Université de Strasbourg – Faculté de Géographie et d'Aménagement
Master 2 Géographie Environnementale parcours FERN

RECONSTITUTION DE LA TRAJECTOIRE TEMPORELLE (XVIIIE ET XXIE S.) DU RHIN SUPERIEUR ENTRE MARCKOLSHEIM ET RHINAU PAR ETUDE PLANIMETRIQUE

Observatoire Hommes-Milieux (OHM) Fessenheim
***Projet IDEX Interdisciplinaire Unistra-CNRS* Juxta Rhenum**

Mémoire de Master 2 GAED réalisé par M. Sébastien Boisson

Soutenu le 26 juin 2019 à la faculté de Géographie de Strasbourg

Membres du Jury
M. Laurent SCHMITT (Maitre de Stage et Professeur),
M. Dominique SCHWARTZ (Responsable master et Professeur),
Mme. Cybill STAENTZEL (Post-doctorante)

Reconstitution de la trajectoire temporelle (XVIIIe et XXIe s.) du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau par étude planimétrique

Observatoire Hommes-Milieux (OHM) Fessenheim
Projet IDEX Interdisciplinaire Unistra-CNRS Juxta Rhenum

Mémoire de Master 2 GAED réalisé par M. BOISSON Sébastien

Soutenu le 26 juin 2019 à la faculté de Géographie de Strasbourg

Alphonse de Lamartine (1790-1869)

Roule libre et superbe entre tes larges rives
Rhin, Nil de l'Occident, coupe des nations !
Et des peuples assis qui boivent tes eaux vives
Emporte les défis et les ambitions !
Alphonse de Lamartine, *La Marseillaise de la Paix*, 1841.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Laurent Schmitt et le Laboratoire Ville Environnements de m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage dans le cadre de mon mémoire de master 2 et du projet Juxta Rhenum. Laurent Schmitt a su me guider, me faire confiance et me transmettre une partie de son amour pour le Rhin.

Je tiens également à remercier Dominique Schwartz et Cybill Staentzel pour avoir accepté de juger mon travail.

Je remercie bien évidemment mon cher collègue Nicolas Heitz pour tous les moments, de joies, de doutes et de fatigues partagés ensemble pour l'élaboration de nos deux mémoires.

L'élaboration de ce mémoire aurait été probablement plus longue sans l'aide de Romain Wenger que je remercie de bon cœur.

Grzegorz Skupinski du Laboratoire Image Ville Environnements a su être toujours disponible et m'aider pour toute information géographique et pour l'acquisition de données précieuses.

Je remercie Solenn Taveau pour m'avoir soutenu et aidé à l'élaboration de ce mémoire. Sans elle le travail aurait été plus dur et moins compréhensible.

Merci Latif Pato pour tous ces moments de questionnement sur divers sujets. Sans toi le quatrième étage n'aurait pas été aussi attrayant.

Enfin, je remercie Marie-Anne Le Mentec, Éole Cézard, El Pueblo Élite, Valentin Chardon, Pixel Isiodou, Roger Gilabert pour leur aide pour la rédaction, la compréhension et la traduction de certaine partie de mon mémoire.

Merci

TABLES DES MATIÈRES

Table des matières

REMERCIEMENTS 4
TABLES DES MATIÈRES 5
INTRODUCTION 7
ÉTATS DE L'ART 9
I. Histoire et caractéristiques du Rhin et du Rhin supérieur 9
I.1 Anthropisation du Rhin 9
1.2 Régime fluvial du Rhin 11
1.3 Caractéristiques fluviales de notre zone d'étude (Marckolsheim-Rhinau) 14
II. Histoire des aménagements du Rhin selon Tulla 15
II.1 Les grandes étapes de l'aménagement. 15
II.2 Impactes des aménagements sur le Rhin. 19
II.3 Le Grand Canal d'Alsace et la centrale de Fessenheim. 19
II.4 Les polluants historiques 21
ETUDE CARTOGRAPHIQUE 23
I. Histoire de l'analyse planimétrique et carte anciennes 23
I.1 Qu'est-ce que la planimétrie ? 23
I.2 L'étude des cartes anciennes 23
I.3 Sélection des cartes anciennes à étudier 24
II. Méthodes de traitement 26
II.1 Le géoréférencement 26
II.2 La digitalisation 27
II.3 Les zones d'études prioritaires 34
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS 35
I. Évolution de l'hydrosystème fluvial du tronçon 35
I.1 Évolution naturelle de l'hydrosystème fluvial de 1778 à 1838 35
I.2 Évolution de l'hydrosystème fluvial à partir des aménagements anthropiques. 41
II. Identifications des zones de contractions des chenaux potentiellement pollués 49
II.1 Contractions des chenaux 49
II.3 Limites de la méthode 55
CONCLUSION 57

