées de Thareau et de Charrin ne devaient former qu'une seule et même levée, mais les crues répétées empêchèrent sa finalisation. Aujourd'hui, si les levées ne protègent pas le val des inondations de la Loire, elles contraignent encore fortement sa mobilité (**Figure 3.6**). Deux autres levées de plus petite envergure, et dont la construction a été entreprise par des particuliers, sont présentes sur le site : la levée de la marquise construite en 1790 et la levée de Champfort probablement datée du XIX<sup>e</sup> s. Ces deux levées, érodées par la Loire, devaient être plus étendues qu'elles ne le sont aujourd'hui. Plusieurs protections de berge ont également été relevées par les membres de la RNR Loire Bourguignonne. Elles sont majoritairement présentes sur les concavités des méandres afin de limiter l'action érosive du cours d'eau (**Figure 3.6**).

Malgré la mobilité passée de la Loire, le site d'étude présente une activité portuaire passée importante. Quatre anciens ports secondaires ayant fonctionné à des périodes différentes sont recensés sur le site d'étude (**Figure 3.6**). Le port de la levée, seul en rive droite, aurait fonctionné depuis au moins la période médiévale<sup>8</sup>. Le port de Thareau correspondait autrefois à une paroisse du nom d'Aulnay, avérée depuis 1164, avec église et cimetière aujourd'hui disparus (**Chabrol, 2018**). Port Thareau reliait son arrière-pays forestier aux ports du cours de la Loire jusqu'à Paris avec le commerce allant du bois aux produits manufacturés. Le sable nécessaire à la fabrique de verre à Fours (Nièvre), quelques kilomètres plus à l'est, y transitait (**Petit-Dorot, 2021**). On retrouve deux autres ports à Gannay-sur-Loire dont celui du Port Saint-Georges, ayant fonctionné jusqu'au XIX<sup>e</sup> s., et celui de à Laménay-sur-Loire ayant fonctionné au moins du XVIII<sup>e</sup> s au XIX<sup>e</sup> s.

---

<sup>8</sup> Selon un panneau d'information sur la levée de Thareau non sourcé.

## 2. Les trois sites urbains : Nevers, Decize et Digoin

Trois sites d'étude en contexte urbain ont été sélectionnés : Digoin, Decize et Nevers. Ils ont été choisis car correspondant à trois sites de confluences et aux trois ports ligériens les plus importants de la zone d'étude. Ils bénéficient ainsi de ressources documentaires très importantes remontant jusqu'au XIV<sup>e</sup> s. Ces documents vont nous être essentiels à l'étude des relations entre les sociétés et leur environnement ligérien en contexte urbain, ainsi qu'au recensement des crues passées de la Loire.

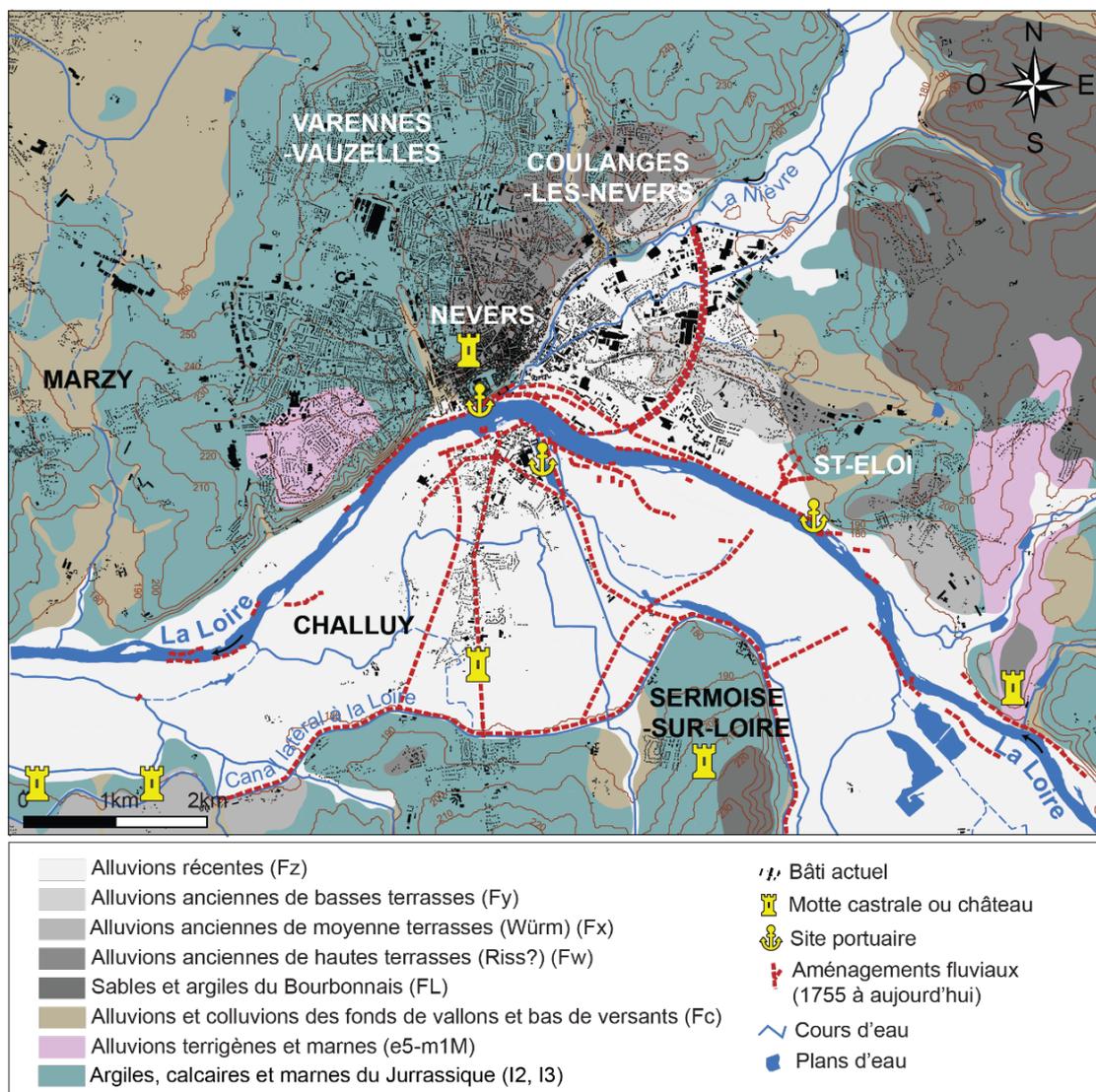


Figure 3.9. Localisation actuelle du site de Nevers (BRGM, IGN).

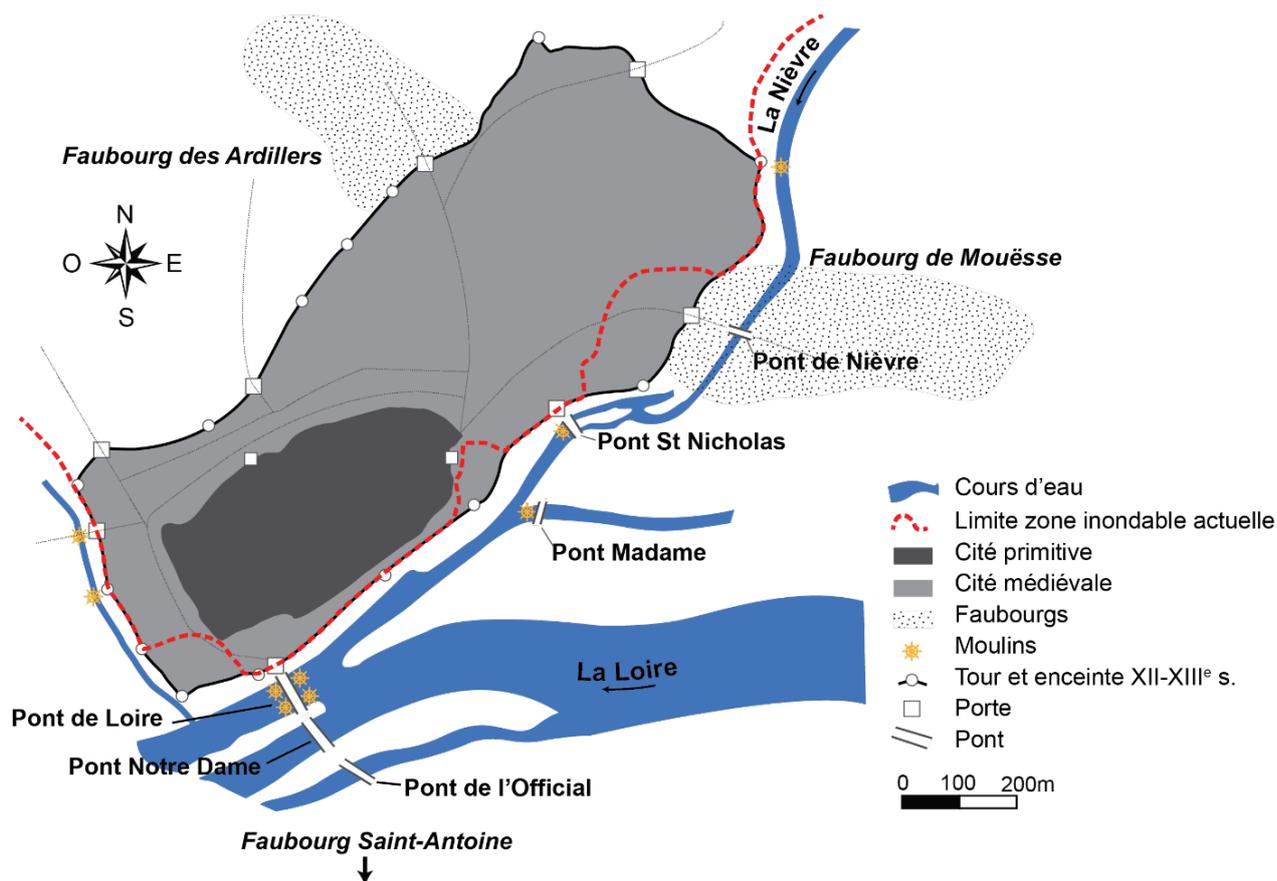
### 2.1. Nevers

Le site de Nevers est le site urbain de franchissement et portuaire le plus important de la zone d'étude. Il est situé à la confluence entre la Nièvre et la Loire et accolé à une plaine alluviale large de plus de 3 km (Figure 3.9). L'importance politique et économique de la cité, ainsi que le nombre important d'aménagements, notamment de ponts, explique l'importante production documentaire.

### 2.1.1. Cité et capitale régionale

Le site est occupé depuis au moins l'époque gallo-romaine, comme l'atteste la présence d'une enceinte construite entre le IV<sup>e</sup> et le V<sup>e</sup> s. et la présence de plusieurs temples. L'obtention du siège d'un évêché dès le VI<sup>e</sup> s. atteste de l'importance précoce du site urbain (**Charrier et al., 1983**). Le cœur de la cité se développa sur et autour de la butte jurassique, occupée aujourd'hui par la cathédrale (**Figure 3.9**). Nevers devient ensuite la capitale d'un nouveau comté au début du Moyen Âge, à la frontière entre le royaume des premiers Carolingiens et le duché d'Aquitaine (**Escoffier, 2007**). La cité de Nevers se situe également aux frontières de plusieurs entités politiques (comté, duché, royaume) et à la confluence de nombreuses routes commerciales, fluviales (de l'Auvergne et de la région Lyonnaise à l'aval de la Loire) ou terrestres (route de Paris, capitale du royaume, à Lyon, capitale économique du royaume). Forte de cette situation, Nevers compta parmi les ports les plus importants de la Loire (**Mantellier, 1864-1869**) et se développa économiquement tout au long du Moyen Âge et de l'Ancien Régime (**Florenty, 1991**). Aux XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> s., la population avoisinait les 4000 à 6000 habitants (**Grisot, 1997**). Afin de faire face au développement urbain, Nevers bénéficia alors d'une seconde enceinte au XII<sup>e</sup> s. (**Charrier et al., 1984**). Si la cité primitive se situe en zone insubmersible, une partie de la cité médiévale se situe partiellement en zone inondable, ainsi que les faubourgs de Saint-Antoine et de Mouësse qui se développent tout au long du Moyen Âge et de l'Ancien Régime (**Figure 3.10**). Nevers et ses alentours bénéficièrent d'un fort développement industriel à partir du XVII<sup>e</sup> s. qui perdura jusqu'au XX<sup>e</sup> s. La profusion en minerai de fer sur la Nièvre ou sur ses propres affluents, notamment l'Aubois en rive gauche, permit le développement de l'industrie sidérurgique dans la région. L'industrie de faïencerie, introduite à Nevers au XVI<sup>e</sup> s., connut également un net développement aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> s. Les produits furent exportés dans tout le royaume et au-delà.

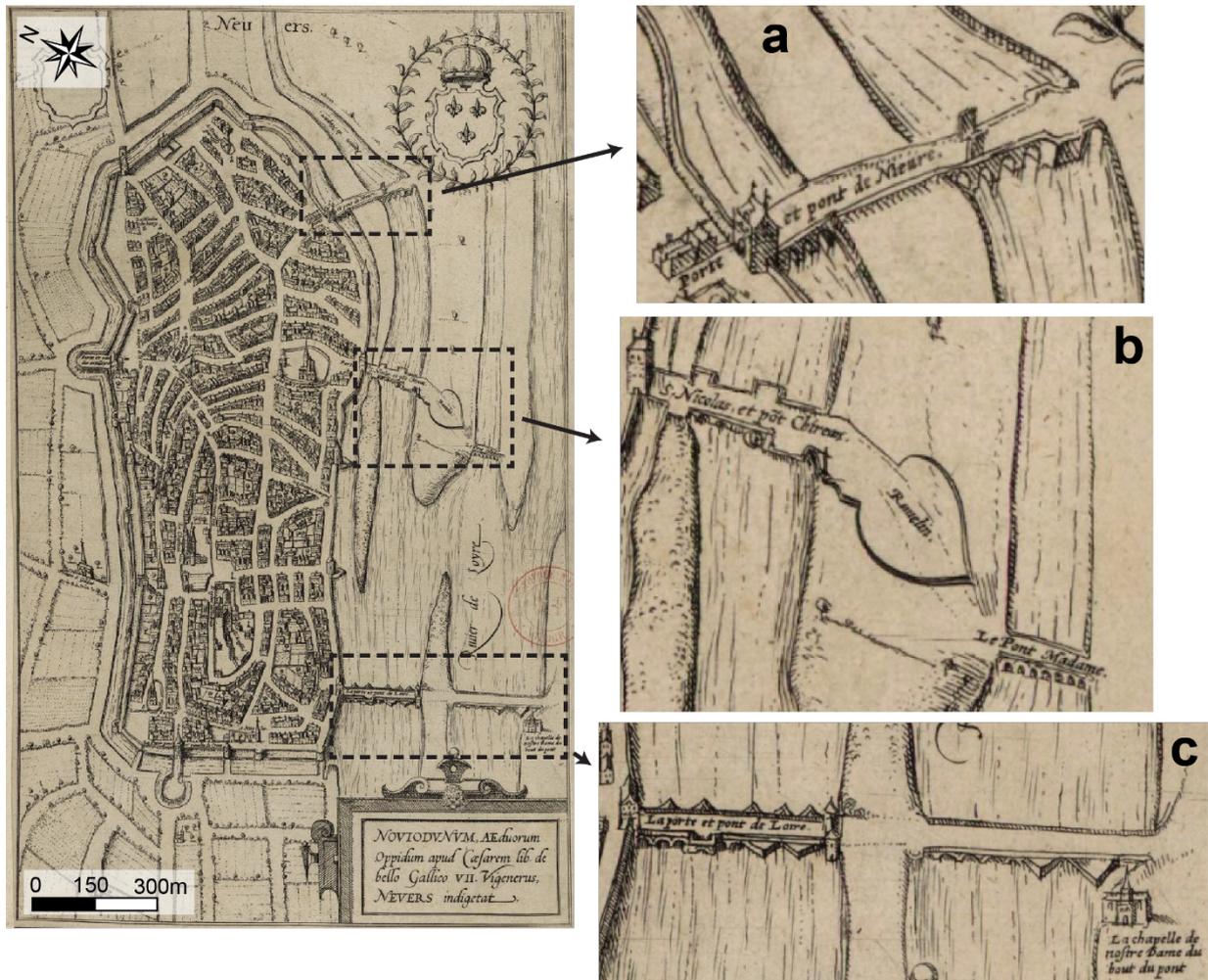
En 1231, la communauté de Nevers obtient son autonomie vis-à-vis du Comté de Nevers par une charte de franchise octroyée par les descendants de Pierre de Courtenay (**Crouzet, 1858**). Cette charte accorde aux Neversois le droit d'instituer un gouvernement municipal dont la gestion est confiée annuellement à quatre échevins (**Foucher, 2023c**). La communauté eut également le droit d'établir sa propre comptabilité afin de gérer ses revenus et ses dépenses communales. Cette comptabilité fut conservée sous forme de plusieurs dizaines de comptes de plusieurs dizaines voire centaines de pages entre 1389 et 1786. Riche en informations, ils renseignent sur l'histoire de la cité, notamment les divers événements auxquels la cité dû faire face (pestes, guerres, crues, etc.), ou encore sur les nombreux aménagements de la ville. C'est en grande partie sur cette documentation, conservée aux archives municipales de Nevers (**AD Nièvre**) et également conservée à Decize, que repose l'étude des crues passées de la Loire entre le XIV<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> s., comme nous le verrons dans le **quatrième chapitre**.



**Figure 3.10.** Proposition de représentation du site de Nevers aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. (modifié de **Foucher, 2023b** et de **Charrier et al., 1983**).

### 2.1.2. Une grande diversité d'aménagements sur un site de divagation du fleuve

Les comptes communaux de Nevers témoignent de la présence de nombreux ponts afin de franchir la Loire et la Nièvre, mais aussi d'accéder aux différentes îles présentes sur la Loire (**Figure 3.10, Figure 3.11**). La première mention d'un pont remonte en 1227, lorsque la comtesse de Nevers cède une partie des revenus de son péage sur le pont, nécessairement plus ancien donc. La ville compta jusqu'à dix ponts, bien que ce chiffre ait varié au gré des aménagements et surtout des événements de crue. Il fut en effet compliqué pour la communauté de maintenir le franchissement de la Loire en raison de largueur importante du lit majeur, de l'activité hydrologique de la Loire et de la divagation de ses chenaux (**Foucher, 2020 ; 2023b ; 2023c**). De nombreux aménagements ont été construits du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours (**Figure 3.9**), afin de limiter les divagations de la Loire dans un but de conserver les ponts, mais également d'assurer la navigation, essentielle aux revenus de la cité. Les réparations et reconstructions des nombreux ponts et aménagements à Nevers suite aux passages des crues ont permis un enregistrement important des événements de crue dans les documents comptables, puis plus tard, dans les documents des corps d'ingénieurs.



**Figure 3.11.** Représentation de Nevers en 1600. « Noviodunum, AEduorum Oppidum apud Caesarem lib. de bello Gallico VII Vigenerus. Nevers indigetat » (BNF. Une version colorée est conservée aux archives départementales de la Nièvre, côte **1Fi/Nevers/61A**). **a** : pont de Nièvre permettant le franchissement des douves et de la Nièvre. **b** : pont Saint Nicholas et pont Cizeau (autrefois séparés) permettant de franchir la Nièvre, et le pont Madame, permettant d'accéder à une île de la Loire. **c** : les deux ponts de Loire. Une troisième partie du pont de Loire, le pont de l'Official, n'est pas visible.

## 2.2. Decize

### 2.2.1. Une cité stratégique

Bien que plus petit, le site de Decize comporte plusieurs similitudes avec celui de Nevers. Tout d'abord, perchée sur une butte jurassique insubmersible entourée de deux bras de la Loire (**Figure 3.12**), l'occupation du Decize est ancienne avec la présence d'un oppidum éduen (*Decetia*) daté de l'époque gallo-romaine. De plus, malgré sa taille et son importance politique plus réduite que celles de Nevers, Decize reste une ville hautement stratégique pour le comté de Nevers (**Merle, 1974**). La forteresse de Decize, construite sur l'éperon rocheux, constitua la résidence secondaire des comtes de Nevers dès le XI<sup>e</sup> s. au moins (**Brocq, 2014**). Ville forteresse et portuaire, elle est un lieu de commerce important et le deuxième site du comté pour le franchissement de la Loire, notamment pour les marchandises et les troupes. Elle bénéficia en effet de la même situation favorable que Nevers par rapport aux routes

commerciales fluviales et terrestres. Decize, comme Nevers, compte parmi les péages les plus importants sur la Loire, dont le droit fut disputé entre le Comte de Nevers, la communauté des marchands et la communauté des habitants de Decize (Mantellier, 1864-1869). Si la cité souffre aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s. de grandes difficultés économiques provoquées par plusieurs événements militaires, hydrologiques ou encore épidémiques (Volut, 1992), son développement économique se poursuit au XVIII<sup>e</sup> s. La cité abrite alors un entrepôt de vin important et des activités de verrerie, de sidérurgie et de commerce de bois et de charbon. À partir du XIX<sup>e</sup> s., la ville bénéficia du raccordement à deux canaux, le canal latéral à la Loire et le canal du Nivernais, provoquant un second développement économique, notamment industriel, qui perdura jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> s.

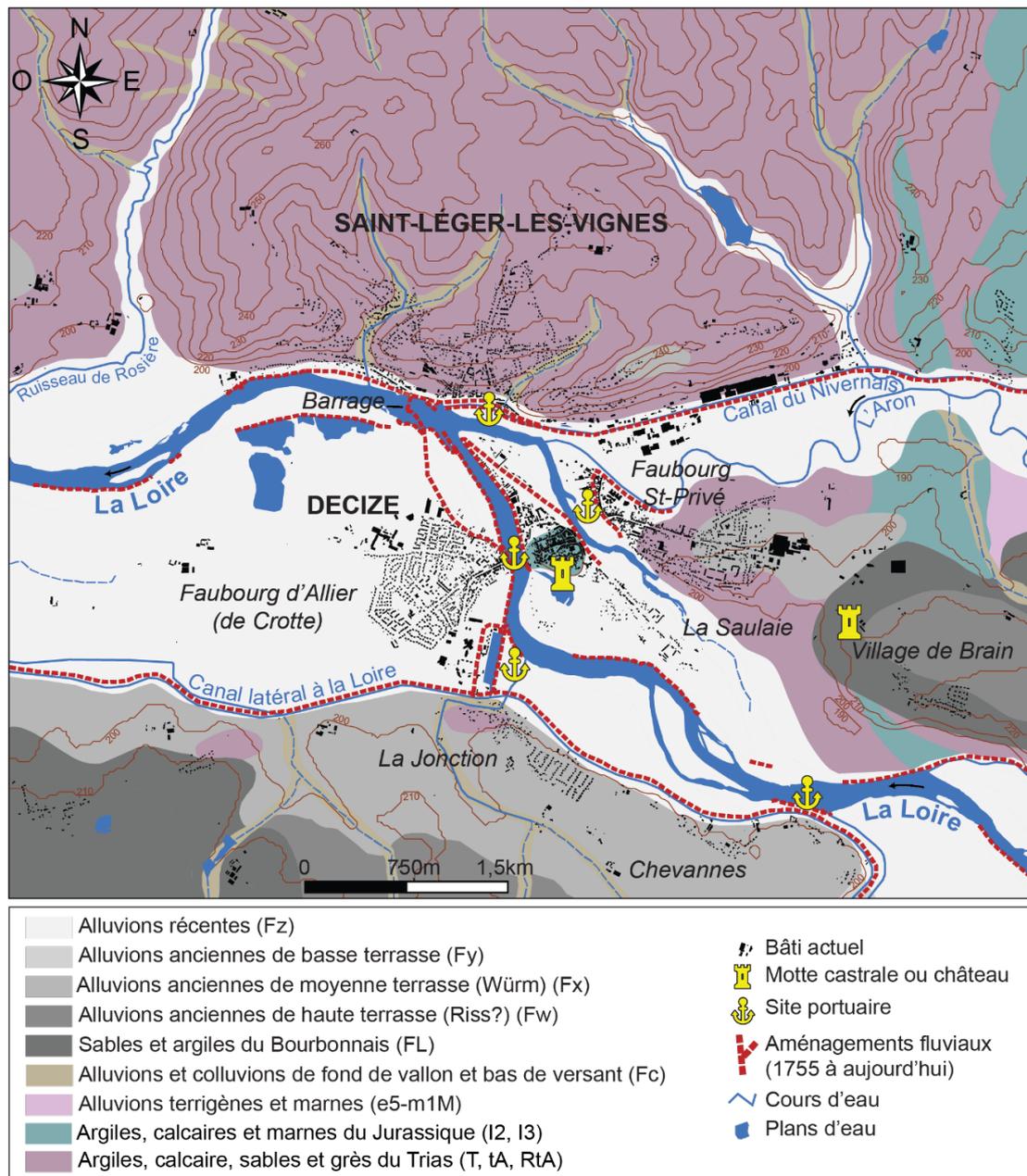
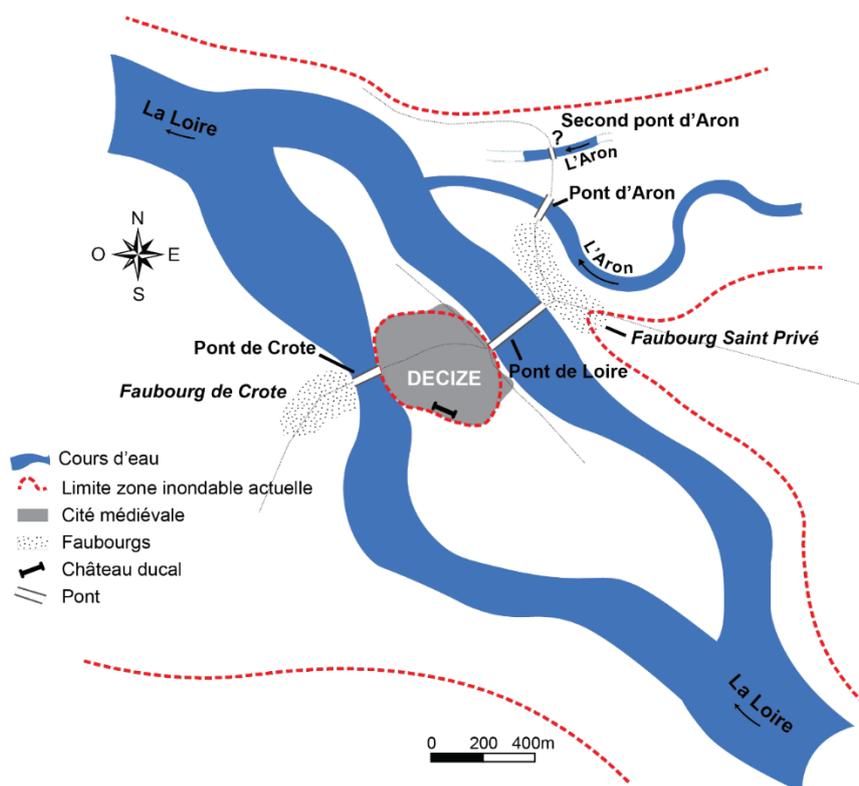


Figure 3.12. Localisation actuelle du site de Decize (BRGM, IGN).

Tout comme Nevers, la cité bénéficia d'une certaine autonomie dès le Moyen Âge grâce à une charte de franchise octroyée par les descendants de Pierre de Courtenay en 1226 (**Tresvaux de Berteux, 1855**). La communauté de Decize établit donc aussi une comptabilité communale dont les documents ont été en partie conservés aux archives municipales de Decize (**AD Nièvre**). Bien que le nombre de documents conservé soit plus faible qu'à Nevers, il n'en reste pas moins riches en détails sur l'histoire de la ville et de ses aménagements fluviaux, notamment face aux crues et aux divagations de la Loire.

### 2.2.2. Le second site de franchissement le plus important

Si le site de Decize permit à la ville de se développer grâce aux péages par terre et par eau, les sociétés payèrent cet avantage par l'obligation de maintenir deux ponts pour atteindre chaque rive, les rendant très vulnérables aux destructions des crues de la Loire et de l'Aron. La cité compta jusqu'à cinq ponts. La première mention de pont daté de 1278 est celui du « pont de Loire » (**Merle, 1974**). Situé sur le bras droit de la Loire, celui-ci relie la cité au faubourg Saint-Privé (**Figure 3.13**). On retrouve en rive gauche le pont de Crotte reliant la cité au faubourg de Crotte (renommé aujourd'hui « faubourg d'Allier »). En effet, au cours du Moyen Âge, le bâti s'élargit hors de l'île centrale dans les faubourgs en zone submersible (**Figure 3.13**). De plus, le site se situe à la confluence de la Loire avec l'Aron, affluent venu des contreforts du Morvan, sur lequel la cité dispose d'un ou deux ponts suivant les périodes. Tout comme à Nevers, la cité bénéficie d'aménagements fluviaux afin de préserver la navigation, les ponts ou encore les faubourgs eux-mêmes. Un barrage est construit en 1836 à l'aval direct de Decize pour les besoins de la navigation (**Figure 3.12**).



**Figure 3.13.** Proposition de représentation schématique du site de Decize aux XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s.

### 2.3. Digoin

Tout comme les deux sites précédents, le site de Digoin est aussi un site de confluence, cette fois-ci entre la Loire et l'Arroux, affluent s'écoulant depuis le Massif du Morvan. Le site de Digoin est occupé depuis le Néolithique et plusieurs restes témoignent également d'une présence gallo-romaine (Chaussard, 1986). Un premier bourg se développe au moins depuis le XI<sup>e</sup> s. sur une terrasse récente (Figure 3.14). La majeure partie de la ville moderne s'étend également sur la terrasse et très partiellement dans la plaine alluviale. Du XIX<sup>e</sup> s. à nos jours, le site se caractérise par un habitat bien moins développé dans le lit majeur (Figure 3.14) qu'il ne l'est pour les sites de Nevers et Decize.

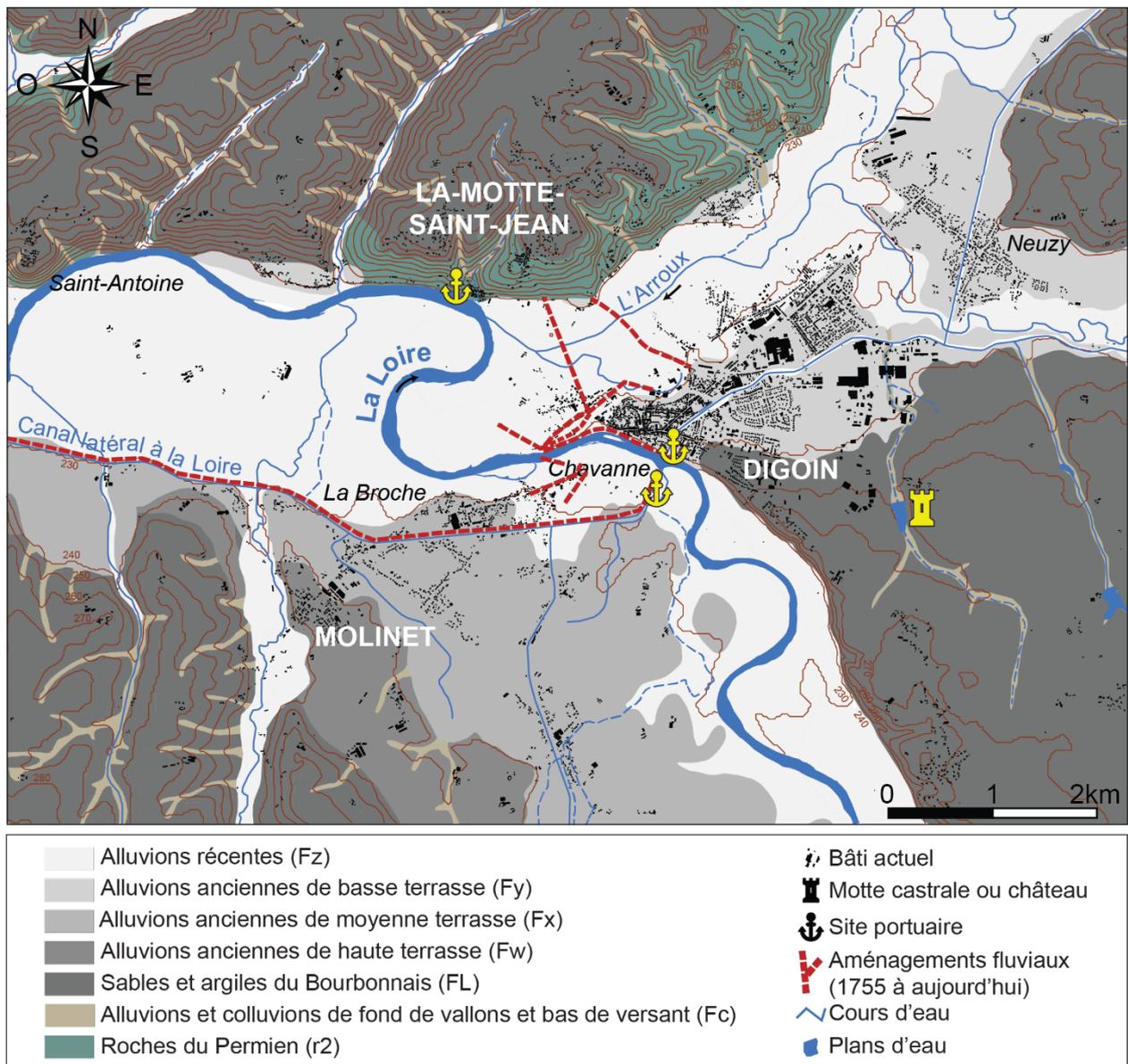


Figure 3.14. Localisation actuelle du site de Digoin (BRGM, IGN).

Si le site ne bénéficie clairement pas de la même importance politique ou stratégique des deux cités précédentes, Digoin est représentée comme Decize et Nevers parmi les trente-cinq villes au sein

de la corporation des marchands de la Loire (**Mantellier, 1864-1869**). On dispose d'une première mention d'un port et d'un péage à Digoin en 1295 (**Mantellier, 1864-1869**). Digoin est également un site important pour le flottage du bois provenant de la Loire amont et du Massif du Morvan, destiné à la Loire aval et à l'Île-de-France (**Chaussard, 1970**). Mais contrairement à Nevers et Decize, c'est véritablement à partir du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> s. que la ville se développe réellement en devenant un point de convergence commerciale de plus grande envergure avec l'ouverture du canal du Centre et du canal latéral à la Loire, et avec l'amélioration du réseau routier et du développement du réseau ferré. La ville bénéficie alors d'un développement industriel à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. et qui perdura jusqu'au XX<sup>e</sup> s. On sait finalement assez peu de choses du site à l'époque médiévale. La ville, si une ville il y eut, ne bénéficia pas de charte de franchise. Le premier pont connu est construit au milieu du XIX<sup>e</sup> s. et peu d'aménagement semble avoir été présent avant la construction des canaux.

\*

## **Conclusion du chapitre**

Cinq sites d'étude ont été sélectionnés dans le cadre de cette présente étude, trois sites situés en contexte urbain et deux sites situés en contexte rural. Les deux sites d'études ruraux doivent permettre la mise en place de l'approche sédimentologique et d'étudier l'histoire de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire via l'étude de ses dépôts sédimentaires passés. Dans ce cadre, les sites d'Uxeloup et de Thareau présentent tous deux plusieurs paléochenaux, mais au sein de contextes géologiques et hydrogéomorphologiques différents. Si la Loire présente une forte mobilité historique sur le site de Thareau, celle-ci semble être bien plus restreinte sur le site d'Uxeloup, ce qui nous permettra d'observer cet effet sur l'enregistrement sédimentaire des crues. Des levées et de plus petits aménagements sont présents sur les deux sites d'étude. L'évolution de cet aménagement nous permettra d'étudier les relations entre les sociétés et leur environnement ligérien. En contexte urbain, trois sites ont été sélectionnés présentant plusieurs similitudes et différences justifiant notre intérêt. Les sites de confluences (hydrologiques et de routes commerciales, terrestres ou fluviales) de Nevers, Decize et Digoin ont permis aux cités de se développer tout au long du dernier millénaire. Ce développement économique et urbain est accompagné d'un développement des aménagements fluviaux et portuaires. Les cités de Nevers et Decize, grâce à leur autonomie précoce, bénéficient de riches écrits témoignant de la présence, de l'entretien et de la vulnérabilité de ces aménagements face aux crues et aux divagations de la Loire. Ces informations nous sont essentielles dans le cadre de l'étude de l'histoire hydrologique de la Loire, mais également des relations entre les sociétés urbaines et la Loire. Les trois sites urbains semblent néanmoins présenter des types, voire des trajectoires d'aménagement différentes qu'il sera nécessaire d'expliquer. Est-ce en raison de l'hydrogéomorphologie, de l'histoire du site, ou de choix divergeant des communautés respectives ?



# Chapitre 4

## Matériels et méthodes

Les réponses aux différents objectifs de la thèse définis reposent sur la mise en place d'une approche interdisciplinaire combinant méthodes géohistoriques, sédimentologique et cartographiques. Il s'agit dans le cadre de ce chapitre de présenter les différentes ressources et méthodologies mises en place dans l'ordre qui suit.

Premièrement, nous verrons que la reconstitution fine de l'évolution de l'activité hydrologique de la Loire au cours du dernier millénaire est en grande partie permise par l'exploitation des sources documentaires, disponibles dès la fin du XIV<sup>e</sup> s. Néanmoins, la disponibilité et la nature de ces documents varient tout au long de la période d'étude. Ces documents vont également nous permettre d'explorer les relations entre les sociétés riveraines de la Loire et l'évolution du système fluvial au cours du dernier millénaire. Elles vont plus particulièrement nous permettre de rendre compte de quelle(s) manière(s) les communautés urbaines et riveraines de la Loire composèrent avec les crues et les migrations du fleuve.

En revanche, en contexte rural où ces documents sont bien plus rares, c'est le MNT Lidar associé aux ressources cartographiques et photographiques qui doit nous renseigner sur les formes d'adaptation des sociétés à leur environnement ligérien. Ces ressources vont également permettre l'étude diachronique de l'évolution en plan de la Loire du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. à nos jours.

Enfin, l'étude du remblaiement sédimentaire des paléochenaux de la Loire doit compléter l'étude géohistorique de l'activité hydrologique ligérienne. L'étude de ces remblaiements, véritables archives sédimentaires de l'activité passée du fleuve, vise à étendre l'échelle temporelle de l'étude et de confirmer ou d'infirmer les périodes hydrologiques détectées à l'aide des documents historiques. Nous visons ainsi à mettre en dialogue les témoins sédimentaires avec les témoins historiques. La première étape est de sélectionner les paléochenaux, notamment grâce aux ressources cartographiques anciennes et au MNT Lidar.

## 1. L'exploitation des sources documentaires

L'approche géohistorique repose sur l'utilisation de sources secondaires, émanant des recherches bibliographiques, et de sources primaires, les archives historiques originales. Les sources primaires ont été consultées dans divers fonds archivistiques : aux archives nationales à Pierrefitte-sur-Seine, aux archives départementales du Loiret et en grande partie dans celles de la Nièvre, regroupant les archives municipales de Nevers et Decize (**Tableau 4.1**). Les sources secondaires sont présentées en premières, car c'est à partir de ces dernières que nous avons démarré notre travail d'étude et de recensement.

**Tableau 4.1.** Archives historiques consultées pour cette étude. Ici ne figurent que les cotes consultées sur place. Les journaux et autres sources consultées en ligne n'y figurent pas. La liste des cotes mentionnées dans cette thèse est à retrouver dans la partie **Source**.

	Archives communales Nevers	Archives communales Decize	Archives départementales de la Nièvre	Archives départementales du Loiret	Archives nationales	Total
<b>Cotes consultées</b>	204	23	62	21	25	<b>335</b>
<b>Documents consultés</b>	521	133	≈1000	≈250	≈600	<b>≈2450</b>
<b>Séries</b>	BB, CC, DD, II	BB, CC, DD	1C, 1L, 6L, 11L, 2S, 3S, 147J	2J, W	F/14	

### 1.1. Des ressources documentaires riches et variées

#### 1.1.1. Les sources secondaires

Les sources secondaires ont été essentielles à cette étude, notamment dans le cadre du recensement des crues de la Loire. Plusieurs mentions furent trouvées dans les travaux de **Champion (1858)**, **Jullien (1883)**, **Dion (1961)**, **Geneslay (1971)**, **Charrier et al. (1984)**, et **Gob (2005)**. L'utilisation des sources secondaires a été réalisée en gardant un esprit critique vis-à-vis de l'auteur et des modalités de son travail de recherche. Les travaux de **Champion (1858)** ont eu une importance cruciale pour ce présent travail. Maurice Champion était historien et son ouvrage, publié en plusieurs volumes, constitue encore la référence concernant l'histoire des crues sur plusieurs rivières françaises. Son travail de recensement reste le plus exhaustif sur nombre de cours d'eau dont la Loire. Ses recherches semblent fiables, détaillées en information et cet ouvrage est le seul du corpus de cette thèse dont l'objectif principal était de recenser les crues passées de la Loire. Les sources archivistiques sont toutes mentionnées, ce qui est rare pour l'époque, et nous a permis de retrouver dans les archives plusieurs des documents utilisés. Amédée Jullien n'était quant à lui pas historien de métier. Notaire, peintre et directeur de musée, il publie en 1883 son ouvrage sur l'histoire de la Nièvre qui constitue son seul travail historique connu et publié (**Jullien, 1883**). Malgré l'absence de mention des sources

historiques utilisées, c'est un ouvrage riche en informations sur la Nièvre et les cités qui y sont présentes, notamment Nevers et Decize. Plusieurs mentions de crues qui semblent fiables sont présentes, ainsi que de nombreuses informations sur les aménagements fluviaux des cités de Nevers et Decize. Les travaux de référence de **Dion (1961)** et **Geneslay (1971)** ont aussi été essentiels à ce travail. Au-delà des recherches sur les levées, l'ouvrage de **Dion (1961)** mentionne plusieurs évènements de crue sourcés. Le travail de **Geneslay (1971)** mentionne aussi plusieurs évènements antérieurs au XIX<sup>e</sup> s. Le riche travail réalisé par **Charrier et al. (1984)** porte sur les inondations et sur les équipements des différentes villes de la zone d'étude, malheureusement sans mentionner ses sources. Enfin, la thèse de **Gob (2005)** recense les crues de la Loire dans sa partie amont à partir des ouvrages de **De Brive (1866)**, **Duplessis (1872)** et **Rouchon (1907)**. Plusieurs évènements de crue issus de ces différentes sources secondaires ont été écartés en raison de leur manque de fiabilité ou de précision. Cependant, ces travaux nous ont permis de constituer une première base de données de références archivistiques et d'évènements. Les sources primaires utilisées dans ces travaux ont été retrouvées afin d'être vérifiées et complétées si besoin. 4 % des évènements de crue recensée dans la zone d'étude proviennent de sources secondaires uniquement.

Concernant les rapports entre les sociétés riveraines de la Loire et leur environnement, peu de travaux ont été effectués sur la zone d'étude. Les études de **Jullien (1883)**, **Dion (1961)**, **Charrier et al. (1984)** et **Temam (2012)** nous a permis d'obtenir une première base pour le recensement des aménagements fluviaux et des ponts. Mais les informations demeurent assez lacunaires, voire absentes, au-delà du XVIII<sup>e</sup> s. De même que pour l'étude des évènements de crue, une grande partie des informations présentes dans cette thèse sur l'évolution de l'aménagement sur la zone d'étude et des réactions des sociétés riveraines aux crues de la Loire proviennent des sources primaires.

### **1.1.2. Les sources primaires**

Le nombre, la nature, le contenu et l'origine des sources primaires varient au fil des siècles. Chacune de ces caractéristiques a été prise en compte lors de l'interprétation des informations contenues dans les documents, que ce soit dans le cadre du recensement des crues et de leurs dégâts ou de l'étude des relations entre les sociétés et leur environnement. Concernant l'étude des crues passées, les caractéristiques documentaires influencent le nombre et la précision des évènements de crue enregistrés. Les documents pour lesquels nous ne disposons pas d'une fiabilité suffisante ont été systématiquement mis de côté ou catégorisés comme manquant d'information. Les raisons en sont, par exemple, le manque de précision de la date, l'exagération excessive des dommages causés par l'inondation ou encore le manque de référence spatiale.

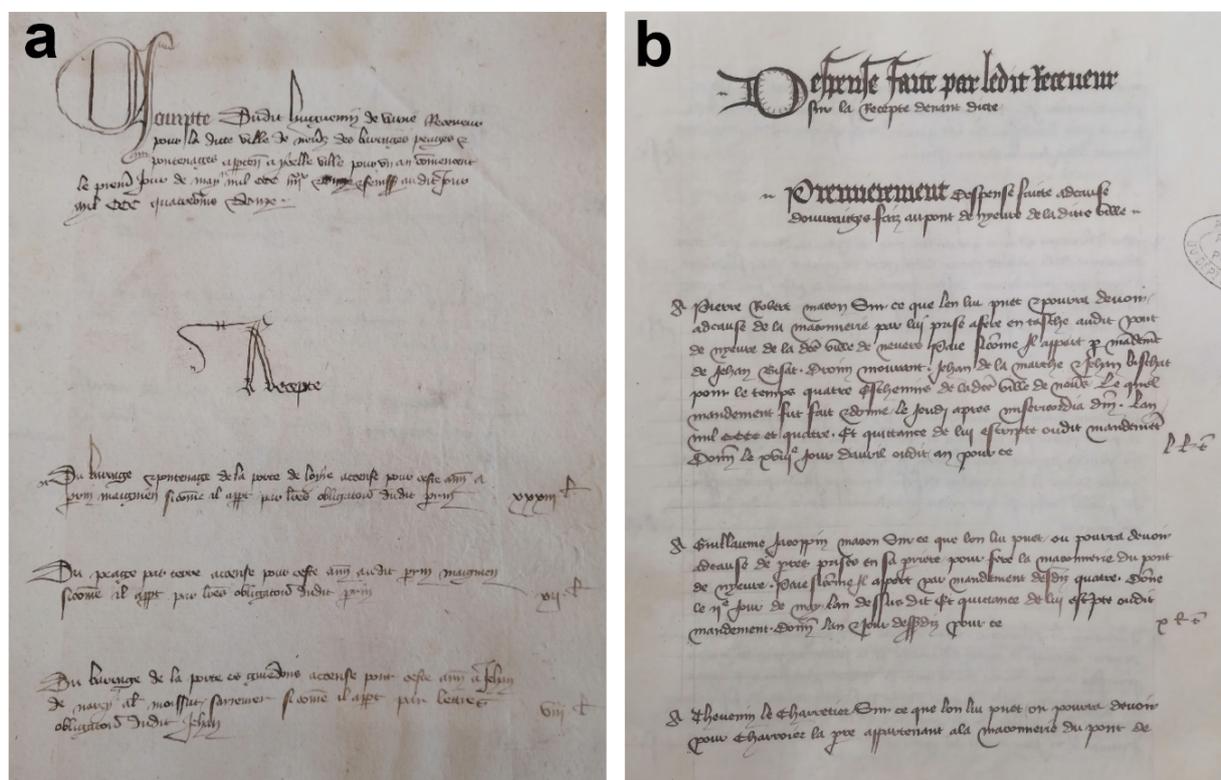
#### ***1.1.2.1. Documents antérieurs au XIVE s.***

Avant le XIV<sup>e</sup> s., si quelques documents et informations sont disponibles, ils restent succincts et isolés. **Alexandre (1987)** mentionne plusieurs crues antérieures au XIII<sup>e</sup> s. tirées de diverses annales

médiévales (*Annales Nivernenses, Annales Floriacenses, Fragmenta Chronicae Floriacensis*). **Champion (1858)** liste 14 événements de crue sur la Loire au cours du VI<sup>e</sup> s., principalement relevé dans *L'Histoire des Francs* de Grégoire de Tours, du VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> s. La majorité ne dispose pas de désignation spatiale précise. Nos recherches n'ont pas permis de trouver d'événements supplémentaires antérieurs au XIV<sup>e</sup> s.

### 1.1.2.2. Documents du XIV<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> s.

À partir de la fin du XIV<sup>e</sup> s. et du début du XV<sup>e</sup> s., la documentation médiévale est très riche sur les sites d'étude de Nevers et Decize. Grâce à leur autonomie accordée par le pouvoir comtal au XIII<sup>e</sup> s. (cf. **chapitre 3**), les deux cités mettent en place un système de comptabilité moderne calqué sur celui de la Chambre des comptes du Duché de Bourgogne (**Foucher, 2020**). De nombreux comptes produits par la Chambre ont été conservés.

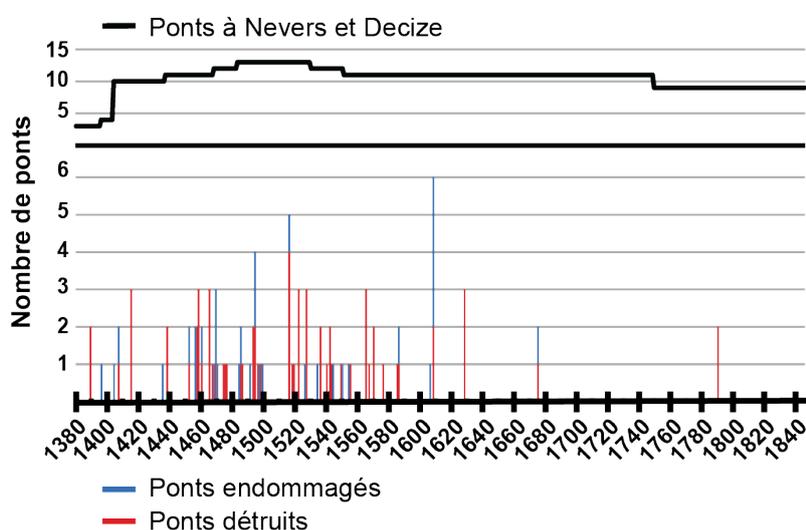


**Figure 4.1.** Exemples de comptes communaux de Nevers. **a** : première page de la partie recette pour le compte de l'année 1392-1393 (AM Nevers, CC/1, fol. 28r). **b** : première page de la partie dépense pour l'année 1403-1404, sous-catégorie « ouvraiges faiz au pont de Nyevre » (AM Nevers, CC/12, fol. 6r).

Les échevins se servirent du système de comptabilité pour gérer le budget de la ville. Cet outil se devait donc d'être le plus précis possible pour ses utilisateurs contemporains. Chaque compte correspond à un exercice annuel. Les comptes se composent d'une partie « recette », qui détaille tous les revenus de la ville pour l'année, et d'une partie « dépense » pour le détail de l'utilisation des réserves monétaires de la ville (**Figure 4.1**). Pour les comptes du XIV<sup>e</sup> et du XV<sup>e</sup> s., la partie « dépense » dispose

de sous-catégories : travaux sur les ponts, pavage des rues, réfection des portes de la ville, travaux sur les battis, réfection des murailles, etc. La richesse de ces documents se caractérise également par leur étendue temporelle. Sur les 210 années courant entre 1389 et 1599, 175 comptes annuels ont été conservés pour Nevers (i.e., 83 %) et 110 pour Decize (52 %). En considérant leur ancienneté, la majeure partie des comptes pour cette période sont en très bon état, les archives départementales de la Nièvre et communales de Nevers ayant réalisé une campagne de restauration des comptes endommagés jusqu'en 2021. Chaque paiement effectué par la ville est détaillé avec le destinataire, les matériaux achetés ou déplacés, le type de travail réalisé, l'aménagement concerné (notamment pour les ponts), etc.

Les dépenses de la ville sont multiples et variées, mais sont principalement destinées à l'entretien des aménagements communaux. À Nevers et à Decize, l'entretien des ponts, de certains moulins, des grèves et des différents aménagements fluviaux (battis) revient à la communauté. Ces ponts sont tout aussi importants pour la communauté (cf. **chapitre 3**), que pour ses dépenses annuelles. Le nombre maximum de treize ponts est atteint au XVI<sup>e</sup> s., dont huit recensés à Nevers et quatre à Decize (**Figure 4.2**). L'entretien de ces ponts revenant à la ville, leur endommagement ou leur destruction par les crues ou pour d'autres raisons, est systématiquement enregistré par les comptes. La fragilité de ces infrastructures et la nécessité de les maintenir ont obligé les communautés à constamment les surveiller, réparer ou les reconstruire. Afin de limiter la vulnérabilité des ponts face aux crues, ils sont peu à peu reconstruits en pierre au cours des XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s. Ces travaux de très grande ampleur ont engendré une forte production documentaire dans les comptabilités.



**Figure 4.2.** Nombre de ponts présents, endommagés et détruits par les crues à Nevers et Decize entre 1380 et 1845.

Toutes les actions réalisées sur les différents aménagements fluviaux, ponts, *battis* et autres, ont donc laissé de nombreuses traces dans les documents, nous permettant de recenser les événements de crue et de nous éclairer sur les rapports entre les communautés riveraines de la Loire et leur cours d'eau au fil des siècles. Que ce soit au sujet de l'occurrence d'événements de crues ou au sujet des réponses

des sociétés face à ces crues ou aux migrations du fleuve, la grande majorité des informations dont nous disposons pour les XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s. provient de ces documents. À l'échelle de la zone d'étude, les mentions de crues sont donc concentrées sur les seuls sites de Nevers et Decize. De même, nous ne disposons de quasiment aucune information provenant des documents textuels sur des aménagements fluviaux en dehors de ces deux sites urbains.

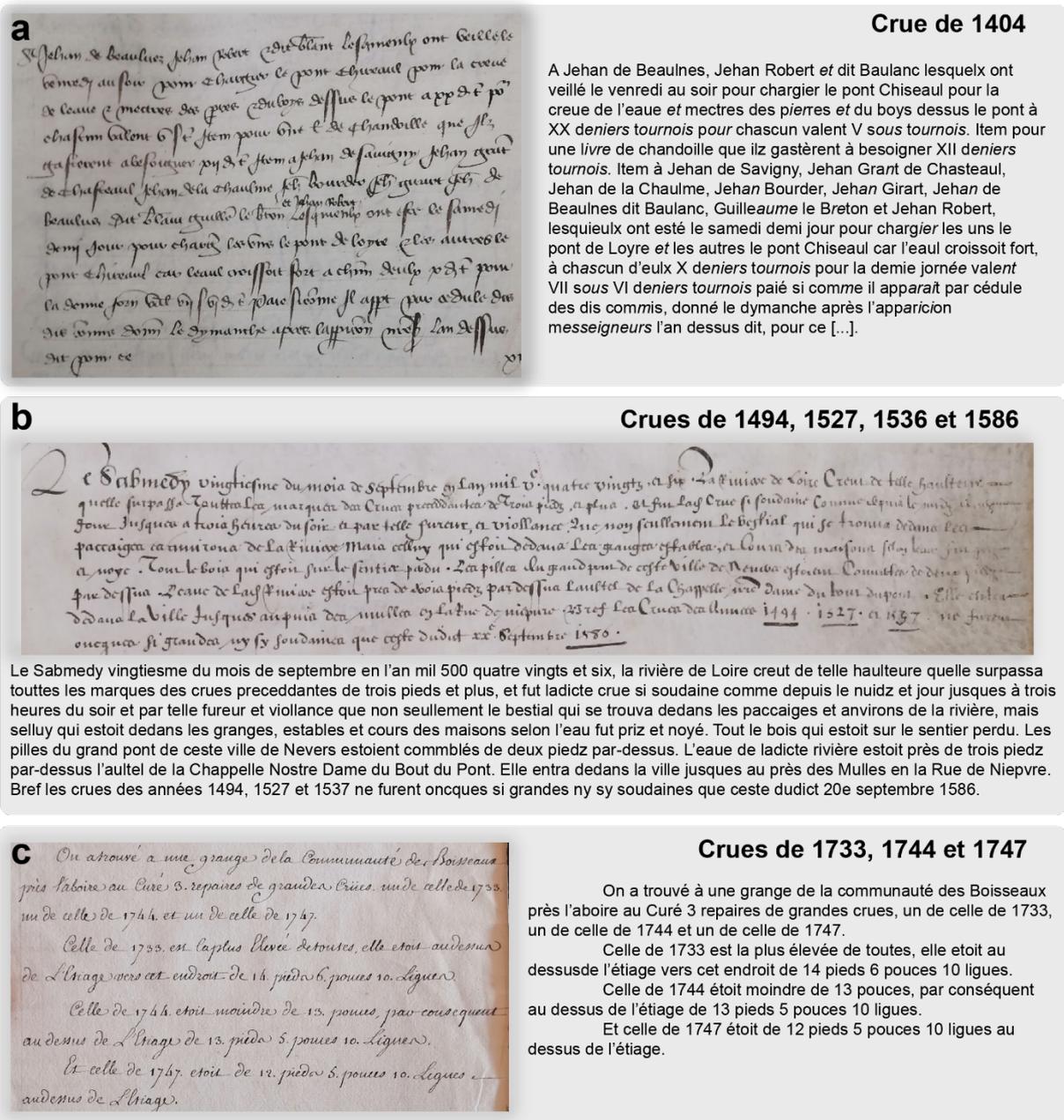
#### ***1.1.2.3. Documents du XVI<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> s.***

Si plusieurs comptes communaux sont disponibles à Nevers et Decize pour la première moitié du XVI<sup>e</sup> s., à partir de la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> s. et jusqu'à la fin du XVII<sup>e</sup> s., une grande partie de ces comptes sont perdus ou en très mauvais état. Les comptes des siècles précédents étaient en parchemin, garantissant une bonne préservation. Le papier commence à être utilisé à partir du milieu du XVI<sup>e</sup> s. Ce matériel, ainsi que les inscriptions, se conservent très mal dans le temps. De plus, le nombre de mentions d'évènements de crues diminue pour deux raisons principales : premièrement, l'entretien de plusieurs ouvrages fluviaux revient au corps des Levées et Turcies, n'apparaissant donc plus dans les comptes communaux. De plus, les documents des Levées et Turcies de cette période pour la zone d'étude sont en très grande partie perdus. Deuxièmement, la reconstruction des ponts en pierre et non plus en bois les rend de moins en moins vulnérables face aux crues (**Figure 4.2**), limitant l'enregistrement des évènements dans les documents. Enfin, peu de documents ont été conservés aux archives départementales de la Nièvre ou aux archives nationales pour cette période. Malgré ce déficit documentaire, les crues les plus importantes ont été recensées, en partie grâce au travail de **Champion (1858)** et au recensement de **Gob (2005)**. Cette baisse du nombre de documents et de leur précision affecte aussi l'étude des réactions des populations aux crues de la Loire, bien moins nombreuses, ainsi que l'étude des aménagements, notamment à Decize.

#### ***1.1.2.4. Documents du XVIII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s.***

Nous disposons pour le XVIII<sup>e</sup> s. et la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. des archives historiques les plus diversifiées. Une grande partie des mentions relatives aux évènements de crues provient des documents du corps des ingénieurs des Ponts et Chaussées. À partir du XVIII<sup>e</sup> s., les Ponts et Chaussées constituent le principal corps d'ingénieur chargé des travaux publics dans le royaume de France et, en particulier, responsable de l'entretien des canaux, des chenaux et des infrastructures fluviales. La multiplicité des aménagements fluviaux aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. génère une forte production documentaire. Cette profusion documentaire compense la perte des données des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s. De plus, la majeure partie de ces documents sont d'une fiabilité bien plus importante que pour les documents des siècles précédents. La documentation provenant des corps d'ingénieur, leurs rapports décrivent avec précisions les aménagements construits ou réparés suite aux évènements de crues, et dont les dégâts sont plus détaillés que pour les siècles précédents avec des premières mentions de hauteurs d'eau (**Figure 4.3**).

Outre ces documents, des mentions d'inondations ont été trouvées dans de nombreux autres documents : archives paroissiales, transcriptions des assemblées générales des mairies de Nevers et de Decize et dans les plaintes des habitants. Si les informations sur les inondations fournies par les archives paroissiales et les assemblées générales de Nevers et Decize sont fiables, les plaintes des habitants le sont moins, celles-ci ayant tendance à accentuer le nombre de crues et leurs dégâts afin d'obtenir des indemnisations plus importantes. Elles donnent en revanche un témoignage très précieux des rapports entre les sociétés rurales et les crues de la Loire sur la zone d'étude.



**Figure 4.3.** Exemple de témoignages de crue de la Loire. **a** : mention d'évènement de crue dans le compte communal de Nevers de 1404-1405 (AM Nevers, CC/13, fol. 24r). **b** : mention trouvée dans un recensement d'évènements de crues dont l'origine des rédacteurs est inconnue (Médiathèque de Nevers, MS/034). **c** : mention dans un rapport des Ponts et Chaussées (AN, F/14/1198).

Enfin, à partir du XIX<sup>e</sup> s., on trouve également des mentions d'inondations dans les journaux. Très peu de journaux ont été publiés sur notre secteur d'étude et les numéros conservés sont souvent assez tardifs : le Journal de la Nièvre, publié à partir de 1789-1790, n'est par exemple conservé aux archives départementales de la Nièvre que de 1848 à 1939. Des recherches ont donc aussi été réalisées sur le site de presse de la Bibliothèque Nationale de France « *retronews* »<sup>9</sup> qui permet d'accéder à plusieurs milliers de titres de presse de 1631 à 1951. Plusieurs mentions de crues (49 au total entre 1800 et 1845) ont pu être retrouvées dans *l'Echo de la Loire*, *le Journal des débats*, *le Journal du Cher*, *la Gazette de France* et *le Journal du Commerce*.

Le nombre et la diversité des documents disponibles nous ont permis de recenser avec une grande fiabilité de nombreuses crues inédites de la Loire de forte et de faible intensité pour les XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. Ils permettent également de bien renseigner l'évolution de l'aménagement du lit majeur de la Loire en contexte urbain, mais également en contexte rural, ce qui n'était encore pas possible pour les siècles précédents. L'élargissement spatial du contenu des archives documentaires permet d'observer les réactions et les adaptations des sociétés aux crues et aux migrations de la Loire que ce soit sur les sites urbains ou ruraux.

#### ***1.1.2.5. Documents du XIX<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui***

Les trois crues catastrophiques de la Loire 1846, 1856 et 1866 provoquèrent une production documentaire inédite, notamment de la part des Ponts et Chaussées. À partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s., les archives documentaires disponibles sont bien plus conséquentes que pour les siècles précédents. Nous avons décidé dans le cadre de l'étude des crues passées de nous concentrer seulement sur les relevés hydrographiques à partir de 1846 et ce pour deux raisons. Premièrement, la consultation des archives documentaires de 1846 à aujourd'hui aurait été impossible et nécessiterait l'élaboration d'une thèse supplémentaire. Deuxièmement, les relevés hydrographiques permettent de réaliser un recensement bien plus exhaustif qu'avec les archives documentaires. La Loire a bénéficié d'échelles limnimétriques au moins depuis la première moitié du XVIII<sup>e</sup> s. Des premières hauteurs d'eau sont en effet mentionnées dans les rapports des Ponts et Chaussées avec précision. Néanmoins, les relevés n'étaient encore probablement pas journaliers, seulement effectués lors des événements exceptionnels. Les échelles se multiplient sur le cours de la Loire à la suite des trois crues exceptionnelles du XIX<sup>e</sup> s., et les relevés quotidiens sur plusieurs sites se mettent en place. Sur la zone d'étude des échelles sont présentes dès le milieu du XIX<sup>e</sup> s. à Digoin, au Fourneau, à Gilly, Thareau, Decize, Nevers et au Bec d'Allier (**AD Loiret, 206W/46863**). À Digoin, l'échelle est même présente dès 1811, mentionnée dans un ouvrage de l'ingénieur Comoy (**AN, F/14/6670**), mais dont les relevés semblent aujourd'hui perdus jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> s. Plus largement, une grande partie des relevés du XIX<sup>e</sup> s. ont été perdus.

---

<sup>9</sup> <https://www.retronews.fr/>

Les données de l'échelle de Nevers sont les seules de la zone d'étude quasi complètes entre 1846 et aujourd'hui. Seules les hauteurs d'eau sont disponibles entre 1846 et 1954 (**AD Loiret, 171W/30903 ; Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne, s.d.**). Un seul problème demeure : si les documents entre 1846 et 1900 ont été retrouvés dans les archives, les documents de 1900 à 1954 ne l'ont pas été, et les données utilisées dans cette étude proviennent du rapport du **Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.)**. Nous ne savons donc pas si le rapport comprend bien tous les événements. Les débits associés à ces hauteurs d'eau ont été calculés par le **Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.)**, en prenant en compte l'évolution des courbes de tarages de 1852 à 1983. À partir de 1954 et jusqu'à aujourd'hui, les débits sont disponibles sur l'Hydroportail développé par le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations ([www.hydro.eaufrance.fr](http://www.hydro.eaufrance.fr)).

Concernant les rapports entre les sociétés et leur environnement, **Temam (2012)** fit déjà un travail important sur les modalités et l'évolution de l'aménagement en partie sur la zone d'étude. Face à la lourde documentation du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s., nous avons donc décidé d'également limiter l'étude des réponses des sociétés aux crues et aux migrations de la Loire au milieu du XIX<sup>e</sup> s., avant l'occurrence des trois crues catastrophiques de 1846, 1856 et 1866.

## **1.2. Traitement des données historiques**

Que ce soit dans le cadre de l'étude des crues historiques de la Loire ou de celle des relations entre les sociétés riveraines le système fluvial ligérien, les fonds documentaires consultés sont les mêmes. En revanche, la collecte de l'information et son traitement diffèrent sur plusieurs points, en particulier entre la période de 1380 – 1845 et celle de 1846 – 2023.

### **1.2.1. Collecte d'informations historiques sur les crues de la Loire**

#### ***1.2.1.1. Période historique de 1380 à 1845***

Une méthode systématique de collecte d'informations a été mise en place afin de relever le plus exhaustivement possible les événements de crues. Tous les comptes communaux de Nevers et de Decize disponibles ont été lus dans leur intégralité et toutes les mentions explicites de crues ont été notées. Les crues sont clairement désignées dans les comptes : « grant creue de leaue » (**AM Nevers, CC/2, Fol. 7r, 1394**), « creue des eaux » (**AM Nevers, CC/42, Fol. 16r, 1439**), « la grant inondation de eaulx et grandes froydures » (**AM Nevers, CC/113, Fol. 2r, 1542**), « le 4e octobre 1707 la rivièrre de Loire et celle d'Allier ont cru » (**Médiathèque de Nevers, MS/034**). Toutes les cotes des archives consultées dont la description mentionne les mots « crue », « inondation », « débordement » ou tout autre mot similaire, ont été lues dans leur intégralité.

Tous les événements correspondant à une crue ou à une inondation ont été relevés. Néanmoins, il est parfois impossible pour les événements de faible ampleur d'être certain que la crue ait été

débordante. Avant le XVIII<sup>e</sup> s., la plupart des mentions ne concernent que les crues et les mentions d'inondations sont très rares. Chaque évènement a été classé dans l'une des quatre zones suivantes : Loire supérieure (amont de la zone d'étude), zone d'étude, Loire moyenne (du Bec d'Allier à Tours) et « Loire générale ». Cette dernière classe regroupe les évènements survenus au moins une fois dans la zone d'étude et une fois ailleurs sur la Loire. Un évènement de crue relevé à Nevers puis à Orléans sera par exemple classé dans la catégorie « Loire générale ». Une classe supplémentaire « sans localisation » a été ajoutée afin de regrouper les évènements d'inondation sans localisation précise. Les évènements hydrologiques affectant la basse vallée de la Loire, en aval de Tours, n'ont pas été pris en compte en raison de la distance trop grande par rapport à la zone d'étude.

La saisonnalité a été étudiée sur la base de deux informations : la saison d'occurrence de l'évènement et le mois d'occurrence. La prise en compte de la saison permet de comprendre un plus grand nombre d'évènements pour lesquels le mois d'occurrence n'est pas certain. Si un évènement de crue intervient à cheval sur deux mois ou sur deux saisons consécutives, seul le premier mois ou la première saison est pris en compte. En suivant les saisons hydrologiques actuelles, la saisonnalité des crues a été fixée comme suit : hiver : décembre, janvier, février ; printemps : mars, avril, mai ; été : juin, juillet, août, septembre ; automne : octobre, novembre. Au total, 16 % des évènements de crue recensés dans cette étude entre 1380 et 1845 ne disposent pas d'information saisonnière, 7 % disposent de la saison seule et 77 % du mois d'occurrence. La présence de glace et/ou de débâcle a également été notée.

#### ***1.2.1.2. Période contemporaine de 1846 à 2023***

Entre 1846 et 2023, tous les évènements relevés à Nevers dont le débit fut supérieur au débit de plein bord (654 m<sup>3</sup>/s à la station de Nevers) ont été définis comme évènement de crue. Nous avons considéré que deux pics de crue correspondaient à deux évènements de crue distincts lorsqu'ils étaient séparés de 72 h au moins. Les données provenant du **Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.)** ont été vérifiées via les archives des relevés hydrographiques entre 1846 et 1900. Quelques évènements non considérés par le **Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.)** car trop proches temporellement selon eux, mais dont les différents pics étaient bien séparés de plus de 72 h, ont été ajoutés. Tous les évènements recensés entre 1846 et 2023 sont accompagnés du mois d'occurrence. Nous n'avons néanmoins pris aucune information sur les dégâts engendrés par les évènements.

### **1.2.2. Qualification de l'intensité des crues**

#### ***1.2.2.1. Les crues de 1380 à 1845***

L'étude de la variation du régime de crue de la Loire depuis l'époque médiévale est dépendant de la disponibilité documentaire. Grâce au nombre important et à la précision des documents du XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup>, de la première moitié du XVI<sup>e</sup>, et des XVIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup>, XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> s., il a été possible de relever les

événements de faible comme de forte intensité. En revanche, ça n'a pu être le cas pour la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> s. et le XVII<sup>e</sup> s. en raison du nombre de documents moins important et de leur perte de précision. Afin de tenter de passer outre cet effet documentaire, nous avons identifié des périodes de forte et de faible intensité hydrologique en utilisant des indices de crue qui ne prennent pas seulement en compte le nombre de crues par an ou par décennie, mais également l'intensité de chaque événement. Toutefois, avant le XVIII<sup>e</sup> s. les informations sur la hauteur des eaux lors des crues sont extrêmement rares et les données collectées sont généralement plutôt de nature qualitative. Afin de qualifier l'intensité de ces événements, l'intensité des crues a été catégorisée suivant les dégâts, ou l'absence de dégâts, qu'elles ont provoqués, suivant les classifications des études précédentes (e.g., **Brázdil et al., 2006 ; Glaser et al., 2010 ; Brázdil et al., 2014 ; Pichard et al., 2017 ; Barriendos et al., 2019 ; Thoumas, 2019 ; Blöschl et al., 2020**). Les critères de classification ont été inspirés de ces études, adaptés aux conditions spécifiques de la zone et des sites d'étude. La plupart des études utilisent une classification tripartite. Nous avons choisi une classification quadripartite afin d'intégrer à l'étude les événements dont le manque d'information empêche de pouvoir les comprendre dans une des trois classes principales. Les classes s'organisent comme tel :

- **Classe C1 : crue sans information** ; les informations disponibles ne sont pas assez suffisantes pour classer l'évènement. La plupart des événements compris dans cette classe proviennent de sources secondaires.
- **Classe C2 : crue faible** ; cette classe comprend les crues de faible intensité. Aucun dommage, ou de très faibles dommages sont reportés sur les aménagements. La crue peut emporter des matériaux disposés sur les grèves et inonder les champs. Dans le cadre des calculs d'indice, l'équivalence en taux de retour est une crue actuelle d'un taux de retour de 1 à 5 ans.
- **Classe C3 : crue importante** ; cette classe regroupe les événements responsables de dommages notables. Des mesures sont prises par les sociétés riveraines afin de protéger les aménagements avant le passage de ces événements. Les ponts, digues et levées sont endommagés et des réparations sont nécessaires après le passage de la crue. L'équivalence en taux de retour est une crue actuelle d'un taux de retour de 5 à 20 ans.
- **Classe C4 : crue exceptionnelle** ; cette classe regroupe les événements ayant inondé et provoqué des dégâts sur toute la zone d'étude et au-delà. L'évènement est recensé sur plusieurs sites. Des mesures sont prises avant le passage de la crue. Plusieurs ponts et autres aménagements sont très endommagés ou détruits. Les levées sont percées, souvent en plusieurs endroits. Des travaux de réparation sont nécessaires, coûteux et longs. Les parcelles agricoles sont largement inondées. L'équivalence en taux de retour est une crue actuelle d'un taux de retour supérieur à 20 ans.

Les équivalences des taux de retour sont similaires à celles définies par le travail de **Pichard et al. (2017)**.

### 1.2.2.2. Les crues de 1846 à 2023

Nous avons décidé de classer les crues de cette période comme pour celles de la période précédente pour deux raisons. Premièrement, pour tenter de simplifier la comparaison des données et des résultats entre les deux périodes bénéficiant de sources et de type de données différentes, respectivement semi-qualitatives pour la période historique et quantitative pour la période contemporaine. Deuxième, en raison de l'hétérogénéité des données, entre les hauteurs d'eau de 1846 à 1954 (avec débits recalculés) et les débits de 1954 à 2023.

Le système de classification reste donc le même. La catégorie C1 n'est pas représentée, car nous avons des informations pour tous les événements concernés. Les classes s'organisent comme tel :

- **Classe C2 : crue faible** ; débit de l'évènement inférieur à celui d'un évènement d'un taux de retour de 5 ans ( $< 1460 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- **Classe C3 : crue importante** ; débit de l'évènement supérieur ou égal à celui d'un évènement d'un taux de retour de 5 ans et inférieur à celui d'un taux de retour de 20 ans ( $[1460 - 1950[ \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- **Classe C4 : crue exceptionnelle** ; débit de l'évènement supérieur à celui d'un évènement d'un taux de retour de 20 ans ( $> 1950 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

### 1.2.3. Indices de crue

Nous n'avons pas sélectionné d'indice de crue fondé seulement sur la somme des événements (e.g., **Glaser et al., 2010** ; **Macdonald et Sangster, 2017**) car trop dépendants de l'effet documentaire (**Favier, 2007**) : la multiplication des événements sur une période atteste-t-elle réellement d'une fréquence plus importante de l'aléa ou plutôt de la multiplication des sources ? Afin de lisser le plus possible cet effet documentaire, nous avons sélectionné deux indices de crue intégrant l'intensité des crues : les indices de **Pichard et al. (2017)** et de **Blöschl et al. (2020)**.

Le premier indice utilisé (PFI) est celui créé par **Pichard et al. (2017)**. Une valeur est associée à chaque classe de crue et la somme de ces valeurs est calculée par an :

$$\text{PFI}_1 = N_{C1} \cdot 0.5 + N_{C2} \cdot 1 + N_{C3} \cdot 2.2 + N_{C4} \cdot 3 \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec  $N$  pour le nombre de crue par an et les indices C1, C2, C3 et C4 correspondant aux classes de crue. Suivant **Pichard et al. (2017)**, la valeur de 1 a été associée à la classe C2 par simple convention. Dans cette étude, afin de considérer les crues C1, tout en minimisant leur poids, la valeur de 0,5 leur a été associée, par simple convention. Pour les crues C3 et C4, les valeurs de 2,2 et 3 sont calculées respectivement avec le ratio entre les débits des crues de taux de retour annuel (crue C2 ;  $654 \text{ m}^3/\text{s}$  ; valeur de 1), de 5 ans (crue C3 ;  $1460 \text{ m}^3/\text{s}$  ; valeur de 2,2) et de 20 ans (crue C4 ;  $1950 \text{ m}^3/\text{s}$  ; valeur de 3) à la station de Nevers, suivant la méthodologie de **Pichard et al. (2017)** (cf. **chapitre 2**). Afin d'être

sûr que les périodes de faible comme de forte activité hydrologique ne dépendent pas que des valeurs données au PFI<sub>1</sub> tiré de **Pichard et al. (2017)**, nous avons repris cet indice en changeant les valeurs associées aux classes de crue. Le poids des crues de faible intensité a été augmenté dans l'indice PFI<sub>2</sub> et abaissé dans l'indice PFI<sub>3</sub> :

$$\mathbf{PFI}_2 = N_{c1.1} + N_{c2.2} + N_{c3.3} + N_{c4.4} \text{ (Eq. 2)}$$

$$\mathbf{PFI}_3 = N_{c1.0.5} + N_{c2.1} + N_{c3.3} + N_{c4.6} \text{ (Eq. 3)}$$

Le second indice est celui utilisé par **Blöschl et al. (2020)**. Lorsqu'il y a plus d'un évènement recensé par an, les intensités  $I$  de chaque évènement  $N$  sont additionnées.

$$\mathbf{BFI} = \sqrt{\sum I_{Nn}^2} \text{ (Eq. 4)}$$

Les intensités  $I$  associées aux classes de crue utilisées dans cet indice sont les mêmes que ceux du PFI<sub>1</sub> : 0,5 pour C1, 1 pour C2, 2,2 pour C3 et 3 pour C4. Le **Tableau 4.2** présente un exemple du calcul des différents indices pour l'année 1408.

**Tableau 4.2.** Exemple des résultats des calculs d'indice pour l'année 1408 : une crue C4 et 5 crues C2.

Année 1408				
Indice	PFI <sub>1</sub>	PFI <sub>2</sub>	PFI <sub>3</sub>	BFI
Résultats	8	14	11	3,74

Le recensement des crues C1 et C2 est inégal à travers les siècles. Les quatre indices ont donc aussi été calculés avec tous les évènements et avec les crues C3 et C4 seules.

#### 1.2.4. L'étude des relations entre sociétés et hydrosystème

Afin d'étudier la relation entre les sociétés urbaines et rurales riveraines de la Loire et leur système fluvial ligérien, l'étude des archives documentaires a deux objectifs. Le premier fut d'établir une étude précise de l'évolution de l'aménagement du lit majeur de la Loire sur la zone d'étude et plus particulièrement sur les différents sites d'études urbains (Nevers, Decize et Digoin) et ruraux (sites de Thareau et d'Uxeloup). Cet aménagement, ou son absence, peut nous donner des pistes sur les réponses des sociétés face aux crues et aux migrations du fleuve. Pour ce faire, la totalité des cotes archivistiques faisant référence aux aménagements fluviaux et aux ponts présents sur la zone d'étude entre le XIV<sup>e</sup> et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. a été consultée dans les différentes archives. Le volume documentaire concernant les aménagements à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> s., notamment à la suite des grandes crues de 1846, 1856 et 1866, est bien trop important pour avoir été consulté intégralement au cours de cette thèse. De plus, l'étude de **Temam (2012)** renseigne déjà très bien l'aménagement de la zone d'étude pour la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. Nous nous sommes également servis du corpus cartographique et photographique, ainsi que du MNT Lidar pour relever la présence de nombreux aménagements n'apparaissant pas dans

les documents, notamment ceux de faible ampleur comme les digues et épis. Le recensement des différents aménagements à partir de la fin du XVII<sup>e</sup> s. a donc été principalement réalisé grâce aux cartes anciennes.

Le second objectif de l'étude des relations entre les sociétés et leur hydrosystème est de tenter d'observer les réponses des différentes communautés à l'activité hydrogéomorphologique de la Loire : comment étaient gérés les événements et leurs dégâts ? Ya-t-il eu une mémoire des crues ? Celles-ci ont été catastrophiques pour les communautés ? Ya-t-il eu une adaptation aux crues et/ou aux migrations de la Loire ? Nous tenterons de répondre à ces questions à l'aide des mêmes documents étudiés dans le cadre du recensement des événements de crue, notamment les comptes communaux qui donnent une idée des réponses des communautés urbaines. En revanche, pour les communautés rurales, comme dit précédemment, nous faisons face à une absence de documents disponibles avant les XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> s. Pour les siècles précédents, c'est principalement l'étude du bâti ancien dans le lit majeur grâce au MNT Lidar qui nous donnera des informations précieuses sur l'adaptabilité des populations à la capacité érosive de la Loire.

\*

En conclusion, nous bénéficions sur la zone d'étude d'une richesse documentaire importante, et encore largement inexploitée dans le cadre d'études géographiques. Les comptes communaux, conservés depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s., présentent un degré d'information exceptionnel pour les XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s. Couplés aux archives des différents corps d'ingénieur, le corpus documentaire permet non seulement de mettre en place une étude fine de l'évolution du régime de crue de la Loire depuis le XIV<sup>e</sup> s., mais aussi de l'évolution des relations entre les sociétés riveraines de la Loire et l'hydrosystème. Ce dernier point repose aussi en grande partie sur l'étude du corpus cartographique et photographique, ainsi que sur le MNT Lidar de la Loire.

## **2. Étude cartographique de la plaine alluviale ligérienne**

L'étude cartographique de la plaine alluviale de la Loire, reposant sur un corpus composé de cartes anciennes, de photographies aériennes et satellitaires et du MNT Lidar, doit remplir trois objectifs :

- Renseigner l'évolution planimétrique des bandes actives et des îles de la Loire à partir d'une étude cartographique diachronique entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et aujourd'hui ;
- Établir une étude de l'aménagement du lit majeur entre la fin du XVII<sup>e</sup> s. et aujourd'hui visant à compléter le recensement effectué à l'aide des archives documentaires ;
- Étudier la présence et la répartition du bâti dans le lit majeur de la Loire depuis l'époque médiévale en zone rurale.

## 2.1. Ressources cartographiques, photographiques et imageries satellitaires

### 2.1.1. Les premières cartes ligériennes (XVII<sup>e</sup> – mi XVIII<sup>e</sup> s.)

La volonté de représenter avec précision l'espace fluvial et les aménagements fluviaux en place, à réparer et à ériger intervient dans le cours du XVII<sup>e</sup> s. que ce soit en France (**de Dainville, 1964 ; Cœur, 2008**), ou sur la Loire. La carte produite en 1684 par Nicolas Poictevin<sup>10</sup>, ingénieur architecte des Turcies et Levées (**Temam, 2012**) est la première carte conservée à tenter de représenter avec précision le lit majeur de la Loire ainsi qu'une partie des aménagements fluviaux sur une portion importante de la Loire à l'aval de la zone d'étude à une échelle de 15000 toises<sup>11</sup>. C'est de 1692 que date la première ressource cartographique pouvant être utilisée sur la zone d'étude.

#### 2.1.1.1. Carte de la Loire de 1692

La première carte représentant une portion de la zone d'étude a été réalisée par l'ingénieur Claude Mathieu (16.. – 1733), un autre ingénieur architecte des Turcies et Levées (**Temam, 2012**). Il produit ou fait produire au cours de sa carrière quatre cartes différentes. La première, datée de 1692<sup>12</sup>, a pour but, tout comme la précédente de Poictevin, de représenter le lit majeur de la Loire ainsi que les aménagements fluviaux, mais cette fois-ci de manière plus précise à une échelle de 7000 toises (≈ 13600 m) (**Figure 4.4**). Elle représente avec précision les multiples chenaux de la Loire, ainsi que les aménagements fluviaux, des levées aux plus petits ouvrages (**Figure 4.4**). Ce travail est le seul de Mathieu cartographiant une partie de notre zone d'étude, de Decize à Nevers. Il produisit d'autres cartes, hors de la zone d'étude, destinées notamment à cartographier les brèches faites aux levées par les crues exceptionnelles d'octobre 1707 et juin 1709<sup>13</sup>, ou à actualiser en 1725<sup>14</sup> la carte de 1692 entre La Charité et Orléans.

---

<sup>10</sup> « Carte du cours de la rivière de Loire. Dans l'étendue des levées qui la retiennent depuis la ville de Gien jusqu'au Pont de Cé », réalisée par Nicolas Poictevin (16.. – 1719) (BNF, département Cartes et Plans, GE DD-2987 (1188B). En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b530528226>).

<sup>11</sup> Une toise valant 6 pieds, environ 1,949m.

<sup>12</sup> « Carte du cours de la riviere d'Allier depuis le pont du Château jusqu'a son embouchure dans la riviere de Loire et aussi partie de la Riviere de Loire depuis la Ville de Desize jusqu'à celle de la Charité faite Par l'ordre de Monsiegnieur Le Peletier conseiller d'Etat, Itendant des finances et directeur general des fortifications / Par le Sr Mathieu », réalisée par Mathieu (16.. – 1733) (BNF, département Cartes et Plans, GE DD-2987 (1266B). En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53052630z>).

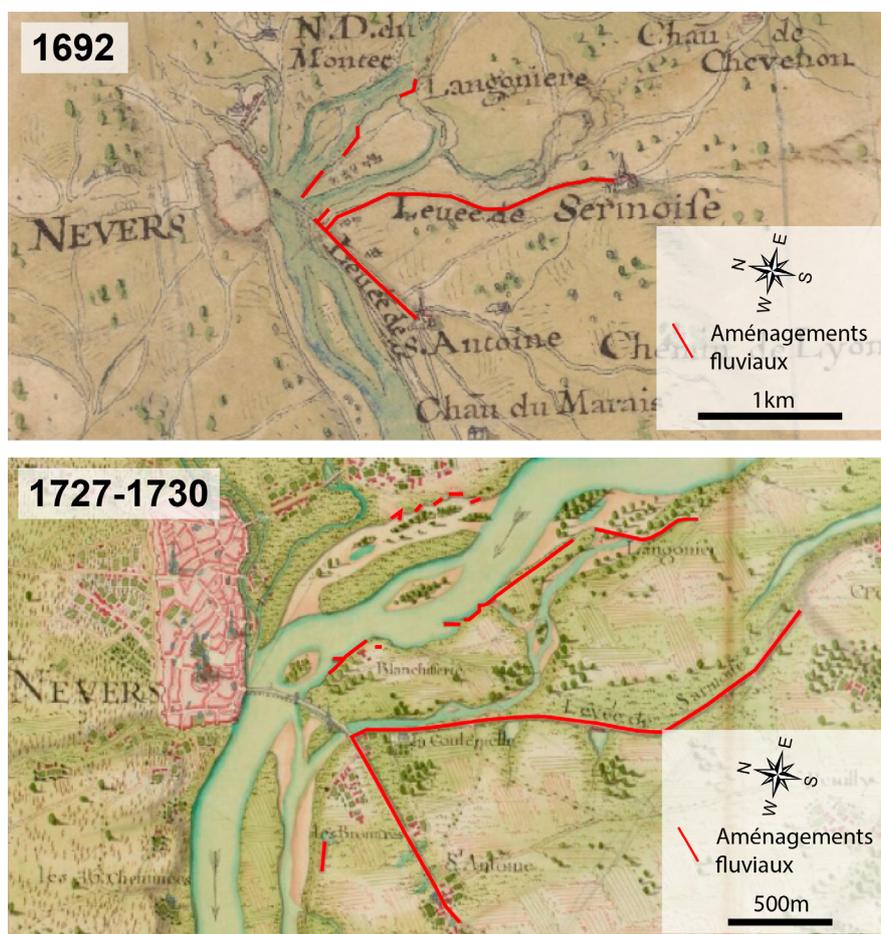
<sup>13</sup> « Carte du cours de la rivière de Loire depuis Briarre en descendant jusque à Orléans ou sont marquées les levées et les brèches qui ont été faites au mois d'octobre 1707 et mois de juin 1709 par inondations extraordinaires qui ont passé de 3 à 4 pieds sur les levées », réalisée par Mathieu (BNF, département Cartes et plans, GE DD-2987 (1219 B). En Ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53052667b>).

<sup>14</sup> « Carte du cours de la riviere de Loire depuis la ville de la Charité en descendant jusque'à celle d'Orléans dans l'étendue de l'élection de Gien et partie de celle d'Orléans / par le Sr Mathieu » (BNF, département Cartes et plans, GE DD-2987 (1218 B). En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53052613g>).

### 2.1.1.2. Carte de la Loire de 1727-1730

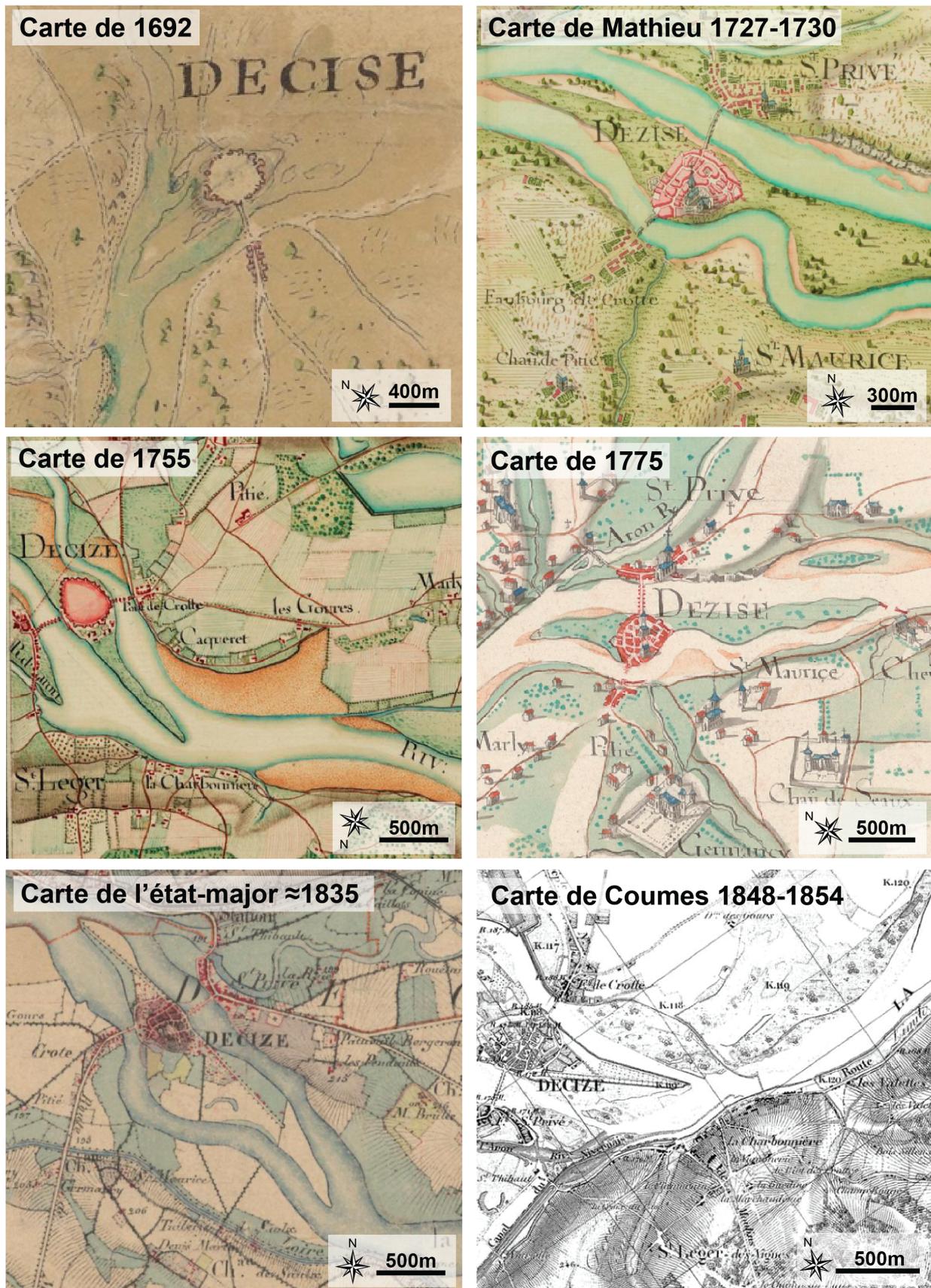
La dernière entreprise cartographique de Mathieu réalisée entre 1727 et 1730<sup>15</sup> est la plus précise de toutes (Figure 4.4, Figure 4.5). L'objectif est le même que pour les cartes de 1692 et 1725, mais à l'échelle bien plus fine de 1400 toises ( $\approx 2728,6$  m). Elle est composée de 23 planches cartographiques, recouvrant le cours de l'Allier de Vichy au Bec d'Allier et celui de la Loire de Decize à Orléans et recoupe donc une partie de la zone d'étude entre Nevers et Decize. La représentation cartographique est bien plus précise que toutes les cartes précédentes : les lits principaux et secondaires, bras morts, bancs et îles sont représentés, ainsi qu'une large gamme d'aménagements : levées, digues, protections de berges et épis.

Bien que les cartes de Mathieu de 1692 et de 1727-1730 ne soient pas géoréférencées et qu'elles ne portent pas sur la totalité de la zone d'étude, elles renseignent sur le style fluvial et l'emplacement des différents bras de la Loire, ainsi que sur la présence d'aménagements.



**Figure 4.4.** Localisation des aménagements fluviaux sur les cartes de Mathieu de 1692 et de 1727-1730 dans le secteur de Nevers.

<sup>15</sup> « Carte du cours des rivières de Loire et d'Allier depuis Orléans en remontant sur la Loire jusqu'à Décize et sur l'Allier au-dessus de Vichy » par Mathieu. (École nationale des Ponts et Chaussées, Fol.4969. En ligne : <https://heritage.ecoledesponts.fr/ark:/12148/btv1b10481273k?rk=472105;2>).



**Figure 4.5.** Ressources cartographiques représentant la portion de la Loire sur le secteur de Decize entre la fin du XVII<sup>e</sup> s. et la première moitié du XIX<sup>e</sup> s.

### 2.1.1.3. Carte de la Loire de 1775

Une autre carte plus tardive et composée de deux planches datées de 1775<sup>16</sup> est du même type que celles de Mathieu. Comme le nom l'indique, et dans la lignée des précédentes, la carte résulte du besoin de cartographier la bande active de la Loire (lit mineur, bancs et îles) ainsi que les aménagements afin d'entretenir le lit de la Loire pour la navigation. Cependant, elle n'est pas aussi précise que la carte de la Loire de 1755 sur la représentation du bâti rendant son géoréférencement impossible (**Figure 4.5**). La fine représentation des aménagements fluviaux est néanmoins utile à notre étude.

## 2.1.2. Le corpus cartographique et photographique géoréférencable

Les progrès de représentation des cartes ligériennes sont très importants entre le XVII<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> s. comme l'illustre le travail de Mathieu (**Figure 4.4**). Ces avancées s'expliquent par l'objectif de ces entreprises cartographiques qui doivent avant tout servir d'outils au service de la gestion du fleuve afin d'en assurer la bonne navigation (**Temam et Grivel, 2009**). À partir du XVIII<sup>e</sup> s., ces progrès permettent d'obtenir une première carte géoréférencable en 1755. Au total, quatre ressources cartographiques géoréférencables datées de 1755, 1836, 1848 et 1851 sont utilisées dans le cadre de cette étude, un corpus de photographique aériennes de 1953 et un corpus d'images satellitaires de 2023.

### 2.1.2.1. Carte de la Loire de 1755

Le premier corpus cartographique utilisé est daté de 1755<sup>17</sup>. Ce corpus comprend 85 planches qui représentent le cours de l'Allier depuis Vichy jusqu'au Bec d'Allier, ainsi que le cours de la Loire depuis Saint-Aignan jusqu'aux Ponts-de-Cé. Ces cartes couvrent quasi l'entièreté de la zone d'étude. Seul le cours de la Loire entre Digoin et Saint-Aignan (≈ 15 km) ne l'est pas. Les cartes ont été réalisées à l'échelle de 1 000 toises soit environ 1/35 000<sup>e</sup>. Le ou les auteurs sont inconnus, mais comme le titre l'indique, les Turcies et Levées en ont sûrement été les commanditaires. La précision et le mode de représentation de ces cartes sont dans la lignée de la progression de représentation du XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 4.5**). Les lits principaux, secondaires, bras morts, bancs, îles, berges érodées sont représentés, ainsi que de nombreux aménagements, des levées aux digues en passant par les épis, les protections de berges, les chantiers et les ports. Le tissu urbain ainsi que les parcelles, villes et forêts sont également représentées

---

<sup>16</sup> « Carte du cours de la Riviere de Loire depuis la Ville d'Orleans en remontant jusqu'à Cosne (Premiere Partie)... ou sont démontrés les chantiers et Levées suivant les Contours qu'elle fait, telle qu'elle est à présent avec les Bancs de Sable qui font les changements de sa Navigation entre les Chantiers et Levées qui la contiennent dans ses débordements. 2<sup>e</sup> partie... jusqu'à Decize, ou sont démontrées les contours et Sables qui font le changement de son Lits. Entre les Chantiers au long desquels on fait des ouvrages de Battis et Levées pour la contenir à l'effet d'empêcher les Changements de son Cours au travers des terres des particuliers et de conserver sa navigation » d'auteur inconnu (BNF, département Cartes et plans, GE C-9898. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b53099988d>).

<sup>17</sup> « Cartes du Cours de la rivière d'Allier depuis Vichy jusqu'à la Loire. Celles du cours de la Loire depuis St. Aignan jusqu'au Pont de Cé. Qui comprennent la Vallée et les Bords de ces Rivières dont la conservation fait l'objet du Département des Turcies et Levées » par auteur inconnu (BNF, GEFF-17578. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b52500127p/fl>).

avec précision, rendant un premier géoréférencement possible. Bien que ces cartes soient d'une grande précision pour l'époque, elles restent encore assez déformées.

### **2.1.2.2. Carte de l'état-major (1835-1845)**

Le second corpus cartographique géoréférencé est la carte de l'état-major (**Figure 4.5**), disponible pour sa première édition sur la plateforme Géoportail. Les minutes de la carte d'État-major ont été réalisées à l'échelle de la France métropolitaine entre 1820 et 1866. Les planches correspondant à la zone étude ont été produites entre 1835 et 1845 et plus précisément de 1836 selon **Steinmann (2015)** pour la zone d'étude. Elle est la première carte produite à l'échelle de la France et a pour but de faire suite à la carte de Cassini produite au XVIII<sup>e</sup> s. devenue trop désuète en informations géographiques et en précision (1/86 400<sup>e</sup> pour celle de Cassini contre 1/30 000<sup>e</sup> pour celle d'État-Major). Contrairement aux cartes précédentes, la carte d'État-Major n'a donc pas la Loire pour principal sujet. En résulte un manque de détail important. La différenciation entre bancs et îles est moins certaine et les bancs ne sont quelques fois simplement pas représentés. De plus, les aménagements fluviaux, notamment les plus petits, ne sont en général pas représentés. La carte d'État-Major permet cependant de par la précision du relevé des routes, des aménagements (canaux, chemins de fer, ponts, etc.) et du tissu urbain d'obtenir un géoréférencement bien plus précis que pour la carte de 1755.

### **2.1.2.3. Carte de Coumes (1848-1855)**

La « Carte de Coumes » est un corpus cartographique de 74 feuilles, levé sous la direction de l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Jules Coumes, et constitue avec la carte de 1755 la seconde ressource cartographique la plus importante pour notre étude (**Figure 4.5**). Les relevés ont été réalisés sur l'ensemble du cours de la Loire de Vorey (Haute-Loire) à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique), à l'échelle de 1/20 000<sup>e</sup>. Cette importante entreprise eut pour but de cartographier avec la plus grande précision le lit majeur de la Loire suite à la crue de 1846 afin de cartographier l'espace inondable et ses enjeux (**Temam et Grivel, 2009**). En conséquence, les formes fluviales (type de berge, bancs, îles, etc.), occupation du sol et végétation (ripisylve, oseraies, cultures agricoles, marais, etc.), bâtis et aménagements (routes et sentiers, hameaux, chemins de fer, ponts, etc.) ont été représentés avec une précision remarquable. La plus grande partie des aménagements visibles à l'œil nu à l'époque ont été représentés. Il est simplement difficile de distinguer quelques fois des protections de berges des levées naturelles. Enfin, les limites atteintes par l'inondation d'octobre 1846 sont représentées avec précision sur les cartes. La richesse de ce corpus cartographique en a fait un document incontournable dans l'étude planimétrique de la Loire (**Gautier et al., 2001 ; Gautier et Grivel, 2006 ; Grivel, 2008 ; Temam et Grivel, 2009 ; Temam, 2012 ; Martins, 2022 ; Hureau, 2023**). La production des cartes de Coumes marque un changement dans le cadre de la gestion du fleuve (**Temam et Grivel, 2009**). Les cartes ne doivent plus servir qu'à l'entreprise de la navigation, mais aussi devenir un outil dans le cadre de la gestion du risque. Les cartes géoréférencées ont été rendues disponibles par la DREAL Centre Val de

Loire<sup>18</sup>. Sur la zone d'étude, la première version finalisée des cartes sont datées de 1852 (Bec d'Allier) à 1855 (Digoin). Dans le cadre de nos recherches, nous conservons cependant la date de 1848, date à laquelle les relevés ont été effectués.

#### 2.1.2.4. Plans de Grenier (1851-1852)

Ces plans géométriques ont été réalisés par les services de la navigation afin de cartographier tous les ouvrages et infrastructures relatifs à la navigation fluviale (Temam et Grivel, 2009). Ce corpus de plan est composé de 200 planches, réalisées entre 1851 et 1852 sur la zone d'étude. Ils nous ont été transmis par le service de la DDT de la Nièvre qui a récupéré une partie des fonds archivistiques des services de la navigation du département (Martins, 2022). En raison de leur nombre important et de leur proximité temporelle avec les cartes de Coumes, elles n'ont pas été géoréférencées. Néanmoins, réalisées à une échelle de 1/2000<sup>e</sup>, elles permettent de voir les aménagements avec beaucoup de détails (Figure 4.6). Elles ont donc été consultées afin de relever tous les aménagements pour le milieu du XIX<sup>e</sup> s. et qui n'apparaissent pas entièrement sur la carte de Coumes, notamment les protections de berge.

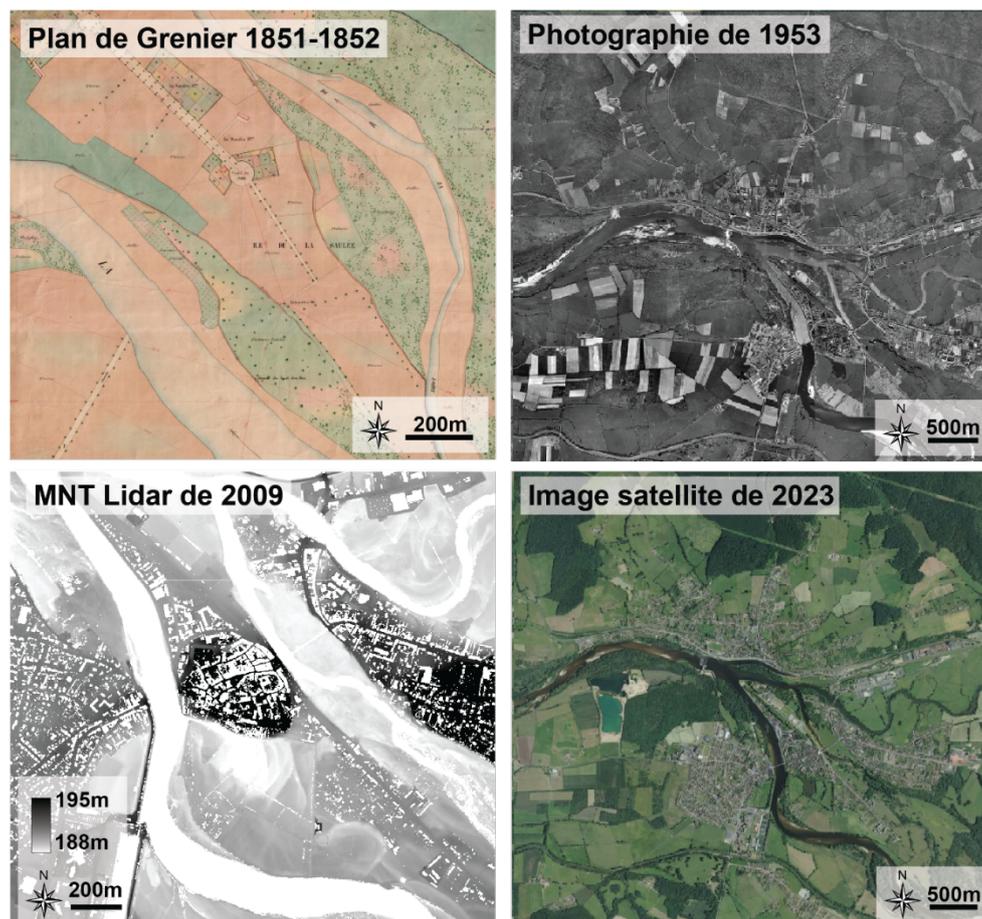


Figure 4.6. Plan de Grenier, photographie de 1953, MNT Lidar et image satellite de 2023 sur le secteur de Decize.

<sup>18</sup> Site internet : <https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/les-cartes-de-1850-r565.html>

#### **2.1.2.5. Photographies aériennes de 1953**

Les photographies aériennes de 1953 ont été acquises à une résolution de 50 cm et une exactitude planimétrique de 2 m. Ces données ont toutes été acquises auprès de l'IGN (fond BD ORTHO<sup>®</sup> Historique) (**Figure 4.6**). Les ressources ont été géoréférencées par l'IGN.

#### **2.1.2.6. Images satellites de 2023**

Les images satellites utilisées dans le cadre de cette étude datent de 2023, fournies par Google (**Figure 4.6**). Les images étaient déjà intégrées et géoréférencées dans QGIS.

#### **2.1.2.7. MNT Lidar**

Nous disposons sur l'entièreté de la zone d'étude d'un MNT Lidar fourni par la DREAL Centre Val de Loire<sup>19</sup>. L'emprise spatiale est celle du lit majeur et de quelques centaines de mètres à 1 km au-delà du lit majeur (**Figure 4.6**). Les mesures datent de 2009 et ont été réalisées à une précision de 30 cm en X et Y et de 15 cm en Z. Nous n'avons pas pu utiliser le Lidar HD en cours d'acquisition par l'IGN car la zone d'étude de Digoin à Decize n'était pas encore couverte<sup>20</sup>. Le traitement du MNT sous SIG (QGIS) a été repris du travail de thèse de Ronan Steinmann (**Steinmann, 2015 ; Steinmann et al., 2017**) réalisé sur la Loire amont et d'Annaëlle Vayssière (**Vayssière et al., 2016 ; Vayssière, 2018**) sur le Cher. Afin de mettre en évidence la morphologie de la surface du lit majeur et de pouvoir apprécier la différence d'altitude relative entre les paléochenaux, le MNT a été « corrigé » en soustrayant la pente du fleuve. Le procédé technique suivi est celui de *Dan Coe Carto* (<https://dancoecarto.com/creating-rems-in-qgis-the-idw-method>). L'identification des paléochenaux a ainsi été réalisée par l'analyse des images aériennes, de l'altitude et de la pente (**Figure 4.7**).

En conclusion, parmi les différentes ressources cartographiques servant à cette étude (**Figure 4.5, Figure 4.6**), cinq d'entre elles sont géoréférencées en totalité ou quasi-totalité sur la zone d'étude : la carte de 1755, celle de l'état-major de 1836, la carte de Coumes de 1848, les photographies aériennes de 1953 et les images satellites de 2023 (**Tableau 4.3**). Les plans de Grenier de 1851 n'ont pas été géoréférencés en raison de la proximité temporelle avec la carte de Coumes de 1848 et du nombre de planches trop important.

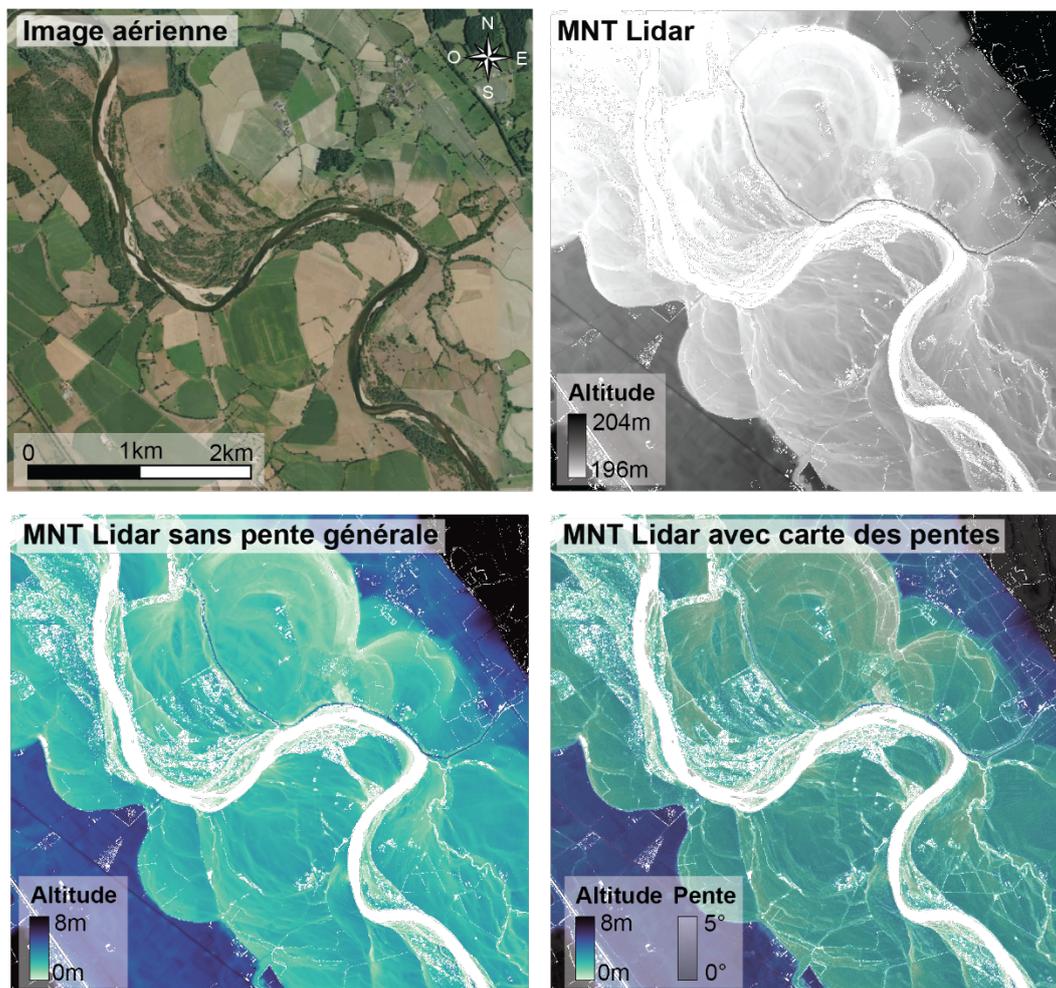
Certaines cartographiques ont également servi à l'étude, notamment dans le cadre du recensement des aménagements, mais sur des portions très restreintes. L'Atlas de Trudaine (1740-1780) qui cartographie sur notre secteur la route Paris – Lyon ne recoupe par exemple que le secteur de Nevers. Le cadastre napoléonien a aussi été partiellement consulté sur les différents sites d'étude. La limite la

---

<sup>19</sup> Site internet : <https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/grid-emprise-et-contours-de-la-vegetation-de-l-eau-a2078.html>

<sup>20</sup> Site internet : <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>

plus importante de l'étude réside dans l'absence de ressources géoréférencées entre le milieu du XIX<sup>e</sup> s. avec la carte de Coumes et les photographies aériennes du milieu du XX<sup>e</sup> s.



**Figure 4.7.** Image aérienne, MNT Lidar, MNT Lidar sans la pente générale et MNT Lidar avec la carte des pentes en transparence sur le site de Charrin - Saint-Hilaire.

**Tableau 4.3.** Ressources cartographiques et photographiques utilisées (en gris les ressources géoréférencées).

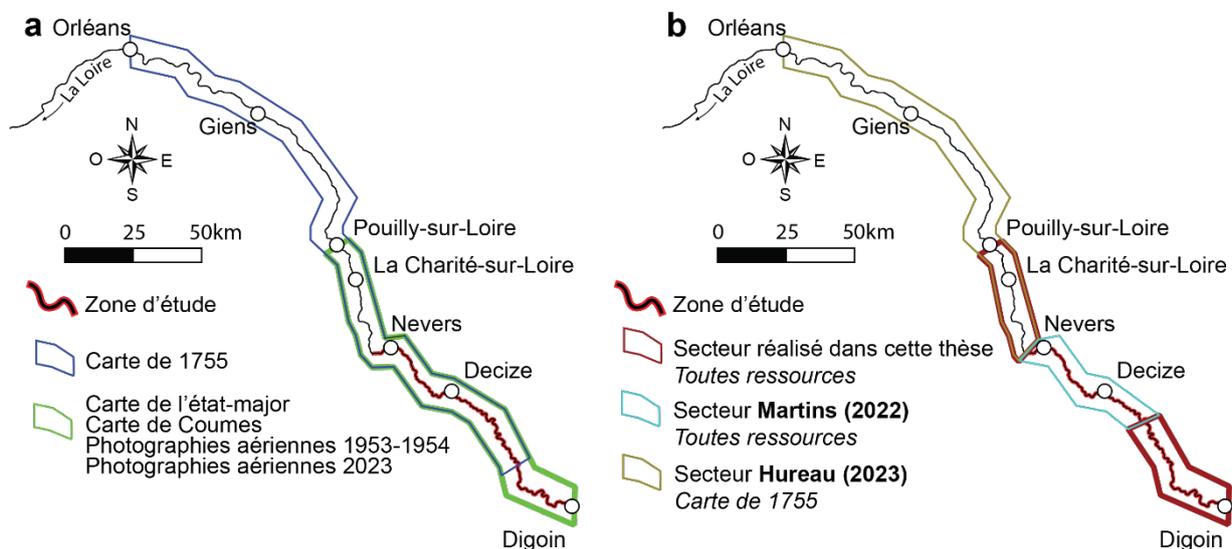
Ressources	Date	Échelle	Source
Carte de Mathieu	1692	1:245 000	BNF, département Cartes et Plans, GE DD-2987 (1266B)
Carte de Mathieu	1727-1730	1:49 000	École nationale des Ponts et Chaussées, Fol.4969
Carte de 1755	1755	1: 35 000	BNF, GEFF-17578
Carte de 1775	1775	1:58 500	BNF, département Cartes et plans, GE C-9898
Atlas de Trudaine	1740-1780	1:8640	AN, CP/F/14/8443 à 8507 et base Archim
Cadastre napoléonien	XIX <sup>e</sup> s.	variable	AD Nièvre, AD Allier, AD Saône-et-Loire
Carte de l'état-major	≈1835	1:30 000	IGN
Carte de Coumes	1848-1854	1:20 000	SIEL, DREAL Centre-Val de Loire
Plans de Grenier	1851-1852	1:2 000	DDT Nièvre
Photographie aérienne	1953	1:20 000	BD ORTHO Historique, IGN
MNT Lidar	2009	1:1 000	DREAL Centre Val de Loire
Image satellite	2023	1:1 000	Google

### 2.1.3. Géoréférencement

Les ressources à géoréférencer (carte de 1755 et carte de 1836) l'ont été partiellement par le travail de **Martins (2022)** dans le cadre de son stage de Master 1 entre Thareau et le Bec d'Allier. Les géoréférencements entre Digoin et Thareau en amont, puis entre le Bec d'Allier et Pouilly-sur-Loire en aval ont ensuite été réalisés dans le cadre de cette thèse (**Figure 4.8**). Le géoréférencement des planches de la carte de 1755 a été problématique. En effet, si les planches de Charrin / Saint-Hilaire à Orléans ont pu être géoréférencées par **Martins (2022)** et **Hureau (2023)**, les planches de Charrin / Saint-Hilaire à Saint-Aignan n'ont pas pu l'être en raison de la déformation des planches et du changement d'occupation du sol trop importante depuis 1755. Le géoréférencement des différentes ressources a été effectué sur le logiciel QGIS 3.26.1 avec les images satellites de 2023 comme référentiel actuel. Les points d'amer ont été préférentiellement disposés le plus proche possible du cours de la Loire, répartis avec homogénéité sur toute sa longueur, afin de limiter le plus possible la déformation de la carte aux abords de la Loire. L'erreur liée au géoréférencement appelée Erreur Quadratique Moyenne (EMQ) a été calculée de la manière suivante directement par QGIS (**Dépret, 2014**) (**Tableau 4.4**) :

**Tableau 4.4.** Nombre moyen de ponts d'amer et moyenne des erreurs EMQ par ressource cartographique.

Ressource	Nombre de points moyens	Erreur EMQ
Carte de 1755	26,8	16,1
Carte de 1836	66,5	6,5

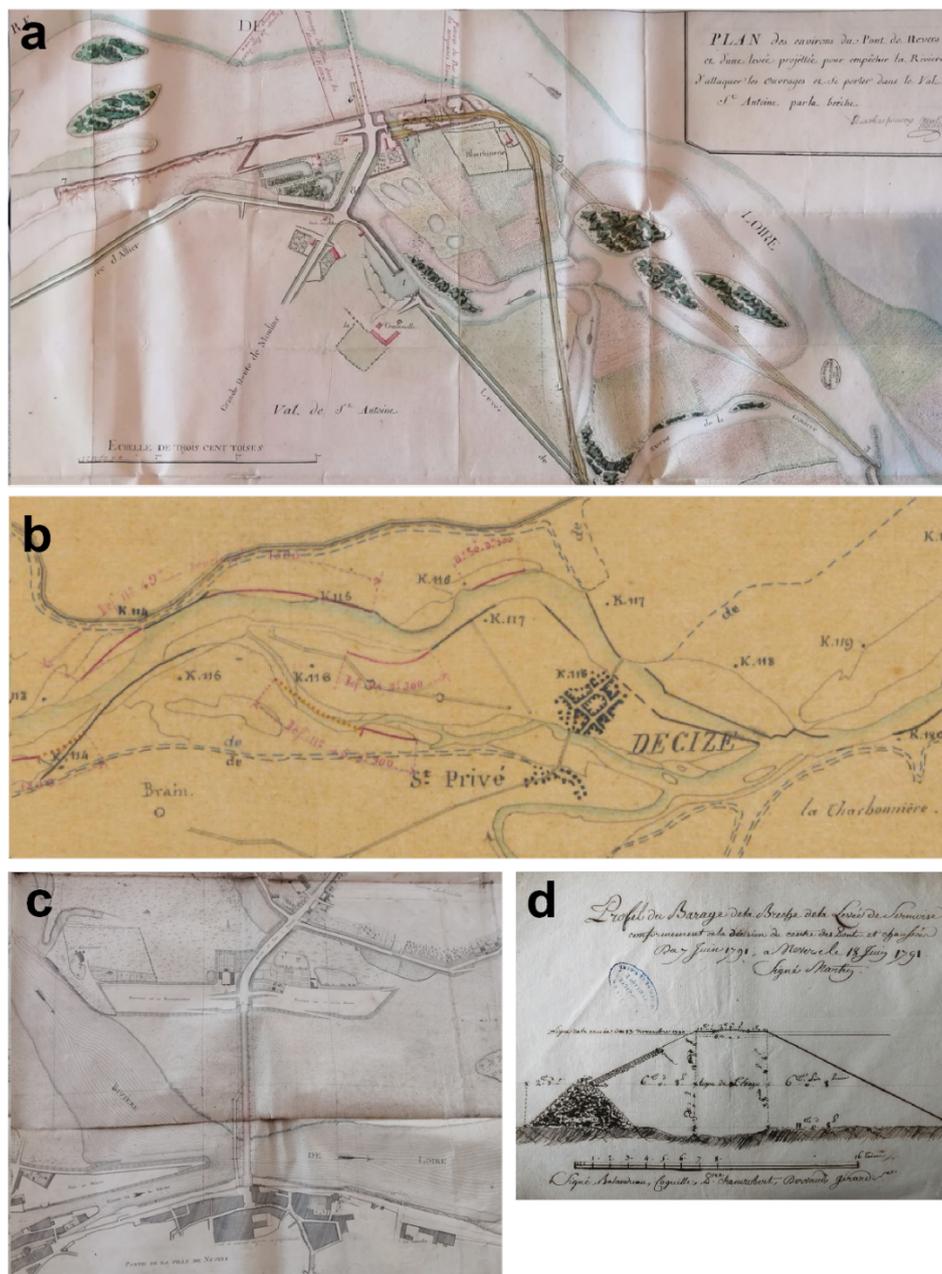


**Figure 4.8.** Emprise spatiale des ressources cartographiques géoréférencées et traitées. **a** : emprise spatiale par ressources cartographiques. **b** : emprise spatiale de la provenance des données utilisées.

### 2.1.4. Les plans et dessins

Certaines des archives documentaires émanant des corps d'ingénieurs consultées dans les différentes archives étaient à l'origine accompagnées de plans et dessins, voire de cartes.

Malheureusement, la grande majorité d'entre eux ont été perdus ou volés. Ceux conservés ont tous été consultés. Contrairement aux ressources présentées précédemment, les plans portent sur une portion restreinte du fleuve sur laquelle portent des travaux à effectuer ou les dégâts observés à la suite d'une crue (**Figure 4.9**). La précision de la représentation est toutefois bien plus importante, notamment sur celle des aménagements et des dégâts. La majorité des plans de la zone d'étude porte sur les levées et est donc concentrée sur les zones urbaines, notamment celle de Nevers.



**Figure 4.9.** Exemples de plans. **a** : plan des dégâts provoqués par la crue de novembre 1790 sur la levée de Sermoise (rive gauche de la Loire à Nevers) et des travaux prévus en conséquence (AN, F/14/1203). **b** : plan délimitant l'emprise spatiale des crues de 1846 et 1856, des secteurs aménagés et des secteurs à aménager. **c** : plan de 1812 du nouveau pont à réaliser à Nevers suite à la destruction de l'ancien par la crue de 1790 (AD Nièvre, 3S/634). **d** : profil du rehaussement de la levée de Sermoise suivant la nouvelle directive des Ponts et Chaussées suite à la crue de 1790 (AD Nevers, 1L/415).

## **2.2. Traitement de l'information géographique**

### **2.2.1. Étude de l'évolution en plan de la Loire**

Le géoréférencement des différentes ressources cartographiques et photographiques va tout d'abord nous permettre d'étudier l'évolution en plan de la bande active et des îles de la Loire. Pour ce faire, les bandes actives, regroupant le lit mineur en eau, les bancs de sable sans distinction, et les îles ont été digitalisées sur les cartes de 1755, les cartes d'État-major (1836), les cartes de Coumes (1848), les photographies aériennes de 1953 et les images satellites de 2023. Il était impossible de prendre en compte les bancs sableux séparément, car leur représentation est trop peu précise et inégale suivant les différentes planches des cartes de 1755 et 1836, ainsi que sur les photographies aériennes de 1953 prises lors de hautes eaux.

L'étude de l'évolution en plan des bandes actives se fera à partir de l'évolution de leurs largeurs. Pour se faire, nous avons repris la méthode déjà mise en place dans le cadre du mémoire de master de **Martins (2022)**. Une ligne centrale a été calculée à partir de toutes les bandes actives fusionnées sur le logiciel QGIS. Des transects perpendiculaires ont ensuite été déterminés tous les 500 m à partir de cette ligne centrale. Cette méthode permet de conserver les mêmes tronçons pour chaque bande active et d'étudier avec précision l'évolution de leurs largeurs. Elle nécessita quelques ajustements, certains tronçons ne recoupant pas toutes les bandes actives perpendiculairement, surestimant leur largeur. Au total, 201 transects ont été réalisés le long des différentes bandes actives, de Digoïn au Bec d'Allier.

Le géoréférencement des différentes ressources cartographiques et photographiques nous permet également d'étudier l'évolution de l'aménagement de la Loire et de le mettre en lien avec l'évolution en plan du cours d'eau.

### **2.2.2. Contribution à l'étude des relations entre les sociétés et leur environnement**

#### ***2.2.2.1. Évolution de l'aménagement du lit majeur***

Dans le cadre de l'étude de l'évolution de l'aménagement du lit majeur, tous les aménagements furent digitalisés sur chacune des ressources géoréférencées. Chaque aménagement présent sur les ressources non géoréférencées fut également relevé, parfois correspondant à des éléments déjà digitalisés. Une grande partie des aménagements relevés sur les différentes ressources cartographiques fut par ailleurs également relevée sur le MNT Lidar, confirmant leur présence et leur localisation précise. D'autres ne le furent pas en raison de leur érosion.

#### ***2.2.2.2. Étude de l'habitat dans le lit majeur***

Le corpus cartographique et photographique, ainsi que le MNT Lidar permettent également d'étudier les adaptations potentielles des sociétés rurales à leur environnement. De même que pour les aménagements, chaque structure ancienne, consistant en tertre ou motte castrale, présente dans le lit

majeur de la Loire a été relevée sur le MNT Lidar. Celles-ci sont repérables grâce à leur surélévation relative (**Garcia et Dumont, 2014**).

Dans le cadre de l'étude des relations entre les sociétés rurales et l'hydrosystème, il s'agit également de voir si les sociétés étaient adaptées ou non aux déplacements de la Loire. L'étude diachronique des ressources cartographiques et photographiques permet d'étudier la disparition de l'habitat en lien avec les déplacements de la Loire entre les cartes de 1755 et 1836, de 1836 et 1953 puis entre 1953 et 2023. L'habitat déplacé ou disparu a été classé en trois classes :

- **Classe 1** : bâtiment isolé ;
- **Classe 2** : hameau (plus de 2 bâtiments) ;
- **Classe 3** : village (plus de 5 bâtiments).

\*

En conclusion, nous disposons de ressources cartographiques anciennes précises sur la zone d'étude. Les cartes de la fin du XVII<sup>e</sup> et du XVIII<sup>e</sup> s. associées à celles du XIX<sup>e</sup> s., aux photographies aériennes, aux images satellites et au MNT Lidar, permettent d'effectuer plusieurs traitements de l'information géographique qui apportent à l'étude de l'évolution de l'hydrosystème au cours des quatre derniers siècles. En complément des archives documentaires, ce corpus permet également de renseigner sur les relations entre les sociétés et leur environnement, notamment en zone rurale. Comme nous allons le voir directement dans la partie suivante, ce corpus et son analyse sont également essentiels à l'étude morpho-sédimentaire.

### **3. Étude stratigraphique et sédimentologique des paléochenaux et de leur remblaiement**

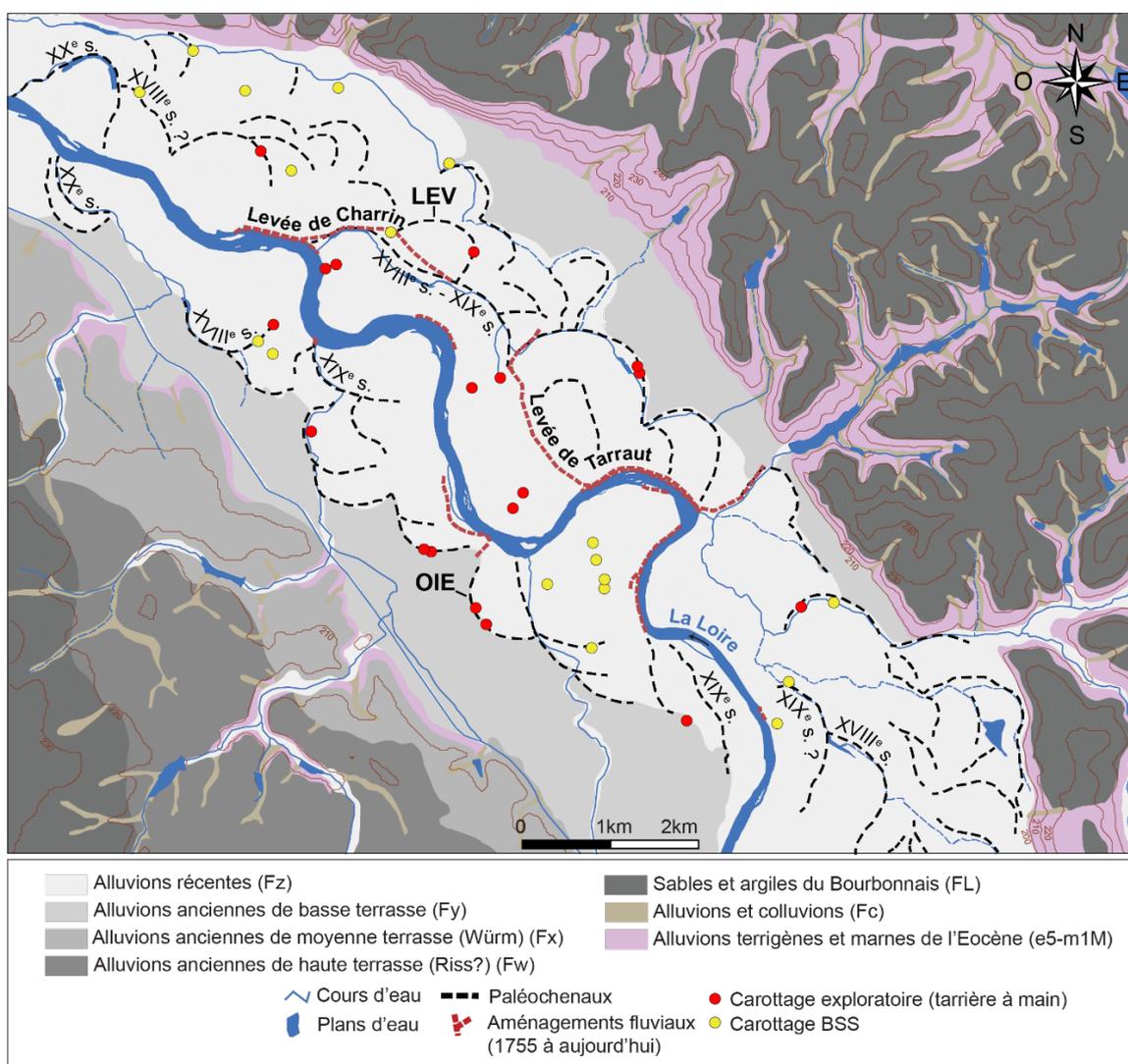
L'étude de l'histoire hydrologique de la Loire via l'approche stratigraphique et sédimentologique repose sur l'analyse fine du remblaiement sédimentaire des paléochenaux de la Loire. Ces paléochenaux, en tant que pièges à sédiments (cf. **chapitre 1**), ont enregistré l'activité hydrologique passée de la Loire au fil de ses débordements. En contexte ligérien, la sélection des paléochenaux constitue néanmoins un certain défi (cf. **chapitre 1**). Nous devons en effet obtenir un enregistrement continu et antérieur au XIV<sup>e</sup> s. afin de compléter le recensement historique des crues. La recherche des « bons candidats » s'est réalisée en plusieurs étapes à l'aide de microtopographie, de cartes anciennes et de plusieurs missions de terrain. La stratigraphie des paléochenaux sélectionnés a ensuite été déterminée grâce à des carottages accompagnés de profils de tomographie par résistivité électrique (*Electrical Resistivity Tomography*, ERT). La caractérisation des faciès sédimentaires repose sur de nombreuses mesures granulométriques accompagnées de mesures de susceptibilité magnétique. Afin d'identifier les unités fluviales dans lesquelles les cortèges sédimentaires des paléochenaux étudiés se sont mis en place, une approche actualiste a été également mise en place avec la création d'images CM. Enfin, la résolution

fine des mesures granulométriques nous sert également à la détection des traces laissées par les crues au sein des paléochenaux et/ou au mieux la détermination de périodes de forte et de faible activité hydrologique. Les événements et/ou les périodes d'activité hydrologiques déterminés seront ensuite mis en dialogue avec les événements relevés grâce aux archives documentaires.

### 3.1. Recherche et sélection des « bons candidats »

#### 3.1.1. Analyses microtopographiques, diachroniques et prospections sur le terrain

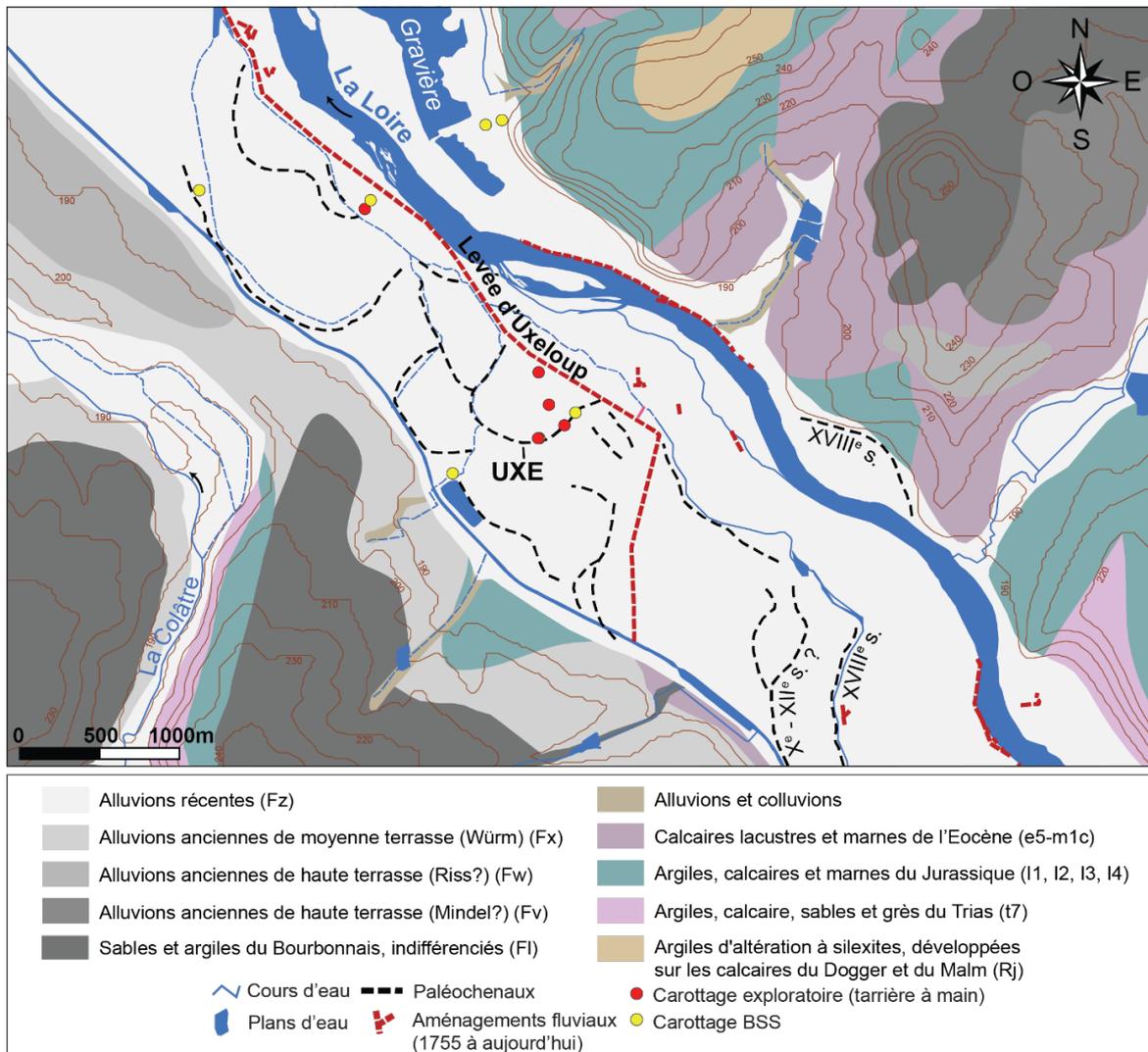
L'objectif principal de la sélection des paléochenaux est de retenir ceux ayant enregistré l'histoire hydrologique de la Loire au-delà du XIV<sup>e</sup> s. afin de compléter les informations obtenues grâce aux archives documentaires. Les paléochenaux sont facilement repérables par analyse microtopographique à partir du MNT Lidar.



**Figure 4.10.** Paléochenaux de la Loire sur le site de Thareau.

On peut distinguer sur les **Figure 4.10** et **Figure 4.11** l'ensemble des paléochenaux détecté grâce au traitement du MNT Lidar pour chacun des deux sites d'étude. Le corpus de cartes anciennes

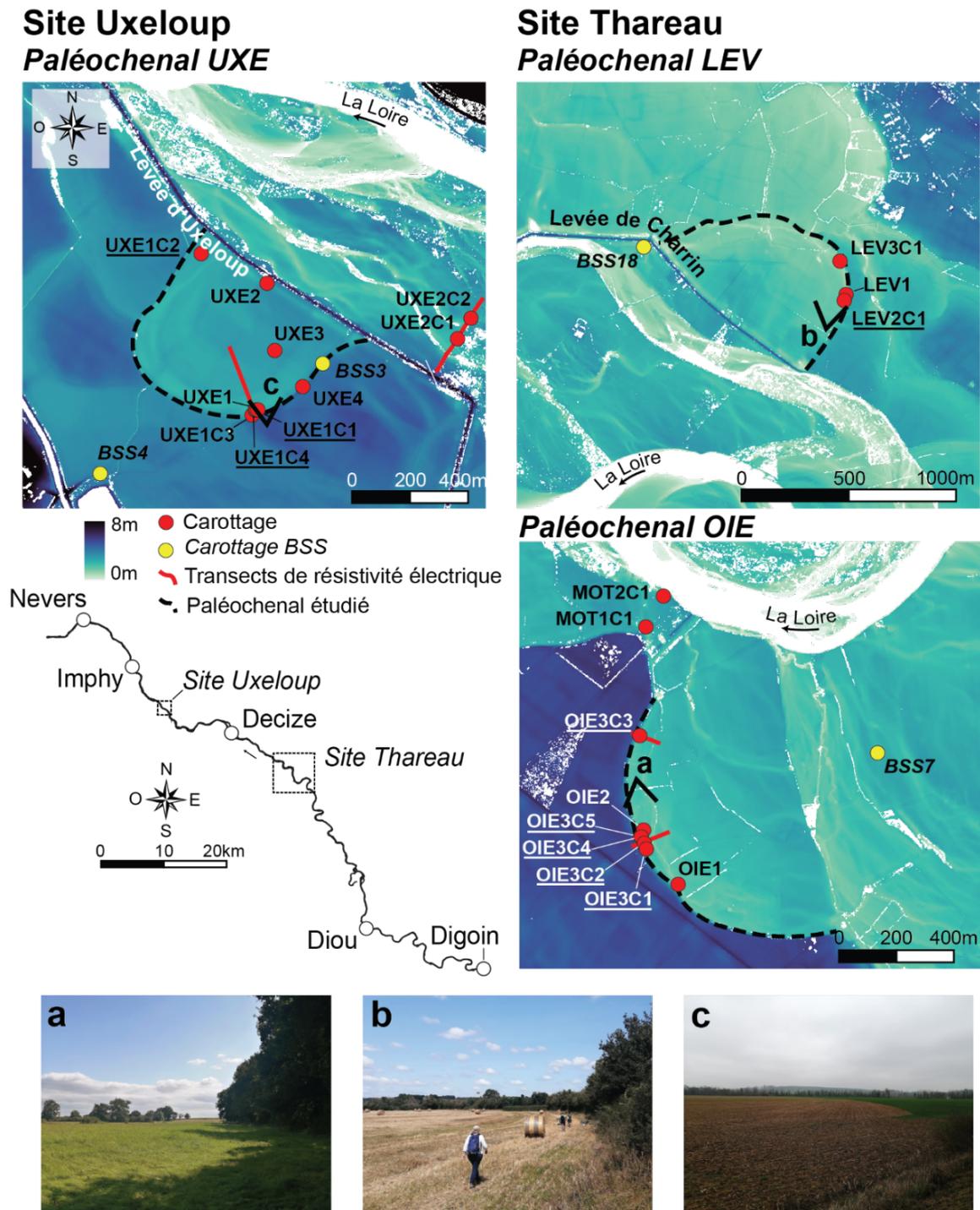
nous a permis de dater relativement plusieurs paléochenaux et de discréditer ceux dont le fonctionnement est postérieur au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Le fonctionnement d'une grande partie d'entre eux, 83 % à Thareau (**Figure 4.10**) et 88 % à Uxeloup (**Figure 4.11**), demeure plus ancien que le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Néanmoins, sélectionner un paléochenal trop éloigné des bandes alluviales successives c'est aussi risquer d'obtenir un signal sédimentaire faible ou incomplet de l'activité hydrologique. Nous avons donc évité de sélectionner les paléochenaux éloignés de plus d'1 km des bandes actives datées du XVIII<sup>e</sup> – XXI<sup>e</sup> s. Enfin, des carottages à la tarière (tête Edelman) ont été réalisés afin d'obtenir un premier aperçu du remblaiement sédimentaire des paléochenaux qui nous ont semblé intéressants. Au total, 16 carottages à la tarière à main ont été effectués au cours de deux missions de terrain en avril et juillet 2021. Certains n'ont finalement pas été considérés en raison de leur remplissage trop hétérogène ou trop grossier ne convenant donc pas à une étude fine de l'enregistrement sédimentaire des crues passées (cf. **chapitre 1** et **sous-partie 3.2.** suivante). Les paléochenaux sélectionnés à cette étape présentent tous un remblaiement fin important (plus d'1 m) et plutôt homogène.



**Figure 4.11.** Paléochenaux de la Loire sur le site d'Uxeloup.

### 3.1.2. Carottages des paléochenaux

Les carottages des paléochenaux sélectionnés ont été réalisés au carottier à percussion (Cobra TT) avec des tubes PVC d'1 m de long et de 50 mm de diamètre. Au total, 18 carottages ont été réalisés au carottier à percussion au cours de cinq missions de terrain en août 2021, mars et juillet 2022, juillet 2023 et février 2024 (**Figure 4.12**).



**Figure 4.12.** Localisation des carottages et des transects de résistivité réalisés sur les trois sites des paléochenaux sélectionnés. Les carottages dont le dénominateur est souligné correspondent à ceux pour lesquels des analyses ou des datations ont été réalisées.

Toutes les carottes prélevées avec le carottier à percussion ont été ouvertes au LGP, décrites et photographiées. La couleur, texture et structure de chacune des unités stratigraphiques déterminées ont été définies. Les prélèvements destinés aux mesures granulométriques ont été réalisés sur une moitié de la carotte tandis que l'autre moitié a été conservée pour les mesures non destructives : susceptibilité magnétique et prélèvements supplémentaires de matériel datable. Aux carottages effectués dans le cadre de cette thèse s'ajoutent les données issues de la Banque du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM (**Figure 4.12**). Bien que leur description soit succincte et quelquefois discutable (**cf. chapitre 2**), ils sont bien plus profonds que ceux que nous avons effectués et atteignent le substrat.

### **3.1.3. Sélection finale de trois paléochenaux**

Parmi les paléochenaux carottés, un paléochenal a été sélectionné sur le **site d'Uxeloup** et deux paléochenaux sur le **site de Thareau** (**Figure 4.12**). Ces paléochenaux ont été sélectionnés pour plusieurs raisons. Premièrement en raison de leur âge relatif, antérieurs au XVIII<sup>e</sup> s. Deuxièmement, en raison de leur remblaiement en sédiment fin assez important. Et enfin, en raison du contexte anthropique. Deux de ces trois paléochenaux (LEV et UXE) se trouvent en arrière de levées qui ne limitent pas l'inondation du val et dont on connaît les périodes de construction (mi XVIII<sup>e</sup> s.) et l'histoire de leur évolution grâce aux archives documentaires. Le troisième paléochenal n'est cependant pas entouré d'aménagement de cette ampleur, et pourrait donc nous donner des informations sur l'impact des levées sur l'enregistrement sédimentaire (**Figure 4.12**).

## **3.2. Étude stratigraphique du remblaiement des paléochenaux**

La stratigraphie du remblaiement des paléochenaux a été déterminée verticalement par la description des carottages et horizontalement par des profils ERT réalisés sur deux des trois paléochenaux sélectionnés. La description et la caractérisation des différents faciès sédimentaires reposent principalement sur les mesures granulométriques, qui servent également comme nous le verrons par la suite à détecter les événements de crues, mais également sur des mesures de résistivité électrique et de la mise en place d'une approche actualiste.

### **3.2.1. Analyses granulométriques**

Les analyses granulométriques doivent tout d'abord nous servir à mieux caractériser les différents faciès sédimentaires des paléochenaux. Pour ce faire, un carottage par paléochenal a été sélectionné afin de réaliser les mesures granulométriques (**Figure 4.12, Tableau 4.5**). Pour UXE1C1 et LEV2C1, toutes les unités sédimentaires déterminées ont été échantillonnées (**Tableau 4.5**). Seuls les deux premiers mètres du carottage OI3C1 ont été échantillonnés. Dans le cadre de la détection des traces laissées par les événements de crue, les deux premiers mètres des trois carottages où l'on retrouve les unités sédimentaires limoneuses les plus homogènes en taille, garantes d'un enregistrement potentiellement continu (**cf. chapitre 1**), ont été échantillonnés au centimètre.

**Tableau 4.5.** Total des mesures granulométriques effectuées sur les différents carottages et prélèvements de surface.

Profondeur (en m)	OIE3C1	UXE1C1	LEV2C1	Prélèvements de surface
0-1	95	100	100	N/A
1-2	6	45	71	N/A
2-3	0	9	13	N/A
3-4	0	8	10	N/A
Surface	N/A	N/A	N/A	52
<b>Total</b>		509 <sup>21</sup>		

Les mesures granulométriques ont été réalisées avec un granulomètre laser Beckmann-Coulter LS230 au LGP en collaboration avec Ségolène Saulnier-Copard. La fraction organique des échantillons a été éliminée par attaque au peroxyde d'hydrogène à 35 % (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Une fois la fraction minérale isolée, les échantillons ont été traités avec de l'hexamétaphosphate de sodium dilué à 0,5 % à de l'eau distillée afin de séparer les particules entre elles. Chaque échantillon a été tamisé afin d'isoler les particules supérieures à 2000 µm. Les refus de tamis ont été tamisés à 2000, 3150, 4000, 5000 et 6100 µm et pris en compte dans l'étude. Les résultats ont été analysés à l'aide de la feuille de calcul GRADISTAT (**Blott and Pye, 2001**).

### 3.2.2. Mesures de susceptibilité magnétique

Les mesures de susceptibilité magnétique doivent compléter les mesures granulométriques dans le cadre de la détermination des faciès sédimentaires. Les mesures de susceptibilité magnétique permettent de mesurer les variations de la teneur en minéraux ferromagnétiques des sédiments. La mesure de cette teneur peut nous renseigner sur les processus de formation et de transport des sédiments (**Dearing, 1999**) et aider à identifier des périodes de fort détritisme associées à une activité hydrologique plus intense (**Vannière et al., 2004 ; Steinmann, 2015 ; Vayssière, 2018 ; de Milleville, 2023**). La susceptibilité magnétique a été mesurée au LGP en collaboration avec Ségolène Saulnier Copard avec un susceptibilimètre Bartington MS2 à un pas de 0,5 cm.

### 3.2.3. Profils ERT

Des profils de tomographie de résistivité électrique (ERT) ont également été réalisés afin d'obtenir une image en deux dimensions de la structure des paléochenaux suivant la résistance des matériaux à un courant électrique. Cette résistance  $p$  des matériaux (exprimée en ohm/m) peut varier en fonction de la porosité du matériel et de son degré de saturation en eau. L'ERT permet de distinguer le

<sup>21</sup> Parmi les 509 mesures granulométriques effectuées, 61 le furent par Anastasia Gueguen, Pénélope Santerre, Gwell Cusnar, Enora Cordeau, Colombe Guerry, Laura Karam et Iris Xifaras dans le cadre de leur stage de licence au LGP, et 12 le furent également par Ségolène Saulnier-Copard.

remblaiement fin des paléochenaux des cortèges grossiers et donc de pouvoir identifier plus précisément les différents cortèges sédimentaires. Des profils ERT ont été réalisés sur les paléochenaux d'OIE et UXE (**Figure 4.12**). Aucun n'a pu être effectué sur celui de LEV, principalement pour des conditions d'accès au paléochenal.

### 3.2.4. Approche actualiste et image CM

La mise en place de l'approche actualiste répond au besoin d'identifier les unités fluviales dans lesquelles les cortèges sédimentaires des paléochenaux étudiés se sont mis en place. La méthode de l'image CM de **Passega (1957, 1964)** offre la possibilité de caractériser ces environnements sédimentaires passés à partir d'un référentiel actuel (**Bravard, 1983 ; Arnaud-Fassetta, 1998**). Cette méthode constitue un mode d'interprétation des processus de transports propre à une rivière, ou même à un secteur en particulier. Il ne peut donc y avoir d'image CM « universelle », chaque image devant être construite sur un secteur de rivière de puissance et de patron fluvial relativement homogènes. Cette méthode a été adaptée avec succès sur des rivières de puissances et styles fluviaux différents (**Bravard et Peiry, 1993 ; Brousse et Arnaud-Fassetta, 2011 ; Houbrecht et al., 2013 ; Lescure, 2015 ; Salvador, 2016 ; Vayssière, 2018**), notamment dans le bassin rhodanien et sur le Rhône lui-même (**Bravard et al., 1986 ; Arnaud-Fassetta, 1998 ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Brousse et Arnaud-Fassetta, 2011**). Son application sur le bas-Rhône permet notamment de mettre en valeur l'évolution des modes des transport et de taille des dépôts dans le temps, que ce soit à court terme entre 1999 et 2010 (**Brousse et Arnaud-Fassetta, 2001**) ou à plus long terme de la période du PAG à nos jours (**Arnaud-Fassetta, 2003**). Une première image CM des processus de transport ligérien avait été effectuée par **Gautier et al. (2001)** à partir d'échantillons prélevés en Loire nivernaise à l'amont du Bec d'Allier. Nous proposons ici de mettre à jour l'image CM des modes de transports actuels, qui servira de référentiel pour interpréter les modes de transports responsables des remblaiements des paléochenaux étudiés.

59 prélèvements de surface ont été réalisés sur plusieurs sites d'étude et sur plusieurs formes fluviales :

- Dans la bande active : bancs actifs de bras principaux et secondaires, dépôts de bas de berge ;
- Dans la plaine proximale et distale : dépôts de bras morts et en cours de fermeture, à ceci s'ajoutent les dépôts récents de la crue de mars 2024 et de celle d'avril 2024 ;
- À l'interface plaine – bande active : dépôts de haut de berge et sur les îles.

Ces échantillons ont été mesurés par granulométrie laser (**Tableau 4.5**). Les particules grossières de bancs actifs ont été mesurées in situ avec la méthode de **Wolman (1954)**.

L'image CM est représentée sous forme de diagramme mettant en relation deux critères granulométriques : la taille de l'élément le plus grossier ( $D_{99}$  ou C), caractéristique de la compétence

maximale, face au diamètre du grain médian ( $D_{50}$  ou M) qui caractérise la taille médiane du sédiment (**Figure 4.13**). Les modalités de transport sont alors identifiées en fonction de la position des échantillons sur le diagramme. On distingue sur les différents graphes les différents processus de transport suivant différents segments (**Passéga, 1964 ; Arnaud-Fassetta, 2003 ; Figure 4.13**) :

- Segment NO : transport par roulement-charriage ;
- Segment PQ : mélange de transport par roulement et par suspension graduée ;
- Segment QR : transport par suspension graduée ;
- Segment RS : transport par suspension uniforme.

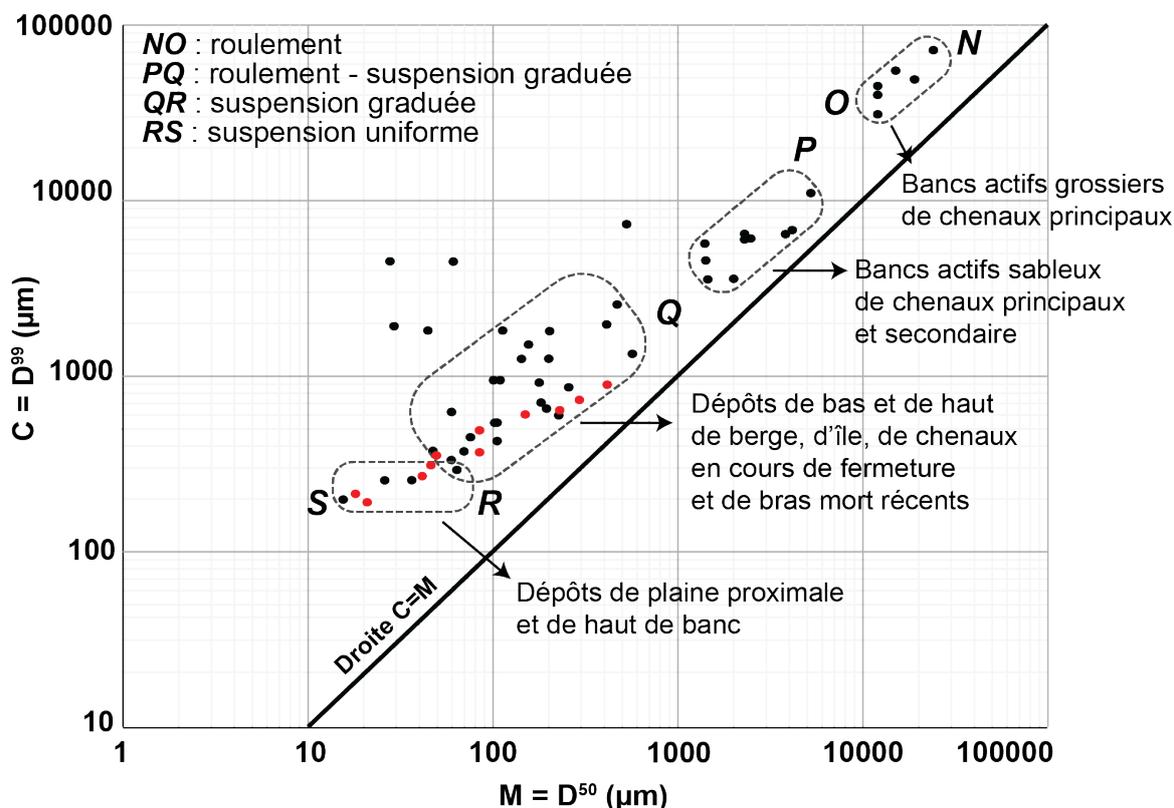
D'autres segments pourraient apparaître mais ne l'ont pas été soit par manque de données soit par caractéristiques fluviales propres à la Loire. Par exemple, le mode de transport par suspension pélagique (T) est très difficilement perceptible sur la Loire (**Gautier et al., 2001**) et aucun échantillon ne peut y être associé dans le cadre de cette thèse (cf. **chapitre 6**). **Arnaud-Fassetta (1998), Arnaud-Fassetta (2003)** et **Brousse et Arnaud-Fassetta (2011)**, puis repris également par **Salvador (2016)**, distinguent deux segments RS et R'S' renvoyant à des dépôts transportés respectivement par suspension uniforme en mode « énergétique » et « calme ». Cette distinction n'apparaît pas ici.

Les quatre segments caractéristiques des différentes modalités de transport apparaissent plutôt clairement sur l'image CM actuelle, accompagnée de statistiques descriptives du gradient granulométrique de chaque segment (**Figure 4.13**). Le segment NO correspond aux dépôts de bancs actifs de chenaux principaux dont les particules grossières, composées exclusivement de graviers et galets ( $D_{50}$  minimal à 1,2 cm et  $D_{99}$  minimal à 3,1 cm), ne se déplacent que par roulement. Le fond du lit de la Loire n'a pu être échantillonné en raison des hauteurs d'eau trop importante.

Le segment PQ concerne les échantillons de bancs actifs de chenaux principaux et secondaires dont les particules se déplacent par roulement et par suspension graduée suivant le débit. Ces particules constituent un mélange de sables grossiers et de graviers avec des valeurs de  $D_{50}$  et de  $D_{99}$  allant respectivement de 527,8 à 5223,5  $\mu\text{m}$  et de 3560,2 à 11030,9  $\mu\text{m}$ .

Regroupant 51 % du nombre total d'échantillons, le segment QR témoigne de l'importance du processus de transport par suspension graduée sur la zone d'étude. Ce résultat est cohérent avec le fait que la Loire transporte majoritairement plus de sables que de limons et d'argiles (cf. **chapitre 2 et 3**). Le segment regroupe une large gamme de sables grossiers, moyens et fins, avec des  $D_{50}$  et  $D_{99}$  minima respectifs de 75,3 et 449,4  $\mu\text{m}$  et des  $D_{50}$  et  $D_{99}$  maxima respectifs de 226,6 et 1806,9  $\mu\text{m}$ . De plus, ces échantillons ont été prélevés sur des unités fluviales diversifiées : bas et haut de berge, dépôts d'îles, de chenaux en cours de fermeture et de bras morts récents. Il reste difficile au sein de ce segment de différencier ces différentes unités. Cinq échantillons se retrouvent hors des segments des segments PQ et QR. Quatre d'entre eux se caractérisent par un  $D_{50}$  bas et un  $D_{99}$  très élevés et correspondent à des

environnements actuels de dépôts différents : îles, bras secondaire et plaine proximale. De nouveaux prélèvements seraient nécessaires pour mieux comprendre le ou les processus de transport impliqués.



Segment	NO		PQ		QR		RS	
Centiles*	D <sub>50</sub>	D <sub>99</sub>						
Max	24000	72000	5223,5	11030,9	226,6	1806,9	36,3	255,5
Min	12000	31000	527,8	3560,2	75,3	449,4	15,5	197,6
Médiane	13500	47000	2286,9	6088,8	175,1	625,9	20,2	207,4

\*: les unités sont en µm

**Figure 4.13.** Image CM de la Loire réalisée à partir des dépôts actuels. Sont représentés en rouge les échantillons de dépôts de crues prélevés en mars et avril 2024.

Enfin, le segment RS est assez peu pourvu sur l'image CM actuelle. Il fut également le plus difficile à identifier et le prélèvement des échantillons nécessita plusieurs missions de terrain. Les échantillons du segment RS correspondent ici à des dépôts de suspension uniforme prélevés sur des sommets de bancs actifs et à des dépôts de plaine proximale, prélevés jusqu'à 70 m au-delà de la berge. Les médianes du D<sub>50</sub> et du D<sub>99</sub> du segment se situent respectivement à 20,2 et 207,4 µm, ce qui est cohérent avec les limites du segment RS proposées dans les études précédentes (Lescure, 2015 ; Vayssière, 2018), notamment dans le bassin rhodanien (Bravard et al., 1986 ; Arnaud-Fassetta, 1998 ; Brousse et Arnaud-Fassetta, 2011 ; Salvador, 2016). En revanche, le nombre d'échantillons est bien plus faible que sur ces études. Le faible nombre d'échantillons actuels relevés sur ce segment, et l'absence de

suspension pélagique, s'explique par la faiblesse du transport fin sur la Loire (cf. **chapitre 2 et 3**) et témoigne de la rareté des dépôts fins au sein de la plaine et du transport par suspension uniforme.

L'image CM construite en 2001 par **Gautier et al.** est proche de la nôtre. La limite Cr, correspondant à la limite inférieure de notre segment PQ est similaire autour de 3000  $\mu\text{m}$ . L'image CM de 2001 témoigne également d'un transport par suspension graduée important regroupant les dépôts de bas et haut de berge, de chenaux colmatés, de bancs de bras anastomosés. La limite Cu, correspondant à la limite supérieure de notre segment RS, est néanmoins plus haute, caractérisée à 600  $\mu\text{m}$  contre environ 300  $\mu\text{m}$  dans le cadre de cette étude.

Ainsi, la caractérisation d'une image CM des modes de transports actuels témoigne de l'importance de la suspension graduée, qui s'explique par l'omniprésence des sables, et par une très faible suspension uniforme, s'expliquant par une faible présence de limons et surtout d'argiles. Cette image CM nous servira à présent de référentiel pour interpréter les modes de transports responsables des remblaiements des paléochenaux étudiés, mais également à voir si la configuration actuelle (suspension graduée importante et suspension uniforme faible) des processus de transports fut différente ou non par le passé.

### **3.3. Détection granulométrique des évènements de crue**

Que ce soit en milieu lacustre ou fluvial, les détections visuelles, granulométriques (**Beierle et al., 2002 ; Toonen, 2013 ; Wilhelm et al., 2022a ; Peng et al., 2019 ; Pang et al., 2023 ; Hess et al., 2024**) ou encore géochimiques (**Berner et al., 2012 ; Croudace et Rothwell, 2015 ; Davies et al., 2015 ; Sridhar et al., 2016 ; Rapuc et al., 2020 ; Pang et al., 2023**) sont les méthodes les plus communément utilisées pour l'identification et la caractérisation des dépôts évènementiels. Contrairement à certaines études réalisées en contexte lacustre (**Wilhelm et al., 2022**) ou fluvial (**Peng et al., 2019**), les dépôts de crues n'ont pas pu être détectés par identification visuelle dans cette présente étude. L'identification repose donc principalement sur les mesures granulométriques, accompagnées de mesures de susceptibilité magnétique. L'application de cette approche nécessite d'avoir un remblaiement sédimentaire assez homogène afin de limiter le « bruit de fond » et de pouvoir identifier les anomalies granulométriques ou géochimiques comme évènements de crue. Ainsi, au sein des trois paléochenaux sélectionnés le carottage présentant l'enregistrement le plus homogène a été sélectionné pour l'application des trois méthodologies.

La caractérisation granulométrique des dépôts évènementiels repose sur l'utilisation de statistiques classiques (e.g., **Blott et Pye, 2001 ; Beierle et al., 2002 ; Toonen et al., 2015 ; Peng et al., 2019**). Dans le cadre d'une série granulométrique homogène, la queue grossière de la distribution granulométrique, caractérisée par le  $D_{90}$ ,  $D_{95}$  ou le  $D_{99}$ , permet d'indiquer les anomalies d'apports grossiers et de discréditer les évènements (**Toonen et al., 2015 ; Peng et al., 2019**). Dans le cadre de la

Loire et de son transport sédimentaire majoritairement sableux, la fraction sableuse (> 63 µm) peut aussi nous aider à identifier les évènements.

Plusieurs études se sont également servies de la méthode des *End Member Modelling* (EMM) permettant de décomposer la distribution granulométrique de chaque échantillon (Weltje, 1997). Cette méthode peut ainsi aider à renseigner la stratigraphie (Duquesne et Carozza, 2023) et d'aider à détecter des évènements de crue (Toonen et al., 2015 ; Peng et al., 2019, 2021). Nous avons appliqué la méthode proposée par Dietze et Dietze (2019) avec l'aide d'Amélie Duquesne, mais l'interprétation des résultats ne nous a pas permis de compléter les données et les analyses déjà réalisées grâce à la granulométrie ni au sujet de la stratigraphie des différents paléochenaux, ni dans le cadre de la détection des évènements de crue. L'exploitation de la méthode EMM ne sera donc pas présente dans les résultats de ce présent travail.

### 3.4. Cadre chronologique

Le cadre chronologique des unités sédimentaires repose sur des datations réalisées par méthode du radiocarbone 14 (<sup>14</sup>C), réalisées sur charbon ou sédiment organique (SO) au *Poznan Radiocarbon Laboratory* et au laboratoire de Radiochronologie du Centre d'étude nordique de l'Université de Laval, et par méthode de luminescence stimulée optiquement (OSL) au laboratoire *Scottish Universities Environmental Research Centre* (SUERC) en collaboration avec D. Sanderson, A.J. Cresswell et L. Martin. Les datations <sup>14</sup>C ont été calibrées sur l'outil OxCal (courbe de calibration IntCal20). Les diagrammes âge-profondeur ont été réalisés sur le logiciel R à l'aide du package rbacon (Blaauw et Christen, 2011).

Comme nous le verrons plus en détail au sein du **sixième chapitre**, trois des datations effectuées par méthode du <sup>14</sup>C n'ont pas été retenues car incohérentes avec la stratigraphie. L'incohérence de deux d'entre elles s'explique probablement par le fait que le charbon daté ait été remobilisé par la Loire. La réalisation des datations OSL a également rencontré des difficultés. Les particules mesurées furent probablement mal « blanchies » durant leur transport par la Loire au sein du lit. Ce problème de blanchiment, déjà très bien connu dans la littérature (e.g., Ghilardi et al., 2015 ; Rixhon, 2022), a rendu les mesures difficiles à réaliser par l'équipe du SUERC. Une date parmi les trois réalisées souffre en conséquence d'un manque important de précision avec une mesure réalisée à ± 200 ans.

\*

En conclusion, le **Tableau 4.6** récapitule toutes les analyses réalisées sur les différentes carottes. Les sites d'études et les paléochenaux ne bénéficient pas du même nombre d'analyses. Par exemple, si des mesures granulométriques, magnétiques et de géophysique ont pu être effectuées sur le carottage OIE3C1, aucun matériel datable n'a été trouvé. À l'inverse, LEV2C1 bénéficie de matériel datable, mais aucun profil géophysique n'a pu être effectué.

**Tableau 4.6.** Récapitulatif des analyses et datations réalisées sur les carottes des trois paléochenaux sélectionnés.

Site	Carotte	Granulométrie	Susceptibilité magnétique	Géophysique (résistivité élec.)	Datations (nombre)
Uxeloup	UXE1C1	o	o	o	4
Uxeloup	UXE1C2		o	o	2
Uxeloup	UXE1C4			o	1
Thareau	LEV2C1	o	o		4
Thareau	OIE3C1	o	o	o	0
Thareau	OIE3C2		o	o	2
Thareau	OIE3C3		o	o	2
Thareau	OIE3C4			o	5
Thareau	OIE3C5			o	1

\*

## Conclusion du chapitre

La mise en place d'approches et de méthodologies empruntées aux disciplines géographique, historique et sédimentologique doit répondre aux problématiques énoncées en **introduction** et dans le **premier chapitre**. L'intérêt de cette approche interdisciplinaire réside également dans le fait que les avantages propres à chacune des méthodes répondent aux limites de chacune.

L'approche historique repose sur un corpus documentaire très riche, et plus particulièrement sur les comptes communaux des deux cités médiévales de Nevers et Decize conservés du XIV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. Ces comptes, encore largement sous-exploités, sont riches à la fois en informations liées aux crues et à la fois liées aux relations entre les sociétés urbaines et l'hydrosystème. Ces documents, associés à d'autres plus tardifs, émanant principalement des corps des ingénieurs, permettent de réaliser un recensement des évènements de crue et de détecter à l'aide d'indice de crue des périodes de forte comme de faible activité hydrologique. Ils vont également permettre de renseigner les relations entre les sociétés riveraines de la Loire et leur fleuve et plus particulièrement de leurs adaptations aux contraintes fluviales.

La mise en place de l'approche cartographique répond à plusieurs enjeux. Dans le cadre de l'étude sédimentaire, les cartes anciennes nous ont aidés à discrétiser les paléochenaux antérieurs au XVIII<sup>e</sup> s. des plus récents afin de sélectionner des candidats ayant enregistré une histoire sédimentaire remontant au moins à la période médiévale. Le traitement SIG des données issues des cartographies

diachroniques réalisées à partir de l'étude de ces cartes anciennes, des photographies aériennes et satellitaires, renseignent également sur la mobilité de la Loire depuis la fin du XVII<sup>e</sup> s. Le croisement de ces ressources avec, d'une part l'étude fine du MNT Lidar et, d'autre part les ressources documentaires ayant servi au recensement des crues de la Loire, a pour but de nous renseigner sur les relations entre les sociétés et leur hydrosystème.

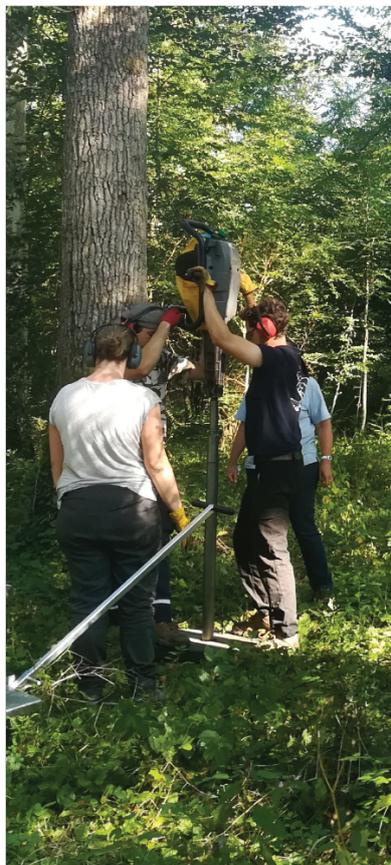
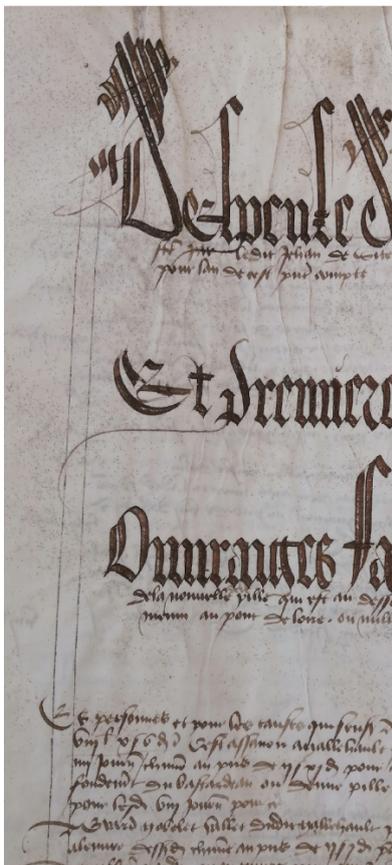
Enfin, l'approche stratigraphique et sédimentologique et en particulier l'analyse granulométrique fine du remplissage sédimentaire des paléochenaux de la Loire permettront de recouper et d'allonger temporellement l'étude de l'activité hydrologique passée de la Loire. Ces analyses granulométriques sont accompagnées de susceptibilité magnétique, associées à des mesures géophysiques afin de mieux comprendre l'évolution des paléochenaux étudiés.

## Partie II

---

# Étude de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire

---



*De gauche à droite : extrait de la première page des dépenses du compte de 1454 (AM Nevers, CC/50, fol. 6), carottage sur le site de Thareau (26/08/2021), photographie de la carotte UXE2C1.*

---

Cette seconde partie de la thèse est destinée à renseigner l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire à partir de deux approches. Dans un premier temps, le **cinquième chapitre** a pour objectif d'effectuer un recensement exhaustif des crues de la Loire à partir des archives documentaires du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours. L'utilisation d'indices doit permettre de définir les périodes de forte et de faible activité hydrologique des huit derniers siècles. Dans un second temps, le **sixième chapitre** vise à allonger temporellement cette étude au-delà du XIV<sup>e</sup> s. L'objectif est de renseigner l'activité passée de la Loire à partir de l'étude des remblaiements sédimentaire de ses paléochenaux. Leur étude stratigraphique doit permettre la détection et la caractérisation granulométrique des traces du passage des évènements de crue, inédits pour la période antérieure au XIV<sup>e</sup> s. ou préalablement identifiés au sein des archives documentaires pour la période du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours. Cet objectif nous permettra également de renseigner plus précisément le rôle des évènements de crue dans la construction, ou la destruction, de la plaine alluviale.

---



# Chapitre 5

## Variations de l'activité hydrologique de la Loire depuis le XIV<sup>e</sup> s.

L'objectif de ce chapitre est de renseigner avec précision les variations de l'activité hydrologique de la Loire depuis le XIV<sup>e</sup> s. à partir de l'étude des archives documentaires. Cette étude repose sur deux sous-objectifs. Il s'agit dans un premier temps de réaliser un recensement des crues de la Loire le plus exhaustif possible. Le recensement des crues ligériennes le plus précis jusqu'à aujourd'hui est celui de **Champion (1858)** qui n'a jamais été renouvelé et qui ne va pas au-delà du milieu du XIX<sup>e</sup> s. et demeure succinct pour la première moitié du PAG. De plus, une grande partie des évènements relevés l'ont été en Loire moyenne et aval. Ainsi, l'objectif de ce recensement est d'étudier la variation de l'activité hydrologique de la Loire que ce soit en termes d'intensité ou de saisonnalité au cours des huit derniers siècles. Il permettra aussi de détecter des périodes de forte et de faible activité hydrologique à l'aide du calcul d'indice de crue. Ce recensement doit également nous permettre de renseigner des périodes qui le sont encore très peu en France, notamment du Moyen Âge au début de la période Moderne. Le recensement des crues a été réalisé à l'aide d'archives documentaires entre la fin du XIV<sup>e</sup> s. et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. Les archives documentaires plus récentes n'ont pas été consultées, car nous bénéficions de relevés hydrographiques précis à partir de 1846 sur le site de Nevers. Les résultats du recensement et de la détection de périodes hydrologiques seront donc présentés en deux temps en raison des différences de matériel documentaire. Il s'agira par la suite de questionner la comparaison des résultats issus des deux corpus documentaires distincts pour la **période 1** (1380 – 1845) et la **période 2** (1846 – 2023). Les résultats de cette étude seront comparés à la fois à l'activité hydrologique des autres cours d'eau présents dans le bassin de la Loire, puis au cours d'eau français, européen et enfin aux fluctuations climatiques. Ces comparaisons permettront d'une part de valider, ou non, les périodes d'activité hydrologique détectées sur la Loire, et d'autre part de tenter d'en comprendre les influences.

Les résultats du recensement de crues, de la détection des périodes hydrologiques au cours de la **période 1** ont été publiés dans un article paru dans *Journal of Hydrology* : **Mesmin E., Gautier E., Arnaud-Fassetta G., Foucher M., Martins G., Gob F., 2024.** Characterization of periods of high and low hydrological activity in the Loire River, France, between the 14th and mid-19th centuries. *Journal of Hydrology*, 633, 130932.

# 1. Recensement des crues de la Loire

## 1.1. Recensement des crues entre 1380 et 1846

L'étude des archives documentaires a permis de recenser 313 événements de crue de la Loire avec un total de 487 mentions documentaires entre 1380 et 1845, soit une crue tous les 1,5 ans (**Tableau 5.1, Figure 5.1**). Parmi ces événements, 152 ont été relevés sur la zone d'étude seule, 68 à la fois sur la zone d'étude et en dehors (type « Loire générale » ; **Figure 5.1**), 37 en Loire amont, 38 en Loire moyenne et 18 sans localisation précise (**Figure 5.1**). Le nombre de crues recensées est toutefois hétérogène à travers les siècles (**Figure 5.1**). Parmi les 119 événements inédits recensés sur la Loire sans aucune mention bibliographique, 88 l'ont été entre le XIV<sup>e</sup> et le XVI<sup>e</sup> s. (cf. **Annexe 1**) grâce aux comptes communaux de Nevers et Decize. Durant les XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s., le nombre de crues faibles (C2) recensé est beaucoup plus faible que pour les siècles précédents, s'expliquant par la baisse du nombre de documents disponibles et de la perte de précision pour ceux ayant été consultés (cf. **chapitre 4**). À l'inverse à partir du XVIII<sup>e</sup> s., le nombre de crues recensées augmente significativement grâce à la diversité et la richesse des documents disponibles sur le bassin de la Loire.

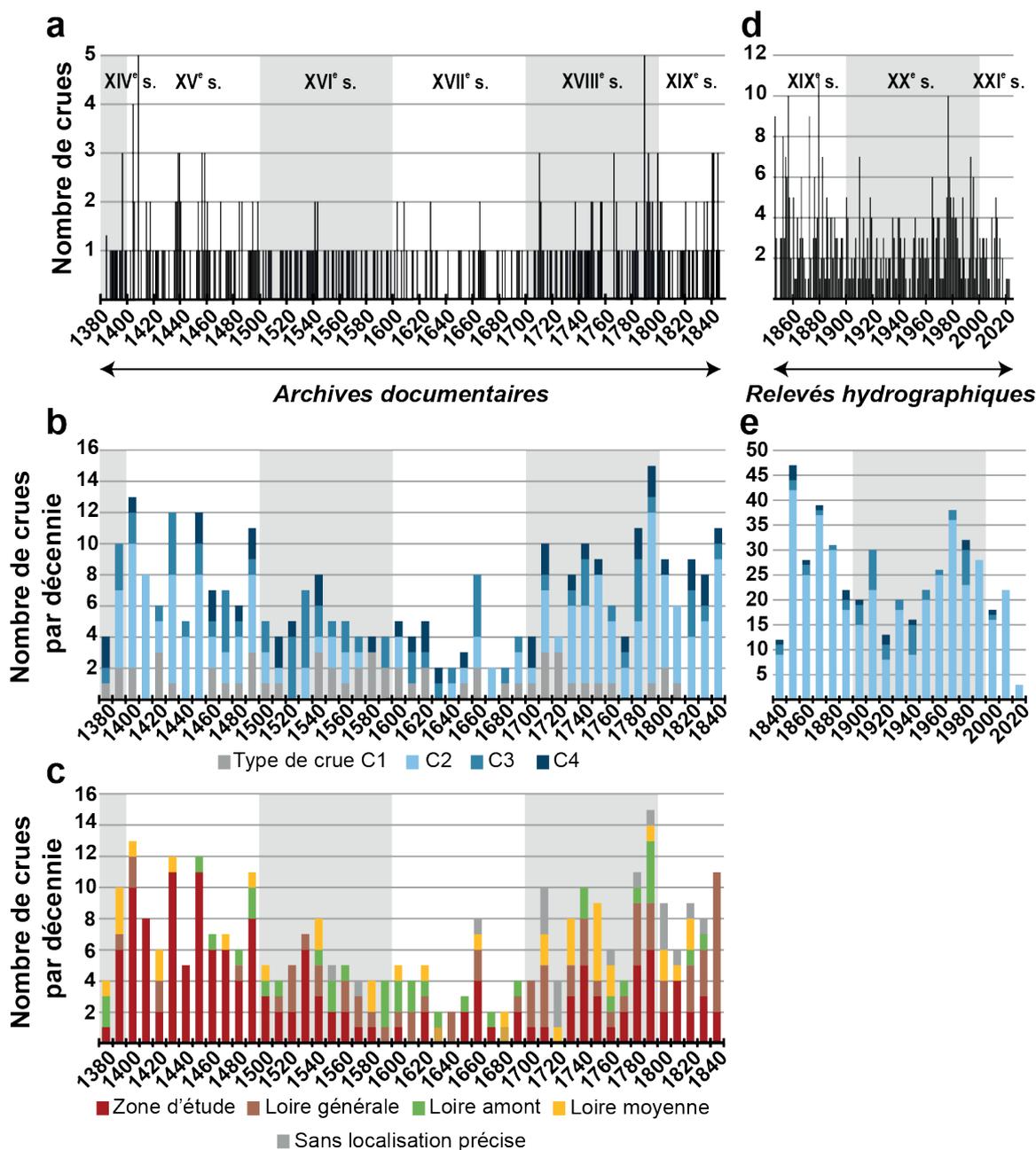
**Tableau 5.1.** Nombre d'événements de crue recensés entre 1380 et 1845. \* = crues recensées dans les catégories "zone d'étude" et "général".

	Type de crue C4	C3	C2	C1	Total
<b>Zone d'étude*</b>	36	51	122	11	220
<b>Hors zone d'étude</b>	2	14	33	44	93
<b>Total</b>	38	65	155	55	313

Une hétérogénéité est également observable dans la distribution de l'intensité des événements de crue. L'étude documentaire permet de relever les crues faibles (C2) et les crues importantes (C3) qui représentent 70 % des événements enregistrés, notamment durant les siècles les mieux documentés : XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup>, XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. (**Figure 5.1, Figure 5.2**). La majorité (85 %) des crues exceptionnelles de la Loire avait déjà été recensée par les sources secondaires ou les travaux précédents à partir du XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s. : c'est le cas des événements de 1494, 1519, 1527, 1548 (**Dion, 1961**), 1744, 1755, 1789 (**Champion, 1858**) et 1522 (**Champion, 1858 ; Charrier et al., 1984**). Néanmoins, plusieurs événements exceptionnels du XIV<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> s. ne l'avaient pas encore été, ou catégorisé comme tel, en particulier les crues de 1408, 1458, 1465 et 1516.

En croisant les archives historiques et les sources bibliographiques, nous pouvons considérer que la quasi-totalité des crues exceptionnelles (C4) a été enregistrée, le nombre de références étant toujours bien plus élevé que pour les crues de moindre intensité (**Tableau 5.2**). Par ailleurs, ce nombre de références par événement de crue croît selon deux facteurs : plus le siècle est proche de la période

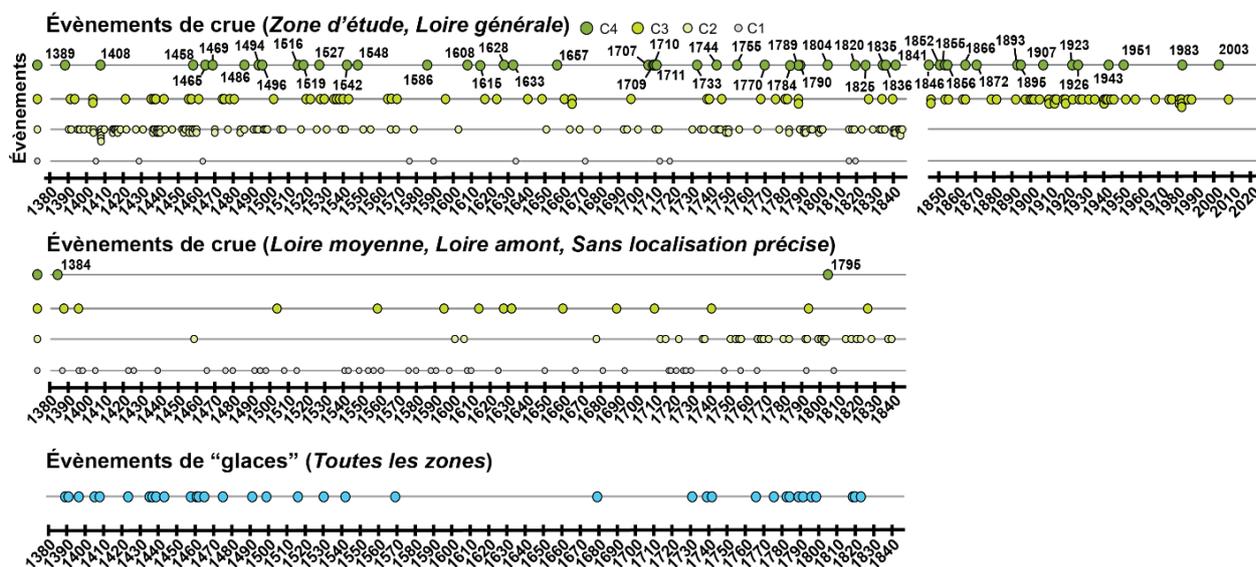
actuelle, plus les évènements bénéficient de plusieurs mentions, et plus l'évènement est intense plus celui-ci bénéficie de multiples mentions documentaires (**Tableau 5.2**). Tous les évènements bénéficient en moyenne de deux mentions documentaires différentes. Chaque mention compte pour une cote archivistique ou journal ou mention bibliographique. Dans le cas des comptes communaux de Nevers et Decize, certains évènements ont été mentionnés plusieurs fois par compte pour divers paiements ou affaires, mais les différentes mentions ont été comptabilisé comme une seule dans le **Tableau 5.2**, car correspondant à une seule cote.



**Figure 5.1.** Recensement des crues de la Loire. **a** : nombre de crues recensées entre 1380 et 1845. **b** : nombre de crues recensées par type de crue (1380 – 1845). **c** : nombre de crues recensées par localisation (1380 – 1845). **d** : nombre de crues recensées entre 1846 et 2023. **e** : nombre de crues recensées par type de crue (1846 – 2023).

**Tableau 5.2.** Nombre de références documentaires par type d'évènement de crue et par siècle entre 1380 et 1845.

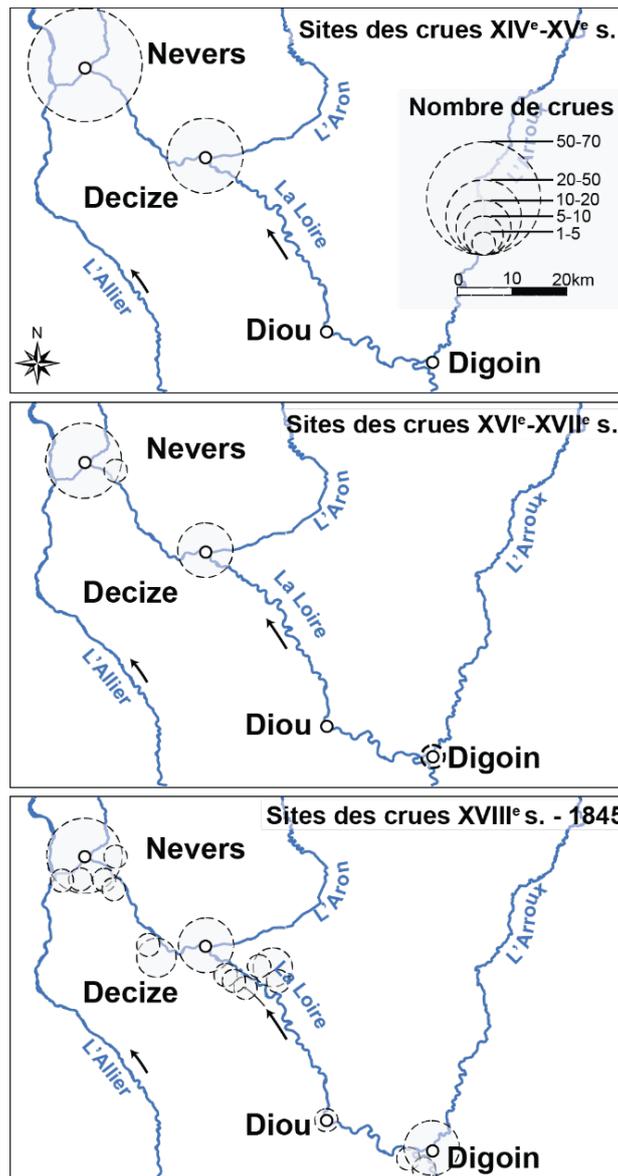
	Cruce C1	C2	C3	C4	Total
XIV <sup>e</sup> s.	1	1,2	1,8	1	1,3
XV <sup>e</sup> s.	1,2	1,1	1,5	2,8	1,3
XVI <sup>e</sup> s.	1,2	1,3	2,4	4,8	2,1
XVII <sup>e</sup> s.	1,1	1,7	1,6	6,5	2,3
XVIII <sup>e</sup> s.	1	1,8	1,8	7,6	2,5
XIX <sup>e</sup> s.	1	1,4	3,6	8,0	2,7
<b>Total</b>	1,1	1,4	2,0	5,8	2



**Figure 5.2.** Évènements de crue et de "glace" entre 1380 et 2023. Les évènements C2 n'ont pas été représentés entre 1846 et 2023 en raison de leur nombre trop important.

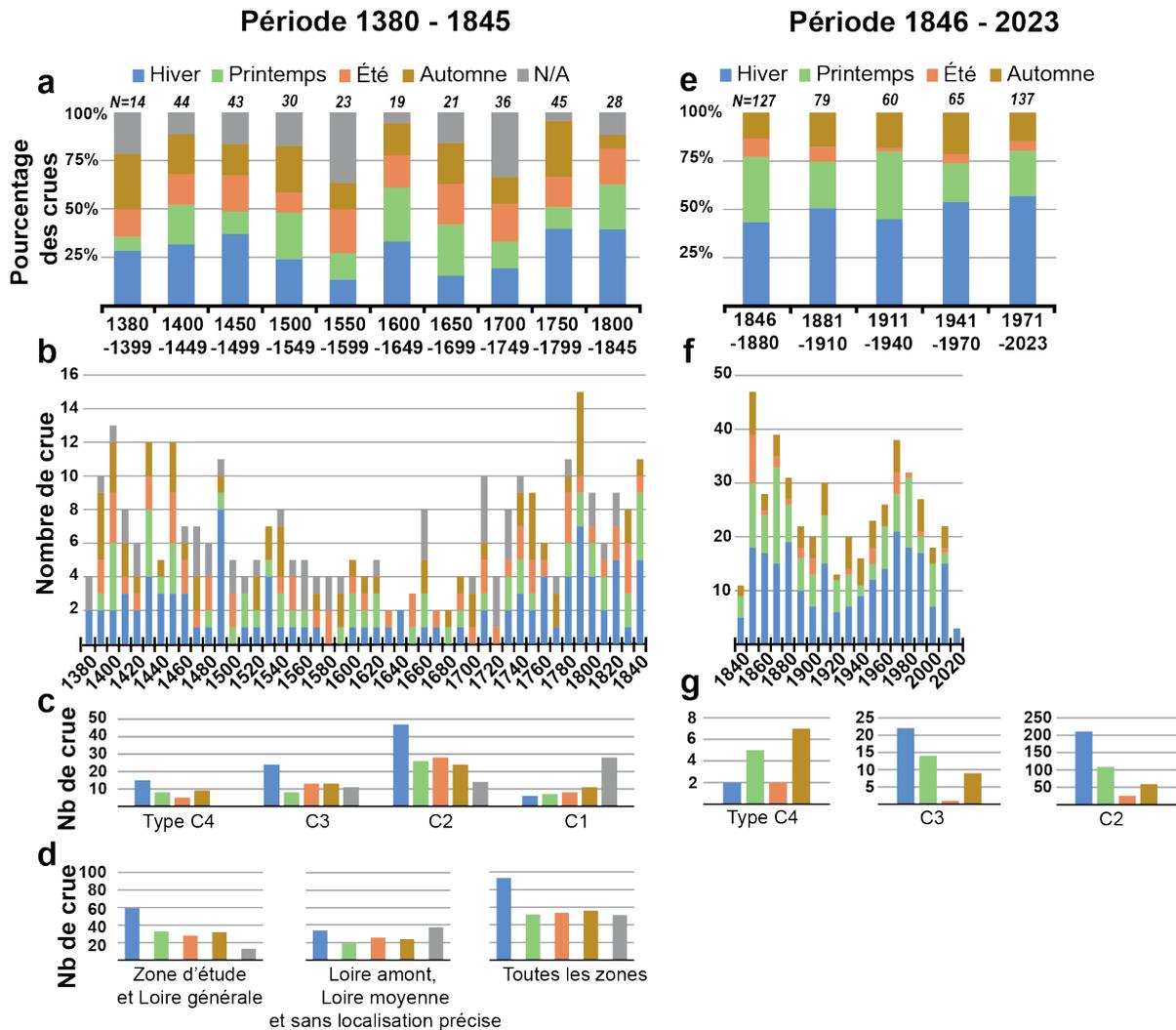
Ainsi, la plus grande partie des crues inédites recensées sont des évènements de faible ou de forte intensité (C2 et C3). L'hétérogénéité dans le nombre de crues recensées et dans leur intensité à travers les siècles s'explique d'abord par la variabilité de la disponibilité documentaire exposée dans le **troisième chapitre**.

La répartition des évènements est polarisée sur Nevers et Decize du XIV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 5.3**). Avant le XVIII<sup>e</sup> s. et la diversification des sources documentaires, les mentions de crue sont majoritairement relevées dans les comptes communaux de Nevers et Decize, expliquant cette répartition spatiale. À partir du XVIII<sup>e</sup> s., la diversification des sources documentaires permet de relever des évènements de crues en contexte urbain comme rural.



**Figure 5.3.** Localisation des mentions d'évènement de crue entre 1380 et 1845.

La saison d'occurrence principale des évènements de crue est l'hiver entre le XIV<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> s. La seconde saison d'occurrence est le printemps ou l'automne (**Figure 5.4**), ce qui concorde avec le schéma saisonnier actuel de la Loire (cf. **chapitre 2**). La proportion de crues hivernales varie de 20 % à 40 %, et les périodes pour lesquelles elles sont le plus nombreuses sont celles de 1450 – 1499, 1750 – 1799 et 1800 – 1845 (**Figure 5.4**). Ces périodes correspondent aussi à la formation fréquente de glaces sur la Loire, en particulier à la fin du XIV<sup>e</sup> s., au XV<sup>e</sup> s., de 1730 à 1740, à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. et de 1815 à 1820 (**Figure 5.2**). Par rapport au schéma saisonnier actuel, les évènements d'été et d'automne représentent 10 à 30 % de tous les évènements durant la période du PAG, valeurs bien plus importantes que pour la période actuelle (1 à 13 % entre 1996 et 2023). Il faut néanmoins noter que le nombre d'évènements sans information sur la saisonnalité d'occurrence reste assez conséquent (**Figure 5.4**).



**Figure 5.4.** Saisonnalité des crues de la Loire. **a** : Saisonnalité des crues par périodes de 50 ans (1380 – 1845). **b** : Saisonnalité des crues par décennie (1380-1845). **c** : Saisonnalité des crues par type de crue (1380 – 1845). **d** : Saisonnalité des crues par secteur ligérien (1380 – 1845). **e** : Saisonnalité des crues par périodes de 30 ans (1846-2023). **f** : Saisonnalité des crues par décennie (1846 – 2023). **g** : Saisonnalité des crues par type de crue (1846 – 2023).

## 1.2. Recensement des crues entre 1846 et 2023

Entre 1846 et 2023, 468 évènements de crue ont été recensés sur la Loire à la station hydrologique de Nevers, soit 2,6 crues par an (**Figure 5.1**, **Figure 5.2**, **Tableau 5.3**). 15 évènements exceptionnels (C4) sont recensés sur cette période, ce qui fait environ une crue exceptionnelle tous les 11,8 ans, similaire aux résultats pour la période 1380 – 1846 où une crue C4 a été relevée tous les 12,2 ans. Cette similitude confirme l’hypothèse qu’il soit très probable que la très grande partie des crues C4 de la période 1380 – 1845 aient été recensées. 46 crues importantes (C3) ont été recensées entre 1846 et 2023. Rapporté au nombre d’années séparant 1846 et 2023, le nombre de crue C3 recensé est plus important proportionnellement que pour la période précédente. Mais c’est véritablement la différence du recensement des crues C2 entre les deux périodes qui reste la plus importante : 407 crues faibles (C2)

sont recensées entre 1846 et 2023 contre 55 entre 1380 et 1845. De plus, même pour la période 1846 – 2023 ce nombre reste encore sous-estimé.

**Tableau 5.3.** Nombre d'évènements de crue recensés entre 1846 et 2023.

	Type de crue C4	C3	C2	Total
<b>Station de Nevers</b>	15	46	407	468

En effet, si la variation du nombre de crues témoigne de la variabilité de l'activité hydrologique comme nous le verrons par la suite, il s'explique aussi en partie par un effet documentaire. Entre 1900 et 1954, les informations sont tirées du rapport du **Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.)** et nous n'avons pas retrouvé les relevés hydrographiques originaux de cette période. Or, il est probable que le rapport n'ait pas mentionné les plus faibles évènements en raison de leur méthodologie utilisée (cf. **chapitre 4**). En conséquence, le nombre de crues C2 recensé entre 1900 et 1954 (**Figure 5.1**) apparaît plus faible que pour les périodes précédentes et suivantes. Or, le nombre d'évènements C3 et C4 reste significatif.

L'étude de la saisonnalité des crues fait ressortir une contraction de celle-ci autour de la période hivernale au cours des deux derniers siècles (**Figure 5.4**). C'est à partir du milieu du XX<sup>e</sup> s. que le nombre de crues d'hiver dépasse 50 % du nombre total. Si la proportion de crues automnales reste assez similaire au cours des deux derniers siècles, oscillant entre 12 et 20 %, celle des crues de printemps, passant de 43 % à 32 % avec un minimum à 11 %, et d'été, passant de 12 % à moins de 7 %, sont à la baisse (**Figure 5.4**). La proportion des crues de printemps est la plus importante pour les périodes de 1846 – 1880 et 1911 – 1940, tandis que celles d'été le sont pour les deux périodes les plus anciennes : 1846 – 1880 et 1881 – 1910. Finalement, la période actuelle de 1971 – 2023 constitue la période pour laquelle on observe la proportion la plus importante d'évènements hivernaux, mais elle ne constitue pas non plus la période pour laquelle les évènements de printemps, d'été ou d'automne sont les plus faibles en proportion. C'est pour la période de 1846 – 1880 que le pourcentage de crues de printemps est le plus faible et pour la période de 1911 – 1940 que le pourcentage de crues d'été est le plus faible. Concernant la saisonnalité des crues par type de crue on observe deux grandes différences entre la période 1 (1380 – 1845) et la période 2 (1846 – 2023). Premièrement, les crues C3 et C2 d'été sont en nombre bien plus faible entre 1846 et 2023 qu'entre 1380 et 1845. Deuxièmement, entre 1380 et 1845, les crues C4 étaient majoritairement hivernales, ce qui n'est plus du tout le cas entre 1846 et 2023, alors qu'elles constituent plus de 50 % du total des crues recensées (**Figure 5.4**).

Ainsi, l'exploitation des archives documentaires conservées depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s. a permis d'effectuer un recensement inédit des crues de la Loire. Malgré l'hétérogénéité du recensement parmi

les siècles étudiés expliqué par la disponibilité documentaire, l'utilisation et le calcul d'indices nous autorise à identifier plusieurs périodes de forte comme de faible activité hydrologique.

## 2. Détection de périodes de forte et de faible activité hydrologique

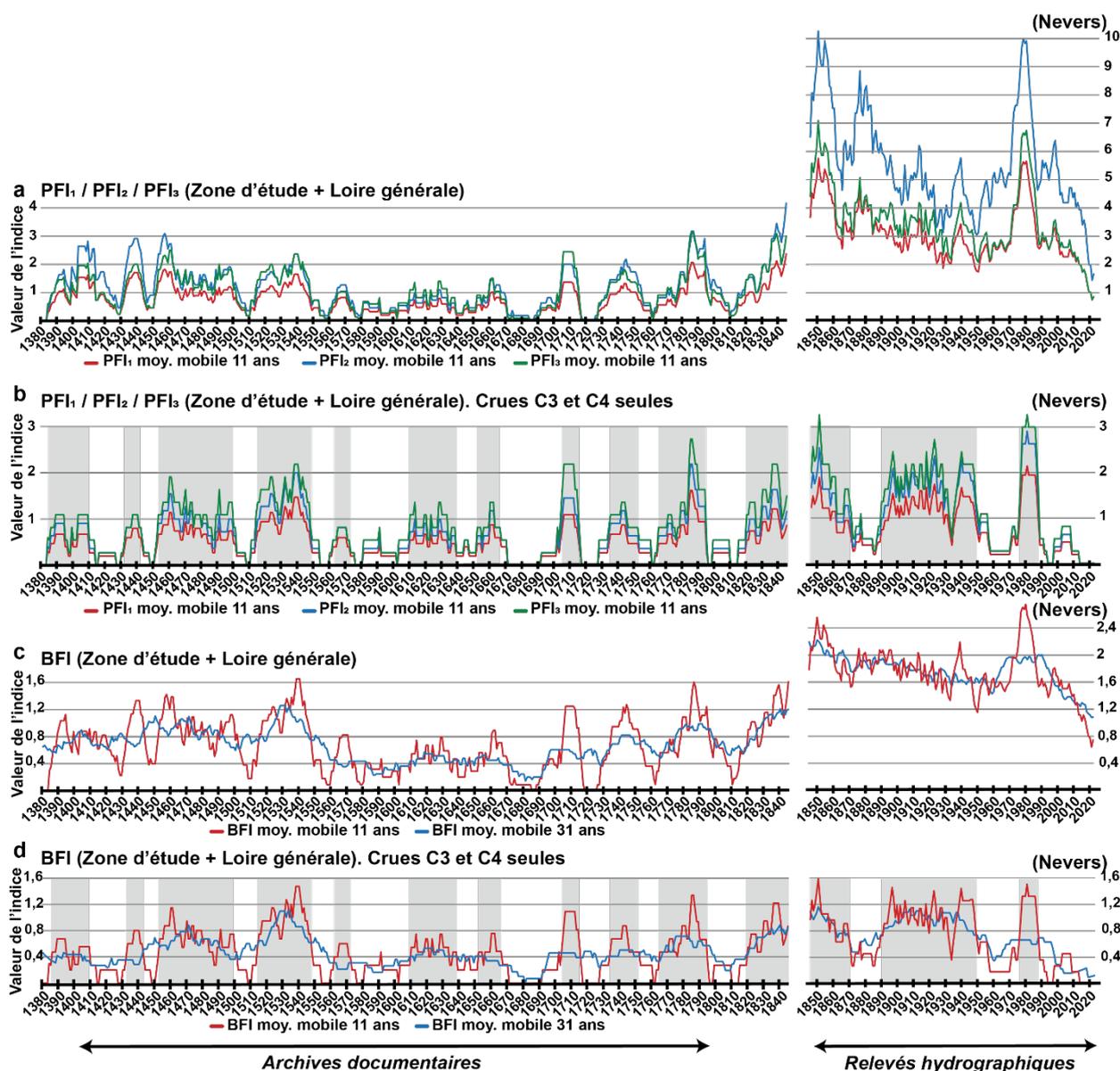
### 2.1. Périodes hydrologiques entre 1380 et 1846

La **Figure 5.5** présente les résultats des calculs des quatre indices de crue repris de **Pichard et al. (2017)** (PFI) et de **Blöschl et al. (2020)** (BFI).

Les indices ont été calculés dans un premier temps en incluant les événements de crue C1 et C2 (**Figure 5.5a** et **c**), puis dans un second temps sans les crues C1 et C2 (**Figure 5.5b** et **d**). Le calcul de la moyenne mobile sur 11 ans et 31 ans nous permet de relever des périodes de forte et de faible activité hydrologique. On observe tout d'abord de grandes différences entre les moyennes mobiles des indices incluant tous les événements de crues (**Figure 5.5a** et **c**) et ceux incluant seulement les événements C3 et C4 (**Figure 5.5b** et **d**). Ces différences sont particulièrement marquées pour les périodes 1385 – 1420, 1430 – 1465, 1730 – 1755, 1780 – 1800 et au-delà de 1820. Ces périodes correspondent aux siècles pour lesquels la disponibilité documentaire est la plus importante. Afin de supprimer cet effet documentaire, surestimant l'importance des périodes hydrologiques pour lesquelles nous disposons d'un plus grand nombre de documents, la détermination des périodes de haute et de basse activité hydrologique a été effectuée uniquement avec les événements C3 et C4. Sous cet angle, les périodes de forte activité hydrologique détectée sur les différents indices sont similaires (**Figure 5.5b** et **d**). Huit périodes de forte activité hydrologique ont été déterminées : 1385 – 1410, 1430 – 1440, 1455 – 1500, 1515 – 1550, 1705 – 1715, 1735 – 1750, 1770 – 1800 et 1820 – 1845. Il est plus difficile de définir des périodes de faible ou de forte activité hydrologique au cours des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s., bien que plusieurs périodes de pics d'activités soient visibles (1560 – 1570, 1610 – 1640 et 1655 – 1665). Les périodes d'activité les plus intenses de la période 1380 – 1845 d'étude semblent être celles de 1515 – 1550 et 1770 – 1800.

Les indices de crue permettent de détecter également des périodes de faible activité hydrologique (**Figure 5.5b** et **d**) : 1420 – 1430, 1500 – 1515, 1715 – 1735, 1750 – 1770 et 1800 – 1820. Pour le reste de la période d'étude, notamment les XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s., il est difficile de déterminer si la rareté des événements de crue est liée à une faible activité hydrologique et/ou à un manque de documentation, bien que la période 1670 – 1705 semble particulièrement calme.

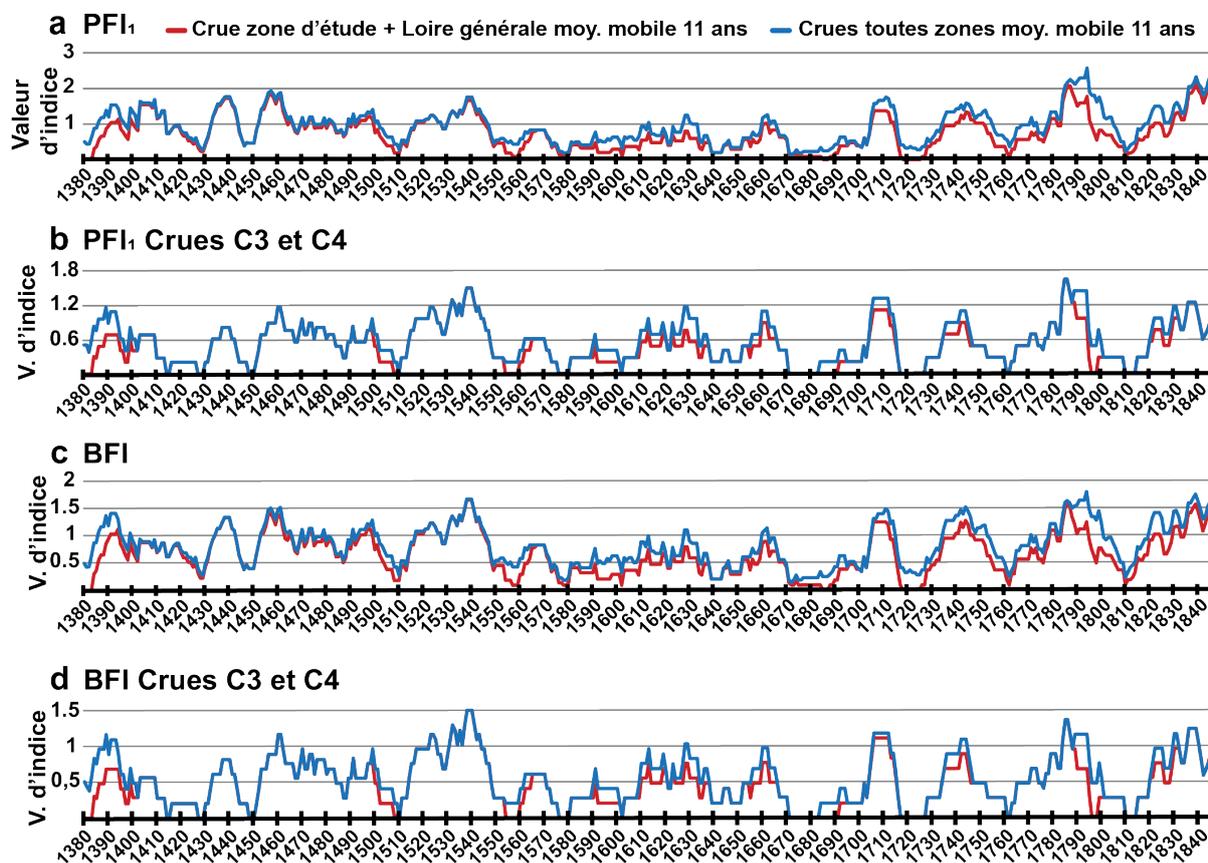
Les différences entre les deux indices restent assez minimales tant pour les périodes de forte activité hydrologique comme pour celles de faible activité hydrologique. Ainsi, nous pouvons conclure que dans le cadre de la détermination des périodes hydrologiques par l'utilisation d'indices de crues, c'est la catégorisation de l'intensité de chaque événement qui joue le rôle le plus déterminant.



**Figure 5.5.** Calcul des différents indices pour l'étude de la variabilité hydrologique de la Loire entre 1380 et 2023. Entre 1380 et 1845, seules les archives documentaires sont utilisées. Entre 1846 et 2023, seuls les relevés hydrographiques sont utilisés. Pour le calcul des PFI et BFI et de leurs variations (**a**, **b**, **c**, **d**), seules les moyennes mobiles sont présentées. Les aires grises dans **b** et **d** désignent les périodes de haute intensité hydrologique.

La **Figure 5.6** présente les moyennes mobiles sur 11 ans des indices PFI et BFI calculés avec les évènements de crue détectés sur la zone d'étude (catégories « zone d'étude » et « Loire générale ») et calculés avec les évènements détectés sur toutes les autres zones ligériennes. Une bonne corrélation visuelle peut être établie entre les deux moyennes. Les résultats des indices incluant uniquement les évènements C3 et C4 présentent assez peu de différences (**Figure 5.6b** et **d**). La grande majorité de ces évènements de crue, à l'exception de deux crues C4 (5 % du total) et de 14 crues C3 (21 % du total) (**Figure 5.2**), ont été enregistrés dans la zone d'étude, ce qui explique les similarités dans les résultats de la **Figure 5.6**. Cependant, des différences plus significatives sont observables pour le calcul des

indices PFI et BFI incluant toutes les catégories d'évènements (**Figure 5.6a et c**). Certaines périodes de forte activité hydrologique semblent plus intenses ou plus longues si l'on considère les données pour l'ensemble de la Loire. C'est le cas des périodes 1380 – 1410, 1730 – 1755 et 1765 – 1800. Malgré ces légères différences, les évènements enregistrés hors de la zone d'étude confirment les périodes de forte activité hydrologique observées précédemment.



**Figure 5.6.** Calcul des indices suivant les différentes zones ligériennes entre 1380 et 1845.

## 2.2. Périodes hydrologiques entre 1846 et 2023

La **Figure 5.5** présente également les résultats des calculs des indices pour la période 1846 – 2023. Le nombre de crues C2 bien plus important que pour la période 1380 – 1846 rend l'analyse des résultats d'indices calculés à partir de tous les évènements (C2, C3 et C4) assez difficile. On observe de grandes différences entre les indices calculés avec tous les évènements et ceux calculés avec les crues C3 et C4 seules. Ainsi, tout comme pour la période précédente, les périodes hydrologiques ont été déterminées seulement avec le calcul d'indices réalisés avec les évènements (C3 et C4) seuls. Par ailleurs, le problème bibliographique de la première moitié du XX<sup>e</sup> s. mentionné précédemment ne semble pas impacter la détermination des périodes puisque les évènements sous-représentés par les documents entre 1900 et 1954 sont les plus faibles (C2). Enfin, tout comme pour la période précédente, peu de différence est observable entre les résultats d'indice de **Pichard et al. (2017)** et de **Blöschl et al. (2020)**.

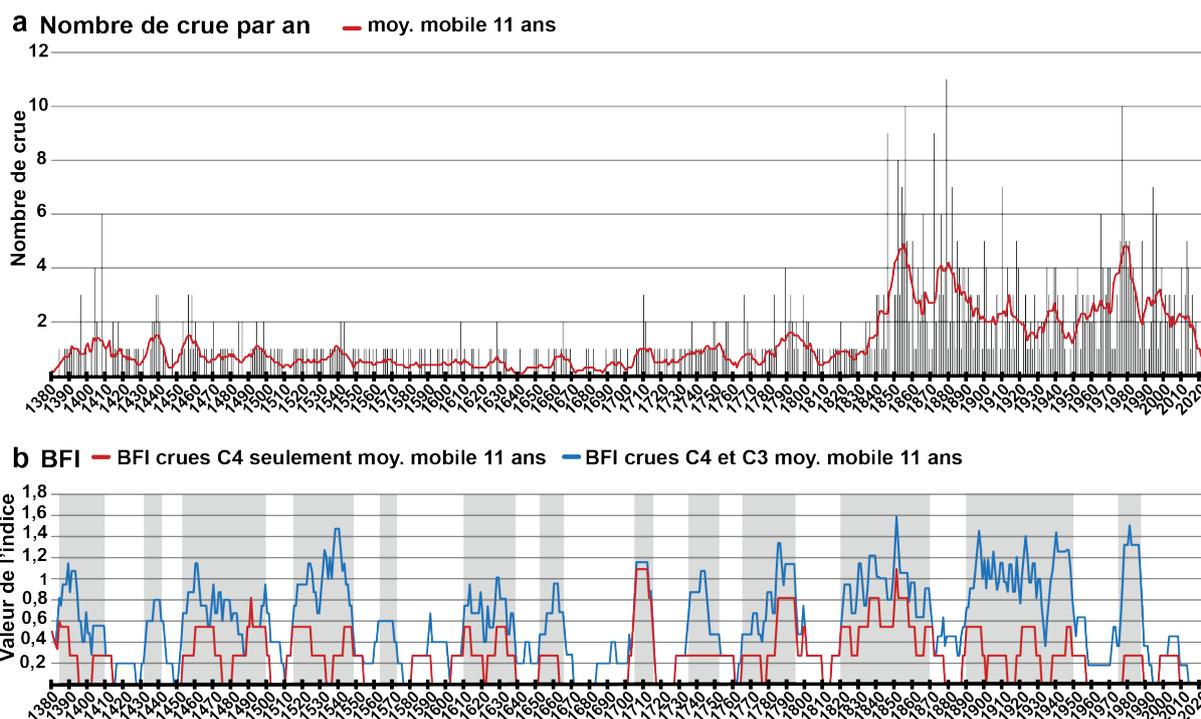
Trois périodes de forte activité hydrologique sont détectées à la station de Nevers à l'aide des relevés hydrologiques entre 1846 et 2023 (**Figure 5.5**) : la période de 1846 – 1870 pouvant être démarrée en 1820 avec les sources documentaires historiques, la période de 1890 – 1950 et celle de 1978 – 1988. Bien que cette dernière période soit courte, elle n'en reste pas moins intense avec une crue C4 et 8 crues C3 en 10 ans (**Figure 5.2**). Il est assez difficile de déterminer quelle période présente l'intensité la plus forte. Au regard des événements eux-mêmes, la période 1820 – 1870 est celle qui concentre le plus d'événements exceptionnels (C4), mais celle de 1890 – 1950 concentre le plus d'événements importants (C3) (**Figure 5.2**). En résultent des intensités calculées par les indices de crues assez similaires (**Figure 5.5**). De plus, le nombre d'événements C3 est bien plus élevé pour la période 1380 – 1845 que pour la période 1846 – 2023 en raison de la documentation, rendant la comparaison entre les deux périodes compliquées.

Trois périodes de faible activité hydrologique sont également détectées : 1870 – 1890, 1950 – 1978 et la période actuelle de 1988 – 2023. Cette dernière période est par ailleurs la plus étendue des 600 dernières années si on met de côté la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> s. et le XVII<sup>e</sup> s. dont le manque documentaire ne nous permet pas d'être certain de l'étendue des périodes de forte activité hydrologique et donc de faible activité.

### **2.3. Les difficultés de comparaison entre les deux séries temporelles**

Plusieurs points rendent la comparaison des résultats entre la période 1380 – 1845 et la période 1846 – 2023 difficile. Premièrement, en raison de la différence de nature de la documentation, le nombre de crues recensées sur la période 1846 – 2023 est bien plus important que pour la période précédente (**Figure 5.7**). Si nous considérons que grâce à l'utilisation de relevés hydrologique précis tous les événements ont été recensés pour la période 1846 – 2023, du plus faible événement au plus intense, nous ne pouvons considérer la même chose pour la période 1380 – 1845. Le nombre d'événements ne peut être que sous-estimé avec l'utilisation des archives documentaires.

Dans un second temps, l'intensité des crues n'a pas été qualifiée de la même manière suivant les deux périodes. La qualification de l'intensité des crues repose sur l'étude de leurs dégâts (ou leur hauteur dans de rares cas) pour la période 1380 – 1845 et sur leur hauteur et leur débit pour la période 1846 – 2023. Or, les événements exceptionnels de 1852, 1893 ou 1943 n'ont provoqué que des dégâts limités et n'auraient peut-être pas été considérés comme des crues C4 avec la méthode de la période 1380 – 1845. La qualification de l'intensité à partir des dégâts ou de l'absence de dégât implique donc une surestimation ou une sous-estimation de l'intensité des événements.



**Figure 5.7.** Nombre de crue par an et calcul du BFI entre 1380 et 2023. **a** : nombre de crues par an. **b** : calcul du BFI. Les aires grises désignent les périodes de haute intensité hydrologique.

Ainsi, il est difficile d'identifier parmi ces différentes périodes d'activité hydrologique les périodes les plus intenses. Comme dit précédemment, c'est entre 1515 – 1550 que l'activité de la Loire semble la plus intense durant la période 1380 – 1845 au regard des événements C3 et C4. Au cours de la période suivante 1846 – 2023, la période 1820 – 1870 est celle qui rassemble le plus d'événements exceptionnels (C4), mais celle de 1890 – 1950 concentre le plus d'événements importants (C3). Ainsi, si l'on prend en compte seulement les événements C4, ce sont les périodes de 1450 – 1500, 1705 – 1715, 1765 – 1795 et 1820 – 1870 qui apparaissent comme les plus intenses des 600 dernières années avec celles de 1705 – 1715, courte et très intense, et celle de 1820 – 1870, plus longue, mais moins intense, en premières positions.

Ainsi, l'utilisation des indices de crue des études précédentes a permis d'identifier plusieurs périodes de forte comme de faible activité hydrologique. Si l'utilisation de ces différents indices ou de différentes valeurs associées aux calculs ne semble pas avoir de poids significatif sur la détermination des périodes, celui des documents, et notamment de leur absence, est bien plus important. Afin d'être certain de la significativité des périodes détectées, il s'agit à présent de les comparer à celles des autres études.

### 3. Comparaison de l'activité de la Loire avec les autres bassins versants

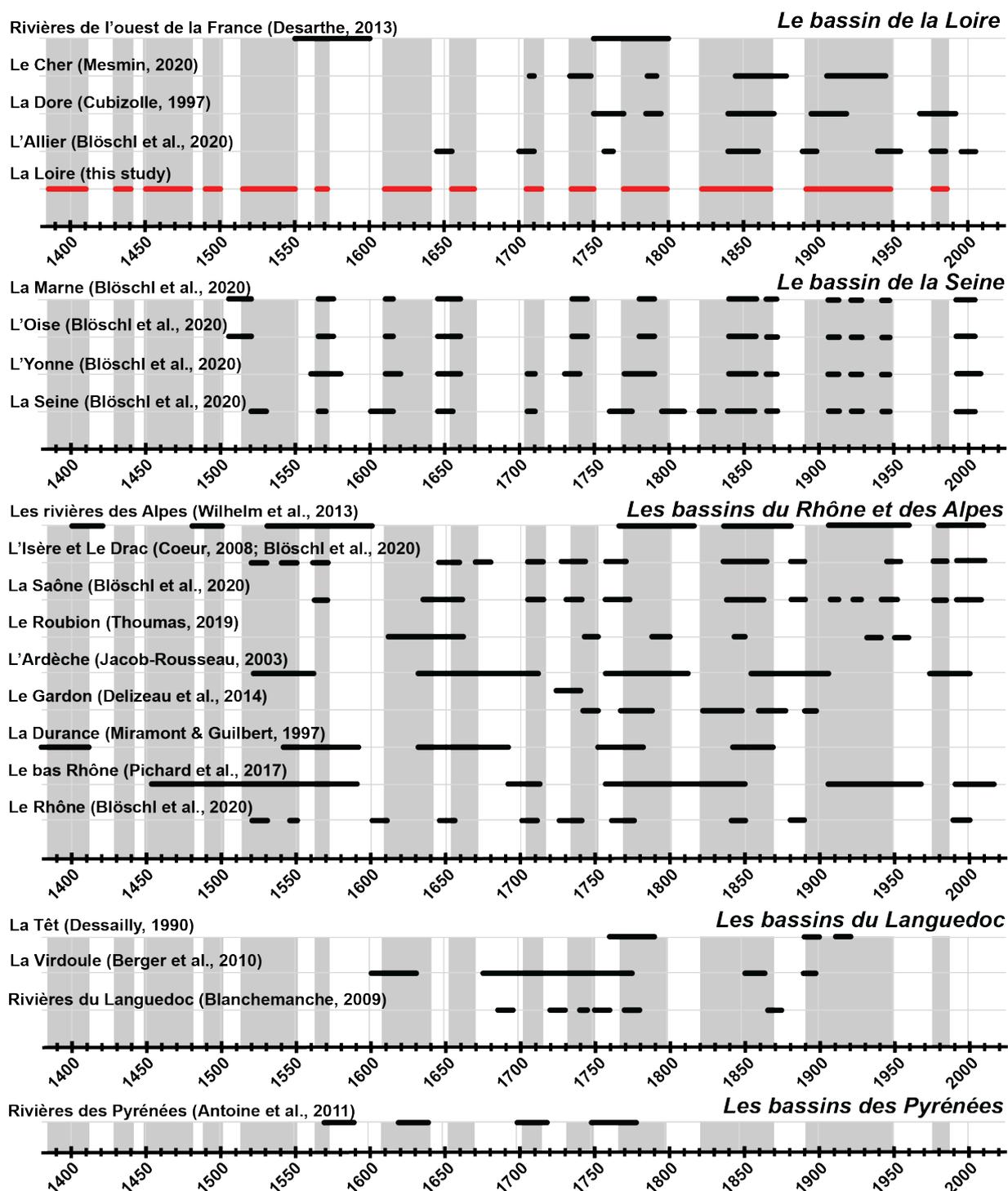
#### 3.1. Paléohydrologie du bassin versant de la Loire depuis l'époque médiévale

L'objectif est ici de comparer les périodes d'activité hydrologiques détectées sur la Loire avec l'activité de ses affluents. Bien que les études soient peu nombreuses, des comparaisons peuvent être réalisées avec l'Allier (**Blöschl et al., 2020**) et son affluent la Dore (**Cubizolle, 1997**), ainsi qu'avec le Cher (**Mesmin, 2020**). L'activité hydrologique des rivières de l'ouest de la France a également été renseignée par l'étude de **Desarthe (2013) (Figure 5.8)**. La plupart des périodes de forte activité hydrologique détectées dans la littérature ligérienne sont cohérentes avec celles enregistrées sur la Loire. La première période qui s'est produite au cours du XVIII<sup>e</sup> s. (1700 – 1715) est observable sur les rivières de l'Allier, du Cher et de la Loire. Elle est suivie d'une période de calme hydrologique entre 1715 et 1730. De 1730 à 1800, le bassin versant de la Loire connaît une période de forte activité hydrologique, mais celle-ci a affecté de manière inégale les différents sous-bassins versants. La période de forte activité hydrologique de 1730 à 1750 observée sur la Loire ne se retrouve que sur le Cher.

En revanche, la période de calme hydrologique qui suit sur la Loire entre 1750 et 1770 correspond à une phase hydrologique active sur l'Allier et la Dore, ainsi que dans l'ouest de la France. Une grande partie du bassin versant (Loire, Dore et Cher) et de l'ouest de la France ont été soumis à des inondations fréquentes à la fin du XVIII<sup>e</sup> s., sauf dans le bassin versant de l'Allier, bien que la plus forte crue enregistrée ait eu lieu en 1790 (**Onde, 1923**). Suite à la période 1800 – 1820, qui semble hydrologiquement calme sur l'ensemble du bassin versant, la période suivante de forte activité hydrologique commence sur la Loire à partir de 1820 et à partir de 1840 sur le Cher, la Dore et l'Allier. Cette période du milieu du XIX<sup>e</sup> s. tarde un peu plus sur le Cher. Entre le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle et le début du XX<sup>e</sup> s., le bassin de la Loire dans son entièreté observe une période de calme hydrologique, puis de nouveau une période de forte activité hydrologique entre le début du XX<sup>e</sup> s. et le milieu du XX<sup>e</sup> s. sur l'ensemble du bassin versant. Enfin, la période de calme de 1955 – 1970 semble générale au bassin, puis une courte période d'activité hydrologique intense entre 1975 et 1985 sur la Dore, l'Allier et la Loire, mais qui n'a pas été détectée sur le Cher et qui correspond plutôt à une période calme avec quelques événements d'importance (**Mesmin, 2020**). Si l'activité hydrologique de la Loire et d'une large partie de son bassin est calme depuis la fin des années 1980, l'Allier observe une dernière période de forte activité entre 1995 et 2010.

Ainsi, la plupart des périodes de forte comme de faible activité hydrologique identifiées sur les affluents de la Loire correspondent à celles de la Loire. Seules les périodes de forte activité hydrologique de 1750 – 1770 et de 1995 – 2010 sont observées sur les affluents sans que ça n'ait été le cas sur la Loire. Il est assez difficile d'expliquer cette différence d'activité pour la période 1750 – 1770, qu'elle soit naturelle ou résultante d'un effet documentaire. L'aménagement de plus en plus lourd des lits de la Loire sur la zone d'étude à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s., comme nous le verrons dans les

septième et neuvième chapitres, aurait également pu jouer un rôle en masquant les évènements les moins intenses.



**Figure 5.8.** Périodes de forte activité hydrologique détectées sur la Loire, comparées à celles des autres rivières françaises. Les aires grisées et les lignes rouges représentent les périodes de forte activité hydrologiques de la Loire détectées dans cette étude. Les lignes noires correspondent à celles des études correspondantes.

### 3.2. Comparaison avec les rivières françaises et européennes

L'activité hydrologique de la Loire se distingue-t-elle de celle des autres cours d'eau ? Cette partie vise à comparer les périodes hydrologiques distinguées sur la Loire dans le cadre de cette étude aux périodes observées sur les autres cours d'eau français et européens principalement à partir du XVI<sup>e</sup> s. Les études antérieures sont en effet encore rares. Cette comparaison doit à la fois nous servir à valider ou non les périodes observées sur la Loire. Mais nous allons voir que celle-ci témoigne également de similitudes d'activités entre la Loire et des cours d'eau de zones géographiques très diverses.

On observe tout d'abord de fortes similitudes entre l'activité hydrologique des rivières du bassin de la Seine et celle du bassin de la Loire (**Figure 5.8**). La majorité des périodes d'activité hydrologique intense à partir du XVII<sup>e</sup> s. se retrouve sur les deux bassins versants. Ces similitudes s'expliquent par la proximité des deux bassins versants et de leurs influences climatiques océaniques prédominantes. Les deux bassins semblent donc répondre de la même manière aux forçages climatiques, du moins jusqu'à la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. En effet, la différence la plus importante s'observe durant la période 1990 – 2010 qui apparaît comme hydrologiquement intense sur le bassin de la Seine et très calme sur la Loire.

On observe également des similitudes avec les rivières alpines, bien que les périodes observées sur la Loire ne correspondent pas tout à fait à celles des Alpes, lesquelles commençant et se terminant plus tôt. Comme dans le cas de la Seine, les rivières des Alpes ont été très actives fin XX<sup>e</sup> – début XXI<sup>e</sup> s. (**Figure 5.8**).

Concernant les bassins versants du sud de la France, les comparaisons sont complexes à réaliser en raison de la diversité de l'étendue temporelle des études, de leurs matériaux d'étude et des approches et méthodologies mises en place. On observe tout de même quelques similitudes. On retrouve une activité hydrologique intense assez généralisée au bassin du Rhône, et à celui de la Loire, durant la première moitié du XVI<sup>e</sup> s., milieu du XVII<sup>e</sup> s., tout au long du XVIII<sup>e</sup> s., du XIX<sup>e</sup> s. et du XX<sup>e</sup> s. Encore une fois, l'activité hydrologique reste intense jusque dans les années 2010. Les activités hydrologiques du Rhône et de la Loire (dans son bassin amont) possèdent toutes les deux des influences méditerranéennes pouvant expliquer les similitudes entre les périodes repérées sur les deux bassins. Cependant, il reste difficile de dire si ces périodes de forte activité hydrologique correspondent entre la Loire et le Rhône en raison de ces influences, car certaines des périodes détectées sur ces deux bassins versants le sont aussi sur celui de la Seine, qui ne partage pas d'influence méditerranéenne. Ainsi, les périodes 1600–1670 et 1730–1800, et surtout 1770–1790, semblent avoir été très actives sur le plan hydrologique à la fois dans le bassin versant de la Loire et dans les bassins versants du sud de la France (**Figure 5.8**), mais aussi dans le bassin versant de la Seine et plus largement en Europe (**Benito et al., 2004a ; Barriendos et Rodrigo, 2006 ; Glaser et al., 2010 ; Macdonald et Sangster, 2017 ; Barriendos et al., 2019 ; Blöschl et al., 2020**). La période 1770 – 1790 n'est pas la seule période de forte intensité à avoir été détectée à la fois sur la Loire et ailleurs en Europe. Si toutes les périodes

recensées dans les différentes parties de l'Europe ne correspondent pas toutes à celles de la Loire (ce qui est logique en raison des très grandes diversités d'influences climatiques), chaque période de forte activité hydrologique enregistrée sur la Loire entre 1500 et 2023 correspond à une période de forte activité hydrologique enregistrée en Europe. La première, de 1515 à 1550, est principalement enregistrée sur les rivières françaises (**Blöschl et al., 2020**), ainsi que sur les rivières du Royaume-Uni (**Schillereff et al., 2019**). Elle apparaît cependant comme très intense sur la Loire sans que ce soit le cas sur les autres rivières européennes. Il est donc probable que cette période ait été hydrologiquement active avec une forte intensité seulement dans le centre de la France. La période de 1605 – 1640 enregistrée sur la Loire l'est aussi sur les rivières de la péninsule ibérique (**Barriendos et Rodrigo, 2006 ; Barriendos et al., 2019 ; Blöschl et al., 2020**). La période de 1655 – 1670 concerne cette fois-ci les rivières de France et de ses pays voisins de l'est (Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Suisse et Autriche). La période de 1705 – 1715 est relevée sur les rivières de la côte atlantique européenne, en France (**Pichard et al., 2017 ; Blöschl et al., 2020**), sur la côte atlantique espagnole (**Barriendos et Rodrigo, 2006**), et dans une moindre mesure au Royaume-Uni (**Schillereff et al., 2019**). La période de 1730 – 1750 est observée quant à elle sur les rivières d'Europe centrale et septentrionale (**Blöschl et al., 2020**). Celle de 1820 – 1870 s'observe sur les rivières de la partie nord de l'Europe : France, Europe du Nord-Ouest et Europe centrale (**Schillereff et al., 2019 ; Blöschl et al., 2020**), mais aussi le long de la côte atlantique espagnole (**Barriendos et Rodrigo, 2006**). La suivante de 1890 – 1950 qui apparaît comme très intense sur la Loire, semble l'être beaucoup moins sur les autres rivières européennes : elle est détectée en France avec une intensité moins importante que pour la période précédente et dans le nord de l'Europe tout en étant quasi absente de la péninsule ibérique et de l'Europe centrale (**Blöschl et al., 2020**). Enfin, la dernière courte période ligérienne de 1975 – 1985 se retrouve très majoritairement sur les rivières de la péninsule ibérique ainsi que sur quelques rivières françaises (**Blöschl et al., 2020 ; Figure 5.8**). Ainsi, les périodes hydrologiques de la Loire peuvent aussi bien correspondre à des périodes relevées en France, dans l'Ouest Européen, mais aussi en Europe centrale ou encore sur la péninsule ibérique. Ainsi, la Loire semble se trouver au carrefour de plusieurs influences climatiques au sein de l'espace européen.

Trois des périodes de calme hydrologique sur la Loire (1720 – 1730, 1800 – 1820 et 1955 – 1975) ont également été enregistrées en France (**Figure 5.8**) et dans une grande partie de l'Europe (**Blöschl et al., 2020**). Néanmoins, les données de **Blöschl et al. (2020)** permettent de rendre compte de l'exceptionnalité du faible dynamisme hydrologique de la Loire de 1990 à 2010 en comparaison des rivières françaises et européennes qui dans une très large mesure observent une période de forte intensité hydrologique. Seules les rivières du nord de l'Europe et de la Péninsule ibérique, ainsi que le Tarn et la Garonne en France, en sont exemptes. La Loire fait donc partie des très rares rivières de l'Europe du centre-ouest à ne pas connaître de période hydrologique active au cours des 40 dernières années. Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette particularité, mais il faut premièrement rappeler que les périodes ont été définies dans cette étude à partir des événements importants (C3) et exceptionnels (C4),

simplifiant l'information. **Ramond (2015)** démontre que jusqu'en 2015, les crues « ordinaires » n'observent pas de baisse d'activité particulière. On observe toutefois une légère baisse de l'activité des crues ordinaires depuis les cinq dernières années (cf. **chapitre 2**). C'est donc par la quasi-absence d'évènement intense que la Loire se démarque des autres rivières européennes au cours des 40 dernières années. Sa position d'interface climatique aurait pu avoir une influence sur une variabilité plus importante des précipitations que sur les autres bassins versants. Le rôle de la taille du bassin versant de la Loire ne peut être recevable puisque le bassin du Rhône, de la Seine, ou encore celui du Rhin observent une période de forte activité hydrologique au cours des vingt dernières années (**Blöschl et al., 2020**). La politique de soutien des débits d'étiage a pu jouer un certain rôle. **Ramond (2015)** a notamment montré que les retenues effectuées l'hiver en prévision du soutien d'étiage durant la période estivale entraînent une baisse des débits de la Loire au mois de décembre. Mais il reste au final assez difficile pour le moment d'expliquer ce calme hydrologique ligérien.

Ainsi, la comparaison des périodes de forte et de faible activité hydrologique identifiées sur la Loire avec les autres périodes détectées dans le bassin versant de la Loire, sur les rivières françaises et européennes rend compte de leur significativité. En effet, toutes les périodes détectées dans cette étude ont été relevées sur d'autres cours d'eau. À contrario, très peu de périodes de forte activité hydrologique détectées sur des rivières du bassin ligérien ou en France sont absentes de la Loire. La synchronicité des périodes de forte activité ligérienne avec celles des rivières ibériques, de l'ouest comme de l'est de l'Europe place la Loire, ou du moins la zone d'étude, au carrefour de plusieurs influences climatiques, qu'il est maintenant nécessaire de tenter de clarifier.

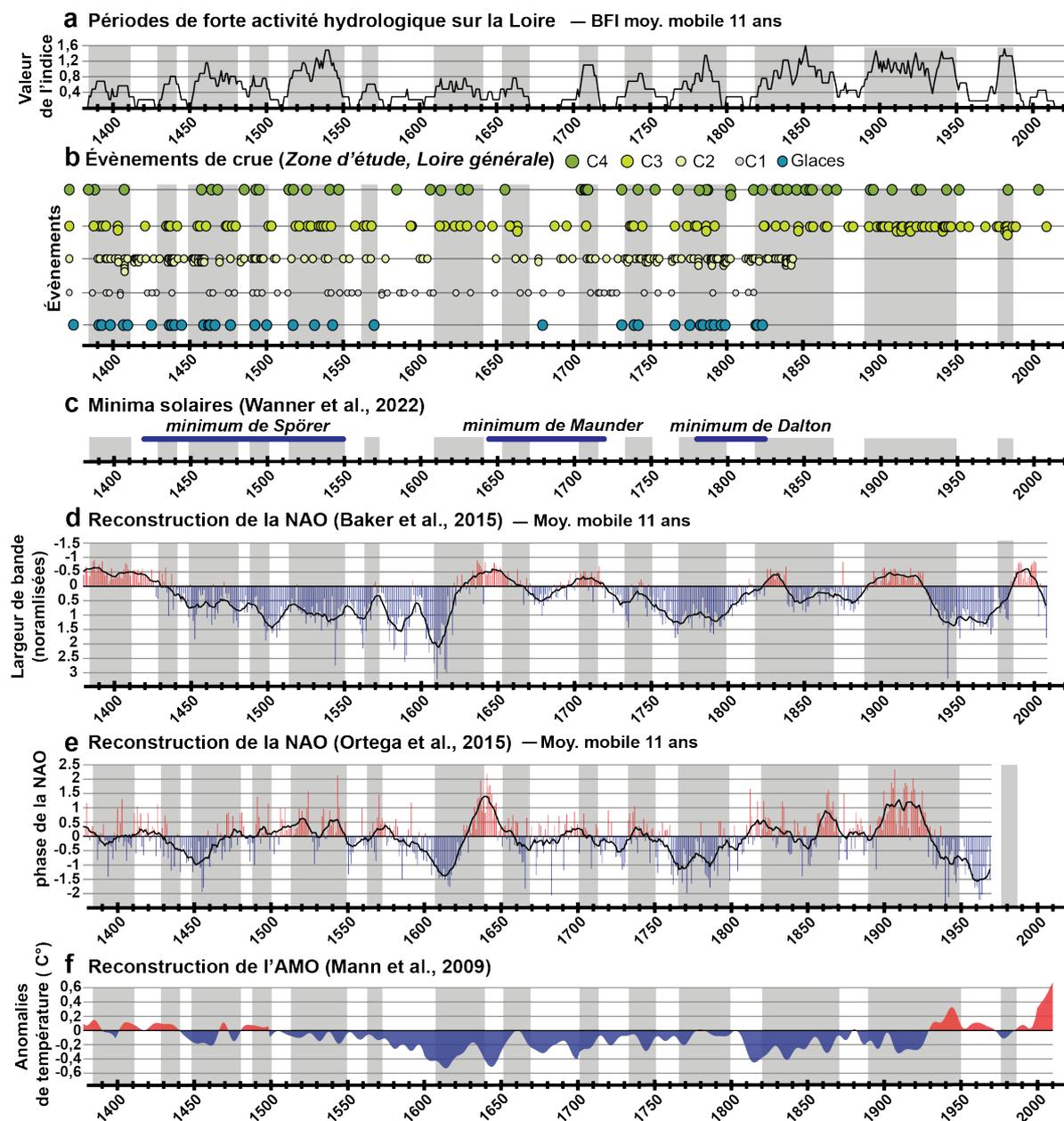
#### **4. Étude des relations entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique de la Loire.**

Plusieurs processus climatiques et atmosphériques constituent des forçages naturels dans l'occurrence de périodes de forte activité hydrologique (**Schulte et al., 2019**). Nous cherchons donc ici à comparer les périodes de forte et de faible activité hydrologique de la Loire à trois types de reconstitutions de processus atmosphériques impliqués dans la formation de crue en Europe occidentale : l'oscillation nord-atlantique (NAO), les grands minima solaires (GSM) et enfin l'oscillation atlantique multi décennale (AMO) (**Figure 5.9**).

##### **4.1. Oscillation nord-atlantique (NAO)**

La NAO, quelle que soit sa position, négative ou positive, a une forte influence sur les précipitations et la formation des crues en Europe (**Guimarães Nobre et al., 2017 ; Rapuc et al., 2019 ; Santisteban et al., 2019 ; Schillereff et al., 2019 ; Peña and Schulte, 2019 ; Schulte et al., 2019**). Les périodes de forte activité hydrologique de la Loire sont comparées ici aux trois reconstitutions des

périodes de la NAO les plus positives et négatives mises en évidence par **Baker et al. (2015)**, **Ortega et al. (2015)** et **Faust et al. (2016)** exploitées par l'étude de **Wanner et al. (2022)**.



**Figure 5.9.** Comparaison entre les périodes de forte activité hydrologique détectées sur la Loire et les variations climatiques. **a** : périodes de forte activité hydrologique identifiées sur la Loire représentées par les bandes grisées. **b** : détail des événements de crues et de glace. **c** : les trois périodes de minima solaires du PAG (**Wanner et al., 2022**). **d** : reconstitution de la NAO par **Baker et al. (2015)** basée sur l'étude de largeur de stalagmites. **e** : reconstitution de la NAO par **Ortega et al. (2015)**. **f** : reconstitution de l'AMO par **Mann et al. (2009)**.

Si l'on se réfère à la reconstitution d'**Ortega et al. (2015)**, quatre des treize périodes (dix périodes avérées et trois potentielles) de forte activité hydrologique de la Loire correspondent à une période de NAO négative, trois à des périodes NAO positive, et six sont à cheval sur les deux types de phases (**Figure 5.9**). De plus, si l'on considère les périodes de forte activité hydrologique les plus

intenses dans la Loire (1455 – 1500, 1515 – 1550, 1705 – 1715, 1770 – 1800), deux d'entre elles correspondent à une période de NAO négative (1455 – 1500 et 1770 – 1800), une sur une période assez neutre (1705 – 1715), deux périodes comptant parmi les plus intenses (1515 – 1550 et 1820 – 1870) correspondent à une période de NAO positive et enfin la dernière période (1890 – 1950) à cheval entre des valeurs de NAO très positives et très négatives (**Figure 5.9**). Néanmoins les périodes de NAO les plus fortement négatives relevées par **Ortega et al. (2015)**, vers 1450 – 1460, 1610 – 1620, 1770 – 1800, 1940 – 1950, et par **Baker et al. (2015)**, correspondent quasi toutes à des périodes de forte activité hydrologique sur la Loire. Ce n'est pas le cas pour la seule période relevée par **Ortega et al. (2015)** entre 1955 – 1965. Il est aussi à noter que **Baker et al. (2015)** ont mesuré plusieurs périodes de NAO très basse pendant la seconde partie du XVI<sup>e</sup> s., mais nos données ne sont pas suffisantes pour savoir si elles correspondent ou non à des périodes de fortes inondations. La période de forte activité hydrologique qui semble être la plus intense de la période 1 (1515 – 1500) correspond à la troisième période la plus haute de la NAO durant le PAG suivant les reconstructions de **Trouet et al. (2009)** et **Ortega et al. (2015)**. Les deux périodes les plus positives de la NAO des 600 dernières années ont été mesurées durant la première moitié du XVII<sup>e</sup> s. et de la première moitié du XX<sup>e</sup> s. (**Trouet et al., 2009** ; **Ortega et al., 2015**) correspondant à deux périodes de forte activité hydrologique sur la Loire. Ainsi, le régime hydrologique de la Loire semble réagir aux variations extrêmes de la NAO, qu'elles soient négatives ou positives.

#### 4.2. Les minima solaires

Les changements de l'activité solaire, et plus particulièrement les périodes de minima solaires, influent sur les régimes de crues (**Benito et al., 2004b** ; **Macdonald et Sangster, 2017** ; **Peña and Schulte, 2019** ; **Schillereff et al., 2019**). Les périodes de faible activité solaire ont deux influences principales sur le climat en Europe occidentale. Outre la baisse des températures sur le continent (**Dobrovolný et al., 2010** ; **Ineson et al., 2015**), elles réduisent également le rayonnement ultraviolet, ce qui affaiblit le jet d'ouest stratosphérique et modifie ainsi la distribution de la pression atmosphérique. Le schéma climatique en Europe occidentale correspond donc à celui d'une NAO en position négative (**Wanner et al., 2001, 2022**).

Trois périodes de grands minima solaires ont eu lieu pendant le PAG : le minimum de Spörer (1420 – 1550), le minimum de Maunder (1645 – 1720) et, dans une moindre mesure, le minimum de Dalton (1780 – 1825) (**Wanner et al., 2022**) (**Figure 5.9**). Ces trois minima solaires correspondent aux trois périodes les plus fraîches du PAG en Europe (**Luterbacher et al., 2016**). Les reconstitutions des dates de vendanges depuis l'époque médiévale indiquent que les températures étaient également plus basses pendant ces minima en Bourgogne, à proximité des sites d'étude (**Le Roy Ladurie et al., 2006** ; **Labbé et al., 2019**). Dans le bassin de la Loire, la période du minimum de Spörer coïncide à des périodes de forte activité hydrologique, notamment à celles de 1455 – 1500 et 1515 – 1550 (**Figure 5.9**). D'après

les différentes reconstitutions climatiques (**Le Roy Ladurie et al., 2006 ; Luterbacher et al., 2016 ; Wanner et al., 2022**), si la première partie du minimum de Spörer correspond à un refroidissement sensible en toutes saisons, la seconde partie de la période est soumise à un réchauffement, en particulier en hiver et en automne. Les deux périodes successives de forte activité hydrologique de la Loire de 1455 – 1550 et 1515 – 1550 semblent donc correspondre à des régimes climatiques différents, bien que coïncidant au même minimum solaire. La première période (1455 – 1550) s'est déroulée durant une période de refroidissement significatif avec une NAO négative, tandis que la suivante (1515 – 1550) correspond à une période de températures générales plus élevées et à une NAO positive. En outre, les crues hivernales sont plus importantes sur la Loire durant la première période que la seconde, au cours de laquelle les crues printanières et automnales prennent plus d'importance (**Figure 5.4**).

Contrairement à son prédécesseur, le minimum de Maunder ne semble pas aussi bien correspondre à des périodes de forte activité hydrologique. Seules les deux courtes périodes de 1650 – 1665 et 1705 – 1715 coïncident avec le minimum de Maunder (**Figure 5.9**). La seconde période de 1705 – 1715 correspond à une courte période de températures particulièrement basses (**Luterbacher et al., 2016**), notamment au printemps (**Wanner et al., 2022**).

Enfin, et tout comme le reste de la France et de l'Europe, la première partie du minimum de Dalton est caractérisée par une forte activité hydrologique sur la Loire (1780 – 1805) (**Figure 5.9**), suivie d'une période de calme hydrologique général dans sa seconde partie (**Figure 5.8, Blöschl et al., 2020**). Comme durant le minimum de Spörer, on observe durant la période de Dalton des clusters d'évènements de glaces sur la Loire (**Figure 5.2**), confirmant des périodes d'hivers rigoureux.

Ainsi, bien qu'elles semblent être favorisées par des périodes fraîches, certaines des périodes de forte activité hydrologique sur la Loire correspondent également à des périodes légèrement plus chaudes durant le PAG, ainsi que durant la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. et durant le XX<sup>e</sup> s. **Brönnimann et al. (2022)** et **Wilhelm et al. (2022)** notent également cette double configuration pour les cours d'eau européens. L'étude de **Brönnimann et al. (2022)** suggère que les périodes de forte activité hydrologique détectées en Europe au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. ont été essentiellement forcées par les circulations atmosphériques, correspondent principalement à des périodes fraîches. Cependant, ils observent depuis 1980 une période assez riche en évènements de crues, bien que caractérisée par un réchauffement important. Les auteurs expliquent l'occurrence de cette période de forte activité hydrologique par l'augmentation récente de la convergence des flux d'humidité induite par ce réchauffement important. L'étude de **Wilhelm et al. (2022)** observe également une double configuration, mais cette fois-ci par rapport à l'intensité des évènements de crue. Ils ont démontré que dans le massif des Alpes depuis l'époque médiévale si les périodes fraîches correspondent à des périodes de forte activité hydrologique, les périodes plus chaudes conduisent également à une augmentation des inondations catastrophiques sur

certaines rivières. Les périodes plus chaudes semblent donc jouer un rôle dans le déclenchement des périodes de forte activité hydrologique, sans pour autant encore parvenir à en déterminer les causes.