BIBLIOGRAPHIE 58
ANNEXES 61
Annexe 1 :..... 61
Annexe 2 :..... 62
Annexe 3 :..... 64
Annexe 4 :..... 65
TABLE DES ILLUSTRATIONS 66
ABSTRACT/RÉSUMÉ..... 68

INTRODUCTION

Axe de communication et de ressource alimentaire, zone de richesse écologique, espace de loisir et de commerce, les cours d'eau et les plaines alluviales sont indissociables de l'évolution de l'Homme (Deschodt et al, 2003). Ainsi, au cours des 2000 dernières années, et principalement des 400 dernières, les activités humaines ont influencés de manière croissante les bassins versants et leurs chenaux. La modification de l'environnement physique par l'Homme a profondément marqué les cours d'eau (Knighton,1984).

Les travaux réalisés sur le Rhin ont souvent été effectués sans tenir compte de la dynamique propre de l'hydrosystème fluvial. Cela entraîne généralement une stabilisation totale des géo-formes fluviales, une banalisation des paysages et des écosystèmes fluviaux (Schmitt, 2000).

Les aménagements effectués sur le Rhin ont permis l'industrialisation qui a elle-même induit une partie des polluants dans le Rhin. Les polluants rejetés ont pu se stocker dans les sédiments fins formé lors de la contraction des chenaux. Cette contraction des chenaux est liée aux aménagements. Nous pourrions parler d'une boucle de rétroaction positive dans le sens ou les aménagements permettent l'industrialisation et donc le rejet de polluant. Polluants qui sont eux même stockés dans la rétraction des chenaux lié aux aménagements.

Ainsi, Le Rhin dans notre cas d'étude a été profondément touché par les aménagements pour leurs intérêts économiques, sociaux et culturels. Néanmoins, depuis le XIXe siècle, une partie de notre société souhaite un retour à l'état « naturel », et donc à une compréhension des événements passés et à une restauration du milieu (Houssier, 2014).

Afin de comprendre aux mieux ces événements passés, le but de notre travail dans le cadre du projet Juxta Rhenum et de notre mémoire, sera d'effectuer une analyse planimétrique diachronique fine du tracé en plan de l'hydrosystème fluvial du Rhin entre Marckolsheim et Rhinau. L'analyse est utile pour caractériser les ajustements géomorphologiques induits par les aménagements et utile pour quantifier des zones de contractions des chenaux par dépôts de sédiments fin, potentiellement polluées formant des zones de « hotspot[1]» privilégiées de polluants.

Comment l'analyse planimétrique du tronçon du Rhin entre Marckolsheim–Rhinau permet-elle de voir une évolution de l'hydrosystème fluvial du Rhin et de localiser des zones de contractions des chenaux recoupés par dépôts de sédiments fin potentiellement pollués liées aux aménagements du fleuve du XIXe siècle ?

[1] « Points chauds » de biodiversité, zones de haute priorité de conservation. MEDAIL. & al, 2006, Biodiversité végétale méditerranéenne et anthropisation : approches macro et micro-régionales, *Annales de géographie*, 618-640.

Pour tenter de répondre à cette question, notre première partie sera consacrée à l'état de l'art. Dans celle-ci, nous pourrons, entre autres, définir notre zone d'étude, mais aussi parler des grandes phases de l'aménagement du Rhin. Dans une seconde partie, nous étudierons les cartes anciennes qui nous ont été proposées et la manière dont nous les avons traitées. Enfin, nous ferons une analyse plus poussée de l'hydrosystème fluvial du Rhin et notamment des résultats obtenus après traitements des données issues de notre partie précédente.