### **4.3. L'oscillation atlantique multi décennale (AMO)**

Enfin, plusieurs études ont établi un lien entre les phases de forte et faible activité hydrologique et les fluctuations de températures de l'AMO (Macdonald et Sangster, 2017), en particulier pendant les périodes les plus fraîches (Barriendos et al., 2019). Les périodes de forte activité hydrologiques parmi les plus intenses (1455 – 1500, 1515 – 1550, 1705 – 1715, 1770 – 1800, 1820 – 1870 et 1977 – 1987) correspondent à des périodes de anomalies négatives des températures de l'AMO. Seule la période 1890 – 1950 est à cheval sur des anomalies négatives et positives (Figure 5.9). Les quatre périodes les plus froides enregistrées par Mann et al. (2009) durant le PAG correspondent aux décennies 1600 – 1630, 1640 – 1650, 1695 – 1715, 1740 – 1750 et 1805 – 1845. À l'exception de la période 1640 – 1650, chacune de ces périodes correspond à une période de forte activité hydrologique sur la Loire. Cependant, si l'on considère l'ensemble des périodes de forte activité hydrologiques ligériennes, plusieurs d'entre elles correspondent également à des périodes où les températures sont anormalement élevées, ou proches des normes. De plus, à l'exception de la période 1705 – 1715, les autres périodes de forte activité hydrologique parmi les plus intenses (1455 – 1500, 1515 – 1550, 1770 – 1800, 1820 – 1870 et 1977 – 1987) ne correspondent pas aux températures négatives les plus basses (Figure 5.9).

Pour conclure, la comparaison des périodes de forte activité hydrologique avec les fluctuations climatiques et atmosphériques met en évidence plusieurs éléments clés. Tout d'abord, les périodes de forte activité hydrologique coïncident avec les minima solaires durant le PAG uniquement pendant les périodes les plus froides de ces minima. Cependant, les périodes pour lesquelles l'indice de la NAO présente les valeurs les plus faibles, mais aussi dans une moindre mesure, les plus élevées, correspondent à des périodes de forte activité hydrologique sur la Loire. Par exemple, la période hydrologique la plus intense de la période 1 sur la Loire (1515 – 1550) ne correspond ni à un schéma NAO négatif ni à une période particulièrement froide. Ce phénomène s'étend également aux fluctuations de l'AMO pour lesquelles les périodes les plus fraîches correspondent à des périodes de forte activité hydrologique sans que toutes les périodes de forte activité hydrologique ne correspondent à des périodes anormalement fraîches. Ainsi, l'occurrence des périodes de forte activité hydrologique apparaît multifactoriel et répond de manière assez hétérogène aux fluctuations de la NAO et des températures, confirmant la place de la Loire au carrefour de plusieurs influences climatiques.

## **5. L'évolution de la saisonnalité des crues de la Loire**

Les résultats présentés dans la Figure 5.4 exposent un degré élevé de variabilité dans la saisonnalité des crues de la Loire au cours du PAG. Il apparaît clairement que le schéma saisonnier des crues durant le PAG est différent du schéma saisonnier actuel (1983 – 2023). C'est la proportion de

crues estivales et automnales qui diffèrent le plus, avec des événements bien plus importants en proportion durant le PAG que durant ces dernières décennies. On observe ensuite une diminution récente des événements estivaux depuis le milieu du XX<sup>e</sup> s., observée aussi par **Nabet (2013)** et **Ramond (2015)** en Loire moyenne. La saisonnalité des crues de la Loire au cours des dernières décennies a tendance à se regrouper autour de l'hiver, dont les proportions de crues ne semblent pas avoir atteint cette importance sur les 600 dernières années.

Tout au long du PAG, et jusqu'à aujourd'hui, le régime hydrologique de la Loire se caractérise par une certaine variabilité de la saisonnalité de ses crues sur la zone d'étude. Il est certain que l'utilisation des archives documentaires empêche fatalement d'observer tous les événements jusqu'en 1845, amplifiant peut-être la variabilité saisonnière apparente. Néanmoins, la variabilité reste importante pour la période 2, notamment entre 1846 et 1940 (**Figure 5.4**), et cette fois-ci il est certain que la quasi-totalité des événements ait été prise en compte. De plus, cette variabilité est aussi notée par **Babonaux (1970)**, **Dacharry (1974, 1996)** et **Grivel (2008)** qui observent une variabilité de la saisonnalité des crues de la Loire durant le XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. à l'aval de la zone d'étude.

L'analyse de la saisonnalité des crues par type de crue fait émerger plusieurs questionnements et remarques. Entre 1380 et 1846, le pourcentage de crue d'été (C2 et C3) est en seconde position après les crues d'hiver, alors qu'elles apparaissent en dernière position entre 1846 et 2023, conformément aux observations des études précédentes (**Grivel, 2008** ; **Nabet, 2013** ; **Ramond, 2015**). La proportion de crues d'été C2 et C3 au sein de la période 1380 – 1845 est probablement surestimée dans cette présente étude, et un facteur extérieur à une évolution éventuelle du contexte climatique pourrait donner une explication à la très haute proportion inattendue d'événements d'été durant le PAG. En effet, les populations riveraines de la Loire prirent l'avantage des saisons d'étiage de la Loire, l'été, pour réaliser les travaux de construction ou de réparation majeurs des ouvrages fluviaux : batis, ponts, levées, etc. Le fait que les crues étaient moins attendues durant l'été que durant le reste de l'année, leur survenue surprenait les populations et nécessitait de stopper les chantiers, de retirer ou déplacer les matériaux de construction, amenant à une mise à l'écrit de l'événement facilité en comparaison d'autres périodes où celles-ci étaient attendues, notamment durant l'hiver. Cette mise à l'écrit facilitée durant l'été lorsque l'événement est moins attendu pourrait expliquer ces proportions élevées durant le PAG.

Le fait que les crues exceptionnelles (C4) d'hiver soient en proportion bien moins importantes entre 1846 et 2023 qu'entre 1380 et 1845 est probablement lié cette fois-ci à un facteur climatique. Nous n'avons malheureusement pas pu recenser de présence de glace au-delà de 1846, car non mentionnées par les relevés hydrologiques. Néanmoins, en raison de la sortie du PAG et d'une augmentation générale des températures, il y eut probablement moins de crues de débâcle sur la Loire, notamment de débâcles catastrophiques comme ce fut le cas en 1389, 1408, 1458, 1465, 1516, 1542, 1784, 1789. La dernière d'ampleur observée sur la zone d'étude l'a été en 1820 et les dernières glaces en 2012.

Pour conclure, le schéma saisonnier des crues de la Loire au cours du PAG est différent de l'actuel, caractérisé par une variabilité plus importante que pour la période récente. Comme déjà notée par les précédentes études ligériennes, depuis la sortie du PAG la saisonnalité des crues de la Loire perd de plus en plus de cette variabilité avec des événements qui se concentrent autour de l'hiver. Pour autant, les crues exceptionnelles hivernales sont de moins en moins nombreuses, et surtout de moins en moins dangereuses pour les sociétés riveraines, en raison de la disparition des glaces. Toutefois, l'analyse de la saisonnalité souligne encore une fois l'importance d'une approche critique dans l'utilisation des données historiques.

## **6. Les conditions de l'enregistrement et du recensement des crues**

Le recensement des crues précis et inédit réalisé dans cette étude est fortement dépendant de la richesse documentaire disponible. Nous avons pu accéder à un grand nombre de documents contenant des informations précises, en particulier pour certains siècles (XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s.) pour lesquels l'information est généralement peu détaillée et peu fiable dans le reste de la France ou de l'Europe. Cette richesse documentaire est due aux conditions propres à la zone d'étude et notamment à l'établissement du système de comptabilité et à la conservation des documents. La seule période pour laquelle les comptes n'ont pas été conservés (seconde moitié du XVI<sup>e</sup> s. et XVII<sup>e</sup> s.) est celle pour laquelle nous avons le moins d'informations que ce soit en quantité ou en précision.

Dans le cadre d'une classification des événements de crue en fonction de leurs dommages, l'effet de l'évolution de la vulnérabilité des sociétés et de leurs aménagements présents sur la zone d'étude est significatif. Dans une précédente étude menée sur le Cher, affluent de la Loire, nous n'avons pas pu réaliser un inventaire précis des événements de crue au-delà du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (**Mesmin, 2020**). Avant le XVIII<sup>e</sup> s., les sites étudiés n'étaient pas suffisamment vulnérables aux débordements du Cher. Les dégâts causés par ces événements étant limités, peu de traces de leur passage ont été conservées. Dans cette présente étude, les aménagements présents sur les sites urbains sont restés vulnérables aux crues de la Loire durant toute la période d'étude. Malgré une réduction de la vulnérabilité des ponts au fil des siècles par leur passage de bois à pierre, la vulnérabilité des chantiers nécessaires à la réduction de cette vulnérabilité et le développement du nombre d'aménagements (ponts, levées, battis, etc.) ont contribué au maintien d'une chronique régulière des événements de crues. En zone rurale, le lit majeur n'est pas aussi protégé par les aménagements qu'en aval du Bec d'Allier. Ainsi, les crues ont pu continuer à s'étendre et à menacer les différents ouvrages du lit majeur, ce qui fut également enregistré dans les documents.

Enfin, de bonnes conditions de conservation des archives ont été indispensables à la réussite de cette étude, heureux fruit du hasard, échappant aux diverses destructions de l'Histoire, puis entretenues par les services publics des archives. Les documents remontant jusqu'au XIV<sup>e</sup> s. ont été conservés, ce qui est tout à fait exceptionnel pour ces siècles, échappant peut-être aux destructions révolutionnaires

en raison de leur production propre au pouvoir de la commune elle-même et des bourgeois, indépendamment de celui des seigneurs, laïcs ou religieux. Le travail de restauration réalisé par les archives communales de Nevers et départementales de la Nièvre a aussi contribué très fortement au bon déroulement de ce travail, remettant à portée de main de nombreux comptes lisibles du XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s.

\*

## **Conclusion du chapitre**

Cette étude confirme l'utilité des sources écrites dans le cadre de la détection de périodes de forte et de faible activité hydrologique sur les rivières. L'abondance documentaire, et notamment celle des cités de Nevers et Decize pour la période médiévale et moderne, a permis de réaliser un recensement inédit et précis des crues de la Loire de 1380 à 2023, recouvrant le PAG et la période récente de réchauffement. Au total, 781 événements de crue ont été recensés, dont 313 entre 1380 et 1845 à l'aide d'archives documentaires seules. L'utilisation de deux indices de crues différents nous a permis de détecter 10 périodes de forte activité hydrologique (1385 – 1410, 1430 – 1440, 1455 – 1500, 1515 – 1550, 1705 – 1715, 1735 – 1750, 1770 – 1800, 1820 – 1870, 1890 – 1950, 1978 – 1988) et 8 périodes de faible activité hydrologique (1420 – 1430, 1500 – 1515, 1715 – 1735, 1750 – 1770, 1800 – 1820, 1870 – 1890, 1950 – 1978, 1988 – 2023) sur la Loire au cours des huit derniers siècles.

Il est difficile d'affirmer que la Loire ait été plus active hydrologiquement parlant durant le PAG que durant les siècles précédant cette période ou la suivante. Les données de la période 1 manquent en effet pour étudier l'activité hydrologique de la Loire avant le début du PAG, ce à quoi doit répondre l'utilisation des archives sédimentaires. Concernant la sortie du PAG, la période 1890 à 1950 reste encore très active sur la Loire. C'est véritablement à partir de la moitié du XX<sup>e</sup> s. que le régime hydrologique devient bien plus calme. Les résultats du chapitre montrent également que si les sociétés ont dû s'adapter à la variabilité de l'intensité hydrologique, elles ont aussi dû traiter avec une grande variabilité saisonnière des crues au cours du PAG qui se poursuit à la sortie du PAG au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. Depuis, cette variabilité s'est atténuée et a laissé place à une concentration du schéma saisonnier autour de la période hivernale. Ces résultats permettent également de noter l'exceptionnalité de la période de calme hydrologique actuelle qui apparaît comme la plus longue des huit derniers siècles. De plus, en comparant les périodes d'activité hydrologique de la Loire avec les rivières françaises et européennes, la Loire fait partie des très rares rivières d'Europe de l'Ouest à ne pas avoir connu de période de forte activité hydrologique durant les 30 dernières années. Il est assez difficile pour le moment d'expliquer cette absence de période de forte activité hydrologique sur la Loire. Une étude à part entière et plus poussée appuyée par des données météorologiques et climatiques serait nécessaire.

À partir du XVI<sup>e</sup> s., les périodes de forte et de faible activité hydrologique identifiées sur la Loire ont également été observées sur d'autres rivières françaises et européennes, permettant de valider leur significativité. Avant le XVI<sup>e</sup> s., rare sont les cours d'eau bénéficiant de données précises. Les périodes ligériennes sont notamment cohérentes avec celles observées dans le reste du bassin de la Loire, ainsi que dans celui de la Seine. Néanmoins, chaque période de forte activité hydrologique relevée sur la Loire se distingue par un schéma spatial de correspondance spécifique avec les rivières européennes. Les périodes ligériennes coïncident parfois avec celles des rivières ibériques, tantôt à celles de l'Europe centrale, ou encore à celles du nord-ouest ou de l'ensemble de la France. Le régime hydrologique de la Loire et son évolution semblent donc être influencés par de multiples facteurs climatiques, la plaçant au carrefour de plusieurs influences climatiques. Il reste cependant encore difficile de clarifier ces influences climatiques. La comparaison de nos résultats avec les valeurs de fluctuation climatiques et atmosphériques met en évidence que l'occurrence des périodes de forte activité hydrologique apparaît multifactoriel et répond de manière hétérogène aux fluctuations de la NAO et des températures. De nouvelles études plus approfondies et entièrement dédiées à cette problématique sont largement nécessaires. Les périodes peuvent être encore comparées à d'autres types de données, notamment celles du West Europe Pressure Anomaly (WEPA) (**Jalon-Rojas et Castelle, 2021**).



## Chapitre 6

### L'enregistrement sédimentaire de l'activité hydrologique de la Loire

La mise en place de l'approche sédimentaire a pour but d'étendre l'échelle temporelle et de compléter l'étude de l'activité hydrologique de la Loire, déjà renseignée par l'étude des archives documentaires dans le **cinquième chapitre** de la fin du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours. Cette étude repose sur la détection d'évènements hydro-sédimentaires par l'étude stratigraphique fine de l'enregistrement sédimentaire de trois paléochenaux de la Loire. Ces paléochenaux ont été sélectionnés en fonction de leur ancienneté potentielle, de leur remblaiement et de la présence ou non d'aménagements (cf. **chapitre 4**). Ainsi, l'objectif de ce **sixième chapitre** est double.

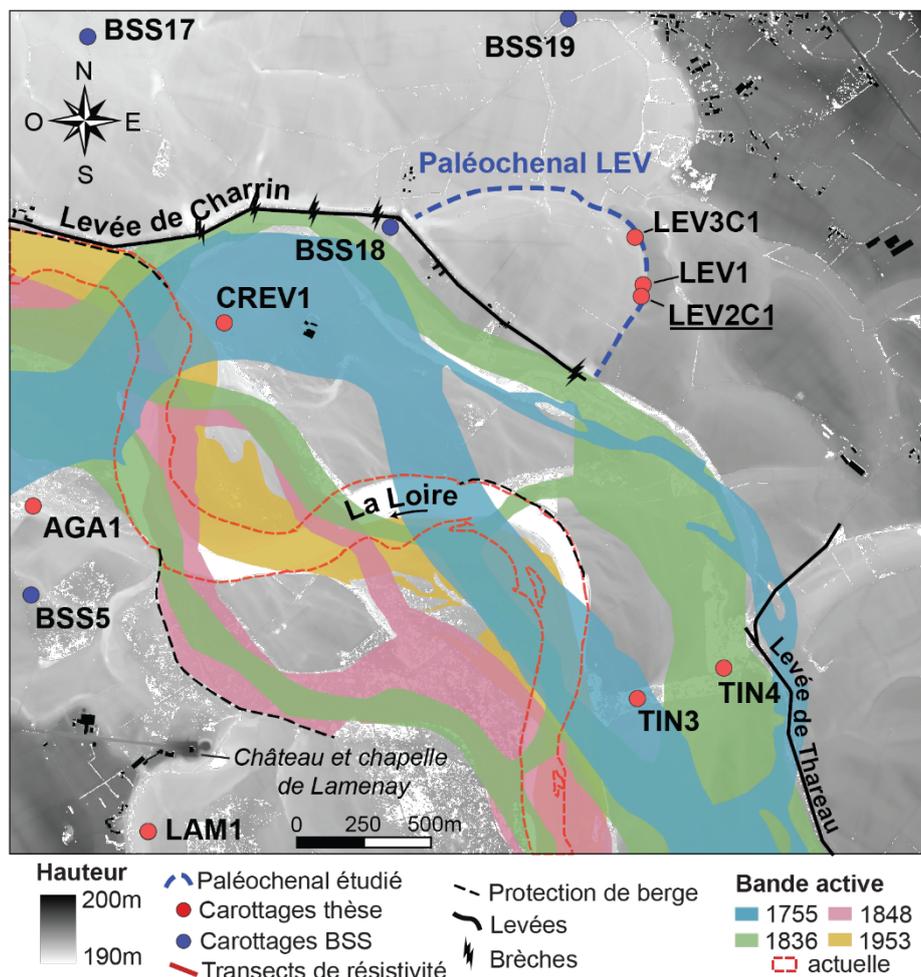
Il s'agit tout d'abord de comprendre l'évolution historique des différents paléochenaux étudiés afin de pouvoir interpréter efficacement leur enregistrement sédimentaire. Leurs histoires vont également nous renseigner sur les modalités de la mobilité de la Loire, essentielles pour mieux comprendre plus tard comment et pourquoi les sociétés y répondirent. Puis, par la détection, la caractérisation et l'interprétation des traces sédimentaires des évènements de crue, il s'agit non seulement de retrouver les périodes hydrologiques, voire les évènements eux-mêmes déjà détectés dans le cadre du **cinquième chapitre**, mais aussi et surtout de renseigner ces périodes au-delà du XIV<sup>e</sup> s., impossible à réaliser avec les archives documentaires seules.

Le chapitre est organisé en deux parties. Une première partie (sous-parties 1 à 3) est destinée à présenter l'enregistrement sédimentaire de chacun des trois paléochenaux sélectionnés afin d'éclairer l'évolution de leur activité, essentielle à la bonne interprétation des informations sur les évènements hydro-sédimentaires qui vont suivre, puis à étudier l'enregistrement des évènements passés afin de les repérer, de les caractériser et de les dater. Une seconde partie (sous-partie 4 et 5) est destinée à la discussion des résultats et à la synthèse des enseignements que ce soit vis-à-vis de l'activité hydro-sédimentaire ou des modalités plus générales de la sédimentation de la plaine. Autrement dit, comment les évènements hydro-sédimentaires participent-ils à la construction ou à la destruction de la plaine alluviale ?

# 1. Le paléochenal LEV : un enregistrement riche d'évènements

## 1.1. Présentation du paléochenal

Le paléochenal LEV décrit un ancien méandre de grande envergure avec une longueur de 1515 m, une altitude maximale de 196,7 m dans sa partie amont et une altitude minimale de 193,9 m dans sa partie aval accolée à la levée (**Figure 6.1**). La largeur du paléochenal est difficile à estimer en l'absence de profil de résistivité. Le chenal était actif au moins jusqu'au XIV<sup>e</sup> s. (**Figure 6.2**). Le paléochenal était très proche des bandes actives du XVIII<sup>e</sup> et de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. Il est séparé par la levée de Charrin mais celle-ci n'est pas rattachée aux coteaux et plusieurs percées provoquées par les crues de la Loire ont été documentées en 1790, 1846 et 1856 (**Temam, 2012**). Ces bandes actives s'éloignent du paléochenal par la suite en migrant vers la rive gauche, probablement suite à la crue de 1846 (**Figure 6.1**).



**Figure 6.1.** Carte du paléo-méandre LEV – Localisation des carottages et migration des bandes actives de 1755 à nos jours.

Le paléochenal LEV bénéficie d'un faciès limoneux homogène important, ce qui n'est pas le cas des paléochenaux UXE et OIE comme nous le verrons plus loin. Il est donc tout d'abord nécessaire de présenter son histoire sédimentaire et plus particulièrement de la mise en place du dépôt limoneux,

essentiel à la détection des événements hydro-sédimentaires.

## 1.2. Description de l'enregistrement d'une défluviatation rapide

Trois carottages permettent de comprendre l'évolution historique du paléochenal de LEV caractérisée, nous le verrons, par une défluviatation rapide au cours du XIV<sup>e</sup> s. Les carottages LEV1, LEV2C1 et LEV3C1 présentent les mêmes trois unités sédimentaires. Le substrat n'a pas été atteint, probablement situé à plus de 10 m de la surface (cf. chapitre 3) (Figure 6.2).

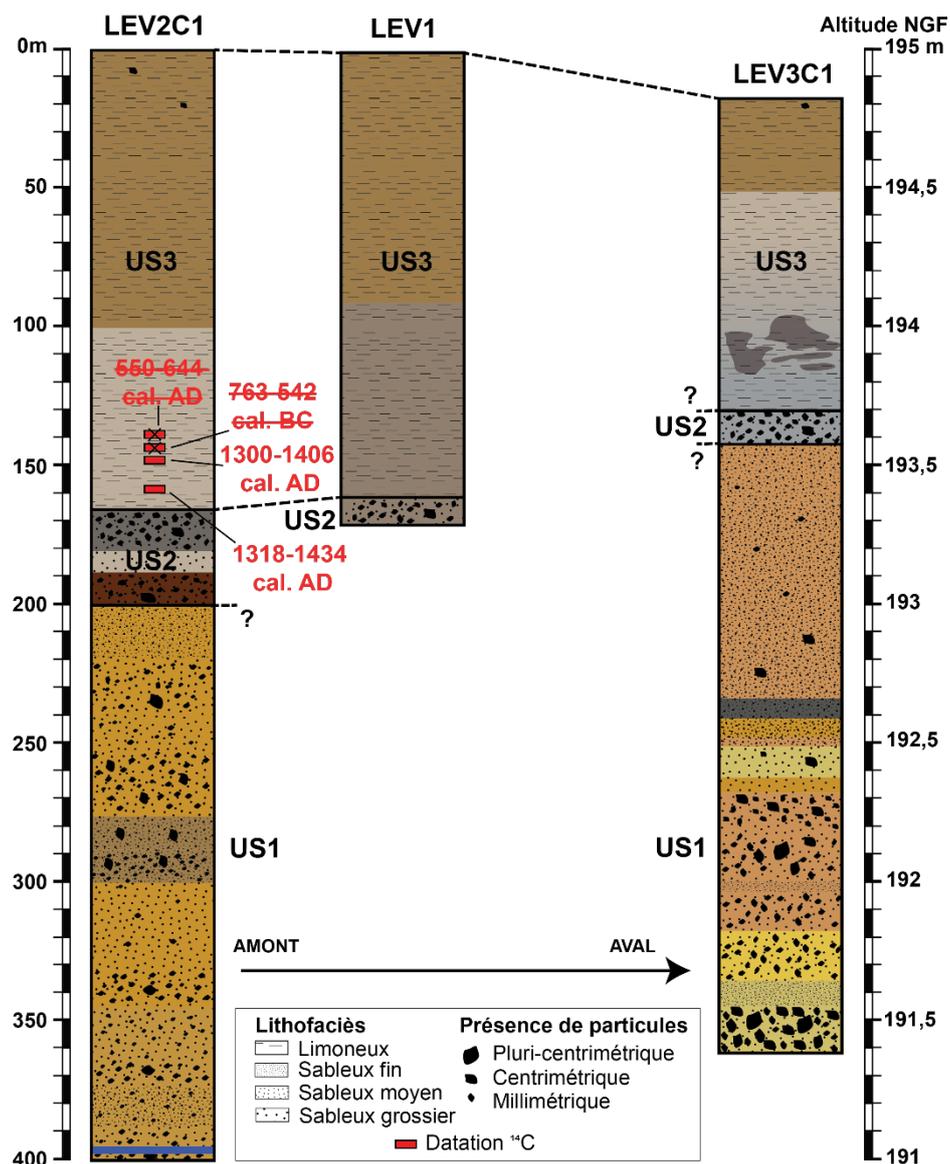


Figure 6.2. Stratigraphie des trois carottages du paléochenal LEV. Les datations rayées sont celles ayant été considérées comme incohérentes.

### 1.2.1. L'unité US1

La première unité US1 présente une alternance de dépôts sableux hétérogènes grossiers, moyens et fins, de couleur jaune pâle à jaune orangé de 191 à 193 m sur LEV2C1 et de 191,4 à 193,57 m sur

LEV3C1. Cette unité n'a pu être datée. On a détecté au sein de ces dépôts sableux de nombreux graviers pluri-millimétriques à centimétriques, voire pluri-centimétriques pour les phases les plus grossières, notamment entre 191,4 et 192,3 m de profondeur sur LEV3C1. Ces dépôts grossiers ont par ailleurs empêché de descendre en dessous de 4 m. LEV3C1 présente des phases bien plus grossières que LEV2C1, situé un peu plus à l'amont du paléochenal.

Les mesures granulométriques effectuées sur la carotte LEV2C1 confirment la forte variabilité apparente de la taille des sables avec un  $D_{50}$  variant d'environ 1000  $\mu\text{m}$  à quasi 6000  $\mu\text{m}$  et un  $D_{99ar}$ <sup>22</sup> variant de moins de 1000  $\mu\text{m}$  à quasi 8000  $\mu\text{m}$  (**Figure 6.3**). Les dépôts sableux d'US1 témoignent de la présence d'un chenal actif de la Loire. Il est probable que la variabilité importante de la taille des sables soit celle d'un chenal secondaire, par analogie avec le fonctionnement actuel. En effet, transposés sur l'image CM actuelle, 99 % des échantillons de l'unité se retrouvent sur l'axe PQ témoignant d'un transport réalisé par roulement et/ou suspension graduée, caractéristique des dépôts de bancs actifs sableux de chenaux principaux ou secondaire actuels. Les cartes du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> s. présentent pour cette partie de Loire un style à chenaux multiples et très mobiles à la fin du PAG (**Figure 6.1**). Il est probable qu'au moment de son fonctionnement, antérieur au XIV<sup>e</sup> s., cette section de Loire ait été également caractérisée par un style à chenaux multiples.

La partie supérieure d'US1 présente la matrice sableuse la plus fine d'un jaune orangé, avec une proportion de limon plus élevée par rapport au reste de l'unité (40 %), témoin d'une fermeture progressive du chenal.

### 1.2.2. L'unité US2

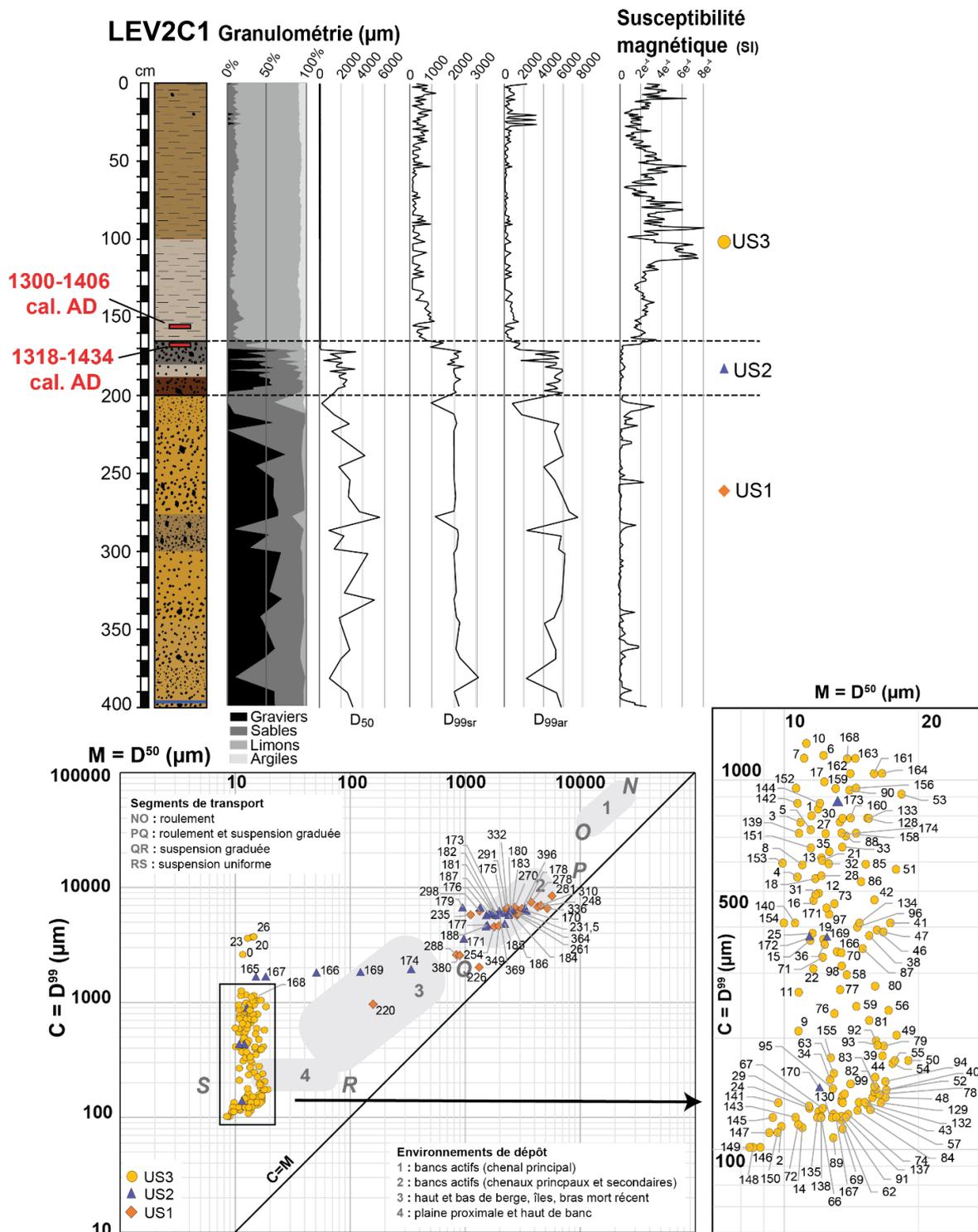
L'unité US2, de 193 à 193,35 m sur LEV2C1 et de 193,58 à 193,7 m sur LEV3C1, présente des dépôts très hétérogènes allant de sables grossiers accompagnés de graviers pluri-millimétriques à centimétriques, à des dépôts limono-sableux sur LEV2C1 (**Figure 6.2**, **Figure 6.4**). Cette unité correspond sans doute sur LEV3C1 au niveau situé entre 193,57 et 193,7 m, qui est caractérisé cette fois-ci par des dépôts sableux grossiers gris, ainsi que sur LEV1 entre 193,3 et 193,4 cm avec des dépôts sableux grossiers brun gris. L'absence de datation ne permet pas d'être certain de la similitude entre LEV2C1, LEV1 et LEV3C1, mais nous la supposons tout de même très fortement.

Les mesures granulométriques effectuées sur LEV2C1 témoignent d'une grande variabilité granulométrique (**Figure 6.3**, **Figure 6.4**). Les valeurs de  $D_{50}$  varient entre 15 et 3331  $\mu\text{m}$  et celles de  $D_{99ar}$  entre 1144  $\mu\text{m}$  et 6729  $\mu\text{m}$ . Cette très forte variabilité s'explique par le poids inégal des graviers dans les échantillons et par l'augmentation progressive des limons du bas vers le toit de l'unité, jusqu'à

---

<sup>22</sup> Les résultats granulométriques du  $D_{99}$  seront présentés avec les refus de tamis ( $D_{99ar}$ ) et sans les refus de tamis ( $D_{99sr}$ ) tout au long de ce chapitre (cf. **Chapitre 4**).

en constituer l'apport principal (**Figure 6.3**). Les échantillons de l'US2, en raison de leur diversité granulométrique, s'étalent sur quasi toute l'image CM : du segment PQ pour la majorité des échantillons, au segment QR puis RS (**Figure 6.3**). Cet étalement témoigne du glissement rapide d'un environnement fluvial dynamique à un environnement beaucoup plus clame et éloigné du chenal actif, notamment à partir de 174 cm.



**Figure 6.3.** Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage LEV2C1.

Ainsi, alors que le toit d'US1 témoignait d'une fermeture progressive, la matrice très grossière d'US2 et la simultanéité observable sur les trois carottages témoigne d'une réactivation du chenal. Enfin, comme pour l'unité précédente, la baisse rapide et significative de la granulométrie des dépôts indique une fermeture très rapide du chenal. Le toit de l'unité US2 sur LEV2C1 présente des dépôts organiques, majoritairement des bois, mélangés aux particules grossières. Ces dépôts pourraient correspondre à ceux d'un évènement de crue d'ampleur, peut être responsable de la défluviation ?

### 1.2.3. L'unité US3

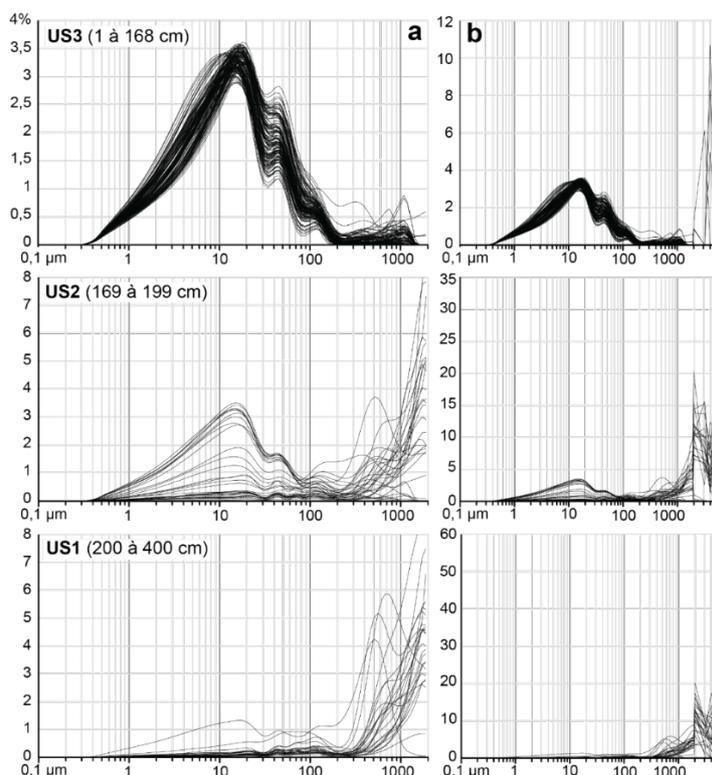
L'unité US3 présente une matrice majoritairement limoneuse brun grise à brun avec une proportion de sable plus faible que pour les US précédents ne dépassant pas 21 % (maximum atteint à 151 cm). On observe une décroissance de l'épaisseur de l'unité vers l'aval : tandis que l'US3 présente une épaisseur de 165 cm sur LEV2C1, elle baisse à 160 cm sur LEV1 située 26 m plus à l'aval, puis à 112 cm sur LEV3C1 situé 191 m plus à l'aval, indiquant que l'apport limoneux se fait préférentiellement par l'amont du paléochenal. Sur LEV2C1, le  $D_{50}$  observe des valeurs assez homogènes entre 10 et 20  $\mu\text{m}$  (**Figure 6.3**), avec un seul pic atteignant 50  $\mu\text{m}$  à 166 cm. Le  $D_{99ar}$  observe cependant une grande variabilité, avec un écart-type de 612, contre moins de 200 pour le  $D_{90}$  et le  $D_{95}$ , avec un minimum de 101,6  $\mu\text{m}$  (à 148 cm) et un maximum de 3725,8  $\mu\text{m}$  (à 26 cm). L'augmentation des valeurs de susceptibilité magnétique sur le toit de l'US2 puis tout au long de l'US3, indique assez clairement que ces hautes valeurs sont associées à une augmentation de la part des limons (**Figure 6.3**).

Ainsi, ces dépôts sédimentaires correspondent à des dépôts de débordement de plaine et contrastent complètement avec les dépôts sableux précédents. La transposition des dépôts de l'US3 sur l'image CM actuelle soulève néanmoins un problème intéressant : la très grande majorité d'entre eux n'a pas d'analogue dans des dépôts actuels (**Figure 6.3**). Les échantillons se répartissent autour d'un  $D_{50}$  assez stable entre 8 et 19  $\mu\text{m}$  et un  $D_{99}$  qui varie énormément, entre 100 et 1400  $\mu\text{m}$ . Alors qu'il fut difficile de trouver des échantillons actuels témoignant d'un transport par suspension uniforme (cf. **chapitre 4**), 58 échantillons de l'US3 se retrouvent au sein du segment RS. De plus, bien que ne correspondant pas aux limites du segment QR actuel, les autres échantillons de l'unité (plus de 50 %) ont probablement été transportés par suspension graduée.

Plusieurs charbons et morceaux de bois ont été prélevés sur LEV2C1 permettant de dater l'unité contrairement aux deux précédentes. Quatre dates ont été réalisées au  $^{14}\text{C}$  sur charbon (**Tableau 6.1**). Deux d'entre elles, située à 148 et 160,7 cm sont datées du XIV<sup>e</sup> s. et début XV<sup>e</sup> s., tandis que les deux autres situées à 144 et 148 cm sont datées bien plus tardivement, de 550-644 cal. AD pour la première et jusqu'à 763-542 cal. BC pour la seconde. Se situant au sein d'une passée granulométrique dont les valeurs de  $D_{99}$  très élevées témoignent d'une activité hydrologique intense, ces deux dates tardives ont probablement été réalisées sur des charbons remaniés par la Loire. Nous considérons donc que ces deux dates ne sont pas contemporaines de la mise en place des dépôts auxquels elles sont associées,

contrairement aux dates de XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. En conséquence, elles n'ont pas été prises en compte dans la suite de l'étude.

Ainsi, l'enregistrement sédimentaire du paléochenal LEV témoigne d'un environnement tout d'abord dynamique, peut-être associé à celui d'un chenal secondaire. Puis, suite à une défluviation rapide au XIV<sup>e</sup> s., le paléochenal enregistre une sédimentation limoneuse de 0,22 cm/an, un taux très important par comparaison avec les deux autres paléochenaux comme nous le verrons plus loin. Cet enregistrement limoneux est idéal dans le cadre de la détection des événements hydro-sédimentaires passés avec un D<sub>50</sub> assez homogène et des D<sub>99ar</sub> et D<sub>99sr</sub> laissant entrevoir différents pics granulométriques.



**Figure 6.4.** Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (LEV). **a** : courbes granulométriques entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 2000  $\mu\text{m}$ . **b** : courbes avec tailles > 2000  $\mu\text{m}$ .

**Tableau 6.1.** Datations réalisées sur le carottage LEV2C1.

Profondeur (en cm)	Type de matériel	Méthode	Dates	Dates calibrées	Laboratoire d'analyse
140	Charbon	<sup>14</sup> C	1480 ± 30 BP	550 - 644 (95,4 %) cal. AD	Poznan lab
144	Charbon	<sup>14</sup> C	2485 ± 15 BP	763 - 718 (18,1 %) ; 710 - 661 (19,5 %) ; 654 - 542 (57,9 %) cal. BC	U. Laval
148	Charbon	<sup>14</sup> C	605 ± 30 BP	1300 - 1372 (71,9 %) ; 1377 - 1406 (23,6 %) cal. AD	Poznan lab
160,7	Charbon	<sup>14</sup> C	550 ± 30 BP	1318 - 1360 (37,4 %) ; 1388 - 1434 (58,0 %) cal. AD	Poznan lab

### 1.3. Détection des évènements de crue

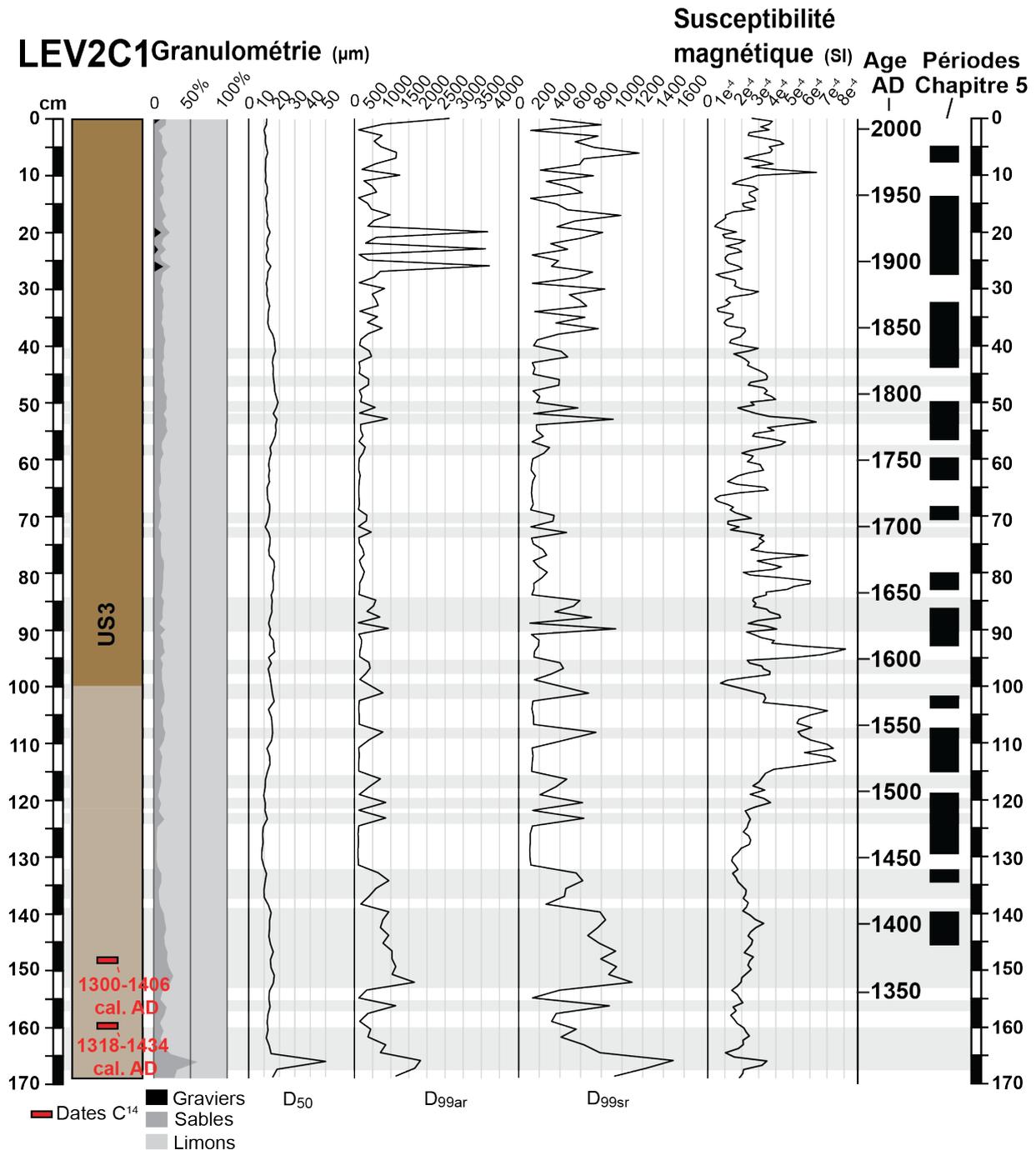
L'homogénéité granulométrique générale de l'US3 nous a permis de relever plusieurs pics granulométriques pouvant correspondre à des évènements hydro-sédimentaires (**Figure 6.5**). Le  $D_{99}$  constitue l'indice le plus efficace pour discrétiser les anomalies granulométriques, que ce soit sur l'enregistrement de LEV, mais également pour ceux d'UXE et OIE. Plusieurs pics granulométriques sont détectables entre la surface et 170 cm. On observe parmi ces pics deux cas de figure. Premièrement, de nombreux pics correspondent à un seul échantillon. C'est par exemple le cas des pics détectés aux centimètres 51, 53, 58, 73, 101, 108, 116, 120, 123, et 156 (**Figure 6.5**). Deuxièmement, on observe aussi des pics étalés sur deux centimètres consécutifs comme ce peut être le cas des centimètres 41 et 42, 46 et 47, 70 et 71, 96 et 97, voire des « clusters » entiers comme ceux des centimètres 85 et 90, 133 à 137, 140 à 152 sur plus de 10 centimètres, ou encore de 160 à 169 cm (**Figure 6.5**).

Les pics de  $D_{99}$  les plus importants sont atteints à 53 cm atteignant  $915 \mu\text{m}$ , à 90 cm atteignant  $938 \mu\text{m}$ , à 134 cm pour  $949 \mu\text{m}$ , 140 cm pour  $950 \mu\text{m}$ , 144 cm pour  $948 \mu\text{m}$ , entre 146 et 152 cm oscillant entre  $1040 \mu\text{m}$  et  $1659 \mu\text{m}$ , à 156 cm pour  $1141 \mu\text{m}$  (**Figure 6.5**).

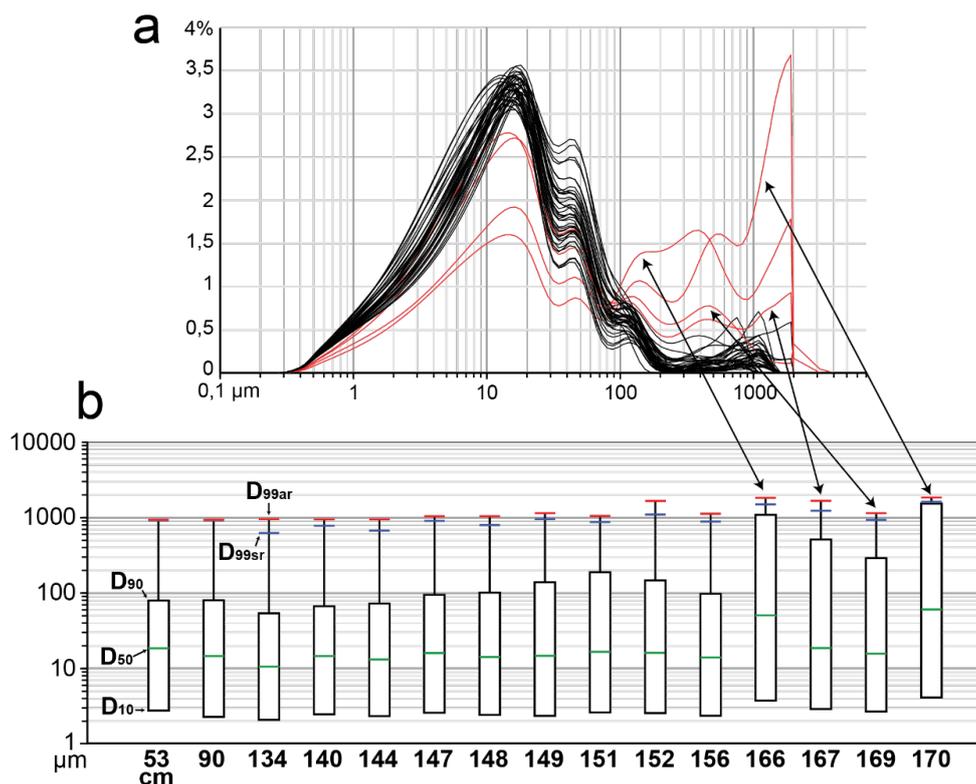
Entre 38 cm et la surface, de nombreux pics dépassent tous les précédents, mais ces dépôts posent problème. En effet, ceux-ci se caractérisent par un  $D_{50}$  proche de  $10 \mu\text{m}$ , donc assez similaire au reste de l'US3, mais également par des valeurs de  $D_{99\text{sr}}$  atteignant plus de 600, 800 et  $1000 \mu\text{m}$ , et même des valeurs de  $D_{99\text{ar}}$  dépassant  $3000 \mu\text{m}$ . Il est néanmoins très probable que ces pics granulométriques, ou du moins leur position dans la carotte, ne renvoient pas du tout à des évènements hydro-sédimentaires, mais plutôt à une perturbation extérieure. Comme nous allons le voir par la suite, nous observons le même phénomène sur le site d'UXE. Que ce soit sur LEV ou UXE, les carottages ont été effectués au sein d'une parcelle agricole cultivée. Après entretien avec les différents agriculteurs des parcelles, ces derniers ont confirmé que leurs labours pouvaient atteindre 30 cm ou plus. La variabilité granulométrique et les valeurs de  $D_{99}$  élevées des 38 premiers centimètres s'expliquent donc fort probablement par le labour de la parcelle. Cet effet n'apparaît justement pas sur le site d'OIE, non cultivé et occupé par une parcelle boisée ou de pâture depuis au moins le XIX<sup>e</sup> s. Une question subsiste : si le labour perturbe et mélange les dépôts, d'où proviennent les particules grossières ? Plusieurs hypothèses pourraient l'expliquer. Les particules ont pu être transportées par les machines de labour. L'activité hydro-sédimentaire de la Loire pourrait aussi être responsable, mais le mélange des dépôts ne permettra dans tous les cas pas de mettre en rapport les pics avec des évènements connus. Nous n'exploiterons donc pas ces données.

Pour en revenir aux dépôts de crue, les pics granulométriques relevés dans la **Figure 6.5** observent une certaine hétérogénéité dans leur distribution granulométrique (**Figure 6.6**). Si toutes les distributions sont multimodales, l'importance des modes varie et certains pics présentent des modes absents chez les autres. Entre 150 et 170 cm, les distributions présentent des modes sableux situés entre

300 et 500  $\mu\text{m}$ , absents pour les dépôts de 40 à 150 cm (**Figure 6.6a**). Les pics granulométriques de 160 à 170 cm se distinguent des autres également sur la **Figure 6.6b** représentant les pics granulométriques les plus importants de l'US3. Les centimètres 166, 167, 169 et 170 observent un  $D_{10}$ , un  $D_{50}$  et surtout un  $D_{90}$  bien plus élevés que pour les pics suivants. Si les caractéristiques granulométriques des pics de 160 à 170 cm peuvent témoigner du passage d'évènements hydro-sédimentaires, ils témoignent probablement également d'une bande active encore assez proche.



**Figure 6.5.** Détection de pics granulométriques au sein du carottage LEV2C1. Les bandes grises correspondent aux pics granulométriques significatifs. Les périodes du **cinquième chapitre** correspondent aux périodes de forte activité hydrologique.

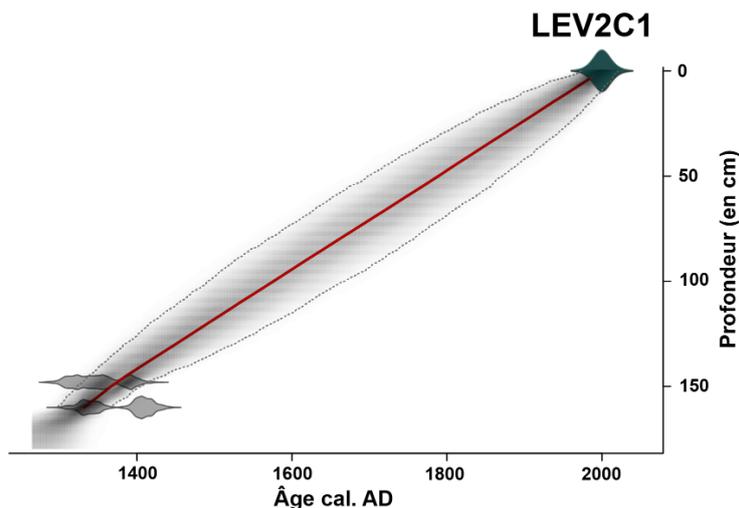


**Figure 6.6. a :** courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques (LEV).  
**b :** boîtes à moustache représentant le D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub>, D<sub>99sr</sub> et D<sub>99ar</sub> des pics granulométriques les plus importants de l'US3.

#### 1.4. Chronologie des évènements de crue

Nous ne disposons sur le carottage LEV que de quatre dates <sup>14</sup>C (**Tableau 6.1**) dont deux seulement sont considérées comme cohérentes comme définit précédemment et sur lesquelles repose le modèle âge-profondeur (**Figure 6.7**). Malgré la fiabilité relative de celui-ci, plusieurs rapprochements peuvent être effectués entre des pics granulométriques et des évènements relevés dans les archives documentaires.

Pour commencer et comme énoncé précédemment, les pics granulométriques situés entre 170 et 160 cm sont probablement le signe d'une présence encore proche de la bande active. À partir du pic à 156 cm, il semble probable que les pics granulométriques soient bien le signe du passage d'évènements hydro-sédimentaires. Les phases de dépôt de 152 à 133 cm se sont probablement produites au début du PAG, du XIV<sup>e</sup> s. à la seconde moitié du XV<sup>e</sup> s. (**Figure 6.5**). Il est cependant impossible de savoir si les différents clusters de pics granulométriques ont été produits par un seul ou par une succession de plusieurs évènements. Toujours est-il que les archives documentaires ont également témoigné de phases de forte activité hydrologique en 1380 – 1410 et 1420 – 1500 (cf. **chapitre 5**).



**Figure 6.7.** Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations d'UXE1C1. Réalisé à l'aide du modèle bayésien Bacon du package R (Blaauw et Christen, 2011). La date actuelle de la surface a été ajoutée artificiellement afin de créer le modèle.

Pour les dépôts de crue situés entre 133 et 90 cm, il est difficile de trouver des correspondances avec les périodes relevées via les archives historiques. Néanmoins, on peut se risquer à certaines hypothèses : les pics aux centimètres 123, 120 et 116 pourraient correspondre aux événements extrêmes de 1486 et 1494/1496. Il est plus difficile de rapprocher le pic de 108 cm d'un des multiples événements de la première moitié du XIV<sup>e</sup> s. Les pics de 101 et 96-97 cm pourraient être liés aux crues exceptionnelles de 1586 et 1608. La phase de dépôts suivante de 90 à 85 cm pourrait correspondre à la période de forte activité hydrologique de 1610 – 1640. La période définie comme calme à partir des archives documentaires entre 1640 et le début du XVIII<sup>e</sup> s. semble également l'être au sein de cet enregistrement sédimentaire. Plus haut, les pics granulométriques de 70, 71 et 73 cm pourraient se rapporter aux événements extrêmes du début du XVIII<sup>e</sup> s. et à la période 1705 – 1715. Enfin, les pics situés entre 55 et 50 cm pourraient correspondre à la phase de forte activité hydrologique de la fin du XVIII<sup>e</sup> s. entre 1775 et 1795.

Il faut tout de même considérer que ces rapprochements restent très fragiles, car reposant sur un modèle âge profondeur établi à l'aide de deux dates seulement. De plus, la phase perturbée par l'activité agricole renvoie probablement à l'activité hydrologique de la Loire entre le milieu du XIX<sup>e</sup> s. et nos jours, ce qui nous empêche de retrouver les traces des grands événements de 1846, 1856, 1866, 1907 ou de 2003 et de recalibrer la chronologie sédimentaire sur la chronologie historique. Ce manque d'information nous empêche également d'être certain qu'un pic granulométrique correspond à un seul événement. Tous les événements de crue considérés comme exceptionnels dans le **cinquième chapitre** n'ont pas pu être rapprochés d'un pic granulométrique détecté au sein sur l'enregistrement de LEV2C1.

\*

En conclusion, suite à une défluviation au début du PAG, le paléochenal LEV, et plus particulièrement le carottage LEV2C1, présente un enregistrement limoneux épais de plus d'un mètre soixante. L'homogénéité de cet enregistrement permet de détecter le passage de plusieurs événements hydro-sédimentaires. Si quelques rapprochements peuvent être réalisés avec des événements de crue relevés grâce aux archives documentaires, nous manquons tout de même de datations pour interpréter pleinement la totalité des informations sédimentaires. Les pics granulométriques de 170 à 130 cm correspondent-ils à des événements hydro-sédimentaires ou à une Loire encore proche pouvant facilement déloger le bouchon alluvial à l'amont du paléochenal ? Si des phases de dépôts pouvaient correspondre à des phases de forte activité hydrologique, il reste difficile et peu significatif de les comparer aux périodes détectées dans le **cinquième chapitre**. De nouvelles datations tout au long des deux mètres seraient essentielles.

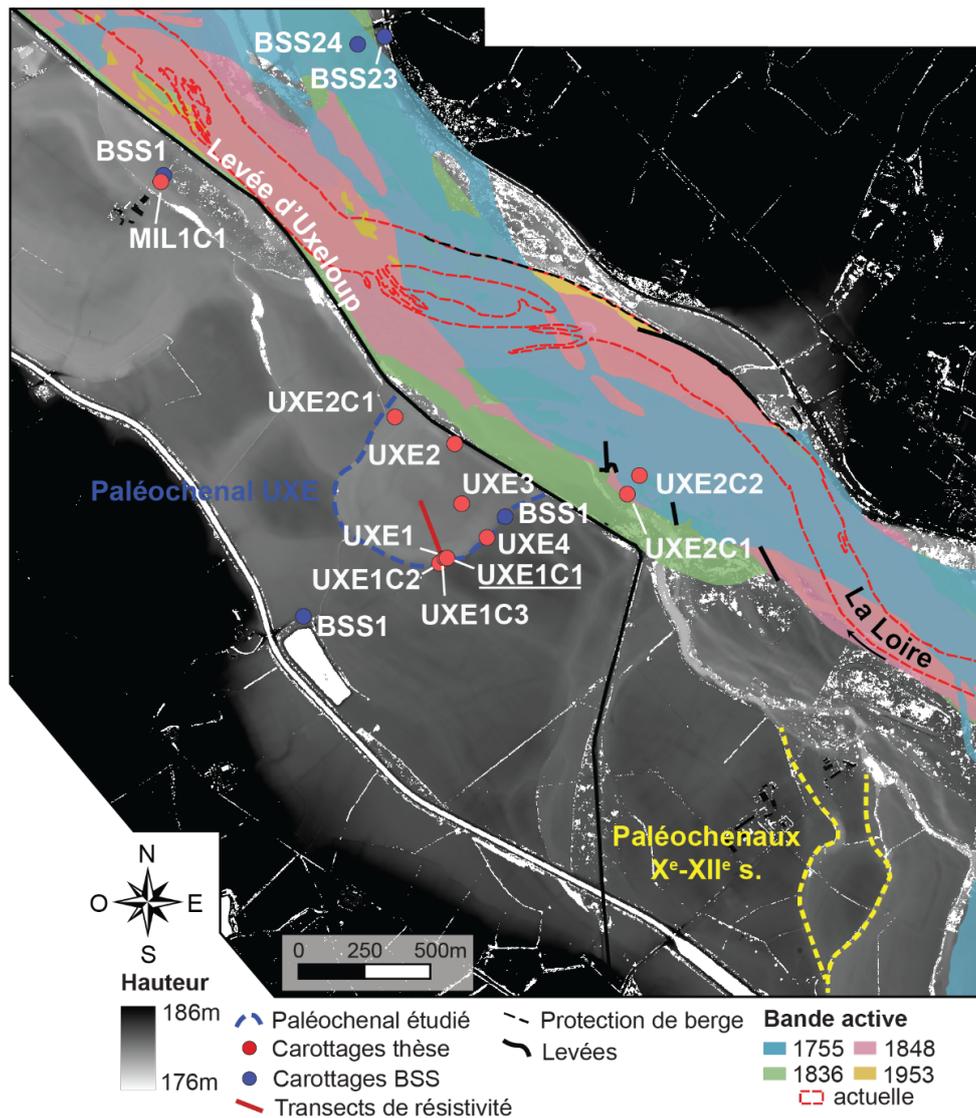
## **2. Le paléochenal UXE : un enregistrement moins dense, mais plus ancien**

### **2.1. Présentation du paléochenal**

Le paléochenal UXE est de petite envergure avec une largeur de 55 à 107 m, une longueur de 1501 m, une altitude maximale de 182,8 m dans sa partie amont, et une altitude minimale de 181,5 m dans sa partie aval (**Figure 6.8**). Le gabarit de ce paléoméandre est donc plus petit que celui de LEV. Le paléochenal est très proche des bandes actives du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s., séparé actuellement de l'actuelle par la levée d'Uxeloup. Les cartes anciennes et photographies aériennes indiquent que les bandes actives depuis le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. se sont retrouvées bloquées entre le coteau en rive droite et la levée (et les aménagements la précédant) en rive gauche (**Figure 6.8**). Les paléochenaux datés du X<sup>e</sup> au XII<sup>e</sup> s. à l'amont direct du site d'étude (**Garcia et Dumont, 2014 ; Figure 6.8**) devaient probablement également passer proche de la rive droite. En bref, la Loire a sans doute été assez peu mobile sur ce secteur au cours du dernier millénaire, offrant un potentiel d'enregistrement intéressant pour le paléochenal. Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> s., le paléochenal reste tout de même très éloigné des bandes actives, au minimum de 873 m. Enfin les faciès sédimentaires diffèrent grandement entre l'amont (UXE1C1) et l'aval du paléochenal (UXE1C2), contrairement aux paléochenaux UXE et OIE.

### **2.2. Description d'un enregistrement différent entre l'amont et l'aval du paléochenal**

Huit carottages (**Figure 6.9**) et un transect de résistivité (**Figure 6.10**) permettent de comprendre l'histoire de l'activité sédimentaire du paléochenal UXE. Les carottages présentent trois unités principales et sept sous-unités distinctes, sans que le substrat n'ait été atteint, probablement situé de 11,5 m à 13 m de la surface selon les carottages de la BSS (cf. **chapitre 3**) (**Figure 6.9**). Six datations furent effectuées sur le site (**Tableau 6.2**).



**Figure 6.8.** Localisation de tous les carottages du site d’Uxeloup (secteur UXE).

### 2.2.1. Unité US1 (a, b, c, d, $\alpha$ et $\beta$ )

Cette première unité se caractérise par une matrice sableuse (**Figure 6.9**). Elle a été divisée en cinq sous-unités (a, b, c, d,  $\alpha$  et  $\beta$ ) du fait de la différence d’enregistrement sableux entre l’amont (UXE1C1 et UXE1C3) et l’aval (UXE2C1) du paléochenal, mais également et surtout en raison du manque de datations ne permettant pas de relier les différentes phases sableuses entre elles. Les différences de granulométrie et une datation ont permis de caractériser quatre sous-unités sur UXE2C1 (US1a, b, c et d) à l’aval du paléochenal. Deux autres sous-unités, US1  $\alpha$  et  $\beta$ , ont été caractérisées à l’amont du paléochenal sur UXE1C1 et UXE1C3. En l’absence de datation, aucun rapprochement significatif ne peut être effectué entre ces unités entre l’aval et l’amont du paléochenal. Elles correspondent néanmoins quasi toutes (sauf US1b) à des dépôts d’environnements fluviaux dynamiques.

La première US1a a été caractérisée sur UXE2C1 entre 178 et 179,2 m. Antérieure à 786-543 cal. BC, elle se caractérise par des sables moyens à fins.

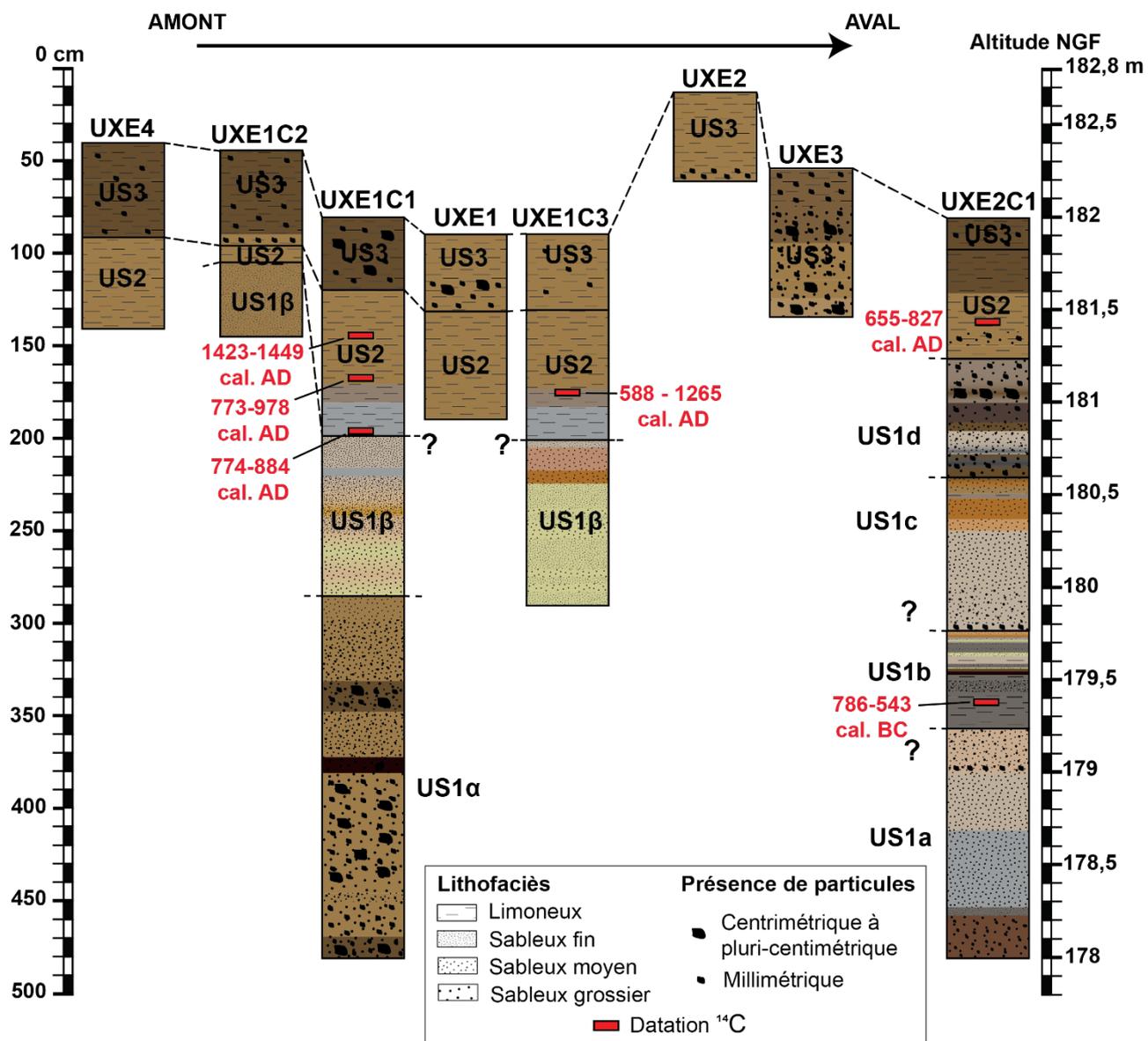


Figure 6.9. Stratigraphie du remblaiement du paléochenal UXE.

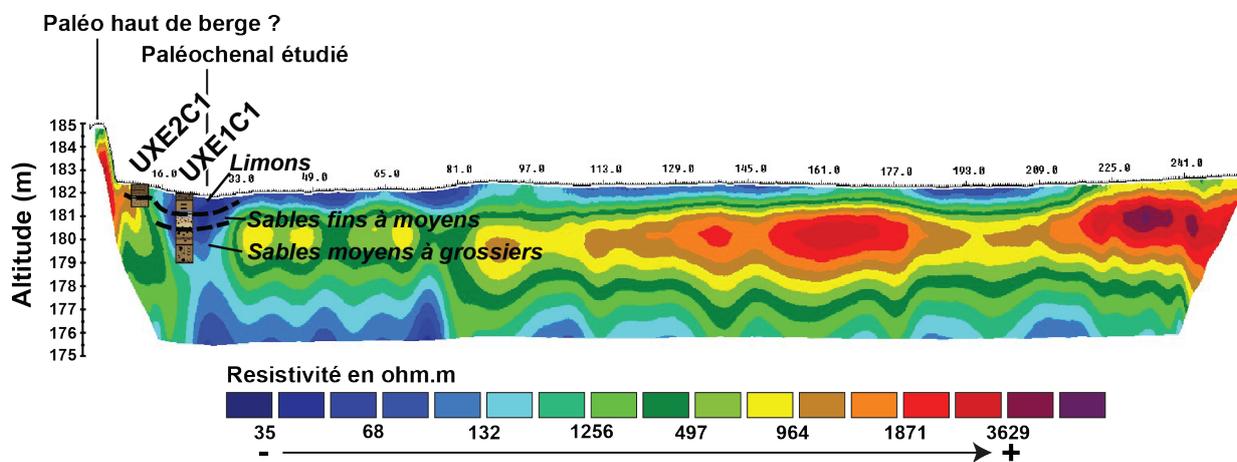


Figure 6.10. Transect de résistivité électrique du paléochenal UXE (amont).

**Tableau 6.2.** Datations réalisées dans le paléochenal UXE.

Carotte	Profondeur (en cm)	Type de matériel	Méthode	Dates	Dates calibrées	Laboratoire d'analyse
UXE1C1	62	Charbon	<sup>14</sup> C	470 ± 15 BP	1423 - 1449 (95,4 %) cal. AD	U. Laval
UXE1C1	87	Charbon	<sup>14</sup> C	1160 ± 30 BP	773 - 791 (10,4 %) ; 804-810 (1,2 %) ; 820-978 (83,9 %) cal. AD	Poznan lab
UXE1C1	105,62	Charbon	<sup>14</sup> C	1200 ± 15 BP	774 - 884 (95,4 %) cal. AD	U. Laval
UXE1C4	83	Charbon	<sup>14</sup> C	1130 ± 190 BP	588 - 1265 (95,4 %) cal. AD	Poznan lab
UXE2C1	46,5	Charbon	<sup>14</sup> C	1290 ± 40 BP	655 - 778 (87,6 %) cal AD ; 788 - 827 (7,9 %) cal. AD	Poznan lab
UXE2C1	262	SO	<sup>14</sup> C	2515 ± 30 BP	78-720 (24,4 %) ; 708-662 (18,7 %) ; 653-543 (52,4 %) cal. BC	Poznan lab

L'US1b entre 179,2 et 179,75 m se caractérise ensuite par des passées bien plus hétérogènes, faites d'alternances de phases limoneuses organiques grises et de phases sableuses plus ou moins épaisses beiges à jaune clair. Datée à 786 – 543 cal. BC, cette unité, absente des carottages à l'amont du paléochenal, pourrait correspondre à la mise en place d'une dynamique plus calme et d'une zone humide, remise en eau épisodiquement.

L'US1c se caractérise ensuite entre 179,75 et 180,6 m par des sables grossiers et moyens et fins. On observe en effet un gradient granulométrique du bas vers le toit de l'unité.

Enfin, l'US1d présente entre 180,6 et 181,25 m des alternances de passées sableuses fines, moyennes et grossières, voire très grossières, notamment entre 181 et 181,2 cm. On observe également des alternances de couleur passant du brun foncé à gris clair correspondant à des dépôts plus ou moins chargés en matière organique. Alors que l'US1c précédente témoignait d'un colmatage ou d'un éloignement progressif du chenal actif, les dépôts de l'US1d correspondent à une nouvelle réactivation du chenal par l'aval.

On retrouve à l'amont du paléochenal les deux sous unités  $\alpha$  et  $\beta$ . L'US1 $\alpha$ , que l'on retrouve sur UXE1C1 entre 178 et 179,95 m, se caractérise par une alternance de passées sableuses grossières et moyennes brunes à brun foncé. Le D<sub>50</sub> moyen est important à 1184  $\mu$ m et atteint 3295  $\mu$ m au maximum à 259 cm, tandis que le D<sub>99</sub> moyen est de 1897  $\mu$ m et atteint 6293  $\mu$ m au maximum (**Figure 6.11**). Le pourcentage de gravier est élevé pour cette unité et atteint régulièrement 25 % du poids total des échantillons. Tous les échantillons de cette unité se retrouvent sur le segment PQ de l'image CM. Leurs caractéristiques granulométriques renvoient à celles de dépôts sableux de bancs actifs de chenaux principaux et secondaires actuels (**Figure 6.11**).

Ensuite, l'US1 $\beta$  se caractérise par des lits sableux moyens à fins de couleur assez pâle, de beige

clair à jaune clair, en passant par des teintes orangées sur UXE1C1 et UXE1C3, ce qui pourrait être les témoins des remontées de nappe (**Figure 6.9**). Il est à noter que ces dépôts sont similaires à ceux de l'unité US1c d'UXE2C1 présente à la même altitude. Néanmoins en l'absence de datations, on ne peut être certain de la correspondance temporelle de ces deux unités. Les mesures granulométriques permettent de distinguer au sein de l'unité US1d deux phases sur UXE1C1 (**Figure 6.11**) :

- Une première phase de 205 à 137 cm se caractérise par plus de 75 % de sable, moins de gravier que pour l'US1 $\alpha$ , et une part de limon également moins importante. En d'autres termes, les sables de l'US1 $\beta$  semblent être bien plus homogènes et mieux triés que pour l'unité précédente. Le  $D_{50}$  moyen est de 736  $\mu\text{m}$  (plus petit que pour l'US1a) et diminue vers le haut. Les valeurs de  $D_{50}$  se situent entre 880 et 1061  $\mu\text{m}$  entre 204 et 177 cm, puis entre 361 et 686  $\mu\text{m}$  entre 177 et 138 cm, avant de brutalement chuter entre 138 et 137 cm. Les mêmes observations peuvent être faites au sujet du  $D_{99}$ . Le  $D_{99}$  moyen est de 2327  $\mu\text{m}$  entre 203 et 138 cm, atteignant un maximum à 3561  $\mu\text{m}$  à 193 cm, avant de chuter à partir de 137 cm.
- La seconde phase peut en effet être définie entre 137 et 113 cm (**Figure 6.11**). Elle se caractérise par des dépôts sableux plus fins que pour la première phase, accompagnés d'une proportion de limons bien plus importante. Le  $D_{50}$  moyen est de 130  $\mu\text{m}$ , bien plus faible que pour la première partie d'US1 $\beta$ , mais cette valeur masque une certaine hétérogénéité. Entre 137 et 126 cm, le  $D_{50}$  moyen est de 49  $\mu\text{m}$ , tandis qu'entre 125 et 120 cm il est de 383  $\mu\text{m}$ , atteignant 589  $\mu\text{m}$  à 125 cm. Enfin, entre 119 et 111 cm, le  $D_{50}$  moyen est de 41  $\mu\text{m}$  avec des valeurs qui baissent au fil des centimètres pour atteindre son minimum à 111 cm avec un  $D_{50}$  de 21  $\mu\text{m}$ . Concernant le  $D_{99}$ , celui-ci observe une valeur moyenne à 999  $\mu\text{m}$ , donc plus de deux fois plus bas que pour la phase précédente, avec de très fortes variations.

Ainsi, les valeurs de  $D_{50}$  et de  $D_{99}$  observent une décroissance du bas vers le toit de l'unité, ce qui peut être interprété comme une déconnexion progressive du chenal, avec quelques reconnections, caractérisé par le passage à 137-138 cm par exemple. La transposition des échantillons de l'US1 $\beta$  sur l'image CM actuelle confirme cette interprétation, indiquant un changement progressif du milieu de dépôt (**Figure 6.11**). Alors que les échantillons de la première phase se retrouvent dans le Segment PQ, on observe un glissement de leur positionnement vers le segment QR puis RS pour quelques-uns. Ce glissement progressif témoigne d'un passage d'environnements de dépôts dynamiques à des environnements plus calmes, voire très calme.

Ainsi, l'US1 témoigne d'une histoire hydro-sédimentaire assez différente entre l'amont et l'aval du paléochenal. On observe à l'amont du paléochenal (UXE1C1 et UXE1C3) une déconnexion progressive du chenal actif. Le transect de résistivité témoigne néanmoins d'un remplissage sableux (US1) peu large, entouré de passés probablement bien plus grossiers (**Figure 6.10**). À l'aval, le carottage

UXE2C1 expose une toute autre histoire avec un environnement moins dynamique antérieur à 786 – 543 cal. BC, puis une série de déconnexions et de reconnexions au chenal actif à partir de cette période. À l’amont du paléochenal, les dépôts témoignent tout d’abord d’un environnement dynamique (bancs de bras principal ou secondaire ?) puis d’une déconnexion progressive du chenal actif. Aucune datation ne permet cependant de nous éclairer sur le cadre chronologique de cette déconnexion.

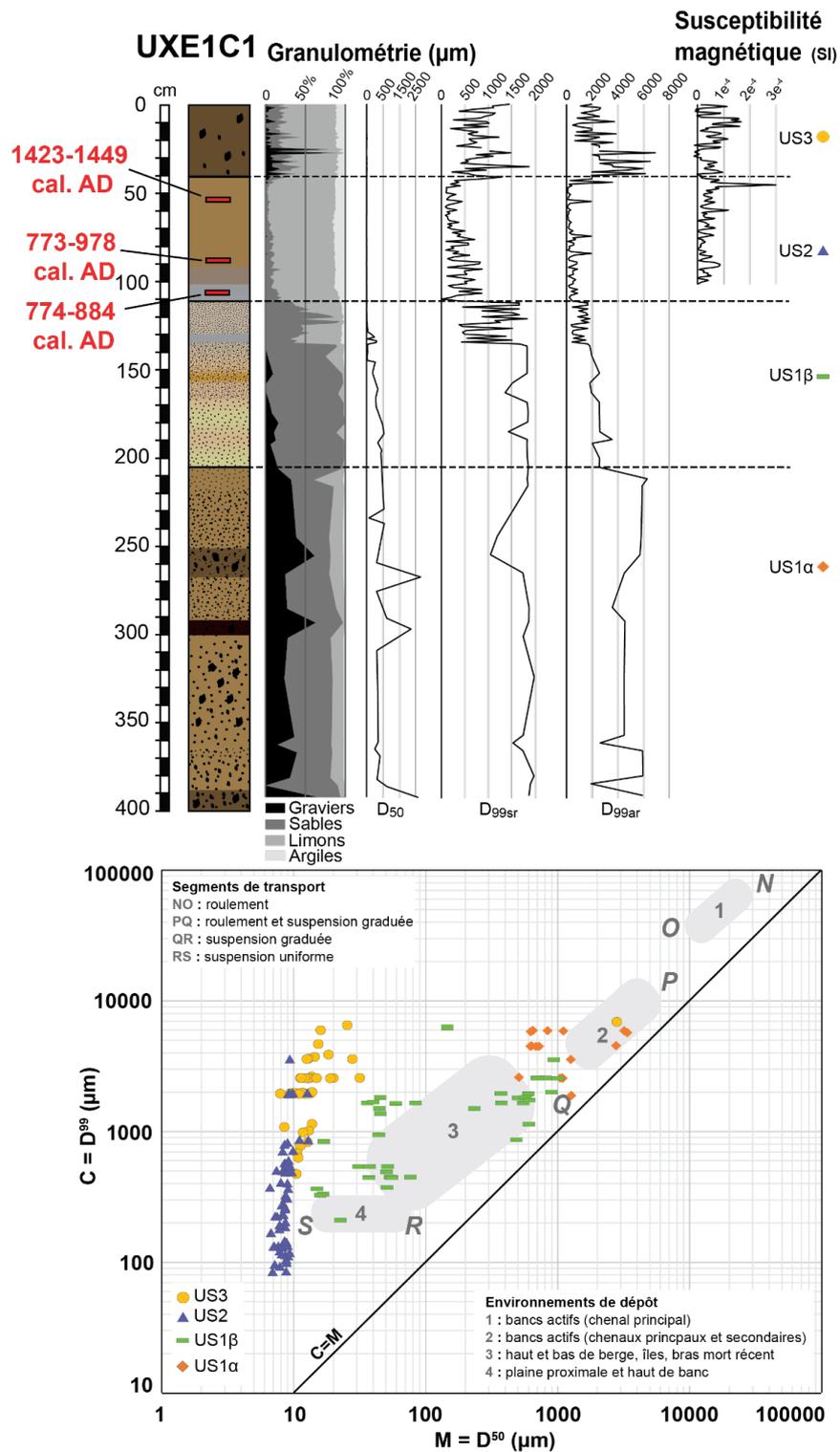
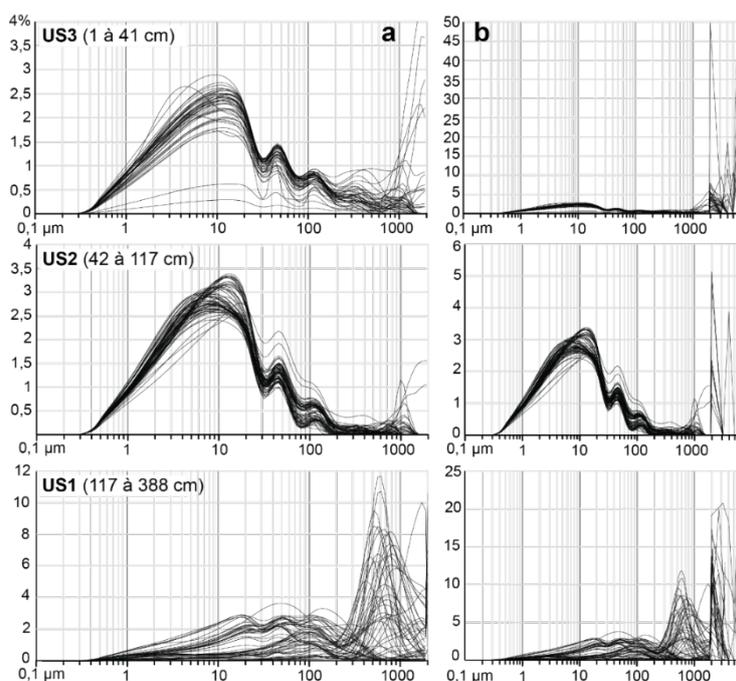


Figure 6.11. Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage UXE1C1.

### 2.2.2. Unité US2

L'unité US2 se caractérise par des dépôts limoneux, voire limono-sableux, gris à brun, que l'on retrouve sur la totalité des carottages (**Figure 6.9**). Plusieurs datations effectuées sur les carottes UXE1C1, UXE1C3 et UXE2C1 confirment la mise en place de l'unité entre le VIII<sup>e</sup> et le IX<sup>e</sup> s., jusqu'au XV<sup>e</sup> s. – XVI<sup>e</sup> s. (**Tableau 6.2**). Quelques différences sont encore une fois notables entre l'amont (UXE1C1) et l'aval (UXE2C1) du paléochenal.

On observe tout d'abord une différence d'épaisseur avec une épaisseur de 78 cm sur UXE1C1 à l'amont et une épaisseur de 58 cm sur UXE2C1 à l'aval. De plus, une phase de dépôt plus grossier apparaît sur UXE2C1 entre 181,3 m et 181,4 m caractérisée par une matrice sableuse moyenne et grossière incluant plusieurs particules millimétriques (**Figure 6.9**). Cette courte phase ne se retrouve pas à l'amont du paléochenal. Sur UXE1C1, les mesures granulométriques témoignent d'un  $D_{50}$  assez stable tout au long de l'unité à 8,8  $\mu\text{m}$  en moyenne. En revanche, le  $D_{99\text{ar}}$  subit des fluctuations, avec une valeur moyenne à 523  $\mu\text{m}$ , mais un maximum à 3602  $\mu\text{m}$  (à 45 cm) et un minimum à 85  $\mu\text{m}$  (à 64 cm). Ces caractéristiques correspondent à des dépôts de débordement limoneux de plaine proximale ou distale. Ces dépôts se disposent de la même manière sur l'image CM que ceux de LEV et OIE et font apparaître le même problème déjà évoqué de non-correspondance avec les dépôts actuels, (**Figure 6.11**). Répartis entre les segments QR et RS, Les positions de ces dépôts limoneux sur cette image témoignent bien d'un  $D_{50}$  stable, mais d'un  $D_{99}$  qui varie beaucoup plus. Ces deux caractéristiques sont nécessaires à la détection des événements de crue et rendent cette unité sédimentaire idéale pour l'étude des événements passés.



**Figure 6.12.** Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (UXE). **a** : courbes granulométriques entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 2000  $\mu\text{m}$ . **b** : courbes avec tailles > 2000  $\mu\text{m}$ .

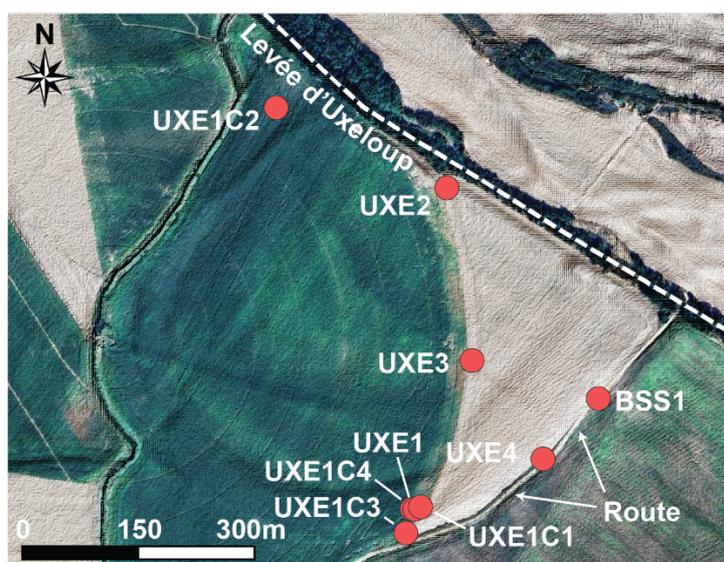
### 2.2.3. Unité US3

Enfin, l'US3 se caractérise par une matrice limono-sableuse brun foncé. Cette unité se distingue de la précédente par sa proportion bien plus importante de gravier et dans une moindre mesure de sable (**Figure 6.9, Figure 6.11**). On peut observer sur la **Figure 6.12** que la distribution granulométrique des échantillons est quasi similaire à celles des échantillons de l'US2, mis à part pour la queue de répartition grossière. En effet, la part de particules grossières supérieures à 2000  $\mu\text{m}$  (gravier) dépasse régulièrement 10 % du poids total de l'échantillon et va jusqu'à 71 % à 26 cm et 81 % à 29 cm (**Figure 6.11**). À partir de 42 cm et jusqu'à la surface, on observe en effet plusieurs changements d'ordre granulométrique. Les valeurs de  $D_{50}$  augmentent légèrement, passant à 13,8  $\mu\text{m}$  contre 8,8  $\mu\text{m}$  pour l'unité précédente, mais montrent surtout beaucoup plus de variations comme ce qu'on peut voir plus précisément sur la **Figure 6.14**. Les valeurs de  $D_{99\text{sr}}$  et  $D_{99\text{ar}}$  atteignent également des valeurs bien plus élevées que celles de l'US2, avec une moyenne de  $D_{99\text{sr}}$  à 806  $\mu\text{m}$  et du  $D_{99\text{ar}}$  à 2584  $\mu\text{m}$ .

Cette différence pourrait avoir la même origine que les perturbations également observées sur l'enregistrement du paléochenal LEV sur les mêmes premiers 40 cm de profondeur. Comme dans le cas de LEV, le paléochenal se trouve sur une parcelle agricole cultivée, probablement depuis au moins le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (d'après la **carte de 1755**). Ces perturbations pourraient être la conséquence du labour au fil des siècles. Cependant, si les labours peuvent expliquer la variabilité des valeurs granulométriques, ils n'expliquent pas les valeurs élevées de  $D_{50}$  et le  $D_{99}$ . Pour l'expliquer, plusieurs hypothèses peuvent être émises. Premièrement, la parcelle cultivée sur laquelle ont été réalisés les deux carottages se trouve directement en arrière de la levée (**Figure 6.13**). Le remblai utilisé pour sa construction, et qui se caractérise par une granulométrie plus grossière que celle des dépôts de crue de plaine distale ou proximale, a très bien pu ruisseler et avoir été entraîné par les machines agricoles au fil des années et siècles. Deuxièmement, la parcelle se situe également au pied d'une route, dont le remblaiement semble être constitué des sables de Loire. Ce remblai ruisselle également vers la parcelle. Enfin, il ne faut pas oublier l'apport potentiel des crues elles-mêmes. S'il est certain que certaines parties de la levée furent emportées lors de crues passées, notamment lors des événements de 1846 et 1856, nous ne connaissons pas la localisation exacte (**Gautier et al., 2022**). Ces particules grossières sont-elles le témoin de brèches dans la levée puis remaniées par le labour ? Difficile de conclure pour le moment. Ce qui est en revanche certain, c'est qu'il est impossible de détecter la trace d'événements hydro-sédimentaires au sein de cette unité sédimentaire à cause de la perturbation.

Depuis la déconnexion totale du paléochenal étudié au chenal actif, la sédimentation fine de débordement caractérisée par les unités US2 et US3 reste également plus importante à l'amont qu'à l'aval du paléochenal. Sur UXE2C1, la datation  $^{14}\text{C}$  effectuée à 46,5 cm indique une date à 655 – 827 cal. AD, autrement dit une valeur de sédimentation de 0,03 cm/an environ. À l'amont, sur UXE1C1, cette sédimentation fine s'est faite à une vitesse de 0,08 cm/an. Bien qu'elle soit deux fois plus

importante qu'à l'aval, cette valeur reste faible comparée au site de LEV.



**Figure 6.13.** Situations des carottages d'UXE vis-à-vis de la route et de la levée. Image satellite Google avec ombrage réalisé à partir du MNT Lidar.

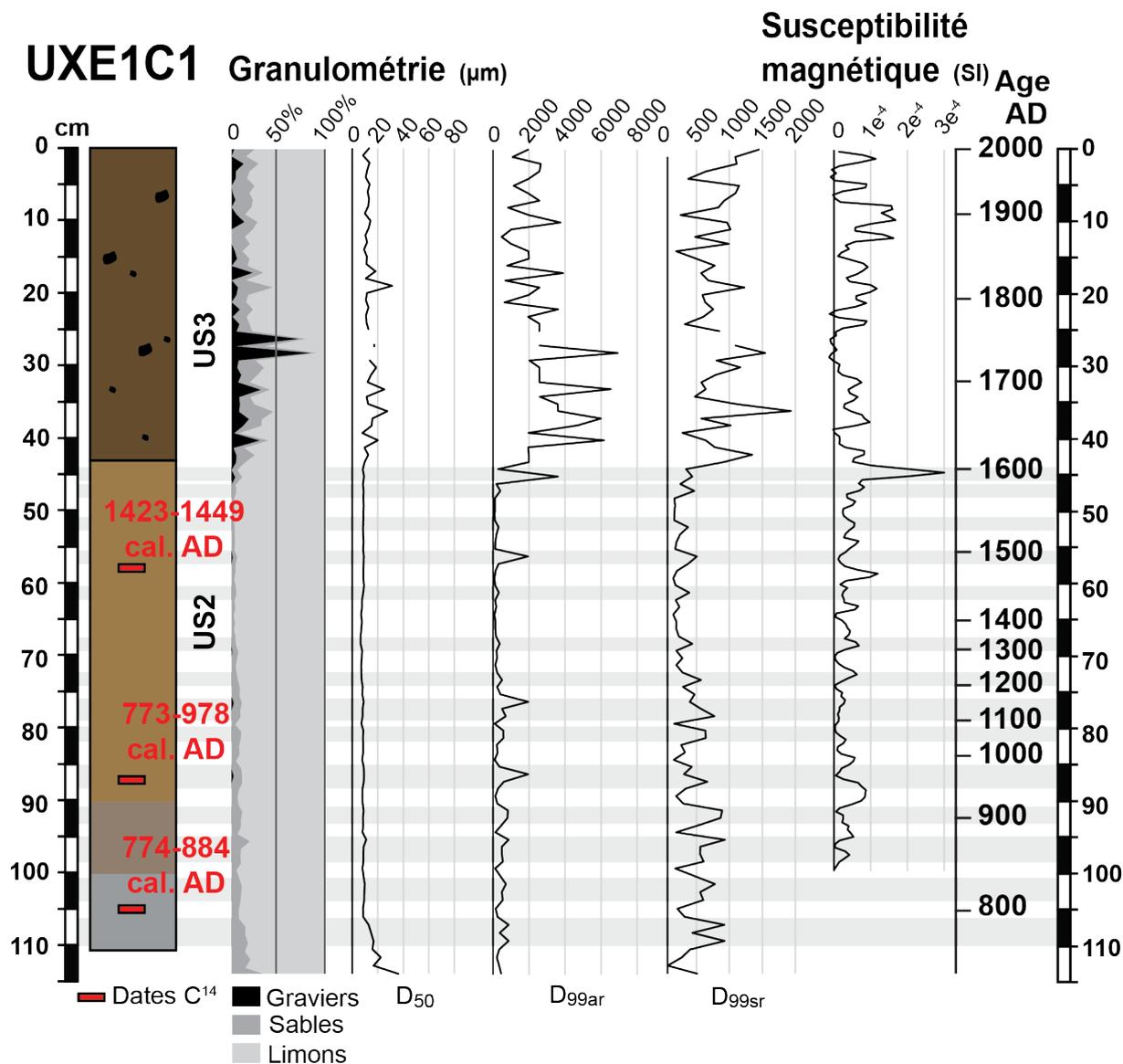
En conclusion, on observe une différence d'évolution histoire entre l'amont et l'aval du paléochenal UXE. Si l'enregistrement à l'amont témoigne d'une déconnexion progressive du chenal actif, les dépôts de l'aval du paléochenal témoignent d'un dynamisme plus important et de plusieurs réactivations. Suite à la déconnexion totale du paléochenal, c'est à l'amont de celui-ci que l'on retrouve l'enregistrement limoneux le plus important, l'US2 du carottage UXE1C1 constituant un enregistrement idéal pour la détection des événements de crue.

### 2.3. Détection des événements de crue

De nombreux pics granulométriques sont détectables au sein de l'US2 du carottage UXE1C1 grâce au  $D_{99ar}$  et  $D_{99sr}$  (Figure 6.14). Tout comme dans le cas de LEV, on observe plusieurs cas de figure. Premièrement, on détecte plusieurs pics d'une épaisseur d'un seul centimètre, notamment à 73, 68, 61, 56, 52, 47 et 45 cm. Plusieurs autres pics se répartissent sur deux centimètres, notamment à 114-115 cm, 91-92, 85-86 et 80-81 cm. Enfin, il y a plusieurs clusters de pics, notamment entre 106 et 110 cm, entre 101 et 103 cm, 95 et 98 cm et entre 76 et 78 cm.

Contrairement à LEV, les valeurs des pics granulométriques peuvent être très différents suivant les centiles  $D_{99sr}$  et  $D_{99ar}$  (Figure 6.14, Figure 6.15). Si le pic à 45 cm apparaît comme un des pics les plus grossiers avec une valeur de  $D_{99ar}$  à 3602  $\mu\text{m}$ , sa valeur de  $D_{99sr}$  n'est que de 373  $\mu\text{m}$ . La même observation peut être faite pour le centimètre 56 avec une valeur de  $D_{99ar}$  à 1947  $\mu\text{m}$  et une valeur de  $D_{99sr}$  à 445  $\mu\text{m}$  ou encore pour le centimètre 86 avec un  $D_{99ar}$  à 1955  $\mu\text{m}$  et un  $D_{99sr}$  à 246  $\mu\text{m}$ . Pour tous les autres pics, les valeurs de  $D_{99sr}$  et  $D_{99ar}$  sont similaires ou très proches (Figure 6.14, Figure 6.15). Ainsi, si l'on prend en compte le  $D_{99ar}$ , les pics granulométriques les plus grossiers sont ceux à 86, 76,

56 et 45 cm (**Figure 6.15**). Mais si l'on prend en compte le  $D_{99sr}$ , ce sont les centimètres 108, 106, 95, 92, 91 et 78 qui observent les valeurs les plus importantes. Mis à part ces quelques différences, nous en observons peu de supplémentaires significatives sur la **Figure 6.15** parmi la granulométrie des différents pics détectés.



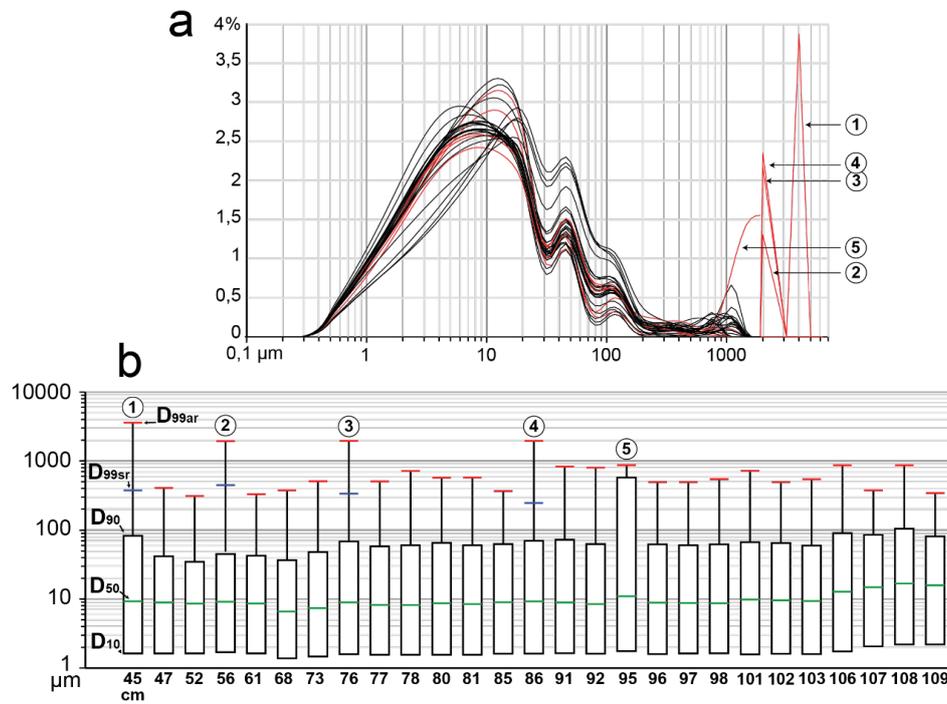
**Figure 6.14.** Détection de pics granulométriques au sein du carottage UXE1C1. Les bandes grises correspondent aux pics granulométriques significatifs.

## 2.4. Chronologie des événements de crue

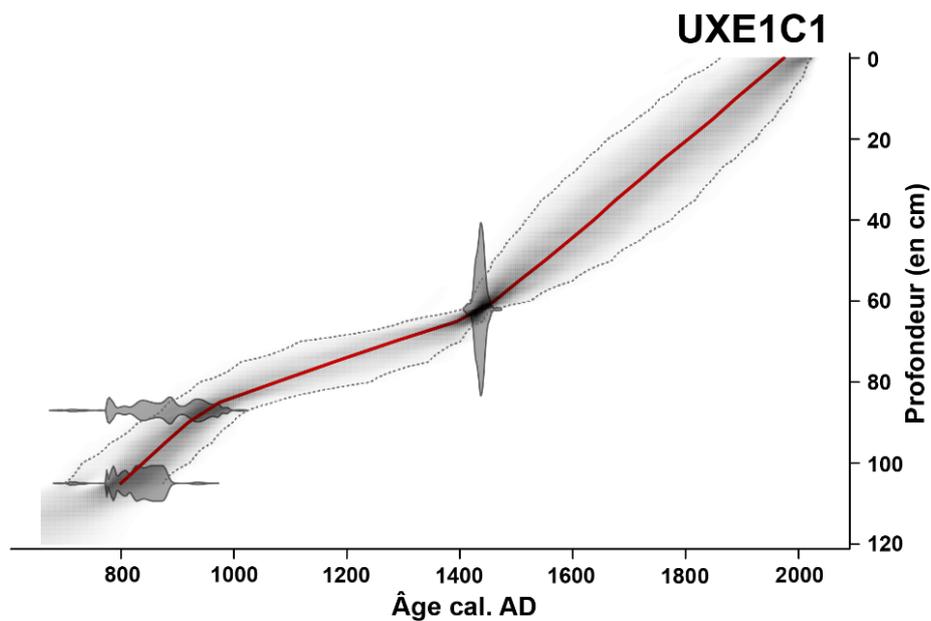
Nous disposons de trois datations réalisées au sein de la carotte UXE1C1 (**Tableau 6.2**) ayant permis de réaliser un modèle âge-profondeur avec plus de précision que celui réalisé pour le paléochenal LEV (**Figure 6.16**). La fiabilité du modèle reste tout de même assez relative, car ne reposant que sur trois datations <sup>14</sup>C.

Le modèle-âge profondeur nous renseigne tout d'abord sur une sédimentation du paléochenal

caractérisée par différents rythmes. La sédimentation apparaît importante du VIII<sup>e</sup> à la fin du IX<sup>e</sup> s. avec une valeur de 0,10 à 0,12 cm/an. On observe ensuite une très forte diminution de la sédimentation entre le X<sup>e</sup> et le début du XIV<sup>e</sup> s. avec des valeurs de 0,04 à 0,05 cm/an. Puis, à partir du XV<sup>e</sup> s. jusqu'à nos jours, on retrouve une sédimentation similaire à celle des VIII<sup>e</sup> et IX<sup>e</sup> s. autour de 0,11 cm/an.



**Figure 6.15.** a : courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques (UXE). b : boîtes à moustache représentant le D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub>, D<sub>99sr</sub> et D<sub>99ar</sub> de tous les pics granulométriques de l'US2.



**Figure 6.16.** Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations d'UXE1C1. Réalisé à l'aide du modèle bayésien Bacon du package R (Blaauw et Christen, 2011).

Malgré les différents rythmes, ces résultats rendent compte d'une sédimentation générale condensée et peu d'évènements sont finalement détectés par siècle (**Figure 6.14**). Concernant les siècles renseignés grâce aux archives documentaires (cf. **chapitre 5**), seuls deux évènements sont détectés au cours du XV<sup>e</sup> s. et trois pour le XVI<sup>e</sup> s. Les perturbations granulométriques de l'US3 empêchent d'étudier les dépôts probablement à partir du début du XVII<sup>e</sup> s., ce qui nous ampute donc d'une grande partie de l'enregistrement récent. Nous pouvons tout de même tenter quelques rapprochements pour l'enregistrement non perturbé entre les pics granulométriques détectés et les crues exceptionnelles connues. Concernant les deux évènements du XV<sup>e</sup> s., celui de 61 cm pourrait correspondre à une des trois crues exceptionnelles relevées au sein des documents : celle de 1458, 1465 ou 1469. Le second évènement à 56 cm pourrait correspondre à une des deux crues exceptionnelles de 1494 ou 1496. Celui de 52 cm pourrait être rapproché des évènements de 1516, 1519, 1527 ou 1542 et enfin ceux de 47 et 45 cm des crues exceptionnelles de 1586 et 1608.

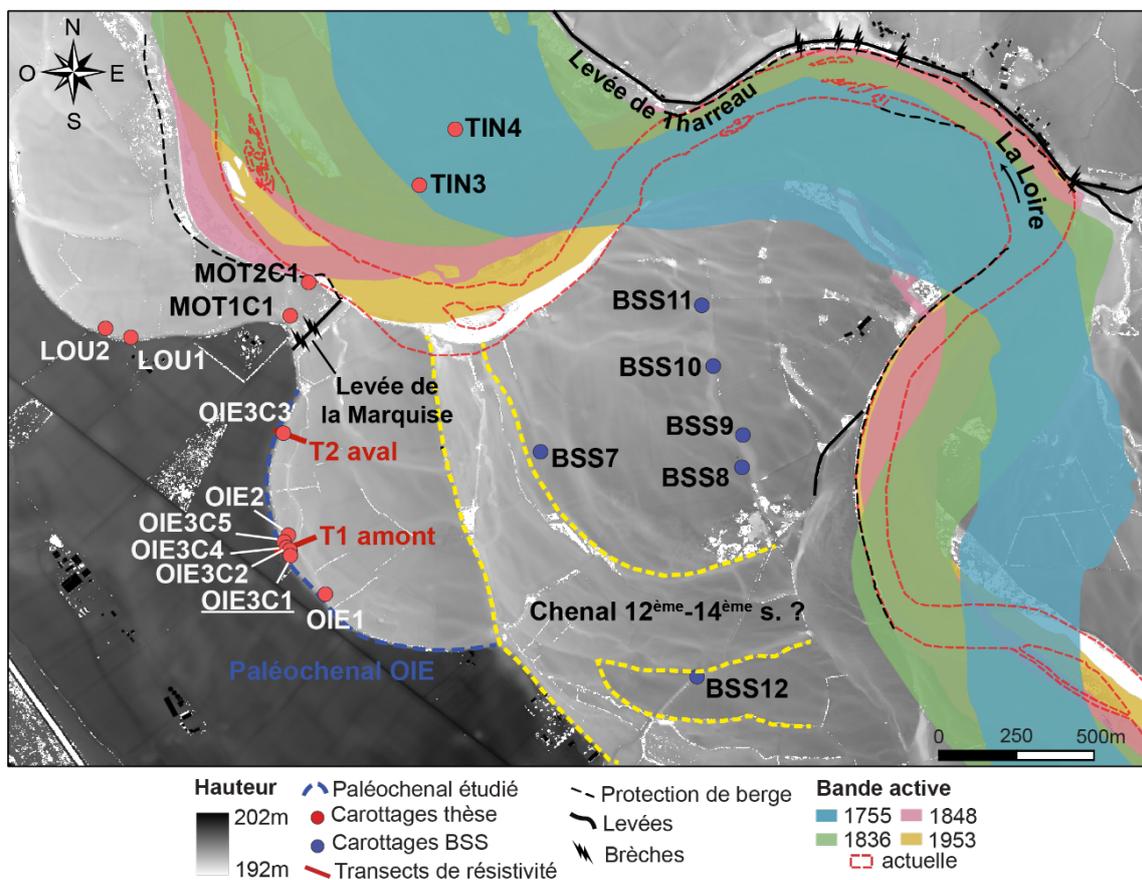
La possibilité de rapprocher ces dépôts de crue avec plusieurs évènements exceptionnels pose la question suivante : ces pics granulométriques sont-ils provoqués par un évènement ou par plusieurs crues exceptionnelles successives ? Dans le cas où les pics seraient provoqués par plusieurs évènements, cela expliquerait le faible nombre de pics, dépendant de l'occurrence de plusieurs évènements exceptionnels à la suite. Dans le cas où un pic serait provoqué par un seul évènement, comment expliquer l'absence de traces des autres crues exceptionnelles ? Il est possible dans ce cas que les évènements détectés à l'aide de la méthodologie mise en place dans le cadre de cette thèse correspondent aux évènements les plus exceptionnels. Concernant les XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s. et selon les archives documentaires (cf. **chapitre 5**), les crues de 1494, 1519, 1586 et 1608 semblent être les plus fortes suivant la description des dégâts, et pourraient tout à fait correspondre aux dépôts de crues détectées. Concernant les siècles antérieurs au XIV<sup>e</sup> s., en l'absence de données documentaires et historiques précises (cf. **chapitre 5**), il est impossible de relier les pics granulométriques à des évènements connus. Enfin, il faut également émettre l'hypothèse d'une érosion des dépôts sédimentaires, mais aucun indice ne permet de pencher à cette faveur.

Ainsi, dans le cas du paléochenal d'UXE, le paléochenal semble n'avoir enregistré la signature sédimentaire que des évènements les plus intenses au cours du dernier millénaire. Cependant, à cause de la perturbation des 40 premiers centimètres et de l'impossibilité de retrouver la signature sédimentaire des évènements de crue récents dont on connaît le débit, il reste difficile de déterminer l'intensité à partir de laquelle tel évènement déposera assez de sédiments pour la détection.

### 3. Le paléochenal OIE : un enregistrement d'évènements très succinct

#### 3.1. Présentation du paléochenal

Le paléochenal OIE est de plus grande envergure que les deux paléochenaux précédant avec une largeur de 92 à 145 m et une longueur actuelle de 1365 m. Celui-ci a été entrecoupé par des chenaux plus récents que ce soit à son aval ou à son amont. Son altitude maximale est de 197,7 m, et son altitude minimale de 196,4 m dans sa partie amont. Il est actuellement occupé par un ruisseau intermittent, affluent de la Loire (**Figure 6.17**). Ce ruisseau est probablement alimenté à la fois par le ruissellement de surface provenant de la terrasse et par les remontées de la nappe. Représenté sur la carte d'État-major, le ruisseau est présent depuis au moins la première moitié du XIX<sup>e</sup> s.



**Figure 6.17.** Localisation de tous les carottages du site de Thareau (secteur OIE).

Le paléochenal est très éloigné des bandes actives successives du XVIII<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s. (**Figure 6.17**). L'amont du paléochenal (OIE3C1) en est éloigné de 1820 à 2160 m, tandis que l'aval (OIE3C3) l'est de 470 à 880 m. Avant de s'attarder sur l'étude des crues, il est nécessaire de présenter l'histoire sédimentaire de ce paléochenal, histoire particulière dans le sens où contrairement aux deux autres paléochenaux, elle enregistre une réactivation partielle du chenal suite à une première déconnexion.

### 3.2. Description de l'enregistrement sédimentaire du paléochenal

Sept carottages (**Figure 6.18**) et deux transects de résistivité électrique (**Figure 6.19**) permettent de comprendre l'évolution morpho-sédimentaire du paléochenal OIE. Les carottages présentent quatre unités sédimentaires distinctes, sans que le substrat n'ait été atteint, probablement situé entre 8 à 14 m de la surface (cf. **Chapitre 3**) (**Figure 6.9**). L'étude stratigraphique bénéficie de 10 datations  $^{14}\text{C}$  et OSL (**Tableau 6.3**).

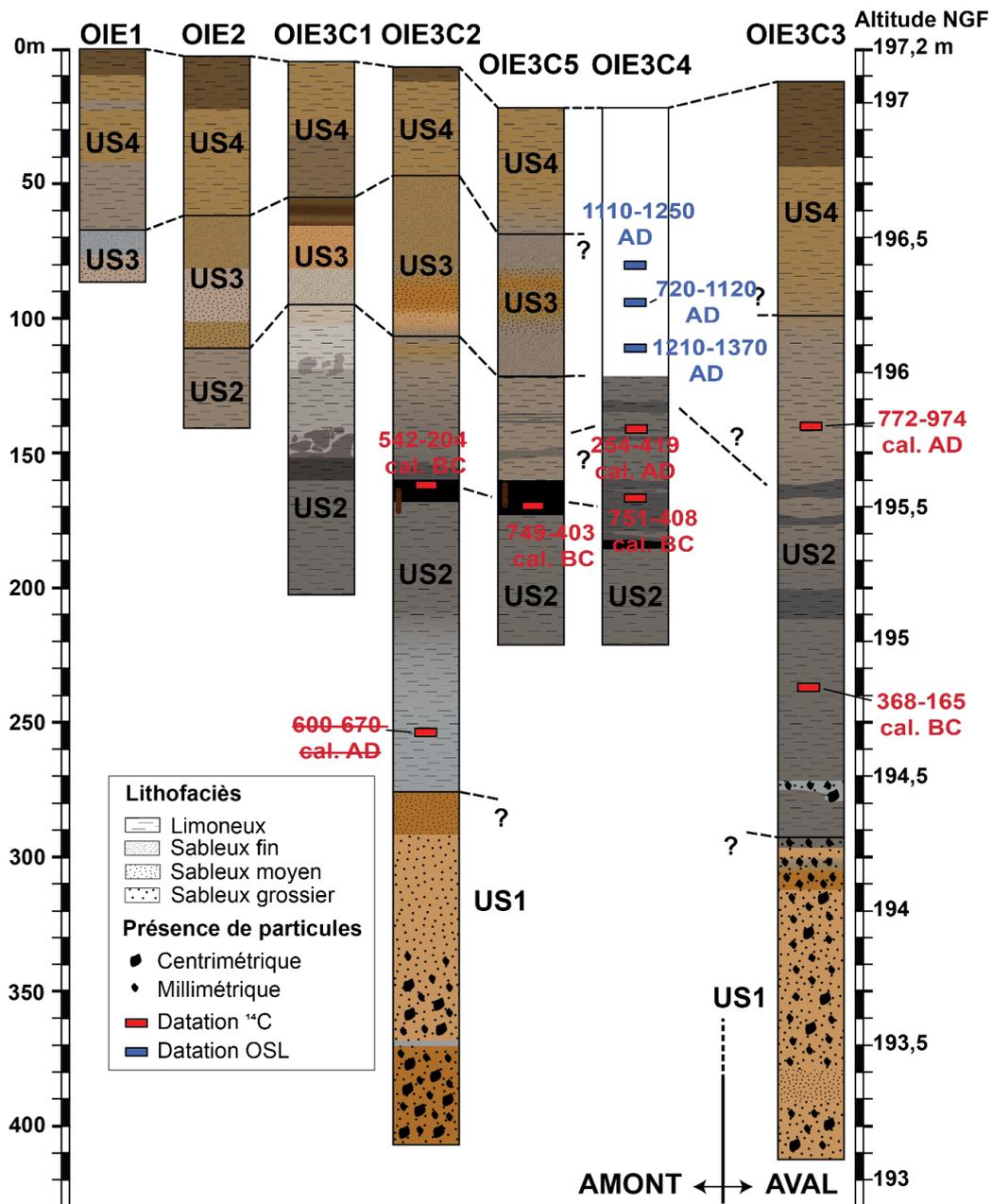


Figure 6.18. Stratigraphie du paléochenal OIE.

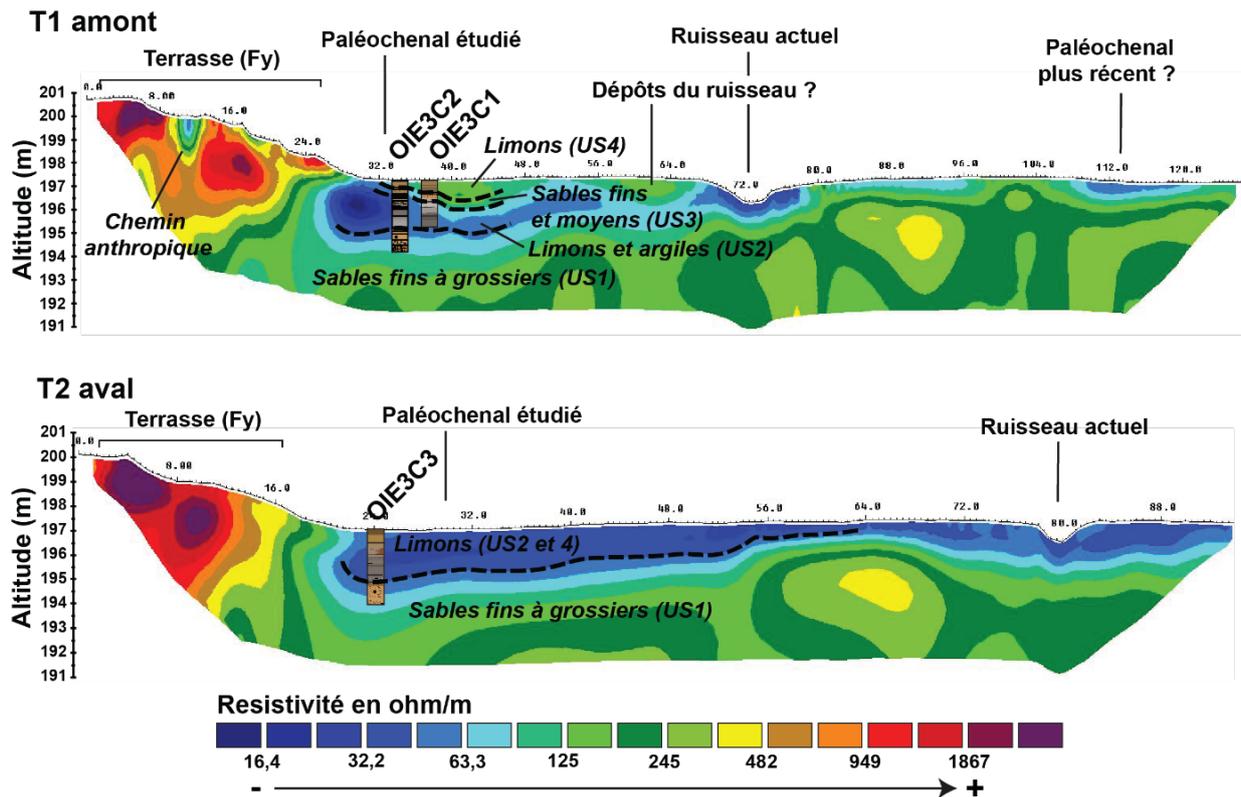


Figure 6.19. Transects de résistivité électrique du paléochenal OIE (amont et aval).

Tableau 6.3. Datations réalisées dans le paléochenal OIE.

Carotte	Profondeur (en cm)	Type de matériel	Méthode	Dates	Dates calibrées	Laboratoire d'analyse
OIE3C2	159	SO	<sup>14</sup> C	2320 ± 50 BP	542 - 347 (68,9%) cal. BC; 316 - 204 (26,5%) cal. BC	Poznan lab
OIE3C2	253	Charbon	<sup>14</sup> C	1395 ± 30 BP	600 - 670 (95,4 %) cal. AD	Poznan lab
OIE3C3	147,5	Charbon	<sup>14</sup> C	1170 ± 30 BP	772 - 901 (73,9%) cal. AD; 916 - 974 (21,6%) cal. AD	Poznan lab
OIE3C3	226,5	Charbon	<sup>14</sup> C	2190 ± 30 BP	368 - 165 (95,4%) cal. BC	Poznan lab
OIE3C4	60	Sables	OSL	1180 ± 70 AD	x	SUERC
OIE3C4	74	Sables	OSL	920 ± 200 AD	x	SUERC
OIE3C4	92	Sables	OSL	1290 ± 80 AD	x	SUERC
OIE3C4	122	SO	<sup>14</sup> C	1700 ± 30 BP	254-288 (19,9%); 323-419 (75,5%) cal. AD; 751 - 684 (22,3%) cal. BC; 668 - 634 (9,8%) cal. BC	Poznan lab
OIE3C4	150	SO	<sup>14</sup> C	2440 ± 30 BP	622 - 613 (1,1%) cal. BC; 591 - 408 (62,3%) cal. BC	Poznan lab
OIE3C5	153	SO	<sup>14</sup> C	2425 ± 30 BP	749 - 686 (16,1%) cal. BC; 666 - 640 (6,8%) cal. BC; 587 - 583 (0,3%) cal. BC; 570 - 403 (72,3%) cal. BC	U. Laval

### 3.2.1. Unité US1

La première unité US1 présente une matrice sableuse que l'on retrouve sur OIE3C2 et OIE3C3 (**Figure 6.18**). La matrice est bien plus grossière à l'aval (OIE3C3) du paléochenal qu'elle ne l'est à l'amont (OIE3C2). Sur OIE3C2, l'US1 se caractérise par des dépôts sableux très grossiers entre 342,5 à 396 cm, accompagnés de particules millimétriques à centimétriques. Puis, de 275 à 342,5 cm les sables grossiers laissent place peu à peu à des sables moyens puis fins. Si sur OIE3C2 la limite avec l'unité US2 caractérisée par des sédiments très fins est nette, elle est un peu plus estompée sur le carottage OIE3C3. Ainsi, l'unité US1 correspond à l'activité d'un chenal encore actif. Nous ne connaissons pas sa période d'activité en l'absence de datation.

### 3.2.2. Unité US2

L'unité US2 se caractérise par une matrice fine limoneuse qui se retrouve sur tous les carottages, mis à part celui de OIE1 n'étant pas assez profond. Cette unité se distingue de la précédente sur les transects de résistivité par des valeurs bien plus faibles, constituant les valeurs minimales mesurées (**Figure 6.19**). Des sables restent présents, mais en très faible proportion, moins de 5 % sur les échantillons mesurés de OIE3C1 entre 105 et 180 cm (**Figure 6.20**). Ces échantillons sont par ailleurs les plus fins mesurés sur la zone d'étude avec un mode situé entre 2 et 3  $\mu\text{m}$  pour certains d'entre eux (**Figure 6.21**), et une proportion d'argile importante, atteignant jusqu'à 21 % à 147 cm (**Figure 6.20**), inégalée sur les deux autres paléochenaux étudiés. Deux facteurs pourraient expliquer la présence exceptionnelle d'argile : la distance du paléochenal aux chenaux actifs ainsi que la présence d'un petit affluent intermittent de la Loire. Celui-ci aurait pu transporter une charge argileuse plus importante que celle présente sur la Loire. Et justement, les valeurs de susceptibilité magnétique faible pour cette unité avec des valeurs oscillant entre 0 et  $10^{-4}$  SI (**Figure 6.21**) pourraient indiquer une origine autochtone de la formation limono-argileuse. Les caractéristiques granulométriques et la transposition des échantillons sur l'image CM actuelle témoignent de processus de transport et de dépôt au sein d'environnements calmes (**Figure 6.20**).

Si cette unité semble granulométriquement assez homogène, on observe tout de même sur OIE3C3 un enregistrement sableux grossier entre 194,6 et 194,5 m, que l'on ne retrouve pas sur les carottages réalisés à l'amont du paléochenal. Cette phase sableuse pourrait être expliquée par la proximité du chenal actif à l'aval du paléochenal, un épisode hydro-sédimentaire de très forte intensité ayant laissé sa trace.

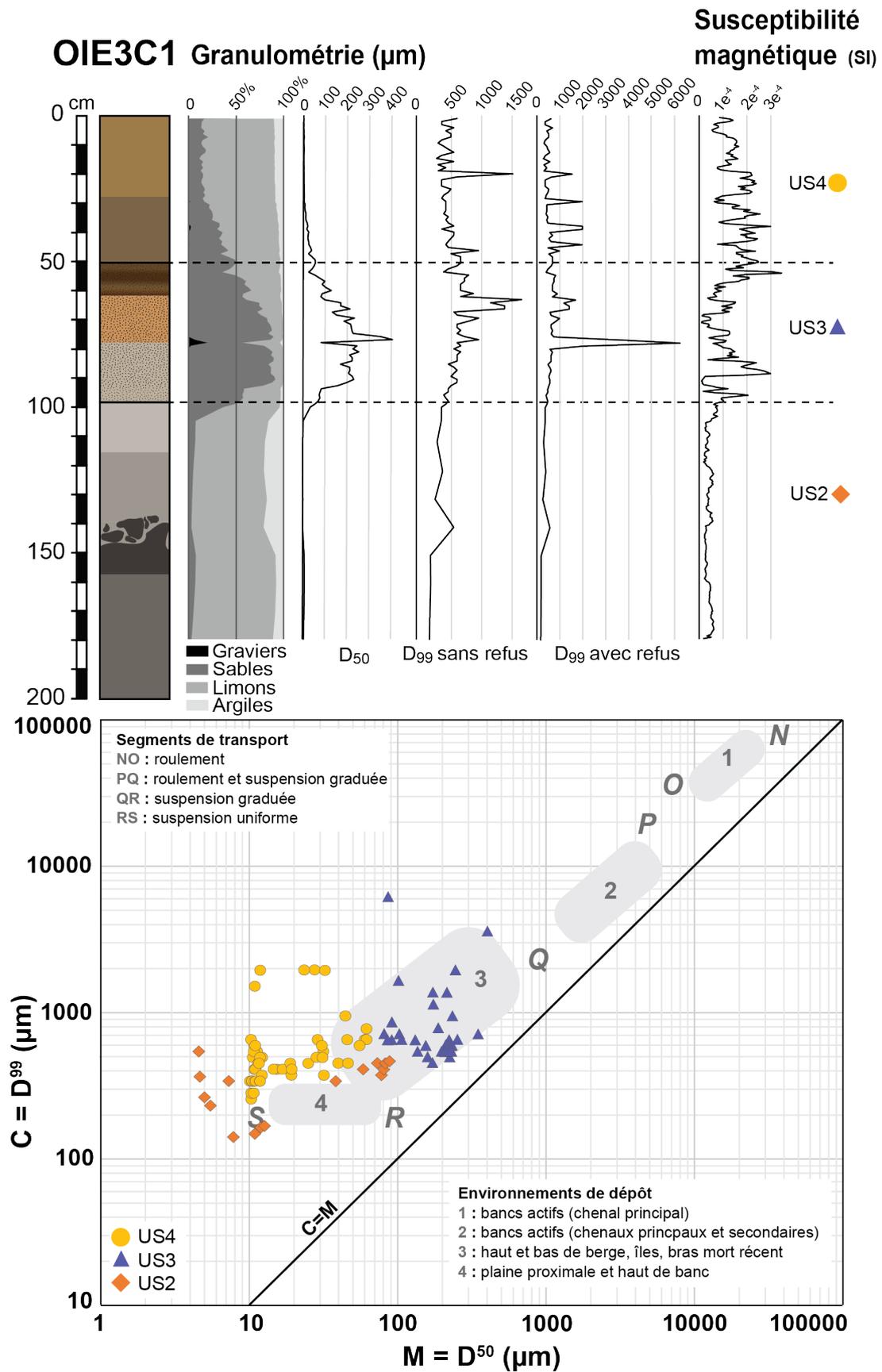
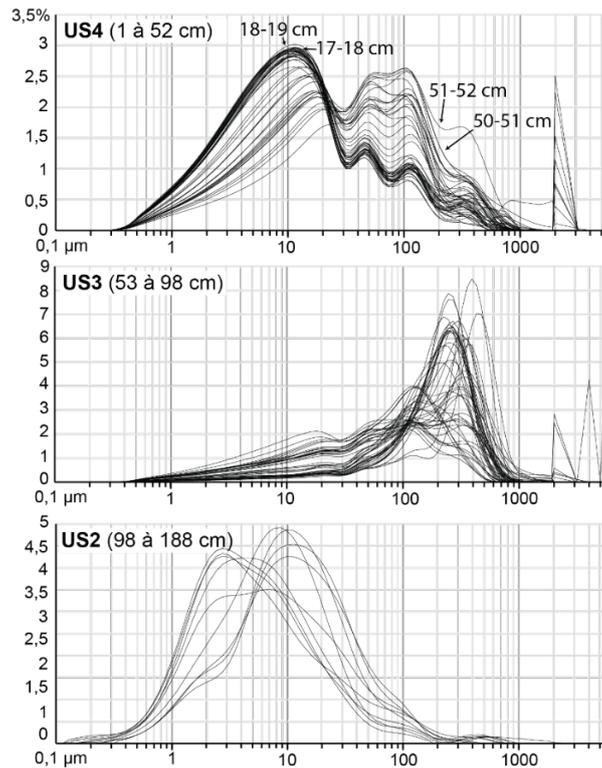


Figure 6.20. Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage OIE3C1.



**Figure 6.21.** Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (OIE).

Plusieurs datations ont été réalisées à la fois sur charbon et sur sédiment organique sur quatre des carottages (**Figure 6.18**, **Tableau 6.3**). La date la plus profonde réalisée sur OI3C2 à 194,67 cm datée de 600 – 670 cal. AD pose problème, car bien plus récente que les dates plus proches de la surface sur tous les autres carottages (**Figure 6.18**). Cette datation pourrait s'expliquer par un manque de précision dans la mesure, l'échantillon envoyé ne contenant que peu de carbone à hauteur de seulement 0,5 mgC. Ensuite, les différentes datations réalisées sur OI3C2, OIE3C4 et OIE3C5 concordent assez bien. On note plusieurs phases de dépôts de sédiments très organiques entre 195,1 et 195,9 m de profondeur. Temporellement, la première phase organique est datée de 749 – 204 cal. BC si nous prenons en compte les datations réalisées sur OIE3C2, OIE3C4 et OIE3C5. Cette phase organique n'est pas présente sur OIE3C3 compte tenu de la datation réalisée à 194,82 cm sur OIE3C3 plus récente. Deux autres phases organiques moins épaisses ont été notées sur OIE3C4 et OIE3C5 à 195,7 et 195,85 m NGF dont la plus basse est datée à 254 – 419 cal. AD. La datation réalisée à 195,8 m sur OIE3C3 datée de 772 – 974 cal. AD nous autorise à penser que ces deux phases organiques observées à l'amont pourraient cette fois-ci correspondre à celles situées sur OI3C3 à l'aval à 195,45 et 195,55 m NGF. Ces différentes phases organiques indiquent la mise en place d'un environnement fluvial calme avec une sédimentation très lente, au moins jusqu'au tournant des V<sup>e</sup> et VI<sup>e</sup> s. Les différentes datations des phases organiques de l'amont du paléochenal (OIE3C2, OIE3C4 et OIE3C5) témoignent de rythmes de sédimentation très faibles, autour de 0,01 cm/an entre 749 cal. BC et 419 cal. AD. Deux facteurs pourraient l'expliquer : le premier serait une érosion de l'enregistrement, mais aucun signe ne semble renforcer cette hypothèse. La seconde est l'éloignement du paléochenal aux chenaux actifs. Il est possible que l'amont du

paléochenal ait été éloigné de plus de 2 voire 3 km d'un chenal actif. Dans ce cadre et dans le contexte où la Loire ne transporte que peu de sédiments fins, il est possible que le paléochenal n'en ait reçu qu'extrêmement peu et seulement durant les événements les plus exceptionnels.

En revanche, la seule date dont nous disposons sur OIE3C3 à 195,8 m NGF et datée de 772 – 974 cal. AD témoigne d'une sédimentation fine limoneuse bien plus importante à l'aval du paléochenal qu'à l'amont suite à la mise en place des différentes phases organiques. Cette différence s'observe également très bien sur les transects de résistivités. À l'aval du paléochenal, ces dépôts fins constituent une vaste loupe de plus de 40 m de largeur, bien plus restreinte à l'amont du paléochenal (**Figure 6.19**). Cette différence pourrait s'expliquer par la présence d'un chenal actif plus proche de l'aval que de l'amont, probablement dans une position similaire à celle du XIX<sup>e</sup> s. (**Figure 6.17**). Tandis que l'amont du paléochenal bénéficie de dépôts fins bien moins épais, probablement en raison d'un éloignement important du ou des chenaux actifs, avant que ces derniers ne se rapprochent au cours du Moyen Âge comme en témoigne l'unité US3.

### 3.2.3. Unité US3

L'unité US3 se caractérise par une matrice sablo-limoneuse grise à brun foncé en passant par des teintes orangées témoins probables de remontée de nappe. L'US3 est présente sur tous les carottages, mis à part à l'aval du paléochenal sur OIE3C3. Le transect de résistivité réalisé à l'aval du paléochenal confirme l'absence de cette unité, apparaissant à l'amont à des valeurs plutôt élevées entre 100 et 200 ohm/m (**Figure 6.19**). L'épaisseur de l'unité est d'au maximum 60 cm sur OIE3C2 et au minimum 40 cm sur OIE3C1. Les mesures granulométriques réalisées sur OIE3C1 exposent une augmentation nette de la part sableuse, du D<sub>50</sub> et du D<sub>99</sub> caractérisant cette unité (**Figure 6.20**). Ces échantillons sableux suivent un mode unique entre 150 et 470 µm (**Figure 6.21**). Transposés à l'image CM actuelle, les dépôts de l'unité se retrouvent en totalité au sein du segment QR témoignant donc d'un dynamisme plus important que pour l'unité précédente : un ou des chenaux actifs se rapprochent (**Figure 6.20**). Afin de dater cet apport sableux, trois mesures OSL ont été réalisées à 92, 74 et 60 cm sur OIE3C4<sup>23</sup> (**Tableau 6.3**). Il fut difficile pour l'équipe du SUERC de réaliser les datations en raison du faible blanchissement des particules. La datation à 74 cm observe notamment une marge d'erreur de 400 ans. Les deux autres datations pointent en revanche vers la même période de mise en place de ces dépôts sableux, entre 1110 et 1370 cal. AD.

Cette phase sableuse pourrait donc correspondre à un rapprochement d'un chenal actif auprès du paléochenal. L'analyse du MNT Lidar permet d'identifier un paléochenal situé à l'amont et proche

---

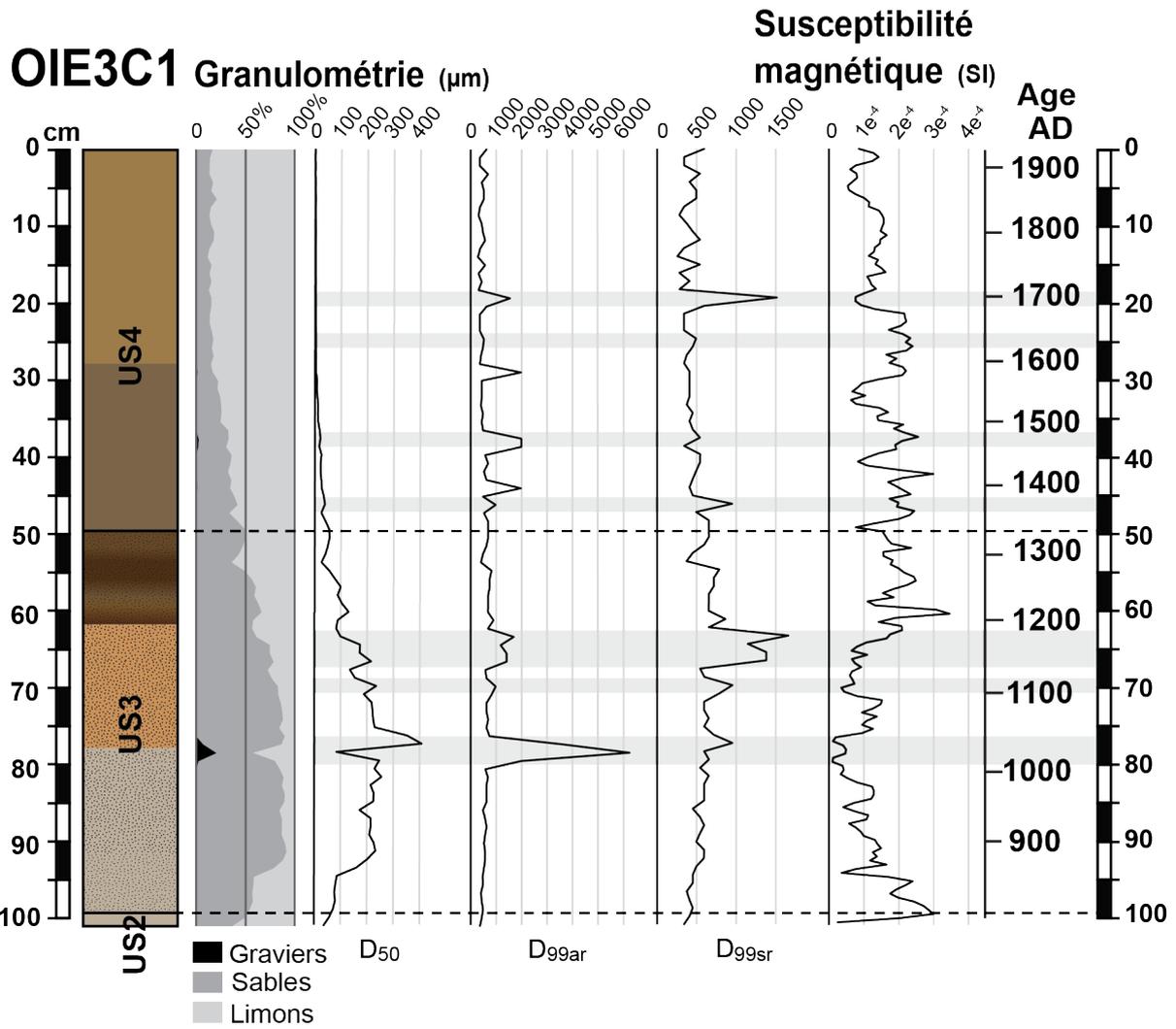
<sup>23</sup> Les limites précises de l'US3 n'ont pu être déterminées sur OIE3C4 à cause de l'utilisation du mètre de carottage pour les datations OSL (**Figure 6.18**), mais nous avons considéré qu'elles étaient similaires à celles de OIE3C5 réalisé un mètre à côté de OIE3C4.

du paléochenal étudié qui pourrait correspondre au chenal responsable des dépôts sableux (**Figure 6.17**). Celui-ci se caractérise par une altitude plus basse que le paléochenal étudié et on peut distinguer deux chenaux distincts dans sa partie amont. L'hypothèse de la présence et de la mise en cause de ce paléochenal dans l'apport sableux est renforcée par l'absence de cette phase à l'aval du paléochenal OIE dans le carottage OIE3C3. L'ouverture de ce chenal entre le XII<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> s. a probablement été assez rapide. L'augmentation de la part sableuse des sédiments sur OIE3C1 se réalise entre 105 et 98 cm. En revanche, la décroissance bien plus progressive de la part sableuse et du D<sub>50</sub> de 70 à 50 cm pourrait témoigner d'un éloignement graduel du chenal à partir de la fin du Moyen Âge vers une direction nord-nord-est si l'on tient compte du MNT Lidar et de la situation des bandes actives à partir du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 6.17**).

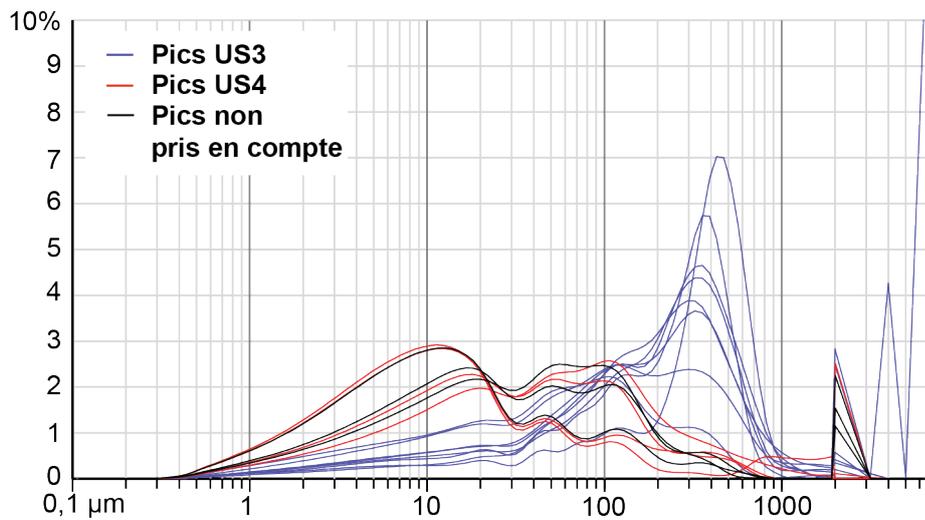
#### 3.2.4. Unité US4

Enfin, la dernière unité US4 se caractérise par une matrice limoneuse et se retrouve sur toutes les carottes (**Figure 6.18**). La transition entre l'unité US3 et US4 (ou entre l'US2 et US4 pour OI3C3) est progressive et visuellement difficile à déterminer avec précision, sauf dans le cas de OIE3C1 grâce aux mesures granulométriques (**Figure 6.20**). La part sableuse et les valeurs de D<sub>50</sub> diminuent de la base de l'unité vers la surface pour se stabiliser à 28 cm entre 10 et 11 µm. Les distributions granulométriques des échantillons sont multimodales avec deux modes limoneux à 10-20 µm et à 45-50 µm, et deux modes sableux à 110-120 µm et entre 300 et 400 µm. L'importance de ces modes sableux tend à diminuer au profit des modes de classe limoneuse de la base vers la surface de l'unité (**Figure 6.21**). La transposition de ces dépôts sur l'image CM actuelle témoigne d'un transport probablement majoritairement réalisé par suspension graduée, contrairement à ceux de l'US2 où certaines particules se retrouvent sur le segment RS. Ainsi, ces dépôts limoneux de débordement témoignent de l'éloignement progressif du chenal actif de l'amont du paléochenal depuis le XIII<sup>e</sup> s.

En conclusion, les différentes unités du paléochenal OIE témoignent d'une mobilité importante de la Loire au cours du dernier millénaire. Suite à une déconnexion et un éloignement du chenal actif probablement important et rapide sans que l'on puisse le dater, une zone humide se met en place avec un enregistrement sédimentaire fin et très lent. Ce remblaiement sédimentaire fin diffère cependant entre son amont et son aval qui y est bien dilaté comme en témoigne les deux transects de résistivité (**Figure 6.19**). Puis, un apport sableux seulement détecté à l'amont du paléochenal témoigne du rapprochement d'un chenal actif vers l'amont entre le XII<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> s., avant de s'éloigner de nouveau rapidement. En raison de la mobilité et de la distance importante entre les bandes actives successives et le paléochenal, finalement situé en plaine distale une grande partie du temps au cours des deux derniers millénaires, l'enregistrement limoneux a été peu important.



**Figure 6.22.** Détection de pics granulométriques au sein du carottage OIE3C1. Les bandes grises correspondent aux pics granulométriques significatifs. Les périodes historiques déterminées à l'aide du modèle âge-profondeur de OIE3C4 (**Figure 6.24**).



**Figure 6.23.** Courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques en D<sub>99</sub> et/ou en D<sub>50</sub>.

### 3.3. Détection des évènements de crue

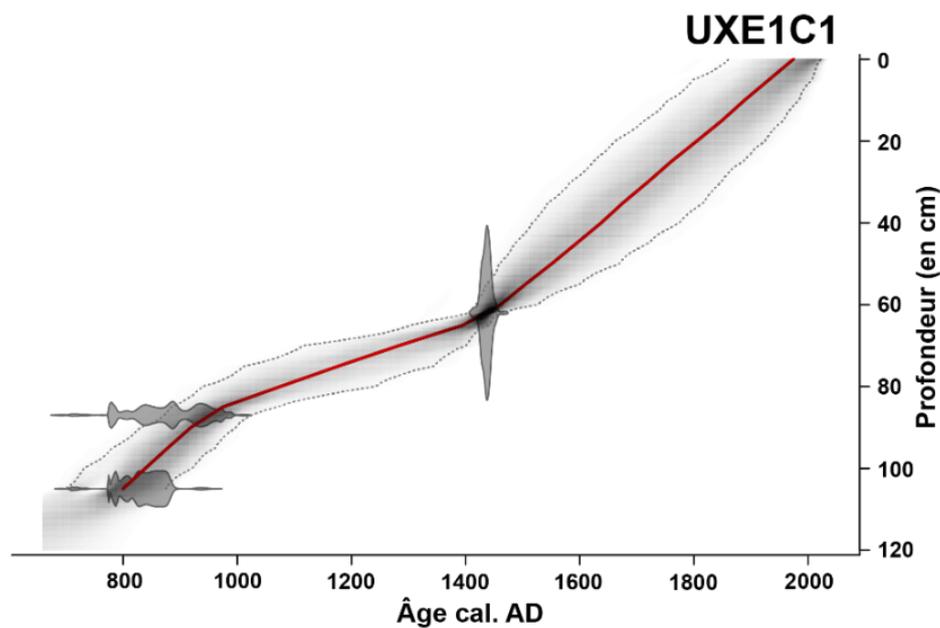
En raison du faible enregistrement limoneux récent, l'analyse du carottage OIE3C1 révèle peu de pics granulométriques (**Figure 6.22**). Trois pics ou clusters de pics sont détectés au sein de l'US3 et quatre pics granulométriques sont observables au sein de l'US4. Au sein de l'US3, le dépôt sédimentaire de 75 à 78 cm correspond au dépôt le plus grossier. Un pic granulométrique est également visible à 70 cm avec un  $D_{99sr}$  atteignant quasi 1000  $\mu\text{m}$ , puis un nouveau cluster entre 66 et 63 cm, formé par quatre centimètres dépassant les 1300  $\mu\text{m}$ . Au sein de l'US4, les quatre pics granulométriques sont observables à 46 cm, 38 cm, 25 cm et à 20 cm (**Figure 6.22**). Celui à 20 cm est de loin le plus significatif de l'US4, caractérisé par un  $D_{99sr}$  élevé à 1515  $\mu\text{m}$ . Trois pics granulométriques sont observables sur la courbe des  $D_{99ar}$  à 44, 38 et 29 cm. Ils n'ont pas été considérés comme évènement hydro-sédimentaire potentiel en raison de l'absence d'augmentation de leur taille sur la courbe des  $D_{99sr}$ . Leur valeur importante de  $D_{99ar}$  est dans les trois cas produite par la taille d'un seul gravier de taille supérieure à 2000  $\mu\text{m}$ . Ces pics sont donc peu significatifs. Comme on peut l'observer sur la **Figure 6.23**, les pics granulométriques détectés via leur  $D_{99}$  présentent une diversité de composition granulométrique que révèle leur courbe granulométrique respective. L'étude de la queue grossière des courbes granulométriques peut être totalement faussée par la présence d'une ou de quelques particules grossières. Or, ces particules isolées ne peuvent être prises comme preuve d'un évènement à part entière (**Peng et al., 2019**).

Contrairement aux paléochenaux LEV et UXE, l'exploitation de la parcelle en pâture, probablement depuis plusieurs siècles, ne semble pas avoir perturbé les 30 à 40 premiers centimètres. Malgré ça, très peu de traces d'évènements hydro-sédimentaires sont détectables dans le paléochenal. Ce manque peut s'expliquer selon deux facteurs : la forte mobilité de la Loire sur ce sous-secteur, empêchant l'interprétation des pics granulométriques de l'US3 comme révélateurs d'évènements hydro-sédimentaires, et l'éloignement des chenaux actifs comme nous l'avons vu dans la sous-partie précédente.

### 3.4. Chronologie des évènements de crue

Une dernière limite importante vient complexifier la tâche de l'étude chronologique des évènements de crue au sein de l'enregistrement sédimentaire de OI3C1 : l'absence de datation réalisée sur la carotte étudiée faute de matériel datable. Le modèle âge-profondeur de la **Figure 6.24** a été réalisé sur la carotte OIE3C4, similaire à la carotte OIE3C5, mais éloigné de 30 m du carottage OIE3C1. Malgré ça, il est certain que la mise en place de la phase sableuse datée du milieu du Moyen Âge entre le XII<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> s. est synchrone. En conséquence, les quatre évènements hydro-sédimentaires relevés au sein de l'US4 se sont déroulés entre le XIII<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> ou XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 6.22**). La distance entre OIE3C1 et OIE3C4 rend la tentative de liaison risquée entre ces traces sédimentaires et des évènements relevés dans les archives documentaires. Nous pouvons néanmoins noter que le pic granulométrique le plus significatif à 20 cm correspondrait à un évènement survenu entre la fin du XVII<sup>e</sup> s. et le début du

XVIII<sup>e</sup> s. En prenant en compte la distance importante entre les chenaux actifs et le paléochenal au XVIII<sup>e</sup> s., seule une crue d'intensité extrême pourrait être responsable d'un dépôt aussi grossier. Aucune crue extrême n'a été détectée entre le milieu et la fin du XVII<sup>e</sup> s. En revanche, le début du XVIII<sup>e</sup> s. se caractérise par une période hydrologique courte, mais très intense, ponctuée de plusieurs événements extrêmes très rapprochés : les crues de 1707, 1709, 1710 et 1711. Les premiers événements de 1707 et 1709 sont ceux qui furent les plus importants (cf. **chapitre 5**). Le pic granulométrique fut-il produit par un de ces événements, par le cluster d'événements lui-même, ou par des événements antérieurs ou postérieurs ? De nouvelles datations seraient nécessaires pour trancher.

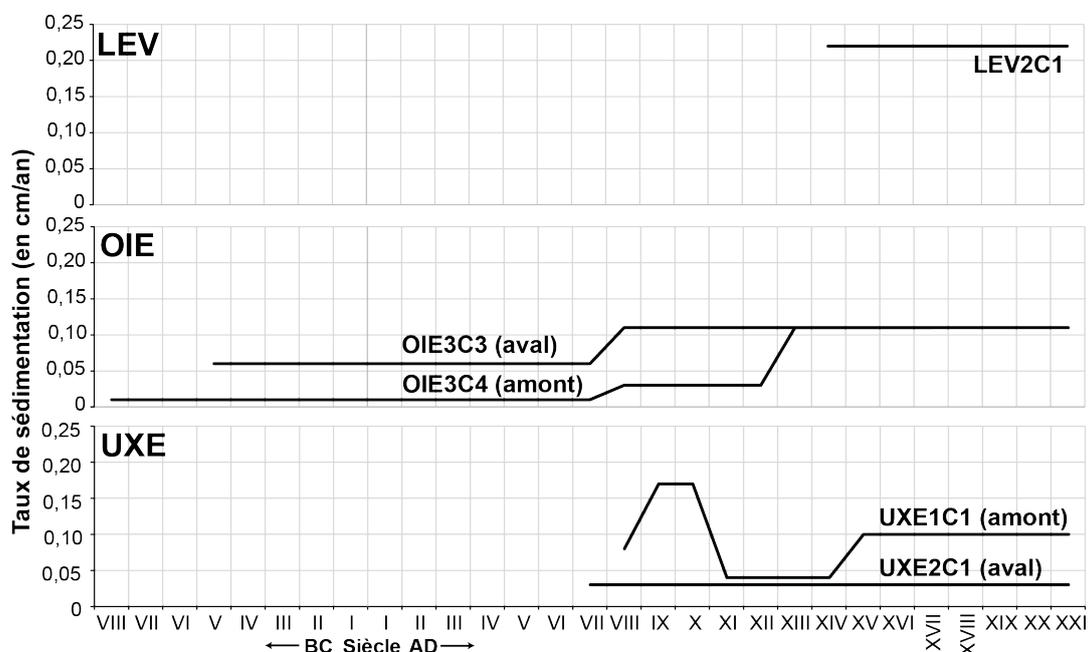


**Figure 6.24.** Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations de OI3C4. Réalisé à l'aide du modèle bayésien Bacon du package R (**Blaauw et Christen, 2011**).

\*

Pour conclure, les résultats des carottages et des analyses granulométriques de l'enregistrement sédimentaire des trois paléochenaux sélectionnés rendent compte d'histoires sédimentaires très différentes et de rythmes de sédimentations également différents (**Figure 6.25**). L'enregistrement du paléochenal LEV témoigne d'une défluviation rapide intervenue au XIV<sup>e</sup> s. Suite à cette défluviation, le paléochenal LEV enregistre un rythme de sédimentation de 0,22 cm/an du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours, le plus élevé des trois paléochenaux. Celui d'UXE illustre une différence importante d'activité entre l'amont et l'aval du paléochenal et une déconnexion plutôt progressive du chenal actif entre la fin de l'Antiquité et le début du Moyen Âge. Les rythmes de sédimentations diffèrent également entre l'aval et l'amont du paléochenal. On observe à l'aval (UXE2C1) une sédimentation très faible de 0,03 cm/an. En revanche à l'amont (UXE1C1), trois périodes de sédimentation distinctes se dégagent : une sédimentation importante du VIII<sup>e</sup> au X<sup>e</sup> s., puis bien plus faible du X<sup>e</sup> au XIV<sup>e</sup> s., et enfin de nouveau une sédimentation importante du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours (**Figure 6.25**). Enfin, l'enregistrement sédimentaire

d'OIE témoigne d'une activité encore plus ancienne, probablement de l'Âge du Bronze, et de plusieurs migrations et reconnections progressives avec une position générale très éloignée des bandes actives successives. Ainsi, si les mesures granulométriques, et notamment le D<sub>99</sub>, permettent de détecter le passage de nombreux évènements hydro-sédimentaires au sein des paléochenaux, peu de similarité fut observée entre les différents enregistrements.



**Figure 6.25.** Rythmes de sédimentations des trois paléochenaux étudiés.

L'enregistrement d'OIE est le plus ancien, mais peu d'évènements furent détectés, probablement en raison de la distance du paléochenal aux chenaux actifs successifs. Celui de LEV est à l'inverse le plus fourni, mais ne commence qu'au XIV<sup>e</sup> s., suite à sa défluviation. Cette étude souffre d'un manque important de datations rendant les différentes interprétations temporelles assez fragiles. Le passage de certains évènements de crue semble toutefois avoir été détecté sur plusieurs paléochenaux à la fois. Les évènements de 1586 et 1608 pourraient avoir laissé une trace de leurs transports sédimentaires au sein des paléochenaux LEV et UXE et ceux du début du XVIII<sup>e</sup> s., plus probablement les crues de 1707 et 1709, au sein de ceux de LEV et OIE, sans que l'on puisse les détecter à UXE en raison de la perturbation du milieu. Grâce à l'étude des archives documentaires, il est certain que ces quatre évènements de crue comptent parmi les plus intenses de leurs siècles respectifs (cf. **chapitre 5**). Ces résultats semblent indiquer que les évènements enregistrés par les paléochenaux restent limités aux crues exceptionnelles, et dans le cas d'UXE par exemple, aux évènements les plus intenses parmi ces crues exceptionnelles. Même dans le cas de LEV qui compte le nombre d'évènements détectés le plus important, leur nombre reste inférieur sur la période concernée (XIV<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> s.) au nombre de crues exceptionnelles (C4) détectées par le biais des archives documentaires.

#### 4. Un enregistrement conforme à ceux des rivières françaises et européennes

Malgré l'enregistrement hétérogène des paléochenaux étudiés, plusieurs de leurs phases se retrouvent également sur d'autres zones ligériennes, ainsi que sur d'autres cours d'eau français et européens.

L'activité hydro-sédimentaire importante au cours des VIII<sup>e</sup>, IX<sup>e</sup> et X<sup>e</sup> s. que l'on retrouve au sein de l'enregistrement sédimentaire d'UXE fut également observée sur les hauts bassins du bassin de la Loire, notamment à l'amont de la zone d'étude par **Defive et al. (2017)** qui observent entre 770 et 870 cal. AD une période d'activité hydro-sédimentaire intense. Une sédimentation importante est également détectée dans le haut bassin de l'Allier par **Ballut (2000)** au IX<sup>e</sup> s. À l'aval, en Loire moyenne, les études de **Carcaud (2004)** et **Castanet (2008)** pointent vers une période de forte activité hydro-sédimentaire au cours des X<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> s. Les différentes études du bassin rhodanien notent également une phase d'activité hydrologique intense au cours du Haut Moyen Âge, des hauts bassins rhodaniens (**Berger et al., 2008**), jusqu'au delta (**Arnaud-Fassetta, 1998**), mais aux contours temporels qui restent encore assez flous (**Salvador et Berger, 2014**).

La suite de l'enregistrement au sein du paléochenal d'UXE témoigne d'une diminution de l'activité hydro-sédimentaire au cours de l'OCM, du X<sup>e</sup> s. au début du XIV<sup>e</sup> s., diminution également observée dans le haut bassin ligérien entre 870 et 1300 par **Defive et al. (2017)**, comme en Loire moyenne entre le XI<sup>e</sup> et le XIV<sup>e</sup> s. (**Castanet, 2008**). Ces observations rejoignent celles réalisées dans le reste de la France (**Arnaud-Fassetta, 2007 ; Brochier et al., 2007 ; Castanet, 2008 ; Berger, 2015 ; Sabatier, 2017 ; Wilhelm et al., 2022**) et de l'Europe (**Thorndycraft et Benito, 2006 ; Macklin et al., 2010 ; Toonen, 2013 ; Peng et al., 2020**) rapprochant la période de l'Optimum Climatique Médiéval d'une activité hydro-sédimentaire calme. Ce calme hydro-sédimentaire s'explique par un nombre d'événements de crue plus faible et des conditions climatiques plus douces au général, limitant les débordements dans les plaines, ainsi que l'érosion générale des versants et limitant par conséquent l'apport sédimentaire. La bibliographie comporte cependant certains contre-exemples notamment sur de petits hydrosystèmes dont la sédimentation importante au cours de l'OCM trouve son origine dans l'augmentation de l'exploitation des sols par les sociétés (e.g. **De Milleville, 2023**). Dans ce cadre, il faut noter que la phase sableuse enregistrée dans le paléochenal d'OIE correspond quasi parfaitement à cette période d'activité. Nous pensons cependant que cette phase est simplement le témoin d'un déplacement « ordinaire » du cours d'eau, plus que le signe d'une activité hydro-sédimentaire accrue. Par ailleurs, l'enregistrement du paléochenal d'UXE ne présente pas d'activité accrue pour cette période.

Ensuite, la chronologie des dépôts sédimentaires du paléochenal d'UXE témoigne d'une accumulation plus importante à la charnière des XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s., ce qui laisserait entrevoir l'effet du PAG. Il faut également noter le cas de la défluviation du paléochenal LEV qui intervient au début du PAG. Suite à cette défluviation, le paléochenal enregistre plusieurs phases de dépôts importants au cours

des XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. Il reste difficile d'être certain que ces phases de dépôts soient les témoins de phases d'activité hydro-sédimentaire intenses plutôt que celui de la présence de chenaux actifs encore proches. L'interprétation de la responsabilité du PAG dans une sédimentation plus importante et rapide a déjà été largement admise sur une multitude de rivières françaises et européennes comme évoqué dans le **premier chapitre**. Une à plusieurs phases d'intense activité hydro-sédimentaire sont bien documentées dans le bassin de la Loire (Cubizolle, 1997 ; Ballut, 2000 ; Cubizolle et al., 2001 ; Straffin et al., 2002 ; Castanet, 2008 ; Steinmann, 2015 ; Defive et al., 2017). Des phases d'activité hydro-sédimentaire intenses sont également détectées dans le bassin de la Seine (Pastre et al., 2002 ; Chaussé et al., 2008 ; Pastre et al., 2019), dans celui du Rhône, que ce soit en tête de bassin ou dans le delta (Arnaud-Fassetta, 2007), sur la Garonne (Lescure, 2015 ; David, 2016), dans la plaine du Roussillon (Carozza et al., 2006), en montagne comme dans les Alpes (Peiry, 1988 ; Bravard, 1989 ; Salvador, 1991 ; Salvador et Berger, 2014 ; Wilhelm et al., 2022), dans le Massif Central (Cubizolle, 1997 ; Cubizolle et al., 2001 ; Gob et al., 2008 ; Jacob-Rousseau et Astrade, 2014 ; Delile et al., 2016) ou encore dans les Pyrénées (Antoine, 2012), ainsi qu'ailleurs en Europe (e.g. Brown, 1998 ; Thorndycraft et Benito, 2006 ; Toonen et al., 2017 ; Peng et al. 2020).

Cependant, bien que ces études aient démontré la présence de périodes intenses d'activité hydrogéomorphologique au cours du PAG, elles ne sont pas forcément contemporaines les unes aux autres. Comme l'étude des archives documentaires a pu nous le montrer, l'activité hydro-sédimentaire au cours du PAG n'est pas homogène. À l'amont de la zone d'étude, Defive et al. (2017) détecte par exemple la phase hydro-sédimentaire la plus intense des deux derniers millénaires sur la Haute Loire entre 1300 et 1425, puis une activité moins énergique entre 1425 et 1580, avant d'observer une nouvelle intensification entre 1580 et 1700, puis une nouvelle diminution de l'activité hydro-sédimentaire au cours du XVIII<sup>e</sup> s. Les résultats de cette présente étude ne permettent pas de retrouver dans les archives sédimentaires la variabilité de l'activité hydro-sédimentaire ligérienne exposée par les archives documentaires au cours du PAG.

Ainsi, l'enregistrement du paléochenal d'UXE témoigne d'un signal sédimentaire cohérent avec celui déjà exposé sur la Loire, que ce soit à l'amont ou à l'aval de la zone d'étude, et plus largement en France ou en l'Europe. La période du haut Moyen Âge semble correspondre à une période d'activité hydro-sédimentaire marquée, tandis que celle de l'OCM voit l'activité hydro-sédimentaire de la Loire s'adoucir. Enfin, celle du PAG correspond à une nouvelle accélération de la sédimentation et peut-être de la mobilité latérale. Cependant, ces conclusions générales ne reposent que sur l'interprétation d'un seul enregistrement. Et nous tenons à souligner qu'il serait nécessaire d'étudier l'enregistrement d'autres paléochenaux afin de vérifier ces conclusions. De plus, nous n'avons aucune signature de l'activité sédimentaire de la Loire à partir du XIX<sup>e</sup> s. en raison des perturbations liées à l'activité agricole. Il est donc impossible d'estimer la période d'arrêt de l'influence du PAG sur la sédimentation de la Loire, celle-ci ayant été fort probablement très perturbée par les activités et aménagements anthropiques

comme nous allons le voir plus tard.

## **5. Enseignements sur les conditions générales de la construction de la plaine alluviale au cours du dernier millénaire**

Malgré l'enregistrement d'UXE qui se montre assez conforme à de nombreux autres cas, que ce soit sur la Loire, en France ou en Europe, de nombreux problèmes et questionnements subsistent quant à l'enregistrement sédimentaire et granulométrique du passage des crues au sein des paléochenaux étudiés : comment expliquer plus précisément ce faible enregistrement et qu'est-ce que ces paléochenaux ont-ils au final réellement enregistré ? Comment expliquer les différences d'image CM entre les dépôts actuels, notamment de crue, et les dépôts plus anciens ? Nous le verrons, les hypothèses de réponse à ces questions sont révélatrices de changements dans les conditions générales de la construction de la plaine de ce secteur de Loire au cours du dernier millénaire.

### **5.1. La faible signature sédimentaire des évènements de crue**

Les résultats de la détection des traces d'évènements hydro-sédimentaires au sein des trois paléochenaux étudiés rend compte d'un nombre de crues détecté très inférieur au nombre de crues révélé par les archives documentaires, et même toujours inférieur au nombre d'évènements ayant été considéré comme exceptionnel (C4) (cf. **chapitre 5**). Alors comment expliquer le faible nombre général d'évènements enregistrés, ainsi que la différence du nombre détecté entre les paléochenaux eux-mêmes ?

L'enregistrement des trois paléochenaux ne nous permet pas de dire que les levées ont joué un rôle général en ce sens. Dans le cas d'UXE, l'enregistrement ne peut être étudié que du VIII<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> s., les perturbations agricoles empêchant les études pour les siècles les plus récents. Or, la levée d'Uxeloup n'est construite qu'à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. et ne peut donc jouer aucun rôle dans le nombre très faible d'évènement hydro-sédimentaire relevé. Dans le cas de LEV, la levée ne fut jamais terminée et fut percée en plusieurs endroits au cours des crues exceptionnelles (e.g. 1790, 1846 et 1856). L'absence d'aménagement et de levée en aval ou en amont direct du paléochenal d'OIE, malgré un enregistrement encore plus faible des évènements de crue que sur UXE et LEV, illustre plutôt une influence importante de la distance par rapport aux chenaux actifs et du rôle joué par leur mobilité. Du XVIII<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s., le site étudié (OIE3C1) est éloigné des chenaux actifs de 1820 à 2160 m. Celui d'UXE, sur cette même période, est éloigné de 420 à 870 m des bandes actives successives et celui de LEV est un peu plus proche, situé entre 370 à 647 m. **Grivel (2008)** a exposé le gradient granulométrique des dépôts de la Loire dans son cours moyen, notamment suite à la crue de 2003. C'est environ à partir d'un éloignement de 80 m d'un chenal actif que les dépôts sableux disparaissent. Il mesure ensuite 2 à 5 cm de dépôts limoneux sur les francs bords éloignés au maximum de 120-130 m d'un chenal actif. Ces mesures rendent donc compte de dépôts peu épais, notamment dans le contexte d'un évènement de

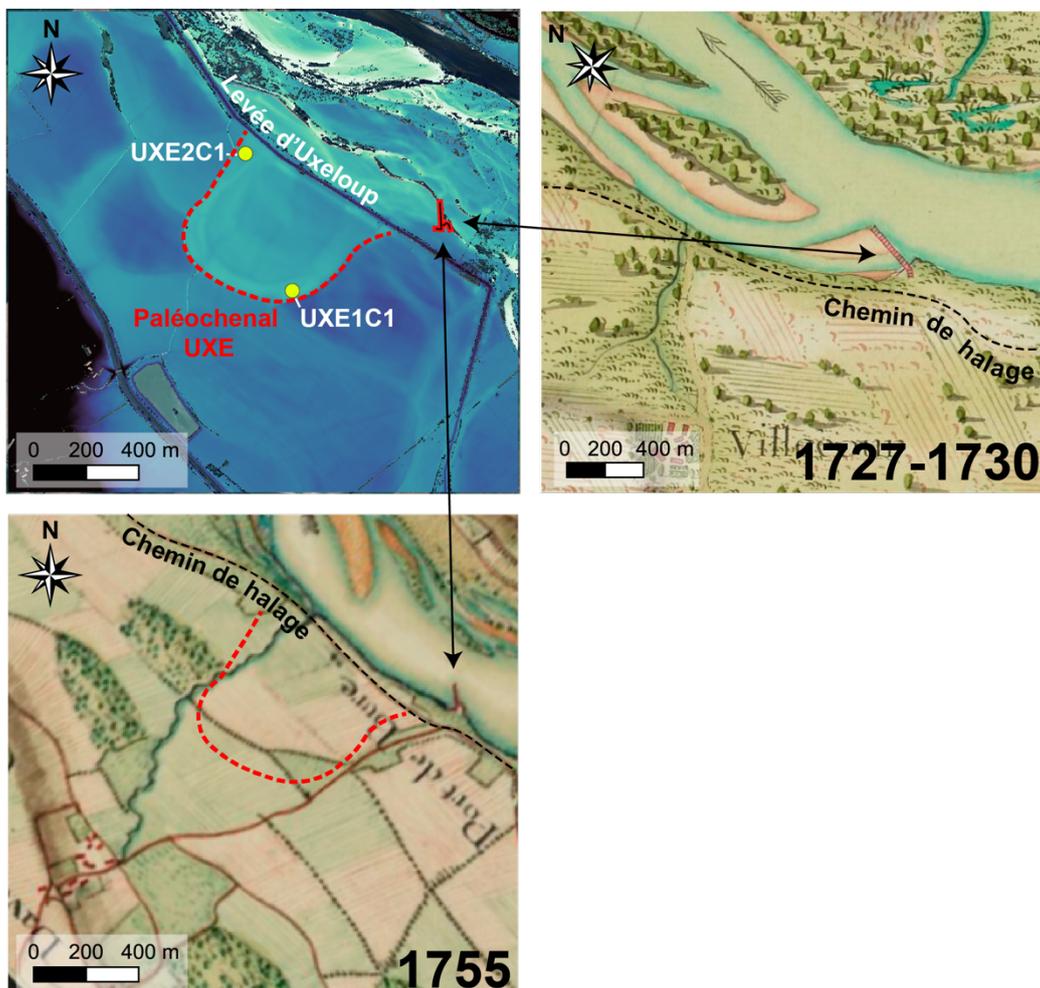
taux de retour supérieur à 20 ans.

En plus d'une proximité légèrement plus importante, trois hypothèses peuvent être émises afin d'expliquer le nombre plus élevé d'évènements recensés et le taux de sédimentation limoneux bien plus important sur LEV que sur UXE. La première hypothèse repose sur l'hypothèse qu'un bras actif (le plus important ?) fut plus proche du site de LEV du XIV<sup>e</sup> au XVII<sup>e</sup> s. qu'il ne l'a été entre le XVIII<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s., expliquant le grand nombre d'évènements détectés au cours du PAG.

Une seconde hypothèse se rapporte à la géométrie et au style fluvial de la Loire suivant les deux secteurs de Thareau (LEV) et d'Uxeloup (UXE). Du XVIII<sup>e</sup> à la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s., le cours de la Loire se caractérise sur le secteur de Thareau par un style fluvial à chenaux multiples avec un espace de mobilité bien plus important que dans le secteur d'Uxeloup où la Loire se caractérise par un style fluvial à chenal unique. Les dépôts sédimentaires plus importants sur le site de Thareau peuvent expliquer le style à chenaux multiples. Ce cas de figure était-il le même avant le XVIII<sup>e</sup> s. ? Une étude morpho-sédimentaire plus complète serait nécessaire pour l'affirmer, mais on peut le supposer à partir des études de **Steinmann (2015)** et **Castanet (2008)**. De plus, il est probable que le secteur d'Uxeloup ait également souffert d'une incision plus importante ou plus précoce que sur le site de Thareau. **Gautier et al. (in prep)** mesure une incision importante et progressive sur le site d'Uxeloup entre 1755 et 2023 (cf. **chapitre 9**). Cette incision est de l'ordre de 75 cm environ entre 1755 et 1848, puis de 70 cm entre 1848 et 1953 et enfin de 2,5 m entre 1953 et 2023. Cette incision a certainement joué un rôle important dans la déconnexion sédimentaire entre le lit actif et la plaine, limitant les dépôts sédimentaires au sein des paléochenaux. Mais cette incision a-t-elle débuté avant le XVIII<sup>e</sup> s. en pleine période du PAG ? La question n'est pas anodine, le site d'Uxeloup étant situé entre Decize à son amont et Nevers à son aval, deux cités dont les vals sont aménagés dès les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. au moins, comme nous le verrons en détail dans les **septième** et **neuvième chapitres**. Comme énoncé également dans le **troisième chapitre**, le site d'Uxeloup est en relation avec l'économie des deux cités depuis au moins le XV<sup>e</sup> s., notamment pour leur fourniture en bois. De plus, l'activité de navigation était plus importante entre Decize et Nevers qu'à l'amont de Decize. Ces différentes situations et activités ont pu amener à un aménagement général plus important entre Decize et Nevers qu'à l'amont de Decize, comprenant le site de Charrin, ce qui aurait pu provoquer une incision plus précoce sur le site d'Uxeloup, limitant les dépôts sédimentaires en plaine proximale et distale. **Steinmann (2015)** identifie par exemple une première phase d'incision du lit de la Loire à l'amont de Digoin dès le XIV<sup>e</sup> s.

La troisième hypothèse repose également sur l'influence potentielle des aménagements anthropiques sur l'enregistrement du paléochenal UXE. Comme nous l'avons dit précédemment, la levée n'est construite qu'à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> s. Cependant, on peut observer sur les cartes du XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 6.26**) que le paléochenal est situé en arrière du chemin de halage, au moins dès le XVIII<sup>e</sup> s., peut-être plus antérieurement encore. Les comptabilités des Turcies et Levées du XVI<sup>e</sup> s.

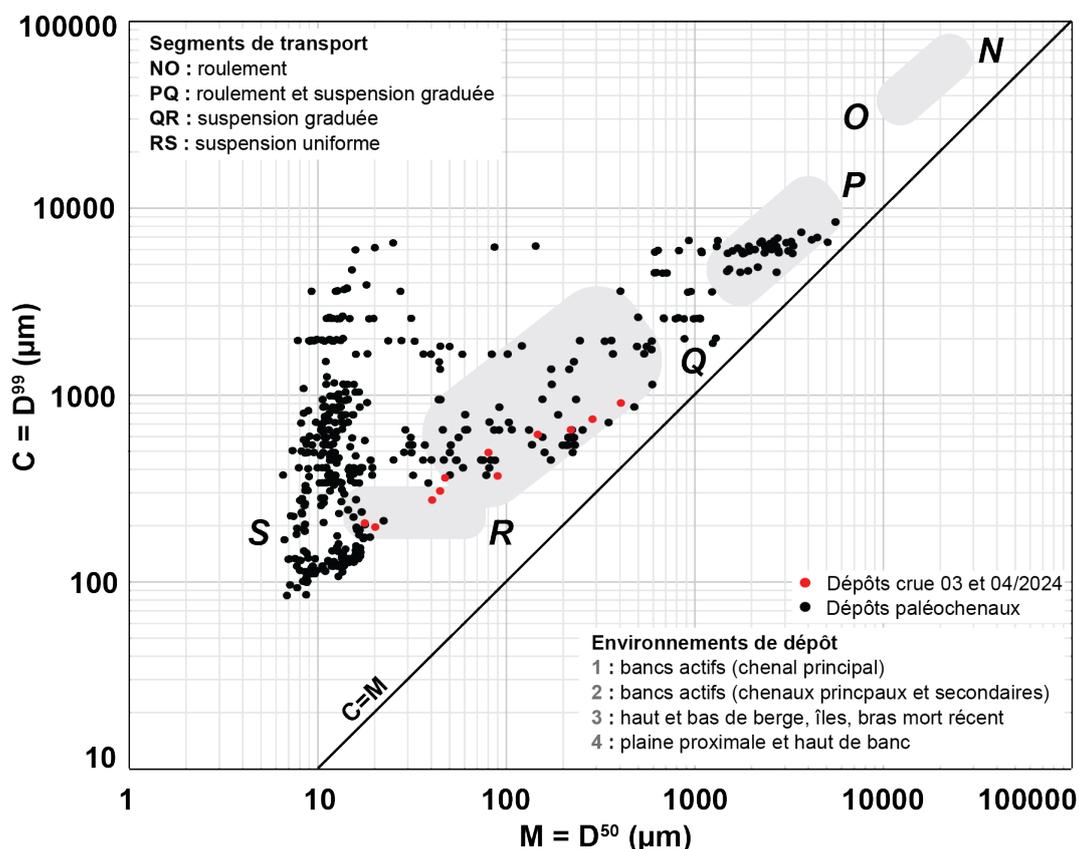
indiquent que ces chemins de halage faisaient l'objet d'une grande attention dans le secteur de Nevers, réparant les brèches dans le sentier à l'aide de pierres (AM Nevers, CC/144, 1567-1568 ; CC/152, 1577 ; CC/153, 1579 ; CC/154, 1580). L'enregistrement sédimentaire de l'aval du paléochenal (UXE2C1) indique plusieurs réactivations illustrant la capacité de la Loire à éroder ce secteur (Figure 6.26). Le corps des Turcies et Levées ou les sociétés riveraines ont donc dû entretenir ce chemin de halage. Cet entretien a-t-il requis des comblements ? Des aménagements tels que des empierrements ? Une surélévation ? Ce chemin ayant été depuis remplacé par la levée, ce qui pourrait par ailleurs peut-être témoigner de la volonté des ingénieurs de consolider définitivement ce chemin, il est impossible de répondre à ces questions. Cependant un épi dont nous ne connaissons pas la date exacte de construction est présent dans l'axe du paléochenal dès le début du XVIII<sup>e</sup> s. De plus, des « chantiers » semblent également avoir été présents sur le secteur avant la levée (Gautier et al., 2022). L'épi ainsi que ces aménagements ponctuels, sans que l'on puisse les localiser avec précision, ont également pu jouer sur le blocage de la sédimentation du paléochenal.



**Figure 6.26.** Localisation du chemin de halage et de l'épi d'Uxeloup par rapport au paléochenal étudié.

Ainsi, plusieurs facteurs peuvent expliquer le faible nombre de crues recensées au sein des paléochenaux et plus largement leur faible sédimentation au cours du dernier millénaire. La distance

aux chenaux actifs semble être le premier facteur, révélateur de la faible sédimentation du paléochenal OIE. Ensuite, si les levées ne peuvent être incriminées dans les faibles sédimentations observées en raison de leur construction tardive (mi-XVIII<sup>e</sup> s.), de plus petits aménagements, ponctuels, ont pu limiter la sédimentation, notamment du paléochenal UXE. Enfin, l'incision du plancher alluvial bien plus importante à l'aval qu'à l'amont de Decize explique également une sédimentation plus faible à UXE qu'à LEV.



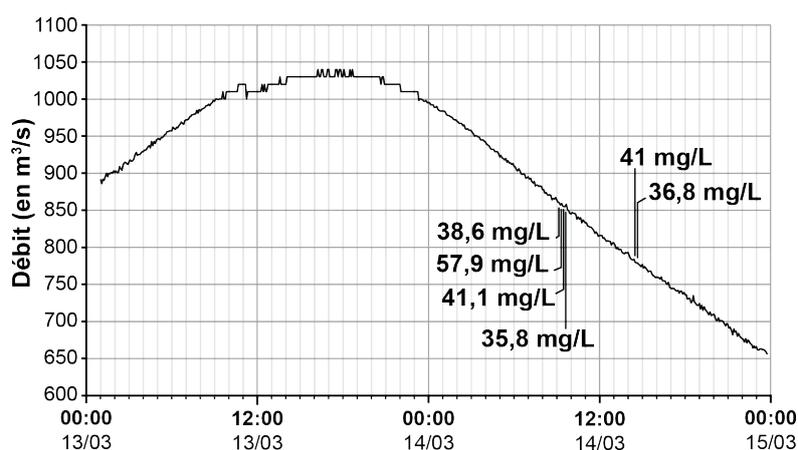
**Figure 6.27.** Dépôts des crues du printemps 2024 (points rouges) et dépôts des paléochenaux étudiés (points noirs) comparés à l'image CM actuelle (segments actuels en gris).

## 5.2. Des Images CM passées et actuelles différentes

La transposition des dépôts sédimentaires des différents paléochenaux sur l'image CM actuelle a mis en évidence une différence importante au niveau des segments QR et RS entre l'image CM passée et actuelle (**Figure 6.27**). Les dépôts sédimentaires des unités limoneuses des trois paléochenaux étudiés, et au sein desquelles nous avons détecté le passage des crues (US3 pour LEV2C1, US2 et US3 pour UXE1C1 et US2 et US4 pour OIE3C1), se disposent sur un axe vertical caractérisé par un  $D_{50}$  plutôt faible et homogène (entre 7 et 20  $\mu\text{m}$ ) et un  $D_{99}$  très hétérogène (entre 80 et quasi 7000  $\mu\text{m}$ ), sans correspondance avec les dépôts actuels (**Figure 6.27**). Nombre de ces dépôts anciens se retrouvent au sein et sous le segment RS, alors que pour rappel il fut difficile de trouver des échantillons actuels afin de définir ce segment et de renseigner le transport des sédiments par suspension uniforme (cf. **chapitre 4**). Deux des échantillons déposés par les crues de 2024 se rapprochent de la colonne verticale des dépôts

anciens, mais restent tout de même en bordure. Les échantillons limoneux anciens se répartissent également au-dessus du segment RS, transportés par suspension graduée, mais sans équivalence avec des échantillons actuels (**Figure 6.27**). Alors comment expliquer cette grande différence ?

Premièrement, elle pourrait s'expliquer par une évolution de la recharge sédimentaire. La Loire transporterait actuellement moins d'argile et moins de limons que durant les siècles, voire les millénaires précédents. Actuellement, le transport de MES est très faible sur la zone d'étude. Les mesures de MES réalisées au cours de la crue du 13 au 14 mars 2024 ayant atteint 1040 m<sup>3</sup>/s à son maximum au pont d'Imphy, lieu des mesures, présentent des valeurs de 35,8 à 57,9 mg/L (**Figure 6.28**).



**Figure 6.28.** Mesures de MES effectuées au pont d'Imphy durant la crue du 13 au 14 mars 2024 (hydro.eaufrance).

Ces mesures sont comparables à celles réalisées par **Grivel (2008)** en Loire moyenne et plus précisément au site de Belleville. Ses mesures réalisées à des débits allant de 40 à 1100 m<sup>3</sup>/s s'échelonnent entre 4 et 66,8 mg/L. Au pic de crue de 2003 ( $\approx 3500$  m<sup>3</sup>/s), les concentrations de MES s'élevèrent tout de même à un maximum de 240 mg/L. En comparaison de mesures de MES réalisées sur des rivières à débit similaires et plus faibles (**Bravard et Petit, 1997**), ces valeurs sont très faibles. Cette différence de recharge pourrait s'expliquer suivant plusieurs facteurs. Le climat plus froid et pluvieux du PAG, notamment dans le haut bassin, serait responsable d'une érosion plus marquée que pour la période actuelle du Massif Central d'où proviennent les sédiments fins. Le réchauffement progressif du climat associé au reboisement de ce haut bassin au cours du XX<sup>e</sup> s. expliquerait alors une alimentation en sédiments fins restreinte. De nouvelles études à part entière seraient nécessaires pour affirmer ou infirmer ces hypothèses, en réeffectuant notamment des mesures de MES avant et pendant le pic de crue.

Deuxièmement, l'incision du fleuve est également un facteur explicatif des différences entre les images CM. L'enfoncement du plancher alluvial de la Loire a déjà été largement observé hors de la zone d'étude (**Gasowski, 1994 ; Dambre, 1996 ; Leteinturier et al., 2000 ; Larue, 2004 ; Gautier et Grivel 2006 ; Grivel, 2008 ; Nabet, 2013 ; Steinmann, 2015**). Mais de nouvelles données viennent affirmer

l'idée que le lit s'est enfoncé bien avant le XIX<sup>e</sup> s. Dans une étude en cours, **Gautier et al. (in prep)** estime l'enfoncement du plancher alluvial sur la zone d'étude depuis le milieu du XVIII<sup>e</sup> à partir de données issues de cette thèse et sur lesquelles nous reviendrons plus en détail dans le **neuvième chapitre**. Les résultats témoignent d'un enfoncement du lit de la Loire dès le milieu XVIII<sup>e</sup> s. et au cours du XIX<sup>e</sup> s. Entre 1755 et 1848, le lit de la Loire s'enfonce de tout son long entre Decize et Nevers. Cette incision s'accélère entre 1848 et 1953 pour atteindre son paroxysme entre 1953 et 2017. Certains secteurs atteignent un enfoncement général de plus de 4 m entre 1755 et 2017, notamment à Uxeloup. Nous reviendrons plus en détail dans le **neuvième chapitre** sur les modalités de cette incision et sur ses facteurs qui trouvent principalement leur origine dans l'aménagement du val et les extractions de granulats.

En conclusion, l'incision du lit de la Loire a contribué à une déconnexion du cours d'eau avec sa plaine alluviale caractérisée par des limons de plus en plus rarement déposés en plaine proximale et surtout en plaine distale, ce qui expliquerait les différences entre les images CM passées et l'actuelle. Les effets de cette incision sont d'autant plus accentués que la Loire transporte « naturellement » peu de sédiments en suspension, une rareté qui pourrait s'être accentuée récemment suite à la fin du PAG. Il faut cependant rappeler que l'on dispose de peu de suivi de MES sur la Loire. Il est primordial de vérifier toutes ces hypothèses à partir de dépôts de crues majeures. Pour rappel, **Grivel (2008)** mesura des dépôts de l'ordre de 2 cm à 120-130 m d'un chenal actif sur les franc-bords lors de la crue de 2003, illustrant la faible épaisseur des dépôts même pendant les événements majeurs. Il ne fit toutefois pas de mesures au-delà de cette distance.

### **5.3. Mobilité et sociétés**

L'histoire sédimentaire des trois paléochenaux donne des indices avec trois exemples de mobilités, mobilité qui peut être progressive comme le cas d'UXE le montre, rapide à l'image du cas d'OIE, voire très rapide, comme le montre la défluviation de LEV. La modification morphologique de la bande active et les déplacements sableux furent tels lors de la crue exceptionnelle de 1846 que les ingénieurs durent justement commander la carte de Coumes afin de rendre compte de ces changements (cf. **chapitre 4**). **Dion (1931)** donne un exemple parlant de mobilité rapide. Un méandre à Saint-Martin-des-Lais, à l'amont de Thareau, érode 3 ha de terre et provoque un recul de la berge plus de 25 m pour la seule année 1872. Entre 1789 et 1848, au domaine des Gougnions au nord de Saint-Martin-des-Lais, la Loire se déplace à une vitesse de 5,6 m/an. Depuis 1848, elle a continué de se déplacer latéralement à une vitesse de 5,9 m/an. Plus au sud et au plus proche du bourg de Saint-Martin-des-Lais, la Loire s'est déportée latéralement en rive gauche à une vitesse de quasi 3 m entre 1848 et 2023. D'autres sous-secteurs localisés entre Saint-Martin-des-Lais et Diou plus au sud encore enregistrent des déplacements supérieurs à 3 ou 4 m/an entre 1848 et 2023. Sur le site du paléochenal d'OIE, le déplacement du chenal actif responsable de l'apport sableux de l'US3 s'est ensuite déporté sur une direction Nord Nord-Est à

une vitesse probable de 2 à 2,5 m/an entre les XIII<sup>e</sup> – XIV<sup>e</sup> s. et le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Enfin, toujours sur le site de Thareau mais du côté de Laménay à l’aval, la Loire s’est déportée vers la rive gauche à une vitesse de 3,2 m/an entre 1848 et 2023.

La mobilité latérale de la bande active ainsi que la forte mobilité des corps sableux au sein du lit mineur ont eu de fortes influences sur les sociétés riveraines de la Loire. L’absence d’établissement de ports majeurs en rive gauche trouve certainement son origine dans cette mobilité de la bande active plus forte en rive gauche. Elle explique aussi l’établissement de nombreux « chantiers », simples berges surélevées et quelques fois protégées par des protections de berge sur lesquelles sont établis des ports (**Dion, 1961**). Si les chantiers antérieurs au XVIII<sup>e</sup> s. sont probablement considérés comme temporaires, à partir du XVIII<sup>e</sup> s. ils sont largement aménagés et certains subsistent (exemple du port de Thareau). L’absence de quai à Nevers, Decize et Digoin (cf. **chapitre 3**) pourrait s’expliquer par la mobilité des corps sableux. Si les sociétés réussirent plus ou moins à contraindre la bande active en rive droite au niveau des sites urbains (cf. **chapitre 7**), l’impossibilité de dompter les déplacements des corps sableux les empêcha de construire des quais avant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. Le système institutionnalisé du balisage du lit de la Loire est la réponse sociale à la mobilité des bancs, en partie en identifiant leurs déplacements chaque année afin d’éviter les naufrages.

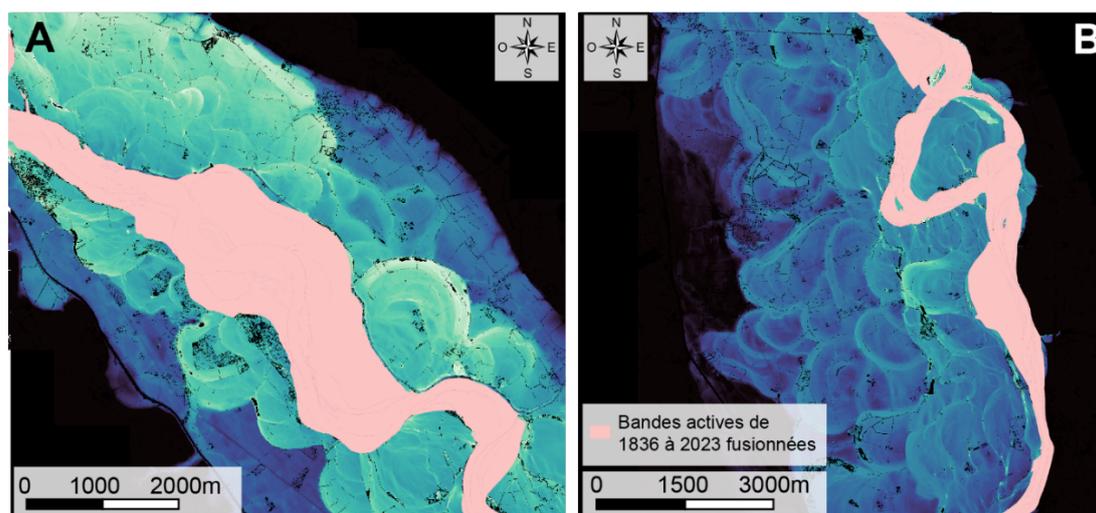
À cause de l’aménagement important des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s., entraînant l’incision importante du plancher alluvial, la mobilité et la capacité érosive de la Loire ne sont plus du tout un problème d’ampleur pour les sociétés comme ce l’était auparavant et comme nous le verrons en détail dans la **partie III** de la thèse. Si la levée de Charrin ne défend aucunement la plaine contre les inondations, elle limite la mobilité de la Loire. Pour cette raison, elle est régulièrement entretenue et de nouveaux travaux d’empierrement ont été entrepris en 2022 (**réunions de la Réserve naturelle régionale de la Loire bourguignonne**) afin de protéger les terres agricoles.

Ainsi, les dépôts sédimentaires de la Loire se font très majoritairement au sein des bandes actives elles-mêmes et très peu en plaine proximale et encore moins distale en raison de la nature du transport sédimentaire, très majoritairement sableux. En conséquence, la construction de plaine alluviale se fait en fonction des déplacements de ces bandes actives, délaissant quasi totalement les parties de la plaine d’inondation les plus éloignées.

\*

En conclusion, la différence d’enregistrement de l’activité hydro-sédimentaire passée de la Loire au cours du dernier millénaire entre l’approche historique et sédimentaire est multifactoriel. Le facteur le plus important semble être la distance aux chenaux actifs associée à un faible transport des sédiments fins. La Loire ne transportant sur la zone d’étude que très peu de sédiments fins, les dépôts sédimentaires lors des crues se font majoritairement au sein de la bande active, très peu en plaine proximale et probablement très rarement en plaine distale. Ces deux facteurs sont accentués du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours

par l'incision du plancher alluvial et par l'impact des aménagements, notamment à l'aval de Decize. Cette dynamique provoque une fixation de la plaine alluviale, plus particulièrement en plaine distale, clairement visible sur le MNT Lidar, notamment sur les zones où la plaine est la plus large (**Figure 6.29**). De nombreux paléochenaux sont visibles, assez peu remblayés, sauf pour ceux très proches de la bande active actuelle. Cette « fixité » de la plaine alluviale donne accès, nous le verrons dans le **huitième chapitre**, à des refuges d'habitat pour les populations riveraines, comparables à l'utilisation des montilles en Loire aval (**Dion, 1961 ; Castanet, 2008**).



**Figure 6.29.** Exemples de sites de conservations de paléochenaux. **A** : site de Thareau. **B** : amont du site de Thareau sur les communes de Beaulon et Saint-Aubin-sur-Loire.

\*

## Conclusion du chapitre

La mise en place de l'approche sédimentaire dans le cadre de cette thèse fut riche d'enseignements, mais également de nouveaux questionnements. Le pari de départ était risqué : tenter de sélectionner trois paléochenaux ayant enregistré avec homogénéité l'activité hydro-sédimentaire de la rivière sur le dernier millénaire au moins, afin de compléter l'étude géohistorique, tout en étant sur un cours d'eau mobile. Dans ce cadre, nous avons réussi à trouver deux enregistrements qui pourraient être vus comme « idéaux » dans le cadre de l'étude des crues passées : celui d'UXE et celui de LEV. Si le cas d'OIE ne permet pas d'obtenir un enregistrement « idéal » pour renseigner l'activité hydrologique passée, il renseigne toutefois sur la mobilité de la Loire au cours du dernier millénaire.

L'enregistrement sédimentaire du paléochenal d'UXE témoigne d'une activité sédimentaire de la Loire conforme aux autres secteurs ligériens, ainsi qu'aux autres exemples français et européens. La période du haut Moyen Âge y correspond à une période d'activité hydro-sédimentaire marquée, tandis que celle de l'OCM voit l'activité ligérienne s'adoucir et celle du PAG à une nouvelle accélération. Les archives sédimentaires nous permettent d'affirmer que l'effet du PAG sur l'activité hydro-sédimentaire

de la Loire semble bien commencer au XIV<sup>e</sup> s., ce que les archives documentaires, disponibles à partir de 1389 (cf. **chapitre 5**), ne nous permettaient pas de faire. L'enregistrement de LEV, commençant au début du PAG suite à une défluviation rapide, témoigne du nombre d'évènements hydro-sédimentaire le plus élevé. La mise en dialogue des archives sédimentaires avec les résultats issus de l'étude des archives documentaires du **cinquième chapitre** a permis de proposer plusieurs rapprochements parmi les évènements les plus intenses du dernier millénaire, notamment ceux de 1587, 1608 ou encore 1707 et 1709. Mais ils exposent également une différence intéressante : les paléochenaux ne semblent avoir enregistré le passage que des évènements de crue les plus intenses. Ce faible enregistrement général des crues est multifactoriel, mais c'est la distance aux chenaux actifs associée à un faible transport des sédiments fins qui joue certainement le plus grand rôle. Le faible transport de sédiment fin par la Loire explique des dépôts faibles en plaine proximale et très faibles, voire inexistants, en plaine distale. C'est notamment ce qui explique la faiblesse de l'enregistrement du paléochenal d'OIE. Ces deux facteurs ont probablement été appuyés par l'incision précoce du plancher alluvial et par l'impact des aménagements, notamment à l'aval de Decize. Cette incision a contribué à une déconnexion de la Loire avec sa plaine alluviale, connexion peu active à la base avec sa plaine distale. La formation de la plaine alluviale de la Loire repose donc essentiellement sur les transferts de sédiments au sein de la bande active elle-même, caractérisée par une mobilité importante. Ce modèle général de la construction de la plaine alluviale suit celui proposé par **Wolman & Leopold (1957)** sur un modèle de formation des plaines alluviales à méandres privilégiant le rôle de l'accrétion latérale, représentant selon eux 80 à 90 % du processus comme rappelé par **Salvador (2005)**. Face aux changements occurrents au cours du dernier millénaire, la dynamique de l'accrétion latérale s'impose quasi exclusivement dans le cadre de la construction de la plaine alluviale ligérienne.

Ces caractéristiques du fonctionnement hydro-sédimentaire de la Loire et de la construction de sa plaine alluviale sont essentielles pour mieux comprendre les relations entre les sociétés et leur environnement que l'on étudiera plus en détail dans la **Partie III** suivante. Les sociétés ont dû s'adapter à la fois aux faibles dépôts sédimentaires en plaine proximale et distale, contrairement à la Loire moyenne et aval, ainsi qu'à la mobilité de la bande active et des bancs sableux. « L'inconstance » de la Loire conditionne l'implantation des sociétés riveraines dans le lit de la Loire (cf. **chapitre 8**), notamment portuaire. Afin d'y faire face, les sociétés aménagent le lit de la Loire dès le XIV<sup>e</sup> s. comme nous le verrons en détail dans les **septième et neuvième chapitres**. Les ingénieurs s'adaptent également à cette instabilité par la généralisation du balisage du cours d'eau et par la commande à plusieurs reprises aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. de cartographies du fleuve et de sa plaine afin d'actualiser leurs connaissances (**AN, F/14/1202**).

Cette étude comporte néanmoins de nombreuses limites. La mise en dialogue des archives sédimentaires avec les archives documentaires a souffert du manque de précision du cadre chronologique. Les rapprochements temporels réalisés entre des évènements connus grâce aux archives

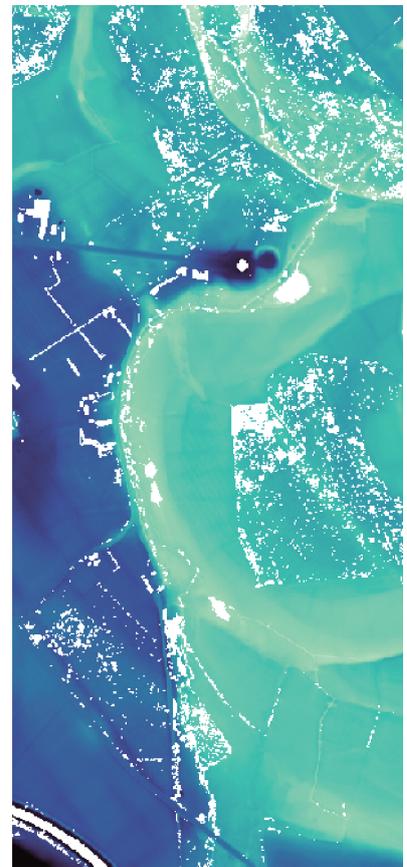
documentaires et leurs traces sédimentaires potentielles ne reposent que sur deux datations pour le paléochenal LEV, trois datations pour UXE et sur des datations réalisées sur un autre carottage pour le cas d'OIE. À titre d'exemple, l'étude de **Peng et al. (2019)** sur les crues de la Meuse repose sur neuf datations  $^{14}\text{C}$  au sein d'un seul carottage, celles de **Wilhelm (2012)** et **Wilhelm et al. (2013)** sur les lacs alpins ou celle de **Toonen (2013)** sur les crues du Rhin emploient une pluralité de méthodes de datations pour tenter de relier les pics granulométriques aux évènements connus : méthode  $^{14}\text{C}$ , données palynologiques, archives documentaires et cartes anciennes, datations isotopiques au plomb ( $^{210}\text{Pb}$ ), pollution aux métaux lourds, évènements majeurs connus (avalanches et tremblements de terre). Ces méthodes de datations complémentaires n'ont pas pu être mises en place, et dans le cadre des évènements récents et très bien connus, du XIX<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s., les perturbations agricoles des paléochenaux LEV et UXE empêchent toute recherche. De plus, les conclusions générales sur l'activité hydro-sédimentaire historique de la Loire ne repose que sur l'interprétation d'un seul enregistrement (UXE). Il est impératif de le confirmer à l'aide d'autres enregistrements et de tenter de retrouver les variations d'activités hydrologique du PAG exposées au sein des sédiments par **Defive et al. (2017)** ou dans les archives documentaires au sein du **cinquième chapitre**.

L'impossibilité d'être certain de l'association entre les signatures sédimentaires et les évènements connus grâce à l'approche historique laisse plusieurs questions en suspens : quels évènements les paléochenaux ont-ils réellement enregistrés ? S'ils n'enregistrent effectivement que les évènements les plus intenses des derniers siècles (LEV) voire millénaires (UXE et OIE), ces enregistrements appuyés par un cadre chronologique mieux détaillé, seraient un atout efficace pour avoir un recul sur la catégorisation des évènements réalisée dans le **cinquième chapitre**. Il est difficile de comparer l'intensité de chaque évènement de crue à partir des archives documentaires en l'absence de hauteurs d'eau comme nous l'avons vu dans le **cinquième chapitre**. L'étude et la comparaison de l'épaisseur des dépôts des différents évènements hydro-sédimentaires permettraient de répondre à ce problème, mais appuyées par un meilleur cadre chronologique.



# Partie III

## Réponses des sociétés à l'activité hydrogéomorphologique ligérienne



*De gauche à droite : représentation des ponts de Loire à Nevers par Amédée Jullien (1883), plan des brèches dans les levées de Nevers suite à la crue de novembre 1790 (AN, F/14/1203), tertres anthropiques et paléochenaux de la Loire visibles sur le MNT Lidar.*

---

Cette dernière partie de la thèse est destinée à l'étude des relations entre les sociétés riveraines de la Loire et leur environnement ligérien. Tantôt en fureur, tantôt plus paisible, l'activité a été ponctuée d'évènement extrême, d'eau et de glace. Les sociétés riveraines de la Loire, déjà durablement installées sur les rives de la Loire au cours du dernier millénaire, ont dû composer avec l'oscillation de son activité hydrogéomorphologique. Le **septième chapitre** vise ainsi à étudier les relations entre les sociétés urbaines et l'activité de la Loire. Les riches fonds documentaires nous ayant déjà permis de réaliser le recensement des crues nous permettent également d'étudier la ou les manières dont les communautés urbaines de Nevers et Decize ont composé avec les contraintes hydrogéomorphologiques de la Loire depuis le XIV<sup>e</sup> s. Ces documents ne permettent cependant pas d'entrevoir les réactions des sociétés riveraines hors de ces centres urbains. En conséquence, le **huitième chapitre** est l'occasion d'étudier les adaptations des sociétés rurales à l'activité hydrogéomorphologique de la Loire, essentiellement à partir du corpus cartographique ancien, du MNT Lidar et de la documentation historique. Enfin, que l'aménagement ait été réalisé en contexte urbain ou rural, nous allons voir dans le **neuvième chapitre** qu'il est un des principaux responsables des changements significatifs de géométrie du lit de la Loire observés entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et la période actuelle.

---



# Chapitre 7

## Les communautés urbaines face aux contraintes fluviales depuis le XIV<sup>e</sup> s.

Les communautés urbaines riveraines de la Loire doivent faire face à deux types de contraintes imposés par la Loire : ses crues et sa mobilité. Les comptes communaux de Nevers et Decize permettent de rendre compte avec une certaine précision des manières dont les communautés composèrent avec ces contraintes dès le XIV<sup>e</sup> s.

Marion Foucher s'est déjà attachée à étudier les relations entre la communauté de Nevers et le fleuve ligérien au XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. (Foucher, 2020, 2023b), notamment dans le cadre de leur réaction face aux migrations du cours d'eau (Foucher, 2023c). La consultation de la documentation archivistique dans le cadre de cette thèse a permis de compléter les observations de Foucher (2023b), d'une part temporellement, jusqu'au XIX<sup>e</sup> s., et d'autre part spatialement, avec deux autres cas d'étude : celui de Decize, et dans une moindre mesure, celui de Digoin.

Ce chapitre est donc l'occasion de se poser de nouvelles questions du ou des liens partagés entre les sociétés urbaines riveraines de la Loire et son activité hydrogéomorphologique :

- Quelles furent les réponses des communautés riveraines aux crues, inondations et migrations du cours d'eau ?
- Y'a-t-il eu des différences de réactions au cours de la période séparant le XIV<sup>e</sup> du milieu du XIX<sup>e</sup> s. ou entre les différents sites d'études ?
- Y'a-t-il une corrélation entre certaines réponses ou stratégies d'aménagement du lit et les périodes de forte ou de faible activité hydrologique de la Loire décrites dans le **cinquième Chapitre** ?

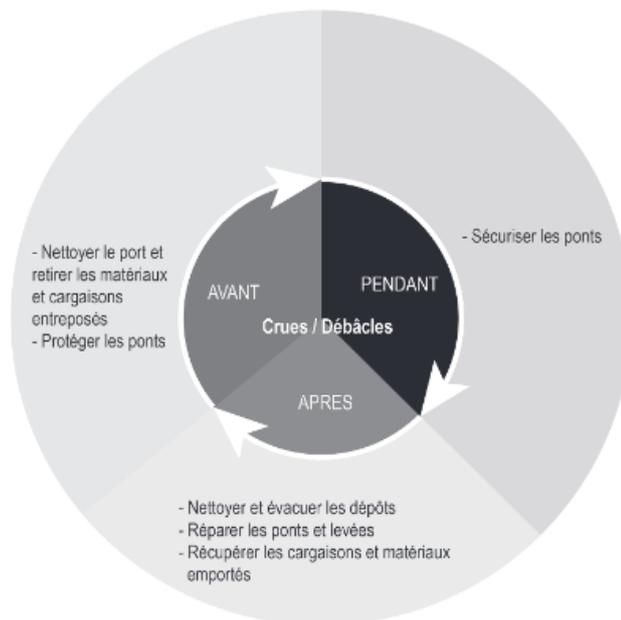
Nous répondrons à ces questions en deux temps. Il s'agit dans un premier temps d'étudier les rapports entre les sociétés urbaines et les crues de la Loire. Puis dans un second temps, d'étudier les trajectoires d'aménagement du lit majeur de la Loire qui diffèrent, nous le verrons, sur les trois sites urbains.

# 1. Les communautés urbaines et les crues de la Loire

Dès les premières pages des premiers registres, de 1389 pour Nevers et de 1404 pour Decize, notre lecture rencontre les premiers évènements de crue. Si leur omniprésence nous a permis d'obtenir les résultats du **cinquième chapitre**, elle nous indique également que les sociétés ont dû constamment vivre avec, et plus particulièrement avec leurs dégâts, raison de leur présence dans ces documents. De par leur intensité certains évènements semblent avoir marqué ces sociétés qui conservent une certaine mémoire des crues. Néanmoins, si ces évènements sont très présents dans les documents, les mentions d'inondations se font beaucoup plus discrètes.

## 1.1. La réaction des communautés aux crues de la Loire

Pour les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s., **Foucher (2023b)** observe dans les comptes de Nevers trois moments de la gestion de l'aléa crue : avant, pendant et après le passage de la crue (**Figure 7.1**). L'exploitation de la documentation archivistique dans le cadre de cette thèse a permis de compléter temporellement les observations de **Foucher (2023b)** du XIV<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s., et d'observer si les réactions observées à Nevers sont comparables ou non à celles de Decize.



**Figure 7.1.** Gestion des aléas saisonniers du fleuve à Nevers aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s., dans **Foucher (2023b)**.

### 1.1.1. L'anticipation de l'aléa

Que ce soit à Nevers ou à Decize, les communautés anticipent l'arrivée de la crue et les destructions potentielles. L'anticipation passe par la mise à l'abri des infrastructures et des biens. Les comptes offrent de nombreux exemples de paiements à des ouvriers pour sécuriser ou évacuer les matériaux entreposés sur les grèves de la Loire ou les pièces de bois transportées dans le lit de la Loire,

car on « doute » que la crue qui arrive n'emporte tout (AM Nevers, CC/3, 1395, fol 3r ; CC/4, 1396, fol 22 ; CC/13, 1404, fol 28 ; CC/76, 1493, fol 10). En mai 1456 par exemple, des ouvriers sont payés pour emmener « quantité de paulx estant sur les greves de Loire » jusqu'à « l'isle de la porcherie [...] à l'occasion que la rivière ne les emmenast » (AM Nevers, CC/52, fol 20). Les aménagements, notamment les ponts, sont aussi protégés à l'avance contre les crues ou les glaces. En 1469, on ajoute des moellons supplémentaires au pont de Loire afin de le protéger des glaces (AM Nevers, CC/63, fol 43). Ces différentes réactions indiquent que l'activité hydrologique de la Loire était surveillée par la communauté de Nevers. Ce fait n'est pas étonnant puisque les mariniers avaient eux-mêmes besoin de surveiller le débit de la Loire afin de savoir si la navigation était possible ou dangereuse (De Person, 2001). Cette anticipation prenait une part claire dans la gestion des affaires de la cité par les échevins (Foucher, 2023b). Les ouvrages bénéficiaient de visites annuelles et une charge communale était accordée à un individu qui devait s'en charger en plus des réparations nécessaires aux ponts et aménagements fluviaux. Plusieurs responsables de cette charge furent retrouvés dans les documents, souvent maître charpentier : Jean Tixier (Foucher, 2023b) et Regnault le Court début XV<sup>e</sup> s. (AM Nevers, CC/13), ou Regnault Thoret durant la première moitié du XVI<sup>e</sup> s. (AM Nevers, CC/87 à CC/96).

### 1.1.2. La préservation des ponts face aux crues et glaces

Lorsque le débit augmente dangereusement, l'objectif est de préserver les ponts ou du moins de limiter les dégâts. Pour ce faire, la communauté de Nevers use de deux méthodes. La première est d'alourdir les ponts, souvent de pierres, afin qu'ils ne soient pas emportés par les crues ou les glaces. Le 14 septembre 1394, quatre hommes sont payés pour avoir chargé un des ponts de Nevers de pierre « afin que la grant creue de l'eau ne emmenast ledit pont » (AM Nevers, CC/2, fol 7). Une nouvelle fois en octobre 1404, les ouvriers doivent charger les ponts Chizeau et de Loire, car « l'eaul croissoit fort » (AM Nevers, CC/13, fol 24 ; fol 27). En 1461, c'est le pont Madame qui est cette fois-ci chargé de pierre (AM Nevers, CC/56, fol 5), tout comme en 1542 (AM Nevers, CC/112, fol 39). En décembre 1496, ce sont trois ponts, dont celui de Notre-Dame, qui le sont en même temps (AM Nevers, CC/77, fol 6). Celui de Notre-Dame l'est une nouvelle fois en 1522 afin que « l'eau ne inondast et emmenast ledit pont » (AM Nevers, CC/97, fol 6). La seconde méthode est d'attacher certaines parties du pont, voire le pont entier, afin d'être sûr qu'elles ne soient pas emportées (AM Nevers, CC/56, 1460-1461 ; AM Decize, CC/6, 1498, fol 8). En 1531, des ouvriers sont payés pour avoir « attaché et retenu » deux des ponts de Loire durant la crue (AM Nevers, CC/104, fol 9). Durant l'hiver 1536-1537, les ponts Madame et de Loire sont « attachés » et alourdis pour qu'ils ne soient pas emportés par les eaux (AM Nevers, CC/107, fol 14, 20 ; CC/108, fol 19). En 1628, on fait mettre des chaînes et on attache les ponts de Loire aux grèves afin qu'ils ne soient pas emportés par les eaux et probablement les glaces (AM Nevers, CC/174, fol 42).

Afin que les ponts ne soient pas emportés par les glaces, les communautés tentent de les casser réduisant la pression des glaces accumulées aux piles soit moins forte. Les ponts y sont en effet très vulnérables. Le seul pont de Loire est par exemple emporté par les glaces deux fois en 51 ans : en 1465 (AM Nevers, CC/59, fol 23) et en 1516 (AM Nevers, CC/91, fol 19). Ainsi, on a relevé de nombreuses mentions de la casse de glace au niveau des ponts du XV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. que ce soit à Decize en 1498 (AM Decize, CC/6, 1498, fol 8) ou 1609 (AM Decize, CC/11, 1609-1610), ou à Nevers où les mentions sont plus nombreuses, notamment au XV<sup>e</sup> s. (AM Nevers, CC/39, 1436, fol 41 ; CC/46, 1443, fol 11 ; CC/54, 1458, fol 13 ; CC/56, 1461 ; CC/59, 1464, fol 15). Ces interventions peuvent être très coûteuses et engager beaucoup d'ouvriers : durant l'hiver 1753-1754 par exemple, ce sont environ 150 ouvriers qui doivent libérer les ponts de Loire des glaces pendant trois jours à Nevers (AM Nevers, CC/328, document du 18 février 1754), et probablement 150 ouvriers de plus pour libérer ceux de Decize ! (AD Nièvre, 1C/187, document de 1754). En 1764 et 1789, ce sont aussi plusieurs centaines d'ouvriers qui doivent casser les glaces à Nevers (AM Nevers, BB/46, délibération du 14 janvier 1789). Néanmoins, et malheureusement pour les communautés de Nevers et Decize, ainsi que pour les autres communautés riveraines, les ponts de Nevers et de Decize sont très souvent emportés, ou dans une moindre mesure, endommagés par les crues et les glaces (Tableau 7.1, Tableau 7.2).

**Tableau 7.1.** Années de destruction totale ou partielle des ponts de Nevers par les crues et glaces. Les destructions pour cause de vétusté ou de guerre ne sont pas prises en compte. \* : par destruction totale nous entendons que le passage est coupé. \*\* : comprend le pont principal de rive droite, le petit pont et le pont Notre-Dame en rive gauche.

Ponts	Année de destruction totale*	Année de destruction partielle
Loire**	1309 (Parmentier, 1842), 1389 (AM Nevers, CC/1), 1407 (CC/16), 1458 (CC/54), 1465 (CC/59), 1475 (CC/69), 1476 (CC/70), 1486 (CC/74), 1494 (CC/76), 1496 (CC/77), 1516 (CC/91), 1527 (CC/99), 1542 (CC/112), 1628 (Jullien, 1883), 1790 (MS/034).	1396 (CC/4), 1404 (CC/13), 1435 (CC/36), 1456 (CC/53), 1469 (CC/63), 1484 (CC/73), 1499 (CC/78), 1534 (CC/106), 1544 (CC/116), 1550 (CC/126), 1554 (CC/135), 1564 (CC/141), 1606 (CC/166)
Madame	1458 (CC/54), 1469 (CC/64), 1474 (Champion, 1858), 1522 (CC/97), 1527 (CC/99), 1536 (CC/107), 1540 (Parmentier, 1842), 1542 (CC/112), 1543 (CC/115), 1549 (CC/125), 1565 (CC/141), 1628 (Charrier et al., 1986)	N/A
Official	1519 (CC/93), 1522 (CC/96), 1536 (CC/107), 1628 (Charrier et al., 1986)	N/A
Nièvre	1522 (CC/96)	1485 (CC/74), 1516 (CC/92)
Cizeau	1516 (CC/92), 1527 (CC/99)	1407 (CC/16), 1456 (CC/53)
Saint-Nicolas	1493 (CC/76), 1518 (CC/93), 1567 (CC/92), 1555 (CC/135)	1526 (CC/102)

**Tableau 7.2.** Années de destruction totale ou partielle des ponts de Decize par les crues et glaces. Les destructions pour cause de vétusté ou de guerre ne sont pas prises en compte. \* : par destruction totale nous entendons que le passage est coupé.

Ponts	Année de destruction totale*	Année de destruction partielle
Crote	1415 et 1438 (AM Decize, CC/1), 1442 (Merle, 1974), 1457 (CC/4), 1565 et 1570 (CC/9), 1585 (CC/9), 1608 (CC/11), 1790 (Tresvaux de Berteux, 1855)	1452 (CC/4), 1494 et 1497 (CC/6), 1528 et 1566 (Tresvaux de Berteux, 1855)
Loire	1438 (CC/1), 1442 (Merle, 1974), 1452 et 1460 (CC/4), 1570 (CC/9), 1585 (CC/10), 1608 (CC/11), 1709 (Desforges, 1906)	1468 (CC/5), 1528 (Tresvaux de Berteux, 1855), 1675 ? (CC/12)
Aron	1415 (CC/1), 1457 et 1467 (CC/4), 1485 et 1498 (CC/6), 1576 ? (CC/9)	1460 (CC/4), 1469 (CC/4), 1470 (CC/4), 1491 et 1494 (CC/6)

### 1.1.3. Reconstruction et nettoyage suite aux évènements

Suite au passage de la crue, les communautés font réparer ou reconstruire assez vite, que ce soit les ponts ou les battis. L'objectif est de réassurer le passage le plus rapidement possible et d'empêcher la Loire d'ouvrir de nouveaux chenaux. Les chantiers sont par ailleurs strictement organisés et contrôlés par les échevins (Foucher, 2023b). À Decize, le pont de Loire est endommagé par une crue début septembre 1438 puis remis en état dès la semaine suivante (AM Decize, CC/3, 1438). En 1494, c'est le pont d'Aron qui est emporté par une crue. Plusieurs ouvriers et charpentiers sont payés peu de temps après afin de « fere ung passage à pié et à cheval » à la place du pont (AM Decize, CC/6, 1494, fol 4). À Nevers en 1465, la force des glaces détruit le pont de Loire, la communauté fait construire directement un « chevalet de boys au milieu de l'eau » afin d'assurer le passage (AM Nevers, CC/59, fol 23). Le pont de l'Official à Nevers est totalement emporté par la crue de décembre 1516. Il est entièrement refait deux ans après en 1518-1519 (AM Nevers, CC/93, fol 20). En 1526, c'est le pont Chizeau qui est refait « à neuf » quelques mois après sa destruction par la crue (AM Nevers, CC/99, fol 26). En 1542, les ponts de Notre Dame et de l'Official sont refaits quelques semaines ou mois après avoir été emportés par les crues (AM Nevers, CC/112, fol 41). Les multiples exemples indiquent que les ponts de bois sont donc facilement réparables ou remplaçables. Il en va différemment pour les ponts de pierre. Lorsque les piles sont conservées, il suffisait aux communautés d'installer de nouveaux tabliers de bois pour le passage. Ce système a perduré longtemps puisque ce n'est qu'aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> que des ponts entièrement faits de pierre ont vu le jour à Nevers et à Decize. Néanmoins, lorsque les piles elles-mêmes sont emportées, le revers est bien plus important pour la communauté. Le coût et le temps nécessaire aux constructions de pierre privent la communauté de pont pour des périodes bien plus longues que lorsque les ponts n'étaient faits que de bois.

Tout comme les ponts, les battis sont aussi très souvent réparés après le passage des crues (**AM Decize, CC/5, 1472, fol 16 ; CC/6, 1494, fol 13 ; AM Nevers, CC/1, 1389, fol 17 ; CC/153, 1579 ; CC/166, 1607**). Les crues ne font pas « que » détruire ou endommager les aménagements, elles érodent aussi les berges et ouvrent de nouveaux chenaux, nuisant à la conservation des îles et des pâtures.

Les échevins sont aussi obligés de payer des ouvriers, souvent des mariniers disposant de bateaux, afin de récupérer tout ce que la Loire emporte, notamment le bois de flottage ou des ponts. Les mentions sont très nombreuses à Nevers, comme en 1396 (**AM Nevers, CC/3, fol 5 ; CC/4, fol 17**), 1399 (**AM Nevers, CC/7, fol 30**), 1414 (**AM Nevers, CC/19, fol 13**), 1437 (**AM Nevers, CC/39, fol 26**) ou en 1494 où les ouvriers doivent récupérer les morceaux du pont Madame, emporté par la crue du 1<sup>er</sup> mai (**AM Nevers, CC/76, fol 25**), tout comme en 1516 (**AM Nevers, CC/91, fol 20**) et 1541 (**AM Nevers, CC/111, fol 18**). À Decize, les échevins font face au même problème. En 1494, plusieurs ouvriers sont payés pour aller rechercher les solives du pont de Crote emportées par la crue 10 km plus à l'aval jusqu'à Fleury et la Motte Farchat (**AM Decize, CC/6, 1494, fol 5**), et l'histoire se répète en 1570 (**AM Decize, CC/9, 1570-1571**). Si la Loire emporte, elle crée aussi des embâcles qu'il faut retirer, empêchant la navigation et menaçant les ponts. À Nevers en 1403 ou 1404, un charpentier est payé pour avoir retiré des piles du pont de Loire « tout le boys que l'eau avoit amené au travers des aiguilles » (**AM Nevers, CC/12, fol 15**). Ce sont les mêmes observations à Decize où l'on fait couper le bois accumulé aux piles du pont de Crote en 1457 (**AM Decize, CC/4, 1457, fol 4**). Et ce sont parfois les débris des ponts eux-mêmes qu'il faut retirer. À Decize, on fait déplacer à l'aide de plusieurs voitures « les bois de la ruine des ponts » suite à la crue catastrophique de 1608 (**AM Decize, CC/11, 1608-1609**).

#### **1.1.4. Des inondations imperceptibles**

Malgré les nombreuses informations disponibles vis-à-vis des crues de la Loire, celles faisant référence aux inondations provoquées par ces crues sont très rares, que ce soit à Nevers et à Decize, en dépit de la présence de zones inondables bien habitées dans les deux cas (cf. **chapitre 3**).

Nous disposons de quelques mentions à Nevers. Pour rappel, seule une petite partie de la ville entre ses murs d'enceinte soumise au risque inondation (**Figure 7.2**). Selon le manuscrit **MS/034 (Médiathèque de Nevers)**, l'eau entre dans la ville lors des inondations de 1586, 1608, 1628 et 1733. En 1586 et 1628, elle atteint le « puit des mulles », et la mention de 1733 ajoute que le puits des mules se trouve en face de l'hôtel des Bordes. Cette indication nous confirme que le « puits des mulles » du XVI<sup>e</sup> s. correspond à l'actuelle place du puit des Meules. Cette place constitue encore aujourd'hui la limite actuelle de la zone inondable définie par le dernier PPRi (**Figure 7.2**) (**DDT Nièvre, 2020b**). Les inondations peuvent donc toucher Nevers dans son enceinte seulement lors d'évènements très exceptionnels. Hors des murs, nous disposons d'un seul acte mentionnant le paiement en novembre 1404 de deux ouvriers pour avoir « oster 70 planches qui estoient à la rue de l'eauue [...] pour doubte que

l'eau ne les enmenast » (AM Nevers, CC/13, fol 22). Cette rue était probablement située entre les grèves de Loire et les murs de la ville. En revanche à Decize, nous n'avons rencontré aucune mention d'inondation des faubourgs ou de la cité avant le XVIII<sup>e</sup> s. : en 1728 les échevins demandent la construction d'un quai pour « empêcher la perte entière du faubourg de Crotte que la rivière de Loire inonde dans les grandes eaux » (AM Decize, BB/4, 1728). Malgré ces rares mentions, il est certain que plusieurs faubourgs des cités respectives furent soumis aux inondations de la Loire et de ses affluents (cf. chapitre 3). Les populations ont nécessairement dû souffrir de ces inondations, sans que l'on puisse savoir à quel point en l'absence de données. Nous n'avons par ailleurs très peu d'information sur l'étendue réelle des faubourgs installés en zone inondable avant le XVIII<sup>e</sup> s., ainsi que sur le nombre d'habitants. Les registres paroissiaux de Nevers et Decize ayant permis à Florenty (1991) de réaliser son étude sur Nevers et sa population au XVIII<sup>e</sup> s. n'ont été conservés dans leur très grande majorité seulement à partir du XVII<sup>e</sup> s.



**Figure 7.2.** Limite de la zone inondable actuelle (DDT Nièvre, 2020b) et territoire du Nevers médiéval protégé par les enceintes. Les faubourgs n'ont pas été représentés, faute d'informations précises.

Alors, comment expliquer la rareté des mentions d'inondations dans la documentation jusqu'au XVIII<sup>e</sup> s. ? Premièrement, la majorité des informations dont nous disposons proviennent des comptes communaux de Decize et Nevers. Ces comptes présentent des exemples d'assistance communale notamment pendant les pestes ou les guerres, mais seulement réservée aux membres de la communauté urbaine. Lors des pestes par exemple, les portes de la ville sont fermées, les étrangers et habitants des faubourgs sont mis dehors, car non membre de la communauté (**communication personnelle de Marion Foucher**). Or, sur les sites d'études, ce sont ces habitants des faubourgs qui sont susceptibles d'être inondés, les Neversois et Decizois étant à l'abri derrière les murailles (cf. **chapitre 3**). On comprend alors l'absence d'assistance aux inondés et donc de mention dans les documents.

Deuxièmement, si nous bénéficions d'un exemple d'assistance à Tours où la commune envoie des secours aux victimes d'une inondation de la Loire en 1481 (**Labbé, 2022**), **Labbé (2017, 2022)** précise que ces exemples sont rares, les autorités n'intervenant que très peu en faveur des sinistrés. L'assistance passe néanmoins par l'aide des plus puissants : remises sur la fiscalité et concessions du droit d'imposer. En 1409, le comte de Nevers accorde le droit d'accès à son bois de Cuffy afin de récupérer du bois pour réparer les ponts de Loire (**AM Nevers, CC/16, fol 31**). En 1454 et 1455, c'est cette fois-ci une part des impôts prélevés sur le sel que le comte de Nevers accorde à la ville pour la reconstruction des ponts (**AM Nevers, CC/50, fol 20**). Les Decizois obtiennent en 1579 une réduction de la taille suite aux destructions de leurs ponts par les crues afin de les reconstruire (**AM Decize, DD/12, document du 6 avril 1579**), de même que les neversois en 1609 suite à la crue de 1608 (**AM Nevers, CC/166, fol 100 ; CC/364**). Là encore, ces exemples concernent la reconstruction des aménagements de franchissement et ne font pas référence aux sinistrés.

## **1.2 Une évolution des réactions entre le Moyen Âge et le XIX<sup>e</sup> s. ?**

Alors observe-t-on des changements vis-à-vis de ces réactions et du schéma proposé par **Foucher (2023b)** entre le XIV<sup>e</sup> s. et les XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. ? Une grande partie de ces réactions ne semble pas changer à travers le temps. Les communautés tentent toujours de préserver du mieux possible les ponts face aux glaces aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. que ce soit en cassant les glaces (**AM Nevers, 1I/128/4 ; AD Nièvre, 1L/415, 1791 et 1799 ; 3S/9974, 1820 ; 1L/416, 1792**), ou en les chargeant de pierres et de bois (**AD Nièvre, 1L/415**), d'autant plus que le coût de construction de ceux-ci est beaucoup plus élevé qu'auparavant. Un arrêté de décembre 1799 indique encore qu'en temps de glace à Nevers, les autorités doivent faire (i) charger les ponts avec le plus de quartiers de pierre possible (le pont est alors en bois à Nevers, le précédent en pierre ayant été emporté en 1790), (ii) casser les glaces en amont et en aval du pont, (iii) retirer tous les bateaux et trains de bois en amont du pont (**AD Nièvre, 1L/415**). Les ponts de Decize et de la Charité-sur-Loire sont alors chargés de pierre de taille pour éviter qu'ils ne soient pas emportés par la débâcle de 1799 (**AD Nièvre, 1L/415**). Certaines méthodes peuvent cependant changer : en 1789 et 1838, on propose à Nevers de casser la glace à l'aide d'explosifs (**AN, F/14/1202, rapport**

**de Normand 1789 ; AD Nièvre, 3S/3020, 1838**), sans que l'on sache si la méthode fut réellement appliquée.

Ensuite, au cours des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s., la question de la bonne navigabilité de la Loire est plus que primordiale puisqu'étant arrivée à son paroxysme (cf. **chapitre 2**). Pour l'assurer, le balisage de la Loire, consistant à nettoyer le lit de tout ce que le cours d'eau aurait pu charrier et à délimiter le chenal de navigation, se devait d'être réalisé de Roanne à Nantes une fois par an (AN, F/14/1201, F/14/1203 ; **Grivel, 2008**). Réalisé par les services des Turcies et Levées puis des Ponts et Chaussées, les différentes cités portuaires ligériennes se devaient de participer financièrement à ce balisage (AD Nièvre, 1C/203). Cette régularité permettait d'assurer la bonne navigabilité de la Loire, notamment suite aux crues et au déplacement des bancs et bras pouvant être très rapide comme nous avons pu le voir sur le site de Thareau (cf. **chapitre 6**).

Enfin, suite aux destructions, l'objectif reste durant toute la période d'étude de réparer au plus vite. Aux ponts et aménagements limitant l'érosion s'ajoutent les levées à partir du XVII<sup>e</sup> s., dont les percées réalisées par les glaces ou les crues sont aussi rapidement comblées. Bien que la rapidité soit primordiale, les choix d'aménagement n'en restent pas moins réfléchis. Selon **Foucher (2023b)**, les comptes de Nevers laissent entrevoir dès le XV<sup>e</sup> s., une gestion concertée et anticipée par les échevins des aménagements de la ville, notamment les ponts. C'est toujours le cas au XVIII<sup>e</sup> s. : en 1791 par exemple, suite à la chute du pont de Loire, les ingénieurs et administrateurs réfléchissent aux aménagements à réaliser pour réassurer le passage sur la Loire : construire léger, mais en devant réparer six fois par an (ils estiment le nombre futur de crues à six par an) ou attendre pour construire en plus dur (AD Nièvre, 1L/416).

Néanmoins, la position des communautés urbaines ou pouvoirs vis-à-vis des inondations change au cours des siècles. Durant le Moyen Âge et l'époque Moderne, les aménagements de la zone d'étude ne sont pas réalisés pour limiter les inondations de la Loire et de ses affluents. Le paradigme tend à changer à partir du XVIII<sup>e</sup> s. Certaines levées de la zone d'étude ont clairement été réalisées dans le but de contraindre la Loire, notamment celles d'Uxeloup et Saint-Antoine, qui ne limitent en rien l'inondation des vals. Néanmoins, le rôle de celles de Saint-Eloi, de Sermoise et de Charrin – Saint-Hilaire est plus ambivalent. Leur rôle principal reste de contraindre la Loire afin d'assurer la navigabilité du fleuve, mais les Ponts et Chaussées ne cachent pas un sous-objectif qui est de limiter l'inondation soit des parcelles agricoles voire de faubourgs comme c'est le cas pour la levée de Saint-Éloi suite aux crues de 1789 et 1790. Or, ce changement de stratégie est bien plus tardif qu'à l'aval. Certains faubourgs d'Orléans, Blois et Amboise obtinrent l'édification de levées purement défensives face aux inondations dès le XVI<sup>e</sup> et le XVII<sup>e</sup> s. (**Dion, 1961**). La thèse de **Temam (2012)** démontre ensuite bien que les trois crues exceptionnelles de 1846, 1856 et 1866 constituent le tournant le plus important vis-à-vis de la

prise en compte et de la gestion du risque inondation sur la zone d'étude, ne reposant plus seulement que sur les ouvrages fluviaux, mais également sur la prévention.

Ainsi, les réactions des sociétés vis-à-vis des crues semblent assez peu changer entre le XIV<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> s. Toutefois, les moyens déployés ne sont pas les mêmes en raison de l'aménagement fluvial qui se densifie au fil des siècles. De plus, la gestion du risque change en partie de mains, plus seulement entre celles des communautés urbaines, mais aussi entre celles de l'État et des corps d'ingénieurs à partir du XVII<sup>e</sup> s. Encore une fois, ce changement de mains est tardif comparé à l'aval, où dès le XVI<sup>e</sup> s., le pouvoir des corps d'ingénieurs pouvait dépasser celui des communautés urbaines concernant l'aménagement fluvial (Dion, 1961).

### 1.3. La mémoire et la perception des crues

Est-ce que cette continuité des réactions face aux crues de la Loire pourrait être en partie garantie par une certaine mémoire des événements ? Bien qu'il soit difficile de répondre avec précision à cette question de la mémoire, un document assez exceptionnel et unique en son genre sur la zone d'étude nous donne quelques indices : le registre MS/034 (Médiathèque de Nevers) (Figure 7.3).

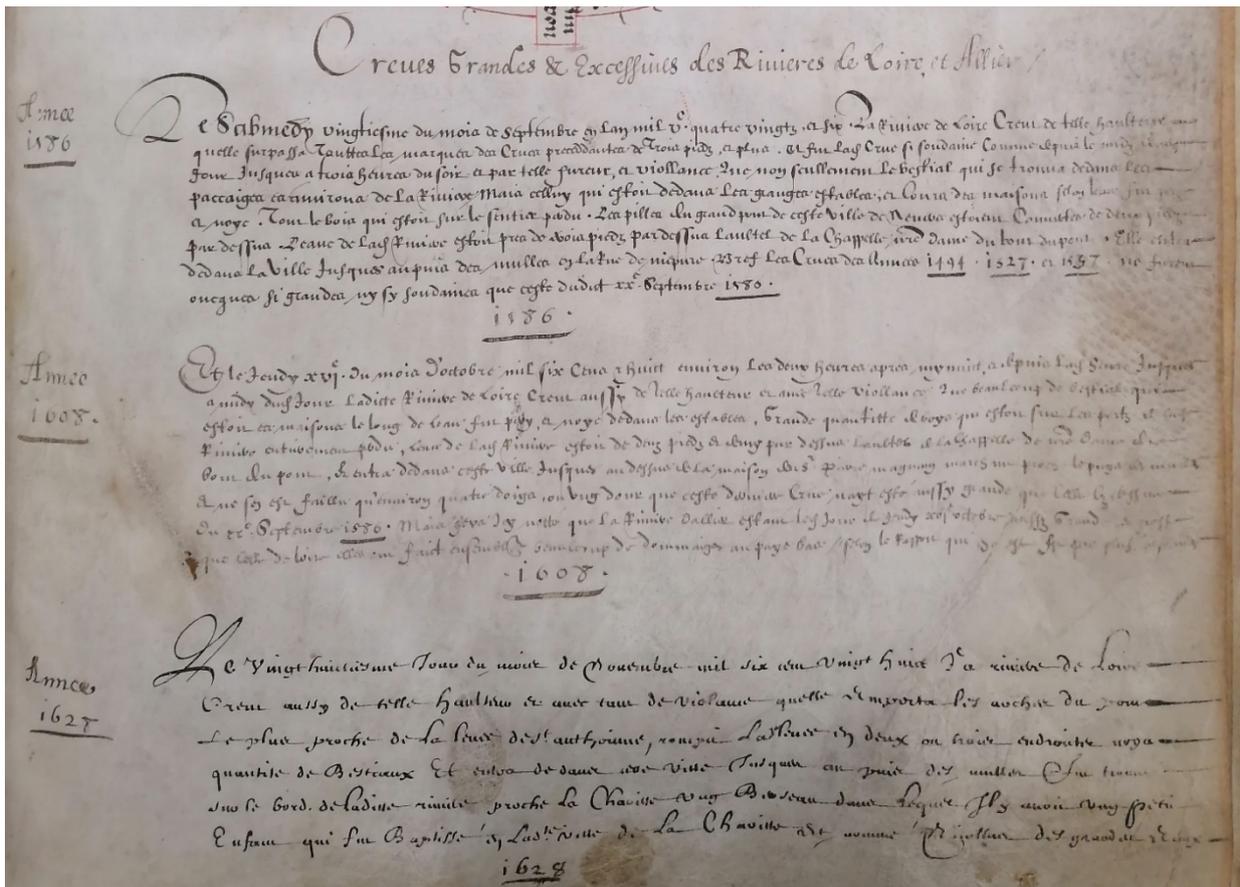


Figure 7.3. Extrait du registre MS/034 (Médiathèque de Nevers). La liste est titrée : « Creues Grandes et Excessives des Rivieres de Loire et Allier ». Les trois paragraphes décrivent respectivement les événements de crues extrêmes de 1586, 1608 et 1628.

### 1.3.1. Les indices du registre MS/034

Nous n'avons que très peu d'information sur ce document, au-delà du contenu qu'il présente. Nous ne savons par exemple par pourquoi celui-ci est conservé à la médiathèque de Nevers et non aux archives municipales de Nevers comme toutes les autres productions de la Chambre des Comptes. En effet, le document semble avoir été écrit par ou pour la Chambre des Comptes de Nevers. Celui-ci regroupe plusieurs passages et contenus très hétéroclites, tantôt écrit en ancien français, tantôt en latin. Il comporte notamment un calendrier enluminé annoté d'évènements allant du XV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s., un passage commenté des Évangiles, des rapports d'entrevues de la Chambre des Comptes, des retranscriptions de documents importants vis-à-vis de la Chambre des Comptes ou des Comtes de Nevers, et même une découverte archéologique le 2 septembre 1492 ! Lors de la construction d'une cave dans Nevers, une pierre gravée « AN OE CAMVLOS TQVTIS' SIC NoSIE VRV » est retrouvée (**Médiathèque de Nevers, MS/034, fol 64**).

Nous devons néanmoins laisser de côté la curiosité que suscite le côté hétéroclite et les multiples détails singuliers de ce document pour se pencher sur une partie du document qui, cette fois c'est certain, se rattache à notre questionnement général. Dès les premières pages apparaît un passage assez particulier titré « Creues Grandes et Excessives des Rivieres de Loire et Allier » qui semble dénoter avec le reste du document. Ce passage constitue une liste de crues ayant touché Nevers (**Figure 7.3**), mentionnant les crues de 1586, 1608, 1628, 1657, 1664, 1707, 1709, 1710, 1733, 1744 et 1790, que l'on a toutes considérées comme extrêmes (C4) dans le **cinquième chapitre**. On trouve aussi une mention de l'étiage extrême des mois d'août, septembre et octobre 1677, que le scripteur compare à l'année 1538 « sous François Premier [...], et ceste année au printemps es cesté la riviere a creu sept ou huit fois ». Le travail de recensement des crues nous a effectivement permis de retrouver dans les comptes de Nevers, une mention de crue importante en mars 1538 (cf. **chapitre 5**). Et c'est là la particularité de ces inscriptions : les mentions comparent les évènements à des évènements antérieurs avec précision. Le paragraphe de la crue de 1586 mentionne par exemple que celle-ci fut plus « grande » et « soudaine » que celles de 1494, 1527 et 1537. La crue du 4 octobre 1707 aurait été « aussy grande que celle de 1608 », celle de 1709 « à peu près de la mesme hauteur qu'elle fut en 1707 », 1710 « encore plus grosse que les deux années ey dessus », 1733 plus haute de « neufs lignes » qu'en 1707, mais cependant dépassée par celle de 1744, puis par celle de 1790 de trois pieds.

Il semblerait que la comparaison des évènements entre eux, parfois avec des mesures précises, ait été permise par des marques de crues, clairement mentionnées dès la mention de l'évènement de 1586 : « Le sabmedy vingtisme du mois de septembre en l'an 1586, la riviere de Loire creue de telle haulteur quelle surpassa toutes les marques des crues précédantes de trois piedz en plus [...] ». Au XVIII<sup>e</sup> s., les rapports d'ingénieur confirment toujours leur présence. En 1747, un groupe d'ingénieurs des Ponts et Chaussées recherchent des repères de crue du côté de Diou, probablement pour pouvoir

rendre compte du degré d'intensité ou d'exceptionnalité de la crue qui vient de passer. Ils en trouvent trois dans une grange sur la commune de Pierrefite-sur-Loire indiquant la hauteur des crues de 1733, 1744, et de la toute récente 1747 (AN, F/14/1198). Si ces anciennes preuves de marque de crue sont rares, elles ne sont pas isolées en Europe. En France, les plus anciens repères de crue conservés datent de 1616 sur le Rhône et de 1602 sur la Saône, de 1576 sur le Gers, de 1530 sur la Vienne et 1608 sur le Cher, 1649 sur la Seine, de 1651 sur la Loire ou même de 1437 sur La Clarée, petit affluent de la Durance ([reperesdecru.es.developpement-durable.gouv.fr](http://reperesdecru.es.developpement-durable.gouv.fr)). Hors de France, on peut même retrouver dans les rues de Florence des niveaux bien connus des inondations de 1177, 1333, 1547 et 1557 de l'Arno. Aujourd'hui, tous les repères de crues de la zone d'étude antérieurs au XIX<sup>e</sup> s. ont été néanmoins perdus. Ce point n'est pas étonnant, l'étude de **Gazelle et Maronna (2009)** a par exemple montré qu'en seulement trente ans (1970-2000), seul 59 % des repères de crues apposés durant cette période furent conservés en Lot-et-Garonne.

La continuité de la mise à l'écrit des événements au sein du document **MS/034** est aussi assez exceptionnelle. Le type de graphie des paragraphes et son évolution indiqueraient que la mise à l'écrit serait contemporaine des événements du XVI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 7.3**). La liste des crues semble donc avoir été réalisée au fil des siècles. La lecture de tous les autres documents disponibles semble confirmer que ces événements constituent les plus exceptionnels et dommageables pour la cité de Nevers (cf. **chapitre 5**).

Et finalement, malgré l'apparence hétéroclite des différentes parties de ce document, elles semblent tout de même avoir en commun de relater des événements remarquables pour la communauté, que ce soit des réunions de création de nouvelle monnaie, le mariage de la nouvelle comtesse, une découverte archéologique ou encore un événement de crue exceptionnelle.

### **1.3.2. La crue exceptionnelle de septembre 1586**

Alors pourquoi cette liste existe-t-elle ? Qu'est-ce qui motiva la mise à l'écrit du premier événement, puis des suivants ? Les différents scripteurs ne s'étant pas exprimés sur leur(s) motivation(s), la réponse à ces questions ne peut reposer que sur des hypothèses.

On peut tout naturellement s'intéresser au premier événement et il faut dès lors noter l'exceptionnalité de celui-ci. Nous avons considéré la crue de septembre 1586 comme exceptionnelle en raison des dégâts qu'elle a provoqués (cf. **chapitre 5**). À Nevers, l'inscription du registre souligne l'intensité exceptionnelle ainsi que la rapidité de la crue : « *ladicte* crue [fut] si soudaine comme depuis le midy [...] jusques à trois heures du soir et par telle fureur et violance ».

Ces mêmes points sont soulignés lorsque la crue touche Decize. Au XIX<sup>e</sup> s., plusieurs ouvrages d'auteurs locaux reprennent le contenu d'un document, aujourd'hui perdu (**Girerd, 1852 ; Tresvaux de Berteux, 1855 ; Julien, 1883 ; Poussereau, 1891**), décrivant l'événement comme tel : « la Loire était

tellement basse qu'on passait son bras droit à pied sec. À midi une crue extraordinaire se manifesta tout-à-coup, et ses progrès furent si rapides qu'à minuit les eaux s'élevèrent à la hauteur de l'autel de l'église de Saint-Privé ou Saint-Privat, détruisirent l'escalier de son clocher, atteignant les solives du cellier, emportant, dans leur impétuosité, le pont de Crotte et plusieurs maisons qui faisaient obstacle à leur passage ». Girerd semble être le premier à utiliser cette source. Seul problème : il date l'évènement de septembre 1585 et non pas de 1586. La similarité de la temporalité (autour du 20 septembre), du déroulement de l'évènement de crue et des dégâts, nous laisse penser que Girerd fit une erreur de datation, reprise ensuite par tous les autres auteurs, dont **Champion (1858)**, jusqu'à aujourd'hui. La « fameuse » crue de Decize de septembre 1585, faisant quasi partie du patrimoine historique de la ville (**Volut, 1992**), est donc très fort probablement bien celle de 1586 que l'on retrouve sur le reste de la Loire. En l'absence du document original, nous ne pouvons être certains de cette affirmation.

Suite à la crue, le roi de France Henri III accorde à la communauté urbaine de Decize, ainsi qu'à celle de la Charité-sur-Loire (**recherches de Marion Foucher**), des octrois sur l'impôt afin de reconstruire les ponts emportés par la crue (**Volut, 1992**). Dans le Forez, la « royne Isabel » (peut être Isabelle-Claire-Eugénie d'Autriche ?) finance les lourdes réparations et donne assistance aux sinistrés (**Champion, 1858**). Du Forez (**Champion, 1858**) jusqu'à Nantes (**Mercier, 2013**) et en Anjou où les levées sont rompues (**Champion, 1858**), en passant par Decize et Nevers, la crue atteint des hauteurs exceptionnelles et fait de très lourds dégâts. Une grande partie d'Orléans est inondée et la jonction des eaux de la Loire avec celles du Loiret font tomber les ponts d'Olivet et de Saint Mesmin (**Champion, 1858**). À Tours, la crue aurait atteint une hauteur de seulement quelques centimètres inférieurs à celle de 1856 ! (**Geneslay, 1971**). Or, le linéaire des levées et leur hauteur étant moins importantes au XVI<sup>e</sup> s. qu'au XIX<sup>e</sup> s. (**Dion, 1961**), les eaux ont donc pu bien plus s'étendre en amont de Tours lors de la crue que pour celle de 1856. Ainsi, si la hauteur fut quasiment la même qu'en 1856, le débit fut-il donc plus élevé ? Nous ne pourrions probablement jamais répondre à cette question, mais ce qui est certain c'est que l'évènement de crue de 1586 compte parmi les plus extrêmes des huit derniers siècles. Très peu d'évènements provoquent de si lourds dégâts autant à l'extrême amont de la Loire qu'à son extrême aval, mis à part les trois crues de 1846, 1856 et 1866 et celle de 1907. Bien que l'on manque encore de données pour en être certain, il est possible que la crue de 1586 ait été une crue de type mixte (cf. **chapitre 2**) expliquant l'intensité exceptionnelle de l'évènement de l'amont vers l'aval du bassin.

En plus d'avoir atteint une intensité exceptionnelle, la crue semble avoir été rapide et inattendue sur la zone d'étude, contribuant au choc des populations. L'évènement de crue est assez isolé temporellement. La dernière crue extrême est passée 40 ans plus tôt en 1548 et la période hydrologique, bien que l'on manque de données pour en être certain, est assez calme (cf. **chapitre 5**), renforçant probablement le côté inattendu de l'évènement et le choc des populations. Enfin, à Nevers, l'inondation atteint l'actuelle Place du Puits des Meules, dépassant les remparts (**Médiathèque de Nevers, MS/034 ; Figure 7.2**), frontières et aménagements symboliques de la ville (**Labbé, 2017**), dans le cas de Nevers

situé entre la ville et le fleuve. Ces différents facteurs renforcèrent peut-être l'exceptionnalité de l'évènement pour les contemporains et déclenchèrent alors la première mise à l'écrit de l'évènement dans ce document déjà utilisé depuis le XIV<sup>e</sup> s. pour copier documents importants et inscrire les faits marquants dans le cadre de la gestion de la ville ou de la vie de la communauté.

Le contenu du registre **MS/034** est une preuve d'une certaine mémoire des crues les plus intenses, présente depuis au moins le XVI<sup>e</sup> s. à Nevers. À partir du XVIII<sup>e</sup> s., la mise en comparaison entre les évènements de crue devient de plus en plus commun dans les rapports des ingénieurs des Ponts et Chaussées. La volonté d'entretenir une mémoire des crues devient même une composante majeure de la gestion de l'hydrosystème et du risque par les ingénieurs à partir du XIX<sup>e</sup> s. sur la Loire (**Temam, 2012**).

#### **1.4. Des évènements catastrophiques ?**

##### **1.4.1. Des évènements considérés comme non catastrophiques avant le XVIII<sup>e</sup> s.**

Comme nous venons de le voir, la crue de 1586 a probablement marqué, voire choqué, les populations riveraines sur la zone d'étude. Mais peut-on dire que les évènements de crue les plus intenses ont été *catastrophiques* ? Autrement dit, les sociétés contemporaines des évènements extrêmes les ont-elles considérés comme une *catastrophe* ? Pour que *catastrophe* il y ait, il faut que l'évènement exceptionnel ait été considéré comme remarquable, inhabituel et traumatique (**Berlioz, 2006 ; Leguay, 2005 ; Labbé, 2017**). Nous savons que les crues précédemment citées furent exceptionnelles, donc inhabituelles, et l'interprétation du document **MS/034 (Médiathèque de Nevers)** va dans le sens de l'existence d'évènements hydrologiques remarquables pour les contemporains, mais furent-ils traumatiques ? Aucun document ou autre exemple ne semble présenter les évènements de crues comme traumatiques.

Par exemple, les processions post-catastrophes constituent souvent l'expression la plus visible du choc des sociétés suite à l'évènement (**Berlioz, 2006 ; Labbé, 2017**). Or, aucune ne semble avoir été réalisée suite à une crue à Nevers. Le seul exemple d'intervention religieuse dont nous disposons est une messe célébrée à Nevers en juillet 1469, afin que « les fondements de la dicte pille (du pont de Loire) feussent pris et mis hors du dongier de eaulx en faisant dire la dicte messe » (**AM Nevers, CC/63, fol 27**). À l'inverse, plusieurs processions furent réalisées à Nevers pour d'autres types de calamités : famine (**AM Nevers, CC/71, 1483, fol 16**), causes de guerre (**AM Nevers, CC/27, 1422 ; CC/28, 1428 ; BB/21, 1617**), incendie (**AM Nevers, CC/72, fol 38**), tremblement de terre (**AM Nevers, CC/70, 1477**), de nombreuses fois pour les récurrentes pestes et autres maladies (e.g. **AM Nevers, CC/42, 1439, fol 40 ; BB/19, 1584 ; BB/20, 1597 ; BB/22, 1633**), et même pour de fortes pluies (**AM Nevers, CC/39, 1437, fol 51**). Si ces pluies ont bien provoqué des crues cette même année, ce sont les inondations urbaines qui semblent avoir le plus marqué les habitants de Nevers.

Sur la base de ce travail de thèse, nous rejoignons donc l'avis de **Foucher (2023c)** soutenant que ces événements ne semblent pas constituer de catastrophe à Nevers jusqu'au XVIII<sup>e</sup> s., bien que l'aléa eut un réel potentiel catastrophique. Les documents sont trop peu nombreux à Decize pour émettre un quelconque avis. Néanmoins, il faut admettre que, même pour le cas de Nevers, conclure par l'absence n'est pas idéal. Les travaux historiques précédents regorgent d'exemples de catastrophes naturelles ayant provoqué des dégâts colossaux et pertes nombreuses de vies humaines sans que les documents disponibles n'en fassent aucune illusion (**Leguay, 2019**). De plus, plusieurs fonds ayant pu nous renseigner sur le caractère traumatique ou non des événements extrêmes de crue à Nevers et Decize n'ont pas été consultés. Les comptes communaux ne mentionnent par exemple pas toutes les processions ou autres événements religieux. Y'a-t'il eut des réactions de l'église suite à la crue de 1469 ? de 1586 ? Il faudrait consulter les vastes fonds des institutions religieuses séculières, dont certains comptes ont été conservés à Nevers à partir du XV<sup>e</sup> s. (**AM Nevers, série GG ; AD Nièvre, série G**). De même, si la comptabilité présente des exemples d'assistance publique au Moyen Âge (**recherches de Marion Foucher**), les délibérations de l'administration communale pourraient aussi témoigner d'actes d'assistance communale suite à des événements hydrologiques s'il y en eut (**AM Nevers, série BB**).