ÉTATS DE L'ART

I. Histoire et caractéristiques du Rhin et du Rhin supérieur

I.1 Anthropisation du Rhin

I.1.a La présence de l'Homme du Néolithique au Moyen-âge

Certaines fouilles préventives et sites archéologiques nous permettent d'apercevoir l'occupation humaine dans notre secteur du Néolithique jusqu'au moyen-âge (Annexe 1).

De nombreuses découvertes principalement situées du côté allemand du fleuve nous témoignent d'une présence humaine. La majorité des traces humaines du côté français sont situées à Bischwihr et Muntzenheim. De ce qui est retenu, la répartition des hommes s'est faite en fonction de l'hydrosystème du fleuve de l'époque, mais aussi des marais qui étaient encore présents en grande quantité à cette époque (Carbiener, 1969).

À l'âge du bronze, les zones humides asséchées par l'abaissement du niveau de la nappe permettent la mise en culture. Néanmoins, certaines zones situées près du fleuve ne sont pas utilisées en raison des fréquentes inondations qui y ont lieu.

L'âge de fer n'est pas bien documenté sur l'activité des Hommes. Nous pouvons quand même attester d'une occupation anthropique croissante. La fin de l'âge de fer est marquée par une phase d'amélioration climatique (Houssier, 2014).

Enfin, l'antiquité et le Moyen-âge correspondent à des phases d'installation conséquente. La taille des villages augmente et le nombreux d'habitants augmente également. Des axes de communication ont été découverts plus près du fleuve (Houssier, 2014).

I.1.b L'appropriation du Rhin par l'Homme

La notion de Rhin apparaît rapidement avec les récits de Posidonios un philosophe, géographe et historien de 100 ans avant J-C. À cette époque, le Rhin n'évoque pour le philosophe qu'une notion assez vague de « cours d'eau situé aux extrémités du monde » (Grenier, 1920). Ce n'est que plus tard, au premier centenaire de notre ère, que la « découverte » du Rhin fut officialisée. Une fois que César a conquis une plaine au pied des Vosges, son armée contempla les vastes vallées vertes du Rhin. Ce qui devait être une expédition pour combattre les pays voisins se transforma en expédition d'exploration. Malheureusement, le Rhin était très peu décrit à cette époque. En effet, celui-ci était considéré plus comme une frontière entre les terres conquises qu'un réel lieu d'intérêt et de puissance économique.

Ce n'est qu'au Moyen-âge que le Rhin sauvage devint un lieu d'exploitation. Cela est encore très contrasté, car la population locale voit le Rhin à la fois comme

un lieu de vie, mais aussi de danger. En effet, les terres agricoles sont fertiles, la faune et la flore y sont abondantes. Les premières voies internationales de communication se multiplient sur le fleuve. Néanmoins, les crues périodiques viennent entraver l'expansion de l'activité humaine. La plupart du temps, les crues viennent inonder les terres agricoles et peuvent parfois emmener une partie du bétail et des habitations. Certaines données historiques parlent de villages qui auraient disparu à la suite de grandes crues (Descombes, 2012). Les communes de Dummenhein au XIVe (près de Plobsheim), Abertzheim (près de La Wantzenau), et Neukirch (près d'Herrlisheim) ont été englouties par les eaux aux alentours du XIVe, XVe siècle (Werner, 1928) la crue de 1480 aussi appelées « le Déluge du Rhin » (Figure 1 et 2) a également fait des dégâts et a marqué très certainement les esprits (Houssier, 2014).

Figure 1 : Naufrage du Rhin au XVIIIe. Source : Encyclopédie 2007, le Rhin

Figure 2 : Déluge du Rhin, inondation de l'été 1480 entre Bâle et Strasbourg 1628. Source : Cosmographie de S.Mûnster,mémoire de Houssier

Dès lors, nous pouvons voir le Rhin comme un espace de crainte et de convoitise. Il est décrit comme charmant, hospitalier et à la fois terriblement hostile. Le Rhin est un fleuve de merveilles et de richesse. Il inspira tant de poèmes et de contes, de chants et de légendes qui ont traversé les siècles. Il est l'un des fleurons de l'économie européenne. Mais depuis plus de deux siècles, les Hommes se sont radicalement détournés des espaces marginalisés qu'ils appréciaient, créant ainsi un premier renversement des valeurs. La montée en puissance de l'industrialisation a mis fin en grande partie aux lieux dits naturels et sauvages et a encouragé les aménagements sur les fleuves et les rivières.