#### **1.4.2. Les changements de la fin du XVIII<sup>e</sup> s. et du XIX<sup>e</sup> s.**

En revanche, les trois crues de 1846, 1856 et 1866 peuvent clairement être considérées comme des événements catastrophiques sur la Loire (**Temam, 2012 ; Labbé, 2017**). L'exceptionnalité et l'étendue des dégâts provoqués par la succession des trois événements de crue dont les fréquences de retour dépassèrent les cent ans, pousse le pouvoir impérial à revoir l'aménagement du val, commander de nombreuses études afin de comprendre précisément le fonctionnement de l'hydrosystème et de ses crues, ainsi que des cartographies de ses formes en plan. L'effet traumatique est réel et bien présent à l'échelle de la vallée ligérienne, mais également à l'échelle de l'état, car les crues exceptionnelles de la Loire furent accompagnées de crues exceptionnelles également sur le Rhône. Cet effet traumatique se reflète à travers les représentations picturales des événements de crue (**Metzger et Desarthe, 2017**) et dans la littérature scientifique. Maurice Champion commence par exemple le premier tome de sa grande entreprise potamologique en la justifiant avec les mots suivants : « Les désastreuses inondations dont la plus grande partie de la France a été affligée en 1840, 1846 et 1856, ont appelé l'attention des esprits sur ces grandes catastrophes [...] » (**Champion, 1858**).

Mais nous pourrions peut-être considérer un autre événement, intervenu plus de 50 ans auparavant, comme première grande « catastrophe » ligérienne : la crue de 1790. Pour comprendre l'événement de 1790, il faut remonter deux ans en arrière en 1788. L'hiver 1788-1789 est le second plus intense du siècle après celui de 1709, et met à mal toute la population à travers le royaume de France, contribuant en partie à la Révolution française (**Le Roy Ladurie, 2006**), mais également en Europe (**Pfister and Wanner, 2021**). Sur la zone d'étude, dès novembre 1788, les sociétés riveraines doivent

faire face à l'interruption de la navigation et des moulins à cause des glaces présentes sur la Loire et ses affluents (**AM Nevers, BB/46**). Certains observateurs des Ponts et Chaussées estiment ne jamais avoir vu autant de glace sur la Loire (**AD Loiret, 2J/2090**). La Loire reste gelée de novembre 1788 à janvier 1789. Des réunions extraordinaires s'organisent à Nevers afin de réfléchir à la manière de casser les glaces pour libérer les moulins, puis plus tard pour limiter le risque de débâcle. Les différentes entreprises ne suffisent néanmoins pas, car mi-janvier, les 15 et 16 janvier sur la zone d'étude, le 18 à Orléans, une débâcle se produit sur la Loire et sur ses affluents, notamment sur l'Allier (**AN, F/14/1202**). Les dégâts sont très importants : si le pont de Nevers en ressort indemne, de nombreux aménagements et levées de la zone d'étude sont très endommagés. Une grande partie du val est inondé et les récoltes perdues (**AD Nièvre, 1L/240**). Ce constat est également fait à l'aval de la zone d'étude, de La Charité à Tours (**AN, F/14/1202 ; Champion, 1858**), en passant par Orléans (**AM Orléans, BB/19**). À la Charité, un pont de bois sur un bras secondaire est emporté (**Dumont et al., 2014**), tandis qu'à Jargeau c'est le pont principal en pierre qui est détruit par les glaces (**Foucher, 2024**). De nouvelles crues emportent une nouvelle fois les récoltes en février, mai et octobre (**AD Nièvre, 1L/240**). Bien qu'elle ait été occultée par la crue de 1790, **Champion (1858)** ne la mentionnant par exemple pas, la crue d'octobre 1789 atteint des hauteurs très élevées, inondant les chantiers, menaçant les aménagements, ouvrant également de nouveaux chenaux et détruisant la majorité des cultures (**AN, F/14/1203**).

Moins de deux ans après la débâcle de janvier 1789, un an après la crue d'octobre 1789, et alors que toutes les brèches ne sont pas encore réparées, les riverains indemnisés, et les réserves de céréales reconstituées, l'eau monte une nouvelle fois rapidement en novembre 1790. Malheureusement pour les riverains, l'évènement est loin d'être ordinaire. La crue atteint des hauteurs et débits exceptionnels sur tout le cours de la Loire, de l'amont (**Rouchon, 1907 ; Chaussard, 1970**) à l'aval de la zone d'étude (**Champion, 1858**), ainsi que sur ses affluents, dont le Cher (**Mesmin, 2020**) et l'Allier. Elle y constitue encore aujourd'hui la crue de référence avec un débit atteint à Moulins à plus de 7000 m<sup>3</sup>/s, contre « seulement » 4700 m<sup>3</sup>/s en 1856 (**Onde, 1923**). À Nevers, la crue de 1790 compte parmi les évènements les plus exceptionnels recensés, la plus haute depuis au moins 200 ans (**Médiathèque de Nevers, MS/034**). La crue fait de très lourds dégâts, détruisant de nombreuses habitations, ouvrant plusieurs brèches dans les différents aménagements, détruisant les ponts de Decize et Nevers, et provoquant la perte d'une large partie des récoltes que ce soit sur la zone d'étude (**AD Nièvre, 1L/240**), ou à l'aval, de la Charité à Tours (**AD Loiret, 2J/552, 2J/2090 ; AN, F/14/1202 ; Champion, 1858**). L'ampleur des dégâts amène les autorités révolutionnaires à produire une documentation exceptionnelle afin de recenser toutes les pertes de cheptels, récoltes, secours, ainsi que les dégâts aux aménagements sur la totalité du cours (**AD Nièvre, 1L/240, 1L/415, 1L/416, 6L/31**). Aucun autre évènement avant ceux du milieu du XIX<sup>e</sup> s. n'est responsable d'une telle production documentaire. On comprend parmi les différentes plaintes recensées dans les fonds la détresse des riverains de la Loire. Beaucoup font face à de lourdes pertes de cheptels et de productions agricoles en 1789 et en 1790. Certains durent contracter

des emprunts à la suite des dégâts des glaces de 1789, et font face à de lourdes dettes suite aux pertes de 1790 (**AD Nièvre, 1I/128/4**). Suite à l'évènement, l'aménagement du val est en partie repensé. Pour la première fois, la question de protéger les populations des inondations est mise sur la table, expliquant en partie l'exhaussement des levées. De plus, le département de la Nièvre bénéficie d'aides financières de l'Assemblée Nationale et du Roi lui-même (**AD Nièvre, 1L/240**).

On manque de documents pour affirmer que les populations furent traumatisées, mais on peut le supposer. Il faut donc comprendre que la crue de 1790, avec son lot de destruction, intervient après deux années de froid, de glace et de crue, mais également dans un contexte politique particulier, en pleine révolution française. La crue de novembre 1790 est donc le premier évènement que l'on pourrait qualifier de catastrophique pour la zone d'étude. La mémoire traumatique de l'évènement est ensuite remplacée par celle des trois crues du milieu du XIX<sup>e</sup> s. qui dépasse la crue de 1790 sur la zone d'étude en hauteur, dégâts et remises en question des modes de gestion de l'espace fluvial.

\*

En conclusion, la documentation urbaine a permis de compléter les travaux de **Foucher (2023c)** et de rendre compte de sociétés urbaines attentives et réactives aux évènements de crue du XIV<sup>e</sup> s. au XIX<sup>e</sup> s. Les réactions similaires des communautés de Nevers et Decize indiquent que les évènements de crues étaient vécus pour la majorité comme évènements ordinaires et les sociétés s'organisèrent pour faire face à ces évènements ordinaires. Cette organisation a peut-être aussi contribué à l'apparente non-considération par ces sociétés des évènements de crues comme catastrophiques.

En effet, l'organisation de l'anticipation et de la réponse plus générale aux évènements, notamment destructeurs, permet à la communauté de réduire sa vulnérabilité économique. Néanmoins, la vulnérabilité sociale des sociétés riveraines sur les deux sites d'études urbains reste assez floue, voire inconnue. Nous avons vu que les informations liées aux inondations sont très rares. De plus, nous n'avons aucune information sur de potentielles victimes humaines, contrairement à plusieurs indications sur des pertes de cheptels (**MS/034, médiathèque de Nevers**). **Labbé (2017)** fait remarquer que si le bilan humain est une composante fondamentale de la qualification de l'évènement catastrophique de notre société actuelle (**Clavandier, 2004**), ce n'était pas du tout le cas au Moyen Âge, expliquant l'absence de données de ce type sur la zone d'étude et la rareté générale à la Loire et plus largement à la France. Difficile donc de conclure sur la vulnérabilité sociale des sites d'étude.

Enfin, il faut garder à l'esprit que le fleuve et ses ressources restent une composante essentielle à la survie et à l'enrichissement de ces sociétés riveraines. Sans la Loire et ses crues, pas d'activité de navigation sur laquelle reposent en (grande) partie les revenus des cités ligériennes. Ces sociétés sont donc avant tout tournées vers l'hydrosystème, connaissent et s'organisent en fonction de son activité, ce qui permet aussi d'expliquer leur adaptation. Néanmoins, par manque de temps, nous n'avons réuni que très peu d'information de l'effet sur ces sociétés des basses eaux ou d'étiages prolongés ou anormaux

qui mettent justement à mal la navigation. Il serait intéressant de voir, s'il y'en a, les modalités d'adaptation des communautés urbaines à cet autre aléa.

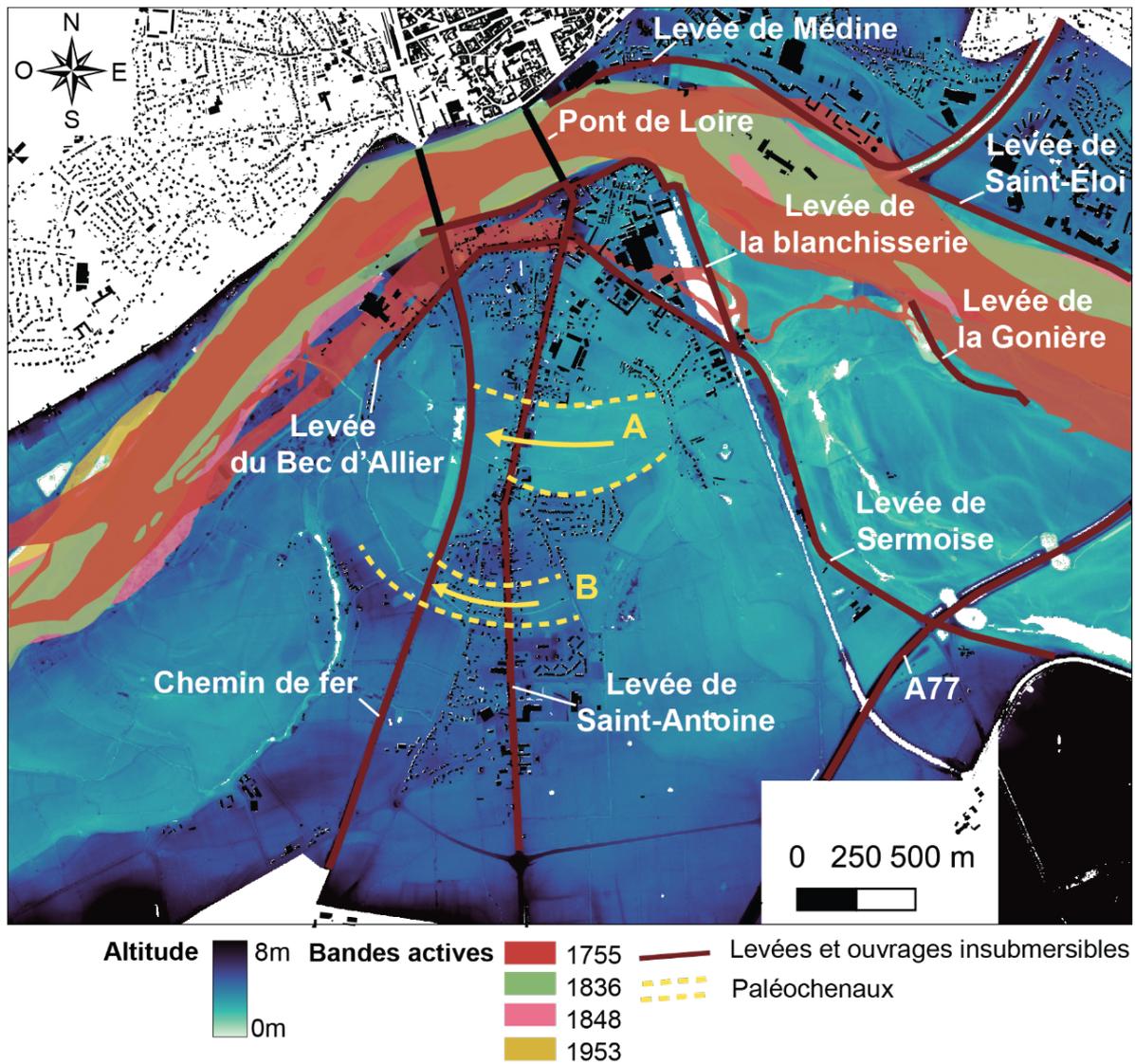
## 2. Les communautés face aux divagations de la Loire

Si les cités et leurs ponts ont eu à souffrir des crues, les communautés urbaines durent aussi composer avec les migrations latérales et la capacité érosive de la Loire. Le franchissement et le maintien des ponts sur la Loire furent un défi partagé par les différentes communautés urbaines de la zone d'étude. S'y ajoute l'enjeu du maintien des bonnes conditions de navigabilité et assurer la pérennité des ports. Suivant ces deux enjeux principaux, les sites connurent des trajectoires d'aménagements différentes, mais qui amènent dans tous les cas à la contrainte de plus en plus importante du lit fluvial.

Marion Foucher publia un travail sur l'étude des battis, levée submersible et pierre angulaire de l'aménagement fluvial à Nevers au XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. (**Foucher, 2023c**). La richesse documentaire nous permet ici de réaliser une étude précise et détaillée de l'évolution de l'aménagement des cités étudiées du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours. Jusqu'alors, aucune reconstitution de l'aménagement de la cité de Nevers et de ses alentours n'a été réalisée avant le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (**Temam, 2012**), et aucune reconstitution tous siècles confondus à Decize et à Digoïn. C'est donc ici l'occasion de présenter en détail les modalités de l'évolution de l'aménagement, des stratégies mises en place et de leurs temporalités, témoignages des relations entre les sociétés et leur environnement.

### 2.1. Le défi du franchissement d'une Loire large et mobile à Nevers

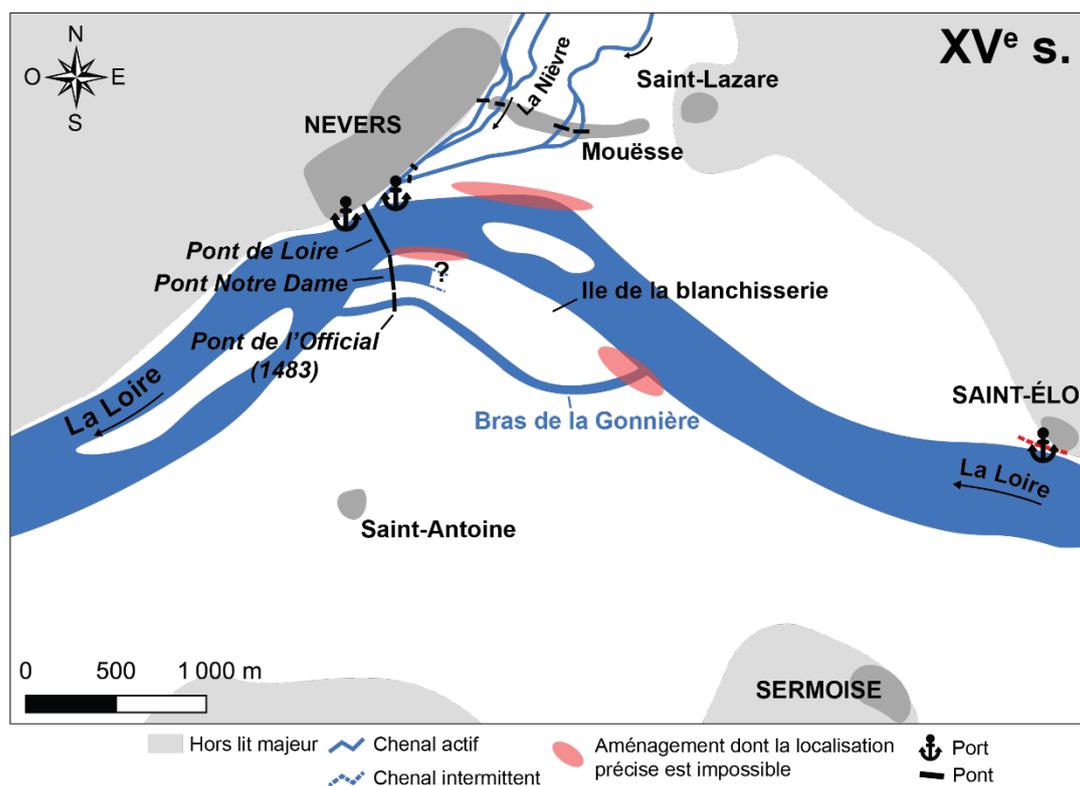
Parmi les différentes contraintes imposées par la Loire, la difficulté principale de la communauté de Nevers fut de maintenir le franchissement de la Loire sur un site où celle-ci a largement divagué. Jusqu'à la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s., la Loire adopte sur le site de Nevers un style fluvial à chenaux multiples (**Figure 7.4**). Comme les résultats du **neuvième chapitre** vont nous permettre de le voir, si la bande active présente une largeur de 300 m, cette largeur n'est pas exceptionnelle et même en deçà de la médiane générale des largeurs de la bande active entre Digoïn et le Bec d'Allier. Toutefois, maintenir le franchissement sur une bande active mobile de 300 m constitue un certain défi. Technologiquement, il était encore très difficile avant le XVIII<sup>e</sup> s. de maintenir le franchissement avec un seul ouvrage et trois ponts étaient dès lors nécessaires pour traverser la Loire. La communauté de Nevers eut de grandes difficultés à les maintenir face aux crues et dut les reconstruire de très nombreuses fois. Dès le XV<sup>e</sup> s., afin d'alléger les coûts de ces maintiens, la stratégie de la communauté fut de tenter de simplifier le lit en un seul et même bras. Le défi n'en fut pas aisé puisqu'il fut réalisé seulement à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s.



**Figure 7.4.** Aménagements insubmersibles actuels et succession des bandes actives de la Loire à Nevers entre 1755 et 1953.

### 2.1.1 Une large bande active fortement aménagée dès les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s.

Tout comme les crues, des témoignages de présence d'aménagements fluviaux apparaissent dès les premiers comptes communaux de Nevers de la fin du XIV<sup>e</sup> s. Ceux-ci révèlent la présence de battis, digues submersibles, présents dans le lit mineur de la Loire (Foucher 2023c). L'objectif principal de ces battis est de limiter l'action érosive du cours d'eau et de contraindre la Loire à passer sous le pont de Loire, pont principal et le plus long de la cité (Figure 7.5). En 1456 et 1457, des nouveaux battis sont construits sur la Loire qui « treffort gaigne terre sur les pastureaux » (AM Nevers, CC/52, fol 25v ; CC/53, fol 11v), probablement situés en rive gauche en amont des ponts sur la Loire.



**Figure 7.5.** Proposition de reconstitution du site de Nevers au XV<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle de la carte de 1692, modifiée à partir des données disponibles dans les archives documentaires.

Les batis permettent aussi de protéger les aménagements de l'érosion. En 1427, un nouveau batti est construit devant la porte de Loire afin de « destourner leau » (AM Nevers, CC/31, fol 20). En 1437, des batis sont aussi construits pour protéger des moulins (AM Nevers, CC/40, 34) et en 1452, 1468 et 1533 pour protéger les piles en pierre du pont de Loire (AM Nevers, CC/48, fol 4 ; CC/63, fol 34 ; CC/105ter fol 22).

Ces batis sont régulièrement réparés et renforcés, notamment suite aux crues. Dès le premier compte en 1390, une brèche provoquée par la crue de l'hiver 1389 dans un batti doit être comblée (AM Nevers, CC/1, fol 17). En 1456, ce sont 40 m de batis qui doivent être réparés après avoir été « rompu par la forse des grans eues » (AM Nevers, CC/52, fol 24). Bien qu'il soit impossible de le connaître entièrement, le linéaire des batis est probablement très important comme en témoignent les sommes importantes allouées par la commune chaque année ou le nombre d'ouvriers présents sur les chantiers (206 en 1405) (Foucher, 2023c ; AM Nevers, CC/14). Pour la seule année 1456, des mariniers (dirigeant probablement le chantier) sont payés pour avoir réalisé près de 390 m (200 toises) de batti « simple » et 60 m de batti « double » aux « lieux où il est besoing et necessaire » (AM Nevers, CC/52, 20 et 21).

Bien qu'il soit certain que des batis étaient présents sur la Loire et la Nièvre, leur localisation précise est difficile. Comme le note Foucher (2023b), il est certain que plusieurs batis sont présents en

rive gauche sur les îles afin de les protéger de l'érosion (**Figure 7.5**). Nous pouvons cependant émettre l'hypothèse qu'au moins un de ces battis était destiné à limiter l'érosion d'une île qui pourrait correspondre à celle de la blanchisserie des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> s. En 1515, un acte qualifie même de probables battis situés au niveau du pont de l'Official de « levees des chaulmes de Loire » (**AM Nevers, CC/93, 20**). D'autres battis semblent se trouver en rive droite, probablement entre Nevers et Saint-Éloi au niveau des deux confluences avec la Nièvre (**Figure 7.5; AM Nevers, CC/161, fol 19**). Leur but était probablement de limiter l'érosion vers le faubourg de Mouësse, stabiliser les confluences et sécuriser le port de Saint-Éloi par lequel transitait une grande partie des matériaux. Enfin, en 1565, suite à une crue destructrice, plusieurs mariniers sont payés par la cité de Nevers pour réparer et combler les brèches dans les battis et d'en construire de nouveaux « du côté de Savigny », en face de Saint-Éloi (**AM Nevers, CC/144, fol 7**). La mention « seule » de réparations réalisées aux battis « des sentiers de Loire » en 1577 pourrait indiquer la présence de ces aménagements en dehors de Nevers, dans le cas contraire la localisation précise aurait été mentionnée (**AM Nevers, CC/152, fol 4**).

Comme le note **Foucher (2023c)**, l'importance des battis pour la ville se reflète par l'organisation des comptes eux-mêmes, pour lesquels des catégories entières leurs sont accordées, notamment en 1391 (**AM Nevers, CC/1**), 1404-1405 (**AM Nevers, CC/13**), 1405-1406 (**AM Nevers, CC/14**) et 1406-1407 (**AM Nevers, CC/15**). Bien qu'il soit difficile de déterminer leurs localisation, étendue et nombre, il est certain que dès le XIV<sup>e</sup> et le XV<sup>e</sup> s. certaines rives de la Loire sont déjà aménagées, voire très aménagées.

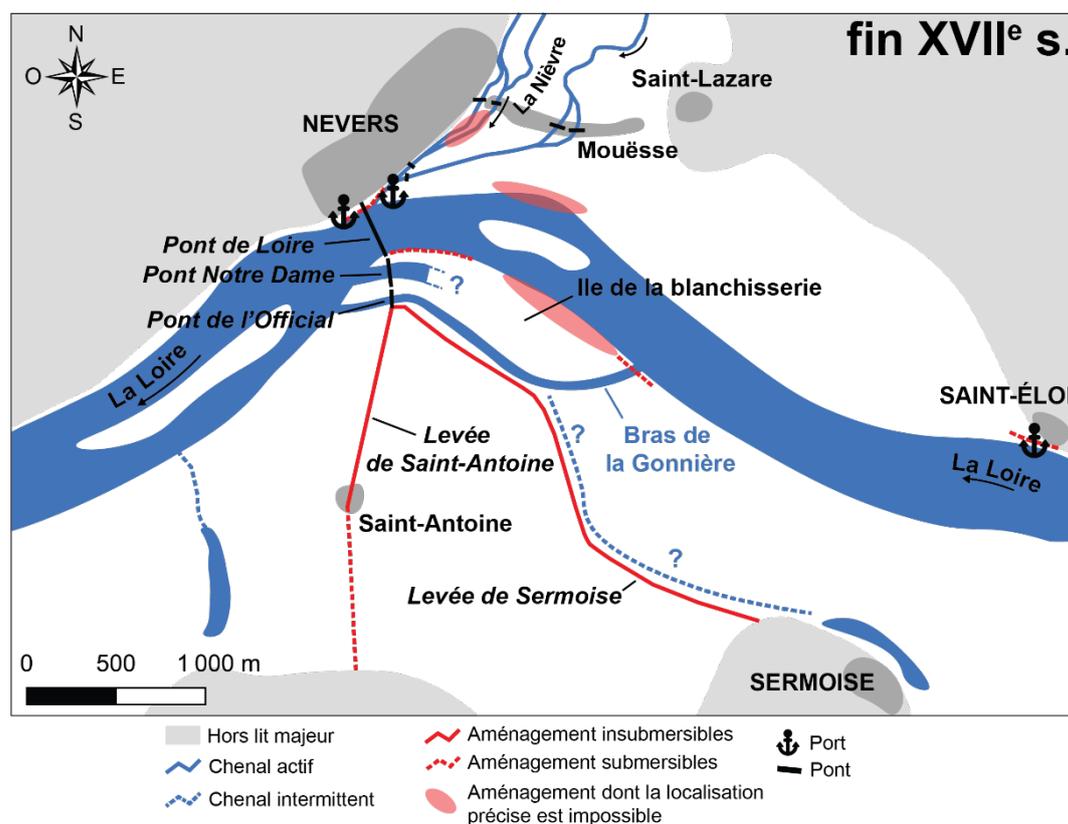
Mais la communauté de Nevers ne se contente pas que de l'usage de battis, elle passe aussi par la modification artificielle et directe de l'écoulement dans le lit mineur et la bande active. En 1405, en saison d'étiage, plus de 20 ouvriers sont payés pour « geter le sablon *et* fere les foussez des greves de Loyre » et pour « charroyer du sablon des greves de Loyre et mettre de dehors icelles *pour* delivrer la voye de leaul » ou encore « pour fere les foussez des greves pour prendre le cours de leaul *et* deschargier le bateiz de Loyre » et « faire le chemin a leaul » (**AM Nevers, CC/14, fol 17**). Sur la Nièvre, la rivière transportant moins de sable que la Loire, ce sont plutôt des « grant motes de terre » qui sont retirées afin que « la grant riviere puisse passer » en 1456 (**AM Nevers, CC/52, 17**). La communauté n'hésite pas à supprimer directement les îles, ou plus probablement des îlots ou micro-îlots, notamment en 1456 où plusieurs mariniers sont payés pour avoir « rompu une ysle » qui déviait le courant menaçant les battis (**AM Nevers, CC/52, 24**). De même en 1601, c'est une motte de terre qui est supprimée menaçant les battis en détournant la Loire (**AM Nevers, CC/162**).

Malgré ces pressions anthropiques, la Loire semble encore conserver sa capacité érosive. En effet, Pierre Renier Official chantre et chanoine de la cathédrale de Nevers fournit en 1483 la totalité des fonds pour « parfaire ung pont et passage es chanlines de Loire près les grantz pontz » où le passage est devenu impossible « quant les eaues sont grandes » (**AM Nevers, CC/72, fol 40**). On le comprend,

la Loire semble avoir ouvert un nouveau lit, ou réactivé un bras mort situé en rive gauche au niveau des ponts de Loire, nécessitant la construction d'un nouveau pont (**Figure 7.5**). Ce bras, nommé « bras de la Gonnière », reste actif par la suite puisque le nouveau pont, fait de bois, est emporté par une crue dès 1519 (AM Nevers, CC/93, fol 20), puis en 1522 (AM Nevers, CC/96, fol 8) et 1536 (AM Nevers, CC/107, fol 18). Cet exemple témoigne de processus rapide et actif de dépôts et d'ouverture de nouveaux lits par la Loire à l'image des généralités admises dans le **sixième chapitre**.

### 2.1.2. Les nouveaux grands chantiers du XVII<sup>e</sup> s.

Au début du XVII<sup>e</sup> s., il est donc toujours difficile pour la communauté de Nevers de limiter la sédimentation, l'érosion et la mobilité de la Loire. De plus, en 1605, les ponts de Loire apparaissent délabrés et la Loire emprunte toujours le bras de la Gonnière sur lequel se trouve le pont de l'Official. De nouveaux grands chantiers sont alors entrepris par la communauté de Nevers dont certains détails apparaissent dans les comptes de 1605, 1606 et 1607 (AM Nevers, CC/166), puis dans les années 1670. Ces chantiers suivent un triple projet : un renforcement des ponts de Loire, notamment de l'Official, la concentration des eaux de la Loire sous le pont de Loire, et la fermeture du bras de la Gonnière (**Figure 7.6**), ce qui permettrait à la cité de réduire les coûts d'entretien du pont, souvent emporté.



**Figure 7.6.** Proposition de reconstitution du site de Nevers à la fin du XVII<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle de la carte de 1692.

Premièrement, le pont de l'Official est entièrement refait à partir de 1604, et cette fois-ci en pierre moyennant une forte somme d'argent (**Parmentier, 1842 ; AM Nevers, CC/166**). Mais la Loire semble toujours préférentiellement emprunter le chenal de la Gonnière lors des crues puisque le pont est emporté dès 1628. Le pont est probablement réparé en bois par la suite puisque l'on décide, sous l'égide de Colbert contrôleur général des finances du Royaume de France, une nouvelle fois de sa reconstruction totale en pierre en 1670 (**AD Nièvre, 3E/1/941**).

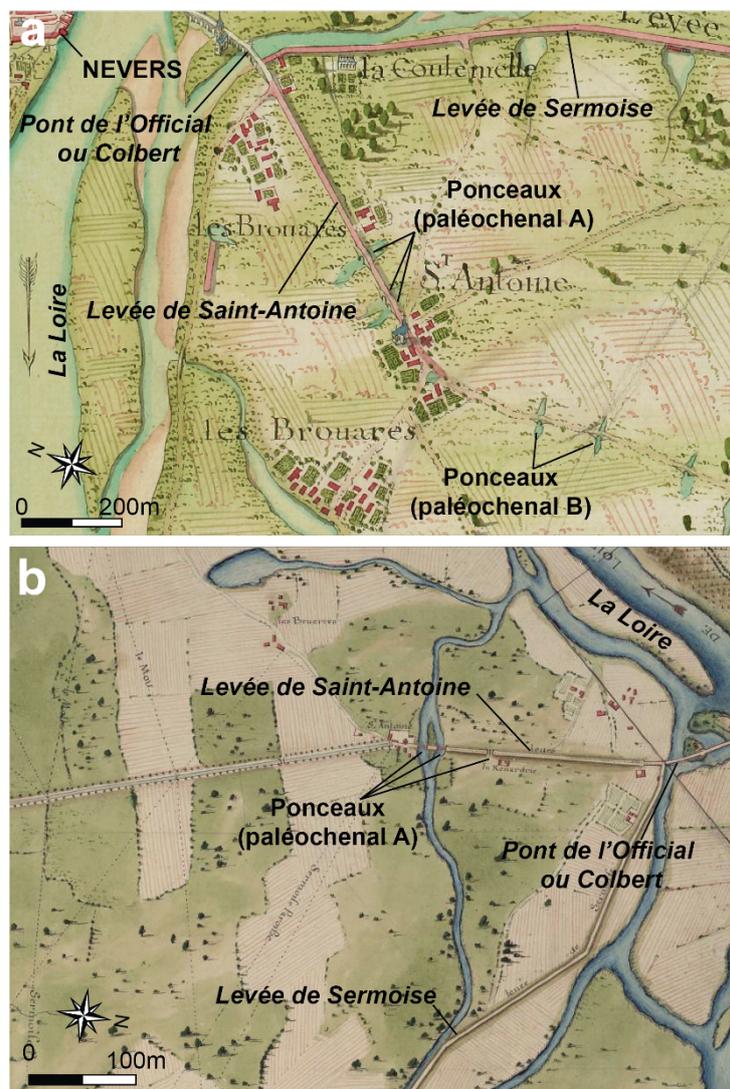
Le second point important de ces chantiers est le renforcement et le développement des battis destinés à limiter l'érosion de la rive gauche et à contracter la bande active. Le développement des battis semble se concentrer sur l'île de la Blanchisserie, depuis les ponts de Loire vers l'amont du bras de la Gonnière (**AM Nevers, CC/161, CC/162, CC/163**). Le but est véritablement de bloquer à la fois l'érosion latérale de la « rivière neusve », mais aussi de fermer le chenal responsable de cette érosion latérale et obligeant à maintenir le pont de l'Official (**Figure 7.6**). Le nombre important d'ouvriers et de matériaux impliqués dans le chantier des battis témoignent de leurs dimensions exceptionnelles. Durant la seule année 1602, plusieurs dizaines d'actes indiquent le paiement de plus de cinq milliers de tombereaux<sup>24</sup> de pierres destinées à la construction des battis (**AM Nevers, CC/163**). Des milliers d'autres tombereaux de pierres suivront les années suivantes. Sept décennies plus tard en 1670, la situation semble toutefois inchangée : le lit de la Gonnière est toujours actif et un nouveau chantier d'ampleur est commandé (**AD Nièvre, 3E/1/941, document de novembre 1670**). La reconstruction du pont de l'Official est commandée, ainsi que la réparation des battis réalisés précédemment, leur allongement et de nouveaux aménagements destinés à provoquer l'ensablement du bras de la Gonnière. Les travaux commencés, un avenant à l'adjudication est nécessaire afin d'ajouter la réparation des dégâts de la crue de décembre 1670 qui emporte 200 m de battis (**AD Nièvre, 3E/1/941, document de mai 1671**).

Enfin, c'est au début du XVII<sup>e</sup> s. qu'une solution plus radicale est entreprise afin de limiter la divagation de la Loire en rive gauche : la construction des levées de Saint-Antoine et de Sermoise (**Figure 7.6**). Ces deux levées se caractérisent par un historique qui demeure encore mystérieux, les travaux de **Temam (2012)** n'étant pas parvenus à les dater. C'est ici l'occasion de faire un point sur cet historique et d'émettre des hypothèses sur les raisons de leur présence. La levée de Saint-Antoine correspond au chemin situé dans l'axe du pont de Loire (**Figure 7.6**). Elle est la première à être réalisée en 1606 d'après **Charrier et al. (1983)** et **Florenty (1991)** sans qu'aucune de ces références bibliographiques ne précise ses sources archivistiques. Ces premières mentions de construction de la levée en 1606 n'ont pas été retrouvées dans les archives, mais si cette date est véridique, sa construction fait donc probablement partie du même projet que celui des battis du début du XVII<sup>e</sup> s. Le contenu des comptes de Nevers va dans le sens d'une absence de levée avant le début du XVII<sup>e</sup> s. : en 1581, la route

---

<sup>24</sup> Un « tombereau » correspond à une charrette tirée par des animaux

passant par Saint-Antoine est qualifiée de « mauvais chemin » et doit être repavée, sans mention de levée (AM Nevers, CC/155). Le compte de 1582-1583 fait référence de nombreuses fois à Saint-Antoine, étant le lieu où les malades de la peste étaient installés, de nouveau sans aucune mention de « levée » (AM Nevers, CC/156). La première mention écrite de la levée dont nous disposons apparaît dans le **registre MS/034** dans le paragraphe de description de la crue de novembre 1628 qui « emporta les arches du pont le plus proche de la levée de St Anthoine, rompu la levée en deux ou trois endroits [...] » (**Médiathèque de Nevers, MS/034**). Néanmoins, les comptes de la ville de 1605, 1606 ou 1607, restent muets sur une éventuelle construction de levée. La levée est représentée sur la carte de 1692, puis sur celles de Matthieu de 1727-1730 et de Trudaine, probablement de 1745-1760. Elle est représentée sur la carte de Matthieu avec des ponceaux destinés à laisser passer les eaux de la Loire en cas de crue et donc la localisation des deux paléochenaux encore visibles sur le MNT (**Figure 7.4, Figure 7.7**).



**Figure 7.7. a** : représentation de la levée de Saint-Antoine à Nevers sur la carte de Matthieu de 1727-1730. **b** : représentation sur l'Atlas de Trudaine de 1745-1780. Les paléochenaux A et B font références à ceux représentés sur la **Figure 7.2**.

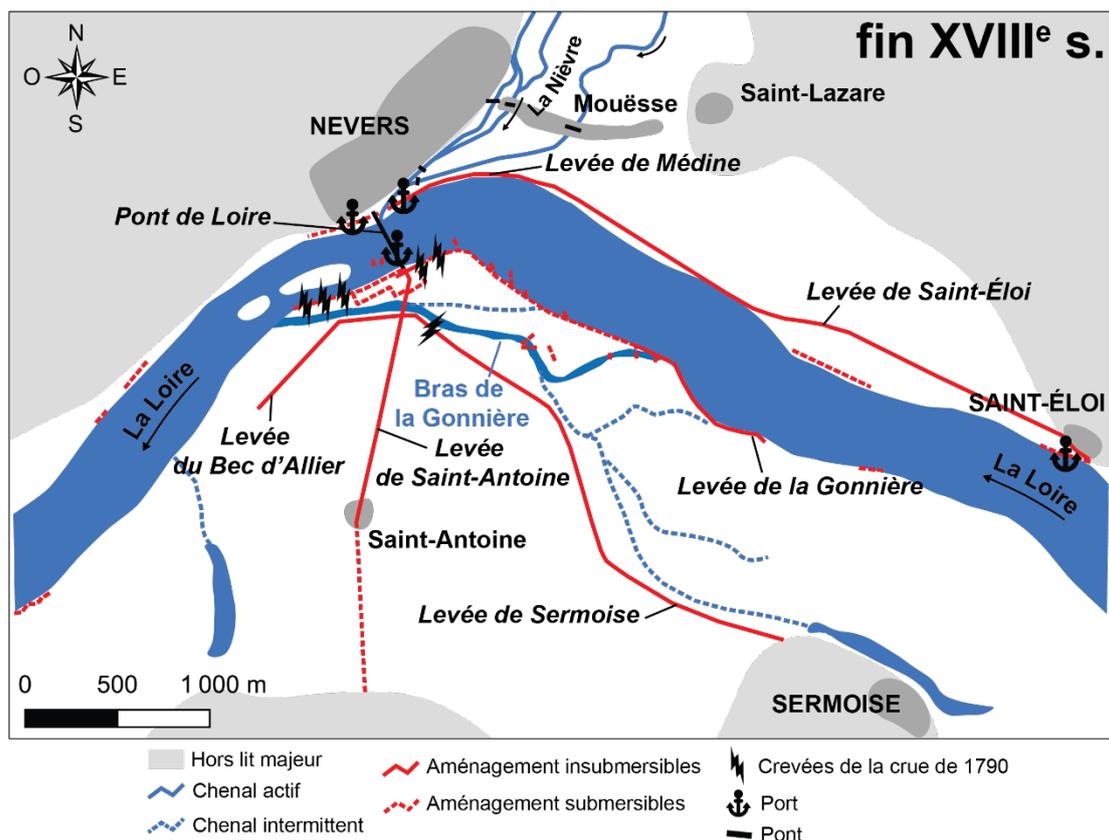
La carte de Trudaine confirme la localisation des ponceaux, mais représente le paléochenal A encore actif (**Figure 7.7**), avec un chenal longeant la levée de Sermoise en arrière (**AN, CP/F14/8490**). Nous ne savons donc quasiment rien sur la construction de la levée de Saint-Antoine, mais il est probable que le chemin dans l'axe du pont ait été surélevé auparavant afin de faire face aux inondations du lit majeur et de maintenir l'accessibilité, du moins en certains points. La datation de sa construction au début du XVII<sup>e</sup> s. semble cohérente, mais comment expliquer l'absence de mention de sa construction dans les documents ? Il est probable que la levée n'ait été commanditée ni par la communauté de Nevers ni par les Turcies et Levées, n'apparaissant donc pas dans les documents consultés. A-t-elle été commandée par le seigneur de Sermoise afin de sécuriser l'accès commercial à Nevers ? ou par un pouvoir religieux comme ce fut le cas pour le pont de l'Official ? Nous ne pouvons pas encore trancher.

Tout comme pour la levée de Saint-Antoine, et malgré son importance, les informations sur la « levée » de Sermoise sont très rares avant le XVIII<sup>e</sup> s. Les premières mentions de la « levée » de Sermoise dont nous disposons sont ses représentations cartographiques de 1692 et 1727-1730. On peut estimer que l'objectif de la levée, située entre le pont de Loire et Sermoise, fut et reste de bloquer les divagations de la Loire, ainsi que les inondations du val, car contrairement à la levée de Saint-Antoine aucun ponceau n'est présent (**Figure 7.6, Figure 7.7**). Il est probable que certains battis construits au cours du XVII<sup>e</sup> s. aient été réalisés sur l'actuel emplacement de la levée, non désignée alors comme telle. Les hauteurs mentionnées de ces battis sont de trois toises de hauteur, soit quasiment six mètres, donc insubmersibles (**AD Nièvre, 3E/1/941, bail du 4 novembre 1670**), ce qui diffère de la définition dont nous disposons de ce qu'est un batti. Il faut attendre la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. pour que l'aménagement soit véritablement désigné comme « levée » dans les documents (**AN, F/14/1203**). Nous pouvons donc émettre une hypothèse afin d'expliquer l'absence de date de construction de l'aménagement et la rareté des informations le concernant : la « levée » aurait pu être en réalité formée de battis construits au fur et à mesure du XVII<sup>e</sup> s., puis réunis en un seul et même aménagement linéaire à la fin du XVII<sup>e</sup> s., expliquant la dénomination de « levée ».

Au-delà du manque d'informations autour des deux aménagements les plus importants de toute la zone d'étude pour cette période, le problème principal de la communauté qu'est le bras de la Gonnière, signe d'une Loire encore mobile et menaçante pour les terres, n'est toujours pas résolu à la fin du XVII<sup>e</sup> s. malgré des investissements et des aménagements toujours plus nombreux.

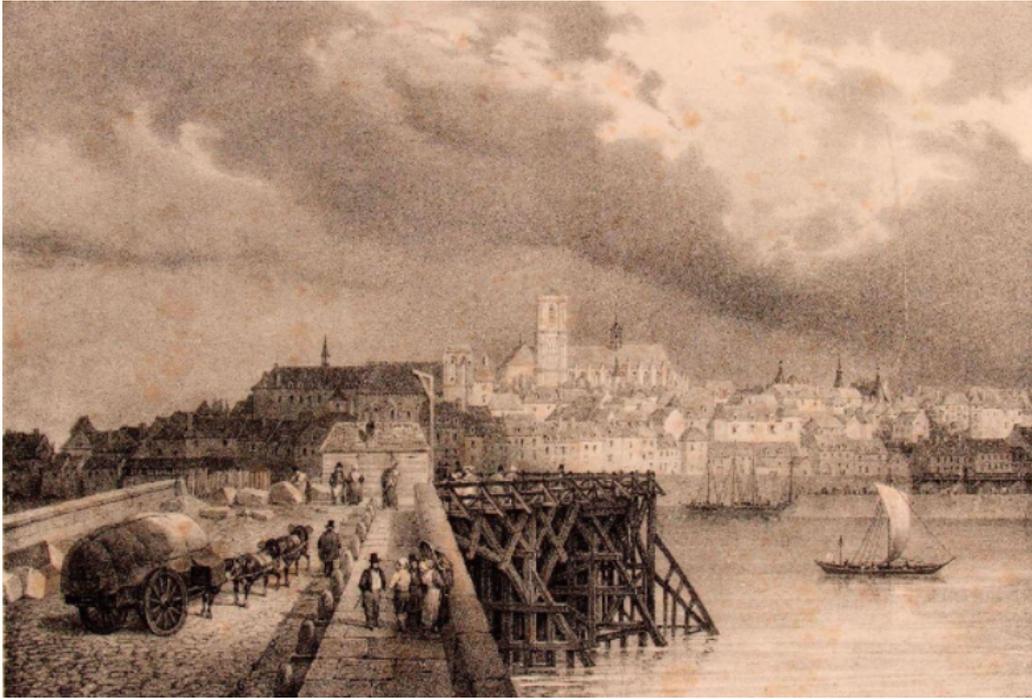
### **2.1.2. La stabilisation et contraction du lit aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s.**

Le XVIII<sup>e</sup> s. voit deux nouveaux chantiers majeurs : la construction d'un pont unique sur la Loire et un aménagement contraignant encore plus la Loire afin d'assurer efficacement la navigation dont l'activité arrive à son paroxysme (**Figure 7.8**).



**Figure 7.8.** Proposition de reconstitution du site de Nevers à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle des différentes ressources cartographiques et plans de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. (cf. chapitre 4).

Premièrement, la réalisation d'un pont unique sur la Loire doit répondre aux deux mêmes problèmes qui pénalisent la communauté depuis le XIV<sup>e</sup> s. : traverser et limiter le déportement de la Loire en rive gauche. Durant la première moitié du XVIII<sup>e</sup> s., la traversée est toujours réalisée sur les trois ponts, ces deux derniers étant en très mauvais état. En 1747, il est premièrement décidé de réparer le pont de Loire à grands frais (AD Nièvre, 1C/203). En 1764, la communauté s'occupe des deux autres ponts. Plutôt que les reconstruire, il est décidé de les supprimer : le pont de Notre Dame est en partie détruit, et l'autre partie est reconstruite dans le prolongement du pont de Loire (AD Nièvre, 3S/634). Le pont de l'Official disparaît, remplacé par une plateforme qui doit avoir le double avantage d'être plus résistante face aux crues de la Loire que le pont, et de complètement bloquer le bras de la Gonnière afin d'assurer un seul pont. Pour se faire, la plateforme est complétée par de nouveaux battis et des digues sont construites pour provoquer l'ensablement du bras (Figure 7.8). Le chantier de l'unification du pont de Loire de 1747 à 1778 coûte à la communauté plusieurs centaines de milliers de livres, des sommes très importantes nécessitant des impôts et perceptions exceptionnelles. Néanmoins, le pont ne reste indemne qu'une douzaine d'années. Bien qu'il ait résisté à la débâcle de 1789, la moitié du pont de Loire est emportée par la crue exceptionnelle de novembre 1790 (AD Nièvre, 3S/634 ; Figure 7.9).

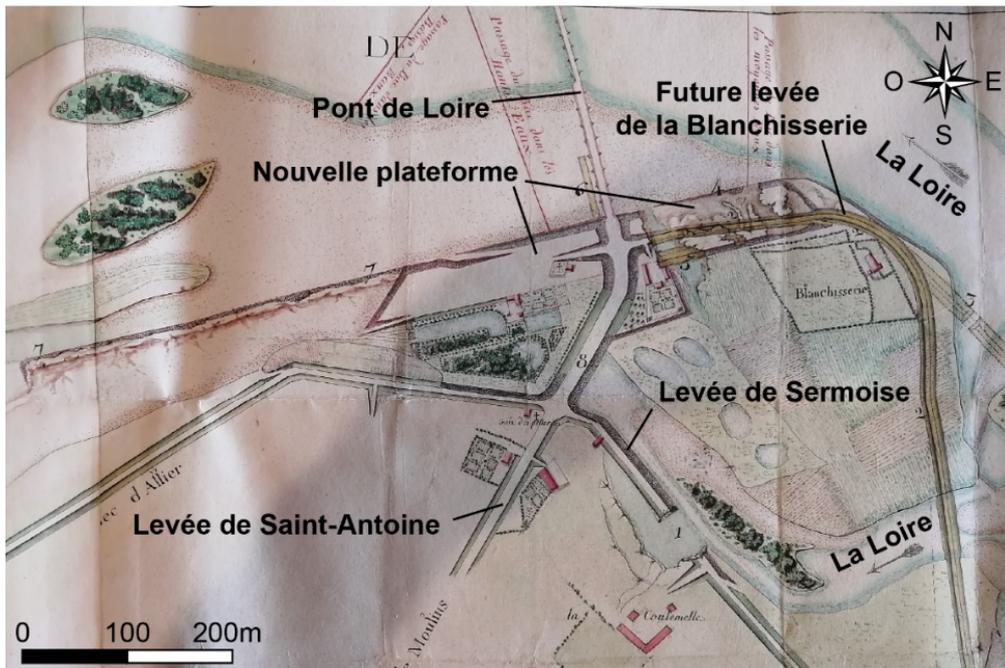


**Figure 7.9.** Lithographie d'Isidore-Laurent Deroy représentant en 1836 au premier plan le pont de Nevers détruit et remplacé par un pont de bois et à l'arrière-plan la ville de Nevers (AD Loire, CHPL4154/2).

Comme nous avons expliqué précédemment, l'exceptionnalité des hauteurs d'eau de la crue de novembre 1790, ainsi que les dégâts engendrés, un an seulement après la crue exceptionnelle de débâcle de janvier 1789, amène à une campagne importante d'aménagement. Le premier objectif est de fermer complètement l'accès du lit majeur en rive droite à la Loire avec la construction de levées insubmersibles (AN, F/14/1202). La levée de Médine, dont une partie est entreprise dès les années 1780 afin de protéger le nouveau port des forges royales (AN, F/14/1201, F/14/1202), est prolongée. Le projet de construction de la levée de Saint-Éloi doit ensuite faire le lien entre celle de Médine et le port de Saint-Éloi avec un triple objectif (Figure 7.8). Entrepris dès 1788 afin de faciliter la navigation et protéger le port de Médine, la crue de 1790 pousse les Turcies et Levées à rapidement réaliser les travaux, principalement pour sauvegarder les faubourgs de Mouësse et Saint Lazare des inondations de la Loire (AN, F/14/1202). Toujours en rive droite, mais à l'aval de Nevers, le chemin de halage est renforcé et surélevé, devenant « la levée de Billereux » (AN, F/14/1203 ; AD Nièvre, 3S/11350). En rive droite, les aménagements limitent en partie les destructions (Temam, 2012), mais la levée de Sermoise est percée (AN, F/14/1203) (Figure 7.8, Figure 7.10), laissant le val inondé, probablement avec force puisque les ponceaux de la levée de Saint-Antoine (Figure 7.7) sont emportés (Médiathèque de Nevers, MS/034).

Les aménagements préexistants sont donc renforcés à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. mais aucune nouvelle levée n'est construite, la communauté ayant refusé de peur que les eaux ne se déportent en rive droite et menacent les nouvelles levées (AN, F/14/1203). Il faut attendre le milieu du XIX<sup>e</sup> s. pour voir la construction de nouveaux aménagements d'ampleur en rive gauche avec notamment celle du chemin de

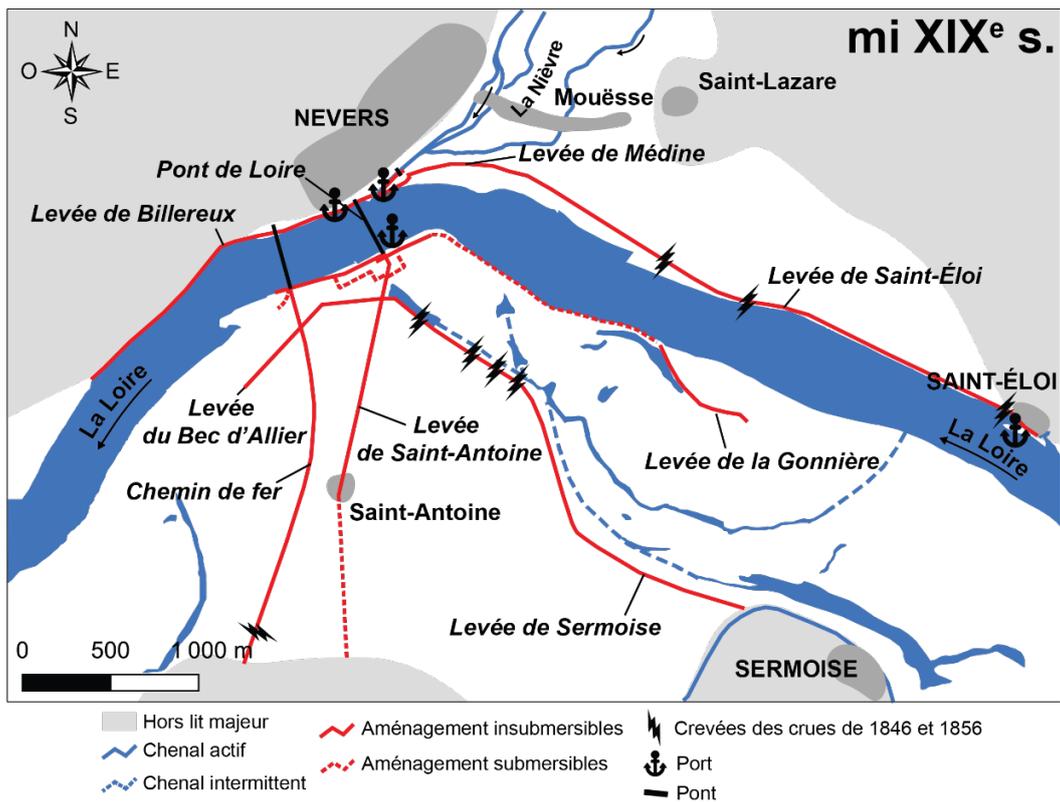
fer ou celle de la Blanchisserie destinée à protéger le port du canal latéral à la Loire (AN, F/14/7556 ; **Figure 7.11**). Si les premières levées de Nevers répondent au besoin de contraindre la Loire au profit de la communauté et de la navigation, leur développement et leur élévation constante à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. répond aussi au besoin de protéger les faubourgs du XIX<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s., des inondations (**Figure 7.11**, **Figure 7.12**). Entre le XIX<sup>e</sup> s. et aujourd'hui, de nouveaux aménagements voient encore le jour (**Figure 7.12**), notamment la levée ou pont américain en 1918, construit par l'armée américaine afin de soutenir une ligne de chemin de fer temporaire. La levée, réalisée très rapidement et non entretenue est aujourd'hui percée en plusieurs points. Enfin, l'autoroute A77 est le dernier aménagement majeur réalisé. Construite en 1995, elle contribue à fermer l'accès de la Loire à sa plaine alluviale.



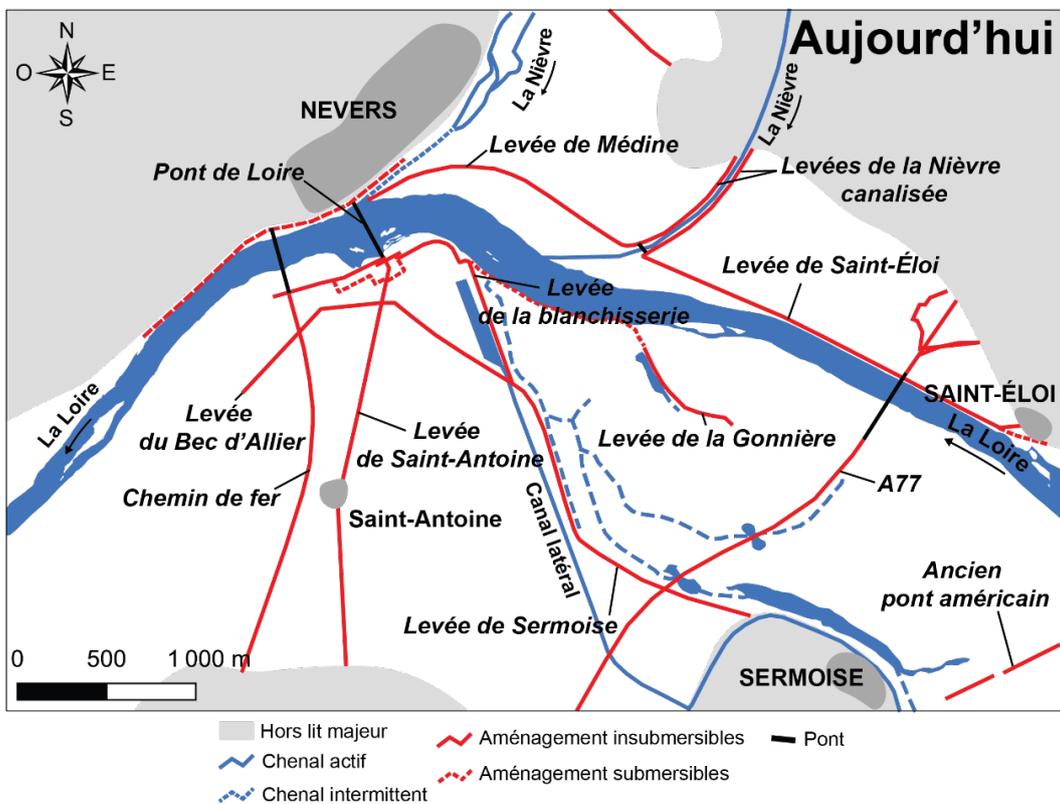
**Figure 7.10.** Dégâts en rive gauche de Nevers suite au passage de la crue de novembre 1790 (AN, F/14/1203).

\*

En conclusion, l'aménagement du lit majeur de Nevers, entrepris avant les premiers documents du XIV<sup>e</sup> s., est progressif et continu jusqu'à nos jours (**Figure 7.5** à **Figure 7.12**). Cet aménagement répond au besoin de la communauté de Nevers d'abaisser la vulnérabilité des terrains agricoles environnants, des chemins de hallages, mais aussi surtout de ses aménagements de franchissement faisant très souvent les frais des crues et des glaces. L'aménagement sert également à assurer la navigabilité du fleuve et la bonne conduite du commerce fluvial. Néanmoins, l'ampleur et la continuité de l'investissement et de l'aménagement du lit majeur à Nevers est un cas exceptionnel de la zone d'étude. Les cas de Decize et Digoin ont observé des trajectoires d'aménagement différentes.



**Figure 7.11.** Proposition de reconstitution du site de Nevers au milieu du XIX<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle de la carte de Coumes (1848).



**Figure 7.12.** Site de Nevers en 2024.

## 2.2. Le double défi du franchissement de la Loire à Decize

Le site de Decize, entouré de deux bras de la Loire, obligea la cité à maintenir deux ponts. Néanmoins, lors des crues, le cours de la Loire se concentre sur le bras gauche, menaçant constamment le pont et le faubourg de Crote. Dès le XV<sup>e</sup> s., la communauté de Decize tente de concentrer le cours de la Loire sur le bras droit, afin d'assurer le port et de limiter les destructions des crues en bras gauche. Ce n'est qu'au XIX<sup>e</sup> s. que la communauté, ou plutôt les ingénieurs arrivent au terme de leur projet.

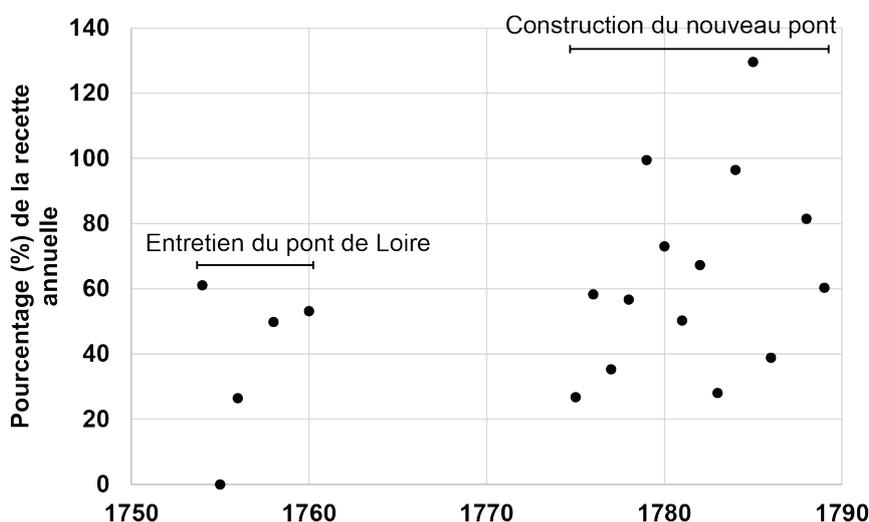
### 2.2.1. Des ponts très vulnérables face aux crues

Dès le début du XV<sup>e</sup> s., Decize maintient plusieurs ponts : deux ponts sur les deux bras de la Loire, le pont de Loire sur le bras droit, et celui de Crote sur le bras gauche, ainsi que deux ou trois ponts sur ce qui semble être plusieurs bras de l'Aron (**AM Decize, CC/1**) (**Figure 7.14**). Comme à Nevers, les paiements pour l'entretien des ponts occupent une place très importante dans les registres et les dépenses avec des catégories qui leur sont consacrées. Au cours du XV<sup>e</sup> s., les travaux sur les ponts sont continus : il faut les réparer voire les reconstruire suite aux passages des crues (**Tableau 7.2**) ou des destructions provoquées par le passage de bandes armées (**AM Decize, CC/1, CC/2, CC/3, CC/4**).

Jusqu'au XVIII<sup>e</sup> s., les ponts de Decize sont majoritairement, voire totalement, faits de bois. Afin de limiter les dégâts, le pont de Loire est le premier à disposer de piles en pierre au cours de la première moitié du XV<sup>e</sup> s. (**AM Decize, CC/3**). Néanmoins, à cause du coût et des destructions régulières, il n'est pas fait entièrement de pierre avant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. Le pont de Crote connaît le même scénario. S'il bénéficie de piles en pierre dès le XVI<sup>e</sup> s., il continue d'être régulièrement détruit jusqu'au XX<sup>e</sup> s., à cause des crues et glaces (**Tableau 7.2**), mais aussi en raison de sa vétusté en 1785 (**Tresvaux de Berteux, 1855**), par un train de bois en 1804 (**Jullien, 1883**), ou encore par les Alliés en 1944. Les ponts de Decize et de Nevers sont donc des conglomérats de pierres et de bois, fruits des multiples réparations.

En conséquence des multiples réparations et reconstructions, la cité de Decize s'endette très lourdement. En 1660, alors que les ponts sont toujours coupés, la ville doit rembourser les emprunts réalisés pour la reconstruction de ces mêmes ponts en 1590, 1608, 1628 et 1659, suite à leurs destructions par les crues (**AM Decize, CC/12**), malgré l'aide du pouvoir royal au cours des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> s. (**AM Decize, DD/11 ; DD/12**). Aux dégâts des crues s'ajoutent ceux des guerres (Decize est totalement pillée et la population massacrée en 1525) et des maladies au cours du XVI<sup>e</sup> s. (**Volut, 1992**). Deux ans avant la crue catastrophique de 1586 qui coupe les deux ponts, le conseiller du Roi Anthoine Olivier témoigne dans un rapport de 1583 de l'état « pitoyable » de la cité et de ses ponts (**Volut, 1992**). Ce sont les échevins eux-mêmes qui apportent le même témoignage deux siècles plus tard en 1765 (**AM Decize, DD/12, document du 2 fev. 1765**). Malgré cette dernière plainte, les finances de la ville semblent s'améliorer au cours du XVIII<sup>e</sup> s. Les sommes allouées aux réfections des ponts et aménagements par la ville sont alors très variables d'une année sur l'autre et peuvent atteindre des sommes élevées. Lors

de la construction du nouveau pont de pierre sur le bras droit de la Loire à la fin du XVIII<sup>e</sup> s., les paiements atteignent la quasi-totalité des recettes de la ville, notamment en 1779 et 1784, les dépassant même en 1785 (**Figure 7.13** ; **AD Nièvre, 1C/187**). La **Figure 7.13** nous illustre le poids que prend l'assurance du franchissement de la Loire sur les finances d'une cité telle que Decize. On comprend dès lors pourquoi peu de ponts sont présents sur la Loire avant le XIX<sup>e</sup> s. (cf. **chapitre 2**).



**Figure 7.13.** Pourcentage (%) de la recette annuelle de Decize allouée aux travaux de réfection (1754 - 1760) ou de construction du pont de Loire (1775 - 1789) (**AD Nièvre, 1C/187**). Le pont de Crote est détruit durant cette période.

Ainsi, du XV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s., la communauté de Decize est très vulnérable face aux crues de la Loire qui menacent et détruisent constamment ses ponts. C'est à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. seulement que la communauté perd en vulnérabilité grâce au nouveau pont de Loire. Entièrement refait en pierre en 1775 (**Figure 7.13** ; **AD Nièvre, 1C/186, 1C/190** ; **Jullien, 1883**), il résiste à la crue de 1790, qui emporte celui de Nevers, puis aux suivantes du XIX<sup>e</sup> s. Néanmoins, le pont de Crote subit encore des destructions multiples jusqu'au XX<sup>e</sup> s. Afin de limiter la menace de la Loire sur ses ponts, mais aussi sur les murs de la ville elle-même, des faubourgs ou des parcelles agricoles, la communauté fait construire en plus des ponts successifs des battis.

### 2.2.2. Détourner et concentrer l'eau par les battis dès le XV<sup>e</sup> s.

Tout comme à Nevers, la construction de battis par la communauté de Decize répond à deux objectifs : limiter l'action érosive du cours d'eau et détourner les eaux de la Loire. Plusieurs battis sont présents à Decize dès le XV<sup>e</sup> s. et l'investissement financier de la communauté est conséquent. Des parties entières leur sont dédiées dans les comptes, notamment en 1466-1467, 1467-1468, 1471-1472, 1484-1485, 1495, 1497, 1498.

La présence de battis est avérée à Decize pour la première fois en février 1421, proche du pont de Loire, lorsqu'un de ceux-ci doit être réparé en prévision du passage d'une crue (**AM Decize, CC/2**,

1420-1421, Fol 4). Cette mention indique que l'aménagement était déjà présent avant 1421. Cependant, comme à Nevers, il est difficile de localiser précisément les battis présents à Decize au XV<sup>e</sup> s. (Figure 7.14). Certains battis sont localisés au niveau des ponts de Loire (AM Decize, CC/2, 1420-1421, fol 4 ; DD/12, document de 1701), de Crote (AM Decize, CC/4, 1460, fol 12 ; CC/6, 1497, fol 7) et d'Aron (AM Decize, CC/4, 1460, fol 7, 8, 10, 11). Ceux-ci pourraient se trouver à l'extrémité des ponts, contraignant les cours à se maintenir sous le pont. Ces battis sont aussi utilisés pour protéger les infrastructures installées en bord de Loire de l'érosion comme les tours de défense (AM Decize, CC/2, 1420-1421, Fol 5), ou un colombier (AM Decize, CC/6, 1495, fol 4). En rive droite et gauche, les faubourgs de Saint-Privé et de Crote semblent être protégés par des aménagements. Une « bastille » semble protéger le faubourg à la fois des eaux et surtout des ennemis en 1494 (AM Decize, CC/6, 1494, fol 7). Côté Saint-Privé, le faubourg est protégé de l'érosion grâce à un « grand bâti », mentionné en 1569 (AM Decize, CC/9, 1569-1570), batti qui laisse place à une levée à partir du XVIII<sup>e</sup> s. Toujours en rive droite, une « levée » est mentionnée à Saint Léger dès 1469 (AM Decize, CC/5, 1469, fol 10). Cette levée pourrait correspondre au chemin de halage en rive droite au niveau de Saint-Léger, site du port de la Charbonnière qui voit le jour au cours du XVII<sup>e</sup> s. (Figure 7.14). Mais il faut noter cette curieuse désignation de « levée » pour l'aménagement. C'est la mention de « levée » la plus ancienne dont nous disposons pour la zone d'étude. Est-ce un défaut de langage ou une réelle volonté de construire un ouvrage insubmersible ? Impossible de répondre car aucune nouvelle mention de l'aménagement n'est faite dans les documents suivants.

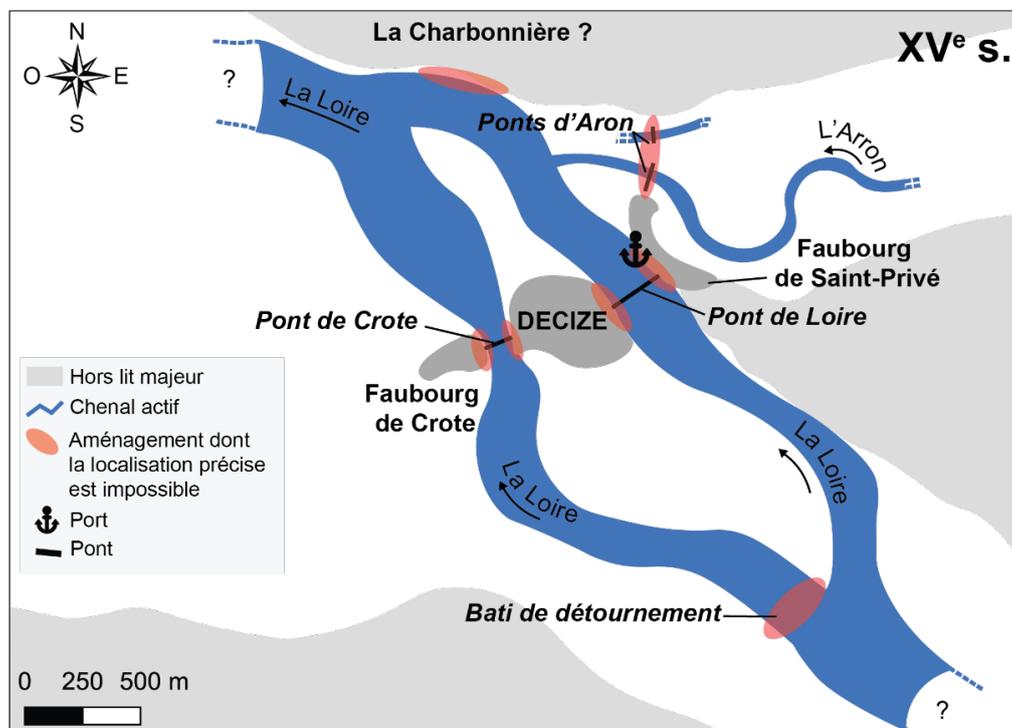
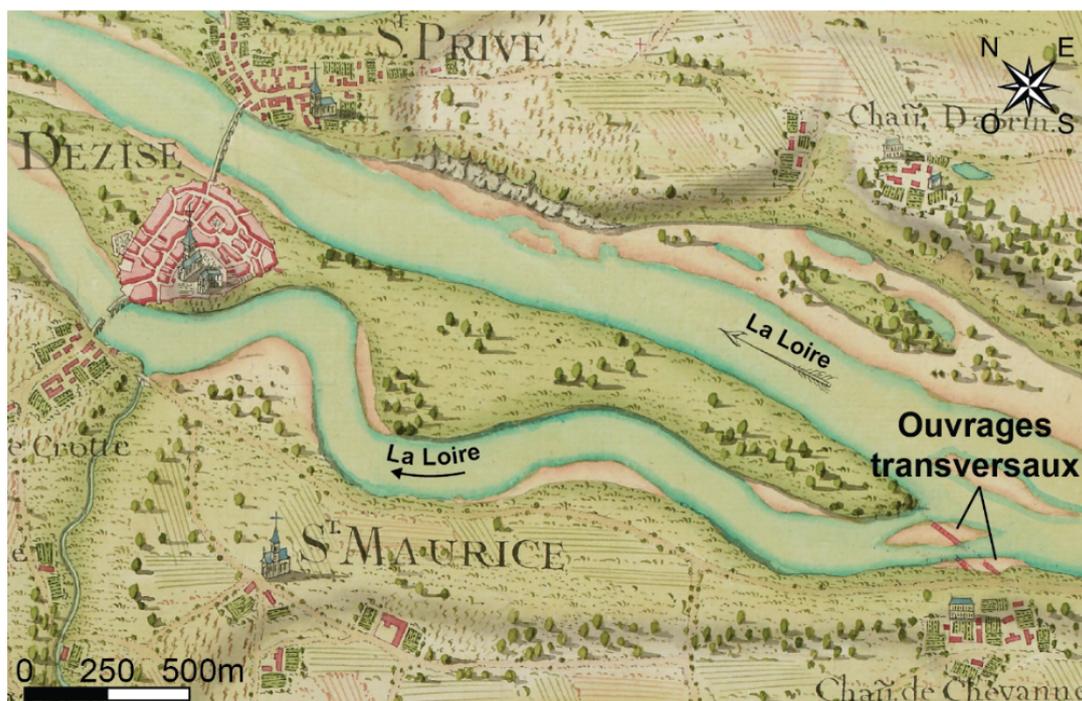


Figure 7.14. Proposition de reconstitution du site de Decize au XV<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle de la carte de 1692, modifiée à partir des données disponibles dans les archives documentaires.

Enfin, un des battis les plus importants pour la communauté fut celui destiné à détourner l'eau du bras gauche vers le bras droit. Au XV<sup>e</sup> s., tout comme aujourd'hui, le bras gauche constituait probablement le bras principal de la Loire à Decize. Lors des crues, la Loire prenant toujours le chemin le plus court, se concentrait dans le bras gauche, menaçant constamment de destruction le faubourg et pont de Crote, et de délaïsser le bras droit sur lequel est installé le port.



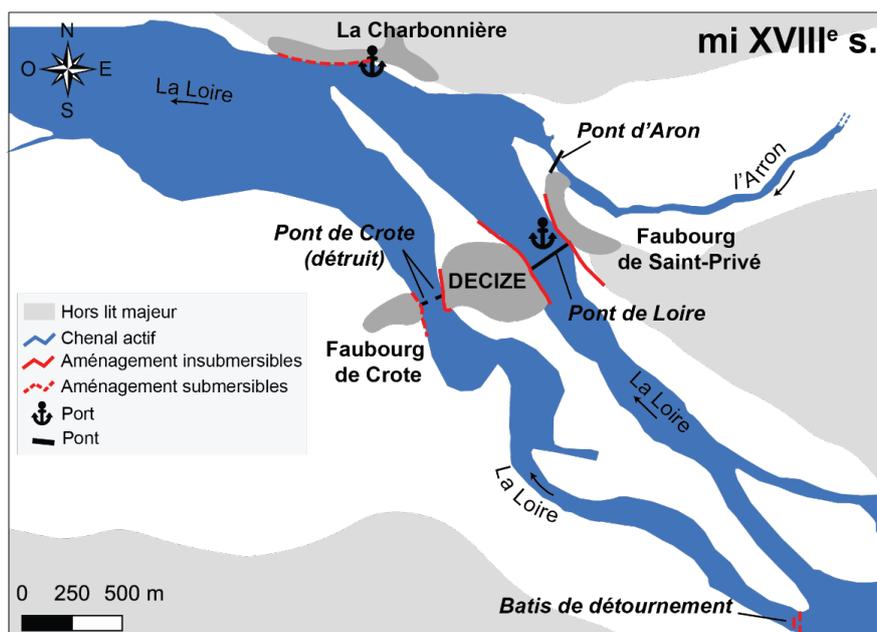
**Figure 7.15.** Représentation à l'amont de Decize des deux battis construits sur le bras gauche de la Loire sur la Carte de Mathieu (1727-1730).

Ainsi, dès le XV<sup>e</sup> s. au moins, la communauté semble prendre la décision de détourner les eaux du bras gauche vers le droit (**Figure 7.14**). Le compte de 1452-1453 comporte la première mention d'un paiement pour la construction d'un batti destiné à détourner l'eau vers le bras droit (**AM Decize, CC/2, 1452-1453, fol 5**). Ce premier batti a probablement fait les frais des crues puisqu'en 1469 un nouveau batti est construit pour « fere tourner l'eaue devers le pont de Loire qui estoit en Crotte » (**AM Decize, CC/5, 1469, fol 11**). Celui-ci est probablement réparé en 1472 (**AM Decize, CC/5, 1472, fol 15**), en 1484-1485 (**AM Decize, CC/6, 1484-1485, fol 8**) et une nouvelle fois en 1499 (**AM Decize, CC/6, 1499, fol 4**). À noter qu'un second batti « dans la rivière » est construit en 1467, sans que l'on puisse le localiser (**AM Decize, CC/5, 1467, fol 9**). En 1566, plutôt qu'un batti, les échevins payent quarante ouvriers pour faire un fossé afin de « destourner l'eaue de Crotte » (**AM Decize, CC/9, 1565-1568**).

À partir de la seconde moitié du XV<sup>e</sup> s., les battis semblent donc se multiplier à Decize, et ceux-ci nécessitent de nombreuses réparations, souvent suite aux passages des crues (**AM Decize, CC/6, 1494, fol 13 et 13 ; CC/6, 1498, fol 24 ; CC/9, 1569-1570**). En 1500, une copie de chartre du comte de Nevers accordant une aide financière aux échevins de Decize pour l'entretien des ponts et murailles détruits par les « inondations » témoigne aussi de l'importance des battis pour contraindre le cours d'eau et défendre

les berges de l'érosion : « ung *chascun* jour il *convient fere* pour l'entretement (= entretien) du cours de *ladicte riviere* et fortificacion d'icelle ville » (AM Decize, CC/6, 1500, fol 28).

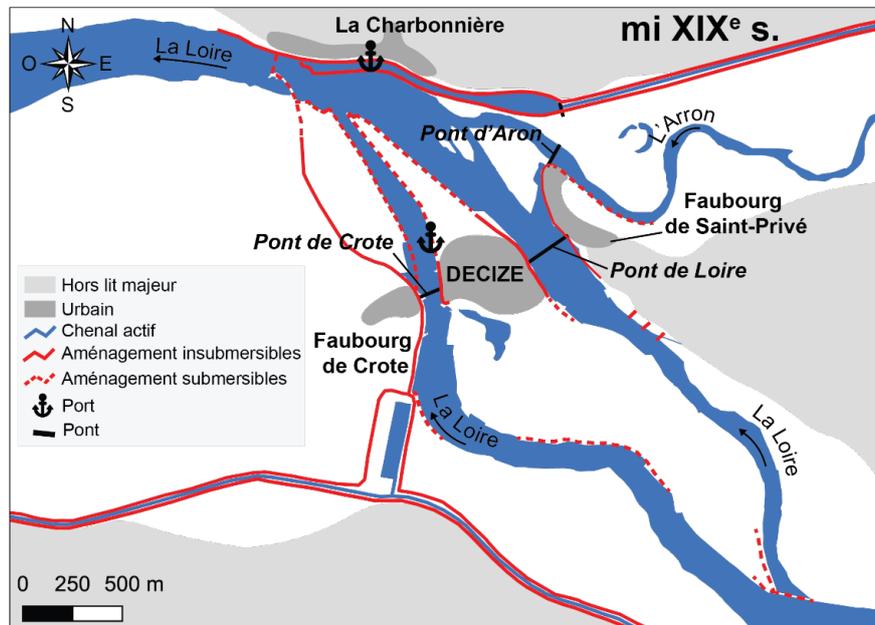
À partir du XVI<sup>e</sup> s., et surtout du XVII<sup>e</sup> s., les battis sont moins présents au sein des comptes, mais les cartes et les rapports des Ponts et Chaussées du XVIII<sup>e</sup> confirment que l'objectif de détourner les eaux du bras gauche, voire de le couper complètement, reste d'actualité. La carte de Mathieu de 1727-1730 représente sur le bras gauche deux battis, dont un coupant l'entièreté du bras, mais détruit en deux endroits (Erreur ! Source du renvoi introuvable., Figure 7.16).



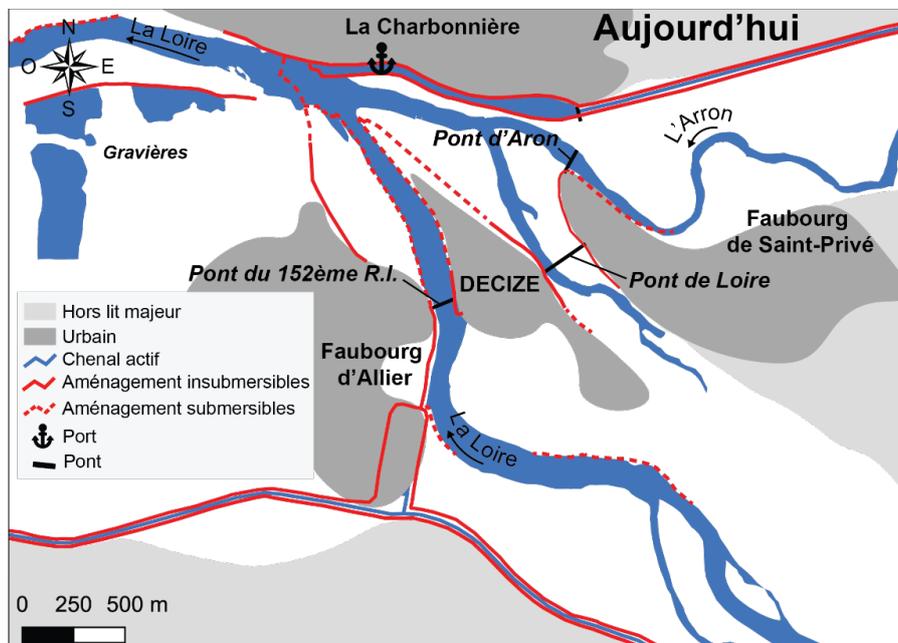
**Figure 7.16.** Proposition de reconstitution du site de Decize au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle des différentes ressources cartographiques et plans de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. (cf. chapitre 4).

Celui-ci est toujours représenté sur la carte de 1775, détruit en un seul point cette fois-ci. En 1783, une levée est même envisagée pour remplacer le pont de Crote afin de complètement couper le bras, mais le projet n'a jamais été réalisé (AD Nièvre, 1C/190). En revanche à partir du XIX<sup>e</sup> s., l'objectif change. En 1815, et à la suite de la défaite napoléonienne, les armées wurtembergeoises sont cantonnées à la Charbonnière en rive droite. N'ayant pas les droits de traverser le bras droit de la Loire, et afin de pouvoir accéder à un bras navigable, l'occupant construit une chevrette sur le bras gauche afin de concentrer les eaux dans le bras droit (AD Nièvre, 3S/6647, documents et plan de 1843). Suite au départ des Wurtembergeois et afin de protéger le canal du Nivernais en rive droite fraîchement terminée en 1842, les ingénieurs des Ponts et Chaussées détournèrent les eaux cette fois-ci du bras droit vers le bras gauche à l'aide d'une nouvelle chevrette, ou barrage, après la destruction de celle des Wurtembergeois (AD Nièvre, 3S/6647, rapport de 1843) (Figure 7.17). Visible sur les plans de Grenier de 1852 et sur les cartes de Coumes en 1854, ce nouvel aménagement contribua à la fermeture progressive du bras droit jusqu'à nos jours, le bras gauche devenant donc le bras principal de la Loire à

Decize depuis les années 1840 (**Figure 7.17**, **Figure 7.18**). Il est cependant probable que son efficacité ne soit pas seulement due à une meilleure résistance de l'ouvrage à l'érosion par rapport à ceux du XV<sup>e</sup> s. mais également à l'incision du plancher alluvial déjà importante dès le XVIII<sup>e</sup> s. (cf. **chapitre 6** et **chapitre 9**), réduisant par conséquent les débordements, l'érosion et les dépôts de sédiments pouvant nuire à l'aménagement.



**Figure 7.17.** Proposition de reconstitution du site de Decize au milieu du XIX<sup>e</sup> s. La représentation des cours d'eau suit celle de la carte de Coumes (1848).



**Figure 7.18.** Site de Decize en 2024.

\*

Ainsi, malgré un investissement lourd de la cité dans la construction de battis afin de limiter sa vulnérabilité face aux érosions de la Loire dès le XV<sup>e</sup> s. (**Figure 7.14**), la communauté échoue à réduire sa vulnérabilité face aux crues. Est-ce en raison d'un manque d'investissement continu ? D'un manque de solidité des aménagements ? Ou d'une activité trop intense de la Loire ? Il est difficile de trancher, les différents facteurs ayant probablement tous joués. De plus, l'aménagement du lit majeur de la Loire à Decize semble bien moins progressif qu'à Nevers et se développe assez peu entre le XV<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 7.14** à **Figure 7.16**). Les raisons de cet aménagement plus réduit sont probablement multiples. Tout d'abord, la reconstruction continue des ponts a nécessité des investissements déjà trop lourds pour la communauté, la laissant sans fonds disponibles pour des constructions potentielles d'autres aménagements contraignant la Loire. Ce faible aménagement s'explique aussi par des raisons hydrogéomorphologiques : la Loire peut moins divaguer à Decize comme elle a pu le faire à Nevers avec une plaine alluviale très large et facilement érodable. La Loire semble avoir bien moins migré sur le secteur de Decize comme peut en témoigner la faible présence de paléochenaux conservés dans la plaine. Géologiquement, le site est plus contraint. La communauté Decizoise a donc moins eu la nécessité de limiter les migrations de la Loire. C'est véritablement entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et le XIX<sup>e</sup> s. que la majorité des ouvrages présents encore aujourd'hui et les plus contraignants pour la Loire ont été édifiés (**Figure 7.17**). Ceux-ci s'expliquent par la construction des différents canaux par les Ponts et Chaussées et qu'il était nécessaire pour eux de protéger de l'érosion et des inondations. Finalement, à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> s. (**Figure 7.17**) et jusqu'à nos jours (**Figure 7.18**), la Loire demeure très fortement contrainte par les aménagements réalisés pour servir la navigation du fleuve.

### 2.3. Le cas de Digoin

Si les documents nous ont permis de bien documenter avec précision l'évolution de l'aménagement fluvial à Decize et Digoin, nous n'avons pas pu consulter de documents pour le site de Digoin. Cependant, les quelques ressources cartographiques dont nous disposons peuvent nous donner quelques indices sur la trajectoire d'aménagement de la ville, notamment le cadastre napoléonien premièrement établi en 1806-1808 qui constitue le document cartographique de précision le plus ancien pour Digoin (**AD Saône-et-Loire, 3P/8466 ; AD Allier, 3P/3180**).

La ville semble ne pas avoir bénéficié de pont, ou ceux existants n'ont pas été maintenus. Les environs de Digoin constituent pourtant un secteur de franchissement ancien. Un, voire plusieurs ponts romains ont en effet été découverts à Chassenard, commune en rive gauche à l'amont direct de Digoin (**Dumont, 2010 ; Steinmann, 2015**). Plus tard au VIII<sup>e</sup> s., les troupes de Pépin le Bref traversent la Loire proche de Digoin, via un pont ou gué (**Dendievel et Chevalier, 2018**). Aucune information ne permet de dire qu'un pont permit de traverser la Loire à Digoin même au cours du Moyen Âge ou de l'Ancien Régime. Ce qui est en revanche certain, c'est que le franchissement de la Loire a été assuré seulement par bac du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> s. (**AD Saône-et-Loire, 3P/8466**). L'Atlas général des routes de la province

de Bourgogne ne représente durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. que des bacs pour traverser la Loire et l'Arroux (AD Saône-et-Loire, C/SUP/PC/1). La carte de Cassini du XVII<sup>e</sup> s. ne présente aucun pont sur la Loire ni sur l'Arroux. La carte d'état-major est la première à représenter un pont sur la Loire, accompagné du pont-canal, qui assure enfin le passage (Figure 7.19). Le premier pont connu de Digoin est construit en 1832 (pont suspendu), la construction du pont-canal suit en 1835 (Chaussard, 1986 ; Dendievel et Chevalier, 2018).

Avant le XX<sup>e</sup> s., peu d'aménagements sont présents en dehors de ceux sécurisant le canal du Centre à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. et le canal latéral à la Loire mis en service au cours de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. (Figure 7.19). Les rives de la ville, en rive droite de la Loire, furent le lieu d'installation d'un port, actif dès la période médiévale (Mantellier, 1864-1869). Ce secteur était donc probablement protégé de l'érosion du cours d'eau par des protections de berge, mais Chaussard (1986) note cependant une absence de quai au XVII<sup>e</sup> s., les marchandises étant déposées directement sur les grèves. La lithographie d'Isidore-Laurent Deroy représentant les berges de Digoin en 1836 n'expose par exemple qu'un quai au premier plan (Figure 7.20). Aucune levée ne fut construite avant le XIX<sup>e</sup> s. D'autres petits aménagements de contraintes étaient probablement présents à Digoin. En 1687, un batti et des épis sont par exemple construits dans la Loire (Chaussard, 1986).

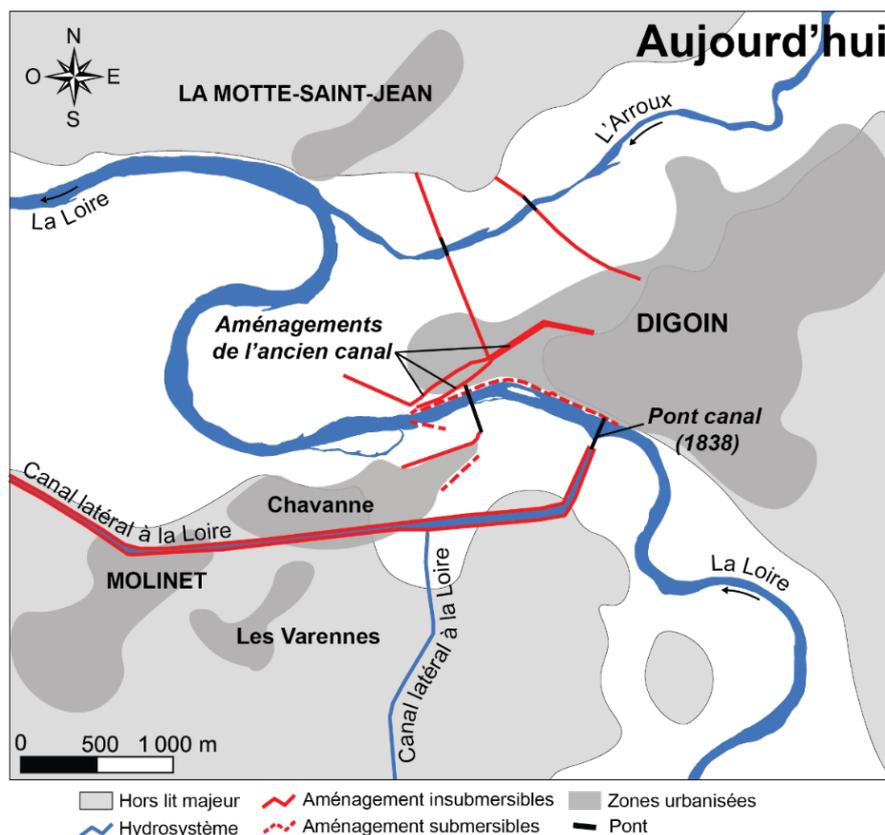


Figure 7.19. Site de Digoin en 2024.



**Figure 7.20.** Rives de la Loire à Digoin en 1836 par Isidore-Laurent Deroy (AD Loire, CHPL4154/2).

La ville de Digoin était probablement bien moins étendue et importante économiquement que Decize et Nevers au Moyen Âge. Simple petit bourg portuaire (**Chaussard, 1986**), elle ne bénéficia pas non plus de charte de franchise, ne développant donc pas de comptabilité communale et très peu de documents médiévaux y faisant référence ont été conservés. En raison de revenus économiques moins importants et d'une navigation moins développée qu'à l'aval, il est fort probable que le lit ait été bien moins aménagé qu'à Decize et Nevers jusqu'au XVIII<sup>e</sup> s. L'absence de pont avant le XIX<sup>e</sup> s. peut aussi témoigner de ce manque de finance face à la difficulté matérielle de maintenir un pont sur la Loire comme nous avons pu le voir pour Decize et Nevers.

#### **2.4. Des contraintes et des trajectoires d'aménagement différentes**

Face aux contraintes de la Loire, les trajectoires d'aménagement des sites de Nevers, Decize et Digoin se caractérisent par plusieurs différences et similarités. Les communautés de Nevers et Decize semblent être préoccupées par deux choses principales : le maintien du passage sur la Loire et son érosion latérale. La raison de ces préoccupations est en grande partie économique : le passage permet de circuler, échanger et prélever des taxes. En revanche, les inondations ne semblent pas faire partie de ces préoccupations, ou du moins pas fondamentalement avant le XIX<sup>e</sup> s. (**Temam, 2012**).

Les deux cités de Nevers et Decize ont tenté d'abaisser la vulnérabilité de leurs ponts face aux crues (passage du bois à la pierre) et aux divagations de la Loire (renforcement des berges et coupure de bras secondaire) dès les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. par la construction de battis (**Figure 7.21, Figure 7.22**). L'objectif principal fut de couper ou détourner l'eau d'un bras secondaire de la Loire, menaçant constamment la capacité de la communauté de Nevers et celle de Decize à franchir le fleuve. Ce défi n'est pas exceptionnel et fut partagé par d'autres communautés fluviales que ce soit sur la Loire ou ailleurs. La communauté de Tours dû par exemple entretenir trois ponts afin de traverser la Loire et leur maintien fut assuré par des réparations incessantes.

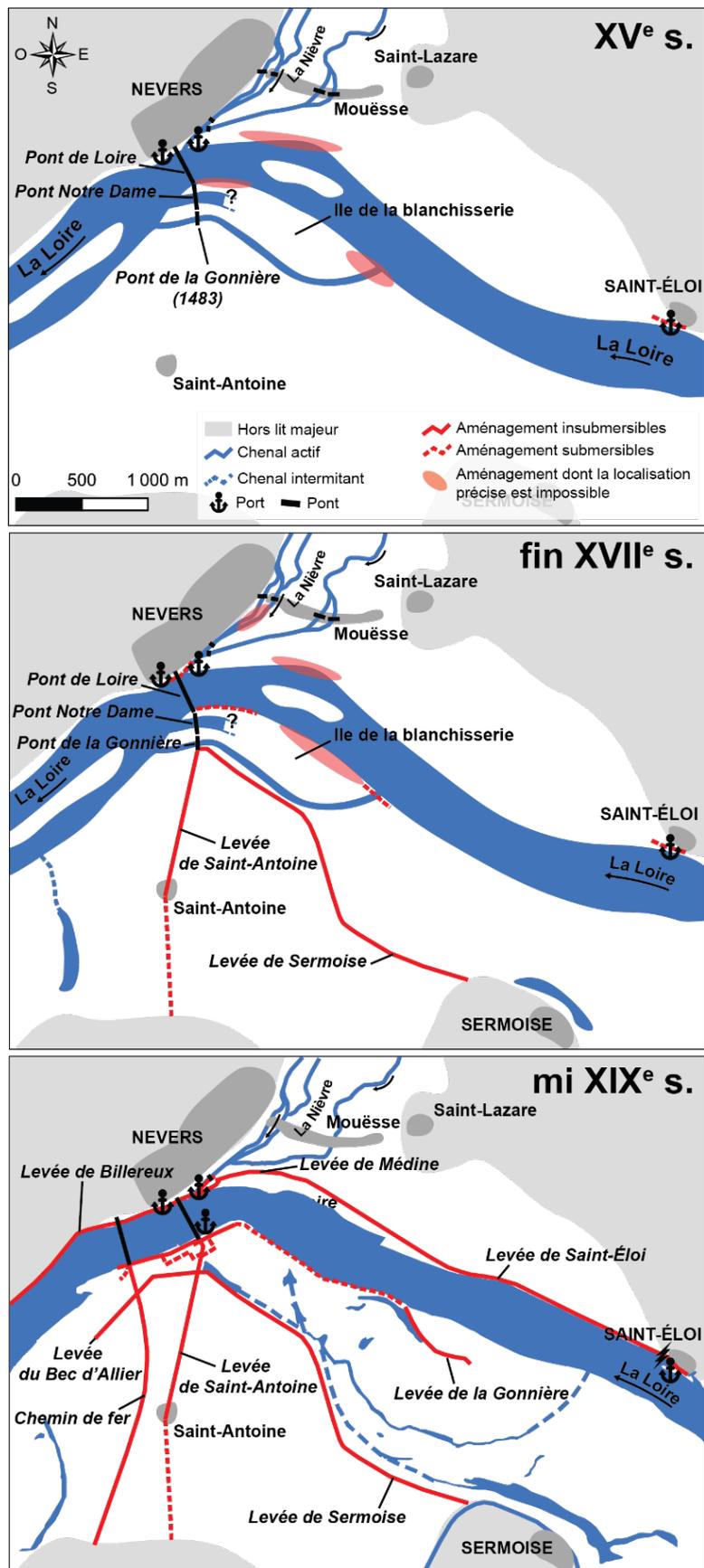


Figure 7.21. Évolution de l'aménagement sur le site de Nevers du XV<sup>e</sup> au milieu du XIX<sup>e</sup> s.

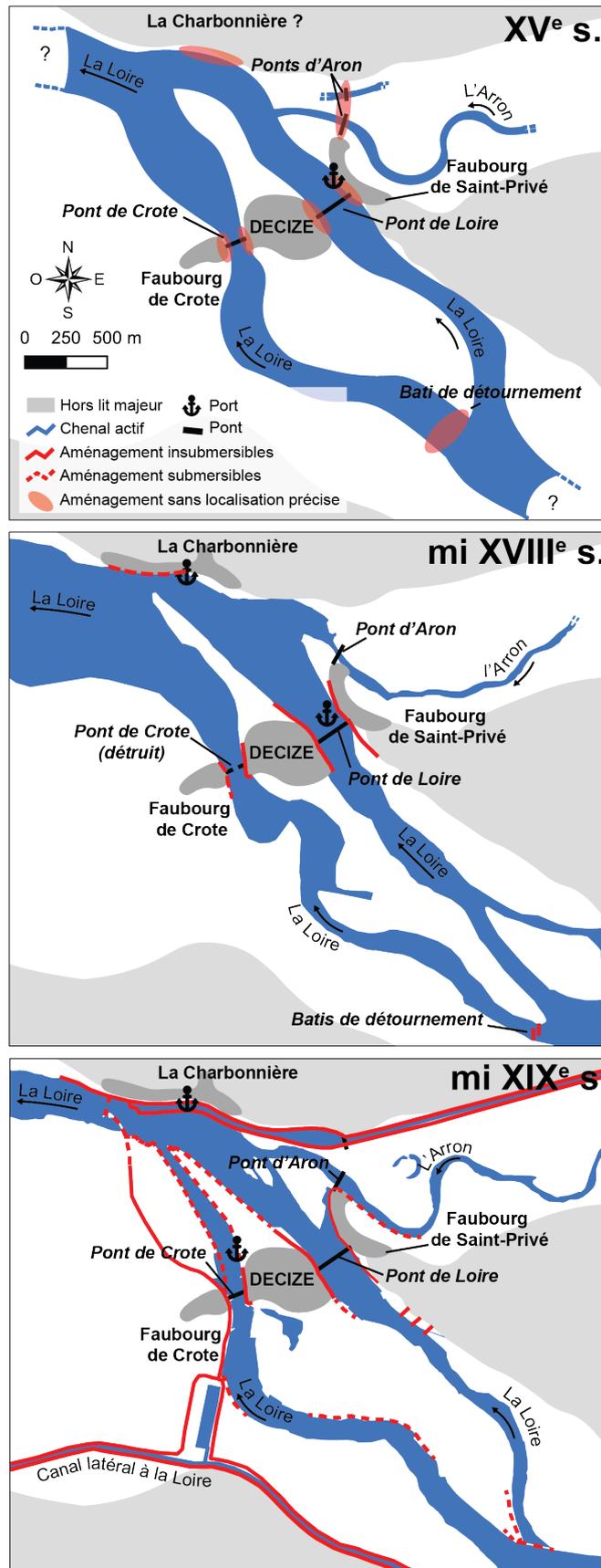
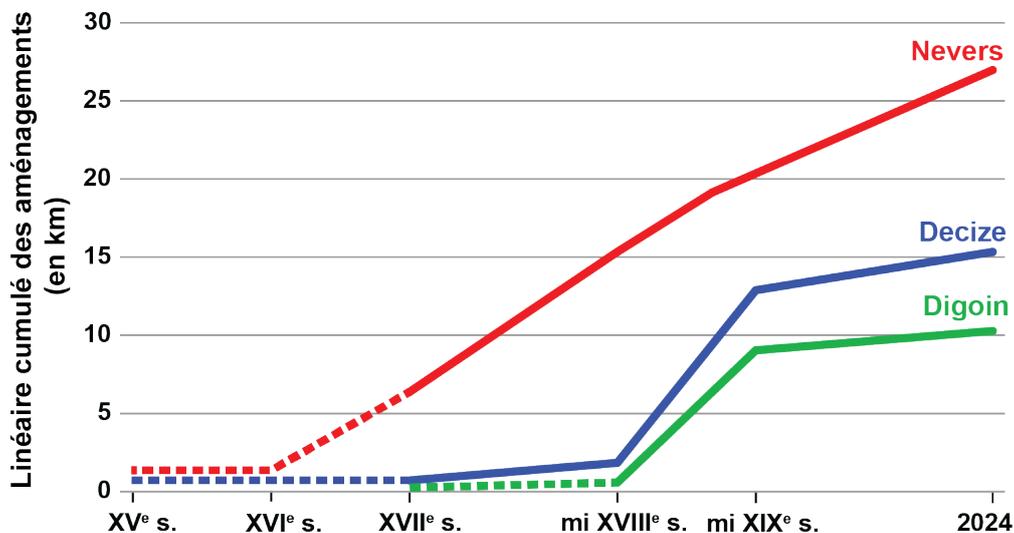


Figure 7.22. Évolution de l'aménagement sur le site de Decize du XV<sup>e</sup> au milieu du XIX<sup>e</sup> s.

Le démantèlement de ces ponts devenus très vétustes au XVIII<sup>e</sup> s. et la construction d'un seul et unique (pont Wilson) intervient durant les décennies 1760-1770 (Boisseuil, 1992), tout comme pour le pont de Loire de Nevers. De plus, les battis furent également utilisés par la communauté de Tours dès le XIV<sup>e</sup> s. (Carcaud et Garcin, 2001 ; Noizet et al., 2004). À Lyon, la communauté urbaine dû assurer le franchissement de plusieurs bras sur le Rhône jusqu'au XVIII<sup>e</sup> s. Les ingénieurs réussissent finalement à provoquer la fermeture du bras secondaire au XVIII<sup>e</sup> s. (Burnouf et Carcaud, 1991). Face à la Loire, Nevers reste tout de même moins vulnérable que Decize, pour laquelle ses accès ont parfois été totalement coupés avec les rives suite à certains passages de crue. Pourtant, c'est à Nevers que l'aménagement a été bien plus important du XIV<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. (Figure 7.21, Figure 7.22), les revenus plus importants de la communauté ayant pu soutenir les lourdes dépenses inerrantes à la sauvegarde des ponts. Entre 1466 et 1472, les recettes de Nevers étaient par exemple deux à neuf fois supérieures à celles de Decize (AM Decize, CC/4 ; AM Nevers, CC/61 à CC/68). C'est probablement pour des raisons principalement financières que l'aménagement de Decize ne s'accéléra qu'à partir du XVIII<sup>e</sup> s., malgré l'aide des puissants, comtes et rois. Concernant Digoin, les ouvrages ne semblent se multiplier qu'entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. avec la construction des différents canaux. Toutefois, en l'absence de pont à entretenir face aux crues, Digoin fut probablement la moins vulnérable des trois cités jusqu'au XIX<sup>e</sup> s.



**Figure 7.23.** Linéaire cumulé des aménagements submersibles et insubmersibles situés dans le lit majeur de la Loire sur les sites de Nevers, Decize et Digoin. Les traits en pointillés indiquent que les valeurs sont estimées. Les traits pleins indiquent que les valeurs ont été mesurées.

Le linéaire cumulé de tous les aménagements présents sur les sites d'étude urbains (Figure 7.23) résume assez bien les différentes trajectoires d'aménagements. Celles de Decize et Digoin sont au final assez similaires. Malgré un développement probablement plus précoce à Decize qu'à Digoin, les deux sites observent une augmentation significative et la majorité du linéaire aménagé actuel réalisé entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. À Nevers, l'aménagement fut plus progressif jusqu'à nos

jours, et surtout bien plus soutenu, avec un linéaire de plus de 15 km dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. reposant essentiellement sur les levées.

Nevers est en effet la seule cité à bénéficier de « vraies » levées, comparable à celles de la Loire moyenne et aval. Decize et Digoin ne bénéficient d’aucune levée commandée par les Ponts et Chaussées, bien que les protections arrivées bien plus tard associées aux canaux, ainsi que celles associées aux routes plus ou moins récentes constituent aujourd’hui des ouvrages importants de contrainte pour la Loire. La présence de levées seulement à Nevers s’expliquerait plutôt par des raisons géomorphologiques. La plaine alluviale ligérienne est bien plus large à Nevers qu’elle ne l’est à Decize ou Digoin au niveau des ponts à maintenir. Les ponceaux présents sur la levée de Saint-Antoine à Nevers confirment par ailleurs que la Loire possédait des chenaux secondaires dans cette vaste plaine alluviale, sans que l’on sache s’ils étaient actifs continuellement ou seulement pendant les épisodes de crue.

Certaines stratégies d’aménagement restent tout de même similaires sur les trois sites d’études. On observe par exemple une absence de quais à Nevers, Decize et Digoin avant les XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. Il est probable qu’en raison de l’évolution rapide des îles, chenaux et bancs, comme nous avons pu le voir dans le **sixième chapitre**, les sociétés portuaires ne purent assurer la présence de port avant la réalisation d’aménagements lourds. À partir du XVIII<sup>e</sup> s., la fixation du lit entreprise par les Levées et Turcies puis Ponts et Chaussées permet alors aux différentes villes de construire leurs quais, avec un cours plus facilement maintenable.

L’autre similarité réside finalement dans l’aménagement général et très contraignant du cours de la Loire à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> s. sur les trois sites d’étude. Cette contrainte prévue et réalisée par les ingénieurs des Ponts et Chaussées répond à leur volonté d’assurer la bonne navigabilité du fleuve et des canaux.

\*

## **Conclusion du chapitre**

Les riches fonds de la comptabilité communale des cités de Nevers et Decize puis des documents des différents corps d’ingénieur ont permis une étude historique détaillée des relations entre les sociétés urbaines et leur environnement ligérien depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s. Ces documents rendent compte de réponses actives de la part des communautés urbaines de Nevers et Decize aux contraintes des crues et des divagations de la Loire.

La vulnérabilité des cités face aux crues de la Loire résidait principalement dans la perte de leurs ponts, essentiels au développement économique de Nevers et Decize. Les communautés n’hésitèrent ainsi pas à investir des sommes très importantes pour maintenir ces ponts face aux crues répétées de la Loire. Elles durent aussi les maintenir face aux divagations et à la capacité érosive de la Loire. Pour ce faire, les communautés urbaines aménagèrent le lit mineur et majeur dès les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. à l’aide de

battis. Bien que nous ne l'ayons pas fait dans le cadre de cette thèse, les travaux de Marion Foucher, encore en cours, se focalisent sur le coût de construction ou de réparation de ces battis, ainsi que sur les matériaux utilisés. Les quantités de matériaux impliqués dans les chantiers pouvaient être assez impressionnantes. Comme le souligna Annie Dumont lors du séminaire « Le Fleuve aménagé : relations sur la longue durée entre ouvrages et communautés habitante » (Dumont et al., 2022), personne n'a encore tenté d'estimer les volumes de matériaux employés dans le cadre de ces chantiers au cours du Moyen Âge. Or, ces volumes rendent compte de l'importance et des dimensions impressionnantes de ces chantiers. La construction de deux battis de 500 et 330 m à Sully-sur-Loire entre 1606 et 1609 a nécessité l'abattage de plus de 7255 chênes ! (Dumont et al., 2022 ; Dumont et al., 2023) À Nevers, entre 1389 et 1408 seulement, la réparation seule des battis nécessite 3066 pieux, 121 « ongars »<sup>25</sup>, 454 perches, 28 700 fascines, 4200 clous et plusieurs tonnes de pierres (Dumont et al., 2022). On comprend dès lors les coûts très lourds pour la communauté de lutter contre les divagations de la Loire et par conséquent les différentes trajectoires d'aménagements entre les trois cités.

En partie pour des raisons financières et en partie pour des raisons hydrogéomorphologiques, les communautés n'ont finalement pas partagé les mêmes vulnérabilités face aux crues de la Loire. Decize semble avoir été bien plus vulnérable que Nevers, en raison de ses finances moins importantes et de ses deux bras de la Loire à gérer. Mais bien que les vulnérabilités aient été différentes, les réactions des sociétés face aux crues de la Loire semblent avoir assez peu changé suivant les sites d'étude et suivant les périodes, entre le XIV<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> s. C'est véritablement suite à l'évènement de 1790, et surtout de ceux du milieu du XIX<sup>e</sup> s., que la lutte contre les inondations sera bien plus prise en compte dans l'aménagement du lit majeur de la Loire.

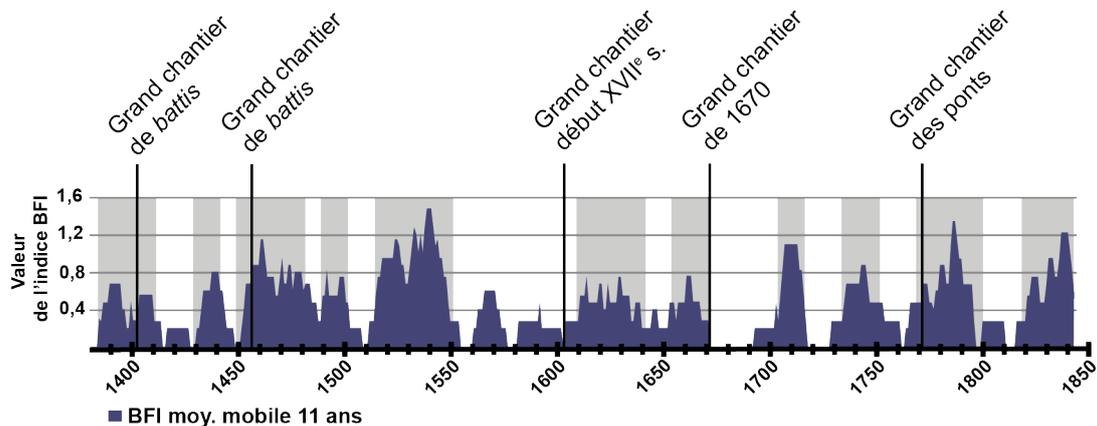
Grâce à la documentation historique, nous pouvons donc avoir un aperçu de cet aménagement contraignant la Loire dès le Moyen Âge au sein d'une zone d'étude dépourvue de recherches archéologiques. Des prospections archéologiques seraient néanmoins intéressantes pour tenter de retrouver les battis, notamment les plus anciens, et de répondre à des questions que les documents seuls ne permettent pas de résoudre : depuis quand les battis sont-ils présents à Nevers et Decize ? Quand, par qui et comment les premières levées de la zone d'étude située à Nevers ont-elles été construites ? Les différentes campagnes d'aménagement ont-elles répondu aux fluctuations de l'activité hydrologique de la Loire ?

Cette dernière question s'est naturellement posée après avoir mis en regard les résultats de ce chapitre avec ceux du **chapitre 5**. Mais force est de constater que les différentes phases d'aménagement du lit majeur ne semblent pas être corrélées avec les différentes périodes d'activité hydrologique de la Loire, qu'elles aient été intenses ou calmes. Par exemple, les différents grands chantiers de Nevers, que

---

<sup>25</sup> D'après le dictionnaire DMF (1330-1500) du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL), un « ongar » correspond à un crampon pour l'assise de fondations dans une rivière.

ce soit ceux des battis, ponts ou levées, se sont déroulés hors ou pendant des périodes de forte activité hydrologique, au début, au milieu ou à la fin de celles-ci (**Figure 7.24**). Concernant les battis, les documents indiquent que ceux-ci ont plutôt été construits et réparés continuellement tout au long du XV<sup>e</sup> s. En revanche, certains évènements hydrologiques ont bien provoqué des prises de décision spécifiques d'aménagements, notamment les crues de 1789 et 1790. Mais nous manquons encore de matière archivistique pour observer si c'est aussi le cas pour les siècles précédents. Enfin, la décision de l'entreprise des grands chantiers repose aussi tout simplement sur d'autres facteurs, notamment financiers qu'il serait nécessaire d'explorer. Les grands chantiers de Nevers du début du XVII<sup>e</sup> s. interviennent au même moment que d'autres sur la Loire, notamment du côté de Sully-sur-Loire. **Dumont et al., 2023** ont démontré que les battis de Sully avaient été commandé par Maximilien de Béthune le Duc de Sully lui-même alors ministre des Finances d'Henri IV. Les travaux de Nevers feraient-ils partie d'un projet ligérien plus vaste ? La réponse nécessite l'étude de documents supplémentaires.



**Figure 7.24.** Temporalité des grands chantiers de Nevers comparés aux périodes de forte activité hydrologique. Indice BFI et résultats présentés dans le **chapitre 5**.

La richesse documentaire des sites d'études provoque un foisonnement de nouveaux questionnements dont nous ne pourrions pas avoir la réponse ici. Les périodes de forte ou de faible activité hydrologique ont-elles par exemple motivé des évolutions technologiques, notamment le passage des ponts de bois aux ponts de pierres ? Ou est-ce plutôt le pouvoir de contrainte de plus en plus soutenu des sociétés urbaines vis-à-vis des divagations de la Loire qui leur permet d'investir dans un pont de pierre qui, ils en sont sûrs, ne sera pas délaissé par la Loire ? Si certains évènements de crue marquèrent les sociétés riveraines, qu'en est-il des périodes de forte activité hydrologique ? Si les aménagements ne semblent pas avoir été réalisés en lien avec ces périodes, il n'empêche que celles-ci ont pu tout de même marquer les sociétés riveraines. De très nombreuses questions restent en suspens, mais elles justifient l'intérêt de s'intéresser de plus près aux autres comptabilités communales en Loire et ailleurs, et apporteraient grandement à la compréhension des relations entre les sociétés et leur environnement fluvial au cours des périodes médiévales et modernes. Cependant, cette comptabilité ne

nous renseigne que sur les relations entre les communautés urbaines et l'hydrosystème. Afin d'en apprendre plus sur les relations entre les sociétés et leur environnement ligérien en contexte rural, d'autres méthodes et matériels d'étude sont nécessaires.



# Chapitre 8

## Les sociétés rurales face à la dynamique fluviale de la Loire

L'étude de l'évolution des sites urbains riverains de la Loire en rapport avec l'action de la rivière depuis la période médiévale a été permise par une analyse combinée des riches fonds archivistiques historiques et des cartes anciennes. En revanche, en contexte rural ce défi s'avère nettement plus complexe. En effet, les archives documentaires et les informations historiques sont beaucoup plus rares, voire absentes avant le XVIII<sup>e</sup> s, la production documentaire restant polarisée sur les sites urbains. Néanmoins, le corpus cartographique et photographique peut nous éclairer sur certains éléments, notamment l'habitat, visible sur une grande partie des ressources disponibles. De plus, l'étude du MNT Lidar permet de repérer dans le lit majeur de la Loire des structures anciennes, antérieures au XVIII<sup>e</sup> s., telles que des mottes castrales ou des tertres anthropiques qui ne figurent pas sur les documents du corpus cartographique, ou difficilement observable sur les photographies et images satellites.

L'étude des modes d'habitat, de leur répartition dans ou hors du lit majeur en fonction de la géomorphologie de la plaine, et de leur évolution dans le temps, peut nous renseigner sur des adaptations potentielles individuelles et collectives face aux actions de la Loire (**Burnouf, 2007 ; Valette, 2011**). De plus, malgré leur rareté, quelques voix de populations rurales riveraines de la Loire ont été mises à l'écrit au XVIII<sup>e</sup> s. Ces voix constituent des plaintes auprès des autorités, notamment vis-à-vis des actions de la Loire (inondation et érosion). Cependant, nous verrons que l'objectif de cette mise à l'écrit et la conservation de ces documents apporte plus de questions que de réponses. Ce chapitre est donc l'occasion de se poser plusieurs questions :

- Les rapports entre les sociétés rurales et la Loire ont-ils été similaires entre la zone d'étude et les autres secteurs ligériens ?
- Les sociétés rurales se sont-elles adaptées à l'activité hydrogéomorphologique pouvant être intense de la Loire ?

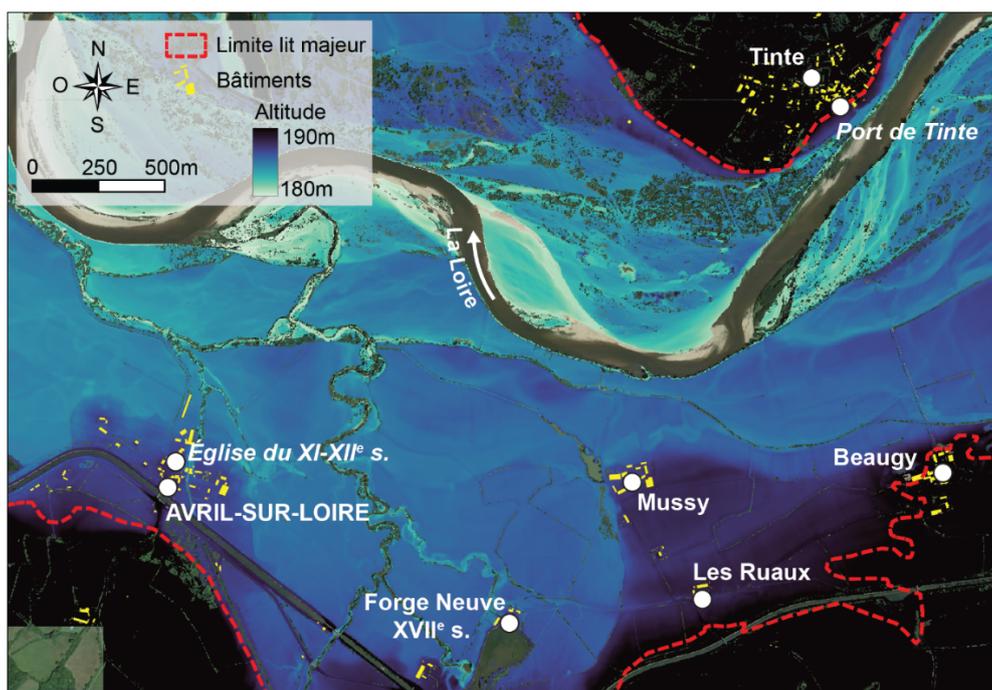
Nous répondrons à ces questions en trois temps. Premièrement, en étudiant la répartition de l'habitat dans et en limite du lit majeur de la Loire. Deuxièmement, en nous intéressant à l'évolution de cet habitat, notamment depuis le XVIII<sup>e</sup> s. Enfin, en consultant les voix des riverains eux-mêmes pour observer ce qu'elles ont à nous révéler sur ces relations entre les sociétés et leur environnement.

## 1. L'habitat dans et en limite du lit majeur de la Loire

Il s'agit dans cette partie d'étudier les modes de répartition de l'habitat et d'occupation dans et hors du lit majeur de la Loire. Que peut nous révéler cette répartition des relations entre les sociétés rurales et leur fleuve ?

### 1.1. Différentes configurations de l'habitat dans le lit majeur

L'habitat actuel dans le lit majeur est assez faible et dispersé, se positionnant sur des talus surélevés, qu'ils soient naturels ou anthropiques, inondés seulement lors des crues exceptionnelles. Néanmoins, la grande majorité de l'habitat reste tout de même en bordure du lit majeur et contrairement à l'aval de la zone d'étude, notamment en Loire moyenne, très peu de bourgs se sont développés au sein du lit majeur. La présence de cet habitat en zone inondable répond à deux enjeux : l'accès aux ressources fluviales, notamment portuaires, et l'accès aux parcelles agricoles. Cependant, la largeur du lit majeur relativement peu importante (entre 2 et 3 km) permet aux populations d'habiter les bordures du lit majeur, hors des zones inondables, tout en ayant accès à ces mêmes enjeux. L'exemple du val d'Avril-sur-Loire est assez représentatif de cette disposition (**Figure 8.1**).



**Figure 8.1.** Exemple de la répartition de l'habitat dans le val d'Avril-sur-Loire situé entre Decize et Nevers. Les limites du lit majeur ont été réalisées à partir du MNT Lidar, des limites des inondations de 1846 et 1856 (AN, F/14/7557), et du PPRI d'Avril-sur-Loire (DDE Nièvre, 2003 ; DDT Nièvre, 2020). Le MNT est un modèle d'élévation relative, sans la pente du cours d'eau.

Si une partie de l'habitat se situe hors du lit majeur (Tinte et son port), notamment sur les terrasses alluviales (Beaugy), une autre partie se situe aussi au sein du lit majeur. Par exemple, le bourg d'Avril-sur-Loire, probablement déjà présent dès l'époque médiévale (église construite sur terre du XI-

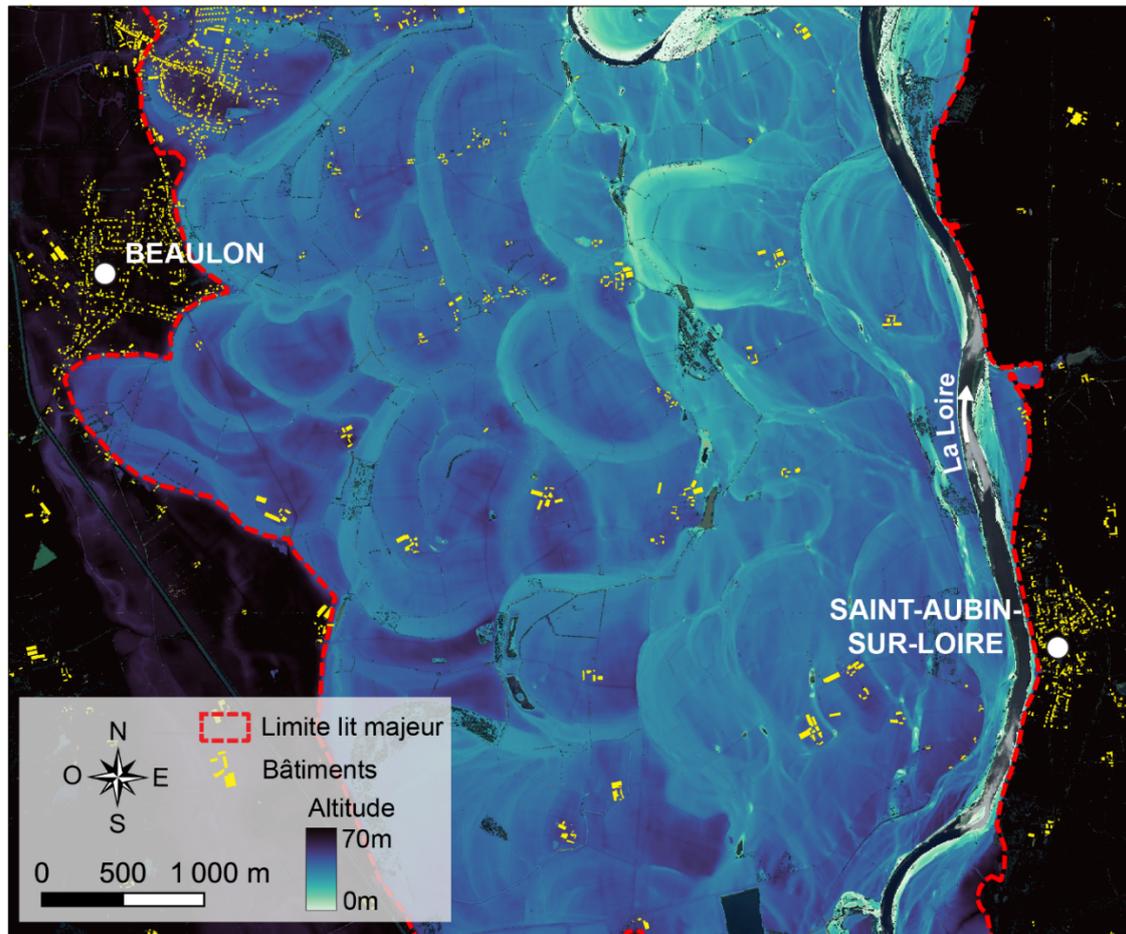
XII<sup>e</sup> s.) est entièrement situé en zone inondable (AN, F/14/7557 ; DDE Nièvre, 2003 ; DDT Nièvre, 2020). Les hameaux de la Forge Neuve datant du XVII<sup>e</sup> s. et les hameaux de Mussy et des Ruaux, déjà présents sur la carte de Cassini (XVII<sup>e</sup> s.), ainsi que sur celle de 1755, sont tous aussi situés en zone inondable. Ces habitats ont donc forcément fait les frais des inondations exceptionnelles passées, notamment celles cartographiées de 1846 et 1856 (AN, F/14/7557), sans avoir été abandonnés. Une grande partie des hameaux et villages existant durant les deux, voire les trois, derniers siècles sont en effet encore habités aujourd'hui. On observe donc que l'habitat en zone inondable semble être pérenne à travers les siècles en adoptant des stratégies de placement en zone surélevée au sein du lit majeur. En revanche, si celui-ci est pérenne, il s'est très peu développé au cours du dernier siècle.

Les cas urbains de Digoin, Decize et Nevers, ainsi que la zone rurale située entre Diou et Saint-Martin-des-Lais, dérogent à ces généralités. Pour les cas urbains, le développement progressif des aménagements de défense contre les divagations, puis contre les inondations de la Loire, du XIV<sup>e</sup> s. à aujourd'hui a permis un développement urbain plus important que pour le reste de la zone d'étude dans le lit majeur (cf. **chapitre 7**).

Aujourd'hui, plus de 5000 bâtiments sur le secteur de Nevers (communes de Nevers, Coulanges-lès-Nevers, Challuy, Sermoise-sur-Loire et Saint-Éloi), 2200 bâtiments à Decize (communes de Decize et de Saint-Léger-des-Vignes) et quasi 1500 sur le secteur de Digoin (communes de Digoin, La Motte-Saint-Jean et Molinet) sont situés en zone inondable, pour une grande majorité protégée par des levées. Cet étalement urbain menacé par les crues de la Loire a été en très grande partie réalisé au cours du XX<sup>e</sup> s. Cependant, le développement urbain en zone inondable constitue seulement une petite partie de l'étalement urbain principalement réalisé hors du lit majeur, notamment à Nevers où celui-ci s'est fait sur les hauteurs de la ville.

Le second cas de la zone rurale située entre Diou et Saint-Martin-des-Lais s'explique cette fois-ci pour des raisons géomorphologiques (**Figure 8.2**). Tout d'abord, la largeur du lit majeur est plus importante sur cette portion de la Loire, atteignant quasi 6 km au niveau de la commune de Beaulon. La plaine alluviale héritée témoigne d'un déplacement important des chenaux méandriformes de la Loire. Au-delà du très bel aspect visuel (**Figure 8.2**), ces migrations ont formé et laissé imprimés dans le paysage tout autant de buttes, montilles et francs bords, notamment grâce à la faible sédimentation de la plaine. En effet, comme nous l'avons vu dans le **sixième chapitre**, le transport sédimentaire dominé par la fraction sableuse explique des dépôts sédimentaires majoritairement effectués au sein de la bande active. Les dépôts fins de remblaiements sont rares en plaine proximale et très rares en plaine distale. Cette très faible sédimentation fine provoque sur ce site une stabilisation des formes alluviales héritées en plaine distale (**Figure 8.2**). Ces formes offrent alors aux populations la possibilité de s'installer dans le lit majeur tout en étant à l'abri des inondations les plus communes et de leurs courants. Une grande partie de l'habitat du lit majeur se situe sur ces formes surélevées par rapport au reste de la plaine, tout

en restant bien entendu totalement inondables lors des événements plus importants. L'habitat est bien plus nombreux que pour le reste de la zone d'étude, en raison de la largeur plus importante de la plaine alluviale, mais aussi du nombre plus important de ces structures sédimentaires héritées offrant une sécurité relative. Néanmoins, la **Figure 8.2** illustre que, bien qu'un nombre important de bâti se trouvent dans le lit majeur, la grande partie de ceux des communes de Beaulon et Saint-Aubin-sur-Loire est située sur les terrasses en limite de celui-ci.



**Figure 8.2.** Exemple de la répartition de l'habitat entre Diou et Saint-Martin-des-Lais. Le MNT est un modèle d'élévation relative, sans la pente du cours d'eau.

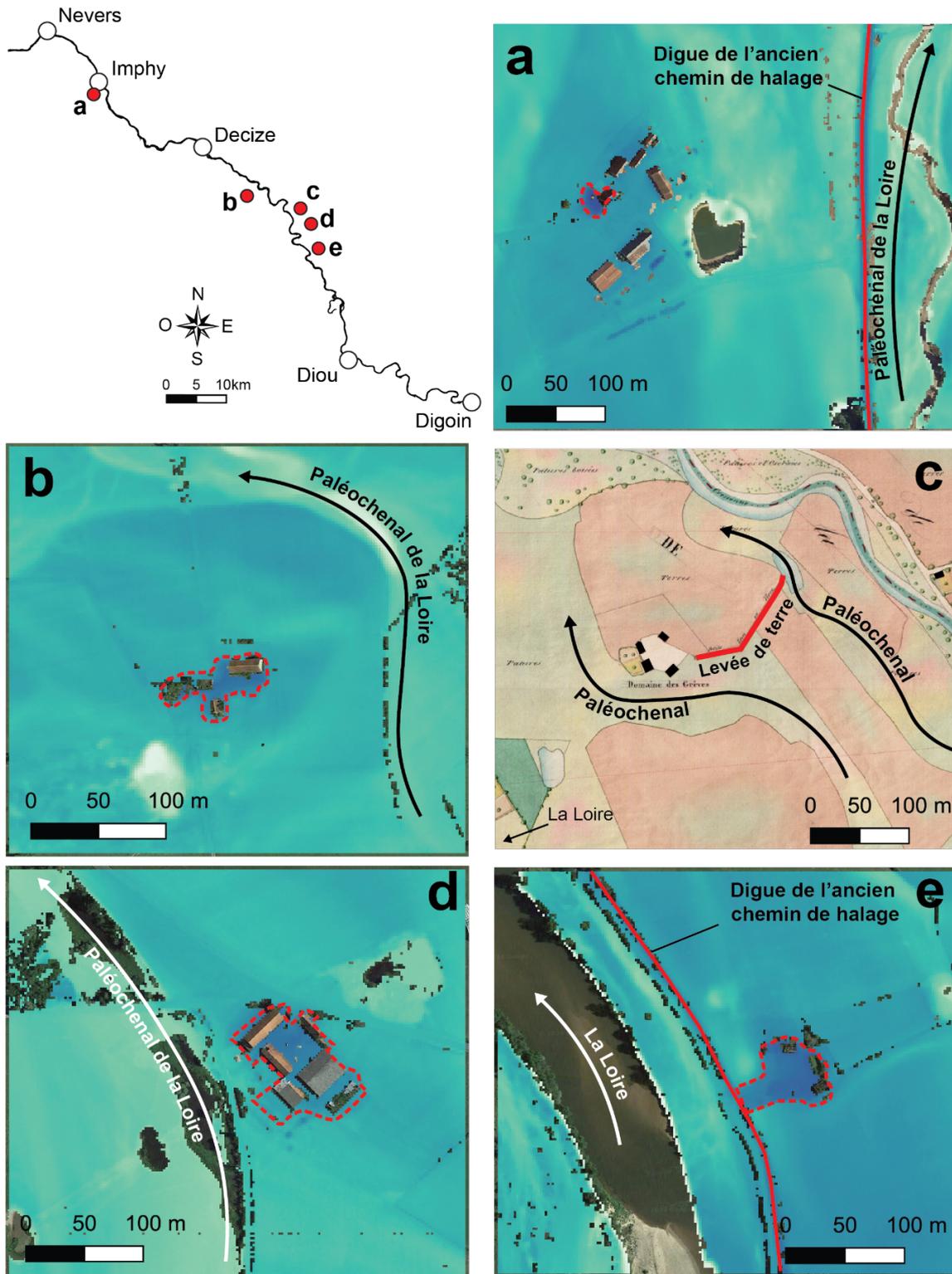
## 1.2. Un habitat présent et adapté au lit majeur depuis la période médiévale

À l'exception de quelques cas particuliers, les maisons, hameaux et même villages présents dans le lit majeur de la zone d'étude sont tous surélevés et à l'abri des courants d'inondation. Si la plus grande part de ces habitats sont ainsi disposés sur des surélévations naturelles, un certain nombre sont aussi construits sur des élévations anthropiques (**Figure 8.3**). Ces tertres peuvent être destinés à accueillir un seul bâtiment (**Figure 8.3a**) ou plusieurs (**Figure 8.3b, c et e**). Dans certains cas, ces tertres sont associés à de petites digues réalisées par les propriétaires eux-mêmes, mais la plupart d'entre elles ont cependant disparu (**Figure 8.3c**).

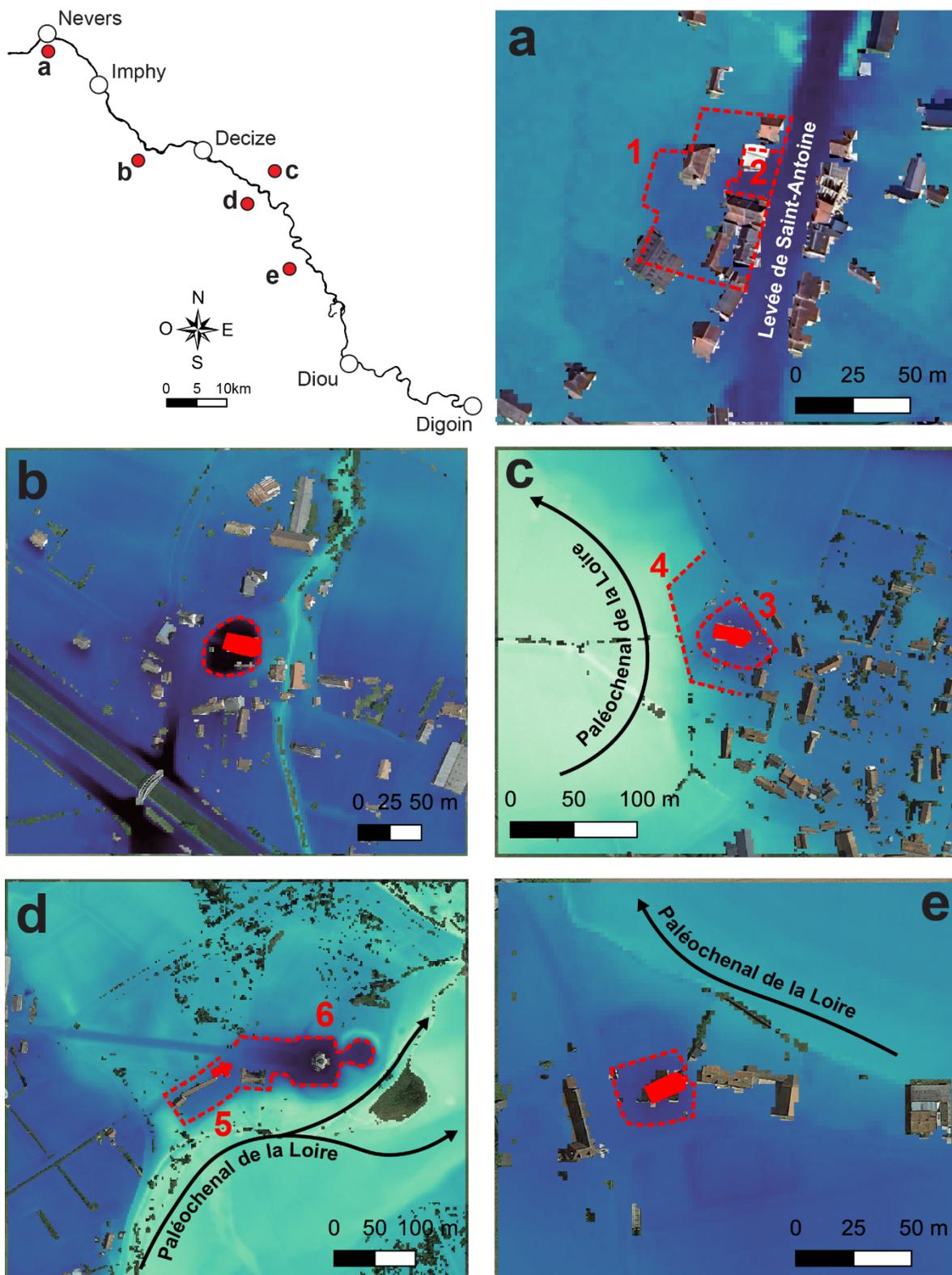
Ces installations dans le lit majeur sont anciennes. La datation précise de chacun des tertres nécessiterait des recherches archéologiques approfondies, mais plusieurs cas peuvent tout de même être datés relativement. Nous disposons en effet de plusieurs exemples de constructions religieuses médiévales sur tertre (**Figure 8.4**). Celle de la maladrerie de Saint-Antoine, accolée à la levée de Saint-Antoine pourrait être la plus ancienne puisque sa construction fut commanditée au IX<sup>e</sup> s. (**Gueneau, 1926**) (**Figure 8.4a**). Il reste difficile d'être certain que le tertre soit celui d'origine en l'absence d'étude archéologique. Les églises de Charrin du XI<sup>e</sup> s. (**Figure 8.4c**) et l'église Saint-Pierre d'Avril-sur-Loire du XI-XII<sup>e</sup> s. (**Figure 8.4b**) se trouvent elles aussi dans le lit majeur, en zone inondable si elles n'avaient pas été construites sur tertre anthropique. Il est fort probable que l'église d'Avril-sur-Loire ait été entourée d'habitat dès la période médiévale puisqu'elle est le siège d'une paroisse au XIII<sup>e</sup> s. (**Cassagne et Korsak, 2013**). Enfin, à Decize même, l'église de Saint-Thibaut datée du XIII<sup>e</sup> s. rattachée autrefois à une commanderie de Templiers (**Ingérop et Strates, 2020**) est également construite sur tertre. Située à la confluence entre la Loire et l'Aron, on peut se demander si le tertre fut efficace lors des plus grandes eaux, car dans d'autres cas l'aménagement d'un tertre n'empêcha pas l'installation d'être inondée.

Le cas du tertre de la chapelle de Laménay en est un exemple. Le tertre en lui-même diffère déjà des exemples précédents en raison de sa forme et de son étendue importante (14 000 m<sup>2</sup>) (**Figure 8.4d**). Malheureusement nous ne disposons que de très peu d'information sur celui-ci. Selon les propriétaires du terrain, la chapelle daterait du XI<sup>e</sup> s. et celle-ci semble être construite sur un tertre anthropique. De plus, elle aurait été accompagnée d'un château, détruit et remplacé par un château du XIX<sup>e</sup> s. (**communication des propriétaires**), accompagné d'un nouveau tertre plus élevé (**Figure 8.4d**). Néanmoins, si le tertre se devait de mettre la chapelle à l'abri des inondations, ça n'a pas toujours été le cas. En effet, en 1756, les paroissiens de Laménay-sur-Loire et Cossaye se plaignent que les nouvelles levées de Charrin et Saint-Hilaire nouvellement construites en rive droite renvoient les eaux lors des crues en rive gauche, chez eux, « ce qui occasionne tous les ans des inondations considérables [...] et il y eu une élévation d'eau [...] qui est monté jusque dans l'église dudit Laménay, ce qui n'étoit jamais arivé dans les plus grandes inondations » (**AN, F/14/1199/2, document du 4 juin 1756**). Si l'on peut mettre de côté certaines exagérations du document, le point de l'église pourrait être avéré : dans une seconde lettre du 16 août 1757, ils ajoutent que l'inondation de l'église fit « fendre la voute du cœur en plusieurs endroits » (**AN, F/14/1199/2, document du 16 août 1757**). Les propriétaires n'étant pas au courant de ces faits, ils n'ont pu nous confirmer les détails présents dans les documents. Les cartographies du XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. témoignent en revanche d'un décalage des lits multiples de la Loire vers la rive gauche, contraints par les levées en rive droite. Arrivant au plus près de l'église autrefois hors des menaces de la Loire, ses inondations auraient donc pu atteindre le bâtiment, ce qui pourrait aussi expliquer pourquoi le nouveau tertre du XIX<sup>e</sup> s. soit plus élevé que l'ancien sur le site de Laménay (**Figure 8.4d**). **Dion (1961)** avait déjà remarqué que l'élévation en Loire moyenne des tertres médiévaux

autour de 5 m 40 au-dessus de l'étiage pouvait témoigner des anciennes élévations des eaux lors des crues, dépassées à partir du XVIII<sup>e</sup> s. en raison de l'effet des levées.



**Figure 8.3.** Exemples de défense d'habitats individuels (digues et tertres). **a** : ferme avec maison seule sur tertre (Chevenon). **b** : ferme construite sur tertre (Cossaye). **c** : levée de terre au domaine des grèves (Cronat) (Plans de Grenier, 1851). **d** : ferme construite sur tertre (Cronat). **e** : tertre et ferme abandonnés (Vitry-sur-Loire).

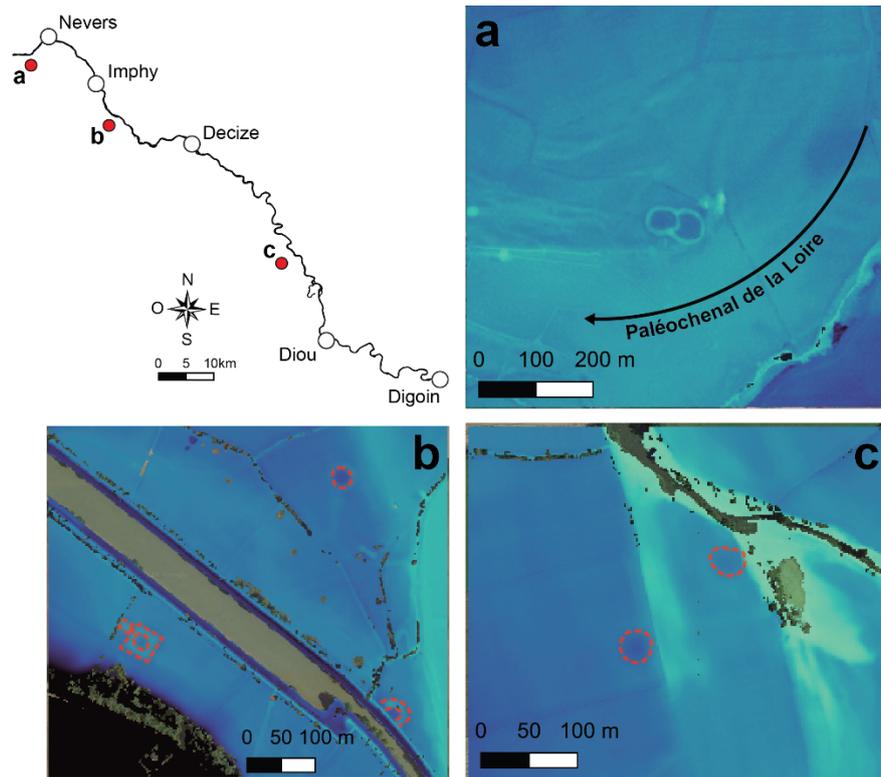


**Figure 8.4.** Exemples de bâtiments religieux (forme rouge) construits sur terre (limites en rouge). **a** : tertre de l'ancien hôpital-maladrerie de Nevers (1) associé à un tertre plus récent (2). **b** : église d'Avril-sur-Loire. **c** : église de Charrin et son tertre (3) associé au tertre probablement plus récent du cimetière (4). **d** : tertre de la chapelle de Laménay-sur-Loire et du château disparu (5) associé à un tertre du château plus récent (XIX<sup>e</sup> s.) (6). **e** : église de Saint-Martin-des-Lais.

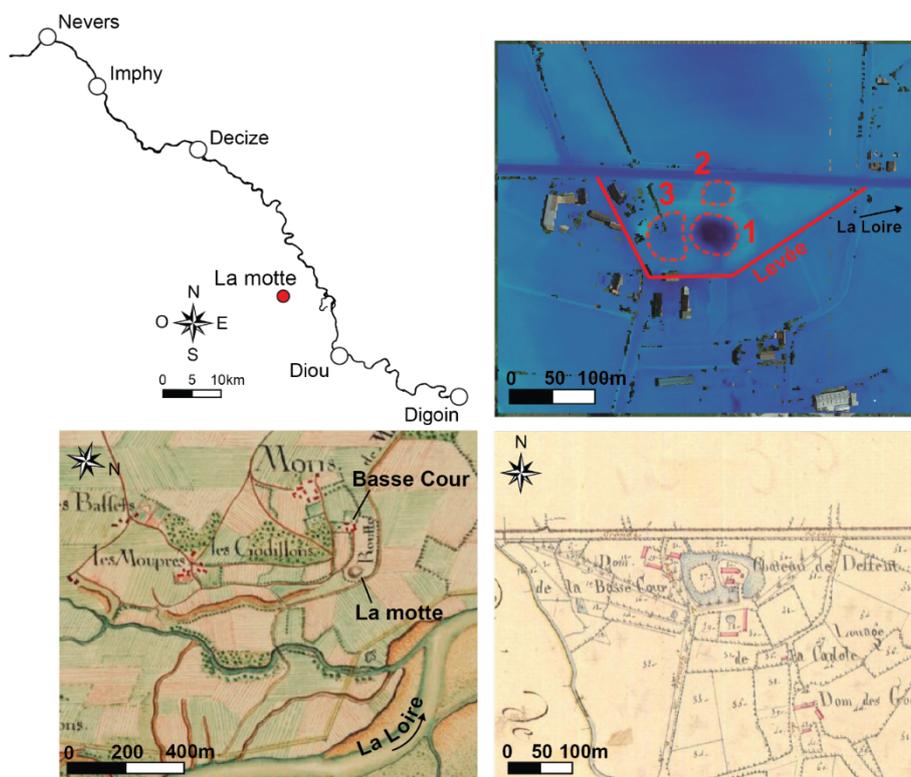
Enfin, comme nous venons de le voir, les installations sur terre ont pu être renouvelées sur de plus anciennes occupations : l'église de Saint-Martin-des-Lais en est un autre exemple. L'église actuelle est construite au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. sur les fondations d'une église médiévale suite à sa destruction (**Figure 8.4e**). L'église actuelle est construite sur terre, mais nous ne savons pas si l'église précédente l'était aussi ou non : l'église médiévale a-t-elle été endommagée ou détruite à la suite d'évènements de crues ? Comme nous avons pu déjà le conclure précédemment, cette reconstruction témoigne de la pérennité de l'habitat, malgré la présence de l'église toujours située en zone inondable selon le PPRi de la commune (**DDT Allier, 2019**).

Les bâtiments religieux ne sont pas les seuls bâtiments historiques d'ampleur à avoir été construits au sein même du lit majeur. L'étude minutieuse du MNT Lidar a permis de repérer d'anciennes structures pouvant être apparentées à des mottes castrales, comme celles repérées sur le site d'Uxeloup par **Garcia et Dumont (2014) (Figure 8.5b)**. Mis à part celles d'Uxeloup, nous avons très peu d'informations sur les autres sites potentiels de mottes castrales (**Figure 8.5a, c ; Figure 8.6**). Si le site **c** de la **Figure 8.5** reste incertain, les formes du site **a** de la **Figure 8.5** et surtout celles de la **Figure 8.6** sont assez suggestives. On peut y observer une motte, ayant probablement accueilli la tour ou le donjon, entouré de deux basses cours séparées par des fossés. La motte est clairement visible sur la carte de 1755 et le cadastre napoléonien de 1811 indique que la motte était encore occupée par le château de Deffent, aujourd'hui totalement disparu. Les fossés étaient par ailleurs encore en eau, à part ceux de la basse-cour nord. Le château ainsi que le domaine de la Basse Cour qui lui était accolé, étaient en plus défendus par de petites levées, probablement destinées à protéger le domaine des inondations de la Loire (**AD Allier, 3P/3110, Section D**). Celles-ci sont toujours bien visibles sur le MNT Lidar (**Figure 8.6**).

Il est intéressant de remarquer, déjà noté par **Garcia et Dumont (2014)**, que dans le cas des mottes d'Uxeloup ou des cas **a** et **c** (s'ils sont avérés) (**Figure 8.5**), les mottes sont situées au plus près des chenaux de la Loire dont elles avaient probablement l'ambition de contrôler le flux commercial. Grâce à un éloignement probablement rapide de la Loire suite à l'abandon de ces paléochenaux et d'une très faible sédimentation en plaine distale (c.f. **chapitre 6**), les formes suggestives des mottes ont été conservées. Dans d'autres cas hydrogéomorphologiques où la Loire se serait par exemple déportée plus progressivement, combien de mottes furent complètement érodées ? En raison de l'absence la plus grande part du temps de documents faisant référence à ces mottes castrales, il est impossible de savoir si certaines de celles-ci ont disparu à la suite des divagations de la Loire. De plus, celles-ci sont aussi très peu représentées sur les cartographies anciennes. Si celle de Gannat-sur-Engièvre est représentée sur la carte de 1755, c'est probablement en raison du fait qu'elle était encore habitée.



**Figure 8.5.** Exemples d'infrastructures anthropiques, probablement mottes castrales. **a** : double structure circulaire (Challuy). **b** : les trois mottes castrales de Fleury-sur-Loire (Garcia et Dumont, 2014). **c** : deux structures circulaires.



**Figure 8.6.** La motte de Garnat-sur-Engièvre. **a** : MNT Lidar. La motte castrale (1) avec deux basses cours (2 et 3). **b** : représentation de la motte sur la carte de 1755. **c** : représentation de la motte sur le cadastre napoléonien de 1811 (AD Allier, 3P/3110, Section D).

La présence d'habitats dans le lit majeur adaptés aux inondations n'est pas exceptionnelle à l'échelle de la Loire. Que ce soit à l'amont direct de la zone d'étude (**Dendievel et Chevalier, 2018**), dans le bassin du Forez (**Cubizolle et Georges, 2001**) ou à l'aval de la zone d'étude (**Dion, 1961**), l'habitat se développe en zone inondable sur des buttes naturelles ou anthropiques dès l'Âge du Fer comme les fouilles à Blois ont pu l'indiquer (**Josset et Aubourg, 2021 ; Morin et al., 2024**). L'exemple de Tours est un cas ligérien exceptionnel d'installation durable des sociétés dans le lit majeur (**Morin et al., 2014**). Installation antique, le cœur de la ville de Tours est lui-même situé sur un monticule alluvial, à l'origine inondable. Le développement de la ville durant l'antiquité et le Moyen Âge a donc nécessité la construction de tertres, turcies, puis des levées, afin de protéger la cité de l'érosion et des inondations de la Loire et du Cher (**Dion, 1961 ; Carcaud et Garcin, 2001 ; Noizet et al., 2004**). Le programme scientifique « TUIMA – Tours, une île au Moyen-Âge », porté par Jean-Baptiste Rigot (CITERES-LAT), en collaboration avec Isabelle Gay-Ovejero (GéHCO) et Didier Boisseuil (CeTHiS) en cours a justement pour but de mieux comprendre les rapports entre la cité et ses fortes contraintes environnementales ligériennes, notamment dans le contexte du Petit Âge glaciaire (**Rigot et al., 2023**).

L'installation en lit majeur sur les autres secteurs ligériens répond aux mêmes enjeux que pour celle en zone d'étude : accès aux parcelles agricoles, aux ressources du cours d'eau et des zones humides, et à la navigation (**Burnouf, 2007**). En revanche, ce développement de l'habitat en Loire moyenne et aval fut sans commune mesure bien plus importante que sur la zone d'étude, notamment grâce à la protection procurée par les turcies puis par les levées dont le linéaire se développe progressivement dès le Moyen Âge. Sur la zone d'étude, les bourgs de quelques dizaines à centaines d'habitats sont rares (Avril-sur-Loire, Saint-Martin-des-Lais, Garnat-sur-Engièvre, etc.), bien plus nombreux et peuplés à l'aval, notamment en Loire moyenne avec notamment les villes de Saint-Benoît-sur-Loire, Darvoy et Jargeau, Sandillon ou encore les faubourgs d'Orléans ou de Blois en rive gauche.

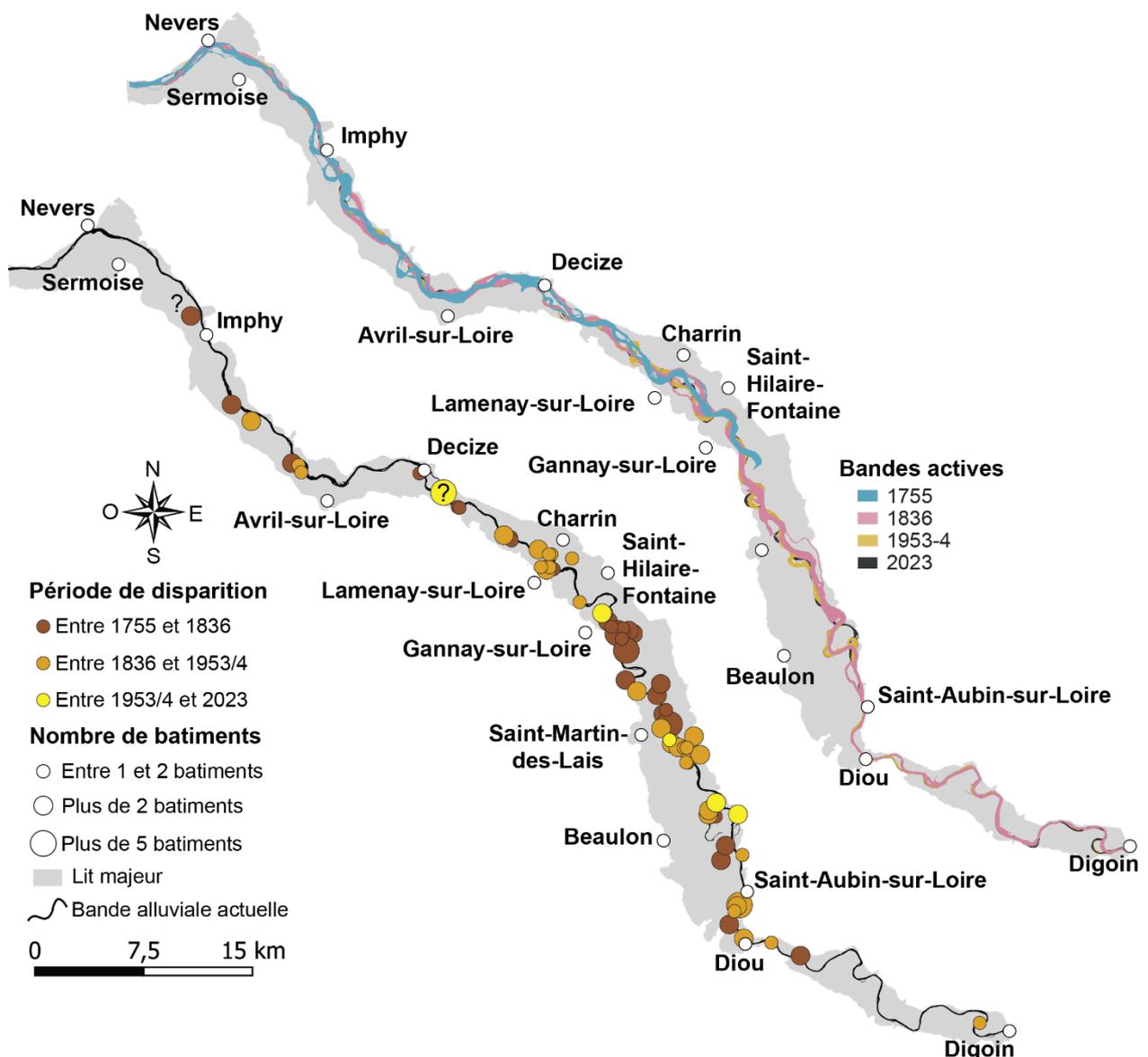
## **2. L'évolution de l'habitat rural face à l'érosion depuis le XVIII<sup>e</sup> s.**

Malgré un habitat adapté aux inondations de la Loire, les tertres et digues construites par les populations le sont moins face à sa capacité érosive. Le corpus cartographique et photographique permet en effet de rendre compte de disparitions de bâtiments et de hameaux suite aux migrations latérales du fleuve entre le XVIII<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> s. Cependant, quelques cas indiquent que les populations se sont accommodées de ces divagations en reconstruisant leur nouvel habitat à proximité de l'ancien détruit.

### **2.1. Répartition spatiale des disparitions**

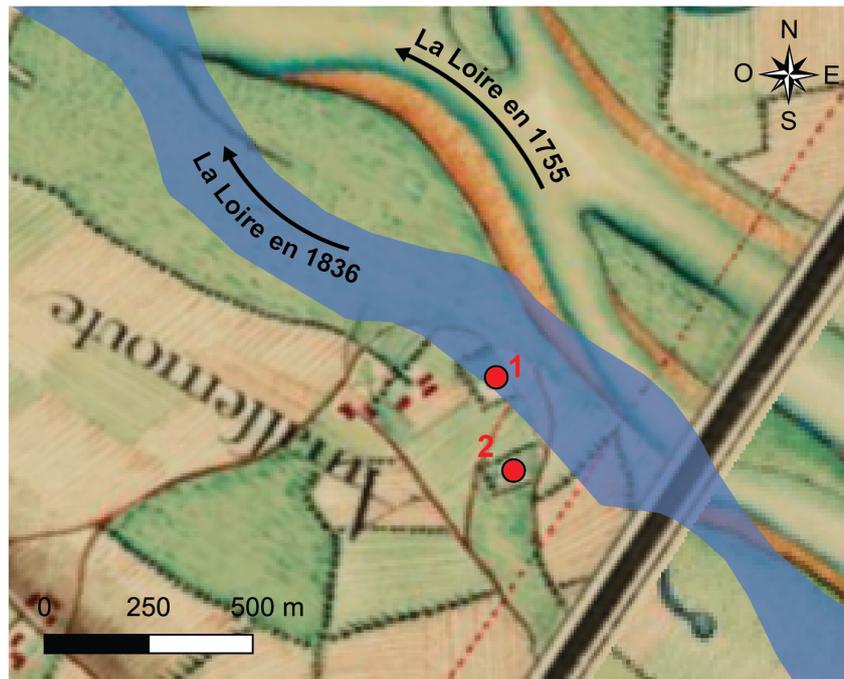
La **Figure 8.7** présente la localisation des habitats ayant disparu au sein du lit majeur entre 1755 et 2023. La carte d'État-major datée de 1836 a été préférée à la carte de Coumes de 1848 en raison de sa meilleure lisibilité concernant l'habitat. Toutes les disparitions représentées sont directement ou indirectement imputables à l'activité hydrogéomorphologique de la Loire. Sur la **Figure 8.8**, nous

pouvons par exemple directement mettre en cause la divagation de la Loire pour expliquer la disparition du bâtiment (1) entre les deux dates de 1755 et 1836. Le second bâtiment (2) est quant à lui abandonné sans que l'on puisse être certain de la cause précise liée à l'activité hydrologique de la Loire : érosion ou changement de lit entre les deux dates ? Inondations répétées et plus importantes en raison du rapprochement du lit mineur ? ou même départ par anticipation des populations ? Quoi qu'il en soit, il est quasi certain que la cause soit liée à l'activité hydrogéomorphologique de la Loire. Souvent, l'emplacement original d'un bâtiment, hameau ou village disparu laisse place quelques années après à des formes fluviales distinctes telles que des bras morts, nouveaux ou anciens bancs, visibles sur les cartes, photographies aériennes ou MNT Lidar.



**Figure 8.7.** Répartition des disparitions d'habitats causé par les migrations de la Loire. L'absence de ressources cartographiques ne permet pas d'identifier de disparitions entre Digoin et Diou entre 1755 et 1836, ni d'y cartographier la bande active en 1755 (cf. chapitre 4).

La répartition de ces disparitions n'est pas homogène sur toute la zone d'étude. Quel que soit le nombre de bâtiments concernés, la grande majorité des disparitions se concentre entre Diou et Decize. Deux facteurs expliquent cette répartition spatiale. Le premier, comme nous l'avons vu en partie précédemment, est le facteur humain : c'est entre Diou et Decize que l'habitat est le plus développé en plaine alluviale. Le second facteur est lié à la dynamique fluviale. C'est sur ce secteur que la Loire a connu la plus forte migration latérale (**Figure 8.7**), en partie pour des raisons géomorphologiques, mais aussi en raison d'un faible nombre d'aménagements de contraintes (cf. **chapitre 9**).



**Figure 8.8.** Exemple de disparition de deux bâtiments (points rouges) entre 1755 et 1836 à cause de l'érosion et du changement de lit de la Loire au village d'Amassemoute (commune de Decize) aujourd'hui totalement disparu.

À l'inverse, c'est entre Digoin et Diou que les disparitions sont les moins importantes. Le tracé de la Loire durant la première moitié du XIX<sup>e</sup> s. étant très similaire deux siècles plus tard à celui de 2023, avec une présence d'aménagements très faible. Enfin, entre Decize et Nevers, les disparitions sont peu nombreuses. Ce faible nombre s'explique par une présence d'aménagements très importante limitant très fortement la capacité de la Loire à migrer.

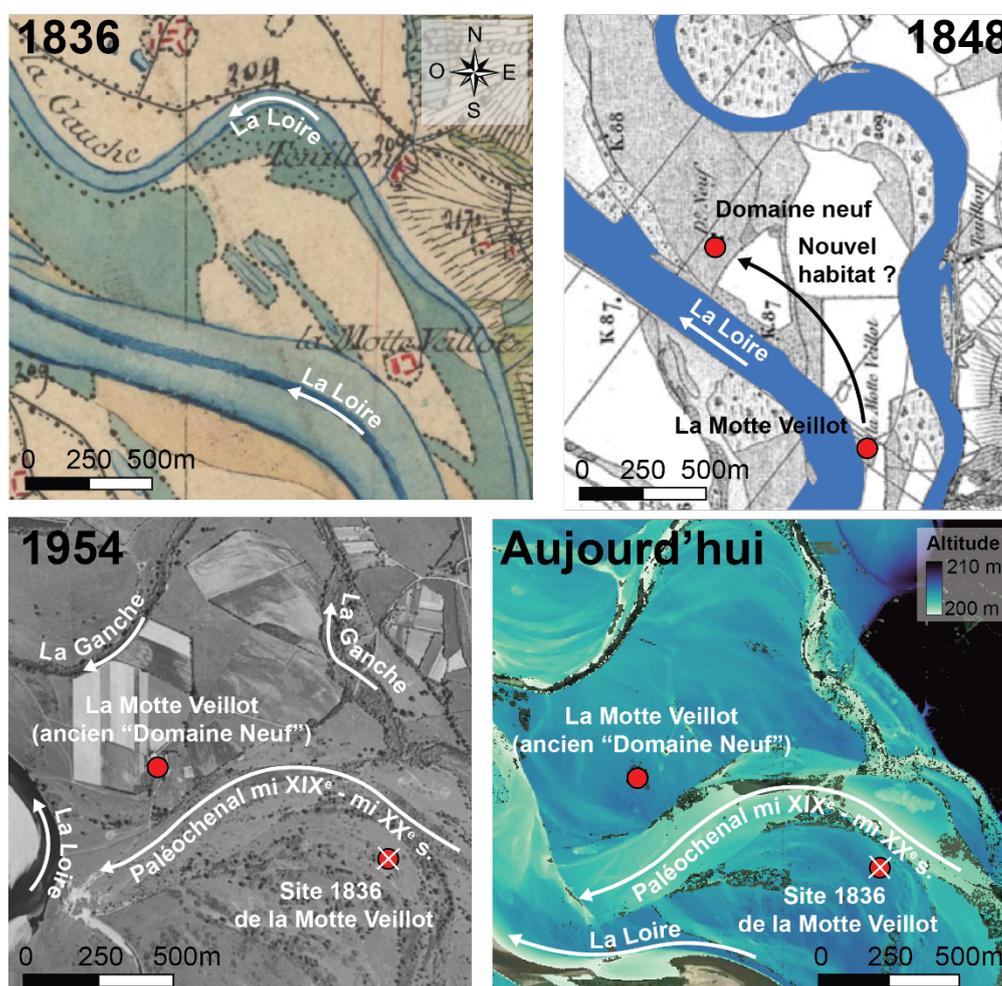
D'un point de vue temporel, la très grande majorité des disparitions ont eu lieu entre 1755 et 1953. À partir du milieu du XX<sup>e</sup> s., le nombre de disparitions chute drastiquement à seulement quatre entités disparues entre 1953 et 2023. Cette baisse s'explique par une migration de la Loire bien moins importante par rapport aux siècles précédents. Plusieurs facteurs en sont à l'origine comme nous le verrons plus en détail dans le **neuvième chapitre**, les plus déterminants étant l'aménagement du lit du fleuve qui s'alourdit de siècle en siècle, associé à une incision importante du plancher alluvial et à une

activité hydrologique plus faible. Ces facteurs ont réduit la capacité de divagation de la Loire, limitant donc drastiquement les disparitions observées.

Bien que nous ne l'ayons pas quantifié, ces érosions et migrations latérales ont aussi modifié le parcellaire agricole et le tracé des chemins. Ce sont ces modifications entre le XVIII<sup>e</sup> s. et les siècles plus récents, associés à une faible présence du bâti, qui nous ont empêchés de géoréférencer les cartes de 1755 entre Saint-Hilaire-Fontaine et l'amont de Digoin (**Figure 8.7**).

## 2.2. L'anticipation de l'érosion par les populations

Face à l'érosion et aux divagations de la Loire, les populations ne restent pas inactives. Nous avons plusieurs exemples d'anticipation de la perte de leur habitat.



**Figure 8.9.** Exemple de déplacement potentiel du hameau de La Motte Veillot (Vitry-sur-Loire).

Entre Beaulon et Gannay-sur-Loire, les bâtiments du domaine des Gouneaux (« Gougnioys » aujourd'hui) à Saint-Martin-des-Lais sont par exemple volontairement démolis par les occupants et reconstruits 400 m plus en arrière (**Dion, 1931**), où ils se situent encore aujourd'hui. Le hameau de la Folie à Vitry-sur-Loire semble avoir connu le même sort : bien que le hameau ait le même nom entre

1755 et 1836, il est déplacé de plusieurs centaines de mètres, le précédent emplacement étant occupé par un chenal de la Loire en 1836.

La ferme de la Motte Veillot à Saint-Martin-des-Lais est présente depuis le XVII<sup>e</sup> s. (**Carte de Cassini**) et située sur une île de la Loire. La ferme est déplacée 800 m plus loin entre 1836 (**Cartes d'État-major**) et 1848 (**Cartes de Coumes**) suite à l'érosion de la Loire en rive concave (**Figure 8.9**). Déjà située en zone inondable, la ferme est déplacée mais reste en zone inondable, faisant les frais des crues de 1866, 1893 et 1907 (repères de crue de la ferme de la Motte Veillot).

### **3. Les plaintes des riverains vis-à-vis de la dynamique fluviale**

Si les exemples de la répartition et de l'évolution de l'habitat du lit majeur tendent à laisser penser que les populations rurales riveraines de la Loire s'accommodent des pressions de la Loire, leurs plaintes aux autorités vis-à-vis de ces pressions indiquent qu'elles souhaitent tout de même les limiter. Plusieurs plaintes, adressées directement aux Ponts et Chaussées, ont été conservées dans les fonds des Archives nationales (**AN, F/14/1198, 1199/2, 1200, 1203**).

#### **3.1. Le contenu des plaintes**

La majorité des plaintes conservées date du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Écrites par des gens lettrés religieux (curé ou prêtre) ou laïcs (seigneurs locaux), elles parlent pour ceux-ci, ainsi que pour les habitants des paroisses concernées. Ces paroisses sont situées sur les deux sites d'étude ruraux du **sixième chapitre** : le **site d'Uxeloup** et celui de **Thareau** (Saint-Hilaire, Charrin, Laménay, Devay et Cossaye). Les plaintes font état de deux problèmes principaux : les pertes des récoltes à la suite des inondations et aux ensablements, et les pertes de terre à cause de l'érosion et de l'ouverture de nouveaux chenaux. Les religieux, seigneurs et populations riveraines demandent alors une baisse ou une exonération des impôts pour les premières pertes et la construction d'aménagements pour limiter les secondes (**AN, F/14/1199/2, F/14/1203**). Les populations riveraines demandent par exemple explicitement aux Ponts et Chaussées la construction de chevrettes pour couper certains bras (**AN, F/14/1199/2, document du 24 mai 1749**) ou même de levées pour protéger un val entier. C'est notamment le cas sur le site de Thareau. À la suite des tentatives infructueuses des habitants de protéger leurs terres de l'érosion et de l'ouverture de nouveaux chenaux à l'aide de levées de terres et de fascines (**AN, F/14/1199/2, document du 22 mars 1749**), les Ponts et Chaussées acceptent de faire construire une levée en 1750-1751 (**AN, F/14/1199/2, document du 10 mai 1756**). À cause des crues répétées durant la décennie 1750-1760, l'adjudicateur des travaux ne réussit pas à finaliser la construction, et ce malgré les plaintes répétées des habitants tout au long de cette décennie, les laissant face à leur déception et aux inondations du val (**AN, F/14/1199/2**).

Vers 1750, le scénario est différent sur le site d'Uxeloup : les seigneurs et habitants des paroisses d'Uxeloup et Luthenay se plaignent des inondations et de l'ensablement de leurs cultures, mais aussi et

surtout de l'érosion de la Loire qui menace plusieurs villages (AN, F/14/1199/2, **document du 11 mai 1751**). Ici la présence des seigneurs aux côtés des riverains est clairement exprimée dans le document : ces derniers en raison des pertes de leurs cultures ne peuvent plus payer les impositions seigneuriales. Louis de Régemorte, ingénieur des Ponts et Chaussées, leur répond par la construction de la levée d'Uxeloup, longue à l'origine de 300 toises (environ 580 m) (AN, F/14/1199/2, **document du 16 juillet 1751**), et encore présente aujourd'hui. Contrairement au site de Thareau, à Uxeloup la levée est destinée à empêcher la Loire de divaguer. Non rattachée au coteau par l'aval, elle n'empêche pas l'inondation du val dont les eaux peuvent remonter vers l'amont, avec tout de même moins de force que si la levée n'avait pas été présente. Nous n'avons pas de détail précis sur les dates et la construction de la levée. De multiples mentions de la levée construite sont disponibles pour la fin du XVIII<sup>e</sup> s., dénommée « levée d'Uxeloup » ou « levée de la Bure ». Lors de la débâcle exceptionnelle de 1789, les eaux ont bien reflué en arrière de la levée, mais sans endommager les terres (AN, F/14/1202). Néanmoins, la levée doit être réparée à la suite des dégradations de la crue de 1790, sans que l'on ait plus de détail (AN, F/14/1203, **documents des 18, 20, 23 janvier, 23 février, 15, 19 et 24 avril 1791**), mais elle fut probablement en partie emportée (AN, F/14/1203, **documents du 16 janvier 1791**). Elle est ensuite prolongée lors des réparations (AN, F/14/1203, **documents du 17 mai 1791**). Ainsi, contrairement aux affirmations de **Temam (2012)** la levée existe bel et bien dès la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. En revanche, il est possible qu'elle existe en sa forme actuelle que depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> s. suite aux travaux des Ponts et Chaussées.

### **3.2. Les modalités de la conservation de ces plaintes**

Il faut néanmoins s'intéresser aux modalités de conservation de ces plaintes qui témoignent de la difficulté d'analyser ce type de document. Ces différentes plaintes sont aujourd'hui conservées par les Archives nationales, au sein du fond « F/14 Travaux Publics » regroupant des documents provenant tous directement de l'institution des Ponts et Chaussées, versés dans leur très grande majorité en 1926 et 1927 (**Archives nationales, 2009**). Toutes les plaintes conservées concernent des secteurs où des levées ont été construites, ou tentées d'être construites : secteur d'Uxeloup et de Thareau. Ces documents ont en réalité été probablement conservés par les Ponts et Chaussées, car les plaintes aboutirent à la construction de levées, justifiant donc leurs financements. Dans ce cas, combien de plaintes n'ayant pas abouti à un quelconque aménagement ont été jetées ou perdues ?

Il ne faut donc pas croire que ces levées auraient été réalisées suite aux plaintes. Les études précédentes ont démontré que l'objectif des Ponts et Chaussées au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. est bien plus de garantir la bonne navigabilité du fleuve (**Dion, 1961 ; Temam, 2012**), que de protéger les populations des inondations. Ces plaintes ont pu servir aux Ponts et Chaussées de prétexte financier pour obtenir le droit ou l'accord des autorités étatiques de réaliser des levées pour les besoins de la navigation. L'abandon à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. des réparations de la levée de Charrin – Saint-Hilaire, détruite en son

centre sur plus de 800 m, irait en ce sens. Bien que détruite, la levée conserve tout de même son rôle de contraindre les déplacements de la Loire et sert donc les intérêts des Ponts et Chaussées, mais pas celui des sociétés qui doivent faire face aux inondations du val.

En bref, ces plaintes sont très localisées, car dépendantes de la volonté de conservation des Ponts et Chaussées. Elles montrent bien en revanche que malgré un habitat individuel adapté à l'activité hydrologique de la Loire, cela n'empêcha tout de même pas ces populations de requérir l'aide des autorités dans une volonté d'abaisser leur vulnérabilité face aux crues et à l'érosion du fleuve.

\*

## Conclusion du chapitre

Comme noté par **Burnouf (2007)** dans le cadre de la Loire moyenne, la Loire a un pouvoir d'attractivité très important. Les différentes composantes du lit majeur, notamment connectées directement ou indirectement au cours d'eau tel que les bras morts, bras secondaires, ou tout autres zones humides sont largement exploités (**Gautier et al., 2001 ; Noizet, 2003**), parfois même surexploités, et ce dès le Moyen Âge (**Burnouf et Carcaud, 1999**). Dès cette période, plusieurs indices nous permettent d'affirmer que sur la zone d'étude l'habitat est largement présent dans le lit majeur de la Loire. L'étude diachronique du corpus cartographique et photographique et du MNT Lidar démontre que face aux événements de crue, mais aussi et surtout aux divagations de la Loire, les sociétés ont usé de plusieurs modalités d'adaptation.

Contrairement aux zones de la Loire située en aval (**Dion, 1961**), ou même sur d'autres fleuves tels que la Garonne (**Valette, 2011**), les adaptations de l'habitat de la zone d'étude sont très peu caractérisées par des initiatives collectives, mais plutôt individuelles. En effet, en l'absence de levée empêchant l'inondation des vals, l'occupation se répartit par habitat dispersé en s'établissant sur des formes sédimentaires surélevées, ou sur terre, quelques fois associées à des digues. Les crues de la Loire n'étant pas éclair, le temps est aussi du côté des populations qui peuvent se mettre, ainsi que leurs effets, plus facilement à l'abri. Nous avons vu qu'en contexte urbain, les sociétés surveillaient l'activité de la Loire (cf. **chapitre 7**). Il en était fort probablement du même acabit pour les sociétés rurales, elles-mêmes tournées vers le cours d'eau. En somme, les sociétés riveraines de la Loire en zone rurale semblent adaptées à l'activité contraignante de la Loire, même sur des secteurs où celle-ci s'est fortement déplacée. La quasi-absence de décès lors des inondations les plus importantes au cours des siècles pour lesquels nous disposons de données (du XVIII<sup>e</sup> s. à nos jours) pourrait témoigner en partie de cette adaptation.

L'étude de cet habitat comporte néanmoins un biais, puisqu'il reste difficile d'étudier l'habitat disparu, donc non adapté. Les mottes castrales et tertres religieux médiévaux sont-ils, à l'image des buttes-témoins en géomorphologie, des marques d'un paysage bâti plus étendu dans le lit majeur dès

l'époque médiévale ? Nous ne pouvons en être certains, bien que l'habitat en Loire à l'aval de la zone d'étude l'ait été même hors de la protection des levées (**Burnouf, 2007**). Des recherches archéologiques associées à des recherches documentaires pourraient nous éclairer sur la question, notamment avec la consultation de terriers<sup>26</sup> par exemple.

Et quand est-il des populations présentes aujourd'hui dans le lit majeur ? Nos échanges avec les habitants du lit majeur en milieu rural m'ont frappé par une conscience et une mémoire du risque inondation très développée. Mais quand est-il à Nevers et Decize en arrière des levées ? Afin de mieux comprendre l'évolution de l'adaptation de ces sociétés, des études sociogéographiques seraient indispensables. Ce questionnement faisait d'ailleurs partie des objectifs du programme ANR DIGUE, porté par Lydie Goeldner-Gianella, dont le site d'Uxeloup constituait l'un des sites d'étude parmi d'autres à l'échelle de toute la France. Les résultats de cette recherche montrent qu'en fonction du type de levée, de leur localisation et des populations impliquées, les réactions à la mention d'évolution potentielle de celle-ci (destruction, renforcement, etc.) ont été très différentes (**Goeldner-Gianella et al., 2024**).

---

<sup>26</sup> Document d'Ancien Régime répertoriant les lois et usages d'une seigneurie. On peut y retrouver un inventaire détaillé des terres, divers biens et des habitats.



## Chapitre 9

# Réponses morphologiques de la Loire à l'évolution hydro-climatique, à l'aménagement et aux activités anthropiques entre 1755 et 2023

Si certaines études ont déjà exploré les dynamiques de l'évolution planimétrique de la Loire du XIX<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s., ce dernier chapitre propose d'étendre cette analyse au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. afin de répondre à la question suivante : quelle est la part du facteur hydro-climatique et celle du facteur anthropique dans l'évolution morphologique de la Loire ?

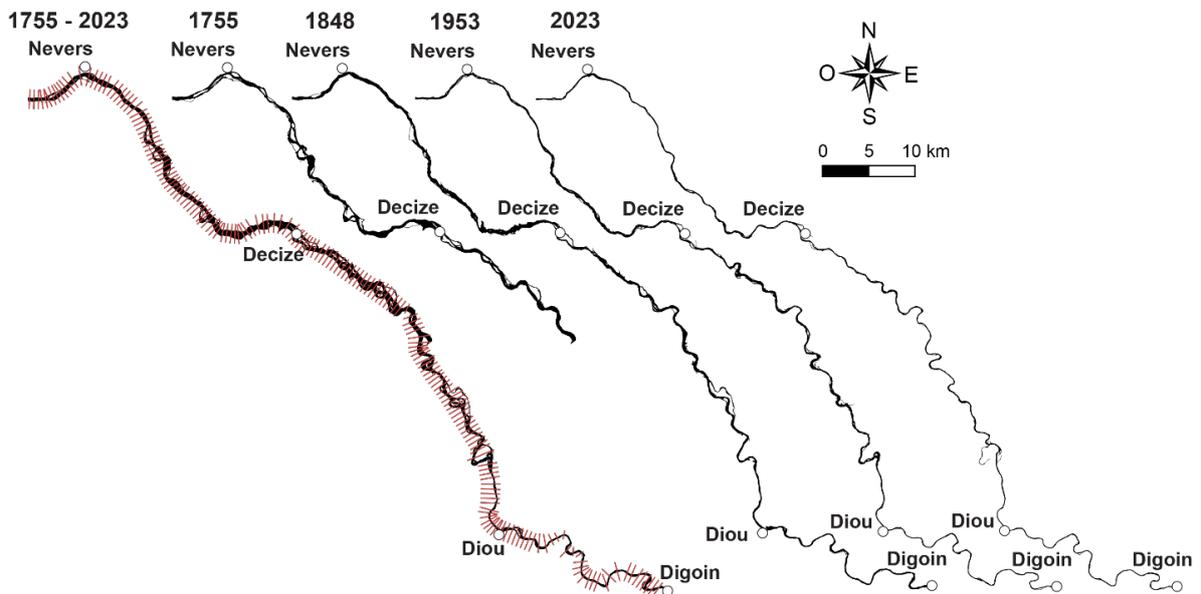
L'objectif est d'étudier l'évolution planimétrique de la bande active de la Loire et de ses îles entre 1755 et 2023 grâce à la digitalisation de ces différentes unités fluviales sur quatre dates : 1755 grâce aux cartes de 1755 ; 1848 à partir des cartes de Coumes ; 1953 à partir de photographies aériennes ; et 2023 à partir d'images satellites (cf. **chapitre 4**). Nous verrons que les résultats préliminaires de **Gautier et al. (in prep)**, reposant en partie sur ces digitalisations, apportent de nouvelles données sur l'évolution verticale du plancher alluvial de la Loire, et ce dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s.

Le chapitre s'organise en deux parties. La première présente les tendances générales quant aux évolutions des largeurs des bandes actives, du nombre et de la surface des îles, permettant de différencier trois secteurs aux dynamiques distinctes. La seconde partie explore les facteurs explicatifs de ces évolutions. Les facteurs « naturels », notamment l'activité hydrologique de la Loire définie dans le **cinquième chapitre** où les différences de contextes géologiques et géomorphologiques présentées dans le **deuxième chapitre** jouent un rôle secondaire dans les évolutions observées. En revanche, l'influence anthropique sur le milieu, caractérisée par l'aménagement de la Loire, son balisage nécessaire à la navigation puis les extractions de granulats, semble surpasser les facteurs « naturels », ou plutôt biophysiques, quant à l'évolution des largeurs des bandes actives, du nombre et de la surface des îles ligériennes.

# 1. Évolution générale en plan de la Loire entre 1755 et 2023

La bande active de la Loire (comprenant le lit mineur et les bancs actifs) ainsi que ses îles ont été digitalisées sur l'ensemble de la zone d'étude pour 1848, 1953 et 2023. Pour rappel, les planches de la carte de 1755 de Thareau (amont de Decize) à Diou n'ont pu être géoréférencées en raison de l'importance de la déformation et des modifications (paysage et bâtis) du lit majeur entre le milieu du XIX<sup>e</sup> s. et aujourd'hui (cf. **chapitre 4**) (**Figure 9.1**).

Nous n'avons pas intégré à cette étude les données issues de la carte d'État-major de 1836 pour deux raisons principales : celle-ci est moins précise que la carte de Coumes dans sa représentation en plan de la Loire et de son lit majeur (cf. **chapitre 4**). Or, les deux cartes ne sont séparées que de quelques années (1836 pour État-major contre 1848 pour celle de Coumes). Nous n'avons donc conservé que celle de Coumes afin d'obtenir les données les plus précises possible pour chaque siècle du XVIII<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> s.



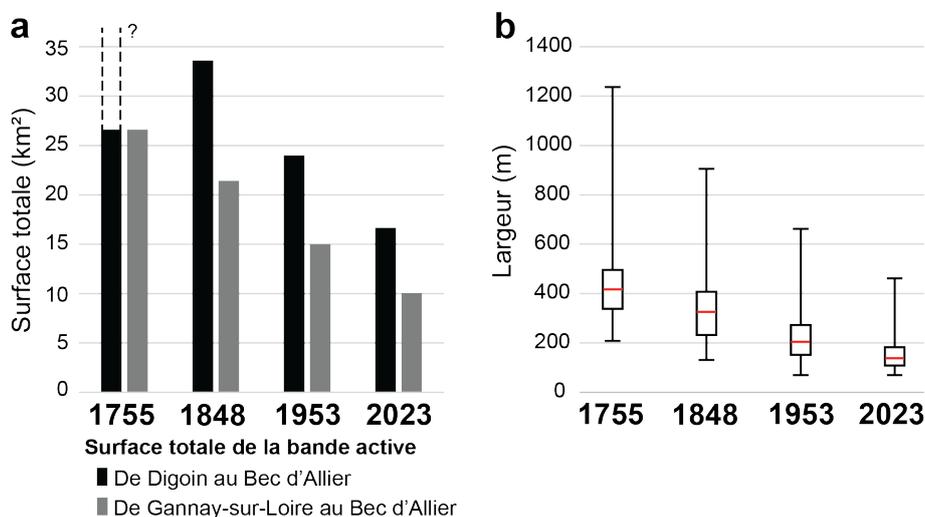
**Figure 9.1.** Évolution des bandes actives de 1755 à 2023. En rouge : les profils d'étude.

L'étude diachronique de ces quatre bandes actives de la Loire et de ses îles témoigne d'évolutions significatives entre 1755 et 2023. Pour rappel, les valeurs d'incertitudes liées à la précision des ressources utilisées ou à leur géoréférencement atteignent 16,1 m pour la carte de 1755 (cf. **chapitre 4**), probablement moins de 5 m pour celle de 1848 et sont insignifiantes dans le cadre de cette étude pour les données de 1953 et 2023. Nous allons voir que même pour les données de 1755, les résultats de ce chapitre restent significatifs.

## 1.1. Contraction de la bande active

La **Figure 9.2a** témoigne d'une diminution significative de la surface totale de la bande active de la Loire entre 1755 et 2023. Entre Gannay-sur-Loire et le Bec d'Allier (**Figure 9.1**), la surface totale

passé de 26,6 km<sup>2</sup> en 1755 à 10 km en 2023, tandis que sur la surface totale de tout le cours de la Loire sur la zone d'étude passé de 33,6 km<sup>2</sup> en 1848 à 16,6 km<sup>2</sup> en 2023. Les rythmes de ces évolutions sont stables entre 1848 et 2023 avec une perte de 0,06 à 0,07 km<sup>2</sup>/an entre Gannay-sur-Loire et le Bec d'Allier et une perte de 0,09 à 0,1 km<sup>2</sup>/an sur la totalité de la zone d'étude (**Tableau 9.1**).



**Figure 9.2.** a : surfaces totales des bandes actives successives. b : distribution des largeurs de la bande active suivant les différentes dates.

**Tableau 9.1.** Données relatives à l'évolution de la surface totale de la bande active entre 1755 et 2023. \* : le secteur de Gannay-sur-Loire au Bec d'Allier correspond à celui pour lequel nous disposons des cartes géoréférencées de 1755.

Digoin au Bec d'Allier (Zone d'étude entière)				Gannay-sur-Loire au Bec d'Allier*			
	Surface totale (km <sup>2</sup> )	Évolution (km <sup>2</sup> )	Évolution par an (km <sup>2</sup> )		Surface totale (km <sup>2</sup> )	Évolution (km <sup>2</sup> )	Évolution par an (km <sup>2</sup> )
1755	26,6			1755	26,6		
1848	33,6			1848	21,4	-5,21	-0,06
1953	24,0	-9,61	-0,09	1953	15,0	-6,42	-0,06
2023	16,7	-7,34	-0,1	2023	10,1	-4,92	-0,07

Les boîtes à moustaches de la **Figure 9.2b** exposent une diminution significative des largeurs de la bande active de la Loire de 1755 à 2023. Alors que la médiane de la largeur des profils se situe à 416 m en 1755, elle diminue à 323 m en 1848, puis à 203 m en 1953 et enfin à 136 m en 2023. Les rythmes de diminution des largeurs médianes sont stables : -1 m/an entre 1755 et 1848, puis -1,1 m/an entre 1848 et 1953 et -0,96 m/an entre 1953 et 2023. Les maxima, minima, quartiles inférieurs et supérieurs subissent également une diminution significative (**Figure 9.2b**). On observe une disparition des largeurs supérieures à 1 km dès le XIX<sup>e</sup> s. De même, alors qu'aucun profil n'observait une largeur inférieure à 200 m en 1755, 17 % seulement des profils en 2023 dépassent une largeur de 200 m. Ces différentes analyses témoignent toutes d'une contraction significative et continue de la bande active de 1755 à 2023.

À l'aval direct de la zone d'étude, **Gautier et al. (2000)** et **Grivel (2008)** notent également une très forte réduction de la largeur de la bande active entre 1850 et 1960 de l'ordre de 56 % à un rythme annuel de 0,24 %, donc plus importante que sur la zone d'étude sur la même période dont la valeur atteint 32 %. **Nabet (2013)** indique également une rétraction importante de la bande active dans le secteur de la Charité-sur-Loire à l'aval de la zone d'étude de l'ordre de 30,9 % entre 1850 et 1932. À l'amont de la zone d'étude, **Steinmann et al. (2017)** exposent néanmoins une dynamique différente. S'ils observent bien une diminution significative de la largeur de la bande active entre 1835-1842 et 1946, dont la médiane passe d'environ 185 m de largeur à 125 m de largeur, sa taille se stabilise ensuite jusqu'à nos jours.

	XVIII <sup>e</sup> - XIX <sup>e</sup> s.	XIX <sup>e</sup> - XX <sup>e</sup> s.	XX <sup>e</sup> - XXI <sup>e</sup> s.
<b>Loire moyenne</b> (Gautier et al., 2000 ; Grivel, 2008 ; Nabet, 2013)	?		
<b>Zone d'étude</b> (cette étude)			
<b>Loire amont</b> (Steinmann et al., 2017)	?		=
<b>L'Allier</b> (Arfeuillère et al., 2022)	?	?	
<b>Le Cher</b> (Dépret, 2014)	?		
<b>La Garonne</b> (David, 2016)	?		
<b>La Charente</b> (Duquesne, 2021)	?		
<b>Le bas Rhône</b> (Arnaud-Fassetta, 2004)	?	?	

	Diminution (> 50 %)		Diminution (< 50 %)
=	Stable		Augmentation

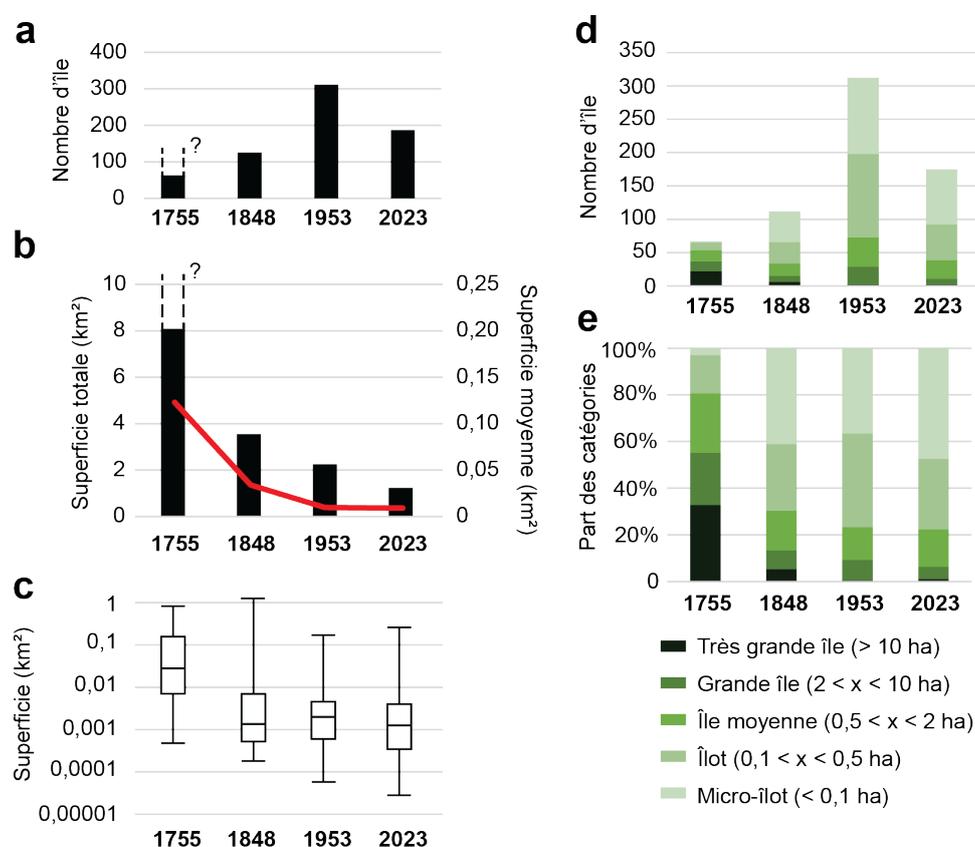
**Figure 9.3.** Évolution des largeurs des bandes actives entre le XVIII<sup>e</sup> et le XXI<sup>e</sup> s. sur plusieurs cours d'eau.

En bref, de l'amont à l'aval de la zone d'étude, la Loire observe une diminution de la largeur de sa bande active entre le XIX<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> s. C'est également le cas sur le Cher, la Garonne ou encore la Charente (**Figure 9.3**). En revanche pour la période suivante du XX<sup>e</sup> s. à nos jours, les dynamiques d'évolutions diffèrent suivant les secteurs ligériens et les cours d'eau étudiés (**Figure 9.3**). Alors qu'à l'amont de la zone d'étude l'évolution de la largeur se stabilise, elle continue de diminuer faiblement à l'aval. Le bas Rhône observe également une contraction de sa bande active entre 1895 et 1995 (**Arnaud-Fassetta, 2003**). Sur le Cher et la Charente, les bandes actives observent même une augmentation de

leur largeur (**Figure 9.3**). Ainsi, alors que la dynamique d'évolution de la largeur de la bande active de la Loire était cohérente sur la zone d'étude avec celle des autres secteurs ou des autres rivières du XIX<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> s., elle se singularise par l'intensité et la continuité de sa diminution du XX<sup>e</sup> à nos jours.

## 1.2. Évolution du nombre et de la surface des îles

Le nombre d'îles, leur superficie totale ainsi que leur superficie moyenne évoluent également de manière significative entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et 2023 (**Figure 9.4**). La superficie totale des îles, leur superficie moyenne, ainsi que les autres indicateurs statistiques indiquent que les îles furent bien plus étendues en 1755 qu'en 1848, 1953 et 2023 (**Figure 9.4b et c**), mais moins nombreuses (**Figure 9.4a**). Le nombre d'îles observe en effet une augmentation continue 1755 à 1953.



**Figure 9.4.** Évolution des îles entre 1755 et 2023. **a** : évolution du nombre d'îles. **b** : évolution de la superficie totale et de superficie moyenne des îles. **c** : boîte à moustache de la superficie des îles. **d** : nombre d'îles par catégorie d'île. **e** : part de chaque catégorie d'île.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette dynamique. Tout d'abord, la faible précision cartographique de la carte de 1755 pourrait sous-estimer le nombre d'îles par rapport à la carte de Coumes de 1848 bien plus précise. Certaines unités fluviales représentées comme bancs de sable comprenaient peut-être des petits îlots ou micro-îlots. Toutefois, afin d'assurer la bonne navigabilité du fleuve, le lit de la Loire était « nettoyé » (cf. **chapitre 7 ; Grivel, 2008**), supprimant les îlots et surtout empêchant la formation de nouveaux îlots et îles dans le lit mineur. Les îles moyennes à très grandes

étaient néanmoins conservées, notamment afin de servir de pâtures (**Gautier et al., 2007**), ce qui explique un nombre d'îles faible, mais aux surfaces importantes. En 1848, on observe une augmentation du nombre d'îles, mais une diminution de leur superficie totale et moyenne (**Figure 9.4a et b**). On note tout particulièrement la baisse du nombre de très grandes îles et de grandes îles (**Figure 9.4d**). Il faut rappeler que la carte de Coumes a été produite pour rendre compte du changement planimétrique du lit de la Loire suite à la crue catastrophique de 1846. Cette crue morphogène modifia par endroit le cours de la Loire, probablement responsable d'une diminution de sa sinuosité à l'amont de la zone d'étude (**Steinmann et al., 2017**). Il est possible qu'elle érodât fortement les îles, les fractionnant pour certaines, augmentant leur nombre, mais diminuant leur taille. Cette tendance générale se confirme en 1953 (**Figure 9.4b et c**). Néanmoins, l'augmentation du nombre d'îles et plus particulièrement d'îlots entre 1848 et 1953 (**Figure 9.4d et e**) s'explique plutôt par l'arrêt de l'entretien du cours d'eau. Si la navigation sur la Loire est déclassée en 1957 (**Lewis et Gautier, 2004**), le cours d'eau a cessé d'être entretenu comme elle l'avait été auparavant au moins 20 à 30 ans avant (**Grivel, 2008**). Selon **Gautier et Grivel (2006)** et **Grivel (2008)**, le processus de formation des îles sur la Loire se fait par le piégeage des sédiments par la végétation se développant sur les bancs. Ce processus explique le développement de micro-ilots et d'ilots entre 1848 et 1953.

En revanche, la superficie générale continue de baisser, les très grandes îles disparaissant quasi complètement (deux très grandes îles en 1953). Cette disparition s'explique en grande partie par la baisse du nombre de bras secondaires fermés par les ingénieurs ou déconnectés par l'incision très importante du plancher alluvial entre 1848 et 1953 que l'on verra plus en détail par la suite. Les grandes et très grandes îles se rattachent par conséquent aux francs bords, comme ce fut déjà bien étudié par **Gautier et al. (2000)** et **Grivel (2008)** à l'aval de la zone d'étude. Cette diminution va donc de pair avec celle de la bande active et se poursuit en 2023. Entre 1953 et 2023, le nombre d'îles baisse significativement avec une division par deux de la surface totale (**Figure 9.4a et b**). Cette diminution s'explique aussi par l'incision du lit de la Loire : de nombreux bras secondaires se déconnectent du lit de la Loire, abaissant le nombre d'îles par leur rattachement aux francs bords.

Il est cependant intéressant de remarquer que cette évolution des îles diffère complètement de celle de la Loire moyenne. **Grivel (2008)** y observe une augmentation significative du nombre d'îles entre 1850 et le début des années 2000. Le nombre d'îles est très bas jusqu'en 1930, puis le rythme de formation des îles s'accélère très fortement jusqu'en 1960 avant de stabiliser. Depuis le début des années 2000, une nouvelle accélération est observée avec le développement de micro-ilots. La formation des îles suit le schéma décrit par **Bomer (1972)**. Cette augmentation du nombre d'îles et de la part de leur surface a également été soulignée par **Gautier et al. (2007)** et **Nabet (2013)** en Loire moyenne. Cette dynamique s'explique aussi par l'arrêt de l'entretien du lit, permettant le développement des îlots et micro-ilots.

Ainsi, alors que la Loire moyenne est qualifiée de « dominée par les îles » aujourd’hui, elle ne l’était pas du tout au XIX<sup>e</sup> s. (Grivel, 2008). À l’inverse, il est probable que le paysage ligérien de la zone d’étude ait été caractérisé par une présence d’îles bien plus importante aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. qu’elle ne l’est aujourd’hui, le Bec d’Allier constituant la limite entre ces deux paysages fluviaux.

Toutes les précédentes remarques permettent de rendre compte d’une évolution significative de l’évolution en plan de la Loire entre 1755 et 2023. Des données préliminaires permettent également de rendre compte d’évolutions significatives, mais cette fois-ci verticales.

## 2. Évolution verticale du lit de la Loire

La Figure 9.5 présente les résultats préliminaires de l’évaluation de l’incision du plancher alluvial de la Loire caractérisée entre 1755 et 2023 par Gautier et al. (in prep.) sur la partie amont de la zone d’étude, de Decize au Bec d’Allier. La méthodologie employée est celle de Rusnák et al. (2024). Les valeurs de 2023 correspondent à la hauteur de la ligne d’eau déterminée à partir du MNT Lidar, tandis que les valeurs de 1755, 1848 et 1953 correspondent à l’altitude actuelle des bandes actives passées définies dans le cadre de cette thèse. Les valeurs de la Figure 9.5a sont relatives, car elles ont été calculées à partir d’un MNT dont la pente générale a été soustraite (cf. chapitre 4). L’enfoncement du plancher alluvial sur la zone d’étude entre Decize et le Bec d’Allier atteint quasi 5 m à son maximum au niveau de Nevers, mais celui-ci n’est pas homogène sur toute cette zone (Figure 9.5 ; Gautier et al., in prep).

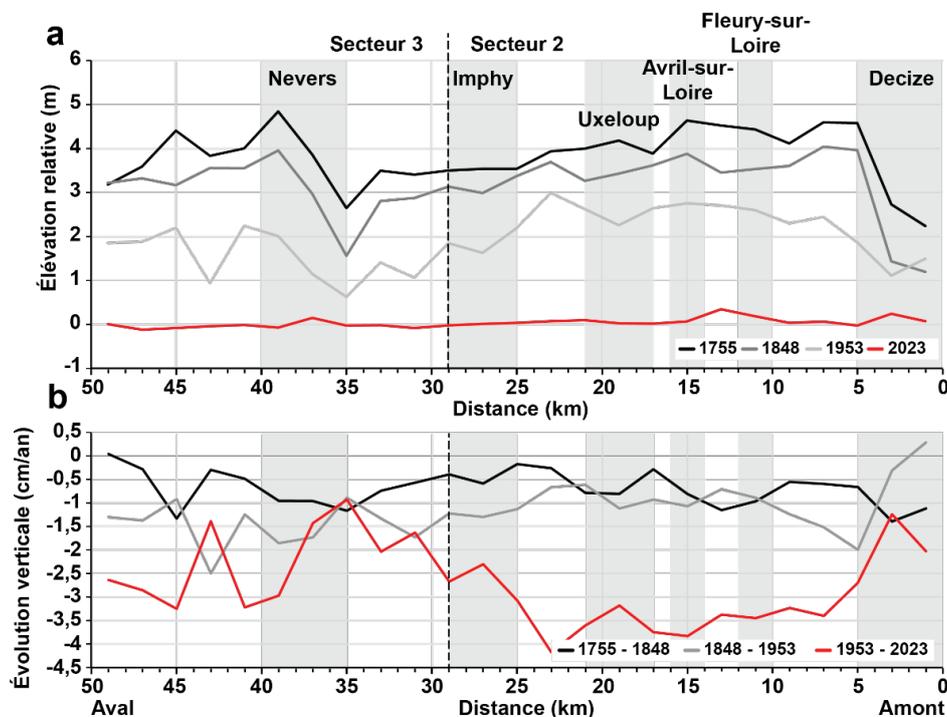


Figure 9.5. a : altitude relative des bandes actives de 1755, 1848, 1953 et 2023. b : évolution verticale (cm/an) entre 1755 et 1848, 1848 et 1953 et entre 1953 et 2023 (dans Gautier et al., in prep).

Dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s., la bande active apparaît plus incisée au niveau des deux sites portuaires de Decize et Nevers, plus particulièrement à son amont. On observe ensuite une première différence d'altitude relative entre les bandes actives de 1755 et 1848 se définissant par une première incision, en moyenne de 64 cm, entre ces deux périodes. Ainsi, contrairement aux conclusions des études précédentes qui firent commencer l'incision de la Loire à partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. (**Gautier et al., 2007**), il semblerait que l'incision du plancher soit significative dès la période 1755 – 1848. Cette incision générale se poursuit entre 1848 et 1953 avec une incision moyenne de 1,2 m et s'accroît encore entre 1953 et 2023 avec une incision moyenne de 1,9 m.

L'incision n'est cependant pas uniforme entre Decize et le Bec d'Allier, bien plus importante entre Decize et Imphy qu'entre Imphy et le bec d'Allier, mais nous y reviendrons plus en détail par la suite.

Cette incision du plancher alluvial est cohérente avec celle mise en valeur par les autres études dans le bassin versant de la Loire (**Gasowski, 1994 ; Dambre, 1996 ; Leteinturier et al., 2000 ; Larue, 2004 ; Gautier et Grivel 2006 ; Grivel, 2008 ; Nabet, 2013**). À l'amont, l'enfoncement du lit est également très important. **Steinmann (2015)** y identifie plusieurs phases d'enfoncement du lit dès le XIV<sup>e</sup> s. À Avrilly, le lit du chenal actuel est situé 4 m en dessous de celui du XIX<sup>e</sup> s. Bien plus à l'amont, au niveau de Saint-Étienne, l'enfoncement est de 1 à 2 m en moyenne (**Descy, 2009**). Le phénomène n'a pas épargné les affluents de la Loire, notamment le Cher qui s'enfonce jusqu'à 2 m entre 1856 et 2010 (**Dépret, 2014**), ou encore l'Allier qui observe une incision de 0,86 m en moyenne (et un maximum à 6,27 m) entre Brioude et la confluence avec la Dore entre 1934-5 et 2020 (**Arfeuillère et al., 2022**). L'incision du plancher alluvial de la Loire n'est évidemment pas une exception à la règle en Europe, elle est observée sur nombre de cours d'eau, notamment à partir des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. Sur le bas Rhône, **Arnaud-Fassetta (2003)** observe une incision du plancher alluvial de 150 % entre 1895 et 1995, certains secteurs s'abaissant de plus de 8 m. Cette incision est à rapprocher de l'incision généralisée des rivières du bassin rhodanien au cours du XX<sup>e</sup> s. (**Peiry et al., 1994**).

### **3. Trois secteurs d'évolution distincts**

Si les chiffres précédemment présentés soulignent des évolutions significatives des formes fluviales de la Loire du XVIII<sup>e</sup> s. à nos jours, les tendances ne sont pas homogènes sur tout le cours de la Loire de Digoin au Bec d'Allier. Si l'on prend en compte la mobilité du cours de la Loire et l'évolution de la largeur de la bande active entre 1755 (ou 1846) et 2023, trois secteurs se distinguent (**Figure 9.6, Figure 9.7**).

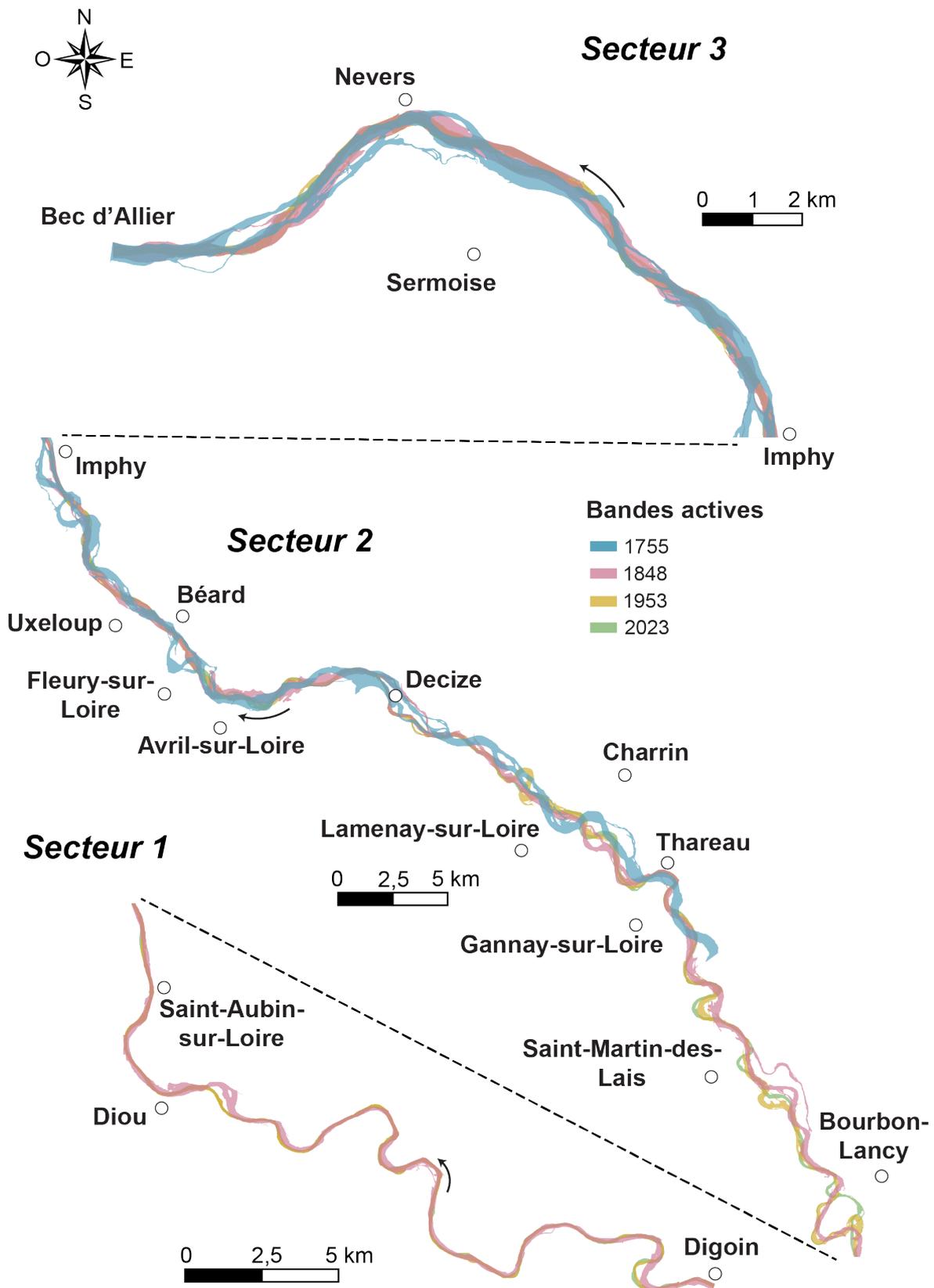
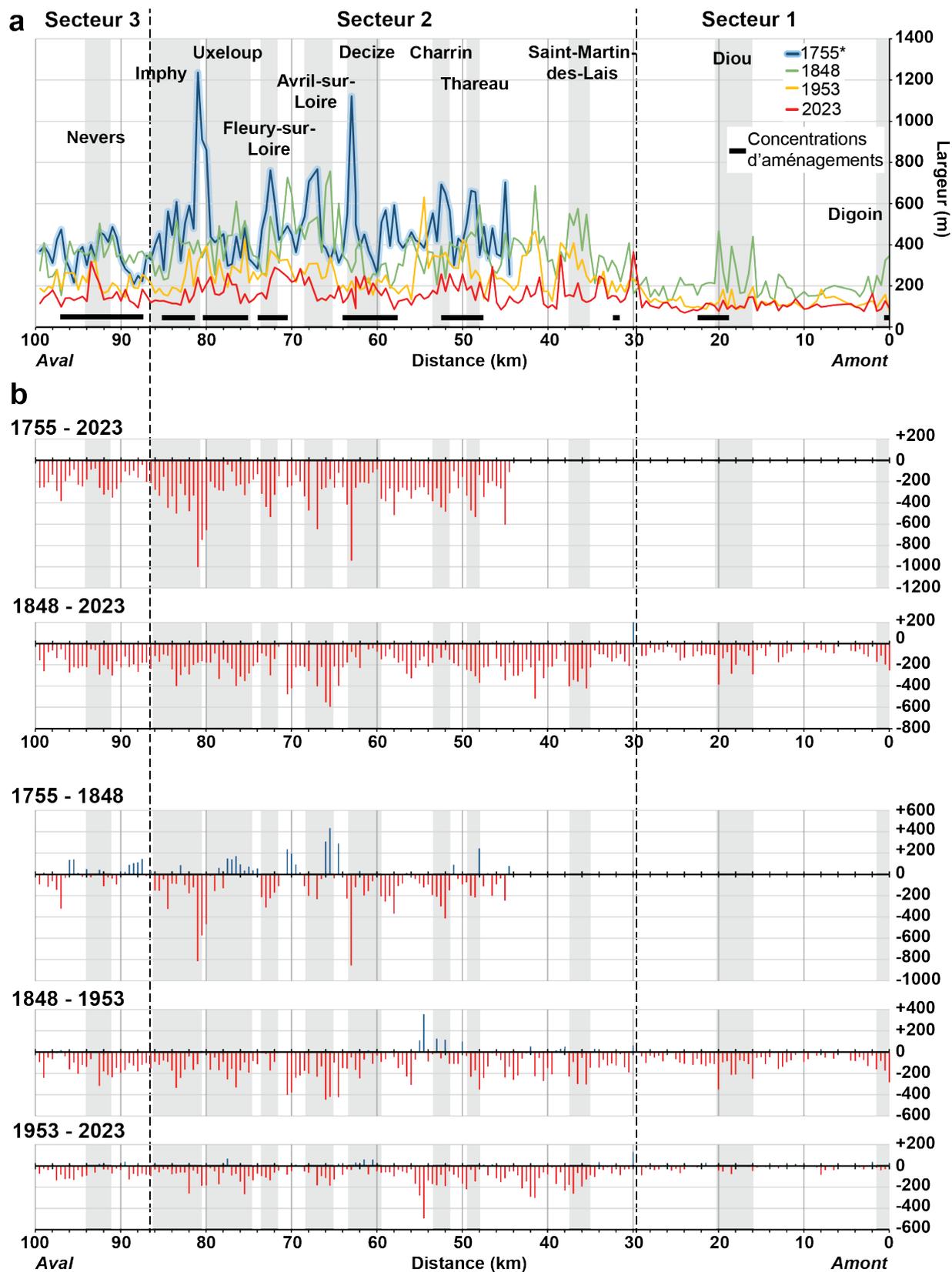


Figure 9.6. Distinction des trois secteurs du cours de la Loire.



**Figure 9.7.** a : largeurs des bandes actives de 1755, 1848, 1953 et 2023. b : évolution des largeurs des différentes bandes actives entre les différentes dates. \* : le contour ajouté à la courbe correspond à la marge d'erreur lié à l'erreur EMQ. Celle des autres dates n'a pas été représentée compte tenu de leur insignifiance dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 4).

### 3.1. Secteur 1 : Digoin à Bourbon-Lancy

Le secteur 1 s'étend de Digoin à Saint-Aubin-sur-Loire sur 36 km de long (28 % du linéaire en 2023) et se caractérise par des déplacements latéraux très faibles (**Figure 9.6**). Les valeurs de largeur de la bande active sont les plus basses de toute la zone étude, notamment pour les années 1848 et 1953. Elles ont également beaucoup moins varié que pour les deux autres secteurs (**Figure 9.7, Figure 9.8**). Seuls les sous-secteurs de Diou et de Digoin enregistrent des valeurs de largeur élevées en 1848, réduites dès 1953.

Le secteur se caractérise également par une très faible présence d'îles, et ce dès 1848. En revanche, c'est le seul secteur qui enregistre une augmentation de ce nombre en 2023, sans que la surface totale n'augmente significativement, la totalité des apparitions n'étant que des îlots et micro-îlots (**Figure 9.9**).

### 3.2. Secteur 2 : Bourbon-Lancy à Imphy

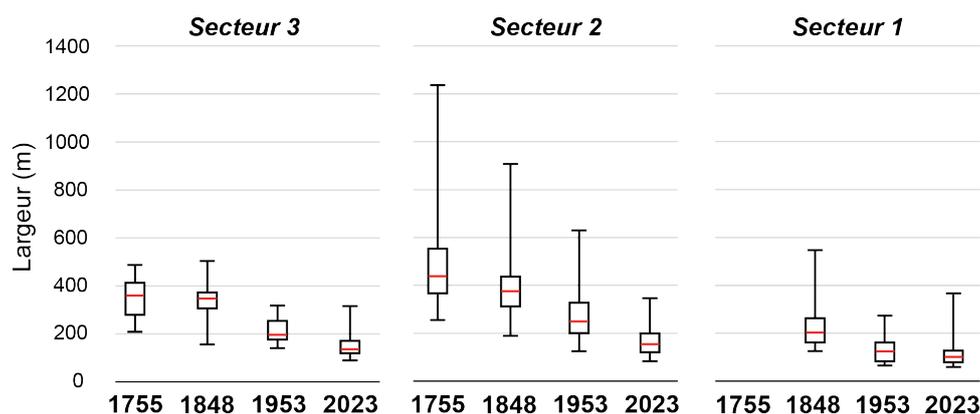
Le secteur 2 s'étend sur 73 km (58 % du linéaire en 2023) de Bourbon-Lancy à Imphy (**Figure 9.6**). Il se caractérise par une mobilité latérale bien plus importante que pour le secteur 1. Certains sous-secteurs sont par ailleurs encore très mobiles, notamment celui de Bourbon-Lancy qui voit l'ouverture d'un nouveau lit entre 1953 et 2023 ou encore ceux de Saint-Martin-des-Lais et du site d'étude de Thareau qui observent des érosions latérales encore importantes (cf. **chapitre 3 et 6**). Les largeurs de la bande actives sont aussi bien plus importantes en 1755 et 1846 que sur les autres secteurs, avec plusieurs profils atteignant plus de 600 m de large. On y retrouve encore aujourd'hui les profils de bande active les plus larges. Ce secteur se caractérise cependant aussi par les diminutions des largeurs de bande active les plus importantes au cours des XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> s. (**Figure 9.7, Figure 9.8**).

On y retrouve en effet tous les sous-secteurs qui enregistrent les valeurs de contraction de la bande active les plus importantes au cours de la période d'étude. C'est le cas de celui de Decize et d'Uxeloup-Imphy enregistrant des diminutions records de plus de 800 m entre 1755 et 1848, soit de 8,6 m par an (**Figure 9.7**). Certains secteurs voient néanmoins sur cette période de 1755 – 1848 des élargissements de leurs bandes actives, notamment à Avril-sur-Loire avec des valeurs de plus de 200 à plus de 400 m, ou encore à Charrin, entre Avril et Fleury-sur-Loire et Uxeloup avec des valeurs comprises entre 220 et 160 m (**Figure 9.7**). Ces élargissements se raréfient néanmoins durant la période suivante entre 1848 et 1953, concentrés sur le secteur de Charrin, et disparaissent quasi totalement entre 1953 et 2023. Finalement, seul un profil situé à l'amont de Saint-Martin-des-Lais observe une augmentation de sa largeur (202 m) entre 1848 et 2023, s'expliquant par l'ouverture d'un nouveau chenal secondaire, et aucun entre 1755 et 2023.

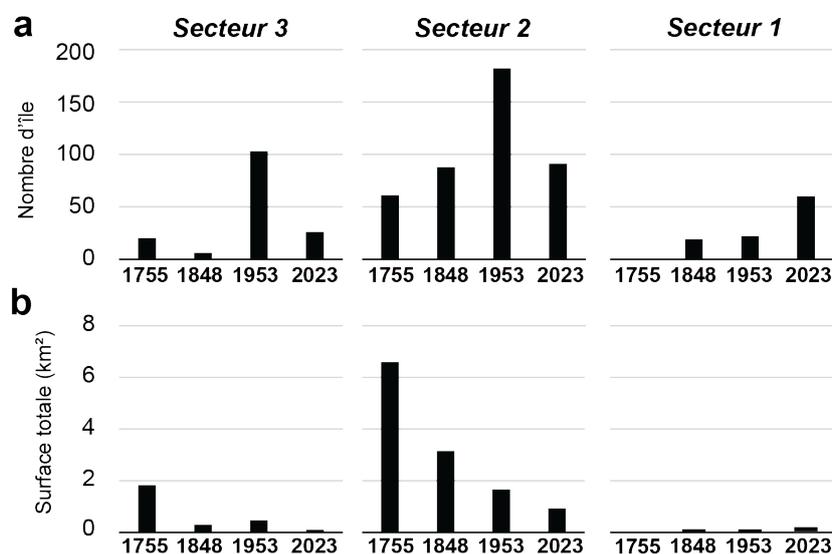
Ensuite, et contrairement au secteur précédent, l'évolution du nombre d'îles et de leur surface générale suit nos constatations réalisées sur les données générales : le nombre d'îles augmente

légèrement de 1755 à 1848, bien plus fortement entre 1848 et 1953, pour ensuite revenir à leur niveau de 1848 en 2023 (**Figure 9.9**). De même, la baisse continue de leur surface générale suit la tendance générale (**Figure 9.4**).

Enfin, l'aval de ce secteur se caractérise également par les valeurs d'incision les plus importantes entre 1755 et 2023 avec une incision moyenne de 3,8 m (**Figure 9.5**). Le secteur s'incisant le plus avec une valeur de 3,5 m est celui situé entre Uxeloup et Imphy entre 1953 et 2023, enregistrement aussi la contraction de la bande active la plus importante un siècle auparavant entre 1755 et 1848.



**Figure 9.8.** Distribution des largeurs de la bande active suivant trois secteurs.



**Figure 9.9.** a : évolution du nombre d'île par secteur. b : évolution de la surface totale par secteur.

### 3.3. Secteur 3 : Imphy au Bec d'Allier

Enfin, le secteur 3 est le moins étendu, restreint d'Imphy au Bec d'Allier sur 17 km (14 % du linéaire en 2023). Il se caractérise par une faible mobilité du lit de la Loire, bien que légèrement plus importante que celle du secteur 1, et par une largeur de la bande active plus faible que celle du secteur

2 dès 1755 (**Figure 9.7, Figure 9.8**). Cette largeur reste ensuite stable en 1848, plus particulièrement sur le sous-secteur de Nevers. Certains sous-secteurs observent des diminutions de la largeur de leur bande active, notamment à l'aval de Nevers, tandis que l'on note des augmentations sur d'autres à l'amont et à l'aval de Nevers. Néanmoins, entre 1848 et 1953, tous les profils subissent une diminution avec une valeur maximale de 313 m. La dynamique de contraction se poursuit entre 1953 et 2023 bien que caractérisée par des valeurs moins importantes.

Si les valeurs d'incision du secteur 3 sont comparables à celle du secteur 2 entre 1755 et 1848, elles diffèrent par la suite (**Figure 9.5**). Entre 1848 et 1953, l'incision moyenne est de 1,7 m entre Imphy et le Bec d'Allier, plus importante que celle (1 m) du secteur précédant entre Decize et Imphy. La tendance s'inverse pour la période suivante (1953 – 2023) avec une incision de 1,4 m sur ce secteur contre 2,2 m pour le secteur 2.

Enfin, si leur surface générale est élevée, les îles sont peu nombreuses en 1755 et ont presque disparu en 1848 (**Figure 9.9**). En revanche, leur nombre augmente très fortement en 1953 passant de 6 en 1848 à 103 en 1953.

Ainsi, ces trois secteurs se distinguent par leurs différences de largeurs de bande active, de nombre d'îles et de leurs surfaces dès 1755, observant des évolutions qui diffèrent également au cours des trois derniers siècles. Si le secteur 1 évolue peu avec les valeurs de diminution de largeur les plus faibles, le secteur 2 contraste complètement avec des largeurs beaucoup plus importantes au XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s., des déplacements latéraux dynamiques et un nombre d'îles important. C'est également sur ce secteur que les diminutions de largeur sont les plus marquées. À l'inverse, le secteur 3 se caractérise par des largeurs de bande active plutôt moyenne et faible dès 1755 et un nombre d'îles assez faible avant 1953. Comment expliquer ces différences ? Si ces trois secteurs possèdent des caractéristiques géomorphologiques différentes influençant le cours de la Loire, nous allons voir que les activités anthropiques ont amplifié et dépassé en importance ces effets.

#### **4. Les conséquences de l'aménagement de la plaine**

Comme nous l'avons vu ponctuellement dans les **septième** et **huitième chapitres**, les sociétés riveraines de la Loire ont délibérément modifié son cours pour servir leurs intérêts économiques ou s'en protéger, que ce soit par la réalisation d'aménagements, de prélèvement de sable ou par la suppression d'îles. La **Figure 9.7** permet de rapprocher les secteurs les portions les plus aménagées de la Loire, réalisées à partir du recensement de tous les aménagements de la zone d'étude (**Figure 9.10**), des différentes largeurs des bandes actives entre 1755 et 2023. On peut rendre compte d'une certaine corrélation visuelle entre les deux types de données. De précédentes études ont déjà souligné les conséquences déterminantes des aménagements sur l'évolution planimétrique de la Loire dans son cours moyenne (**Gautier et al., 2007 ; Temam et Grivel, 2009 ; Grivel et Gautier, 2012 ; Nabet et al.,**

2016 ; Gautier et al., 2022). Il s'agit donc ici de présenter dans un premier temps l'évolution spatiale et temporelle de l'aménagement général sur la zone d'étude, puis de s'attarder par secteur sur des sous-secteurs plus spécifiques afin d'expliquer l'évolution des largeurs de bande active et du nombre d'île en rapport avec l'évolution de l'aménagement.

#### 4.1. Évolution générale de l'aménagement

Le septième chapitre a permis de rendre compte d'un aménagement destiné à contraindre la Loire présente dès le XIV<sup>e</sup> s. en milieu urbain. S'il est plus difficile d'en étudier la présence pour ces mêmes périodes en milieu rural, les résultats du huitième chapitre tendent à laisser penser que les sociétés rurales ont bien contraint la Loire au cours de la période médiévale. Le corpus documentaire, cartographique, photographique, accompagné du MNT Lidar a permis de réaliser un recensement des aménagements à l'échelle de toute la zone d'étude à partir du milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (Figure 9.10).

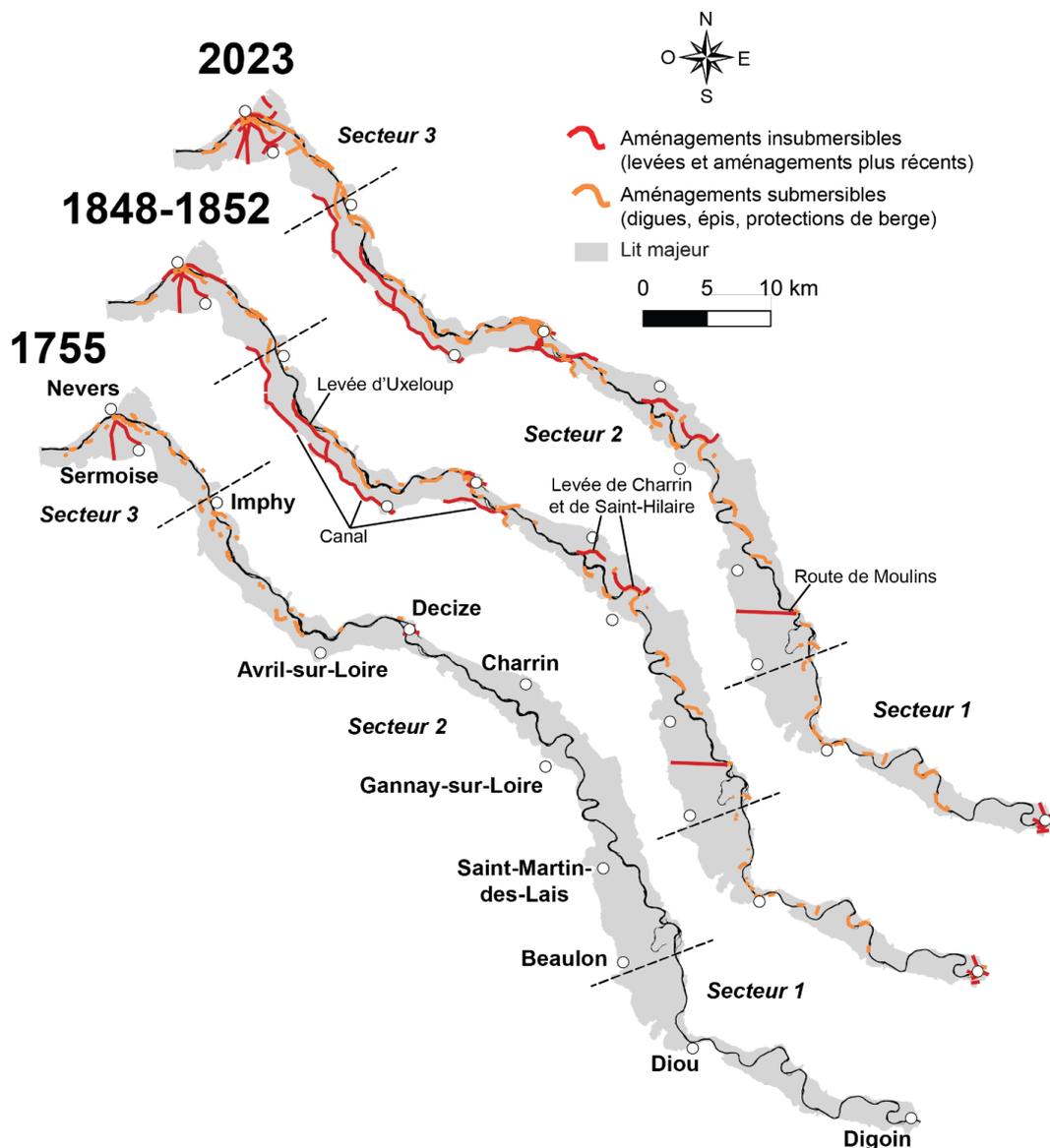


Figure 9.10. Évolution de l'aménagement du lit de la Loire entre 1755 et 2023.

La **Figure 9.10** nous fait apparaître un aménagement bien moins important et étendu sur la zone d'étude au XVIII<sup>e</sup> s. qu'il ne l'est sur les autres zones ligériennes situées à l'aval où le cours de la Loire est déjà enserré par des levées au XVIII<sup>e</sup> s. de Gien à Montjean. Avant le milieu du XVIII<sup>e</sup> s., les aménagements lourds et insubmersibles que sont les levées restent sur la zone d'étude limitée aux seuls sites urbains, et de manière très inégalitaire entre les sites de Nevers, Decize et Digoin, qui y sont encore absentes (cf. **chapitre 7**) (**Figure 9.10**). Néanmoins, de nombreux plus petits aménagements présents sur la zone d'étude sont très majoritairement situés entre Decize et Nevers. Cette répartition s'explique par l'activité de navigation de la Loire. À l'échelle de la zone d'étude, c'est en effet sur cette zone que le commerce fluvial est le plus important (**Lecœur, 2023**), expliquant les investissements plus importants des ingénieurs. Ce commerce entre Decize et Nevers reste cependant bien moins prospère qu'à l'aval du Bec d'Allier (**Mantellier, 1864-1869**), ce qui explique aussi en partie le développement plus tardif et plus restreint de l'aménagement lourd du lit majeur sur la zone d'étude.

À partir du XVIII<sup>e</sup> s., les corps des Turcies et Levées et des Ponts et Chaussées investissent de plus en plus dans l'aménagement du lit majeur de la Loire en zone rurale. Cette dynamique repose à la fois sur des petits aménagements souvent destinés à couper des bras secondaires et sur les premières levées rurales destinées à contraindre plus largement la Loire en limitant sa mobilité latérale. Ces premières levées sont celles de Charrin et Saint-Hilaire et celle d'Uxeloup qui n'apparaissent pas sur la **Figure 9.10**, car n'étant pas terminées en 1755. En conséquence, l'aménagement se développe très nettement entre Nevers et Decize, mais également à l'amont de Decize entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. (**Figure 9.10**). De nouvelles levées voient le jour, que ce soit en contexte rural (Charrin – Saint-Hilaire ; route de Moulins) ou urbain (aménagement de Digoin). De nombreux petits aménagements, chevrettes et protections de berge, principalement entrepris par les corps des ingénieurs, viennent aussi ralentir l'érosion des boucles de méandres en rive concave.

Enfin, entre le XIX<sup>e</sup> s. et aujourd'hui, peu d'aménagement lourd est ajouté en dehors des sites urbains (cf. **chapitre 7**). En revanche, les aménagements non submersibles, digues, épis, chevrettes ou diverses protections de berge, se multiplient afin de limiter l'érosion et provoquer l'ensablement des bras secondaires (**Figure 9.10**).

Ainsi, ce n'est pas seulement le développement des levées qui progresse vers l'amont de la Loire au fil des siècles (**Gautier et al., 2007**), mais bien l'aménagement des vals en eux-mêmes, que ces aménagements aient été lourds ou non. La fixation du lit fut le leitmotiv des Ponts et Chaussées tout au long du XVIII<sup>e</sup> et du XIX<sup>e</sup> s. (**Temam, 2012 ; Martins, 2022**). Un document d'ingénieur de 1840 illustre cette pensée des ingénieurs par l'idée selon laquelle le sable présent dans la Loire responsable de son instabilité provient des berges et donc « si les rives sont fixées, tout le régime de la Loire deviendra fixe » (AN, F/14/6670 ; **Martins, 2022**).

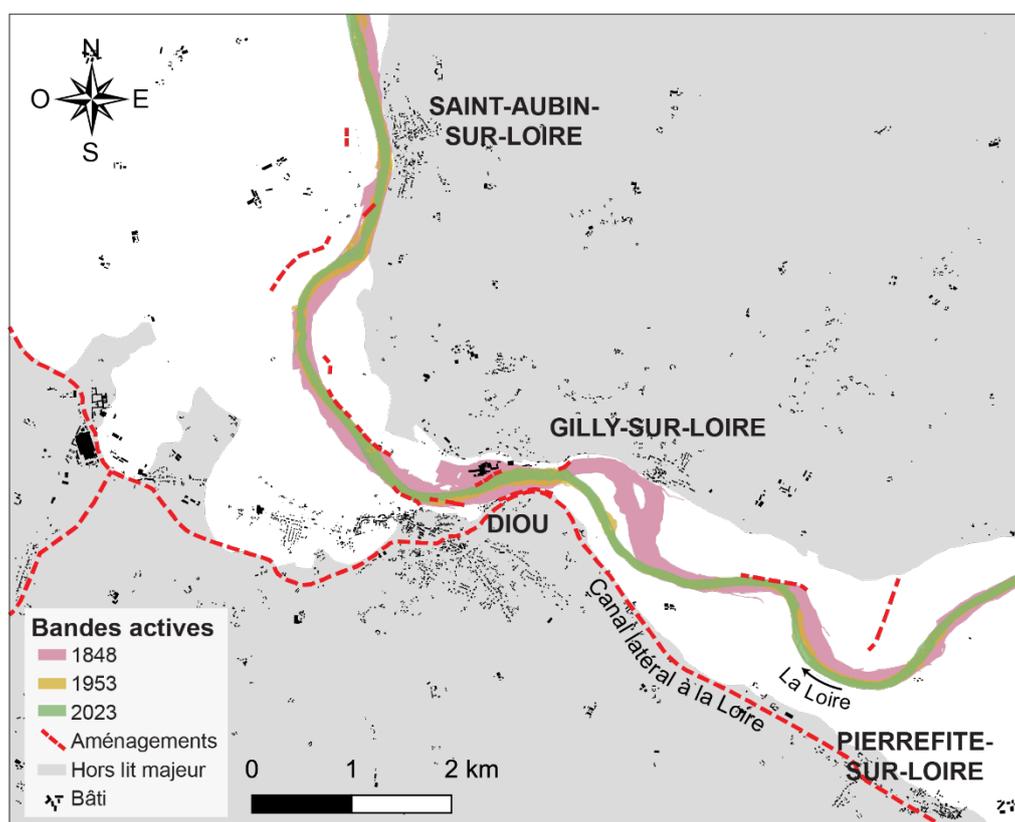
## 4.2. Étude par secteurs et sous-secteurs

L'aménagement des lits de la Loire permet d'expliquer certaines des trajectoires d'évolution de secteurs et sous-secteurs précédemment mis en avant dans ce chapitre.

### 4.2.1. Secteur 1

Comme nous l'avons vu précédemment, le secteur 1 se caractérise par une mobilité très faible entre 1848 et 2023, ainsi que par des largeurs de bande active les plus faibles de la zone d'étude. Deux sous-secteurs dérogent à ces remarques : celui de Diou et Digoin.

La trajectoire d'aménagement du site d'étude de Digoin a déjà été analysée au sein du **septième chapitre**. Il nous a permis de voir que c'est véritablement à partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. et suite à la construction des différents canaux que l'aménagement se développe. Celui-ci provoque une contraction de la bande active, peu étendue de base en 1848 (**Figure 9.7**), probablement déjà influencée par les premiers aménagements d'ampleur.



**Figure 9.11.** Successions des bandes actives de la Loire au niveau de Diou. Tous les aménagements présents sont représentés sur la carte de 1848.

Le secteur de Diou se caractérise par quelques valeurs de la largeur de bandes actives très importantes, puis par leur forte diminution entre 1848 et 1953. Les valeurs de largeur plus importantes pour le reste du secteur pourraient s'expliquer par la géologie particulière du site : la Loire y est fortement contrainte par l'avancée des plateaux autunois (cf. **chapitre 2**). Le lit majeur y est contraint à

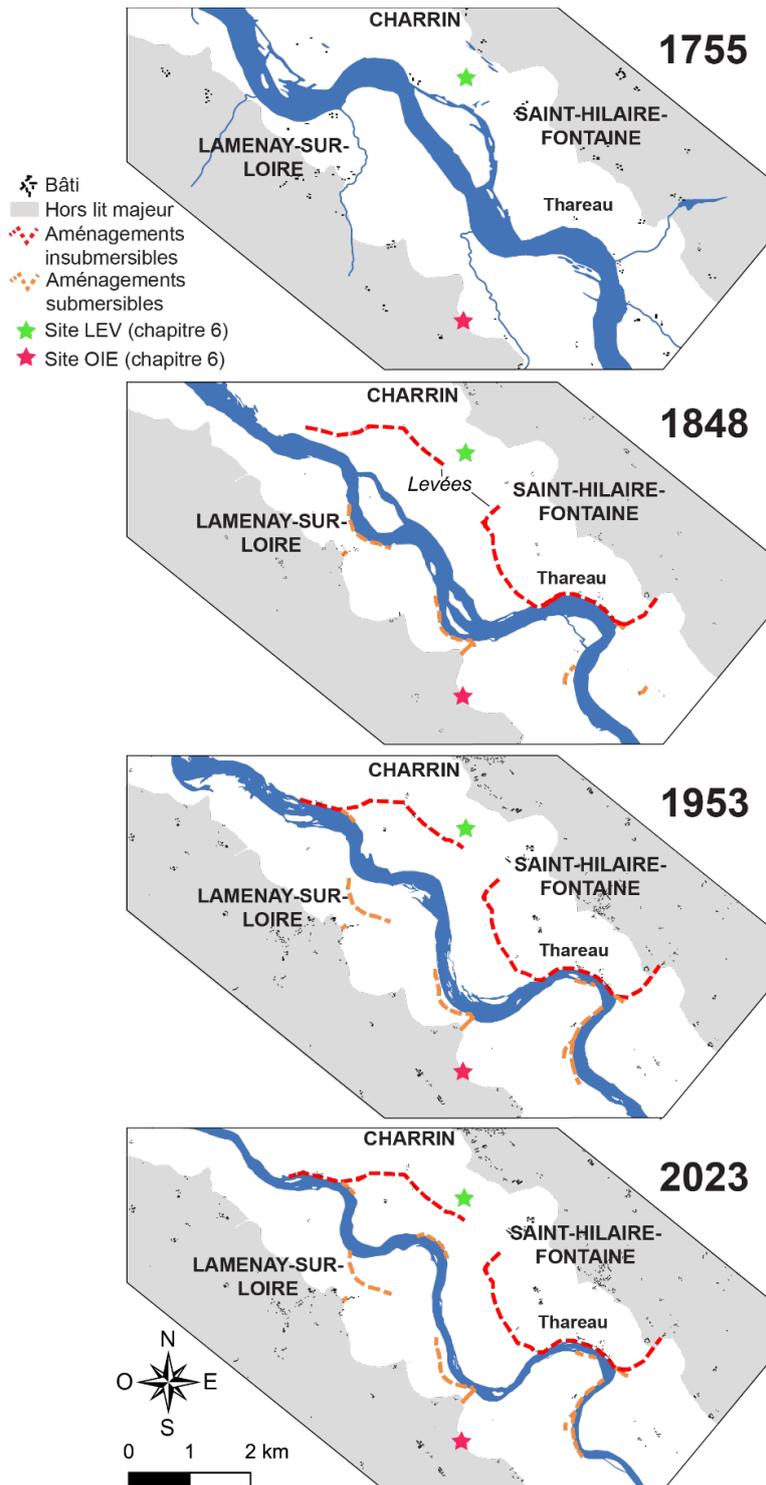
une largeur de 300 m seulement (**Figure 9.11**). Les eaux de la crue de 1846 ont sûrement été bloquées par le passage géologique de Diou, élargissant la bande active dans le secteur. L'absence de mobilité entre 1848 et 1953, puis entre 1953 et 2023 peut néanmoins plutôt s'expliquer par la présence d'aménagements, plus précisément de protections de berge, toutes relevées sur la carte de 1848 (**Figure 9.11**). Leurs effets sont probablement amplifiés par les contraintes géologiques générales du secteur.

#### **4.2.2. Secteur 2**

Le secteur 2 se caractérise par les valeurs de largeur de bande active les plus élevées de toute la zone d'étude, mais également par les diminutions des bandes actives les plus fortes. Appuyés par les exemples des sous-secteurs de Thareau, Uxeloup et Imphy, nous allons voir que ces contractions ont délibérément été provoquées par la réalisation d'aménagements. Si certains furent réalisés pour les besoins de la navigation, d'autres, notamment à Thareau, répondirent au besoin des populations riveraines de se protéger de l'érosion.

##### **4.2.2.1. Évolution du site d'étude de Thareau**

Le site de Thareau regroupe les deux paléochenaux LEV et OIE étudiés dans le cadre du **sixième chapitre (Figure 9.12)**. Comme nous avons pu le voir, la Loire s'y caractérise par une mobilité assez importante. En 1755, la largeur de sa bande active atteint plus de 600 m. Aucun aménagement n'a été relevé en 1755. Pour autant, le port de Thareau en rive droite et celui de Laménay-sur-Loire en rive gauche étaient déjà actifs. S'il est certain qu'aucune levée n'y est encore présente (celles de Charrin – Saint-Hilaire étaient encore en construction), des protections de berge devaient protéger les ports ou « chantiers » sans qu'il soit possible de les localiser. C'est entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. que l'aménagement de ce sous-secteur se développe très fortement. Comme ce fut déjà dit, les levées de Charrin et Saint-Hilaire ne furent jamais finalisées, ce qui ne les empêcha pas de fortement contraindre le lit de la Loire comme nous pouvons le voir entre 1848 et 2023 (**Figure 9.12**). En réponse aux contraintes exercées par les aménagements en rive droite, la Loire semble s'être déportée préférentiellement en rive gauche, comme nous l'avons vu dans le **huitième chapitre** à travers les plaintes des habitants. Ceux-ci aménagent également la rive gauche afin de limiter l'érosion. Ainsi, la volonté des Ponts et Chaussées de limiter les divagations de la Loire en rive droite par la construction d'une levée se répercute sur les habitants en rive gauche qui y répondirent par des protections de berges et des petites levées afin de limiter l'érosion. De nouvelles protections de berge sont ajoutées aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s., notamment sur le secteur de Thareau afin que le cours de la Loire ne quitte pas le port de Thareau. Ces aménagements successifs contraignent très fortement la Loire sur un secteur où elle avait une forte capacité à divaguer (cf. **chapitre 6**) car peu contrainte par la géologie du secteur, contrairement au secteur de Digoin-Diou.



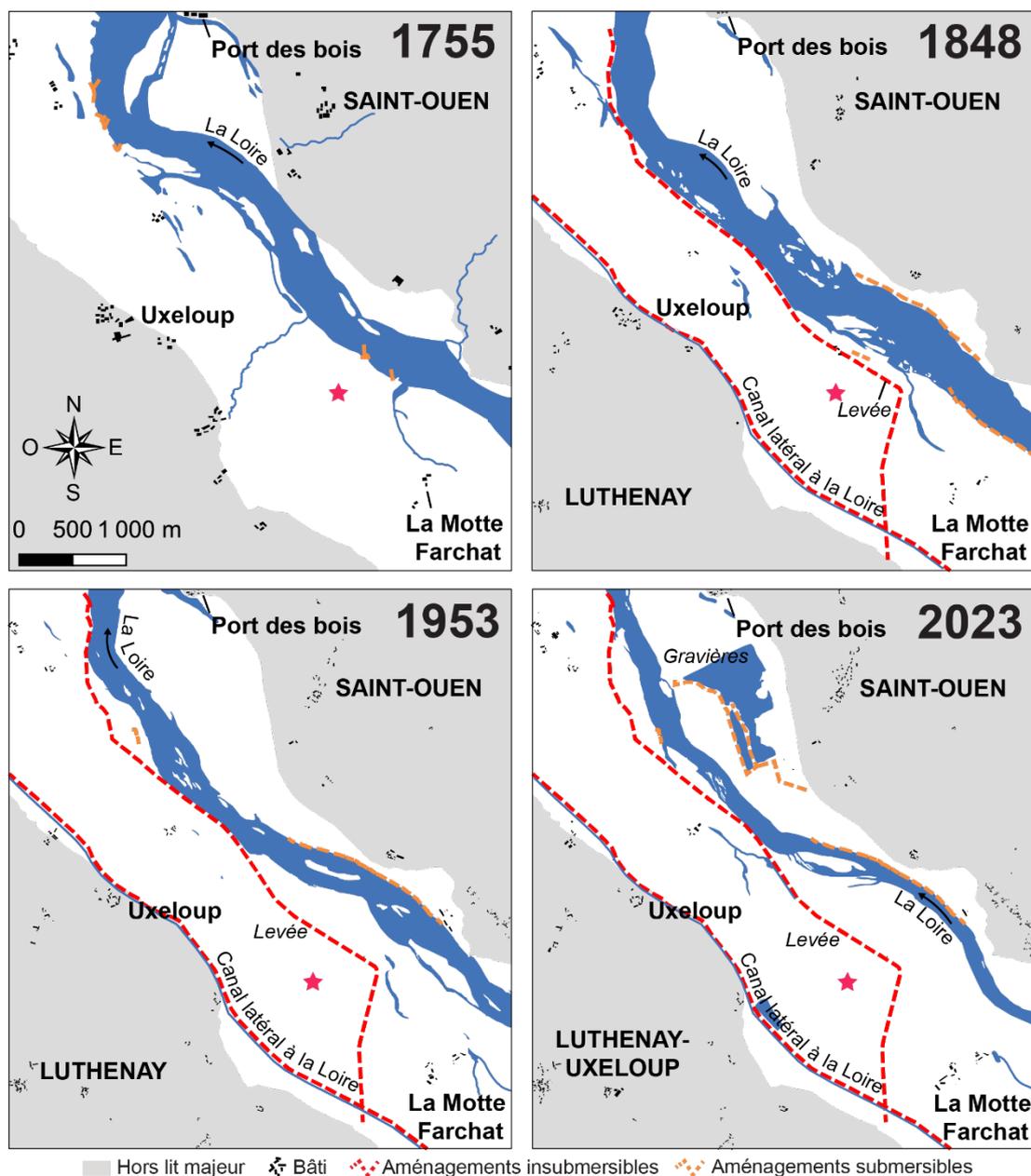
**Figure 9.12.** Évolution de la bande active de la Loire sur le site de Thareau entre 1755 et 2023.

#### 4.2.2.2. Évolution des sites d'Imphy et du site d'étude d'Uxeloup

Si nous allons à présent plus à l'aval de Decize, les sites d'Uxeloup et Imphy sont représentatifs d'une volonté de contrôler la mobilité et la localisation du cours de la Loire par les corps d'ingénieurs.