« Aucun fleuve au monde n'a pris dans l'histoire et le développement de la civilisation, dans les créations et les soucis des hommes, une part aussi directe, aussi diverse, aussi étendue, aussi notoire que le Rhin » (Dollfus, 1960).

Il faut comprendre qu'actuellement le Rhin est le troisième plus grand fleuve d'Europe et est peut-être considéré comme l'un des plus grands espaces économiques d'Europe. Il est à la fois un haut-lieu de puissance économique, politique et de production pour les pays qu'il traverse. Son essor s'est principalement fait durant et après la Première Guerre mondiale. « Avec des transports s'élevant

jusqu'à 76 millions de tonnes en 1927, et supérieurs de 19 millions de tonnes à ceux de 1913, le Rhin représente, plus encore qu'avant la Guerre, la puissance fluviale de beaucoup la plus forte de l'Europe (Uhry, 1932) ». Ces résultats et cette puissance économique sont dus aux progrès accomplis à partir des années 1913 dans le matériel de circulation. La capacité de transport et d'extraction des matières premières avec l'avancée des technologies a hissé le Rhin au rang des fleuves les plus importants du monde.

1.2 Régime fluvial du Rhin

Des Alpes à la mer du Nord, le Rhin possède une longueur d'environ 1320 km et draine une superficie d'environ 185 000km² dans neuf pays différents (Diaz & all, 2016). Le Rhin naît dans le massif du St Gothard et se jette dans la mer du Nord. Il court le long de l'Alsace sur 180 km entre Bâle et Lauterbourg. Le Rhin peut être découpé en cinq tronçons bien distincts (Benyoucef, 2013) :

- Le Rhin alpin s'écoule dans les Alpes Suisses puis dans le lac de Constance. Les affluents du Rhin montagnards possèdent des régimes nuancés passant d'un type glaciaire au type nivopluvial, avec une prédominance des hautes eaux pendant les saisons chaudes (Frécaut, 1961).

- Le haut Rhin s'écoule à l'Ouest à la sortie du lac de Constance jusqu'à Bâle. « À Bâle, le régime du Rhin conserve ses caractéristiques alpines. Sur la période 1808-1980, le fleuve débite en moyenne 1 030m^3/s (1 522m^3/s en juin et 689 m^3/s en janvier), soit près de la moitié du débit de l'embouchure, alors qu'il draine à peine 20 % de la surface totale du bassin » (extrait de l'encyclopédie du Rhin).

- Le Rhin supérieur (le secteur dans lequel notre zone d'étude s'intègre) quant à lui prend la direction du Nord et traverse une dépression large de 35 km entre les Vosges et le Massif Palatin près de la Forêt-Noire. L'incision y est faible, voir même négative et les matériaux sont moins grossiers (Houssier, 2014). Le style fluvial est particulièrement mobile dans le temps. L'incision dans ce secteur est liée d'une part à une puissance fluviale réduite en raison de sa pente peu élevée et d'autre part d'une dynamique érosive en amont à une dynamique de transport moins incisive. Les affluents directs s'écoulent sur la seconde partie du bassin rhénan. La topographie de haute montagne du précédent tronçon laisse place à un domaine de moyenne montagne et de plaine. Un été relativement chaud avec peu de pluie réduit sensiblement le débit du fleuve (Amoros and Petts, 1993).

-Le Rhin moyen commence à hauteur de Bingen en traversant le Massif schisteux rhénan. Cette portion du Rhin s'écoule ensuite jusqu'à la ville de Bonn dans une vallée marquée par son érosion. Le Rhin moyen se caractérise par un lit pierreux et rocheux. La vitesse du cours d'eau augmente du fait qu'il passe dans un lit très érodé.

-Le Rhin inférieur, le cinquième et dernier tronçon, commence à partir de Bonn et se termine à hauteur de Bimmen/Lobith. Il se caractérise par une plaine alluviale et de nombreuses terrasses. Composé à l'époque de nombreux méandres il est de nos jours corseté dans son lit comme le Rhin supérieur. Néanmoins, le fleuve dispose de plus de surface d'épandage des crues du fait de l'éloignement des lignes de digues. Le Rhin se poursuit ensuite vers l'ouest jusqu'aux Pays-Bas. Il se divise pour finir en trois bras principaux, l'Ijssel en direction du Nord, Le Waal et le Lek en direction de l'Ouest pour se jeter dans la mer du Nord (CIPR-Commission Internationale pour la Protection du Rhin)(Figure 3).

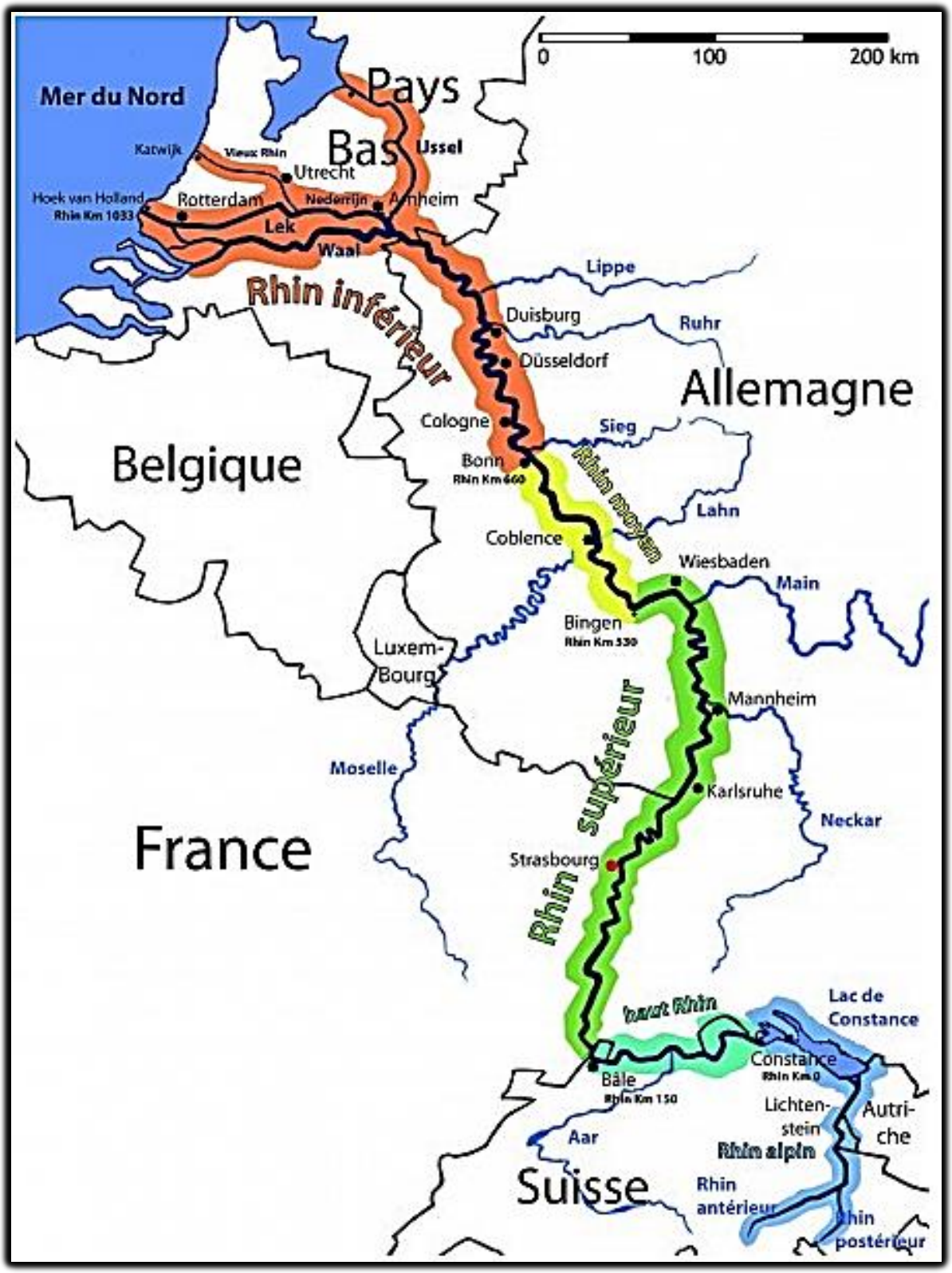


Figure 3 : Carte du Rhin et de ses différents tronçons : Sources : Archives Strasbourg.eu