Le site d'Uxeloup se caractérise par une Loire assez peu mobile entre 1755 et 2023, une des raisons pour laquelle ce site avait été sélectionné dans le cadre de l'étude sédimentaire du **sixième**

**chapitre (Figure 9.13).** En 1755, la bande active a une largeur plutôt moyenne par rapport au reste de la zone d'étude avec des largeurs comprises entre 300 et 400 m. Plusieurs îles et chenaux secondaires sont également présents. Dès 1692 et 1755, voire même dès l'époque médiévale (cf. **chapitre 6**), la Loire est plaquée en rive droite. Il est probable que la faible mobilité de la Loire et son plaquage en rive droite depuis de nombreux siècles trahissent une forte anthropisation de ce sous-secteur de la Loire. En effet, l'objectif était de maintenir le cours en rive droite où se trouve une grande partie des ports (cf. **chapitre 2**), dont le Port des Bois (**Figure 9.13**), ou ceux de Béard et Tinte à l'amont. De plus, comme nous l'avons mentionné dans le **deuxième chapitre**, les sites d'Uxeloup et de la Motte Farchat sont probablement en relation assez forte avec l'économie des deux cités de Nevers et Decize depuis au moins le XV<sup>e</sup> s., notamment pour leur fourniture en bois.

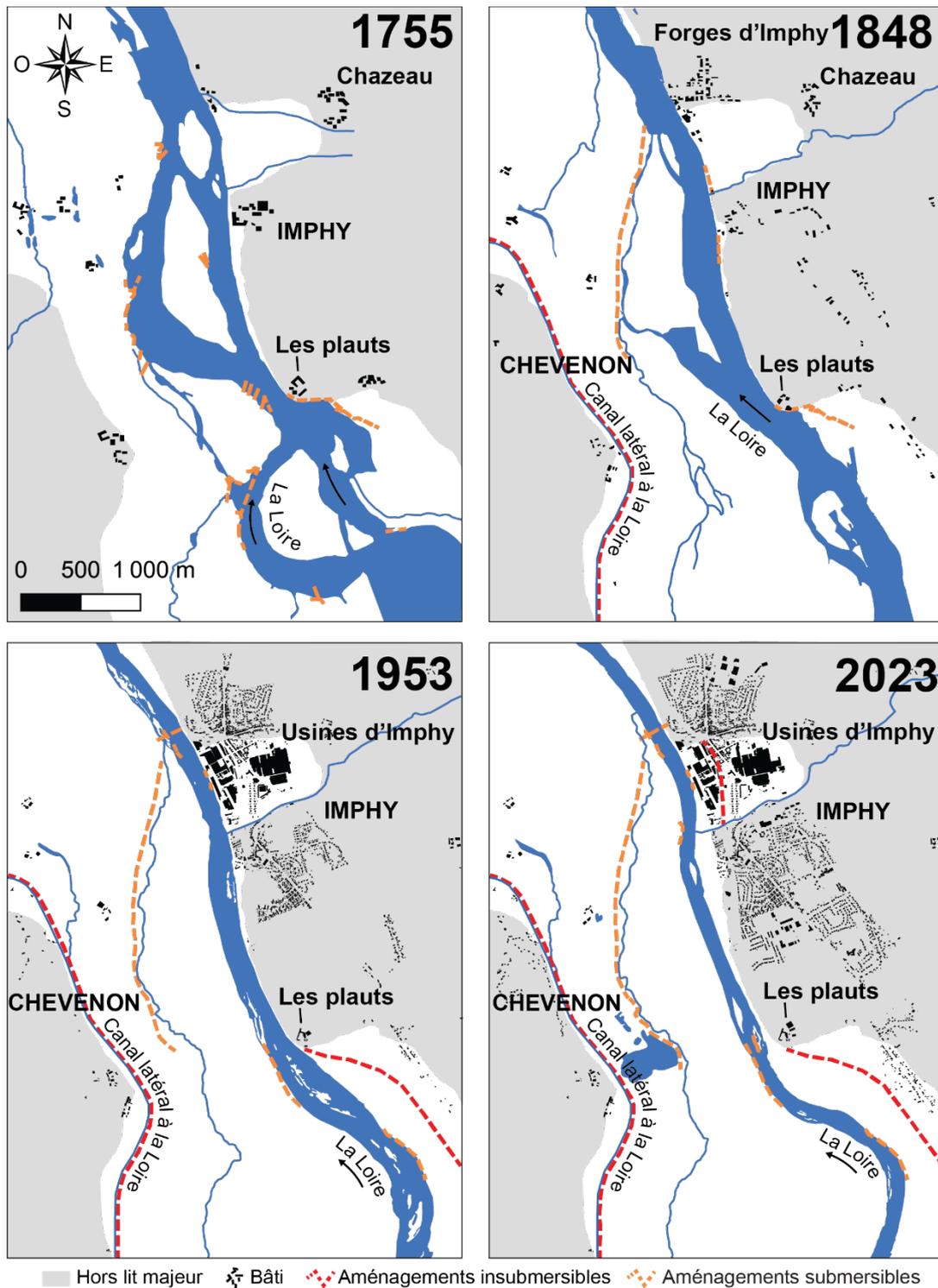


**Figure 9.13.** Évolution de la bande active sur le site d'étude d'Uxeloup entre 1755 et 2023.

Le plaquage du cours de la Loire en rive droite et sa simplification sont assurés par plusieurs petits aménagements détectés en 1755. On peut néanmoins observer que la Loire ouvre de nouveaux lits en rive gauche. Pour y répondre, les Ponts et Chaussées entreprennent la construction de la levée d'Uxeloup durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. Elle n'est cependant pas rattachée au coteau afin de répondre au besoin de la navigation sans empêcher l'épandage des eaux de crue dans le val. La levée est ensuite plusieurs fois réparée face aux crues (**Gautier et al., 2022**). Il est néanmoins assez étonnant de voir la réalisation de plus d'un kilomètre de protection de berge en face de la levée entre 1755 et 1848 (**Figure 9.13**). Celles-ci ne peuvent être destinées à protéger les terres de l'érosion, la Loire serait vite stoppée par la géologie des coteaux. Néanmoins, ces protections de berge pouvaient peut-être répondre à l'objectif de limiter la largeur de la bande active, limitant par la même occasion la formation d'île, encore une fois pour les besoins de la navigation. La Loire étant enserrée dès le milieu du XIX<sup>e</sup> s. entre les aménagements et le lit majeur étroit, peu d'aménagements sont ajoutés au site par la suite.

L'évolution du site d'Imphy, situé à l'amont direct d'Uxeloup est différente. Celle-ci est plutôt représentative de la baisse continue de la largeur du lit de la Loire et de la surface des îles. Les ingénieurs ont en effet eu la volonté de simplifier le cours d'une Loire beaucoup plus large et mobile qu'à Uxeloup, et ce dès le XVIII<sup>e</sup> s. au moins (**Figure 9.14**).

Aux XVII<sup>e</sup> (Carte de 1692) et XVIII<sup>e</sup> s., le style fluvial de la Loire se caractérise par la présence de plusieurs chenaux et îles. De plus, entre 1692 et 1755, le nombre de bras semble s'être multiplié, peut-être suite aux deux différentes périodes de forte activité hydrologique de 1705 – 1715 et 1735 – 1750 (cf. **chapitre 5**). Les Ponts et Chaussées entreprennent alors de fermer les différents bras de la Loire par la multiplication d'épis, digues et chevrettes, dont certaines sont déjà présentes en 1692 (**Martins, 2022**), afin de provoquer leur ensablement (**Figure 9.14**). L'entreprise n'est pas anodine. Au XVII<sup>e</sup> s., une activité sidérurgique se développe sur le site d'Imphy avec l'ouverture de forges. Les propriétaires avaient besoin de maintenir le cours principal de la Loire en rive droite afin de servir au fonctionnement des forges et garantir une sortie portuaire. L'aménagement du XVIII<sup>e</sup> s. semble avoir plutôt bien fonctionné au premier abord puisque même suite à la crue de 1846 le cours reste concentré dans un bras principal en rive droite. Néanmoins, l'écart de 100 ans entre les deux cartographies ne permet pas de rendre compte de toute la difficulté à laquelle les Ponts et Chaussées et riverains ont fait face. Les recherches archivistiques de **Martins (2022)** indiquent que la fermeture des bras en rive gauche du XVIII<sup>e</sup> s. n'empêcha pas directement la simplification du style fluvial. De la fin du XVIII<sup>e</sup> s. à la première moitié du XIX<sup>e</sup> s., les bras continuent de se multiplier, en rive droite cette fois, au niveau des Plauts (**Figure 9.14**). En 1817, un document révèle la construction de nouvelles digues, épis, protection de berges destinés à fermer les bras et empêcher l'ouverture de nouveaux lits (**Martins, 2022 ; AD Nièvre, 3S/6512**).



**Figure 9.14.** Évolution de la bande active de la Loire sur le site d'Imphy entre 1755 et 2023.

Ainsi, la mobilité du lit a été contrôlée grâce à des petites levées et des protections de berge afin de maintenir la Loire en rive droite pour les besoins de l'industrie d'Imphy, mais également pour les besoins de la navigation, importante entre Decize et Nevers (cf. **chapitre 2**).

L'aménagement intense des sites d'Uxeloup et Imphy répond donc à la nécessité de simplifier le cours de la Loire pour les besoins de la navigation. Cet aménagement explique les diminutions records

de largeur de bandes actives précédemment vues (**Figure 9.5**), ainsi que l'incision importante du plancher alluvial.

### 4.1.3. Secteur 3

Enfin, le secteur 3 se caractérise par des largeurs de bande active assez basse dès 1755 et un nombre d'île assez faible avant 1953. Ces caractéristiques sont révélatrices d'une anthropisation très forte du milieu. Comme nous l'avons vu dans le **septième chapitre**, les archives comptables ont révélé l'impact des activités anthropiques sur le milieu dans le secteur de Nevers dès le XIV<sup>e</sup> s. Les faibles largeurs de la bande active de 1755, ainsi que l'incision du plancher alluvial déjà marqué au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. (**Figure 9.5**), sont alors révélatrices de l'ancienneté de l'aménagement du site. La forte incision mesurée entre 1848 et 1953 est par ailleurs nettement supérieure à celle du secteur 2. Celle-ci pourrait avoir été provoquée à la fois par l'érosion régressive provoquée par l'aménagement soutenu du secteur 2 à son amont, en particulier des sites d'Imphy et Uxeloup, et à la fois par l'aménagement très soutenu du secteur 3 lui-même.

De même, la faible présence d'îles en 1755, puis leur quasi-disparition en 1848 relèvent de l'entretien du lit de la Loire pour les besoins de la navigation. Nous avons justement vu dans le **septième chapitre** plusieurs exemples de suppressions d'îles (probablement des îlots ou micro-îlots) dans le secteur de Nevers. Un document de 1731 nous donne un exemple de la marche à suivre : l'île (ou l'îlot) est d'abord défrichée par arrachement et par le feu, puis on la laboure et on y creuse un canal (**AM Nevers, CC/12, document du 31 août 1731**), la Loire devant remobiliser d'elle-même les terres (ou le sable) mises à nu.

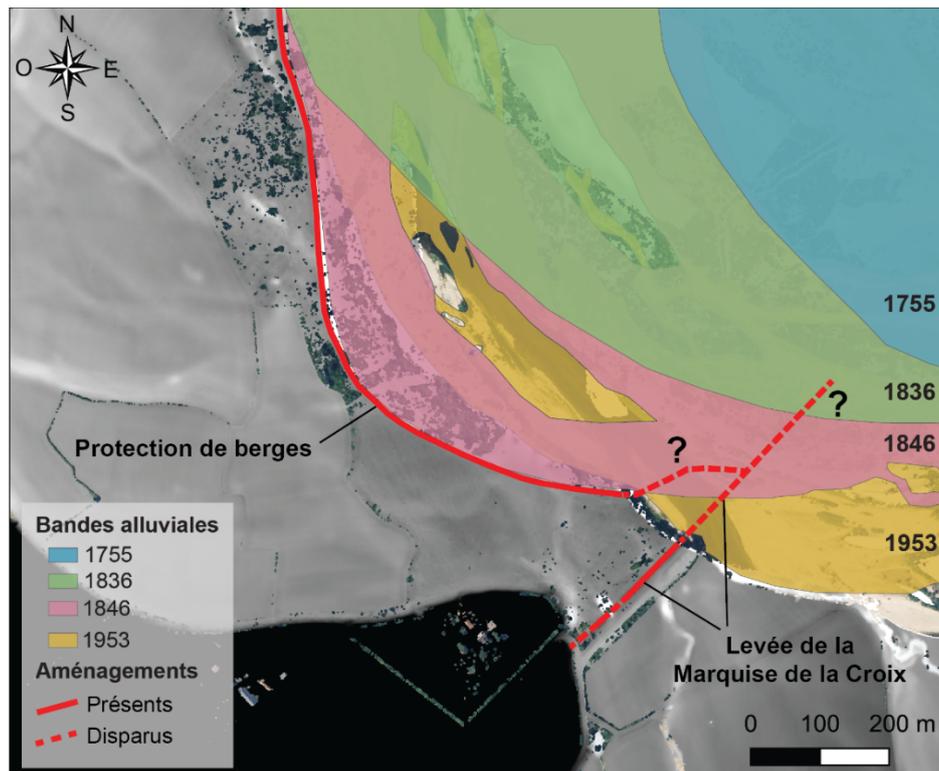
L'augmentation importante du nombre d'îles en 1953, passant de 6 îles (ou îlots et micro îlots) à plus de 100, s'explique par la fin de cet entretien permettant à la végétation pionnière de s'installer (**Gautier et al., in prep**). Néanmoins, le peu d'îles présentes en 1755 occupe une surface totale importante (plus de 1,8 km<sup>2</sup>). Il est difficile de savoir si l'importance de cette surface témoigne de leur utilité ou de l'incapacité des sociétés riveraines à les supprimer en raison de leur taille jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. Toujours est-il que ces îles ont de multiples utilités dès l'époque médiévale : on y prélève l'essentiel des branchages pour les fagots servant à la construction des aménagements fluviaux au Moyen Âge (**Foucher, 2020**), elles servent également de pâtures, ainsi qu'à isoler les populations si nécessaire, notamment en cas d'épidémie (**communication personnelle Marion Foucher**). Un document de 1456 témoigne de l'objectif de conserver « l'île aux porcs » par la réalisation de battis afin de limiter son érosion (**AM Nevers, CC/52, fol. 25r**). Ainsi, si les îlots et micro-îlots étaient supprimés pour les besoins de la navigation, mais également pour sécuriser les ponts et éviter que les eaux se détournent (**AM Nevers, CC/52, fol. 24v**), les plus grandes îles étaient conservées, soit volontairement pour leurs multiples utilités (**Lewis et Gautier, 2004**), soit par incapacité à les supprimer.

Si ces différents exemples démontrent l'implication de l'aménagement de la plaine dans la diminution des largeurs des bandes actives ou encore les conséquences des évolutions de l'exploitation du milieu sur l'évolution des îles, le nombre d'aménagements relevés reste fort probablement sous-estimé.

#### **4.3. Une présence des aménagements qui reste sous-estimée**

Une partie des aménagements ayant participé à contraindre la Loire ne peut être recensée à l'aide des méthodologies mises en place dans le cadre de cette thèse. En effet, les protections de berge sont rarement représentées sur les documents cartographiques, rarement présentes également dans les documents, notamment parce qu'une partie de celles-ci sont réalisées par les populations riveraines elles-mêmes. Les procès-verbaux recensant les dégâts de la crue de novembre 1790 font par exemple état à Avril-sur-Loire de plusieurs empièvements, emportés par la crue, réalisés par les habitants de la paroisse eux-mêmes sans précision quant à leur localisation (**AN, F/14/1203, document du 27 mars 1791**). Ce peut être aussi le cas de petites digues ou levées, disparues depuis. En 1644, une permission est par exemple accordée par la communauté de Nevers à un particulier pour réaliser une petite levée pour préserver ses terres du faubourg de Nièvre des inondations (**AM Nevers, BB/23, fol 400r**).

S'il ne permet pas de repérer les protections de berge, le MNT Lidar a tout de même permis d'identifier d'autres aménagements réalisés par les populations riveraines. La paroisse de Laménay-sur-Loire a par exemple vu plusieurs digues d'ampleur réalisées par les particuliers. Au niveau de la Motte-aux-Oies, la Comtesse de Marquerie avant 1747, puis la Marquise de la Croix durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s. firent construire à leurs frais une levée pour empêcher la Loire de se déporter en rive gauche afin de préserver leurs propriétés (**AN, F/14/1203, dossier « Mad. La Marquise de La Croix et autres propriétaires [...] »**). Ces aménagements furent entrepris par ces particuliers probablement face au refus des Ponts et Chaussées de réaliser une levée en rive gauche et des conséquences de la construction de la levée de Charrin – Saint-Hilaire en rive droite au milieu du XVIII<sup>e</sup> s. déportant les eaux en rive gauche et érodant les propriétés de Gannay-sur-Loire, Laménay-sur-Loire et Cossaye (**AN, F/14/1203, document du 26 mai 1790**). La première digue construite par la Comtesse de Marquerie a totalement été érodée et le peu d'information contenu dans les documents d'archives empêche de la localiser, même approximativement. La levée de la Marquise de la Croix est en revanche toujours visible sur le MNT Lidar. Comme nous avons pu le vérifier sur le terrain, la levée est aujourd'hui percée en deux points et fut autrefois probablement bien plus étendue, érodée de la fin du XVIII<sup>e</sup> s. à aujourd'hui. Elle est également accompagnée de protections de berges et ceux maintenant encore la berge aujourd'hui ont probablement été réalisés suite à la crue de 1790 (**AN, F/14/1203, document du 1<sup>er</sup> février 1790**) (**Figure 9.15**).

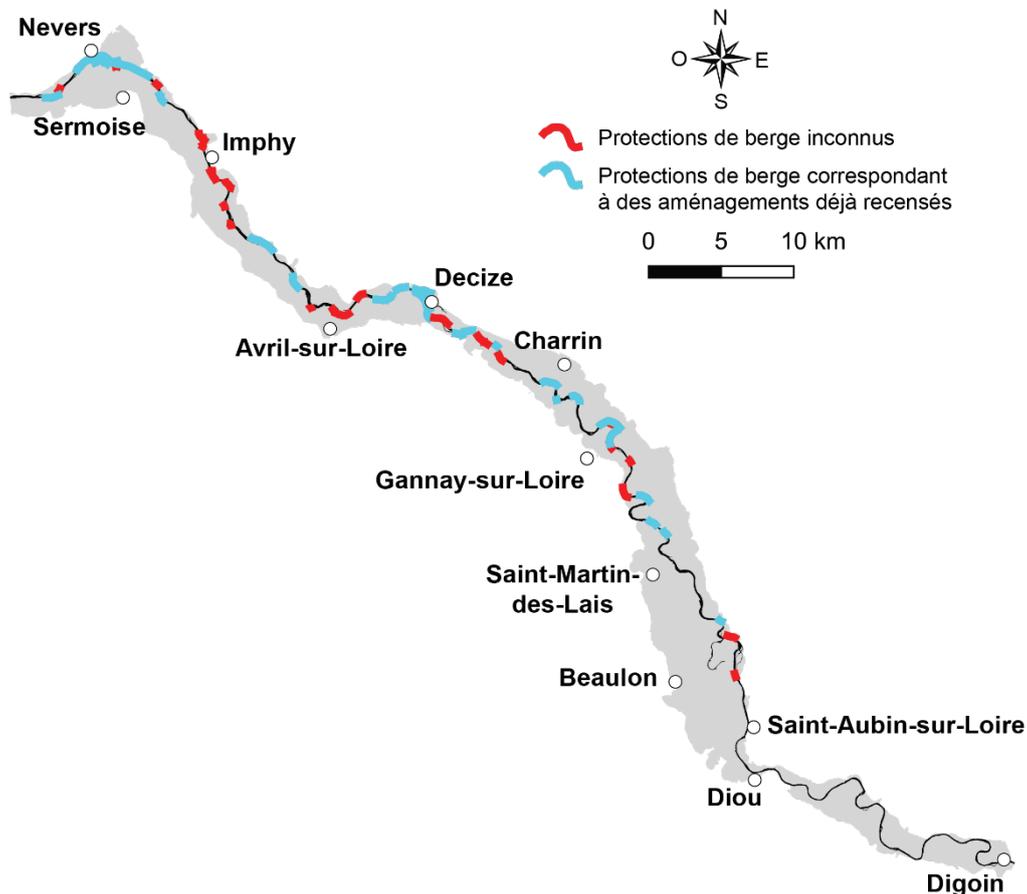


**Figure 9.15.** Aménagements de la Motte-aux-Oies (commune de Gannay-sur-Loire).

Ainsi, la présence des aménagements dans le lit de la Loire ne peut être que sous-estimée, que ces derniers aient été réalisés par des particuliers ou par les corps d'ingénieurs. Or, la contrainte exercée par les protections de berge est déterminante, que ce soit sur les rivières de faible (Dépret, 2014 ; Dépret et al., 2017), ou de plus forte énergie (Surian, 2022). Un lourd travail de terrain serait nécessaire pour recenser tous les aménagements qui ne seraient pas visibles sur les cartes anciennes, photographies aériennes et MNT Lidar. Le Conservatoire d'Espace Naturel de Bourgogne entreprit un travail de ce type en recensant en canoë toutes les protections de berge visible depuis la Loire (Figure 9.16). Si une partie de ces « protections de berge » correspondent bien à des ouvrages recensés depuis le XVIII<sup>e</sup> s., d'autres n'étaient pas connus. De plus, ils ont été recensés, car visibles depuis le lit mineur. Or, une partie non quantifiable reste très peu, voire invisible : les protections de berge de la Motte-aux-Oies (Figure 9.15) n'ont par exemple pas été recensées par le CEN Bourgogne.

Ainsi, le relevé des aménagements à partir du matériel employé dans le cadre de cette thèse sans prospection terrestre sur l'ensemble de la zone d'étude sous-estime fatalement le nombre et l'étendue de ces aménagements. Il est possible que certains sous-secteurs, notamment au sein du secteur 1 et à l'amont du secteur 2, aient été contraints par des aménagements dont nous n'avons pas encore la trace. Bien que ce relevé soit sous-estimé dans le cadre de cette thèse, il n'en demeure pas moins que les aménagements eurent bien de lourdes conséquences sur la dynamique fluviale de la Loire et sur sa géométrie. En bloquant l'accès du cours d'eau à sa plaine et en limitant sa capacité érosive, les aménagements entravent sa recharge sédimentaire. En réponse, le cours d'eau incise : s'il ne peut

compenser son déficit sédimentaire par érosion latérale, il le fait par érosion de son plancher (**Bravard, 1994**). **Kondolf (1997)** résume sous le terme d'*Hungry water* ce phénomène de déficit sédimentaire provoqué par les activités humaines. Il définit comme principaux responsables de l'interruption de la continuité du transport sédimentaire les aménagements, notamment transversaux, mais également les prélèvements massifs de granulats et nous allons voir que la Loire ne déroge pas à la règle.



**Figure 9.16.** Localisation des protections de berge relevées par le CEN Bourgogne.

## 5. Les extractions de granulats

L'incision du lit de la Loire, et le déficit sédimentaire général sont rapidement imputés dès les années 1990 aux prélèvements massifs de granulats (**Dambre et Malaval, 1993 ; Gasowski, 1994 ; Dambre, 1996**). Puis, les études suivantes confirment leur implication sur l'évolution verticale du plancher alluvial (**Gautier et al., 2001 ; Gautier et al., 2007 ; Grivel, 2008**). Les prélèvements furent majoritairement effectués dans le bassin de la Loire à la sortie de la Seconde Guerre Mondiale aux années 1980 (**Gautier et al., 2007**). **Dambre et Malaval (1993)** estime les prélèvements à 220 millions de tonnes sur cette période entre le Bec d'Allier et Nantes. Rien qu'en région Centre, les prélèvements de granulats passent de 0,5 million de tonnes par an en 1960 à 6,4 millions en 1979 (**Gasowski, 1994**). L'incision du lit de la Loire provoquée par les extractions est directement mise en cause dans l'effondrement du pont Wilson à Tours en 1978 faisant aussi suite à l'affaissement de celui de Saumur

en 1968. S'en suivent des réactions de la part des pouvoirs publics. En 1993, la Loi du 4 janvier interdit l'extraction en lit mineur et met en place un encadrement des carrières. Depuis les années 1990, les carrières sont toujours présentes dans le lit majeur, notamment sur la zone d'étude, mais le volume reste en deçà de ce qu'il était auparavant. Aujourd'hui, les effets des extractions massives de granulats sur les systèmes fluviaux sont considérés par plusieurs études comme irréversibles face à l'ampleur du déficit sédimentaire (Bravard, 1994 ; Calle et al., 2017), mais les prémices de cette exploitation restent mal connues.

Les prélèvements effectués dans le lit de la Loire ont démarré bien avant la Seconde Guerre Mondiale ou même le XX<sup>e</sup> s. où leur exploitation devient industrielle. Comme nous l'avons vu dans le **septième chapitre**, les communautés de Nevers et Decize modifièrent directement l'écoulement dans le lit mineur, notamment par la destruction d'îles et le prélèvement de sédiments. Ils prélevèrent aussi quantité de sables pour deux autres tâches principales : la formation de mortier pour toutes les constructions nécessaires et le pavement de la cité (cf. **chapitre 2**). Le sable est directement prélevé dans le lit, sur le rivage (AM Nevers, CC/13, fol. 40v), ou sur les grèves de Loire (AM Nevers, CC/14, fol. 17r) (Foucher, 2020). En 1507, alors que les ouvriers semblent prélever du sable de préférence dans la Loire, ils doivent prendre les bateaux pour aller en récupérer plus loin sans que l'on connaisse la destination (AM Nevers, CC/82, fol. 42r). Les quantités de sables prélevées dans le lit de la Loire sont très importantes à Nevers où le mortier sert à la réparation des ponts de pierres, de la muraille et des battis. De plus, le sable sert à paver les rues, ainsi qu'à les laver. En 1701, on sable de nombreuses rues de Nevers avant le passage du roi d'Angleterre (AM Nevers, CC/305). Bien que nous n'ayons pu le faire faute de temps, il serait intéressant de tenter d'estimer à l'échelle annuelle les quantités prélevées par la communauté de Nevers dans le lit de la Loire grâce à la comptabilité communale.

Ainsi, bien que de nouvelles études soient nécessaires pour mieux renseigner les origines des extractions de granulats et les conséquences de ces extractions précoces sur la géométrie du lit de la Loire, il reste certain que celles-ci accentuèrent le déficit sédimentaire déjà provoqué par l'aménagement du lit.

## **6. La part du facteur hydrologique face au facteur anthropique**

Le dernier facteur à prendre en compte est l'activité hydrologique de la Loire. Les quatre dates auxquelles correspondent les quatre bandes actives recouvrent des contextes d'activité hydrologique différents. Les bandes actives de 1755 et 1848 correspondent encore à une activité ligérienne fortement marquée par la période du PAG. Premièrement, les apports solides étaient fort probablement bien plus importants qu'ils ne le sont aujourd'hui. Deuxièmement, l'activité hydrologique était bien plus dynamique comme nous avons pu le voir dans le **cinquième chapitre**. Cette activité hydrologique intense se poursuit jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> s.

Les bandes actives de 1953 et 2023 ont évolué dans un contexte hydrologique beaucoup plus calme. Les résultats du **cinquième chapitre** ont permis de démontrer que l'activité hydrologique ligérienne est caractérisée par un régime beaucoup plus calme à partir des années 1950 avec une forte diminution des crues de fréquence de retour supérieur à 5 ans. Depuis 1950, la Loire n'a connu qu'une seule période de forte activité hydrologique d'une dizaine d'années seulement entre 1977 et 1987 (cf. **chapitre 5**). Qui plus est, si l'on prend en considération seulement les événements de crue de fréquence de retour de à 5 et 20 ans, la période actuelle (1990 – 2023) correspond à la période hydrologique calme la plus longue que la Loire ait connue depuis le XIV<sup>e</sup> s. La raréfaction de cette catégorie de crue peut jouer en faveur de la faible mobilité de la Loire comparée à celle qu'elle put avoir aux XVIII<sup>e</sup> s. et XIX<sup>e</sup> s. La période de calme a également pu jouer en faveur de la rétractation générale de la bande active. Aucune ressource documentaire ne peut nous permettre de le vérifier, mais on peut imaginer qu'en l'absence de cet événement de 1846 d'un taux de retour supérieur à 100 ans, les largeurs mesurées en 1848 auraient pu être moins importantes.

Néanmoins, alors que les bandes actives de 1755 et 1848 s'inscrivent dans des périodes d'activité hydrologique intense, en particulier pour celle de 1848, on observe tout de même des rétractations significatives des bandes actives entre 1755 et 1848. De plus, la bande active de 1953 se place également à la fin d'une période de forte activité hydrologique s'étendant de 1890 aux années 1950 avec de nombreux événements de crue de taux de retour supérieur à 5 et 20 ans. Encore une fois, la rétractation se fait plus significative et plus générale que pour la période précédente. Ainsi, les baisses continues des largeurs des bandes actives successives dépendraient majoritairement des effets directs de l'aménagement et de l'incision du plancher alluvial plutôt que de l'activité hydrologique. Ce poids supérieur des facteurs anthropiques (et de ses conséquences) sur les facteurs naturels dans le cadre de l'évolution des dynamiques fluviales ligériennes fut déjà souligné à l'amont de la zone d'étude par **Steinmann (2015)** et à l'aval par **Carcaud (2004)**. Cette présente étude permet de le confirmer pour la zone d'étude.

Le facteur hydrologique continue tout de même de jouer son rôle. Il est par exemple possible que les périodes de faible activité hydrologique, comme l'actuelle, puissent amplifier les effets des facteurs anthropiques et de leurs conséquences. De plus, le changement de saisonnalité des crues de la Loire au cours des deux derniers siècles a également pu jouer un certain rôle. Nous avons en effet observé dans le **cinquième chapitre** une diminution des crues d'été à partir de la fin du PAG. Or, c'est durant l'été que les bancs se végétalisent et le passage plus important de crue durant cette période limiterait plus la formation d'îlots au cours du PAG que suite à cette période.

## Conclusion du chapitre

Si de précédentes études avaient permis de mieux comprendre l'évolution planimétrique de la Loire, notamment dans son cours moyen, depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> s., cette étude a permis d'allonger temporellement cette analyse avec l'étude des cartes géoréférencées de 1755, et de mettre en évidence des dynamiques d'évolution du cours de la Loire sur la zone d'étude différentes des cours situés à l'amont et à l'aval.

Les cartes, photographies et images de 1755, 1848, 1953 et 2023 permettent d'observer une diminution générale et continue de la largeur des bandes actives de la Loire, la largeur médiane passant de 416 m en 1755 à 136 m en 2023 à un rythme de 1,1 m/an. Cette diminution générale est cohérente avec les études précédentes l'ayant déjà détectée entre le milieu du XX<sup>e</sup> s. et le XXI<sup>e</sup> s. à l'amont et à l'aval de la zone d'étude. Cette présente étude permet néanmoins de démontrer que la bande active de la Loire s'est rétractée dès la période 1755 – 1848, donc durant la période du PAG. La surface des îles n'a également cessé de décroître entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> et aujourd'hui, tandis que le nombre a tout d'abord observé une tendance à la hausse entre 1755 et 1953, puis à la baisse depuis 1953. Ces tendances générales masquent tout de même des dynamiques d'évolutions différentes sur trois secteurs. Le premier, de Digoin à Bourbon-Lancy, se caractérise par une faible mobilité et des diminutions de bandes actives les plus faibles de la zone d'étude. À l'inverse, les rétractations les plus élevées de la bande active ont été mesurées sur le secteur 2, de Bourbon-Lancy à Imphy, avec des sous-secteurs observant des diminutions de la bande active de plus de 800 m entre 1755 et 2023. Enfin, le secteur 3 par des largeurs de bande active plutôt moyenne et faible dès 1755 et un nombre d'îles assez faible avant 1953.

Si ces trois secteurs possèdent des caractéristiques géomorphologiques différentes influençant le cours de la Loire, notamment sur le secteur 1, ce sont les activités humaines qui contraignent le plus le développement des îles et les évolutions en plan et verticales du lit de la Loire, comme nous avons en partie déjà pu le voir dans le **septième chapitre**. Comme nous l'avons vu plus particulièrement sur certains sous-secteurs tels que ceux de Diou, Thareau, Uxeloup ou encore Imphy, l'objectif des sociétés riveraines et des corps d'ingénieurs fut de simplifier le linéaire du cours de la Loire par la suppression des bras secondaires en provoquant leur ensablement à l'aide d'aménagements permettant également de limiter la mobilité latérale, l'érosion des terres, et de sécuriser ce cours par la suppression des îles.

Ces aménagements sont largement responsables de la contraction du lit de la Loire, mais également de l'incision de son plancher alluvial, accentuée par les extractions de granulats dont l'activité s'industrialisa à partir au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. Les résultats préliminaires de **Gautier et al. (in prep)** reposant sur la digitalisation des bandes actives de la zone d'étude permettent de démontrer une incision du plancher alluvial dès le XVIII<sup>e</sup> s. Cette incision du plancher joua également en faveur

de l'évolution hydrogéomorphologique de la Loire. Comme nous l'avons vu dans le **sixième chapitre**, l'incision est probablement responsable d'une forte baisse de la sédimentation de la plaine. De plus, comme **Grivel (2008)** l'a déjà démontré à l'aval de la zone d'étude, cette incision amplifia l'effet des aménagements eux-mêmes en jouant en faveur d'une stabilisation du cours de la Loire, limitant la capacité érosive du cours d'eau. Cette incision, associée à la fin de l'entretien du lit de la Loire, permit également aux îles de se développer au cours du XX<sup>e</sup> s.

Ainsi, si l'aménagement de la zone d'étude fut moins lourd et plus tardif (pour les levées) qu'en Loire moyenne et aval, il contraint durablement la mobilité du lit de la Loire et son style fluvial, dépassant l'implication des facteurs naturels notamment de l'activité hydrologique comme ce put être déjà évoqué par **Carcaud (2004)** et **Steinmann (2015)**, amenant à une contraction et une incision du cours de la Loire au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> s. pour atteindre le style fluvial qu'on lui connaît aujourd'hui : un cours d'eau méandrique à chenal unique. Ce processus s'inscrit dans la responsabilité généralisée des sociétés humaines sur les changements géométriques des rivières à l'échelle européenne au cours du XX<sup>e</sup> s. (**Arnaud-Fassetta, 2003 ; Brown et al., 2018 ; Dufour et Lespez, 2024**), notamment de leur contraction et leur incision.

Cette présente étude pourrait être améliorée sur plusieurs points afin d'appuyer les affirmations ou d'en faire de nouvelles. Il serait premièrement intéressant de réaliser cette étude à une échelle temporelle plus fine, notamment décennale, comme ce put être fait sur la Loire (**Gautier et al., 2002 ; Grivel, 2008 ; Nabet, 2013**), sur le Cher (**Dépret, 2014**) ou encore l'Allier (**Arfeuillère et al., 2022**). Ceci pourrait permettre de mieux prendre en compte la part des événements de crue dans les différentes dynamiques d'évolution géométriques du lit de la Loire et de ses îles.

Deuxièmement, comme nous l'avons démontré, le nombre d'aménagements recensé est sous-estimé dans le cadre de cette étude en raison de l'absence de prospections pédestres et de l'impossibilité de repérer les protections de berges à l'aide des cartes anciennes, photographies aériennes et satellitaires ou encore du MNT Lidar. Un relevé plus précis des aménagements, et notamment des protections de berge, pourrait permettre une meilleure mise en relation entre leur localisation et les diminutions de largeurs de bande active, comme ce put être déjà réalisé sur des études précédentes (e.g. **Dépret, 2014 ; Arfeuillère et al., 2022**). Les seuils et petits barrages n'ont pas non plus été relevés. Or, comme le souligne **Larue (2004)**, ceux-ci ont une grande part de responsabilité sur l'incision du plancher alluvial ligérien.

Troisièmement, un des facteurs jouant sur l'évolution planimétrique des cours d'eau est la végétation (**Corenblit et Steiger, 2009**), non prise en compte dans cette étude. À l'aval de la zone d'étude, **Grivel (2008)** a déjà démontré son rôle dans le développement accéléré des îles à partir du XX<sup>e</sup> s. Il est également possible que le développement de la végétation contemporaine de l'arrêt de la

navigation, les chenaux n'étant plus « nettoyés », ait joué dans le développement des microîlots et îlots sur la zone d'étude exposé en 1953.

Enfin, l'incision du plancher alluvial a été renseignée par **Gautier et al. (in prep)** sur moins 50 % du linéaire de la zone d'étude. La mise en disponibilité prochaine du MNT Lidar de haute précision de l'IGN couvrant le reste de la zone d'étude permettra d'étendre cette étude.

## Conclusion générale

Deux objectifs principaux furent énoncés en introduction de cette thèse. Le premier était de renseigner l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire par l'analyse comparée des archives documentaires et sédimentaires. Le second était de renseigner les manières dont les sociétés riveraines de la Loire répondirent aux contraintes ligériennes que sont les crues et les divagations au cours des derniers siècles.

### ❖ **Premier objectif : reconstitution de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire**

Un recensement exhaustif et inédit des crues de la Loire depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s. présenté dans le **cinquième chapitre** a été réalisé grâce à l'étude des sources documentaires. La richesse des comptes communaux de Nevers et Decize a permis de relever de nombreux événements de crue encore inconnus sur la Loire au cours des XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s., périodes encore extrêmement peu documentées dans le reste de la France. Complétées par une plus grande diversité de documents au cours des périodes Moderne et Contemporaine, les sources documentaires ont permis le recensement total de 313 événements de crue entre 1380 et 1845. 468 événements de plus ont été recensés entre 1846 et 2023 grâce aux relevés hydrographiques à la station de Nevers. À partir de ces événements et de l'application de deux indices (**Pichard et al., 2017 ; Blöschl et al., 2020**), dix périodes de forte activité hydrologique (1385 – 1410, 1430 – 1440, 1455 – 1500, 1515 – 1550, 1705 – 1715, 1735 – 1750, 1770 – 1800, 1820 – 1870, 1890 – 1950, 1978 – 1988) et huit périodes de faible activité hydrologique (1420 – 1430, 1500 – 1515, 1715 – 1735, 1750 – 1770, 1800 – 1820, 1870 – 1890, 1950 – 1978, 1988 – 2023) ont été déterminées sur la zone d'étude. Si la plus grande partie coïncide avec celles détectées ailleurs en France et en Europe, les plus anciennes du XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. n'ont pu être comparées à l'activité d'autres cours d'eau en raison du manque d'étude. Les périodes de 1560 – 1570, 1610 – 1640 et 1655 – 1655 montrent une forte activité hydrologique, mais nous manquons encore de données pour en être certains, les documents se faisant plus rares entre la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> et la fin du XVII<sup>e</sup> s. Cette étude souligne également une grande variabilité saisonnière des crues de la Loire du XIV<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> s., malgré une surreprésentation probable dans les comptabilités médiévales des crues d'été au cours du PAG. Cette variabilité s'est atténuée au cours du XX<sup>e</sup> s. et a laissé place à une concentration des épisodes de crues autour de la période hivernale. La variabilité historique de l'activité hydrologique de la Loire semble s'expliquer par de multiples facteurs climatiques, plaçant la Loire au carrefour de nombreuses influences. Toutefois, il reste encore très difficile de démêler la part de chacun des facteurs et des études supplémentaires sont nécessaires, notamment en collaboration avec des climatologues.

Pour répondre au premier questionnement émis en introduction, il est difficile d'affirmer que la Loire ait été plus active hydrologiquement parlant durant le Petit Âge Glaciaire (PAG) que durant les siècles entourant cette période. L'exploitation des données historiques disponibles à partir du début de

la période du PAG ne permit pas d'étudier l'activité hydrologique ligérienne antérieure, limite à laquelle dû répondre le **sixième chapitre**. De plus, à la sortie du PAG, la période de 1890 à 1950 se caractérise par une activité hydrologique encore soutenue avec de nombreux événements de taux de retour supérieur à 5 (crue C3) et 20 ans (crue C4). C'est véritablement à partir de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. que la Loire adopte un régime de crues bien plus modéré. Depuis les années 1990, la Loire se singularise à l'échelle de l'Europe de l'Ouest par l'occurrence d'une période de « calme hydrologique », la plus longue des huit derniers siècles si l'on tient compte des épisodes de taux de retour supérieurs à 5 et 20 ans. Il est encore difficile d'expliquer cette période de calme, peut-être le fruit de plusieurs facteurs, notamment lié à l'aménagement du lit, le rôle des barrages et à la position d'interface du bassin amont. De nouvelles études sur l'activité hydrologique de la Loire à l'amont de la zone d'étude pourraient nous permettre de trancher.

L'étude stratigraphique des remblaiements des paléochenaux de la Loire devait permettre dans le **sixième chapitre** de renseigner l'activité hydrogéomorphologique de la Loire sur le dernier millénaire. Parmi les nombreux paléochenaux présents dans la plaine, trois dont les remblaiements décrivent trois évolutions historiques distinctes furent sélectionnés. D'une façon générale, les dépôts associés aux crues sont très peu épais. Le paléochenal OIE témoigne d'une forte mobilité de la Loire, ce qui limite l'étude des crues passées. L'enregistrement du paléochenal LEV commença quant à lui au début du PAG suite à une défluviation rapide et permit de détecter un nombre important de traces de passages de crues. Mais le manque de datations limite leur identification. Enfin, l'enregistrement du paléochenal UXE s'est avéré le plus riche car il permit l'identification de plusieurs phases d'activité hydro-sédimentaire. Cet historique, qui ne repose toutefois que sur l'analyse d'une seule carotte, s'est révélé assez similaire dans les grandes temporalités aux autres secteurs ligériens, ainsi qu'à celui des autres études françaises et européennes. La période du haut Moyen Âge du VIII<sup>e</sup> au X<sup>e</sup> s. correspond à une période d'activité hydro-sédimentaire intense, tandis que celle de l'Optimum Climatique Médiéval (OCM) du X<sup>e</sup> au début du XIV<sup>e</sup> s. voit l'activité de la Loire s'atténuer. C'est à la charnière des XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s., soit au début de la période du PAG, que l'activité ligérienne semble s'intensifier de nouveau. Cet enregistrement permit donc bien d'étendre l'étude de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au-delà du XIV<sup>e</sup> s. et même légèrement au-delà du dernier millénaire. Au-delà de ces informations, le nombre d'événements relevés au sein des remblaiements des paléochenaux demeure nettement inférieur au nombre de crues relevées à partir des archives documentaires. Celui-ci est même inférieur, pour les siècles correspondants, au nombre de crues exceptionnelles (C4). Il est donc fort probable que seuls les événements de crues les plus intenses laissèrent une trace au sein des paléochenaux au cours du dernier millénaire.

Les tentatives d'explication du faible enregistrement sédimentaire général des crues de la Loire résultèrent en plusieurs enseignements relatifs aux conditions générales de la construction et de la destruction de la plaine alluviale ligérienne au cours des deux derniers millénaires. Le faible

enregistrement des crues dans la plaine est multifactoriel et s'explique tout d'abord par la mobilité du fleuve, contrôlant la distance des paléochenaux aux bandes actives successives, comme l'exprime l'enregistrement du paléochenal d'OIE. Or, c'est cette distance au chenal actif qui semble être le facteur de contrôle le plus important du nombre de crues enregistrées dans chacun des paléochenaux, LEV étant le plus proche des chenaux actifs successifs, et OIE le plus éloigné. Le volume de dépôt lors des crues semble en effet décroître latéralement très rapidement au-delà du lit mineur, comme ce qui avait pu être partiellement montré par **Grivel (2008)** lors de la crue de 2003. Ceci s'explique par un faible transport de sédiments fins limoneux et argileux, révélé par les mesures de MES, particules qui sont le plus souvent transportées par suspension et donc déposées au sein de la plaine. La Loire ne transporte majoritairement que des sables, principalement roulés, en saltation et quelquefois en suspension. Cette configuration n'est néanmoins peut-être pas celle des siècles précédents. En effet, un point important dans l'évolution de la construction de la plaine a également été souligné par la comparaison de l'image CM actuelle avec l'image CM des remblaiements des trois paléochenaux étudiés. L'analyse comparée témoigne d'une quasi-disparition des dépôts limono-argileux en plaine proximale et distale (où ils étaient déjà rares), au cours de la période d'étude. Cette évolution est probablement une conséquence de l'incision du plancher alluvial sans doute provoquée par l'aménagement du fleuve. Ainsi, au cours des deux derniers millénaires la formation de la plaine alluviale ligérienne reposait déjà essentiellement sur les transferts de sédiments au sein de la bande active elle-même et caractérisés par une mobilité importante. Malgré la prépondérance du transport sableux, les débordements fournissaient tout de même de la matière fine sur quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres pour les événements les plus intenses au-delà du lit mineur. Aujourd'hui, les dépôts hors de la bande active se sont bien plus raréfiés. La rareté des dépôts fins se rend compte par un nombre très important de paléochenaux qui se dessine dans le paysage actuel, notamment dans la moitié amont de la zone d'étude. Leur présence et leurs contours affirmés sont assurés par une absence de comblement expliqué par la rareté de ces dépôts fins.

Ainsi, l'étude des archives sédimentaires souligne que le début du PAG correspond à une intensification de l'activité hydro-sédimentaire sur la zone d'étude. De nouvelles études seraient nécessaires pour mieux renseigner la mobilité du fleuve au cours de la première moitié du PAG, la seconde moitié étant assurée par l'étude des cartes anciennes. L'étude des archives documentaires précise que l'activité hydrologique de la Loire au cours du PAG n'a pas été homogène et a vu une succession de périodes de forte et de faible activité hydrologique. Néanmoins, si la fin du PAG correspond à la disparition des très grandes crues sur la Loire dont les dernières représentantes furent celles de 1846, 1856 et 1866, elle ne signe pas pour autant la fin des périodes de forte activité hydrologique. Ce n'est véritablement qu'à partir du milieu du XX<sup>e</sup> s. que la Loire adopte un régime de crues plus modéré.

❖ **Second objectif : renseigner les réponses des sociétés aux contraintes ligériennes depuis l'époque médiévale.**

Premièrement, le **septième chapitre** fut l'occasion d'étudier la ou les manières dont les communautés urbaines de Nevers et Decize riveraines de la Loire, ont composé avec le fleuve et son activité depuis la fin du XIV<sup>e</sup> s. Une nouvelle fois, les réponses à cet objectif reposent sur la richesse des comptes communaux respectifs des deux cités, ainsi que sur les fonds documentaires des corps d'ingénieurs des Turcies et Levées puis des Ponts et Chaussées. Ces documents témoignent de réponses actives aux contraintes des crues et des divagations de la Loire tout au long de la période d'étude. Les ponts, points nodaux de la vulnérabilité économique des deux cités, sont activement protégés, réparés et reconstruits avant et suite aux passages des crues. Un document d'exception, le manuscrit MS/034 (XIV<sup>e</sup> – XVIII<sup>e</sup> s.) de la Médiathèque de Nevers, témoigne même d'une certaine mémoire des crues les plus intenses, assurée depuis au moins la fin du XV<sup>e</sup> s. Mais finalement les crues ne constituent pas le problème principal, elles garantissent même en quelque sorte la richesse de la ville puisqu'elles assurent la navigation du fleuve. En revanche, ce sont les migrations du fleuve que les communautés de Nevers et Decize voulurent stopper à tout prix, les faisant dépenser les sommes les plus importantes, notamment afin d'assurer les ponts et les installations portuaires. Pour ce faire, les deux cités investissent dans la construction de nombreux battis dès le XIV<sup>e</sup> s. afin de limiter l'action érosive de la Loire et surtout l'ouverture de nouveaux lits qui obligerait à la construction de nouveaux ponts. Cet aménagement coûteux et de grande ampleur dès les XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> s. répond également aux besoins de la navigation, pierre angulaire de l'enrichissement des cités riveraines de la Loire.

Toutefois, les trajectoires d'aménagement des trois sites d'études diffèrent. À Nevers, le lit est progressivement aménagé du Moyen Âge à nos jours. La communauté et ses finances étaient réellement organisées afin de faire face aux contraintes de la Loire. À Decize et Digoin, c'est véritablement à partir des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> s. que l'aménagement s'accélère. Cet aménagement plus tardif à Digoin s'explique par une vulnérabilité moins importante avec une absence de pont et probablement de bâti dans le lit majeur. À Decize cependant, la vulnérabilité de la communauté aux crues de la Loire fut très élevée, la cité étant située sur une île insubmersible, la communauté se devait d'assurer deux ponts. Elle ne disposait cependant pas des mêmes finances et semble avoir eu de lourdes difficultés à faire face aux multiples vulnérabilités qui parfois se sont cumulées : destructions des crues, épidémies et guerres.

Finalement, les sociétés urbaines répondirent-elles d'une quelconque manière à l'activité hydrogéomorphologique du PAG ? Il est difficile de l'affirmer. Les différentes campagnes d'aménagement de Nevers ne semblent pas répondre à des périodes hydrologiques particulières. Certains événements en revanche marquèrent ces sociétés et pour certains, notamment ceux de 1789 et 1790, amenèrent à une révision de l'aménagement des cités. Mais nous manquons encore de ressources documentaires et de données pour voir si ce fut également le cas pour des événements antérieurs. Une

approche géoarchéologique serait nécessaire pour étudier les aménagements des cités antérieurs au XIV<sup>e</sup> s. et observer un changement ou non dans la trajectoire d'aménagement des cités. Ce qui est en revanche certain c'est que l'objectif principal de ces sociétés urbaines riveraines fut de faire plier la Loire (et surtout ses migrations) à leurs besoins. Ce dessein, mené non sans difficulté, est pleinement accompli à partir du milieu du XIX<sup>e</sup> s.

Ces comptabilités urbaines ne reflètent cependant pas la réalité de toutes les sociétés riveraines de la Loire, la grande majorité de la population vivant hors des villes jusqu'au XX<sup>e</sup> s. En conséquence, le but du **huitième chapitre** était de rendre compte de la manière dont les sociétés cette fois-ci rurales ont composé avec la Loire et son activité. L'étude du MNT Lidar permet de rendre compte d'un habitat largement présent dans le lit majeur de la Loire dès la période médiévale. L'étude diachronique du corpus cartographique ancien et du MNT rend compte de différentes modalités d'adaptations aux divagations de la Loire. Cependant, contrairement à la Loire moyenne, celles-ci semblent principalement individuelles. En l'absence de levée, les populations s'organisent par habitat dispersé en s'établissant sur des formes sédimentaires surélevées, ou sur tertre, quelques fois associées à des digues. En réponse aux divagations de la Loire, certains cas témoignent de déplacements de l'habitat, mais c'est principalement le recours aux aménagements ponctuels par les riverains et la réalisation d'ouvrages lourds par les ingénieurs qui doit répondre à limiter l'érosion et la mobilité de la Loire. Ces aménagements eurent néanmoins des conséquences probablement irréversibles sur le système fluvial ligérien.

En effet, l'étude de l'évolution planimétrique de la Loire à partir des cartes, photographies et images de 1755, 1848, 1953 et 2023 présentée dans le **neuvième chapitre** témoigne d'évolutions significatives. Celles-ci sont en grande partie provoquées directement ou indirectement par les aménagements et leurs conséquences. L'étude diachronique permet de tout d'abord mettre en avant une diminution continue des largeurs de la bande active de la Loire de 1755 à 2023 à un rythme de 1,1 m/an. Certains secteurs observèrent des diminutions de plus de 800 m en moins de 100 ans. En cause, l'aménagement du lit de la Loire par les sociétés. L'étude plus précise de certains secteurs tels que ceux de Charrin, Uxeloup ou Imphy témoignent, à l'image de ceux de Nevers et Decize vu dans le cadre du **septième chapitre**, d'une volonté claire de réduire la mobilité de la Loire, le nombre de chenaux et la capacité érosive du cours d'eau, principalement pour servir les intérêts de la navigation ligérienne.

Si cette dynamique de diminution des largeurs de la bande active est cohérente avec les études ligériennes antérieures réalisées du milieu du XIX<sup>e</sup> à nos jours, les résultats de ce présent travail permettent de démontrer que cette tendance s'est amorcée avant même la fin de la période du PAG, entre le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. et le milieu du XIX<sup>e</sup> s. Par la suite, les bandes actives de 1848 et 1953 observent des diminutions très importantes de leurs largeurs, malgré le fait qu'elles aient été précédées par des périodes de forte activité hydrologique. Ces dynamiques de diminution soulignent la

prépondérance du facteur anthropique sur l'évolution en plan de la Loire face au facteur climatique. Bien que l'aménagement de la zone d'étude fut moins lourd et plus tardif (pour les levées) qu'en Loire moyenne et aval, celui-ci est le principal responsable de la rétractation continue et générale de la bande active jusqu'au cours du XX<sup>e</sup> s., se distinguant des autres secteurs ligériens. L'évolution du nombre et de la surface des îles semble également liée aux activités anthropiques. Peu présentes, mais étendues au milieu du XVIII<sup>e</sup> s., les îles voient leur nombre augmenter jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> s. s'expliquant principalement par la fin de l'entretien du lit de la Loire suite à l'abandon de la navigation et au déclin du pastoralisme. Enfin, l'aménagement de la Loire, accompagné par les extractions de granulats, est également responsable de l'incision significative (3,74 m en moyenne) du plancher alluvial de la Loire entre Decize et le Bec d'Allier. Aucune autre étude n'avait encore mis en avant la précocité de cette incision, mesurée dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s.

Ainsi, la Loire apparaît comme un système fluvial fortement anthropisé dès l'époque médiévale. Malgré l'absence de levée sur la zone d'étude avant le XVIII<sup>e</sup> s., les sociétés riveraines influent très fortement sur leur environnement fluvial dès l'époque médiévale par de multiples modalités. L'aménagement du lit de la Loire ne semble cependant pas répondre à l'intensification de l'activité hydrogéomorphologique ligérienne du Petit Âge Glaciaire, mais plutôt à des motivations économiques, notamment afin d'assurer le commerce fluvial. Le paysage fluvial ligérien actuel est sculpté par les conséquences directes de l'anthropisation plurimillénaire du fleuve, nettement accentuées au cours des derniers siècles. Finalement, comme nous l'avons partiellement observé dans l'objectif précédent, l'aménagement du lit de la Loire limite et limite encore très fortement les connectivités sédimentaires longitudinales et latérales, entraînant également des modifications horizontales et verticales du lit de la Loire, probablement irréversibles.

Si les apports scientifiques de ce présent travail de thèse sont nombreux, ils laissent également de nombreux questionnements en suspens. Certains justifient différentes perspectives de recherches futures.

# Perspectives de recherche

## ❖ L'apport des archives comptables : une exploration géohistorique à poursuivre

Nous avons vu l'importance des apports des ressources comptables pour l'étude des crues passées de la Loire, de sa mobilité et des manières dont les sociétés riveraines urbaines composèrent avec. Si celles-ci comportent quelques limites, notamment d'invisibiliser les inondations des petits comme des événements les plus extrêmes, elles ont l'avantage principal de constituer des ressources quasi continues dans le temps, sans quoi l'étude de l'évolution de l'activité hydrologique de la Loire n'aurait pas été possible. Ces comptes sont également très riches en informations hors du domaine des crues, bien que le temps nous ait manqué pour l'exploitation de nombre d'entre elles. Par exemple et comme mentionnés dans le **neuvième chapitre**, les comptes communaux pourraient nous permettre d'estimer les volumes de granulats prélevés par la communauté de Nevers aux XIV<sup>e</sup>, XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> s. Ces extractions ont-elles pu provoquer une incision encore plus précoce que celle mesurée dès le milieu du XVIII<sup>e</sup> s. ? De même, si les dégâts ont été renseignés, nous n'avons pas relevé le prix des travaux ou la quantité des matériaux en jeu. Or, si la communauté de Nevers se relève des différents événements de crue, cette résilience a un coût financier très important. Une étude du coût nécessaire aux réparations et reconstructions serait possible.

Ces ressources comptables sont également disponibles ailleurs sur la Loire. Le projet CorMéCoULi porté par l'historien Didier Boisseuil eut pour objectif de les recenser et les valoriser (<https://cormecouli.univ-tours.fr/>). Ces comptabilités urbaines sont disponibles à Tours où les registres furent conservés de 1358 à 1678, à Amboise depuis 1421 ou encore à Orléans. Si une grande partie fut réduite en fumée par les bombardements américains de la Seconde Guerre Mondiale, il subsiste tout de même quelques registres de la fin du XIV<sup>e</sup> s. au début du XVI<sup>e</sup> s. À Nantes les registres des délibérations et assemblées communales ont été conservés de 1449 à 1790 et les comptes des miseurs<sup>27</sup> de 1436 à 1782. À Moulins sur l'Allier, les délibérations communales sont conservées du XVI<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> s. et les comptes de la ville de 1399 à 1789. Le Clain, affluent de la Loire, alimente Poitiers dont les registres de délibérations de la ville ont été conservés depuis 1412 et les comptes à partir de la seconde moitié du XIV<sup>e</sup> s. Bien que recensées, ces ressources regorgent de données encore inexploitées par les historiennes et historiens eux-mêmes, comme en témoignent les récents travaux de **Foucher (2020, 2023a, 2023b, 2023c)** sur les archives comptables de Nevers, ceux de **Denmat-Léon (2020)** sur celles de Nantes ou encore ceux de **Gaugain (2018)** sur les comptes d'Amboise. Côté géographes, elles ont encore été très peu utilisées, voire totalement mises de côté. En bref, une histoire hydrologique ligérienne encore plus détaillée est donc possible ! En effet, si cette étude a permis de comparer les résultats obtenus sur la

---

<sup>27</sup> Comptables que l'on retrouve dans les villes bretonnes, notamment à Rennes, Quimper, Vannes ou encore Nantes (**Leguay, 1969**).

Loire avec d'autres fleuves en France et Europe, elle n'a guère permis de les comparer avec les différents secteurs de la Loire elle-même, manquant de données sur leurs histoires hydrologiques respectives.

#### ❖ **Une meilleure analyse de la variabilité de l'activité hydrologique ligérienne**

Nous l'avons vu dans le cadre du **cinquième chapitre**, il reste très difficile d'expliquer la variabilité de l'activité hydrologique de la Loire. Cette difficulté s'explique probablement par la situation de la Loire au carrefour de nombreuses influences climatiques. Mais elle pourrait tout de même être améliorée avec l'apport de nouvelles données et méthodologies. Compléter les données brutes par des recensements des événements de crue à l'amont et à l'aval de la zone d'étude permettrait peut-être de discriminer l'influence cévenole de l'influence océanique à l'échelle du bassin versant de la Loire et d'observer si l'influence de l'une l'emporte sur l'autre en fonction des périodes. L'étude de l'influence climatique gagnerait également avec des données pluviométriques qui n'ont pas été utilisées dans ce présent travail. À ce titre, la thèse de Charlie Hureau en cours au LGP (**Hureau, en cours**) a pour objectif de reconstituer les paléoclimats dans le bassin versant de la Loire (principalement Loire moyenne et aval) au cours de l'OCM et du PAG à partir d'approches dendroclimatologique et dendroisotopique. Ces données principalement de températures et pluviométriques seront plus précises (temporellement et géographiquement) que les données employées dans le cadre de la discussion du **cinquième chapitre**. Enfin, associer ces nouvelles données à une étude statistique solide et poussée reste obligatoire, les corrélations ou non-corrélations réalisées dans cette thèse entre les périodes de forte activité hydrologique et les reconstitutions de la NAO, de températures et de l'AMO ne restant que visuelles. Réaliser une étude en collaboration avec des climatologues permettrait d'améliorer les comparaisons, la précision des résultats et le fait d'ajouter d'autres reconstitutions des fluctuations atmosphériques et climatiques pourraient également être mises en rapport avec les données hydrologiques, notamment celles du West Europe Pressure Anomaly (WEPA) (**Jalon-Rojas et Castelle, 2021**).

#### ❖ **Multiplications et amélioration des études morpho-sédimentaires sur la zone d'étude**

Bien que la mise en place de l'approche morpho-sédimentaire ait permis d'obtenir de multiples informations inédites, l'approche aurait pu ou pourrait permettre d'en obtenir encore de supplémentaires en contexte ligérien. L'étude du **sixième chapitre** démontre que malgré la mobilité de la Loire, les paléochenaux UXE et surtout LEV ont permis de détecter nombre d'événements hydro-sédimentaire, mais le manque de datations empêche une mise en dialogue efficace entre les archives sédimentaires et documentaires afin d'identifier précisément ces événements. Le carottage de nouveaux paléochenaux, voir de celui de LEV afin d'obtenir de nouvelles dates, permettrait avec certitude de nettement améliorer les résultats du **sixième chapitre**. Il serait également intéressant d'encore étendre temporellement ce type d'étude sédimentaire. Les archives sédimentaires sont les seules dans ce cadre d'étude à pouvoir nous renseigner sur l'activité hydro-sédimentaire de la Loire ou sur l'occurrence de grandes crues au-

délà du Moyen Âge central. Or, renseigner avec une grande précision ces périodes antérieures permettrait d'améliorer la contextualisation de certains sites ou structures archéologiques.

Une meilleure identification de ces événements permettrait également d'améliorer nos connaissances sur les dynamiques de construction de la plaine alluviale ligérienne. Ces traces granulométriques correspondent-elles à un seul événement extrême ou à une succession d'événements ? Quel est finalement le rôle des grandes crues dans cette construction de la plaine ? Nous pourrions également améliorer la caractérisation des traces laissées par le passage des crues. Dans le cadre de cette thèse, leur identification ne repose que sur des analyses granulométriques. Mais les premières étapes de l'exploration de l'apport des analyses géochimiques par fluorescence X (XRF – *X Ray Fluorescence*) ont également été effectuées (cf. **Annexe 3**). Pour des raisons méthodologiques, il reste très difficile d'analyser les résultats. Des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour étudier la signature géochimique des crues de la Loire.

Enfin, d'autres approches pourraient également permettre d'améliorer nos connaissances sur les évolutions hydrogéomorphologiques de la Loire. L'étude des dimensions planimétriques des paléochenaux du Cher, affluent de la Loire, et les calculs de leurs paléodébits, par **Vayssière (2016, 2018)** ont par exemple permis d'établir un historique détaillé de la construction de la plaine alluviale.

#### ❖ **Amélioration des connaissances sur l'aménagement de la Loire et de ses affluents**

Nombre de questionnements subsistent sur l'aménagement de la Loire sur la zone d'étude. Comme évoqué dans le **neuvième chapitre**, si les ressources de la thèse ont permis un recensement assez riche des différents aménagements du XIV<sup>e</sup> s. à nos jours, les plus légers restent probablement sous-estimés sans que l'on puisse non plus mesurer l'amplitude de cette sous-estimation. Des prospections terrestres seraient nécessaires, mais surtout des prospections archéologiques. Le **septième chapitre** et le **huitième chapitre** ont souligné la présence de nombreuses structures via les archives documentaires ou via l'étude des cartes anciennes et du MNT Lidar. Des études archéologiques et géoarchéologiques permettraient de mieux comprendre l'historique de leur construction et surtout de leurs évolutions. **Temam (2012)** avait notamment émis l'hypothèse que certains aménagements de la zone d'étude correspondaient en fait à plusieurs générations d'aménagements plus anciens s'étant succédés. **Laurent-Dehecq (2009)** a identifié lors de fouilles archéologiques les différentes phases de construction d'une levée de la Loire à Saint-Denis-en-Val. Finalement, malgré les apports de cette thèse, l'histoire et la construction des levées de Sermoise et Saint-Antoine restent floues, et ce malgré leur rôle très important quant à la contrainte du cours d'eau.

L'étude des trajectoires d'aménagement est également à compléter, que ce soit sur la zone d'étude avec celle de Digoin notamment ou plus à l'aval. Quelle fut celle de Roanne qui se situe directement à la sortie des gorges de la Loire comme peut l'être Montluçon pour le Cher (**Mesmin, 2020**). Si la ville ancienne de Roanne se situe sur les terrasses quaternaires, ses faubourgs se situent dans le lit majeur

depuis l'époque médiévale. Alors comment la communauté de Roanne composa avec la Loire et ses débordements au fil des siècles. Les trajectoires d'aménagements de nombre de cités sur les affluents de la Loire restent également encore méconnues.

#### ❖ **Des méthodologies applicables à d'autres cours d'eau**

Enfin, l'approche interdisciplinaire et les méthodologies mises en oeuvre dans le cadre de cette thèse pourraient être appliquées sur d'autres cours d'eau afin de renseigner avec précision l'activité hydrologique et hydrogéomorphologique au cours du dernier millénaire. Méthodologiquement, peu d'étude en France ont encore essayé de mettre en dialogue les informations issues d'archives documentaires et sédimentaires. Pourtant, sur des cours d'eau moins mobiles que la Loire, l'application des méthodologies de cette thèse pourrait rencontrer moins de limites. Temporellement, les périodes de l'Antiquité et du Moyen Âge restent très peu documentées en France, les reconstitutions historiques de l'activité hydrologique démarrant pour une plus grande partie durant aux XVI<sup>e</sup>, XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> s. Étendre temporellement ces reconstitutions nous permettraient de mieux comprendre les interrelations entre les hydrosystèmes et les fluctuations climatiques, compréhensions essentielles pour faire face au changement climatique actuel.

# Bibliographie

## A

---

- Alexandre, P., 1987.** *Le Climat en Europe au Moyen Âge. Contribution à l'étude des variations climatiques de 1000 à 1425, d'après les sources narratives de l'Europe occidentale.* Edition de l'EHESS, Paris, 827 p.
- Amann, B., Szidat, S., Grosjean, M., 2015.** A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: implications for the future. *Quaternary Science Reviews*, 115, 89–100. DOI : [10.1016/j.quascirev.2015.03.002](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.002).
- Amoros, C., Petts, G.E., 1993.** *Hydrosystèmes fluviaux.* Collection Écologie, Masson, Paris, 300 p.
- Antoine, J.-M., 1992.** *La catastrophe oubliée : les avatars de l'inondation, du risque et de l'aménagement dans la vallée de l'Ariège (Pyrénées françaises, fin XVIIe – XXe siècles).* Thèse de doctorat en géographie, Université Toulouse II-Le Mirail, 495 p.
- Antoine, J.-M., Desailly, B., 1994.** *Base de données historiques sur les inondations de la Cèze, des Gardons, du Vidourle et de l'Hérault dans le département du Gard (XIII<sup>e</sup> siècle-XX<sup>e</sup> siècle).* Direction Départementale de l'Équipement du Gard, 264 p.
- Antoine, J.-M., 2006.** Toulouse au temps des aygats. *Patrimoine Midi-Pyrénées*, 8, 67-73.
- Antoine, J.-M., Desailly, B., Peltier, A., 2009.** Sources historiques et problématiques de recherche en géographie des risques naturels. *Géocarrefour*, 84, 4, 229-239. DOI : 10.4000/geocarrefour.7519.
- Antoine, J.-M., 2011.** Vulnérabilité et adaptation des sociétés montagnardes à la torrencialité au cours du Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées. *Sud-Ouest Européen*. 32, 53–66. DOI : 10.4000/soe.685.
- Antoine, J.-M., Carozza, J.-M., 2011.** Aléas, vulnérabilités et adaptations des sociétés du passé. *Sud-Ouest Européen*, 32, 1-3. DOI : 10.4000/soe.637.
- Antoine, J.-M., 2012.** *Géohistoire des catastrophes et des risques torrentiels. Une histoire de l'environnement pyrénéen.* Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Université Toulouse II-Le Mirail, 334 p.
- Antoine, J.-M., Gazelle, F. 2013.** *L'apport des données historiques dans la connaissance des crues – Interprétation dans le Sud-Ouest de la France.* *Historiens-Géographes*, 10 p.
- Archives Nationales, 2009.** *État général des fonds des Archives nationales (Paris). F/14 Travaux Publics.* 30 p.
- Arfeillère, A., Steiger, J., Roussel, E., Petit, S., Neel, C., Gautier, E., 2022.** Statistical approach of contemporary hydrogeomorphological channel changes of the middle Allier River, France : morphostructural controls, human impacts and flow regime. *Géomorphologie*, 28, 4, 241-256. DOI : 10.4000/geomorphologie.17312.
- Arnaud-Fassetta, G., 1998.** *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône.* Thèse de doctorat en Géographie physique, Université Aix-Marseille 1, 329 p.
- Arnaud-Fassetta, G., 2003.** River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age : geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 51, 141-172. DOI : 10.1016/S0341-8162(02)00093-0.

**Arnaud-Fassetta, G., 2007.** *L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières : entre géographie des risques, géarchéologie et géosciences.* Habilitation à diriger des recherches en Géographie, Université Paris-Diderot, 435 p.

**Arnell N.W., Gosling S.N., 2016.** The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134, 387-401. DOI : 10.1007/s10584-014-1084-5.

**Arnold, L., Stokes, S., Bailey, R., Fattahi, M., Colls, A. E., Tucker, G., 2003.** Optical dating of potassium feldspar using far-red (>665 nm) IRSL emissions: a comparative study using fluvial sediments from the Loire River, France. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1093-1098. DOI : 10.1016/S0277-3791(03)00033-7.

**Aubanton, F., 2010.** Le chargement de l'épave de Châteauneuf-sur-Loire : nouvelle interprétation. Dans Serna V. (dir.), *La Loire dessus dessous. Archéologie d'un fleuve de l'âge du Bronze à nos jours*, 43-46.

## B

---

**Babinet, A., Maillet, E., 1919.** *Bassin de la Loire : Notice hydrologique.* Imprimerie Nationale, Paris, 74 p.

**Babonaux, Y., 1970.** *Le lit de la Loire. Etude d'hydrodynamique fluviale.* Publication du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Bibliothèque Nationale, Paris, 252 p

**Babonaux, Y., 1986.** L'espace ligérien. Dans Viger Ph. (dir.), *Une histoire de la Loire*, Ramsay, Paris, 37-69.

**Baker, V., 2008.** Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects. *Geomorphology*. 101, 1–2. DOI : 10.1016/j.geomorph.2008.05.016.

**Baker, A., Hellstrom, J.C., Kelly, B.F.J., Mariethoz, G., Trouet, V., 2015.** A composite annual-resolution stalagmite record of North Atlantic climate over the last three millennia. *Scientific Reports*. 5, 10307. DOI : 10.1038/srep10307.

**Baker, V.R., Benito, G., Brown, A.G., Carling, P.A., Enzel, Y., Greenbaum, N., Herget, J., Kale, V.S., Latrubesse, E.M., Macklin, M.G., Nanson, G.C., Oguchi, T., Thondycraft, V.R., Ben Dor, Y., Zituni, R., 2021.** Fluvial palaeohydrology in the 21st century and beyond. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47, 1, 58-81. DOI : 10.1002/esp.5275.

**Ballesteros-Cánovas, J.A., Stoffel, M., St George, S., Hirschboeck, K., 2015.** A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, 1–23. DOI : 10.1177/0309133315608758.

**Ballut, C., 2000.** *Evolution environnementale de la Limagne de Clermont-Ferrand au cours de la seconde moitié de l'Holocène (Massif Central français).* Thèse de doctorat en Géographie, Université de Limoges, 306 p.

**Barbiche, B., Chatenet, M., (dir.), 1993.** *L'édition des textes anciens, XVIe-XVIIIe siècles.* Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France, Paris, 117 p.

**Barriendos, M., Cœur, D., Lang, M., Llasat, M. C., Naulet, R., Lemaitre, F., Barrera, A., 2003.** Stationary analysis of historical flood series in France and Spain (14th-20th centuries). *Natural Hazard and Earth System Science*, 3, 583–592. DOI : 10.5194/nhess-3-583-2003.

**Barriendos M., Rodrigo F. S., 2006.** Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences Journal*, 51, 5, 765-783. DOI : 10.1623/hysj.51.5.765.

- Barriendos, M., Gil-Guirado, S., Pino, D., Tuset, J., Pérez-Morales, A., Alberola, A., Costa, J., Balasch, J. C., Castellort, X., Mazon, J., Ruiz-Bellet, J. L., 2019.** Climatic and social factors behind the Spanish Mediterranean flood event chronologies from documentary sources (14th-20th centuries). *Global and Planetary Change*, 182, 102997. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2019.102997.
- Beierle, B.D., Lamoureux, S.F., Cockburn, J.M.H., Spooner, I., 2002.** A new method of visualizing sediment particle size distributions. *Journal of Pleistocene*, 27, 279-283. DOI : 10.1023/A:1014209120642.
- Bély, L., 2013.** *La France moderne, 1498-1789*. PUF, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 704 p.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francés, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V.R., Enzel, Y., Bardossy, A., Cœur, D., Bobée, B., 2004a.** Use of systematic, palaeo-flood and historical data for the improvement of flood risk estimation. *Rev. Sci. Methods. Nat. Hazards*. 31, 623–643. DOI : 10.1023/B:NHAZ.0000024895.48463.eb.
- Benito, G., Díez-Herrero, A., de Villalta, M.F., 2004b.** Response to Solar Signal in the Number of Floods Recorded for the Tagus River Basin over the Last Millennium. *Climatic Change*. 66, 27–28. DOI : 10.1023/B:CLIM.0000043146.37662.de.
- Benito, G., Brázdil, R., Herget, J., Machado, M. J., 2015.** Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3517–3539. DOI :10.5194/hess-19-3517-2015.
- Berger, J.-F., Salvador, P.-G., Franc, O., Verto-Bourrely, A., Bravard, J.-P., 2008.** La chronologie fluviale postglaciaire du haut bassin rhodanien. *Collection EDYTEM, Cahiers de Paléoenvironnement*, 6, 117-144.
- Berger J.-F., Blanchemanche P., Reynès C., Sabatier P., 2010.** Dynamiques fluviales en basse vallée du Vidourle au cours des six derniers siècles. Confrontation des données pédo-sédimentaires à haute résolution temporelle à l'analyse fréquentielle des crues historiques. *Quaternaire*. 21, 1, 27–41. DOI : 10.4000/quaternaire.5427.
- Berger, J.-F., 2015.** *Approche socio-environnementale du Néolithique à l'Anthropocène : quelques études intégrées de la vallée du Rhône aux milieux nord méditerranéens*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Lyon 2, 780 p.
- Berlioz, J., 2006.** *Les lendemains des catastrophes naturelles au Moyen Âge*. Dans Jouanna, J., Leclant, J., Zink, M. (éd.), *L'homme face aux calamités naturelles dans l'Antiquité et au Moyen Âge*, actes du colloque, cahiers de la villa « Kérylos », 17, 165-181.
- Berner, Z.A., Bleck-Schmidt, S., Stüben, D., Neumann, T., Fuchs, M., Lehmann, M., 2012.** Floodplain deposits : A geochemical archive of flood history – A case study on the River Rhine, Germany. *Applied Geochemistry*, 27, 543-561. DOI : j.apgeochem.2011.12.007.
- Bertola, M., Viglione, A., Lun, D., Hall, J., Blöschl, G., 2020.** Flood trends in Europe : are changes in small and big floods different ? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 1805-1822. DOI : 10.5194/hess-24-1805-2020.
- Billacois, F., 1964.** La batellerie de la Loire au XVII<sup>e</sup> siècle. *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 11, 163-190. DOI : 10.3406/rhmc.1964.2874.
- Blaauw, M., Christen, J.A., 2011.** Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6, 457-474. DOI : 10.1214/11-BA618.
- Blanchemanche, P., 2009.** Crues historiques et vendanges en Languedoc méditerranéen oriental : la source, le signal et l'interprétation. *Archéologie du Midi Médiéval*. 27, 225–235. DOI : 10.3406/amime.2009.1900.

- Blanpied, J., 2019.** *La torrentialité dans les Pyrénées centrales : évolution depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, spécificités et dynamiques géomorphologiques actuelles.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Toulouse II Jean Jaurès, 352 p.
- Blanpied, J., Antoine, J.-M., Carozza, J.-M., Valette, P., 2020.** Reconstitution de l'évolution de la dynamique hydrosédimentaire d'un gave pyrénéen (torrent du Bastan, Gave de Pau, Hautes-Pyrénées) : approche croisée géohistorique et hydrogéomorphologique. *Sud-Ouest Européen*, 49, 29-46. DOI : 10.4000/soe.6681.
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilbashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kohnová, S., Koskela, J. J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Sraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi K., Zivkovic N., 2017.** Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. 357, 588–590. DOI : 10.1126/science.aan2506.
- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., Barriendos, M., Böhm, O., Brázdil, R., Cœur, D., Demarée, G., Llasat, M.C., Macdonald, N., Retsö, D., Roald, L., Schmocker-Fackel, P., Amorim, I., Bělínová, M., Benito, G., Bertolin, C., Camuffo, D., Cornel, D., Doktor, R., Elleder, L., Enzi, S., Garcia, J.C., Glaser, R., Hall, J., Haslinger, K., Hofstätter, M., Komma, J., Limanówka, D., Lun, D., Panin, A., Parajka, J., Petrić, H., Rodrigo, F.S., Rohr, C., Schönbein, J., Schulte, L., Silva, L.P., Toonen, W.H.J., Valent, P., Waser, J., Wetter, O., 2020.** Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560–566. DOI : 10.1038/s41586-020-2478-3.
- Blott, S.J., Pye, K., 2001.** Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Boisseuil, D., 1992.** *Le pont sur la Loire à la fin du Moyen-Âge.* Recherches sur Tours, 6, 91 p.
- Bomer, B., 1972.** Les îles de la Loire, évolution ou stabilité ? *Etudes Ligériennes*, 11, 70-80.
- Bravard, J.-P., 1983.** Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de Géographie Alpine*, 71, 4, 363-379. DOI : 10.3406/rga.1983.2543.
- Bravard, J.P., Amoros, C., Pautou, G., 1986.** Impact of civil engineering works on the successions of communities in a fluvial system. *Oikos* 47, 92–111. DOI : 10.2307/3565924.
- Bravard, J.-P., 1989.** La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne. *Bulletin de la Société de Géographie de Liège*. 25, 145–157.
- Bravard, J.-P., Peiry, J.-L., 1993.** La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19-20ème siècle). *Zeitschrift Geomorph., Suppl. Bd.* 88, 67-79.
- Bravard, J.-P., 1994.** L'incision des lits fluviaux : du phénomène morphodynamique naturel et réversible aux impacts irréversibles. *Revue de géographie de Lyon*, 69, 1, 5-10. DOI : 10.3406/geoca.1994.4231.
- Bravard, J.-P., Petit, F., 1997.** *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial.* Armand Colin, Collection U, Paris, 222 p.
- Brázdil, R., Dobrovolný, P., Elleder, L., Kakos, V., Kotyza, O., Kveton, V., Macková, J., Müller, M., Štekl, J., Tolasz, R., Valášek, H., 2005.** *Historical and Recent Floods in the Czech Republic.* Masaryk University, Czech Hydrometeorological Institute, Brno, Praha, 370 p.

- Brázdil, R., Kundzewic, Z. W., Benito G., 2006.** Historical hydrology for studying flood risk in Europe. *Hydrological Sciences Journal*. 51, 739–764. DOI : 10.1623/hysj.51.5.739.
- Brázdil, R., Z., W. Kundzewicz, G., Benito, G. Demarée, N. Macdonald, L. A. Roald, 2012.** Historical floods in Europe in the past millennium. Dans Kundzewicz, Z.W., (éd.), *Changes in Flood Risk in Europe*, IAHS Spec. Publ. 10, Wallingford, U. K., 121–166.
- Brázdil, R., Chromá, K., Rezníková, L., Valášek, H., Dolák, L., Stachon, Z., Soukalová, E., Dobrovolný, P., 2014.** The use of taxation records in assessing historical floods in South Moravia, Czech Republic. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18, 3873–3889. DOI : 10.5194/hess-18-3873-2014.
- Brochier, J.-L., Borel, J.-L., Druart, J.-C., 2007.** Les variations paléoenvironnementales de 1000 avant à 1000 après J.C. et la question des « optima » climatiques de l’Antiquité tardive et du Moyen Âge sur le piémont des Alpes du nord à Colletière, lac de Paladru, France. *Quaternaire*, 18, 3, 253-270. DOI : 10.4000/quaternaire.1125.
- Brocq, N., 2014.** Decize, Cosne, la résidence et la place forte : deux possessions du comte de Nevers aux frontières du Nivernais. Dans Colas, B., Mouillebouche, H., (éd.), *Chastels et maisons fortes IV*, actes des journées de castellologie de Bourgogne 2010-2012, 53-68.
- Brönnimann, S., Stucki, P., Franke, J., Valler, V., Brugnara, Y., Hand, R., Slivinski, L.C., Compo, G.P., Sardeshmukh, P.D., Lang, M., Schaeffli, B., 2022.** Influence of warming and atmospheric circulation changes on multidecadal European flood variability. *Climate of the Past*. 18, 919-933. DOI : 10.5194/cp-18-919-2022.
- Brook, T., 2024.** *Le prix de l'effondrement. Le petit âge glaciaire et la chute des Ming*. Éditions Payot, 286 p.
- Brossé, R., 1982.** *Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, Université d'Angers, 350 p.
- Brouard, E., 2016.** Quel commerce fluvial en Loire angevine au XVIIIe siècle ? Nantes et son arrière-pays ligérien. *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest*, 123-1, 113-156. DOI : 10.4000/abpo.3210.
- Brousse, G., Arnaud-Fassetta, G., 2011.** Caractérisation (2010) et évolution récente (1999-2010) du gradient granulométrique longitudinal dans les deux bras du Rhône deltaïque (France méditerranéenne). *Géomorphologie*, 3, 291-306. DOI : 10.4000/geomorphologie.9500.
- Brown, A.G., 1998.** Fluvial Evidence of the Medieval Warm Period and the Late Medieval Climatic Deterioration in Europe. Dans Benito, G., Baker, V.R., Gregory, K.J., (éd.). *Palaeohydrology and Environmental Change*. 43-52.
- Brown, A.G., Lespez, L., Sear, D.A., Macaire, J.-M., Houben, P., Klimek, K., Brazier, R.E., Van Oost, K., Pears, B., 2018.** Natural vs anthropogenic streams in Europe : History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews*, 180, 185-205. DOI : 10.1016/j.earscirev.2018.02.001.
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Franck, D., Trouet, V., Kaplan, J.O., Herzig, F., Heussner, K.-U, Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., 2011.** 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331, 578-582. DOI : 10.1126/science.1197175.
- Büntgen, U., Myglan, V.S., Charpentier Ljungqvist, F., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., Jungclauss, J., Wagner, S., Krusic, P.J., Esper, J., Kaplan, J.O., de Vaan, M.A.C., Luterbacher, J., Wacker, L., Tegel, W., Kirilyanov, A.V., 2016.** Cooling and societal change

during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, 9, 231–236. DOI : 10.1038/ngeo2652.

**Büntgen, U., Crivellaro, A., Arseneault, D., Baillie, M., Barclay, D., Bernabei, M., Bontadi, J., Boswijk, G., Brown, D., Christie, D.A., Churakova, O.V., Cook, E.R., D'Arrigo, R., Davi, N., Esper, J., Fonti, P., Greaves, C., Hantemirov, R.M., Hughes, M.K., Kirilyanov, A.V., Krusic, P.J., Le Quesne, C., Ljungqvist, F.C., McCormick, M., Myglan, V.S., Nicolussi, K., Oppenheimer, C., Palmer, J., Qin, C., Reinig, F., Salzer, M., Stoffel, M., Torbenson, M., Trnka, M., Villalba, R., Wiesenberg, N., Wiles, G., Yang, B., Piermattei, A., 2022.** Global wood anatomical perspective on the onset of the Late Antique Little Ice Age (LALIA) in the mid-6<sup>th</sup> century CE. *Science Bulletin*, 67, 22, 2336-2344. DOI : 10.1016/j.scib.2022.10.019.

**Burnouf, J., Guilhot, J.-O., Mandy, M.-O., Orcel, C., 1991.** *Le Pont de la Guillotière. Franchir le Rhône à Lyon.* Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes, 196 p.

**Burnouf, J., Carcaud, N., 1999.** Le val de Loire en Anjou Touraine : un cours forcé par les sociétés riveraines. *Médiévales*, 36, 17-29. DOI : 10.3406/abpo.2000.4057.

**Burnouf, J., Carcaud, N., Cubizolle, H., Tremont, F., Visset, L., Garcin, M., Serieyssol, K., 2001.** Les relations sociétés/milieus physiques depuis la fin du Tardiglaciaire : les apports du programme Loire. *Quaternaire*, 12, 1-2, 5-13. DOI : 10.3406/quate.2001.1677.

**Burnouf, J., Carcaud, N., Garcin, M., 2002.** Aléa et risques dans la vallée de la Loire au Moyen Age : la question des « levées » (la cas de la « Loire océanique entre Tours et Angers »). Actes du 3<sup>ème</sup> congrès International de l'archéologie médiévale et postmédiévale, Medieval Europe Basel, 44-49.

**Burnouf, J., Leveau, P., (dir.), 2004.** *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture.* Éditions du CTHS, Paris, 493 p.

**Burnouf, 2007.** Towns and rivers, river towns : environmental archaeology and the archaeological evaluation of urban activities and trade, Dans Henning J. (ed.) *Post-Roman Towns, Trade and Settlement in Europe and Byzantium vol.1 The Heirs of the Roman West*, 165-180.

## C

---

**Calle, M., Alho, P., Benito, G., 2017.** Channel dynamics and geomorphic resilience in an ephemeral Mediterranean river affected by gravel mining. *Geomorphology*, 285, 333-346. DOI : 10.1016/j.geomorph.2017.02.026.

**Camenish, C., 2015.** Endless cold: a seasonal reconstruction of temperature and precipitation in the Burgundian Low Countries during the 15th century based on documentary evidence. *Climate of the Past*, 11, 8, 1049–1066. DOI : 10.5194/cp-11-1049-2015.

**Carcaud, N., Garcin, M. (coord.), 2001.** *Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges. Synthèse des résultats du PCR 1996-1999.* Rapport, 125 p.

**Carcaud, N., Garcin, M., Visset, L., Musch, J. and Burnouf, J., 2002.** Nouvelle lecture de l'évolution des paysages fluviaux à l'Holocène dans le bassin de la Loire moyenne. Dans Bravard, J. P., Magny, M. (Eds.), *Les fleuves ont une histoire. Paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans.* Errance, Paris, 71-84.

**Carcaud, N., 2004.** *D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux.* Diplôme d'habilitation à diriger des recherches, synthèse scientifique, Université d'Angers, 450 p.

- Carozza, J.-M., Odiot, T., Puig, C., Pequinot, C., Jorda, C., Passarius, O., Valette, P., 2006.** Impact du Petit Âge Glaciaire sur les plaines alluviales méditerranéenne françaises : apport de la géoarchéologie à l'évolution du bassin du Roussillon. Old'men river, geoarcheological aspects of rivers and river plains, Belgique, 185-197.
- Carozza, J.-M., Puig, C., 2011.** Changements environnementaux, vulnérabilité et adaptation des sociétés du passé : exemple du Petit Âge Glaciaire en Roussillon (XIII<sup>e</sup> – XVI<sup>e</sup> s.). Sud-Ouest Européen, 32, 67-79. DOI : 10.4000/soe.693.
- Carozza, J.-M., Puig, C., Odiot, T., Valette, P., Passarius, O., 2012.** Lower Mediterranean plain accelerated evolution during the Little Ice Age: Geoarchaeological insight in the Tech basin (Roussillon, Gulf of Lion, Western Mediterranean). Quaternary International, 266, 94-104. DOI : 10.1016/j.quaint.2011.06.049.
- Carozza, J.-M., Devillers, B., Morhange, C., Marriner, N., (éd.), 2014.** Le petit âge de glace en Méditerranée. Méditerranée, 122, 218 p. DOI : 10.4000/mediterranee.6997.
- Cassagne, J.-M., Korsak, M., 2013.** *Dictionnaire des villes et villages de Bourgogne*. Editions de l'Escargot Savant, Viévy, 558 p.
- Castanet, C., 2008.** *La Loire en val d'Orléans. Dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30 000 ans : de l'hydrosystème à l'anthroposystème*. Thèse de doctorat en archéologie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 631 p.
- Chabrol, D., 2018.** *Terres et seigneurs en Donziais. Grandes familles. D'Aulenay (La Celle-sur-Loire)*. 10 p.
- Champion M., 1858-1864.** *Les inondations en France du VI<sup>e</sup> siècle à nos jours*. 6 tomes, Dunod, Paris.
- Charrier, J.-B., Chabrolin, M., Stainmesse, B., 1984.** *Histoire de Nevers. 1, Des origines au début du XIX<sup>e</sup> siècle*. Éditions Horvath, 230 p.
- Chaussard, P., 1970.** *Marine de Loire et mariniers digoinais*. Éditions des Cahiers Bourbonnais, Moulins, 199 p.
- Chaussard, P., 1986.** *Images du passé digoinais*. Digoin, 242 p.
- Chaussé, C., Leroyer, C., Girardclos, O., Allenet, G., Pion, P., Raymond, P., 2008.** Holocene history of the River Seine, Paris, France : bio-chronostratigraphic and geomorphological evidence from the Quai-Branly. The Holocene, 18, 6, 967-980. DOI : 10.1177/0959683608093535.
- Chuine, I., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Daux, V., Le Roy Ladurie, E., 2004.** Grape ripening as a past climate indicator. Nature, 432, 289-290. DOI : 10.1038/432289a.
- Clavandier, G., 2004.** *La mort collective. Pour une sociologie des catastrophes*. CNRS Éditions, Paris, 255 p.
- Cœur, D., 2008.** *La plaine de Grenoble face aux inondations. Genèse d'une politique publique du XVII<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle*. Éditions Quae, Versailles, 329 p.
- Colls, A.E., Stokes, S., Blum, M.D., Straffin, E., 2001.** Age limits on the Late Quaternary evolution of the upper Loire River. Quaternary Science Reviews, 20, 5-9, 743-750. DOI : 10.1016/S0277-3791(00)00048-2.
- Comoy, G., 1861.** *Renseignements sur les crues de la Loire et de ses grands affluents*. Paris, 32 p.
- Comoy, G., 1868.** Quantité de limon dans la Loire pendant les crues. Revue de Géologie, 7, 288 p.

- Coquille, G., 1622.** *Histoire du pays et duche de nivernois*. Réédition de 1988, Horvath, Roanne, 389 p.
- Corenblit, D., Steiger, J., 2009.** Vegetation as a major conductor of geomorphic changes on the Earth surface : toward evolutionary geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 891-896. DOI : 10.1002/esp.1788.
- Croudace, I.W., Rothwell, R.G., (éd.), 2015.** *Micro-XRF Studies of Sediment Cores*. Dordrecht, Springer Netherlands, 656 p.
- Crouzet, H., 1858.** *Droits et privilèges de la commune de Nevers*. Nevers, 220 p.
- Cubizolle, H., 1997.** *La Dore et sa vallée. Approche géohistorique des relations Hommes/milieu fluvial*. Thèse de Doctorat en Géographie, Université Blaise Pascal Clermont II, Publications de l'Université de St-Etienne, 389 p.
- Cubizolle, H., Georges, V., 2001.** L'évolution holocène de la plaine alluviale de la Loire dans le bassin du Forez (Massif central, France). Mise en évidence du potentiel géoarchéologique. *Quaternaire*, 12, 1-2, 53-67. DOI : 10.3406/quate.2001.1681.
- Cubizolle, H., Valadas, B., Gagnaire, J., Evin, J., 2001.** La dynamique des versants dans le bassin de la Dore durant la deuxième moitié de l'holocène (Massif central, France) : premières données géoarchéologiques et datations radiocarbone. *Quaternaire*, 12, 1-2, 15-29. DOI : 10.3406/quate.2001.1678.

## D

---

- Dacharry, M., 1974.** *Hydrologie de la Loire en amont de Gien*. Nouvelles Editions Latines, Paris, 2 tomes, 619 p.
- Dacharry, M., 1996.** Les grandes crues historiques de la Loire. *La Houille Blanche* 6-7, 47-53. DOI : 10.1051/lhb/1996067.
- Dambre, J.L., Malaval, P., 1993.** *Évaluation des conditions de poursuite de la politique de limitation des extractions de matériaux dans le lit de la Loire du Bec d'Allier à Nantes*. Rapport, 59 p.
- Dambre, J.L., 1996.** Les extractions de matériaux dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire et de ses affluents. *La Houille Blanche*, 6-7, 108-113. DOI : 10.1051/lhb/1996077.
- David, M., 2016.** *Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène : trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90km)*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Toulouse II, 287 p.
- David, M., Valette, P., Carozza, J.-M., Jantzi, H., 2020.** *Atlas géohistorique de la Garonne. Moyenne Garonne toulousaine (confluence de l'Ariège à la confluence du Tarn)*. 93 p.
- Davies, S.J., Lamb, H.F., Roberts, S.J., 2015.** Micro-XRF Core Scanning in Palaeolimnology : Recent Developments. Dans Croudace, I.W., Rothwell, R.G., (éd.), *Micro-XRF Studies of Sediment Cores*. Dordrecht, Springer, 189-226.
- DDE Nièvre, 2003.** *Plan de Prévention du Risque Inondation. Secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes*. Plan de zonage Avril-sur-Loire. 1 p.
- DDT Allier, 2019.** *Plan de Prévention des Risques inondation fleuve Loire. Carte de zonage réglementaire*. Commune de Saint-martin-des-Lais. 1 p.
- DDT Nièvre, 2020.** *Plan de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI) de la Loire secteur compris entre Nevers et Saint-Léger-des-Vignes. Commune d'Avril-sur-Loire*. 1 p.

- DDT Nièvre, 2020b.** *Plan de Prévention du Risque d'inondation (PPRi) de la Loire val de Nevers. Commune de Nevers – Planche Est.* 1 p.
- De Brive, M., 1866.** L'inondation du 24 septembre 1866 dans la Haute-Loire. *Annales de la Société d'agriculture, sciences, arts et commerce du Puy*, 27, 435–449.
- De Dainville, F., 1964.** *Le langage des géographes. Termes, signes, couleurs des cartes anciennes (1500-1800).* Réédition de 2018, CTHS, Paris, 301 p.
- De Milleville, L., 2023.** *Trajectoire fonctionnelle (hydrogéomorphologie, biologie) des petites rivières périurbaines d'Île-de-France : l'exemple du Morbras, de la Mérantaise et de la Biberonne.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris-est Créteil, 378 p.
- De Person, F., 2001.** *Bateliers sur la Loire XVIIe-XVIIIe siècles.* CLD, Chambray-lès-Tours, 268 p.
- De Person, F., 2020.** La spécificité des naufrages en Loire (XIVe-XIXe siècle). Dans Serna, V. (dir.), *Épaves et naufrages en Loire. Archéologie de l'accident en eau douce (XIVe-XIXe siècle)*, 76<sup>e</sup> supplément à la Revue Archéologique du Centre de la France, 31-43.
- Dearing, J.A., 1999.** *Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System.* Kenilworth. Chi Publishing, 2<sup>nd</sup> édition, 43 p.
- Defive, E., Berger, J.-F., Poiraux, A., Barra, A., Bouvard, E., Virmoux, C., Voldoire, O., Garreau, A., Miras, Y., Beauger, A., Cabanis, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Dendievel, A.-M., Nomade, S., Delvigne, V., Lafarge, A., Liabeuf, R., Guillou, H., Raynal, J.-P., 2017.** Les flux hydro-sédimentaires dans le bassin supérieur du fleuve Loire (Massif Central, France) au cours des trois derniers millénaires : archives séquentielles, chronologie et corrélations régionales. *Quaternaire*, 28, 3, 373-388. DOI : 10.4000/quaternaire.8304.
- Delile, H., Schmitt, L., Jacob-Rousseau, N., Grosprêtre, L., Privolt, G., Preusser, F., 2016.** Headwater valley response to climate and land use changes during the Little Ice Age in the Massif Central (Yzeron basin, France). *Geomorphology*, 257, 179-197. DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.01.010.
- Delizeau, L., Terrier, B., Berger, J.F., Blanchemanche, P., Latapie, A., Freyrier, R., Paquier, A., Lang, M., Delgado, J.L., 2014.** Reconstitution des crues extrêmes du Gardon à partir d'une analyse paléohydrologique. *La Houille Blanche*. 4, 44–52. DOI : 10.1051/lhb/2014037.
- Delus, C., Bonnot, E., François, D., 2021.** *Etude historique des événements et de l'évolution des enjeux territoriaux sur le périmètre du PAPI d'intention du bassin versant de la Moselle Aval.* LOTERR, rapport final, 402 p.
- Dendievel, A.-M., Chevalier, D., 2018.** Topos et mémoires des deux rives de La Loire amont (XVIIIe-XXe siècles). *Géographie et cultures*, 105, 91-112. DOI : 10.4000/gc.6522.
- Denmat-Léon, A., 2020.** Constituer des archives urbaines à Nantes à la fin du Moyen Âge. La guerre franco-bretonne, point de départ d'une mise en registres et en coffres de la *memoria* de la ville. *Histoire Urbaine*, 59, 125-138. DOI : 10.3917/rhu.059.0127.
- Dépret, T., 2014.** *Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher.* Thèse de doctorat en géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 514 p.
- Dépret, T., Gautier, E., Hooke, J., Grancher, D., Virmoux, C., Brunstein, D., 2017.** Causes of planform stability of a low-energy meandering gravel-bed river (Cher Rvier, France). *Geomorphology*, 285, 58-81. DOI : 10.1016/j.geomorph.2017.01.035.
- Desailly, B., 1990.** *Crues et inondations en Roussillon. Le risque et l'aménagement. Fin du XVIIe - milieu du XXe siècle.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris X Nanterre, 352 p.

- Desarthe, J., 2007.** Caprices du climat, caprice du fleuve, les vallées de la Sarthe et de l'Orne face au climat de la fin du XVII<sup>e</sup> au début du XX<sup>e</sup> siècle. Zone humide et climat. Actes de la journée d'étude 2007, Groupe d'Histoire des Zones Humides, 75-86.
- Desarthe, J., 2013.** Le temps des saisons : Climat, événements extrêmes et sociétés dans l'ouest de la France (XVI<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles), Hermann, Paris, 350 p.
- Descroix, L., Gautier, E., 2002.** Water erosion in the southern French alps : climatic and human mechanisms. *Catena*, 50, 1, 53-85. DOI : 10.1016/S0341-8162(02)00068-1.
- Descy, J.-P., 2009.** Chapter 5 – Continental Atlantic Rivers. Dans Tockner K., Uehlinger U., Robinson C.T. (éd.), *Rivers of Europe*, 151-198. DOI : 10.1016/B978-0-12-369449-2.00005-9.
- Desforges, A., 1906.** Notes diverses tirées d'un vieux registre paroissial de Toury-sur-Abrion (1616-1748). *Mémoire de la Société Académique du Nivernais*, 2, 1, 172-181.
- Diaz, H.F., Trigo, R., Hughes, M.K., Mann, M.E., Xoplaki, E., Barriopedro, D., 2011.** Spatial and temporal characteristics of climate in medieval times revisited. *American Meteorological society*, 92, 11, 1487-1500. DOI : 10.1175/BAMS-D-10-05003.1.
- Dietze, E., Dietze, M., 2019.** Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. *E&G Quaternary Sci. J.*, 68, 29–46. DOI : 10.5194/egqsj-68-29-2019.
- Dion, R., 1938.** Orléans et l'ancienne navigation de la Loire. *Annales de Géographie*, 47, 266, 128-154. DOI : 10.3406/geo.1938.11830.
- Dion, R., 1961.** *Histoire des levées de la Loire*. Réédition de 2017, CNRS éditions, 312 p.
- Dobrovolný, P., Moberg, A., Brázdil, R., Pfister, C., Glaser, R., Wilson, R., vanEngelen, A., Limanówka, D., Kiss, A., Halíčková, M., Macková, J., Riemann, D., Luterbacher, J., Běhň, R., 2010.** Monthly, seasonal and annual temperature re-constructions for Central Europe derived from documentary evidence and instrumental records since AD 1500. *Climatic Change*. 101, 1, 69–107. DOI : 10.1007/s10584-009-9724-x.
- Duband, D., 1996.** La genèse des crues dans le bassin de la Loire. *La Houille Blanche*. 6–7, 54–62. DOI : 10.1051/lhb/1996068.
- Dufour, S., Lespez, L., 2024.** Chapitre 1. La nature de l'Anthropocène : nature anthropisée, nature hybridée. Dans Dufour, S., Lespez, L., (éd.), *Géographie de l'environnement*, 2<sup>e</sup> éd., 36-52.
- Dumont, A., Garcia, J.-P., Escoffier, M., Moyat, P., Hamblin, M., Delanoy, J.-P., Curie, J., 2007.** *Prospection thématique : recherche d'aménagements dans le lit mineur de la Loire – Région Auvergne*. Rapport de prospection, SRA Auvergne et Bourgogne, 105 p.
- Dumont, A., Steinmann, R., Garcia, J.-P., 2008.** *Prospection thématique archéologique du lit mineur et du lit majeur de la Loire en régions Bourgogne et Auvergne. Etude et datation des franchissements et des zones portuaires, dynamique sédimentaire alluviale aux échelles de temps historiques*. Rapport d'activité, 125 p.
- Dumont, A., 2010.** Que nous apprennent les vestiges des (très) vieux ponts de la Loire ? *Géosciences*, 12, 34-41. DOI : hal-00663341f.
- Dumont, A., Bouthier, A., Lavier, C., Lefevre, C., Laudrin, F., Moyat, P., 2010.** Deux ponts gallo-romains à Saint-Satur (Cher). Dans Serna V. (dir.), *La Loire dessus dessous. Archéologie d'un fleuve de l'âge du Bronze à nos jours*, 101-106.

- Dumont, A., Foucher, M., Steinmann, R., Lavier, C., Moyat, P., Garcia, J.-P., 2014.** Évolution des ponts et du lit mineur de la Loire, entre la Charité-sur-Loire et la Chapelle-Montlinard. *Développement durable et territoires*, 5, 3. DOI : 10.4000/developpementdurable.10630.
- Dumont, A., Bully, A., Foucher, M., Moyat, P., Steinmann, R., Lavier, C., Hamblin, M., 2016.** Tant de ponts au fil du temps à la Charité-sur-Loire (Nièvre). *Archéologie en Bourgogne Franche-Comté*, 1, 13 p.
- Dumont, A., Foucher, M., Lavier, C., Richardin, P., Moyat, P., 2021.** *Prospections et sondages Loire 2021 – Centre-Val-de-Loire*. Rapport d'opération programmée, 106 p.
- Dumont, A., Foucher, M., Moyat, P., Lavier, C., 2022.** Digue, levée, chantiers – formes, techniques et matériaux pour contraindre et aménagement la Loire moyenne du 6<sup>e</sup> s. au 18<sup>e</sup> s., séminaire « Le fleuve aménagé : relations sur la longue durée entre ouvrages et communautés habitantes », 14 novembre 2022, Dijon.
- Dumont, A., Moyat, P., Foucher, M., Torre-Guibert, M., Steinmann, R., Deudon, L., Lavier, C., Richardin, P., Varrel, E., Robin, Y., Chavoutier, L., Lempereur, O., Fraudin, C., 2022.** *Opérations 2022 – fleuve Loire. Régions Centre Val de Loire*. Rapport d'opération programmée, 152 p.
- Dumont, A., Foucher, M., Lavier, C., Moyat, P., 2023a.** Contraindre la Loire au XVIII<sup>e</sup> siècle : histoire et archéologie des digues de Saint-Père / Sully-sur-Loire (45). *Archéologie, société et environnement*, 3, 1, 112-128. DOI : 10.21494/ISTE.OP.2023.1028.
- Dumont, A., Foucher, M., Moyat, P., Hureau, C., Delaunay, J., Lavier, C., Richardin, P., Putin, J., Nguyen Van, A., Robin, Y., Fraudin, C., 2023b.** *Prospections 2023 – fleuve Loire*. Rapport d'opération programmée, 149 p.
- Duplessis, M. J., 1872.** Résumé des séances de la Société d'agriculture, sciences, arts et commerce du Puy. *Annales de la Société d'agriculture, sciences, arts et commerce du Puy*, 32, 130-134.
- Duquesne, A., Carozza, J.-M., 2019.** Écrire la géohistoire d'un fleuve à faible énergie : les crues de la Charente entre Angoulême et Saintes. *Physio-Géo*, 14, 57-86. DOI : 10.4000/physio-geo.8942.
- Duquesne, A., 2021.** *Trajectoire d'évolution d'un cours d'eau à faible énergie au cours du second Holocène : La Charente entre Angoulême et Saintes*. Thèse de doctorat en Géographie, Université de la Rochelle, 376 p.
- Duquesne, A., Carozza, J.-M., 2023.** Improving Grain Size Analysis to Characterize Sedimentary Processes in a Low-Energy River : A Case Study of the Charente River (Southwest France). *Applied Sciences*, 13, 8061. DOI : 10.3390/app13148061.
- Duquesne, A., Carozza, J.-M., 2025.** How exceptional was the 2023-2024 flood dequence in the Charente River (Aquitania, South-West France) ? A geohistorical perspective on clustered floods. *GeoHazards*, 6, 3, 27 p. DOI : 10.3390/geohazards6010003.

## E

---

- EPTB Loire, 2017.** *Impacts du changement climatique sur le bassin de la Lorie & ses affluents. Éléments de connaissance scientifique*. 2 p.
- Escoffier, M., 2007.** L'habitat fortifié médiéval des rives de la Loire, entre Digoïn et Marcigny. Dans Dumont, A., (dir.), *Prospection thématique : recherche d'aménagements dans le lit mineur de la Loire – Région Auvergne*, 57 – 78.

## F

---

- Faust, J.C., Fabian, K., Milzer, G., Giraudeau, J., Knies, J., 2016.** Norwegian fjord sediments reveal NAO related winter temperature and precipitation changes of the past 2800 years. *Earth Planet Sci. Lett.* 435, 84–93. DOI : 10.1016/j.epsl.2015.12.003.
- Favier, R., 2007.** L'histoire sociale des risques naturels en questions. Sources et problématiques nouvelles, *Gestion sociale des risques naturels*, 155-172.
- Ferber, F., 2023.** L'exploitation des ressources fluviales en milieu urbain : l'exemple de Metz à la fin du Moyen Âge. Dans Pauly M., Pettiau H., Uhrmacher M. (éd.), *les ressources naturelles en Lotharingie médiévale : regards croisés sur leur exploitation*, Actes des 21es Journées Lotharingiennes, Publications de la Section Historique de l'Institut Grand-Ducal CXXVIII, Publications du CLUDEM53, 51-77.
- Florenty G., 1991.** *Une capitale provinciale et sa population. Nevers au XVIII<sup>e</sup> siècle.* Atelier nivernais d'archives vivantes, Nevers, 379 p.
- Fossier, R., 1991.** *La société médiévale.* Armand Colin, Paris, 464 p.
- Foucher, M., 2020.** Les comptes municipaux et les ouvrages de Loire et de Nièvre à Nevers. Dans Dumont. A. (dir.), *Prospections et sondages Loire 2020 – Centre-Val-de-Loire*, 193 p.
- Foucher, M., Dumont, A., Moyat, P., Lavier, C., Steinmann, R., 2022.** L'épave de Saint-Satur dans la Loire moyenne : un transport d'ardoises interrompu à la charnière du Moyen Âge et de la période moderne. *Archéologie médiévale*, n° spécial « Toitures et matériaux de couverture au Moyen Âge », 1-8. DOI : 10.4000/archeomed.41820.
- Foucher, M., 2023a.** *Les ponts de Loire entre Jargeau et St-Denis-de-l'Hôtel (Loiret).* Rapport de prospections thématiques 2023. 108 p.
- Foucher, M., 2023b.** Vivre au bord de l'eau à Nevers (Nièvre) à la fin du Moyen Âge. Dans Lorans, E., Pouyet, T., Simon, G., (dir.), *L'eau dans les villes d'Europe au Moyen Âge (Ive – Xve siècle) : un vecteur de transformation de l'espace urbain.* Actes du colloque, Tours, 21-23 octobre, 153-166.
- Foucher, M., 2023c.** Comment cohabiter avec la Loire à Nevers à la fin du Moyen Âge ? Tâtonnements et adaptations face à un fleuve changeant : l'exemple des *battis*. *Dynamiques environnementales*, 51, 1-24. DOI : 10.4000/dynenviron.7538.
- Foucher, M., 2024.** *Les ponts de Loire entre Jargeau et St-Denis-de-l'Hôtel (Loiret).* Rapport de prospections thématiques 2023, 108 p.

## G

---

- Gallouedec, L., 1910.** *La Loire, étude de fleuve.* Hachette, Paris, 347 p.
- Garcia, J.-P., Dumont, A., (dir.), 2014.** *Loire et motte castrale. Etude géoarchéologique autour de Fleury-sur-Loire.* Rapport de fouille, 195 p.
- Garcin, M., Carcaud, N., Gautier, E., Burnouf, J., Castanet, C., Fouillet, N., 2006.** Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. Dans Allée P. et Lespez L. (Éds.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, Presses Universitaires Blaise Pascal, 225–236.
- Garnier, E., 2010.** *Les dérangements du temps. 500 ans de chaud et de froid en Europe.* Éditions PLON, 245 p.

- Gasowski, Z., 1994.** L'enfoncement du lit de la Loire. *Revue de Géographie de Lyon*, 69, 1, 41-46.
- Gaugain, L., 2018.** *Amboise. Un château dans la ville.* Presse Universitaires François-Rabelais, Tours, 455 p.
- Gautier, E., 1992.** *Recherches sur la morphologie et la dynamique fluviale dans le bassin du Buech, Alpes du sud.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris Nanterre, 439 p.
- Gautier, E., Piégay, H., Bertaina, P., 2000.** A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management : case study of the Loire and Allier rivers. *Geodinamica Acta*, 13, 1, 29-43. DOI : doi.org/10.1080/09853111.2000.11105360.
- Gautier, E., Bacchi, M., Barbier, J., Berton, J.-P., Chambaud, F., Couderchet, L., Denis, A., Dieu, N., Grosbois, C., Josselin, D., Kunesh, S., Lewis, N., Moine, A., Négrel, P., Oberti, D., Petelet-Giraud, E., Rousseau, O., de Sede, M.-E., 2001.** *La détermination d'un espace de liberté pour le système fluvial ligérien : identification et spatialisation des unités morphodynamiques et écologiques fonctionnelles dans les vals libres et endigués de la Loire, enjeux et acteurs sociaux.* Rapport final des travaux, Programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH), 210 p.
- Gautier, E., Grivel, S., 2006.** Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France. *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*. IAHS Publ., 306, 179 – 187.
- Gautier, E., Burnouf, J., Carcaud, N., Chambaud, F., Garcin, M., 2007.** Les relations entre les sociétés et le fleuve Loire depuis le Moyen Âge. Dans, M. Trémolières, A. Schnitzler, P. Silan. *Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales, pourquoi et comment ?*, Lavoisier, 83-97.
- Gautier, E., Hureau, C., Virmoux, C., Saulnier-Copard, S., Martins, G., Mesmin, E., Ferradou, L., 2022.** Réponse de la ripisylve à l'évolution pluri-décennale du fleuve Loire. *Enjeux écologiques et sociétaux des hydrosystèmes : 20 ans de recherche dans le bassin de la Loire*, Oct 2022, Orléans, France.
- Gauvard, C., 2014.** *La France au Moyen Âge du V<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle.* PUF, 3<sup>e</sup> édition, Paris, 650 p.
- Gazelle, F., Maronna, K., 2009.** Conservation et disparition des repères de crue – Exemple des repères apposés après la crue de 1930 en Lot-et-Garonne et dans le sud du Tarn. *Physio-Géo*, 3, 21-33. DOI : doi.org/10.4000/physio-geo.645.
- Geneslay, E. H., 1971.** *La Loire, crues et embâcles.* Nouvelles Editions Latines, Rennes, 110 p.
- Ghilardi, M., Sanderson, D., Kinnaird, T., Bicket, A., Balossino, S., Parisot, J.-C., Hermitte, C., Guibal, F., Fleury, J.T., 2015.** Dating the bridge at Avignon (south France) and reconstructing the Rhone River fluvial palaeo-landscape in Provence from medieval to modern times. *Journal of Archaeological Science : Reports*, 4, 336-354. DOI : 10.1016/j.jasrep.2015.10.002.
- Girerd F., 1842.** *Notice historique sur Decize, ancienne ville du Nivernois.* Imprimerie Duclos et Fay, Nevers, 115 p.
- Glaser, R., Riemann, D., Schönbein, J., Barriendos, M., Brázdil, R., Bertolin, C., Camuffo, 10D., Deutsch, M., Dobrovolny, P., van Engelen, A., Enzi, S., Halíčková, M., Koenig, S. J., Kotyza, O., Limanówka, D., Macková, J., Sghedoni, M., Martin, B., and Himmelsbach, I., 2010.** The variability of European floods since AD 1500. *Climatic Change*, 101, 235–256. DOI : 10.1007/s10584-010-9816-7.
- Gob, F., 2005.** *La lichénométrie appliquée à l'étude des rivières en gorge en milieu méditerranéen : Caractérisation de leurs paramètres dynamiques et de leur évolution géomorphologique durant le Petit Âge Glaciaire.* Thèse de doctorat en Géographie, Université de Liège, 302 p.

- Gob, F., Jacob, N., Bravard, J.-P., Petit, F., 2008.** The value of lichenometry and historical archives in assessing the incision of submediterranean rivers from the Little Ice Age in the Ardèche and upper Loire (France). *Geomorphology*, 94, 170-183. Doi: 10.1016/j.geomorph.2007.05.005.
- Goeldner-Gianella, L., Grancher, D., d'Avdeew, M., De Godoy Leski, C., Carré, C., Douillard, T., 2024.** Dykes and 'nature'. Results of a survey on the perception of dykes and their evolution in 21st century France. *Cybergeo*, 1073. Doi : 10.4000/12bn9.
- Grataloup, C., 2015.** *Introduction à la géohistoire*. Armand Colin, Paris, 224 p.
- Gregory, K.J., Starkel, I., Baker, V.R. (dir.), 1995.** *Global continental palaeohydrology*. Wiley, 334 p.
- Grisot, A.-N., 1997.** *Aspects du nivernais au Moyen-Age XI<sup>ème</sup>-XV<sup>ème</sup> siècles*. Département de la Nièvre Direction des Archives Départementales, Dossier documentaire n°10, 119 p.
- Grivel, S., 2008.** *La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris VIII, 517 p.
- Grivel, S., Gautier, E., 2012.** Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui. *Cybergeo*, 615. DOI : 10.4000/cybergeo.25451.
- Grivel, S., Nabet, F., Gautier, E., Temam, S., Gruwé, G., Gardaix, J., Lee, M., 2018.** Héritages et influences contemporaines des anciens ouvrages de navigation de Loire moyenne (France). *Vertigo*, 18, 3. DOI : 10.4000/vertigo.23121.
- Groparu, T., 2020.** *Trajectoire d'évolution d'un système deltaïque anthropisé : le delta du Danube – Étude couplée par les archives cartographiques et sédimentaire*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Toulouse 2 Jean Jaurès, 481 p.
- Gueneau, V., 1926.** Les rues de Nevers (suite). *Mémoire de la Société Académique du Nivernais*, 28, 122-165.
- Guillou, S., Maurin, J., 2005.** *Les levées de la Loire : des turcies au Plan Loire, huit siècles d'évolution*. Sciences Eaux & Territoires, (Spécial Ingénieries-EAT-21), 31–39.
- Guimarães Nobre, G., Jongman, B., Aerts, J., Ward, P. J., 2017.** The role of climate variability in extreme floods in Europe. *Environmental Research Letters*. 12, 084012. DOI : 10.1088/1748-9326/aa7c22.

## H

- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriaučiūnien, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., 2014.** Understanding flood regime changes in Europe : a state-of-art assessment. *Hydrol Earth Syst. Sci.* 18, 7, 2735–2772. DOI : 10.5194/hess-18-2735-2014.
- Helama, S., Jones, P. D., Briffa, K. R., 2017.** Dark Ages Cold Period: a literature review and directions for future research. *Holocene*, 27, 1600–1606. DOI : 10.1177/0959683617693898.
- Hess, K., Engel, M., Patel, T., Vakhrameeva, P., Koutsodendris, A., Klemt, E., Hansteen, T.H., Kempf, P., Dwanson, S., Schön, I., Heyvaert, V.M.A., 2024.** A 1500-year record of North Atlantic storm flooding from lacustrine sediments, Shetland Island (UK). *Journal of Quaternary Science*, 39, 1, 37-53. DOI : 10.1002/jqs.3568.

**Hohensinner, S., Lager, B., Sonnlechner, C., Haidvogel, G., Gierlinger, S., Schmid, M., Fridolin, K., Winiwarter, V., 2013.** Changes in water and land : the reconstructed Viennese riverscape from 1500 to the present. *Water History*, 5, 145-172. DOI : 10.1007/s12685-013-0074-2.

**Houbrecht, G., Hallot, E., Levecq, Y., Denis, A.-C., Van Campenhout, J., Peeters, A., Petit, F., 2013.** Images CM de Passega des rivières ardennaises. *Bulletin de la Société Géologique de Liège*, 61, 37-68.

**Hudson-Edwards, K., 2007.** Fluvial environments. Dans Perry, C., Taylor, K., (éd.) *Environmental Sedimentology*. Blackwell Publishing, 75-108.

**Hureau, C., 2023.** *Apport de l'étude des cartes anciennes et des bois historiques en contexte d'archéologie fluviale : synthèse des approches dendrologiques et potentiel de reconstruction paléoclimatique*. Mémoire de master 2 en géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 159 p.

**Hureau, C., en cours.** *Reconstructions des paléoclimats en Loire moyenne depuis le Moyen Âge à partir de bois archéologiques : approches dendroclimatologique et dendroisotopique*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

## I

---

**Imbart de la Tour, J., 1900.** *La Loire, étude générale et étude spéciale de ce fleuve en Nivernais*. G. Vallière, Nevers, 391 p.

**Ineson, S., Maycock, A.C., Gray, L.J., Scaife, A.A., Dunstone, N.J., Harder, J.W., Knight, J.R., Lockwood, M., Manners, J.C., Wood, R.A., 2015.** Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum. *Nature Communication*, 6, 7535. DOI : 10.1038/ncomms8535.

**Ingérop, Strates, 2020.** *Rehabilitation – aménagement du pont sur la vieille Loire à Decize. Études préalables. Analyse du contexte architectural et paysager*. Rapport, 19 p.

**IPCC, 2008.** *Le changement climatique et l'eau. Document technique VI du GIEC*. 228 p.

**IPCC, 2013.** *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 p.

**IPCC, 2023.** *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. Geneva, Switzerland, 35-115. DOI : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

## J

---

**Jacob-Rousseau, N., 2003.** *Les vallées en gorges de la Cévenne vivaraise, Montagne de sable et château d'eau*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris IV Sorbonne, 459 p.

**Jacob-Rousseau, N., Astrade, L., 2014.** Phénomènes torrentiels et transferts sédimentaires autour du massif du Tanargue, de l'âge du fer au petit âge de glace (PAG) (Cévennes vivaraises, France). *Méditerranée*, 122, 81-97. DOI : 10.4000/mediterranee.7159.

**Jacob-Rousseau, N., 2024.** *Quelques propositions pour la géohistoire de l'environnement*. Dossier d'habilitation à diriger des recherches, 2 vol., 308 + 320 p.

**Jalon-Rojas, I., Castelle, B., 2021.** Climate Control of Multidecadal Variability in River Discharge and Precipitation in Western Europe. *Water*, 13, 257. DOI : 10.3390/w13030257.

**Joly, D., Brossar, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., Wavresky, P., 2010.** Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo*, 501. DOI : 10.4000/cybergeo.23155.

**Jones, A.F., Lewin, J., Macklin, M.G., 2010.** Flood series data for the later Holocene : Available approaches, potential and limitations from UK alluvial sediments. *The Holocene*, 20, 7, 1123–1135. DOI : 10.1177/0959683610369501.

**Jones, P.D., Osborn, T.J., Briffa, K.R., 2001.** The evolution of climate over the last millennium. *Science* 292, 662–666. DOI : 10.1126/science.1059126.

**Josset, D., Aubourg, V., 2021.** Le val de Blois, du III<sup>e</sup> siècle avant notre ère à l’an Mil. Des territoires à la ville, des confins aux réseaux. *Archéopages*, 48, 54-63. DOI : 10.4000/archeopages.10170.

**Jullien, A., 1883.** *La Nièvre à travers le passé*. Michot, Nevers, 318 p.

## K

---

**Kjeldsen, T. R., Macdonald, N., Lang, M., Mediero, L., Al-buquerque, T., Bogdanowicz, E., Brázdil, R., Castellarin, A., David, V., Fleig, A., G ́ul, G. O., Kriaciuniene, J., Kohnová, S., Merz, B., Nicholson, O., Roald, L. A., Salinas, J. L., Sarauskiene, D., Šraj, M., Strupczewski, W., Szolgay, J., Toumazis, A., Vanneuville, W., Veijalainen, N., Wilson, D., 2014.** Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation. *Journal of Hydrology*. 517, 963–973, DOI : 10.1016/j.hydrol.2014.06.038.

**Knighton, D., 1984.** *Fluvial Forms and Processes*. Edward Arnold, Baltimore, 218 p.

**Kondolf, G.M., 1997.** Hungry Water : Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21, 4, 533-551. DOI : 10.1007/s002679900048.

## L

---

**Labbé, T., 2017.** *Les catastrophes naturelles au Moyen Âge*. CNRS éditions, Paris, 352 p.

**Labbé, T., Pfister C., Brönnimann S., Rousseau, D., Franke, J., Bois, B., 2019.** The longest homogeneous series of grape harvest dates, Beaune 1354-2018, and its significance for the understanding of past and present climate. *Climate of the Past*, 15, 1485–1501. DOI : 10.5194/cp-15-1485-2019.

**Labbé, T., 2022.** La catastrophe comme objet de gouvernement : le développement de la notion de “calamité publique” dans la pensée politique en France et en Italie (XV<sup>e</sup> – XVI<sup>e</sup> siècle). *Laboratoire italien*, 29. DOI : 10.4000/laboratoireitalien.9200.

**Lamb, H.H., 1965.** The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1, 13-37. DOI : 10.1016/0031-0182(65)90004-0.

**Lamb, H.H., 1977.** *Climate : Past, Present and Future*. 2 vol. , Methuen, London, 648 p. DOI : 10.4324/9780203472521.

**Lamb, H.H., 1984.** Climate in the last thousand years: natural climatic fluctuations and change. Dans Flohn, H., Fantechi, R., (éds.), *The Climate of Europe: Past, Present and Future*, D. Reidel Publ. Cy, Dordrecht.

**Lane, E.W., 1955.** Design of stable channels. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.*, 120, 1234-1260.

**Lang, M., Coeur, D., Lallement, C., Nault, R., 1998.** Valorisation de l’information historique pour la prédétermination du risque d’inondation : application au bassin du Guiers. *Sciences Eaux & Territoires*, 3, 13, 3-14.

- Lang, M., Cœur, D., Bard, A., Bacq, B., Backer, T., Bignon, E., Blanchard, R., Bruckmann, L., Delserieys, M., Edelblutte, C., Merle, C., 2012.** Les inondations remarquables en France au XXe siècle : premiers éléments d'analyse issus de l'enquête EPRI 2011. Congrès SHF : « Evènements extrêmes fluviaux et maritimes », Paris, 1-2 février 2012, 1-12.
- Larue, J.P., 2004.** Morphodynamique fluviale actuelle d'origine anthropique : exemples dans le bassin de la Loire (France). *Géomorphologie*, 10, 2, 127-138. DOI : 10.3406/morfo.2004.1209.
- Laurent-Dehecq, A., 2009.** *Saint-Denis-enVal – Voie Zone Horticole, rue du Château*. ADLFI. Archéologie de la France Informations, Centre-Val de Loire, 2 p.
- Le Griel, A., 1980.** Âge et principales étapes du dépôt des Sables et Argiles du Bourbonnais. *Revue de géologie dynamique et de géographie physique*, 24, 425-433.
- Le Roy Ladurie, E., 1967.** *Histoire du climat depuis l'An Mil*. Flammarion, Paris, 371 p.
- Le Roy Ladurie, E., 2004.** *Histoire humaine et comparée du climat. Tome 1. Canicules et glaciers XIIIe – XVIIIe siècles*. Fayard, Paris, 746 p.
- Le Roy Ladurie, E., 2006.** *Histoire humaine et comparée du climat. Tome 2. Disettes et révolution 1740-1860*. Fayard, Paris, 612 p.
- Le Roy Ladurie, E., Daux, V., Luterbacher, J., 2006.** Le climat de Bourgogne et d'ailleurs XIVE-XXe siècle. *Revue Histoire, économie et société*. 25, 3, 421-436. DOI : 10.3917/hes.063.0421.
- Lecœur, Y., 2011.** La Loire moyenne naviguée au XIXe siècle : représentations, réglementation et aménagement. *Vertigo*, Hors-série 10, 1-10. DOI : 10.4000/vertigo.11371.
- Lecœur, Y., 2023.** *La Loire portant bateaux : le défi de la navigabilité, XVIIIe-début du XXe siècle*. Édition Rabelais, 440 p.
- Leguay, J.-P., 1969.** *La ville de Rennes au XVe siècle à travers les comptes des miseurs*. Klincksieck, Paris, 356 p.
- Leguay, J.-P., 2002.** *L'eau dans la ville au Moyen Âge*. Presses universitaires de Rennes, Rennes, 493 p.
- Leguay, J.-P., 2005.** *Les catastrophes au Moyen Âge*. Nouvelle édition de 2019, Éditions Jean-Paul Gisserot, 246 p.
- Lescure, S., Arnaud-Fassetta, G., Cordier, S., 2011.** Sur quelques modifications hydromorphologiques dans le Val de Seine (Bassin parisien, France) depuis 1830 : quelle part accorder aux facteurs hydrologiques et anthropiques ? *EchoGéo*, 18, 1-18. DOI : 10.4000/echogeo.12658.
- Lescure, S., 2015.** *La Garonne maritime à l'holocène : dynamique, environnements et occupation humaine*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 266 p.
- Lespez, L., Viel, V., Rollet, A.J., Delahaye, D., 2015.** The anthropogenic nature of present-day low energy rivers in western France and implications for current restoration projects. *Geomorphology*, 251, 64-76. DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.05.015.
- Lestel, L., Eschbach, D., Meybeck, M., Gob, F., 2021.** The evolution of the Seine Basin water Bodies through historical maps. Dans Lestel, L., Eschbach, D., Meyback, M., (éds.), *The Seine River Basin*, Hdb Env Chem, 29-57. DOI : 10.1007/698\_2019\_396.

- Leteinturier, B., Engels, P., Petit, F., Chiffaut, A., Malaisse, F., 2000.** Morphodynamisme d'un tronçon de Loire Bourbonnaise depuis le XVIIIe siècle. *Géomorphologie*, 6, 4, 239-251. DOI : 10.3406/morfo.2000.1069.
- Lewis, N., Gautier, E., 2004.** Le Domaine public fluvial, un héritage du passé qui module aujourd'hui la réflexion sur la gestion de la biodiversité – Les zones humides de la Loire sous observation. Dans Burnouf J., Leveau P.(éd.) *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*, CTHS, 343-354.
- Lino, M., Mériaux, P., Royet, P., 2000.** *Méthodologie de diagnostic des digues : appliquée aux levées de la Loire moyenne*. Éd. Cemagref, Antony, 223 p.
- Litzenburger, L., 2015.** *Une ville face au climat*. PUN – Editions Universitaires de Lorraine, 487 p.
- Ljungqvist, F.C., 2010.** A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia. *Geografiska Annaler*, 92 A, 3, 339–351. DOI : 10.1111/j.1468-0459.2010.00399.x.
- Luterbacher, J., Werner, J.P., Smerdon, J.E., Fernández-Donado, L., González-Rouco, F.J., Barriopedroi, D., Ljungqvist, F.C., Büntgen, U., Zorita, E., Wagner, S., Esper, J., McCarroll, D., Toreti, A., Frank, D., Jungclauss, J.H., Barriendos, M., Bertolin, C., Bother, O., Brázdil, R., Camuffo, D., Dobrovolný, P., Gagen, M., Garcia-Bustamante, E., Ge, Q., Gómez-Navarro, J.J., Guiot, J., Hao, Z., Hegerl, G.C., Holmgren, K., Klimenko, V.V., Martín-Chivelet, J., Pfister, C., Roberts, N., Schindler, A., Schurer, A., Solomina, O., von Gunten, L., Wahl, E., Wanner, H., Wetter, O., Xoplaki, E., Yuan, N., Zanchettin, D., Zhang, H., Zerefos, C., 2016.** European summer temperatures since Roman times. *Environmental Research Letters*. 11, 024001. DOI : 10.1088/1748-9326/11/2/024001.

## M

---

- Macdonald, N., 2006.** An underutilized resource: historical flood chronologies a valuable resource in determining periods of hydro-geomorphic change. *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial System (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006)*. IAHS Publ. 306, 120-126.
- Macdonald, N., Sangster, H., 2017.** High-magnitude flooding across Britain since AD 1750. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21, 3, 1631–1650. DOI : 10.5194/hess-21-1631-2017.
- Macklin, M.G., Jones, A.F., Lewin, J., 2010.** River response to rapid Holocene environmental change : evidence and explanation in British catchments. *Quaternary Science Reviews*, 29, 13, 1555-1576. DOI : 10.1016/j.quascirev.2009.06.010.
- Malavoi, J.-R., Bravard, J.-P., 2010.** *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. ONEMA, 228 p.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S., Ni, F., 2008.** Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *PNAS*, 105, 36, 13252-13257. DOI : 10.1073/pnas.0805721105.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F., 2009.** Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326, 1256 – 1260. DOI : 10.1126/science.1177303.
- Mantellier, P., 1864-1869.** *Histoire de la communauté des marchands fréquentant la rivière de la Loire et fleuves descendant en icelle*. 3 vol., G. Jacob, Orléans, 1551 p.

- Martins, G., 2022.** *Étude des évolutions de la dynamique fluviale de la Loire entre Thareau et Nevers du XVIII<sup>ème</sup> au XXI<sup>ème</sup> siècle.* Mémoire de master en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 160 p.
- Massard-Guilbaud, G., 2002.** De la « part du milieu » à l'histoire de l'environnement. *Le Mouvement Social*, 200, 3, 64-72. DOI : 10.3917/lms.200.0064.
- Mauret-Cribellier, V., 2020.** Prévenir le naufrage : le balisage sur la Loire moyenne au XIXe siècle. Dans Serna, S., (dir.), *Épaves et naufrages en Loire. Archéologie de l'accident en eau douce (xiv<sup>e</sup>-xix<sup>e</sup> siècle).* Revue archéologique du Centre de la France, 76<sup>e</sup> supplément, 50-56.
- Mélo A., Wilhelm B., Giguet-Covex C., Arnaud F., 2015.** Construire une chronique d'inondations : événements hydrologiques et histoire climatique dans le bassin de l'Arve (Alpes du Nord, France) entre les XVIIIe et XXIe siècles, dans Rey, P.-J., Dumont, A., (dir.), *L'Homme et son environnement : des lacs, des montagnes et des rivières : Bulles d'archéologie offertes à André Marguet*, Dijon, ARTEHIS Éditions.
- Menjot, D., 2019.** Faire l'histoire des villes médiévales à travers leurs comptabilités. *Comptabilité(S)*, 12, 18 p.
- Mercier, D., 2013.** Inondations. Dans Croix A. et al., (éds.), *Dictionnaire de Nantes*, Presses Universitaires de Rennes, 538-540.
- Merle, M., 1974.** *Decize et son histoire. Edition du syndicat d'initiative de Decize.* Decize, 269 p.
- Mesmin, E., 2020.** *Recensement et étude des crues débordantes du Cher moyen du XV<sup>ème</sup> au XXI<sup>ème</sup> siècle.* Mémoire de master 2 en Géographie, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 189 p.
- Mesmin E., Gautier E., Arnaud-Fassetta G., Foucher M., Martins G., Gob F., 2024.** Characterization of periods of high and low hydrological activity in the Loire River, France, between the 14th and mid-19th centuries. *Journal of Hydrology*, 633, 130932. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2024.130932.
- Metzger, A., Desarthe, J., 2017.** Regarde s'il pleut. Effets d'inondations dans la peinture française (1856-1910). *Communications*, 101, 119-141. DOI : 10.3917/commu.101.0119.
- Miejac, E., 1999.** La Loire aménagée du Moyen Âge à l'époque Moderne entre Cosne-sur-Loire et Chaumont-sur-Loire. *Archéologie médiévale*, 29, 169-190. DOI : 10.3406/shmes.2004.1868.
- Miejac, E., De Saulce, A., Yeny, E., 2009.** Les pêcheries de fleuves et de rivières. Aménagements médiévaux et modernes dans le centre et l'ouest de la France. *Archéopages*, 26, 38-46.
- Miramont, C., Guilbert, X., 1997.** Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en moyenne Durance (France du Sud-Est). *Géomorphologie*. 3, 4, 325–337. DOI : 10.3406/morfo.1997.931.
- Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E., Vidal, J.-P., 2010.** La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences*, BRGM, 12, 78-87.
- Morin, E., Rodier, X., Laurent-Dehecq, A., Macaire, J.-J., 2014.** Morphological and sedimentary evolution of an alluvial floodplain in an urban area : geoarchaeological approaches and applications (Tours, France). *Journal of Archaeological Science*, 46, 255-269. DOI : 10.1016/j.jas.2014.03.021.
- Morin, E., Hulin, G., Laurent-Dehecq, A., Gardère, P., Josset, D., Aubourg, V., 2024.** Long-term fluvial evolution and human occupation in urban fluvial contexts : a geoarchaeological case study from Blois (middle Loire River, France). Dans Borderie Q., Salomon F., (éd.), *Urban Géochronology*, CNRS éditions, 85-102.

**Morsel, J. (dir.), 2018.** *Communautés d'habitants au Moyen Âge (XI<sup>e</sup> – XV<sup>e</sup> siècles)*. Éditions de la Sorbonne, Paris, série du LAMOP, 584 p.

**Munoz, S. E., Gruley, K. E., Massie, A., Fike, D. A., Schroeder, S., Williams, J. W., 2015.** Cahokia's emergence and decline coincided with shifts of flood frequency on the Mississippi River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 20, 6319–6324. DOI : 10.1073/pnas.1501904112.

**Munoz, S.E., Giosan, L., Therell, M.D., Remo, J.W.F., Shen, Z., Sullivan, R.M., Wiman, C., O'Donnell, M., Donnelly, J.P., 2018.** Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. *Nature*, 556, 95-107. DOI : 10.1038/nature26145.

## N

---

**Nabet, F., 2013.** *Étude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 409 p.

**Nabet, F., Grivel, S., Gautier, E., 2016.** Le rôle des aménagements sur la réponse topo-sédimentaire d'un cours d'eau à différents événements hydrologiques, la Loire moyenne. *Géomorphologie*, 22, 2, 211-225. DOI : 10.4000/geomorphologie.11398.

**Nehling P., 2010.** *Géologie du bassin de la Loire*, Géosciences, 12, 10-23.

**Neukom, R., Steiger, N., Gomez-Navarro, J.J., Wang, J., Werner, J.P., 2019.** No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, 571, 550-554. Doi: 10.1038/s41586-019-1401-2.

**Noizet, H., 2003.** *Pratique spatiales, représentations de la ville et fabrique urbaine de Tours : chanoines, moines et laïcs à St Martin et St Julien*. Thèse de doctorat en Histoire, Université de Tours, 3 vol., 862 p.

**Noizet, H., Carcaud, N., Garcin, M., 2004.** Rive droite rive gauche : la Loire et Tours (XII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> siècles). Dans Burnouf, J., Leveau, P., (éd.), *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes (actes du colloque d'Aix-en-Provence tenu en avril 2002)*, coll. Archéologie et histoire de l'art, 19, 137-155.

## O

---

**Onde, H., 1923.** Les crues de l'Allier. *Revue de Géographie Alpine*. 11, 301–372. DOI : 10.3406/rga.1923.5511.

**Ortega, P., Lehner, F., Swingedouw, D., Masson-Delmotte, V., Raible, C.C., Casado, M., Yiou, P., 2015.** A model-tested North Atlantic Oscillation reconstruction for the past millennium. *Nature*. 523, 71–74. DOI : 10.1038/nature14518.

**Ostrowski, P., Falkowski, T., Kochanek, K., 2023.** Reconstructing parameters of the Holocene paleofloods in alluvial lowland river valleys – An example from the Bug valley (East Poland). *Journal of Hydrology*, 624, 129930. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2023.129930.

## P

---

**Pang, H., Jia, Y., Li, F., Qin, L., Chen, L., 2023.** An improved method for paleoflood reconstruction from core sediments in the upper Yellow River. *Frontiers in Earth Science*, 11. DOI : 10.3389/feart.2023.1149502.

- Pardé, M., 1964.** Etudes potamologiques sur la Loire et ses affluents. *Norois*, 44, 183 p.
- Parmentier C.-H., 1842.** *Archives de Nevers, ou Inventaire Historique des Titres de la Ville*. Duclos et Fay, Nevers, 338 p.
- Parris, A.S., Bierman, P.R., Noren, A.J., Prins, M.A., Lini, A., 2010.** Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States. *Journal of Paleolimnology*, 43, 1, 29-49. DOI : 10.1007/s10933-009-9311-1.
- Passega, R., 1957.** Textures as characteristic of clastic deposition. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9, 1952-1984.
- Passega, R., 1964.** Grain size representation by CM pattern as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 4, 830-847. DOI : 10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D.
- Pastre, J.-F., Leroyer, C., Limondin-Lozouet, N., Orth, P., Chaussé, C., Fontugne, M., Gauthier, A., Kunesh, S., Lejeune, Y., Saad, M.C., 2002.** Variations paléoenvironnementales et paléohydrologie durant les 15 derniers millénaires : les réponses morphosédimentaire des vallées du Bassin Parisien (France). Dans Bravart, J.P., Magny, M., (éd.), *Les fleuves ont une histoire. Paléoenvironnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*, 29-44.
- Pastre, J.-F., Leroyer, C., Le Jeune, Y., Bensaadoue S., 2015.** L'évolution de l'environnement dans le centre du bassin parisien du Néolithique ancien à la période moderne. Les apports de l'étude morphosédimentaire et palynologique des fonds de vallées. Actes du colloque de Créteil, 3 et 4 juin 2010, 3<sup>e</sup> supplément revue archéologique d'Île-de-France, 23-42.
- Pastre, J.-F., Leroyer, C., Limondin-Lozouët, N., Antoine, P., Chaussé, C., Gauthier, A., Granai, S., Le Jeune, Y., Wuscher, P., 2019.** Chapitre VI. L'Holocène du Bassin parisien (France) : Apports de l'étude géoécologique et géoarchéologique des fonds de vallée. In G. Amaud-Fassetta et N. Carcaud (eds.), *La géoarchéologie française au XXI<sup>e</sup> siècle*, CNRS Éditions, Paris, 89-106.
- Peiry, J.-L., 1987.** Channel degradation in the middle Arve river, France. *Regulated Rivers research & management*, 1, 183-188. DOI : 10.1002/trr.3450010208.
- Peiry, J.-L., 1988.** *Dynamique des sédiments sur un cours d'eau intra-montagnard : l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Lyon 3, 378 p.
- Peiry, J.-L., Salvador, P.-G., Nouguier, F., 1994.** L'incision des rivières dans les Alpes du nord : état de la question. *Géocarrefour*, 69, 1, 47-56. DOI : 10.3406/geoca.1994.4237.
- Peña, J.C., Schulte, L., 2019.** A paleoclimate model of the atmospheric variability related to large summer floods in the Hasli-Aare (Swiss, Alps) from the AD 1300 to 2010. *Global Planetary Change*, 190, 103191. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2020.103191.
- Peng, F., Prins, M.A., Kasse, C., Cohen, K.M., Van der Putten, N., Van der Lubbe, J., Toonen, W.H.J., Van Balen, R.T., 2019.** An improved method for paleoflood reconstruction and flooding phase identification, applied to the Meuse River in the Netherlands. *Global and Planetary Change*, 177, 213-224. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2019.04.006.
- Peng, F., Kasse, C., Prins, M.A., Ellenkamp, R., Krasnoperov, M.Y., van Balen, R.T., 2020.** Paleoflooding reconstruction from Holocene levee deposits in the lower Meuse valley, the Netherlands. *Geomorphology* 352, 107002. DOI : 10.1016/j.geomorph.2019.107002.
- Petit-Dorot, B., 2021.** *Un village et la Loire au XIX<sup>e</sup> siècle. Port Thareau à Saint-Hilaire-Fontaine*. Camosine – Les Annales des Pays Nivernais, 182, 36 p.
- Pfister, C., Brázdil, R., 1999.** Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and its Social Dimension: A Synthesis. *Climatic Change*, 43, 5-53. DOI : 10.1023/A:1005585931899.

**Pfister, C., Wanner, H., 2021.** *Climate and society in Europe. The Last Thousand Years.* Haupt, 397 p.

**Piana, J., Carcaud N., Cyprien-Chouin, A.-L., Visset, L., Leroy, D., 2009.** Dynamique paysagère tardiglaciaire et holocène dans la vallée du Loir à Pezou (Loir-et-Cher) : développements méthodologiques et premiers résultats. *Noröis*, 213, 73-88. DOI : 10.4000/noröis.3047.

**Piana, J., Carcaud N., Castanet, C., 2016.** Géoarchéologie de la vallée du Loir : dynamiques fluviales Tardiglaciaire et Holocène, interactions sociétés/milieus. Dans Castanet, C., (dir.), *Rapport scientifique du programme AGES (Ancient Geomorphological EvolutionS)*, Rapport final, CNRS – INEE; European Long-Term Ecosystem Research Network, 333-357.

**Pichard, G., Arnaud-Fassetta, G., Moron, V., Roucaute, E., 2017.** Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300-2000) based on documentary and instrumental sources. *Hydrological Sciences Journal*. 62,11, 1772–1795. DOI : 10.1080/02626667.2017.1349314.

**Poussereau, L.-M., 1891.** *Histoire de Decize et de ses environs.* Imp. Typo. Et Litho. Eugène Motte, Issoudun, 114 p.

## R

---

**Ramond, S., 2015.** *Réponses hydrologiques de la Loire moyenne aux changements environnementaux. Formation des débits et fonctionnement d'une plaine alluviale : approches hydrologiques et géochimiques multi-scalaire.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 8, 554 p.

**Rapuc, W., Sabatier, P., Arnaud, F., Palumbo, A., Develle, A.-L., Reyss, J.-L., Augustin, L., Régnier, E., Piccin, A., Chapron, E., Dumoulin, J.-P., Grafenstein, U.V., 2019.** Holocene-long record of flood frequency in the Southern Alps (Lake Iseo, Italy) under human and climate forcing. *Global Planetary Change*, 175, 160–172. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2020.103191.

**Renard, B., 2023.** Use of a national flood mark database to estimate flood hazard in the distant past. *Hydrological Sciences Journal*, 68, 8, 1078-1094. DOI : 10.1080/02626667.2023.2212165.

**Retsö, D., 2015.** Documentary evidence of historical floods and extreme rainfall events in Sweden 1400–1800. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19, 1307–1323. DOI : 10.5194/hess-19-1307-2015.

**Rigot, J.-B., Gay-Ovejero, I., Hirschberger, F., Paillet, N., Bruand, E., 2023.** Du terrain au laboratoire, proposition d'un protocole d'analyse des remblais en milieu urbain : le cas du ruau Sainte Anne (Tours). Dans Fechner, K., Deák, J., Carpentier, C., Blin, O., Husi, Ph., Liard, M., Rigot, J.-B., *Lire le sol en archéologie : pratiques de terrain et regards croisés*, 29 nov. – 1<sup>er</sup> dec. 2023, Tours, Inrap / UMR 7324 CITERES-LAT. DOI : 10.34692/ddc9-2m44.

**Rixhon, G., 2022.** A question of time : historical overview and modern thought on Quaternary dating methods to produce fluvial chronologies. *Quaternaire*, 33, 2. DOI : 10.4000/quaternaire.16705.

**Robert, A., 1845.** Les atterrissements de la Loire à Orléans. *Bulletin société géologique de France*, 2, 2 p.

**Roger, D., 1934.** *Le Val de Loire. Étude de géographie régionale.* Arrault et Cie, Tours, 752 p.

**Roger, J., Gaudry, F., Marteau, P., Quesnel, F., Chèvremont, P., Jauffret, D., 2010.** *Carte géologique de la France à 1/50 000 Decize.* 185 p.

**Rossiaud, J., 2007.** *Le Rhône au Moyen Âge.* Aubier, Collection historique, Paris, 648 p.

- Rouchon U., 1907.** Recherches sur les inondations de la Loire supérieure et de ses affluents dans le département de la Haute-Loire. Mémoires et procès-verbaux de la société scientifique et agricole de la Haute-Loire, 15, 335–428.
- Rumsby, B.T., Macklin, M.G., 1994.** Channel and floodplain response to recent abrupt climate change : The tyne basin, Northern England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 499-515. DOI : 10.1002/esp.3290190603
- Rusnák, M., Kaňuk, J., Kidová, A., Lehotský, M., Piégay, H., Sládek, J., Michaleje, L., 2024.** Inferring channel incision in gravel-bed rivers : Integrating LiDAR data, historical aerial photographs and drone-based SfM topo-bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49, 8, 2475-2497. DOI : 10.1002/esp.5840.

## S

- Sabatier, P., Wilhelm, B., Francesco Ficetola G., Moiroux, F., Poulenard, J., Develle, A.-L., Bichet, A., Chen, W., Pignol, C., Reyss, J.-L., Gielly, L., Bajard, M., Perrette, Y., Malet, E., Taberlet, P., Arnaud, F., 2017.** 6-kyr record of flood frequency and intensity in the western Mediterranean Alps – Interplay of solar and temperature forcing. *Quaternary Science Reviews*, 170, 121-135.
- Salinas, J. L., Kiss, A., Viglione, A., Viertl, R., Bloschl, G., 2016.** A fuzzy Bayesian approach to flood frequency estimation with imprecise historical information. *Water Resource Research*, 52, 6730–6750. DOI : 10.1002/2016WR019177.
- Salvador, P.-G., 1991.** *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Lyon 3, 498 p.
- Salvador, P.-G., 2005.** *Géomorphologie et géoarchéologie des plaines alluviales (piémont alpin et nord de la France)*. Habilitation à diriger des recherches, texte de synthèse, 298 p.
- Salvador, P.-G., Berger, J.-B., 2014.** The evolution of the Rhone River in the Basses Terres basin during the Holocene (Alpine foothills, France). *Geomorphology*, 204, 71-85.
- Salvador, P.-G., 2016.** Caractérisation des remblaiements sédimentaires de six paléochenaux de la plaine alluviale du Rhône par la méthode granulométrique de Passega (Basses Terres, Ain, Isère). *Bulletin de la Société Géologique de Liège*, 67, 107-124. DOI : 10.25518/0770-7576.4492.
- Santisteban, J.I., Mediavilla, R., Galán de Frutos, L., López Cilla, I., 2019.** Holocene floods in a complex fluvial wetland in central Spain: environmental variability, climate and time. *Global Planetary Change*, 181, 102986. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2019.102986.
- Savy, P., 2012.** *L'Europe des rois et des princes 1215-1492*. Cursus, Armand Colin, Paris, 192 p.
- Schemmama, V., 2020.** Un inventaire des naufrages entre 1382 et 1652 à travers l'ouvrage de Philippe Mantellier. Dans Serna, S., (dir.), *Épaves et naufrages en Loire. Archéologie de l'accident en eau douce (xiv<sup>e</sup>-xix<sup>e</sup> siècle)*. Revue archéologique du Centre de la France, 76<sup>e</sup> supplément, 80-88.
- Schillereff, D.N., Chiverrell, R.C., Macdonald, N., Hooke, J.M., 2014.** Flood stratigraphies in lake sediments : A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 17-37. DOI : 10.1016/j.earscirev.2014.03.011.
- Schillereff, D. N., Chiverrell, R. C., Macdonald, N., Hooke, J., Welsh, K. E., Piliposian, G., Croudace, I. W., 2019.** Convergent human and climate forcing of late-Holocene flooding in Northwest England. *Global and Planetary Change*. 182, 102998. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2019.102998.

- Schulte, L., Schillereff, D., Santisteban, J.I., 2019.** Pluridisciplinary analysis and multi-archive, reconstruction of paleofloods: Societal demand, challenges and progress. *Global and Planetary Change*, 177, 225–238. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2019.03.019.
- Schumm, S.A., 1977.** *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New York, 338 p.
- Septsault, M.-L., 2022.** *Le beau XIIIe siècle. 1180-1270 Royaume de France, Empire allemande et Italie*. Atlante Eds, Paris, 300 p.
- Serna, V., (dir.), 2010.** *La Loire dessus dessous. Archéologie d'un fleuve de l'âge du Bronze à nos jours*. Editions Faton, 176 p.
- Serna, S., (dir.), 2020.** *Épaves et naufrages en Loire. Archéologie de l'accident en eau douce (xiv<sup>e</sup>-xix<sup>e</sup> siècle)*. Revue archéologique du Centre de la France, 76<sup>e</sup> supplément, 325 p.
- Servain, S., Carcaud, N., Gautier, E., 2023.** Construction et évolution de la Zone Atelier Loire, une trajectoire développant l'interdisciplinarité. *Dynamiques environnementales*, 51. DOI : 10.5194/cp-18-1083-2022.
- Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.].** *Reconstitution de débits des crues anciennes à Givry-Fourchambault, Nevers, Le Veudre. Etablissement de la loi de fréquences rares pour les crues*, document du service hydrologique centralisateur bassin Loire-Bretagne, Orléans, 35 p + annexes.
- Sheffer, N.A., Enzel, Y., Benito, G., Grodek, T., Poart, N., Lang, M., Naulet, R., Cœur, D., 2003.** Paleofloods and historical floods of the Ardèche River, France. *Water Resources Research*, 39, 12, 13 p. DOI : 10.1029/2003WR002468.
- Sridhar, A., Bhushan, R., Balaji, D., Band, S., Chamyal, L.S., 2016.** Geochemical and Sr-Nd isotopic variations in palaeoflood deposits at mainstem-tributary junction, western India : Implications on late Holocene flood events. *Catena*, 139, 32-43. Doi : 10.1016/j.catena.2015.12.004.
- Steinmann, R., 2015.** *L'influence climatique et anthropique sur trois cours d'eaux bourguignons : géoarchéologie de sites de franchissement sur la Loire, la Saône et le Doubs au cours de l'Holocène*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, Université de Bourgogne, 2 tomes, 423 + 169 p.
- Steinmann, R., Garcia, J.-P., Dumont, A., Quiquerez, A., 2017.** Aspects méthodologiques de l'approche intégrée des comblements postglaciaires : apports pour la reconstitution de la dynamique fluviale de la Loire au cours de l'Holocène. *Géomorphologie*, 23, 1, 83-104.
- Stoffel, M., Corona, C., Ludlow, F., Sigl, M., Huhtamaa, H., Garnier, E., Helama, S., Guillet, S., Crampsie, A., Kleemann, K., Camenisch, C., McConnell, J., Gao, C., 2022.** Climatic, weather, and socio-economic conditions corresponding to the mid-17th-century eruption cluster. *Climate of the Past*, 18, 1083-1108. DOI : 10.5194/cp-18-1083-2022.
- Straffin, E., Blum, M., Colls, A., Stokes, S., 1999.** Alluvial stratigraphy of the Loire and Arroux rivers (Burgundy, France). *Quaternaire*, 10, 4, 271-282. DOI : 10.3406/quate.1999.1648.
- Straffin E., 2000.** Fluvial response to climate change and human activities, Burgundy, France, Thèse de doctorat en Géographie, Université du Nebraska, 236 p.
- Straffin, E., Blum, M., 2002.** Holocene fluvial response to climate change and human activities ; Burgundy, France. *Netherlands Journal of Geosciences*, 81, 3-4, 417-430. DOI : 10.1017/S0016774600022691.

**Surian, N., 2022.** Fluvial Changes in the Anthropocene : A European Perspective. Dans Shroder, J.F., (éd.), *Treatise on Geomorphology*, Second Edition, Volume 9, 561-583. DOI : 10.1016/B978-0-12-818234-5.00109-7.

## T

---

**Temam, S., Grivel, S., 2009.** De la carte outil à la carte source. Représentation et gestion du fleuve Loire aux 18<sup>e</sup> – 19<sup>e</sup> siècles. *Comité Français de Cartographie*, 199, 67-86.

**Temam, S., 2012.** Stratégies de gestion du risque inondation en Loire Nivernaise, ouvrages d'art et ingénieurs depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 8, 506 p.

**Thonniet, P., 2021.** *La fabrique du paysage dans le val de Cisse à l'Holocène : une approche au croisement des sources historiques, archéologiques et environnementales.* Thèse de doctorat en Archéologie, Université de Tours, volume 1, 587 p.

**Thorndycraft, V.R., Benito, G., 2006.** Late Holocene fluvial chronology of Spain : The role of climatic variability and human impact. *Catena*, 66, 34-41. DOI : 10.1016/j.catena.2005.07.007.

**Thoumas, P., 2019.** Histoire des crues du Roubion (Drôme, France) depuis 1501 AD, une approche hydrologique des fluctuations climatiques sur cinq siècles. *Physio-Géo*, 14, 87-111. DOI : 10.4000/physio-geo.8984.

**Toonen, W.H.J., 2013.** *A Holocene flood record of the Lower Rhine.* Utrecht Studies in Earth Sciences, 41, 204 p.

**Toonen, W.H.J., Winkels, T.G., Cohen, K.M., Prins, M.A., Middelkoop, H., 2015.** Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling. *Catena*, 130, 69-81. DOI : 10.1016/j.catena.2014.12.004.

**Toonen, W.H.J., Foulds, S.A., Macklin, M.G., Lewin, J., 2017.** Events, episodes, and phases : Signal from noise in flood-sediment archives. *Geology*, 45 (4), 331-334. DOI : 10.1130/G38540.1.

**Tramblay, Y., Somot, S., 2018.** Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151, 286-302. DOI : 10.1007/s10584-018-2300-5.

**Tramblay, Y., Ribes, A., Somot, S., Neppel, L., Lucas-Picher, P., Vinet, F., Sauquet, E., 2021.** Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en Méditerranée. *Hydroscience journal*, 107, 1912971. DOI : 10.1080/00186368.2021.1912971.

**Tresvaux de Berteux, M.F., 1855.** *Annales de la ville de Decize.* P.-U. Enaut, Moulins, 115 p.

**Trouet, V., Esper J., Graham N., E., Baker A., Scourse, J. D., Frank, D. C., 2009.** Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. *Science*, 324, 78-80. DOI : 10.1126/science.1166349.

## V

---

**Valadas, B., 1984.** *Les hautes terres du Massif Central français : contribution à l'étude des morphodynamiques récentes sur versants cristallins et volcaniques.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2 vol., 927 p.

**Valette, P., 2011.** Changements environnementaux et adaptation des sociétés dans la moyenne vallée de la Garonne (XVIII<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui). *Sud-Ouest Européen*, 32, 35-51. DOI : 10.4000/soe.668.

- Valette, P., Carozza, J.-M., 2013.** Toulouse face à la Garonne : emprise de l'urbanisation dans la plaine inondable et géohistoire des aménagements fluviaux. *Geographica*, 63-64, 177-203. DOI : 10.26754/ojs\_geoph/geoph.201363-64859.
- Valette, P., 2019.** *Géohistoire des paysages fluviaux. Une démarche nécessaire pour reconstituer les trajectoires temporelles des cours d'eau.* Dossier d'habilitation à diriger les recherches, Université Toulouse Jean Jaurès, vol. 1, 378 p.
- Valette, P., Burens, A., Carozza, L., Micu, C., (dir.), 2024.** *Géohistoire des zones humides. Trajectoires d'artificialisation et de conservation.* Presses Universitaires du Midi, Toulouse, 382 p.
- Vannière, B., Bossuet, G., Walter-Simonnet, A.-V., Ruffaldi, P., Adatte, T., Rossy, M., Magny, M., 2004.** High-resolution record of environmental changes and tephrochronological markers of the Last Glacial–Holocene transition at Lake Lautrey (Jura, France). *Journal of Quaternary Science*, 19, 8, 797–808. DOI : 10.1002/jqs.873.
- Vayssière, A., Dépret, T., Castanet, C., Gautier, E., Virmoux, C., Carcuad, N., Garnier, A., Brunstein, D., Pinheiro, D., 2016.** Étude des paléoméandres holocènes de la plaine alluviale du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher). *Géomorphologie*, 22, 2, 163-176. DOI : 10.4000/geomorphologie.11369.
- Vayssière, A., 2018.** *Trajectoires et processus fluviaux dans la moyenne vallée du Cher du Tardiglaciaire à la période actuelle.* Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 467 p.
- Volut, P., 1992.** *Decize en Loire assise 1515-1789*, Nevers, 367 p.

## W

- Wanner, H., Brönnimann, S., Casty, C., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Schmutz, C., Stephenson, D.B., Xoplaki, E., 2001.** North Atlantic oscillation—concepts and studies. *Surv. Geophys.* 22, 321–382. DOI : 10.1023/A:1014217317898.
- Wanner, H., Pfister, C., Neukom, R., 2022.** The variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*. 287, 107531. DOI : 10.1016/j.quascirev.2022.107531.
- Weltje, G.J., 1997.** End-member modeling of compositional data : Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 29, 503-549. DOI : 10.1007/BF02775085.
- Wilhelm, B., 2012.** *Reconstitution sédimentologique des extrêmes hydrologiques au cours du dernier millénaire dans les Alpes françaises : Relations avec les changements climatiques.* Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université de Grenoble, 317 p.
- Wilhelm, B., Arnaud, F., Sabatier, P., Magand, O., Chapron, E., Courp, T., Tachikawa, K., Fanget B., Malet, E., Pignol, C., Bard, E., Delannoy, J. J., 2013.** Palaeoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alp. *Journal of Quaternary Science*, 28, 2, 189–199. DOI : 10.1002/jqs.2609.
- Wilhelm, B., Ballesteros Canovas, J.A., Macdonald, N., Toonen, W.H.J., Baker, V., Barriendos, M., Benito, G., Brauer, A., Corella, J.P., Denniston, R., Glaser, R., Ionita, M., Kahle, M., Liu, T., Luetscher, M., Macklin, M., Mudelsee, M., Munoz, S., Schulte, L., George, S. St., Stoffel, M., Wetter, O., 2018a.** Interpreting historical, botanical, and geological evidence to aid preparations for future floods. *WIREs Water*, 6, 1–22. DOI : 10.1002/wat2.1318.

- Wilhelm, B., Ballesteros Canovas, J.A., Corella Aznar, J.P., Kämpf, L., Swierczynski, T., Stoffel, M., Støren, E., Toonen, W.H.J., 2018b.** Recent advances in paleoflood hydrology: From new archives to data compilation and analysis. *Water Security*, 3, 1–8. DOI : 0.1016/j.wasec.2018.07.001.
- Wilhelm, B., Amann, B., Corella, J.P., Rapuc, W., Giguët-Covex, C., Merz, B., Støren, E., 2022a.** Reconstructing Paleoflood Occurrence and Magnitude from Lake Sediment. *Quaternary*. 5,1, 9. DOI : 3390/quat5010009.
- Wilhelm, B., Rapuc, W., Amann, B., Anselmetti, F.S., Arnaud, F., Blanchet, J., Brauer, A., Czymzik, M., Giguët-Covex, C., Gilli, A., Glur, L., Grosjean, M., Irmeler, R., Nicolle, M., Sabatier, P., Swierczynski, T., Wirth, S.B., 2022b.** Impact of warmer climate periods on flood hazard in the European Alps. *Nature Geoscience*, 15, 118–123. DOI : 10.1038/s41561-021-00878-y.
- Wirth, S.B., Glur, L., Gilli, A., Anselmetti, F.S., 2013.** Holocene flood frequency across the Central Alps – solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. *Quaternary Science Reviews*, 80, 112-128. DOI : j.quascirev.2013.09.002.
- Wolman, M.G., 1954.** A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 3, 6, 951-956. DOI : 10.1029/TR035i006p00951.
- Wolman, M.-G., Leopold, L.-B., 1957.** River floodplains : some observations of their formation. *United States Geological Professional Paper*, 282C, 87-107.

## X

---

- Xoplaki, E., Fleitmann, D., Diaz, H.F., 2011.** Editorial : Medieval Climate Anomaly. *Pages News*, 19, 1, 1-4.

## Sources

Toutes les cotes archivistiques présentées ci-dessous correspondent à celles consultées et mentionnées dans cette thèse. Certaines, notamment celles des archives départementales de l'Allier, de Saône-et-Loire et de la BNF, ont été consultées en ligne. Les autres ont été consultées sur place.

### Archives Nationales

#### *Série F/14 Travaux Publics*

F/14/1198, F/14/1199, F/14/1199/2, F/14/1200, F/14/1201, F/14/1202, F/14/1203, F/14/6670, F/14/7556, F/14/7557, CP/F14/8490.

### Archives départementales de la Nièvre

#### *Série C : Administrations provinciales*

Sous-série 1C : 1C/186, 1C/187, 1C/190, 1C/202, 1C/203

#### *Série L : Administrations révolutionnaires*

1L – Administration départementale : 1L/240, 1L/415, 1L/416

6L – District de Cosne-sur-Loire : 6L/31

#### *Série S : Travaux publics et transports*

3S – Navigation intérieure : 3S/634, 3S/3020, 3S/6310, 3S/6311, 3S/6318, 3S/6512, 3S/6647, 3S/6660, 3S/7129, 3S/9974, 3S/11350

#### *Série 3E : Notaire*

3E/1/941

#### *Série 4E et 5E : Registres d'état civil et tables décennales*

4E/194/36, 4E/194/38

### Archives départementales du Loiret

#### *Collection Jarry (2J)*

2J/552, 2J/2090

#### *Ponts et Chaussées (171W)*

171W/30903

#### *Ponts et Chaussées et direction départementale de la Construction du Loiret (206W)*

206W/46863

### Archives départementales de Saône et Loire

#### *Cadastre Napoléonien*

3P/8466

#### *Atlas général des routes de la province de Bourgogne*

C/SUP/PC/1

## **Archives départementales de l'Allier**

*Cadastre Napoléonien*

3P/3110, 3P/3180

## **Archives municipales de Nevers**

*Série BB : Administration communale*

Correspondance des échevins : BB/11.

Délibérations communales : BB/18, BB/19, BB/20, BB/21, BB/22, BB/23, BB/29, BB/46.

*Série CC : Finances, Impôts et comptabilité*

Comptes des recettes et dépenses : CC/1, CC/2, CC/3, CC/4, CC/6, CC/7, CC/12, CC/13, CC/14, CC/15, CC/16, CC/17, CC/19, CC/20, CC/21, CC/22, CC/27, CC/28, CC/30, CC/31, CC/36, CC/37, CC/39, CC/40, CC/42, CC/43, CC/46, CC/48, CC/50, CC/52, CC/53, CC/54, CC/56, CC/57, CC/59, CC/60, CC/61, CC/62, CC/63, CC/64, CC/65, CC/66, CC/67, CC/68, CC/69, CC/70, CC/71, CC/72, CC/73, CC/74, CC/75, CC/76, CC/77, CC/78, CC/82, CC/87, CC/88, CC/89, CC/90, CC/91, CC/92, CC/93, CC/94, CC/95, CC/96, CC/97, CC/99, CC/100, CC/102, CC/103, CC/104, CC/105ter, CC/106, CC/107, CC/108, CC/109, CC/111, CC/112, CC/113, CC/114, CC/115, CC/116, CC/125, CC/126, CC/128, CC/135, CC/141, CC/144, CC/152, CC/153, CC/154, CC/155, CC/156, CC/161, CC/162, CC/163, CC/166, CC/174, CC/203.

Pièces justificatives : CC/305, CC/328, CC/364.

*Série DD : Biens communaux – Eaux et Forêts – Travaux publics – Voirie*

DD/5, DD/12

*Série Moderne :*

Inondation 1790 : 1I/128/4.

## **Médiathèque de Nevers**

*Catalogue du Fonds Nivernais*

MS/034

## **Archives municipales de Decize**

*Série BB : Administration communale*

Délibérations : BB/4.

*Série CC : Finances, impôts, comptabilité*

Cahiers de comptes : CC/1, CC/2, CC/3, CC/4, CC/5, CC/6, CC/9, CC/10, CC/11, CC/12.

*Série DD : Biens communaux – Eaux et Forêts – Travaux publics – Voirie*

DD/5, DD/11, DD/12

## **Archives municipales d'Orléans**

BB/19

## Bibliothèque Nationale de France

Tous les numéros de journaux consultés l'ont été en ligne sur le site internet *retronews*.

*Nouvelles de Paris faisant suite à celles de Versailles* : n°16 octobre 1789.

*Gazette nationale* : n°17 novembre 1790, n°10 mai 180, n°19 février 1823.

*La Clef du cabinet des souverains* : n°8 mai 1800.

*Le courrier des spectacles* : n°2 janvier 1802, n°9 août 1804.

*Journal de Paris* : n°11 août 1804, n°12 décembre 1826, n°18 décembre 1826.

*Journal de la Bourse* : n°21 juillet 1816.

*Journal des débats* : n°16 mars 1817, n°26 mars 1818, n°13 octobre 1833, n°6 septembre 1834.

*Journal général* : n°18 mars, 1818.

*Journal du Commerce* : n°13 décembre 1825, n°17 décembre 1826.

*Journal Politique* : n°17 juillet 1827.

*Le Constitutionnel* : n°5 février 1829, n°5 février 1834, n°8 février 1837.

*L'Écho de la Loire* : n°2 août 1834, n°15 octobre 1836, n°22 septembre 1839, n°29 mars 1840, n°1<sup>er</sup> novembre 1840, n°8 novembre 1840, n°22 novembre 1840, n°21 février 1841, n°17 mars 1844.

*Gazette de France* : n°24 juillet 1834, n°7 juin 1835, n°29 mai 1844.

*Journal du Cher* : n°13 septembre 1834, n°2 mars 1840.

*Journal Le Temps* : n°11 mai 1836.

*La Quotidienne* : n°14 octobre 1836, n°18 novembre 1840.

*Le Capitole* : n°9 novembre 1840.

*Le Commerce* : n°8 novembre 1840.

*Le Courrier de Saône-et-Loire* : n°28 novembre 1840.

*Le Journal du Peuple* : n°25 février 1841.

*Journal de la Presse* : n°12 octobre 1841, n°22 septembre 1844.

*Gazette du Languedoc* : n°29 mars 1845.

# Liste des Figures

## Introduction

Figure i.1. Carte de localisation de la zone d'étude. ....	16
------------------------------------------------------------	----

## Chapitre 1

Figure 1.1. Compilation de plusieurs reconstitutions des anomalies de températures du III <sup>e</sup> au XXI <sup>e</sup> s. dans Mann et al. (2008). ....	27
Figure 1.2. Spatialisation et chronologie des périodes de forte activité hydrologique détectées de 1500 à nos jours (dans Blöschl et al., 2020). Les couleurs indiquent le rang d'intensité : le rouge étant le plus élevé et le bleu le moins élevé. ....	31
Figure 1.3. Diagramme conceptuel avec les caractéristiques principales des différents proxies dans le cadre d'étude des crues passées (dans Wilhelm et al., 2018a). ....	38
Figure 1.4. Distribution granulométrique schématique des dépôts de crues "majeures" et "extrêmes" (dans Toonen et al., 2015). ....	42

## Chapitre 2

Figure 2.1. Bassin versant de la Loire et localisation de la zone d'étude. ....	49
Figure 2.2. Pluviométrie annuelle sur le bassin versant de la Loire et de l'Allier à l'amont du Bec d'Allier (Météo France), et répartition des différents types climatiques (modifié de Joly et al., 2010). ....	51
Figure 2.3. Débits mensuels moyens de Saint-Rambert à Orléans. ....	52
Figure 2.4. Paramètres hydrologiques. ....	54
Figure 2.5. Saisonnalité des crues aux stations de Digoin (amont de la zone d'étude) et Nevers (aval de la zone d'étude). ....	56
Figure 2.6. Géologie du bassin versant de la Loire. ....	58
Figure 2.7. Lithologie du bassin de la Loire (BRGM). ....	59
Figure 2.8. Principales lithologies et pente du cours de la Loire (d'après Lino et al., 2000). ....	60
Figure 2.9. a : pente générale du cours de la Loire. b : pente du cours de la Loire sur la zone d'étude. ....	60
Figure 2.10. Plaine alluviale actuelle et répartition des terrasses alluviales de la Loire sur la zone d'étude (BRGM). ....	62
Figure 2.11. Schéma de la stratigraphie des terrasses de la Loire dans le secteur de Digoin, et âges obtenus par méthode de l'OSL (d'après Colls et al., 2001). ....	63
Figure 2.12. Synthèse des métamorphoses fluviales de la Loire à l'amont de Digoin (modifiée de Steinmann et al., 2017). ....	64
Figure 2.13. Carottages de la BSS situés sur les deux sites d'études ruraux d'Uxeloup et de Thareau. ....	66
Figure 2.14. Activités autour de la Loire. ....	68
Figure 2.15. Ports et canaux de la zone d'étude. ....	70
Figure 2.16. Évolution du profil des levées de la Loire depuis le XVI <sup>e</sup> s. (dans Dion 1961). ....	72
Figure 2.17. Évolution au cours du temps de la hauteur des levées à l'amont de Tours et du linéaire total (approximatif) de digues sur la Loire moyenne (dans Guillou et Maurin, 2005). ....	73
Figure 2.18. Linéaires de la Loire actuellement occupés par des levées entre Digoin et Blois. ....	74
Figure 2.19. Exemple de plusieurs types d'aménagements présents sur le site de Nevers (1692). ....	74
Figure 2.20. Différents types d'aménagements fluviaux présents sur la zone d'étude. ....	75
Figure 2.21. Synthèse des interactions entre les sociétés et la Loire depuis le Moyen Âge (dans Gautier et al., 2007). ....	76

## Chapitre 3

<b>Figure 3.1.</b> Localisation des cinq sites d'étude.....	79
<b>Figure 3.2.</b> Localisation actuelle du site d'étude d'Uxeloup (BRGM, IGN). .....	80
<b>Figure 3.3.</b> Photographies du site d'Uxeloup. ....	81
<b>Figure 3.4.</b> Carottages du site d'Uxeloup.....	82
<b>Figure 3.5.</b> Mottes castrales à l'amont du site d'Uxeloup ( <b>Garcia et Dumont, 2014</b> ) .....	83
<b>Figure 3.6.</b> Localisation actuelle du site d'étude de Thareau (BRGM, IGN).....	84
<b>Figure 3.7.</b> Photographies du site de Thareau.....	85
<b>Figure 3.8.</b> Carottages du site de Thareau.....	86
<b>Figure 3.9.</b> Localisation actuelle du site de Nevers (BRGM, IGN). .....	88
<b>Figure 3.10.</b> Proposition de représentation du site de Nevers aux XIV <sup>e</sup> et XV <sup>e</sup> s. (modifié de <b>Foucher, 2023b</b> et de <b>Charrier et al., 1983</b> ).....	90
<b>Figure 3.11.</b> Représentation de Nevers en 1600. ....	91
<b>Figure 3.12.</b> Localisation actuelle du site de Decize (BRGM, IGN). ....	92
<b>Figure 3.13.</b> Proposition de représentation schématique du site de Decize aux XV <sup>e</sup> et XVI <sup>e</sup> s.....	93
<b>Figure 3.14.</b> Localisation actuelle du site de Digoïn (BRGM, IGN). ....	94

## Chapitre 4

<b>Figure 4.1.</b> Exemples de comptes communaux de Nevers. ....	100
<b>Figure 4.2.</b> Nombre de ponts présents, endommagés et détruits par les crues à Nevers et Decize entre 1380 et 1845.....	101
<b>Figure 4.3.</b> Exemple de témoignages de crue de la Loire.....	103
<b>Figure 4.4.</b> Localisation des aménagements fluviaux sur les cartes de Mathieu de 1692 et de 1727-1730 dans le secteur de Nevers. ....	112
<b>Figure 4.5.</b> Ressources cartographiques représentant la portion de la Loire sur le secteur de Decize entre la fin du XVII <sup>e</sup> s. et la première moitié du XIX <sup>e</sup> s. ....	113
<b>Figure 4.6.</b> Plan de Grenier, photographie de 1953, MNT Lidar et image satellite de 2023 sur le secteur de Decize.....	116
<b>Figure 4.7.</b> Image aérienne, MNT Lidar, MNT Lidar sans la pente générale et MNT Lidar avec la carte des pentes en transparence sur le site de Charrin - Saint-Hilaire.....	118
<b>Figure 4.8.</b> Emprise spatiale des ressources cartographiques géoréférencées et traitées .....	119
<b>Figure 4.9.</b> Exemples de plans.....	120
<b>Figure 4.10.</b> Paléochenaux de la Loire sur le site de Thareau. ....	123
<b>Figure 4.11.</b> Paléochenaux de la Loire sur le site d'Uxeloup.....	124
<b>Figure 4.12.</b> Localisation des carottages et des transects de résistivité réalisés sur les trois sites des paléochenaux sélectionnés .....	125
<b>Figure 4.13.</b> Image CM de la Loire réalisée à partir des dépôts actuels.....	130

## Chapitre 5

<b>Figure 5.1.</b> Recensement des crues de la Loire.....	141
<b>Figure 5.2.</b> Évènements de crue et de "glace" entre 1380 et 2023.....	142
<b>Figure 5.3.</b> Localisation des mentions d'évènement de crue entre 1380 et 1845.....	143
<b>Figure 5.4.</b> Saisonnalité des crues de la Loire .....	144
<b>Figure 5.5.</b> Calcul des différents indices pour l'étude de la variabilité hydrologique de la Loire entre 1380 et 2023.....	147
<b>Figure 5.6.</b> Calcul des indices suivant les différentes zones ligériennes entre 1380 et 1845. ....	148
<b>Figure 5.7.</b> Nombre de crue par an et calcul du BFI entre 1380 et 2023.....	150
<b>Figure 5.8.</b> Périodes de forte activité hydrologique détectées sur la Loire, comparées à celles des autres rivières françaises .....	152

<b>Figure 5.9.</b> Comparaison entre les périodes de forte activité hydrologique détectées sur la Loire et les variations climatiques .....	156
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## Chapitre 6

<b>Figure 6.1.</b> Carte du paléo-méandre LEV – Localisation des carottages et migration des bandes actives de 1755 à nos jours. ....	166
<b>Figure 6.2.</b> Stratigraphie des trois carottages du paléochenal LEV .....	167
<b>Figure 6.3.</b> Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage LEV2C1. ....	169
<b>Figure 6.4.</b> Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (LEV) .....	171
<b>Figure 6.5.</b> Détection de pics granulométriques au sein du carottage LEV2C1. ....	173
<b>Figure 6.6. a :</b> courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques (LEV). <b>b :</b> boîtes à moustache représentant le D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> , D <sub>90</sub> , D <sub>99sr</sub> et D <sub>99ar</sub> des pics granulométriques les plus importants de l'US3. ....	174
<b>Figure 6.7.</b> Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations d'UXE1C1 .....	175
<b>Figure 6.8.</b> Localisation de tous les carottages du site d'Uxeloup (secteur UXE).....	177
<b>Figure 6.9.</b> Stratigraphie du remblaiement du paléochenal UXE. ....	178
<b>Figure 6.10.</b> Transect de résistivité électrique du paléochenal UXE (amont). ....	178
<b>Figure 6.11.</b> Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage UXE1C1. ....	181
<b>Figure 6.12.</b> Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (UXE).....	182
<b>Figure 6.13.</b> Situations des carottages d'UXE vis-à-vis de la route et de la levée. Image satellite Google avec ombrage réalisé à partir du MNT Lidar. ....	184
<b>Figure 6.14.</b> Détection de pics granulométriques au sein du carottage UXE1C1.....	185
<b>Figure 6.15. a :</b> courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques (UXE). <b>b :</b> boîtes à moustache représentant le D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> , D <sub>90</sub> , D <sub>99sr</sub> et D <sub>99ar</sub> de tous les pics granulométriques de l'US2.....	186
<b>Figure 6.16.</b> Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations d'UXE1C1 .....	186
<b>Figure 6.17.</b> Localisation de tous les carottages du site de Thareau (secteur OIE).....	188
<b>Figure 6.18.</b> Stratigraphie du paléochenal OIE.....	189
<b>Figure 6.19.</b> Transects de résistivité électrique du paléochenal OIE (amont et aval). ....	190
<b>Figure 6.20.</b> Texture granulométrique, susceptibilité magnétique et image CM du carottage OIE3C1. ....	192
<b>Figure 6.21.</b> Courbes granulométriques des échantillons mesurés par unité sédimentaire (OIE).....	193
<b>Figure 6.22.</b> Détection de pics granulométriques au sein du carottage OIE3C1 .....	196
<b>Figure 6.23.</b> Courbes granulométriques des centimètres présentant des pics granulométriques en D <sub>99</sub> et/ou en D <sub>50</sub> .....	196
<b>Figure 6.24.</b> Modèle âge-profondeur réalisé à partir des datations de OI3C4.....	198
<b>Figure 6.25.</b> Rythmes de sédimentations des trois paléochenaux étudiés. ....	199
<b>Figure 6.26.</b> Localisation du chemin de halage et de l'épi d'Uxeloup par rapport au paléochenal étudié. ....	204
<b>Figure 6.27.</b> Dépôts des crues du printemps 2024 (points rouges) et dépôts des paléochenaux étudiés (points noirs) comparés à l'image CM actuelle (segments actuels en gris).....	205
<b>Figure 6.28.</b> Mesures de MES effectuées au pont d'Imphy durant la crue du 13 au 14 mars 2024 (hydro.eaufrance).....	206
<b>Figure 6.29.</b> Exemples de sites de conservations de paléochenaux .....	209

## Chapitre 7

<b>Figure 7.1.</b> Gestion des aléas saisonniers du fleuve à Nevers aux XIV <sup>e</sup> et XV <sup>e</sup> s., dans <b>Foucher (2023b)</b> .	218
<b>Figure 7.2.</b> Limite de la zone inondable actuelle ( <b>DDT Nièvre, 2020b</b> ) et territoire du Nevers médiéval protégé par les enceintes.	223
<b>Figure 7.3.</b> Extrait du registre <b>MS/034 (Médiathèque de Nevers)</b> .	226
<b>Figure 7.4.</b> Aménagements insubmersibles actuels et succession des bandes actives de la Loire à Nevers entre 1755 et 1953.	235
<b>Figure 7.5.</b> Proposition de reconstitution du site de Nevers au XV <sup>e</sup> s.	236
<b>Figure 7.6.</b> Proposition de reconstitution du site de Nevers à la fin du XVII <sup>e</sup> s.	238
<b>Figure 7.7. a :</b> représentation de la levée de Saint-Antoine à Nevers sur la carte de Matthieu de 1727-1730. <b>b :</b> représentation sur l'Atlas de Trudaine de 1745-1780.	240
<b>Figure 7.8.</b> Proposition de reconstitution du site de Nevers à la fin du XVIII <sup>e</sup> s.	242
<b>Figure 7.9.</b> Lithographie d'Isidore-Laurent Deroy représentant en 1836 au premier plan le pont de Nevers détruit et remplacé par un pont de bois et à l'arrière-plan la ville de Nevers ( <b>AD Loire, CHPL4154/2</b> ).	243
<b>Figure 7.10.</b> Dégâts en rive gauche de Nevers suite au passage de la crue de novembre 1790 ( <b>AN, F/14/1203</b> ).	244
<b>Figure 7.11.</b> Proposition de reconstitution du site de Nevers au milieu du XIX <sup>e</sup> s.	245
<b>Figure 7.12.</b> Site de Nevers en 2024.	245
<b>Figure 7.13.</b> Pourcentage (%) de la recette annuelle de Decize allouée aux travaux de réfection (1754 - 1760) ou de construction du pont de Loire (1775 - 1789) ( <b>AD Nièvre, 1C/187</b> ). Le pont de Crote est détruit durant cette période.	247
<b>Figure 7.14.</b> Proposition de reconstitution du site de Decize au XV <sup>e</sup> s.	248
<b>Figure 7.15.</b> Représentation à l'amont de Decize des deux battis construits sur le bras gauche de la Loire sur la Carte de Mathieu (1727-1730).	249
<b>Figure 7.16.</b> Proposition de reconstitution du site de Decize au milieu du XVIII <sup>e</sup> s.	250
<b>Figure 7.17.</b> Proposition de reconstitution du site de Decize au milieu du XIX <sup>e</sup> s.	251
<b>Figure 7.18.</b> Site de Decize en 2024.	251
<b>Figure 7.19.</b> Site de Digoin en 2024.	253
<b>Figure 7.20.</b> Rives de la Loire à Digoin en 1836 par Isidore-Laurent Deroy.	254
<b>Figure 7.21.</b> Évolution de l'aménagement sur le site de Nevers du XV <sup>e</sup> au milieu du XIX <sup>e</sup> s.	255
<b>Figure 7.22.</b> Évolution de l'aménagement sur le site de Decize du XV <sup>e</sup> au milieu du XIX <sup>e</sup> s.	256
<b>Figure 7.23.</b> Linéaire cumulé des aménagements submersibles et insubmersibles situés dans le lit majeur de la Loire sur les sites de Nevers, Decize et Digoin.	257
<b>Figure 7.24.</b> Temporalité des grands chantiers de Nevers comparés aux périodes de forte activité hydrologique.	260

## Chapitre 8

<b>Figure 8.1.</b> Exemple de la répartition de l'habitat dans le val d'Avril-sur-Loire situé entre Decize et Nevers.	264
<b>Figure 8.2.</b> Exemple de la répartition de l'habitat entre Diou et Saint-Martin-des-Lais.	266
<b>Figure 8.3.</b> Exemples de défense d'habitats individuels (digues et tertres)	268
<b>Figure 8.4.</b> Exemples de bâtiments religieux (forme rouge) construits sur tertre (limites en rouge).	269
<b>Figure 8.5.</b> Exemples d'infrastructures anthropiques, probablement mottes castrales	271
<b>Figure 8.6.</b> La motte de Garnat-sur-Engièvre	271
<b>Figure 8.7.</b> Répartition des disparitions d'habitats causé par les migrations de la Loire.	273
<b>Figure 8.8.</b> Exemple de disparition de deux bâtiments (points rouges) entre 1755 et 1836 à cause de l'érosion et du changement de lit de la Loire au village d'Amassemoute (commune de Decize) aujourd'hui totalement disparu.	274

**Figure 8.9.** Exemple de déplacement potentiel du hameau de La Motte Veillot (Vitry-sur-Loire). ...275

## Chapitre 9

<b>Figure 9.1.</b> Évolution des bandes actives de 1755 à 2023.....	282
<b>Figure 9.2. a :</b> surfaces totales des bandes actives successives. <b>b :</b> distribution des largeurs de la bande active suivant les différentes dates.....	283
<b>Figure 9.3.</b> Évolution des largeurs des bandes actives entre le XVIII <sup>e</sup> et le XXI <sup>e</sup> s. sur plusieurs cours d'eau.....	284
<b>Figure 9.4.</b> Évolution des îles entre 1755 et 2023.....	285
<b>Figure 9.5. a :</b> altitude relative des bandes actives de 1755, 1848, 1953 et 2023. <b>b :</b> évolution verticale (cm/an) entre 1755 et 1848, 1848 et 1953 et entre 1953 et 2023 (dans <b>Gautier et al., in prep</b> ). .....	287
<b>Figure 9.6.</b> Distinction des trois secteurs du cours de la Loire.....	289
<b>Figure 9.7. a :</b> largeurs des bandes actives de 1755, 1848, 1953 et 2023. <b>b :</b> évolution des largeurs des différentes bandes actives entre les différentes dates.....	290
<b>Figure 9.8.</b> Distribution des largeurs de la bande active suivant trois secteurs. ....	292
<b>Figure 9.9. a :</b> évolution du nombre d'île par secteur. <b>b :</b> évolution de la surface totale par secteur. .	292
<b>Figure 9.10.</b> Évolution de l'aménagement du lit de la Loire entre 1755 et 2023. ....	294
<b>Figure 9.11.</b> Successions des bandes actives de la Loire au niveau de Diou.....	296
<b>Figure 9.12.</b> Évolution de la bande active de la Loire sur le site de Thareau entre 1755 et 2023.....	298
<b>Figure 9.13.</b> Évolution de la bande active sur le site d'étude d'Uxeloup entre 1755 et 2023. ....	299
<b>Figure 9.14.</b> Évolution de la bande active de la Loire sur le site d'Imphy entre 1755 et 2023. ....	301
<b>Figure 9.15.</b> Aménagements de la Motte-aux-Oies (commune de Gannay-sur-Loire). ....	304
<b>Figure 9.16.</b> Localisation des protections de berge relevées par le CEN Bourgogne. ....	305
<b>Figure A.1.</b> ACP des analyses XRF par carotte.....	368

# Liste des Tableaux

## Chapitre 2

<b>Tableau 2.1.</b> Données hydrologiques par station. * : données non disponibles.....	53
<b>Tableau 2.2.</b> Paramètres morphométriques de la plaine alluviale de la Loire.....	60

## Chapitre 4

<b>Tableau 4.1.</b> Archives historiques consultées pour cette étude (les journaux ne sont pas compris).....	98
<b>Tableau 4.2.</b> Exemple des résultats des calculs d'indice pour l'année 1408.....	109
<b>Tableau 4.3.</b> Ressources cartographiques et photographiques utilisées.....	118
<b>Tableau 4.4.</b> Nombre moyen de ponts d'amer et moyenne des erreurs EMQ par ressource cartographique.....	119
<b>Tableau 4.5.</b> Total des mesures granulométriques effectuées sur les différents carottages et prélèvements de surface.....	127
<b>Tableau 4.6.</b> Récapitulatif des analyses et datations réalisées sur les carottes des trois paléochenaux sélectionnés.....	133

## Chapitre 5

<b>Tableau 5.1.</b> Nombre d'évènements de crue recensés entre 1380 et 1845.....	140
<b>Tableau 5.2.</b> Nombre de références documentaires par type d'évènement de crue et par siècle entre 1380 et 1845.....	142
<b>Tableau 5.3.</b> Nombre d'évènements de crue recensés entre 1846 et 2023.....	145

## Chapitre 6

<b>Tableau 6.1.</b> Datations réalisées sur le carottage LEV2C1.....	171
<b>Tableau 6.2.</b> Datations réalisées dans le paléochenal UXE.....	179
<b>Tableau 6.3.</b> Datations réalisées dans le paléochenal OIE.....	190

## Chapitre 7

<b>Tableau 7.1.</b> Années de destruction totale ou partielle des ponts de Nevers par les crues et glaces...220	
<b>Tableau 7.2.</b> Années de destruction totale ou partielle des ponts de Decize par les crues et glaces...221	

## Chapitre 9

<b>Tableau 9.1.</b> Données relatives à l'évolution de la surface totale de la bande active entre 1755 et 2023.....	283
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## Annexe

<b>Tableau A.1.</b> Centimètres analysés à l'XRF par carottes.....	366
--------------------------------------------------------------------	-----

# Annexes

## Annexe 1. Liste des crues de la Loire (1380 – 1845)

Les cotes archivistiques mentionnées sont celles que nous avons consultées et non pas celles utilisées par les références bibliographiques. L'intensité correspond à celle déterminée dans le cadre de cette thèse.

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1384	hiver	moyenne	4	AM Tours	CC/8	Labbé (2017)
1387	N/A	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1388	N/A	amont	3	?	?	Rouchon (1907), Crepet (1997), Gob (2005)
1389	décembre	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/1	Champion (1858-1864), Charrier et al. (1983), Alexandre (1987)
1390	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/1	
1391	décembre	générale	3	AM Nevers	CC/1	Geneslay (1971)
1392	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/1	
1394	septembre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/2	
1395	novembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/3	
1396	février	moyenne	3	?	?	Geneslay (1971), Alexandre (1987)
1396	avril	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/3, CC/4	
1396	novembre	moyenne	1	?	?	Alexandre (1987)
1398	N/A	moyenne	1	?	?	Alexandre (1987)
1399	été	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/7	
1402	août	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/11	
1404	mars	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/12	
1404	juin	générale	3	AM Nevers	CC/13	Alexandre (1987)
1404	août	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/13	
1404	octobre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/13	
1405	N/A	moyenne	1	?	?	Alexandre (1987)
1405	octobre	zone d'étude	1	AM Nevers	CC/14	
1408	hiver	générale	4	AM Nevers	CC/16	Alexandre (1987), Berlioz (1998), Geneslay (1971)
1408	mars	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/16	
1408	avril	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/16	
1408	mai	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/16	
1408	novembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/16	
1408	décembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/16	
1410	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/17	
1414	N/A	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/19	Felzines (1990)
1414	décembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/19	
1415	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/20	
1416	hiver	zone d'étude	2	AM Decize	CC/1	
1416	avril	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/21	
1417	septembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/22	
1417	novembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/22	
1419	N/A	zone d'étude	2	AM Decize	CC/1	
1421	octobre	générale	3	?	?	De Brive (1866), Alexandre (1987), Gob (2005)
1422	février	zone d'étude	2	AM Decize	CC/2	
1423	N/A	moyenne	1	?	?	Alexandre (1987)
1426	N/A	moyenne	1	?	?	Geneslay (1971), Alexandre (1987)
1427	août	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/30	
1428	février	générale	1	?	?	Champion (1858-1864), De Brive (1872), Gob (2005)
1431	janvier	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/31	
1435	février	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/36	
1436	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/37	
1436	décembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/39	
1437	février	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/39	
1437	avril	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/39	
1438	mars	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/40	
1438	mai	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/40	
1438	septembre	zone d'étude	3	AM Decize	CC/3	
1439	mars	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/42	
1439	juin	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/42	
1439	octobre	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1440	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/43	
1440	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/43	
1442	février	zone d'étude	3	?	?	Merle (1974)
1443	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/46	
1447	mai	zone d'étude	2	?	?	Merle (1974)
1452	novembre	zone d'étude	2	AM Decize	CC/4	
1453	mai	zone d'étude	3	AM Decize	CC/4	
1453	octobre	zone d'étude	2	AM Decize	CC/4	
1454	juin	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/50	

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1456	mai	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/52	
1456	août	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/52	
1456	hiver	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/53	
1457	février	zone d'étude	3	AM Decize	CC/4	
1458	janvier	zone d'étude	4	AM Decize	CC/4	
				AM Nevers	CC/54	
1458	avril	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/54	
1458	novembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/54	
1459	août	amont (Borne)	2	?	?	De Brive (1866), Gob (2005)
1460	septembre	zone d'étude	2	AM Decize	CC/4	
1460	novembre	zone d'étude	2	AM Decize	CC/4	
1461	janvier	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/56	
1462	février	zone d'étude	1	AM Nevers	CC/57	
1465	janvier	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/59, CC/60	
1466	N/A	amont	1	AM Decize	CC/5	Champion (1858-1864)
1469	août	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/63, CC/64	Champion (1858-1864), Jullien (1883), Rouchon (1907)
				AM Decize	CC/5	
1470	juillet	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/64	
1470	octobre	zone d'étude	3	AM Decize	CC/5	
1474	N/A	zone d'étude	3	?	?	Champion (1858-1864)
1475	décembre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/65	
1476	N/A	moyenne	1	?	?	Geneslay (1971)
1477	automne	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/71	
1478	N/A	zone d'étude	3	?	?	Champion (1858-1864)
1480	N/A	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1481	N/A	générale	3	?	?	Duplessis (1872), Geneslay (1971), Labbé (2017)
1484	printemps	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/73	
1484	été	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/73	
1486	janvier	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/74	Champion (1858-1864)
1486	septembre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/74	
1491	février	zone d'étude	2	AM Decize	CC/6	
1492	janvier	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1493	décembre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/75	Champion (1858-1864), Felzines (1990)
				AM Nevers	CC/75	
1494	mai	zone d'étude	4	AM Decize	CC/6	Dion (1961)
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1494	automne	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/75	
1495	N/A	amont	1	?	?	Forez.info
1496	décembre	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/77, CC/78	
1497	janvier	zone d'étude	2	AM Decize	CC/6	
1498	janvier	zone d'étude	2	AM Decize	CC/6	
1498	décembre	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1499	hiver	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/78	
1502	N/A	zone d'étude	3	?	?	Champion (1858-1864)
1504	N/A	moyenne	3	?	?	Geneslay (1971)
1506	juin	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/82	
1507	printemps	zone d'étude	2	?	?	Rouchon (1907), Crepet (1997), Gob (2005)
1508	juillet	amont	1	?	?	De Brive (1866), Gob (2005)
1515	N/A	amont	1	?	?	Forez.info
1516	décembre	zone d'étude	4	AM Nevers	CC/91	
1517	printemps	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/91	
1519	mai	générale	4	AM Nevers	CC/93	Champion (1858-1864), Dion (1961), Charrier et al. (1983)
1520	automne	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/95, CC/96	
1522	automne	générale	3	AM Nevers	CC/97	Champion (1858-1864), Geneslay (1971), Charrier et al. (1983)
1526	N/A	générale	3	?	?	Champion (1858-1864), Charrier et al. (1983)
1527	mai	générale	4	AM Nevers	CC/99	Lemaire (1645), Champion (1858-1864), Dion (1961), Forez-info
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1528	hiver	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/100	Tresvaux de Berteux (1855)
1530	décembre	générale	3	AM Nevers	CC/103	Parmentier (1842), Champion (1858-1864)
1531	octobre	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/104	
1535	hiver	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/106	
1536	novembre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/107	Champion (1858-1864), Charrier et al. (1983)
1537	janvier	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/107	
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1538	mars	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/108	
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1539	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/109	
1540	N/A	zone d'étude	3	?	?	Champion (1858-1864), Charrier et al. (1983)
1541	août	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/111	
1541	novembre	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1542	novembre	générale	4	AM Nevers	CC/111, CC/113, CC/114	Lemaire (1645), Champion (1858-1864)
1543	octobre	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1543	décembre	zone d'étude	3	AM Nevers	CC/115, CC/116	
1548	mai	générale	4	AM Nevers	CC/125, CC/126	Lemaire (1645), Champion (1858-1864), Dion (1961)

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1549	mai	moyenne	1	?	?	Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.].
1551	mars	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/128	
1554	septembre	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1555	hiver	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/135	
1557	N/A	rien	1	?	?	Felzines (1990)
1559	septembre	amont	3	?	?	De Brive (1866), Rouchon (1907), Crept (1997), Gob (2005)
1561	N/A	amont	1	?	?	Forez.info
1565	N/A	générale	3	AM Nevers	CC/141	Champion (1858-1864)
1566	janvier, février	zone d'étude	2	AM Nevers AM Decize	CC/144 CC/9	
1567	mai	générale	3	AM Decize	CC/9	Lemaire (1645), Champion (1858-1864), Dion (1961), Felzines (1990)
1569	N/A	zone d'étude	2	AM Decize	CC/9	Geneslay (1971)
1570	octobre	zone d'étude	3	AM Decize	CC/9	Forez.info
1572	juin	générale	1	?	?	Lemaire (1645), Champion (1858-1864)
1576	N/A	rien	1	?	?	Champion (1858-1864)
1579	janvier	générale	2	?	?	Champion (1858-1864)
1580	N/A	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1586	septembre	générale	4	AM Decize Médiathèque Nevers	CC/10 MS/034	Lemaire (1645), Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864), Jullien (1883), Geneslay (1971), forez-info
1588	N/A	moyenne	1	?	?	Lemaire (1645)
1591	mai	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1595	octobre	amont	3	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1596	N/A	générale	3	?	?	Duplessis (1872), Gob (2005)
1598	novembre	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1601	juin	amont	2	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1603	février	zone d'étude	2	AM Decize	CC/11	
1606	avril	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1608	mars	moyenne	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1608	octobre	générale	4	AM Decize AM Nevers Médiathèque Nevers	CC/11, DD/5 CC/163, CC/364 MS/034	Lemaire (1645), De l'Estoile (1837), Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864), Jullien (1883), Rouchon (1907), Geneslay (1971), Gob (2005), forez-info
1610	août	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1614	octobre	amont	3	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1615	mars	générale	4	?	?	Champion (1858-1864), forez-info
1618	février	générale	3	?	?	Champion (1858-1864), forez-info
1624	janvier	générale	3	?	?	Champion (1858-1864)
1625	mai	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1628	mai	moyenne	4	?	?	Lemaire (1645), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.]. Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864), Jullien (1883), Rouchon (1907), Gob (2005), forez-info
1628	novembre	zone d'étude	4	Médiathèque Nevers	MS/034	
1629	N/A	zone d'étude	1	?	?	forez-info
1632	août	amont	3	?	?	Rouchon (1907), Crepet (1997), Gob (2005)
1633	janvier	générale	4	?	?	Fournier (1856), Champion (1858-1864), Rouchon (1907), Felzines (1990), Gob (2005)
1641	janvier	générale	3	?	?	Rouchon (1907), Felzines (1990), Gob (2005), forez-info
1649	janvier	générale	2	?	?	Dion (1961), Felzines (1990), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.], forez-info
1650	juin	amont	1	?	?	Gob (2005)
1651	avril	zone d'étude	2	?	?	Rouchon (1907), Felzines (1990), Gob (2005)
1657	septembre	zone d'étude	4	Médiathèque Nevers	MS/034	Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864)
1660	mars	moyenne	3	?	?	Geneslay (1971)
1661	janvier	générale	3	?	?	Champion (1858-1864), forez-info
1664	N/A	zone d'étude	2	?	?	Volut [s.d.].
1665	mars-avril	générale	3	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1665	novembre	zone d'étude	3	Médiathèque Nevers	MS/034	Champion (1858-1864), Felzines (1990)
1666	octobre	zone d'étude	1	AN	F/14/1202	Rouchon (1907), Gob (2005)
1667	N/A	rien	1	?	?	Felzines (1990)
1669	N/A	zone d'étude	2	?	?	Volut [s.d.].
1678	juillet	amont	2	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1679	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	BB/29	Rouchon (1907), Gob (2005)
1682	mars	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1689	octobre	moyenne	3	?	?	Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.].
1693	avril	zone d'étude	2	?	?	Gueneau (1926), Chaussard (1970)
1694	novembre	amont	1	?	?	Rouchon (1907), Gob (2005)
1695	décembre	zone d'étude	2	AM Decize	DD/12	
1697	été	générale	3	?	?	Champion (1858-1864)
1701	octobre	générale	2	?	?	Geneslay (1971), Valtat (1993)
1706	N/A	zone d'étude	1	?	?	forez-info
1707	octobre	générale	4	Médiathèque Nevers	MS/034	Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864), Desforges (1906), Geneslay (1971),

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
				AM Orléans	BB/18	Felzines (1990), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.].
				AD Loiret	2J/552	
1709	juin	générale	4	Médiathèque Nevers	MS/034	Tresvaux de Bertheux (1855), Champion (1858-1864), Geneslay (1971), Felzines (1990), Genet (2007), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.], forez-info
1710	juin	zone d'étude	2	AM Nevers	BB/36	Florenty (1991)
1710	septembre	moyenne	3	?	?	Geneslay (1971)
1710	novembre	générale	4	Médiathèque Nevers AD Loiret	MS/034 2J/552	Champion (1858-1864), Felzines (1990), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.], forez-info
1711	février	générale	4	?	?	Champion (1858-1864), Geneslay (1971), Felzines (1990), Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.], Desarthe (2013)
1711	mars	générale	1	?	?	Champion (1858-1864)
1712	N/A	générale	2	?	?	Champion (1858-1864), Geneslay (1971)
1713	N/A	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1716	février	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1718	N/A	rien	1	?	?	Champion (1858-1864)
1719	N/A	rien	1	?	?	Champion (1858-1864)
1722	N/A	rien	1	?	?	Champion (1858-1864)
1723	N/A	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1726	N/A	rien	1	?	?	Champion (1858-1864)
1727	septembre	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1730	N/A	moyenne	1	?	?	Champion (1858-1864)
1731	février	zone d'étude	2	?	?	Champion (1858-1864)
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1733	mai	générale	4	AN	F/14/1198, F/14/1202, F/14/1203 4E/194/36, 4E/194/38	Champion (1858-1864), Boutillier (1884), Geneslay (1971), Felzines (1990)
				AD Nièvre		
				AM Orléans	BB/18	
1735	N/A	générale	2	AN	F/14/1198	Geneslay (1971)
1736	N/A	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1737	mars	amont	2	?	?	Rouchon (1907)
1737	juillet	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1739	hiver	zone d'étude	3	AN	F/14/1202	
1740	décembre	générale	3	?	?	Champion (1858-1864)
1741	août	amont	3	?	?	Rouchon (1907)
1742	N/A	zone d'étude	2	AM Nevers	CC/203	
1744	mai	zone d'étude	2	?	?	Tresvaux de Bertheux (1855), Champion (1858-1864)
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1744	novembre	générale	4	AN	F/14/1198, F/14/119/2	Champion (1858-1864)
1745	novembre	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	Rouchon (1907)
1746	septembre	générale	2	AN	F/14/1199/2	Champion (1858-1864)
1747	mars	générale	3	AN	F/14/1198, F/14/1199/2	Champion (1858-1864)
				AD Nièvre	1C/202	
1748	N/A	amont	1	?	?	Rouchon (1907)
1749	octobre	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	
1749	hiver	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	
1750	janvier	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	
1750	novembre	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	
1751	mars	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1754	novembre	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
				AN	F/14/1199/2, F/14/1202	
1755	novembre	générale	4	AD Loiret AM Orléans AD Nièvre	2J/552 BB/19 1C/205	Champion (1858-1864), Boutillier (1884), Rouchon (1907), Geneslay (1971), forez-info
1756	juin	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1756	novembre	zone d'étude	2	AN	F/14/1199/2	
1757	février	moyenne	1	?	?	Geneslay (1971)
1757	juin	moyenne	2	AN	F/14/1199/2	
1766	janvier	zone d'étude	2	AM Nevers	BB/11	
1766	juin	moyenne	2	?	?	Geneslay (1971)
1766	novembre	amont	1	?	?	Rouchon (1907)
1768	janvier	moyenne	2	AD Loiret	2J/552	
1768	décembre	générale	3	AN	F/14/1200, F/14/1201	
1769	décembre	rien	2	AN	F/14/1202	Champion (1858-1864)
1770	novembre	générale	4	?	?	Champion (1858-1864)
1772	N/A	amont	2	?	?	Rouchon (1907)
				AN	F/14/1202	
1776	janvier	zone d'étude	3	AM Nevers	BB/12	Champion (1858-1864)
1778	octobre	zone d'étude	2	?	?	Champion (1858-1864), Rouchon

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1780	N/A	amont	2	?	?	Rouchon (1907)
1781	septembre	zone d'étude	3	AN	F/14/1202	Champion (1858-1864)
1782	septembre	zone d'étude	3	AN	F/14/1202	Champion (1858-1864)
1783	mars	générale	2	AD Nièvre	4E/194/36, 4E/194/38	Boutillier (1884), Geneslay (1971)
1783	juin	zone d'étude	2	AD Nièvre	4E/194/36, 4E/194/38	Boutillier (1884)
1783	décembre	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1784	janvier	générale	4	AM Orléans AN	BB/11 F/14/1201	Champion (1858-1864)
				AN	F/14/1202, F/14/1203	
1789	janvier	générale	4	AM Nevers AD Loiret AM Orléans	BB/46, DD/5, 1I/128/4 2J/552, 2J/2090 BB/11, BB/19	Champion (1858-1864)
1789	février	zone d'étude	2	AN	F/14/1202	
1789	mai	zone d'étude	3	AN	F/14/1202	
				AN	F/14/1202, F/14/1203	
1789	octobre	générale	3	AD Nièvre BNF	1L/240 Nouvelles de Paris faisant suite à celles de Versailles, n° 16 octobre	Geneslay (1971)
				Médiathèque Nevers	MS/034	
1790	novembre	générale	4	AD Allier AD Nièvre AN BNF	GG/4, 2/Mi/EC/55/2 3S/3020, 3S/6310, 1L/240 F/14/1202, F/14/1203 Gazette nationale, n° 17 nov	Tresvaux de Berteux (1855), Champion (1858-1864), Rouchon (1907), Chaussard (1970), Chaussard (1986), Felzines (1990), forez-info, Service Hydrologique centralisateur du bassin Loire-Bretagne, [s.d.]
1791	janvier	générale	2	AD Nièvre	1L/416	Champion (1858-1864)
1791	décembre	zone d'étude	2	AD Nièvre	1L/240	
1792	janvier	générale	2	AD Nièvre	1L/416	Champion (1858-1864)
1792	juin	amont	2	AD Nièvre	3S/634, 1L/415	
1792	octobre	zone d'étude	2	AD Nièvre	1L/415	
1793	janvier	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1793	octobre	amont	1	?	?	Rouchon (1907)
1794	octobre	amont	3	?	?	Rouchon (1907)
				AN	F/14/1203	
1795	printemps	zone d'étude	2	AD Nièvre	1L/416	
1795	octobre	amont	4	?	?	De Brive (1866), Rouchon (1907)
1796	décembre	zone d'étude	2	AD Nièvre	1L/415	Jullien (1883)
1799	février	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1799	avril	zone d'étude	2	?	?	Volut [s.d.].
1799	décembre	zone d'étude	2	AD Nièvre AD Loiret	1L/415 2J/2090	forez-info
				BNF	Gazette nationale, n° 10 mai	
1800	mai	générale	2	BNF	La Clef du cabinet des souverains, n° 8 mai	
1801	mars	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1801	décembre	zone d'étude	2	AD Nièvre	1I/128/4	Florenty (1991)
					Le Courrier des spectacles, n° 2 janv.	
1802	janvier	moyenne	2	BNF	?	Champion (1858-1864), Felzines (1990)
1802	décembre	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1803	février	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
				AD Loiret	2J/2090	
1804	août	générale	4	BNF BNF	Journal de Paris, n° 11 août Le Courrier des spectacles, n° 9 août	Champion (1858-1864), Felzines (1990), Volut [s.d.].
1807	N/A	zone d'étude	1	?	?	forez-info
1808	N/A	rien	1	?	?	Felzines (1990)
1810	N/A	zone d'étude	1	?	?	Champion (1858-1864), Felzines (1990)
1814	janvier	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1816	juillet	zone d'étude	2	BNF	Journal de Bourse, n° 21 juillet	
1817	mars	rien	2	BNF	Journal des débat, n° 16 mars	
1817	mars	rien	2	?	?	Rouchon (1907)

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1818	mars	zone d'étude	2	BNF	Journal général, n°18 mars ; Journal des débats, n°26 mars	
1819	janvier	zone d'étude	2	AD Nièvre	3S/7129	
1820	janvier	zone d'étude	4	AD Nièvre	3S/7129, 3S/9974	
1820	juillet	amont	2	?	?	Rouchon (1907)
1822	N/A	moyenne	2	?	?	Champion (1858-1864)
1823	janvier	générale	3	AD Nièvre BNF	3S/7129 Gazette nationale, n°19 février	Champion (1858-1864), Geneslay (1971), forez-info
1825	décembre	générale	4	AD Nièvre BNF	3S/634, 3S/3020, 3S/6660 Journal du Commerce, n°13 déc.	Champion (1858-1864), De Brive (1866), Duplessis (1872), Rouchon (1907), Geneslay (1971), forez-info
1826	décembre	moyenne	3	BNF	Journal du Commerce, n°17 déc. ; Journal de Paris, n°12 déc. ; Journal de Paris, n°18 déc.	Champion (1858-1864)
1827	juin	zone d'étude	3	BNF	Journal Politique, n°17 juillet	
1828	N/A	rien	2	?	?	Champion (1858-1864)
1829	février	générale	2	BNF	Le Constitutionnel, n°5 fév.	Champion (1858-1864)
1833	octobre	zone d'étude	2	BNF	Journal des débats, n°13 oct.	Rouchon (1907)
1834	juillet	zone d'étude	3	BNF	L'Écho de la Loire, n°2 août; Gazette de France, n°24 juillet; Journal des débats, n°6 sept.; Journal du Cher, n°13 sept.	Rouchon (1907), Felzines (1990)
1834	septembre	zone d'étude	2	BNF	Le Constitutionnel, n°5 fév.	
1835	mai	générale	4	AD Nièvre BNF	3S/3020, 3S/6311 Gazette de France, n°7 juin	Champion (1858-1864), De Brive (1866), Rouchon (1907), Geneslay (1971)
1836	mai	générale	4	AD Nièvre BNF	3S/3020, 3S/6318 Journal Le Temps, n°11 mai	Champion (1858-1864)
1836	octobre	générale	2	BNF	La Quotidienne, n°14 octobre; L'Écho de la Loire, n°15 octobre	Rouchon (1907)
1837	février	rien	2	BNF	Le Constitutionnel, n°8 fév.	
1839	septembre	amont	2	BNF	L'Écho de la Loire, n°22 septembre; n°29 mars 1840	
1840	janvier	générale	2	?	?	Champion (1858-1864)
1840	novembre	générale	3	AD Nièvre BNF	3S/3020, 3S/6311 L'Écho de la Loire, n°1 nov.; n°8 nov.; Le Capitole, n°9 nov.; Le Commerce, n°8 nov.	Rouchon (1907)
1840	novembre	générale	2	BNF	L'Écho de la Loire, n°22 nov.; La Quotidienne, n°18 nov.; Le Courrier de Saône-et-Loire, n°28 nov.	
1841	février	générale	4	AD Nièvre BNF	3S/6311 Le Journal du Cher, n°2 mars; Le Journal du Peuple, n°25 fév.	Champion (1858-1864)
1841	octobre	générale	2	AD Nièvre BNF	3S/6311 Journal La Presse, n°12 oct.	

Année	Saison ou mois	Zone ligérienne	Intensité	Archives	Cote	Bibliographie
1841	décembre	générale	2	BNF	L'Écho de la Loire, n°21 fév.	
1843	mai	zone d'étude	2	AD Nièvre	3S/6647	
1844	mars	zone d'étude	2	BNF	L'Écho de la Loire, n°17 mars	
1844	mai	générale	2	BNF	La Gazette de France, n°29 mai	
1844	septembre	générale	2	BNF	Journal La Presse, n°22 sept.	
1845	mars	générale	2	BNF	Gazette du Languedoc, n°29 mars	

## Annexe 2. Liste des crues de la Loire (1846– 2023)

Les crues suivantes correspondent aux événements relevés à la station de Nevers. Les débits (en m<sup>3</sup>/s) disponibles pour certains événements de 1846 à 1954 correspondent à des débits recalculés par Service Hydrologique Centralisateur Bassin Loire-Bretagne (s.d.) à partir des hauteurs d'eau.

Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Intensité	Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Intensité
1846	janvier	23	2,73		2	1857	janvier	13	2,66	1000	2
1846	avril	6	2,58		2	1857	janvier	23	2,25		2
1846	avril	20	3,08		2	1857	avril	14	2,85	1130	2
1846	avril	26	2,33		2	1857	mai	12	2,76		2
1846	mai	23	2,63		2	1857	octobre	22	2,79	1160	2
1846	octobre	18	6,33		4	1858	mars	17	2,29		2
1846	novembre	28	2,63		2	1858	décembre	28	2,85	1190	2
1846	décembre	2	2,26		2	1860	janvier	7	2,22		2
1846	décembre	24	3,05		2	1860	janvier	31	2,74	1250	2
1847	février	16	3,33		3	1860	mars	1	2,74	1070	2
1847	avril	9	3,63		3	1860	décembre	9	2,91	1180	2
1847	décembre	1	2,23		2	1860	décembre	27	2,62		2
1850	janvier	21	2,28		2	1861	décembre	31	3,18	1450	2
1850	janvier	28	2,68		2	1862	décembre	2	2,72	1100	2
1850	février	4	2,13		2	1863	janvier	9	2,66	1020	2
1851	février	3	2,39		2	1863	janvier	16	2,1		2
1851	avril	28	2,5		2	1863	janvier	23	2,1		2
1851	mai	13	2,28		2	1863	octobre	15	2,94	1190	2
1852	juin	20	4,22	2240	4	1864	février	28	2,1		2
1852	juin	25	2,29		2	1864	octobre	28	3,49	1630	3
1852	juin	30	2,15		2	1865	janvier	23	2,6		2
1852	juillet	3	2,38		2	1865	février	2	2,7	1030	2
1852	août	21	2,48	870	2	1865	décembre	5	3,21	1410	2
1852	octobre	13	2,19		2	1866	mars	19	2,72	1060	2
1852	novembre	15	3,05		2	1866	mars	26	2,46		2
1852	novembre	23	3	1380	2	1866	avril	10	3,11	1330	2
1853	janvier	10	2,18		2	1866	avril	15	2,3		2
1853	mars	10	2,15		2	1866	septembre	25	6,36	4500	4
1853	juin	3	2,1		2	1866	décembre	17	2,5	910	2
1854	janvier	6	2,3		2	1867	janvier	13	2,14		2
1854	juin	4	3	1260	2	1867	janvier	27	2,6	960	2
1854	novembre	19	2,48	1020	2	1867	mars	20	2,52		2
1854	novembre	25	2,15		2	1868	octobre	21	3,02	1260	2
1854	décembre	1	2,58	1120	2	1868	décembre	23	2,62	980	2
1854	décembre	20	2,39		2	1869	mars	4	2,44	1000	2
1854	décembre	24	3,35	1540	3	1871	février	12	2,16	730	2
1855	janvier	5	2,1		2	1872	février	28	2,16		2
1855	février	19	2,52	900	2	1872	mai	8	2,55		2
1855	mars	5	2,2		2	1872	mai	12	2,38		2
1855	mars	24	2,63	1020	2	1872	mai	26	2,44	920	2
1855	octobre	29	4,16	2220	4	1872	octobre	19	4,82	2770	4
1855	novembre	12	2,15		2	1872	octobre	25	2,84		2
1856	janvier	10	2,2	1050	2	1872	novembre	21	3,04	1270	2
1856	janvier	21	2,76		2	1872	décembre	2	3,08		2
1856	janvier	31	2,21		2	1872	décembre	8	3,16	1420	2
1856	avril	15	2,05	800	2	1873	mars	14	2,68	1020	2
1856	avril	29	3,47	1660	3	1873	mars	20	2,68	1000	2
1856	mai	11	4,08		2	1874	rien				2
1856	mai	17	4,1	2170	4	1875	janvier	18	2,96	1230	2
1856	mai	30	6,13	4200	4	1875	février	6	2,18		2
1856	juin	8	2,32		2	1875	novembre	8	2,64	1100	2
1856	juin	17	2,88	1280	2	1876	février	28	2,64		2
1856	décembre	13	2,58	970	2	1876	mars	4	2,28		2

Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m³/s)	Intensité	Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m³/s)	Intensité
1876	mars	7	2,24		2	1901	octobre	23	3,02	1260	2
1876	mars	12	3,18	1400	2	1902	avril	1	3,85	1920	3
1876	mars	19	2,12		2	1903	juin	16	2,26	800	2
1876	juin	12	2,91	1220	2	1904	février	20	3,15	1380	2
1877	mars	21	2,95	1200	2	1904	mars	12	2,47	920	2
1877	mars	27	2,31		2	1905	novembre	22	3,6	1720	3
1877	juin	1	3,15	1390	2	1906	janvier	11	2,87	1190	2
1878	janvier	27	2,42	830	2	1906	mars	4	2,89	1190	2
1878	avril	6	2,22		2	1907	février	23	2,72	1100	2
1878	avril	14	2,14		2	1907	mars	13	2,55	1000	2
1878	décembre	28	2,83		2	1907	octobre	12	4,6	2570	4
1879	janvier	1	2,87		2	1907	octobre	19	5,34	3270	4
1879	janvier	5	2,63		2	1909	janvier	15	2,5	970	2
1879	janvier	9	2,65	1000	2	1910	janvier	22	3,55	1680	3
1879	janvier	26	2,36	850	2	1910	février	11	2,9	1160	2
1879	février	6	2,13		2	1910	février	23	2,95	1220	2
1879	février	21	2,4		2	1910	mai	29	2,4	860	2
1879	avril	4	2,47		2	1910	novembre	10	2,94	1190	2
1879	avril	8	3,95	1920	3	1910	novembre	28	3,07	1370	2
1879	avril	15	3,48		2	1910	décembre	9	3,76	1840	3
1879	avril	23	2,36		2	1911	décembre	30	2,22	760	2
1879	mai	11	2,86	1140	2	1912	janvier	9	2,62	1000	2
1880	avril	29	2,61	950	2	1912	mars	27	2,5	940	2
1881	février	11	2,48	870	2	1913	mai	19	1,99	710	2
1881	avril	21	2,27		2	1913	novembre	1	2,7	1020	2
1882	juillet	10	3,95	1910	3	1913	novembre	15	3,05	1528	3
1882	octobre	29	2,76	1060	2	1913	décembre	9	3,55	1520	3
1882	novembre	27	2,65		2	1914	novembre	7	3,8	1880	3
1882	décembre	1	2,6		2	1914	décembre	15	2,82	1100	2
1882	décembre	5	2,78	1100	2	1915	avril	10	2,7	1020	2
1882	décembre	24	2,92	1180	2	1916	février	21	2,91	1170	2
1882	décembre	27	2,87		2	1916	avril	7	2,5	890	2
1883	janvier	1	2,71		2	1916	novembre	21	2,33	810	2
1883	décembre	14	2,19	710	2	1917	avril	2	2,03	730	2
1884	décembre	23	2,37		2	1918	janvier	10	2,75	1050	2
1885	février	5	2,22	750	2	1918	janvier	19	2,85	1120	2
1885	octobre	27	2,53		2	1918	avril	17	3,11	1380	2
1885	novembre	2	2,12		2	1918	mai	11	2,75	1050	2
1885	décembre	1	2,28		2	1918	décembre	27	3,44	1590	3
1885	décembre	8	2,15		2	1919	janvier	7	3,48	1620	3
1886	janvier	28	2,49		2	1919	février	26	3,15	1360	2
1886	février	3	2,96	1270	2	1919	avril	2	3,48	1620	3
1886	mars	6	2,88	1180	2	1919	décembre	30	2,77	1070	2
1886	décembre	18	2,42	830	2	1922	avril	12	2,72	1030	2
1887	décembre	10	2,56	930	2	1922	avril	28	2,75	1060	2
1888	mars	13	2,44	900	2	1923	janvier	2	2,8	1090	2
1888	avril	14	2,51	930	2	1923	mars	5	3,56	1690	3
1888	avril	26	2,7	1020	2	1923	décembre	30	4,05	2090	4
1888	décembre	28	2,22		2	1924	décembre	1	3,05	1280	2
1889	janvier	1	3	1240	2	1925	décembre	28	3,06	1290	2
1889	février	16	3,16	1370	2	1926	mai	19	4,08	2110	4
1889	février	21	2,75		2	1926	décembre	3	2,8	1090	2
1889	mars	12	2,68	1020	2	1927	mars	12	3,85	1920	3
1890	janvier	26	2,07	730	2	1928	février	17	3,72	1810	3
1890	mai	30	2,12	700	2	1928	mai	6	2,24	810	2
1891	mars	20	2,67		2	1928	novembre	29	2,79	1080	2
1891	juin	8	2,54	960	2	1930	mai	10	2,56	1020	2
1891	octobre	23	3,16	1370	2	1930	novembre	7	2,72	1120	2
1891	novembre	16	2,52		2	1931	mars	10	3,04	1270	3
1892	février	7	3,29	1470	3	1932	avril	8	3	1720	3
1892	février	22	2,16		2	1932	mai	10	2,78	1100	2
1892	décembre	14	2,21		2	1933	octobre	4	2,9	1160	2
1893	février	9	1,8	700	2	1933	novembre	23	3,01	1250	2
1893	février	23	2,26	740	2	1935	janvier	4	2,45	850	2
1893	octobre	9	4,66	2620	4	1935	mars	4	2,62	1000	2
1894	mai	28	2,14	700	2	1935	novembre	14	3,5	1640	3
1895	mars	12	4,02	2120	4	1935	décembre	5	3,27	1460	2
1895	mars	29	2,13	830	2	1936	janvier	5	3,12	1360	2
1896	janvier	1	2,39	950	2	1936	février	4	2,8	1130	2
1896	août	1	2,23	730	2	1936	juin	7	2,15	690	2
1896	octobre	30	3,04	1380	2	1937	février	24	2,82	1150	2
1897	février	3	3,41	1650	3	1938	février	1	2,05	700	2
1897	février	8	2,9		2	1939	janvier	25	2,9	1210	2
1897	avril	5	2,65	1160	2	1939	avril	9	2,7	1040	2
1899	janvier	17	2,45	850	2	1939	novembre	7	2,77	1070	2
1900	février	15	1,95	660	2	1939	novembre	21	2,98	1220	2
1900	août	28	3,25	1440	2	1940	février	2	2,77	1110	2
1900	octobre	1	3,41	1570	3	1940	février	23	3,36	1530	3
1900	décembre	1	2,26		2	1940	mai	6	3,3	1480	3
1900	décembre	8	2,11		2	1940	décembre	14	3,2	1400	2
1901	mars	22	3,77	1850	3	1941	janvier	25	3,95	1910	3
1901	avril	17	2,65	1000	2	1941	février	10	2,8	1100	2
1901	septembre	26	2,85	1130	2	1941	novembre	16	3	1240	2

Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m³/s)	Intensité	Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m³/s)	Intensité
1942	mars	10	2,65	1070	2	1977	août	20		700	2
1942	octobre	27	3,35	1520	3	1977	août	28		950	2
1943	janvier	15	0	800	0	1978	janvier	26		745	2
1943	octobre	29	3,52	2100	4	1978	février	2		865	2
1944	novembre	16	3,05	1280	2	1978	février	18		1170	2
1944	novembre	26	3,23	1420	2	1978	février	26		790	2
1944	décembre	10	3,85	1920	3	1978	mars	22		975	2
1945	février	9	3,65	1760	3	1978	mai	24		735	2
1948	janvier	30	2,42	830	2	1979	février	7		930	2
1950	février	12	2,38	850	2	1979	mars	27		685	2
1950	novembre	28	2,5	920	2	1979	mai	28		670	2
1951	mai	22	2,48	900	2	1979	octobre	28		855	2
1951	novembre	14	2,95	1200	2	1979	décembre	19		795	2
1951	novembre	23	4,14	2120	4	1980	janvier	25		775	2
1952	janvier	14	2,75	1080	2	1980	février	5		975	2
1952	avril	3	2,62	1000	2	1980	mars	29		725	2
1952	novembre	29	2,99	1250	2	1980	septembre	24		740	2
1952	décembre	20	3,7	1800	3	1981	janvier	5		855	2
1954	avril	3	2,15	740	2	1981	janvier	16		1540	3
1955	janvier	8		898	2	1981	avril	3		785	2
1955	janvier	14		1230	2	1981	mai	13		745	2
1955	février	4		1370	2	1981	décembre	15		1820	3
1956	septembre	5		720	2	1982	décembre	31		720	2
1956	septembre	29		830	2	1982	janvier	7		1750	3
1957	février	16		760	2	1982	décembre	8		1510	3
1957	février	24		1550	3	1982	décembre	16		1560	3
1957	juin	27		690	2	1983	février	28		750	2
1958	février	25		670	2	1983	avril	7		965	2
1958	novembre	11		690	2	1983	avril	23		2000	4
1958	décembre	22		1150	2	1983	mai	15		2230	4
1959	janvier	8		960	2	1984	janvier	25		755	2
1959	janvier	16		830	2	1984	février	8		1040	2
1960	mars	19		690	2	1984	décembre	4		835	2
1960	octobre	26		980	2	1985	février	16		850	2
1961	janvier	5		710	2	1985	mai	10		1420	2
1961	février	5		1200	2	1986	avril	9		825	2
1961	décembre	13		750	2	1986	avril	23		1600	3
1962	janvier	14		1100	2	1987	décembre	19		710	2
1962	avril	1		790	2	1988	janvier	16		670	2
1963	mars	22		850	2	1988	janvier	26		710	2
1964	mars	28		720	2	1988	février	8		935	2
1965	mai	21		655	2	1988	mars	19		1580	3
1965	octobre	2		1060	2	1988	mai	18		855	2
1965	novembre	28		850	2	1989	avril	13		800	2
1965	décembre	4		860	2	1989	avril	27		1280	2
1965	décembre	12		740	2	1990	février	16		1350	2
1965	décembre	27		775	2	1992	juin	13		675	2
1966	janvier	1		990	2	1993	octobre	14		870	2
1966	janvier	24		760	2	1993	décembre	25		760	2
1966	février	10		810	2	1994	janvier	2		1120	2
1966	décembre	14		715	2	1994	janvier	12		1050	2
1968	janvier	4		1120	2	1994	janvier	27		716	2
1968	novembre	5		700	2	1994	février	5		876	2
1968	décembre	26		1710	3	1994	octobre	23		732	2
1969	janvier	16		755	2	1994	novembre	7		1050	2
1969	mars	16		665	2	1994	novembre	13		665	2
1969	avril	29		1000	2	1995	janvier	12		771	2
1969	mai	7		855	2	1995	janvier	25		959	2
1970	février	5		745	2	1995	février	19		809	2
1970	février	12		795	2	1995	février	26		1020	2
1970	février	20		1210	2	1996	février	15		699	2
1970	mars	26		705	2	1996	mai	21		713	2
1971	février	2		780	2	1996	novembre	15		874	2
1972	février	15		675	2	1996	novembre	20		668	2
1973	décembre	25		1240	2	1996	novembre	28		1200	2
1974	février	8		745	2	1996	décembre	25		708	2
1974	octobre	22		745	2	1997	janvier	22		805	2
1974	novembre	29		735	2	1998	janvier	21		679	2
1975	janvier	31		680	2	1998	avril	28		1250	2
1975	novembre	20		900	2	1999	février	10		1010	2
1976	février	14		1040	2	1999	février	20		1270	2
1976	novembre	2		665	2	1999	mai	21		697	2
1976	novembre	9		1650	3	1999	décembre	28		1120	2
1976	décembre	4		825	2	2001	mars	11		1050	2
1976	décembre	11		740	2	2001	mars	22		678	2
1977	janvier	27		795	2	2001	mai	5		1410	2
1977	février	6		1210	2	2002	novembre	27		1050	2
1977	février	17		1030	2	2002	décembre	30		762	2
1977	février	21		1050	2	2003	janvier	3		751	2
1977	mai	6		705	2	2003	février	4		1370	2
1977	mai	27		1600	3	2003	décembre	3		2140	4
1977	juin	25		740	2	2004	janvier	14		1170	2
1977	août	2		1380	2	2004	janvier	27		799	2

Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Intensité	Année	Mois	Jour	Hauteur (en m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Intensité
2004	novembre	5		1030	2	2013	février	7		721	2
2005	janvier	24		848	2	2013	mai	2		1400	2
2005	avril	18		1130	2	2013	mai	21		918	2
2006	mars	6		663	2	2014	janvier	21		1030	2
2006	mars	10		693	2	2014	novembre	7		750	2
2006	avril	12		731	2	2014	novembre	16		847	2
2007	mars	3		1080	2	2014	décembre	20		823	2
2008	novembre	4		1760	3	2015	janvier	31		766	2
2010	février	27		701	2	2016	février	14		809	2
2010	novembre	17		813	2	2016	juin	1		891	2
2010	décembre	8		1070	2	2016	novembre	24		1120	2
2010	décembre	24		966	2	2018	janvier	5		1170	2
2012	janvier	2		925	2	2018	janvier	22		993	2
2012	décembre	18		687	2	2021	janvier	30		930	2
2012	décembre	23		749	2	2022	janvier	1		1000	2
2013	janvier	22		675	2	2023	décembre	12		846	2
2013	février	3		744	2						

### Annexe 3. Mesures XRF

Une étude préliminaire de l'apport des analyses géochimiques par fluorescence X (XRF – *X Ray Fluorescence*) sur la détection des événements de crue a été effectuée dans le cadre de cette thèse. Les résultats n'ont pas été ajoutés au corps de la thèse pour plusieurs raisons. Ces analyses ont été effectuées afin d'appréhender les changements de milieu (Croudace et Rothwell, 2015 ; Vayssière, 2018 ; De Milleville, 2023), mais surtout afin de voir si les événements de crue de la Loire possédaient une certaine signature géochimique comme ce put être fait dans d'autres études (Croudace et Rothwell, 2015 ; Rapuc et al., 2020). Les quantités des éléments géochimiques des carottes sélectionnées LEV2C1, OIE3C3 et UXE1C2 ont été mesurées au core-scanner XRF Avaatech au laboratoire EPOC à Bordeaux par Isabelle Billy et Louise Monnier. Les mesures ont été réalisées à un pas de 0,5 cm à 10kV pour la mesure des éléments légers et à 30kV pour la mesure des éléments lourds. Cependant, en raison de l'état dégradé des carottes, les mesures n'ont pas pu être effectuées sur la totalité de carottages sélectionnés (Tableau A.1). Dans le cas de LEV2C1 par exemple, seulement 44 cm ont pu être analysés en raison du mauvais état de la carotte (Tableau A.1). Dans le cas du paléochenal d'UXE, la dégradation du carottage UXE1C1 sur lequel ont été réalisés les analyses granulométriques étant trop avancée, les analyses XRF ont été réalisées sur un carottage réalisé quelques mètres à côté, rendant l'analyse des résultats difficiles. Finalement, les unités d'UXE et LEV au sein desquelles la grande majorité des événements de crue ont été détectés demeurent peu renseignés par les analyses XRF rendant pour le moment impossible la caractérisation géochimique des pics granulométriques associés aux passages d'évènements de crue.

**Tableau A.1** : centimètres analysés à l'XRF par carottes.

Carottes	Analyses cm	Pas de mesure
LEV2C1	128,5 à 172,5 cm	0,5 cm
OIE3C3	43 à 98 cm puis 106 à 197 cm	0,5 cm
UXE1C2	4,5 à 98 cm puis 103 à 192 cm	0,5 cm

Plusieurs éléments peuvent être considérés dans le cadre de la caractérisation des événements de crue (Croudace et Rothwell, 2015 ; Rapuc et al., 2020), mais ceux-ci dépendent des signatures chimiques du bassin versant étudié. Afin de sélectionner les bons indicateurs, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées pour chaque carotte afin d'identifier les corrélations et non corrélations des variations de la teneur en éléments et indicateurs granulométriques (Figure A.1). L'ACP 1 prend en compte tous les éléments dont les quantités ont été mesurées par XRF. L'ACP 2 prend en compte seulement les éléments susceptibles de nous intéresser. L'ACP 3 prend en compte les éléments susceptibles de nous intéresser et la granulométrie. Les ACPs diffèrent nettement entre les trois carottages. Ces différences sont multifactorielles. Premièrement, le fait sur le site d'UXE d'avoir réalisé les mesures granulométriques sur une carotte différente de celle sur laquelle ont été réalisées les analyses XRF brouille les rapports. Ensuite, comme nous avons pu le voir dans le **troisième chapitre**, les sites d'études diffèrent largement que ce soit géologiquement ou géomorphologiquement. Il est par exemple possible dans le cas d'OIE que le signal du ru intermittent s'ajoute à celui des sédiments déposés par la Loire. Enfin, le faible nombre de mesures sur LEV empêche pour le moment de détecter des signaux généraux parmi les trois enregistrements.

Le signal du Titane (Ti) est souvent interprété comme révélateur d'apports détritiques et d'évènement de crue (Vayssière, 2016 ; Rapuc et al., 2020). Dans le cadre des résultats préliminaires, le signal du Titane, semble être plutôt corrélé à la part du limon dans les sédiments. Ainsi, des analyses supplémentaires sont encore nécessaires pour interpréter efficacement ces données.



# Table des matières

Résumé	5
Abstract	6
Remerciements	7
Sommaire	10
Avant-Propos	12
Introduction générale	13
<b>Partie I. Présentation du contexte scientifique, des objets d'étude, du matériel et des méthodes</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre 1. Étudier les interactions entre hydrosystème, climat et société dans le bassin ligérien : état des connaissances, enjeux et implications méthodologiques</b>	<b>25</b>
1. Interactions entre hydrosystèmes, climat et sociétés	26
1.1. Les systèmes fluviaux face aux variations climatiques au cours du dernier millénaire	26
1.1.1. La « douceur climatique » et le « calme hydrologique » de l'Optimum Climatique Médiéval	27
1.1.2. Un regain généralisé de l'activité hydrogéomorphologique au cours du Petit Âge Glaciaire	28
1.2. Dégradation climatique, activité hydrogéomorphologique et sociétés	31
2. La Loire, entre connaissances et lacunes	33
2.1. Des dynamiques hydrogéomorphologiques et des relations entre les sociétés et leur environnement bien connus en Loire moyenne et aval	33
2.2. Une partie délaissée à l'amont du Bec d'Allier : quelles relations entre les sociétés et leur environnement ligérien ?	36
3. Nécessité d'une approche interdisciplinaire	37
3.1. L'histoire hydrologique de la Loire par les archives documentaires	38
3.2. Complémentarité de l'approche stratigraphique et sédimentologique	41
3.3. Une approche géohistorique pour servir à l'étude des réponses des sociétés à l'activité ligérienne	43
Conclusion du chapitre	46
<b>Chapitre 2. Cadres de la zone d'étude</b>	<b>49</b>
1. Cadre hydrologique actuel	50
1.1. Les climats du bassin versant	50
1.2. Un régime hydrologique contrasté	50
1.2.1. Le régime hydrologique de la Loire	50
1.2.2. Le régime hydrologique de la Loire	51
1.2.3. La variabilité interannuelle du régime hydrologique de la Loire	53
1.3. Fonctionnement général des crues de la Loire	55
1.3.1. Les trois grands types de crues	55
1.3.2. La saisonnalité actuelle des crues de la Loire	55
1.4. La variabilité du régime de crue depuis le XIX <sup>e</sup> s.	56
1.4.1. Variabilité de l'activité des crues	56
1.4.2. Variabilité saisonnière des crues	57
2. Cadre géologique, lithologique et morphologique	57
2.1. Une zone d'étude à l'interface entre le Massif Central et le bassin Parisien	57
2.2. Trois secteurs géologiques et géomorphologiques distincts	59
2.2.1. Digoin – Diou : avancée des plateaux autunois	61

2.2.2. Diou – Decize : jonction des Limagnes	61
2.2.3. Decize – Bec d’Allier : Bassin Parisien	61
2.3. Géomorphologie actuelle et passée de la plaine alluviale de la Loire	61
2.3.1. Tracé actuel de la Loire	61
2.3.2. Les terrasses quaternaires ligériennes	63
2.3.3. Les métamorphoses fluviales quaternaires	64
2.3.4. Le remblaiement sédimentaire du lit majeur	65
3. Les sociétés ligériennes et la Loire	67
3.1. L’exploitation anthropique du fleuve	67
3.1.1. Des exploitations multiples	67
3.1.2. La navigation et le transport	69
3.2. Des contraintes naturelles et anthropiques	70
3.2.1. Les contraintes de la Loire : inconstances, divagations et crues	70
3.2.2. L’aménagement des vals : les levées de la Loire	72
3.2.3. Une diversité d’aménagements	74
Conclusion du Chapitre	77
<b>Chapitre 3. Les sites d’étude</b>	<b>79</b>
1. Deux sites ruraux : Uxeloup et Thareau	80
1.1. Site d’Uxeloup	80
1.1.1. Cadre géologique et morfo-sédimentaire du site	80
1.1.2. Cadre géographique et historique	82
1.2. Site de Thareau	84
1.2.1. Cadre géologique et morfo-sédimentaire	85
1.2.2. Cadre géographique et historique	87
2. Les trois sites urbains : Nevers, Decize et Digoin	88
2.1. Nevers	88
2.1.1. Cité et capitale régionale	89
2.1.2. Une grande diversité d’aménagements sur un site de divagation du fleuve	90
2.2. Decize	91
2.2.1. Une cité stratégique	91
2.2.2. Le second site de franchissement le plus important	93
2.3. Digoin	94
Conclusion du chapitre	95
<b>Chapitre 4. Matériels et méthodes</b>	<b>97</b>
1. L’exploitation des sources documentaires	98
1.1. Des ressources documentaires riches et variées	98
1.1.1. Les sources secondaires	98
1.1.2. Les sources primaires	99
1.1.2.1. Documents antérieurs au X <sup>IV</sup> e s.	99
1.1.2.2. Documents du X <sup>IV</sup> e au X <sup>VI</sup> e s.	100
1.1.2.3. Documents du X <sup>VI</sup> e au X <sup>VII</sup> e s.	102
1.1.2.4. Documents du X <sup>VIII</sup> e au X <sup>IX</sup> e s.	102
1.1.2.5. Documents du X <sup>IX</sup> e siècle à aujourd’hui	104
1.2. Traitement des données historiques	105
1.2.1. Collecte d’informations historiques sur les crues de la Loire	105
1.2.1.1. Période historique de 1380 à 1845	105
1.2.1.2. Période contemporaine de 1846 à 2023	106
1.2.2. Qualification de l’intensité des crues	106
1.2.2.1. Les crues de 1380 à 1845	106
1.2.2.2. Les crues de 1846 à 2023	108
1.2.3. Indices de crue	108
1.2.4. L’étude des relations entre sociétés et hydrosystème	109
2. Étude cartographique de la plaine alluviale ligérienne	110
2.1. Ressources cartographiques, photographiques et imageries satellitaires	111

2.1.1. Les premières cartes ligériennes (XVII <sup>e</sup> – mi XVIII <sup>e</sup> s.)	111
2.1.1.1. Carte de la Loire de 1692	111
2.1.1.2. Carte de la Loire de 1727-1730	112
2.1.1.3. Carte de la Loire de 1775	114
2.1.2. Le corpus cartographique et photographique géoréférencable	114
2.1.2.1. Carte de la Loire de 1755	114
2.1.2.2. Carte de l'état-major (1835-1845)	115
2.1.2.3. Carte de Coumes (1848-1855)	115
2.1.2.4. Plans de Grenier (1851-1852)	116
2.1.2.5. Photographies aériennes de 1953	117
2.1.2.6. Images satellites de 2023	117
2.1.2.7. MNT Lidar	117
2.1.3. Géoréférencement	119
2.1.4. Les plans et dessins	119
2.2. Traitement de l'information géographique	121
2.2.1. Étude de l'évolution en plan de la Loire	121
2.2.2. Contribution à l'étude des relations entre les sociétés et leur environnement	121
2.2.2.1. Évolution de l'aménagement du lit majeur	121
2.2.2.2. Étude de l'habitat dans le lit majeur	121
3. Étude stratigraphique et sédimentologique des paléochenaux et de leur remblaiement	122
3.1. Recherche et sélection des « bons candidats »	123
3.1.1. Analyses microtopographiques, diachroniques et prospections sur le terrain	123
3.1.2. Carottages des paléochenaux	125
3.1.3. Sélection finale de trois paléochenaux	126
3.2. Étude stratigraphique du remblaiement des paléochenaux	126
3.2.1. Analyses granulométriques	126
3.2.2. Mesures de susceptibilité magnétique	127
3.2.3. Profils ERT	127
3.2.4. Approche actualiste et image CM	128
3.3. Détection granulométrique des événements de crue	131
3.4. Cadre chronologique	132
Conclusion du chapitre	133

## **Partie II. Étude de l'activité hydrogéomorphologique de la Loire au cours du dernier millénaire** **135**

<b>Chapitre 5. Variations de l'activité hydrologique de la Loire depuis le XIV<sup>e</sup> s.</b>	<b>139</b>
1. Recensement des crues de la Loire	140
1.1. Recensement des crues entre 1380 et 1846	140
1.2. Recensement des crues entre 1846 et 2023	144
2. Détection de périodes de forte et de faible activité hydrologique	146
2.1. Périodes hydrologiques entre 1380 et 1846	146
2.2. Périodes hydrologiques entre 1846 et 2023	148
2.3. Les difficultés de comparaison entre les deux séries temporelles	149
3. Comparaison de l'activité de la Loire avec les autres bassins versants	151
3.1. Paléohydrologie du bassin versant de la Loire depuis l'époque médiévale	151
3.2. Comparaison avec les rivières françaises et européennes	153
4. Étude des relations entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique de la Loire.	155
4.1. Oscillation nord-atlantique (NAO)	155
4.2. Les minima solaires	157
4.3. L'oscillation atlantique multi décennale (AMO)	159
5. L'évolution de la saisonnalité des crues de la Loire	159
6. Les conditions de l'enregistrement et du recensement des crues	161
Conclusion du chapitre	162

<b>Chapitre 6. L'enregistrement sédimentaire de l'activité hydrologique de la Loire</b>	<b>165</b>
1. Le paléochenal LEV : un enregistrement riche d'évènements	166
1.1. Présentation du paléochenal	166
1.2. Description de l'enregistrement d'une défluviation rapide	167
1.2.1. L'unité US1	167
1.2.2. L'unité US2	168
1.2.3. L'unité US3	170
1.3. Détection des évènements de crue	172
1.4. Chronologie des évènements de crue	174
2. Le paléochenal UXE : un enregistrement moins dense, mais plus ancien	176
2.1. Présentation du paléochenal	176
2.2. Description d'un enregistrement différent entre l'amont et l'aval du paléochenal	176
2.2.1. Unité US1 (a, b, c, d, $\alpha$ et $\beta$ )	177
2.2.2. Unité US2	182
2.2.3. Unité US3	183
2.3. Détection des évènements de crue	184
2.4. Chronologie des évènements de crue	185
3. Le paléochenal OIE : un enregistrement d'évènements très succinct	188
3.1. Présentation du paléochenal	188
3.2. Description de l'enregistrement sédimentaire du paléochenal	189
3.2.1. Unité US1	191
3.2.2. Unité US2	191
3.2.3. Unité US3	194
3.2.4. Unité US4	195
3.3. Détection des évènements de crue	197
3.4. Chronologie des évènements de crue	197
4. Un enregistrement conforme à ceux des rivières françaises et européennes	200
5. Enseignements sur les conditions générales de la construction de la plaine alluviale	202
5.1. La faible signature sédimentaire des évènements de crue	202
5.2. Des Images CM passées et actuelles différentes	205
5.3. Mobilité et sociétés	207
Conclusion du chapitre	209

## **Partie III. Réponses des sociétés à l'activité hydrogéomorphologique ligérienne** \_\_\_\_\_ **213**

<b>Chapitre 7. Les communautés urbaines face aux contraintes fluviales depuis le XIV<sup>e</sup> s.</b>	<b>217</b>
1. Les communautés urbaines et les crues de la Loire	218
1.1. La réaction des communautés aux crues de la Loire	218
1.1.1. L'anticipation de l'aléa	218
1.1.2. La préservation des ponts face aux crues et glaces	219
1.1.3. Reconstruction et nettoyage suite aux évènements	221
1.1.4. Des inondations imperceptibles	222
1.2. Une évolution des réactions entre le Moyen Âge et le XIX <sup>e</sup> s. ?	224
1.3. La mémoire et la perception des crues	226
1.3.1. Les indices du registre MS/034	227
1.3.2. La crue exceptionnelle de septembre 1586	228
1.4. Des évènements catastrophiques ?	230
1.4.1. Des évènements considérés comme non catastrophiques avant le XVIII <sup>e</sup> s.	230
1.4.2. Les changements de la fin du XVIII <sup>e</sup> s. et du XIX <sup>e</sup> s.	231
2. Les communautés face aux divagations de la Loire	234
2.1. Le défi du franchissement d'une Loire large et mobile à Nevers	234
2.1.1. Une large bande active fortement aménagée dès les XIV <sup>e</sup> et XV <sup>e</sup> s.	235

2.1.2. La stabilisation et contraction du lit aux XVIII <sup>e</sup> et XIX <sup>e</sup> s.	241
2.2. Le double défi du franchissement de la Loire à Decize	246
2.2.1. Des ponts très vulnérables face aux crues	246
2.2.2. Détourner et concentrer l'eau par les battis dès le XV <sup>e</sup> s.	247
2.3. Le cas de Digoïn	252
2.4. Des contraintes et des trajectoires d'aménagement différentes	254
Conclusion du chapitre	258
<b>Chapitre 8. Les sociétés rurales face à la dynamique fluviale de la Loire</b>	<b>263</b>
1. L'habitat dans et en limite du lit majeur de la Loire	264
1.1. Différentes configurations de l'habitat dans le lit majeur	264
1.2. Un habitat présent et adapté au lit majeur depuis la période médiévale	266
2. L'évolution de l'habitat rural face à l'érosion depuis le XVIII <sup>e</sup> s.	272
2.1. Répartition spatiale des disparitions	272
2.2. L'anticipation de l'érosion par les populations	275
3. Les plaintes des riverains vis-à-vis de la dynamique fluviale	276
3.1. Le contenu des plaintes	276
3.2. Les modalités de la conservation de ces plaintes	277
Conclusion du chapitre	278
<b>Chapitre 9. Réponses morphologiques de la Loire à l'évolution hydro-climatique, à l'aménagement et aux activités anthropiques entre 1755 et 2023</b>	<b>281</b>
1. Évolution générale en plan de la Loire entre 1755 et 2023	282
1.1. Contraction de la bande active	282
1.2. Évolution du nombre et de la surface des îles	285
2. Évolution verticale du lit de la Loire	287
3. Trois secteurs d'évolution distincts	288
3.1. Secteur 1 : Digoïn à Bourbon-Lancy	291
3.2. Secteur 2 : Bourbon-Lancy à Imphy	291
3.3. Secteur 3 : Imphy au Bec d'Allier	292
4. Les conséquences de l'aménagement de la plaine	293
4.1. Évolution générale de l'aménagement	294
4.2. Étude par secteurs et sous-secteurs	296
4.2.1. Secteur 1	296
4.2.2. Secteur 2	297
4.2.2.1. Évolution du site d'étude de Thareau	297
4.2.2.2. Évolution des sites d'Imphy et du site d'étude d'Uxeloup	298
4.2.3. Secteur 3	302
4.3. Une présence des aménagements qui reste sous-estimée	303
5. Les extractions de granulats	305
6. La part du facteur hydrologique face au facteur anthropique	306
Conclusion du chapitre	308
<b>Conclusion générale</b>	<b>311</b>
<b>Perspectives de recherche</b>	<b>317</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>321</b>
<b>Sources</b>	<b>348</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>351</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>356</b>
<b>Annexes</b>	<b>357</b>
Annexe 1. Liste des crues de la Loire (1380 – 1845)	357
Annexe 2. Liste des crues de la Loire (1846– 2023)	363
Annexe 3. Mesures XRF	366