1.3 Caractéristiques fluviales de notre zone d'étude (Marckolsheim-Rhinau)

Dans le cadre de ce projet, nous allons nous focaliser pour notre sujet sur un tronçon du Rhin entre Marckolsheim et Rhinau. La distance est d'environs de 20 km entre chaque ville et ce tronçon se trouve dans le Rhin supérieur. Dans ce secteur, l'incision y est assez faible, voire nulle. Les matériaux transportés sont moins grossiers qu'en amont et les anciennes anastomoses caractérisées par un écoulement peu puissant transportent des sédiments plus fins (Houssier, 2014). Une partie de la stabilisation de ces anastomoses se fait grâce à la stabilisation de sédiments dus à l'installation d'une végétation stable.

Sur une bonne partie du tronçon l'installation d'une végétation à stade pionnier est en place, puis survient rapidement un stade de végétation terminal lorsque les crues sont suffisamment espacées dans le temps. Bien évidemment, ce type de banc végétalisé se trouvait en bien plus grande quantité lorsque le fleuve n'était pas encore affecté par les aménagements. Actuellement, la bande active et la zone des bancs alluviaux sont peu, voire non végétalisées. Le remaniement des crues annuelles est encore important et d'ordre relativement naturel (Figure 4).

Les zones de tressages présents sur notre tronçon sont quant à eux composées de chenaux multiples entremêlés, enserrant des bancs de galets ou de sables fins. La mobilité du fleuve sur ce tronçon peut faire varier lors de chaque crue la répartition des bancs. De plus, les bancs sont souvent plus bas que l'altitude du champ d'inondation, ce qui augmente la chance qu'ils soient recouverts ou déplacés.

Figure 4 : Le Rhin en tresse et anastomose vers 1830. Source : peinture de Birmann, 1758-1844.

II. Histoire des aménagements du Rhin selon Tulla

II.1 Les grandes étapes de l'aménagement.

Pour parvenir à une puissance économique majeure en Europe, le Rhin s'est vu être drastiquement modifié au début du XIXe siècle. Bien évidemment, des aménagements ultérieurs à ceux du XIXe avaient été déjà réalisés. Néanmoins, ces aménagements antérieurs n'avaient pas de réelles conséquences quant aux modifications hydromorphologiques du fleuve. Avant 1840 le fleuve est encore composé de chenaux multiples, de bancs d'îles végétalisés gênant la navigation (Marchal et Delmas, 1959). De plus, la disparition de plusieurs villages liés à la dynamique fluviale (Werner, 1928 ; Schmitt et al, 2016) et au paludisme (Tricart et Bravard, 1991) a incité Von Tulla à intervenir.

Ainsi, dès 1784, le général d'Arçon présente un projet pour modifier le Rhin. Son but étant de réunir tous les différents bras en un seul et de donner au lit unique une pente assez faible aux prix d'amples sinuosités (Tricart et Bravard ,1991). Ce projet est difficilement réalisable pour des raisons politiques de l'époque. Ce n'est qu'à partir de 1809 qu'apparaît un second projet, celui du colonel Johann Gottfried Von Tulla. Le projet de Von Tulla diffère sensiblement de celui du général d'Arçon. En effet, Von Tulla veut rassembler tous les bras en un lit unique, mais donner un tracé en ligne droite afin de provoquer une incision tout en défendant les berges à l'aide d'épis. Ce que proposent ces deux généraux c'est de la correction ou chenalisation.

Comme d'autres grands fleuves alpins (Danube, Rhône), l'écosystème fluvial était presque intact et très dynamique (Gallusser et al, 1992). La mobilité du fleuve ainsi que les dangers (maladie, inondation) pouvant affecter l'Homme devaient changer. Les raisons essentielles pour chacun des aménageurs étaient de protéger les villages riverains contre les inondations, d'assainir les zones marécageuses, d'assurer bien évidemment un écoulement des crues, de créer des chemins de halage[2] et enfin de pouvoir exploiter un maximum de terre pour l'agriculture. Finalement, c'est le contrat de Von Tulla qui finit par séduire la France à l'époque. Von Tulla réalisa des illustrations pour représenter les modifications mises en place sur un tronçon du Rhin (Figure 5).

[2] Halage : Chemin situé sur les rebords d'une rivière. Il sert de passage aux hommes et aux animaux.
Source : Linternaute.

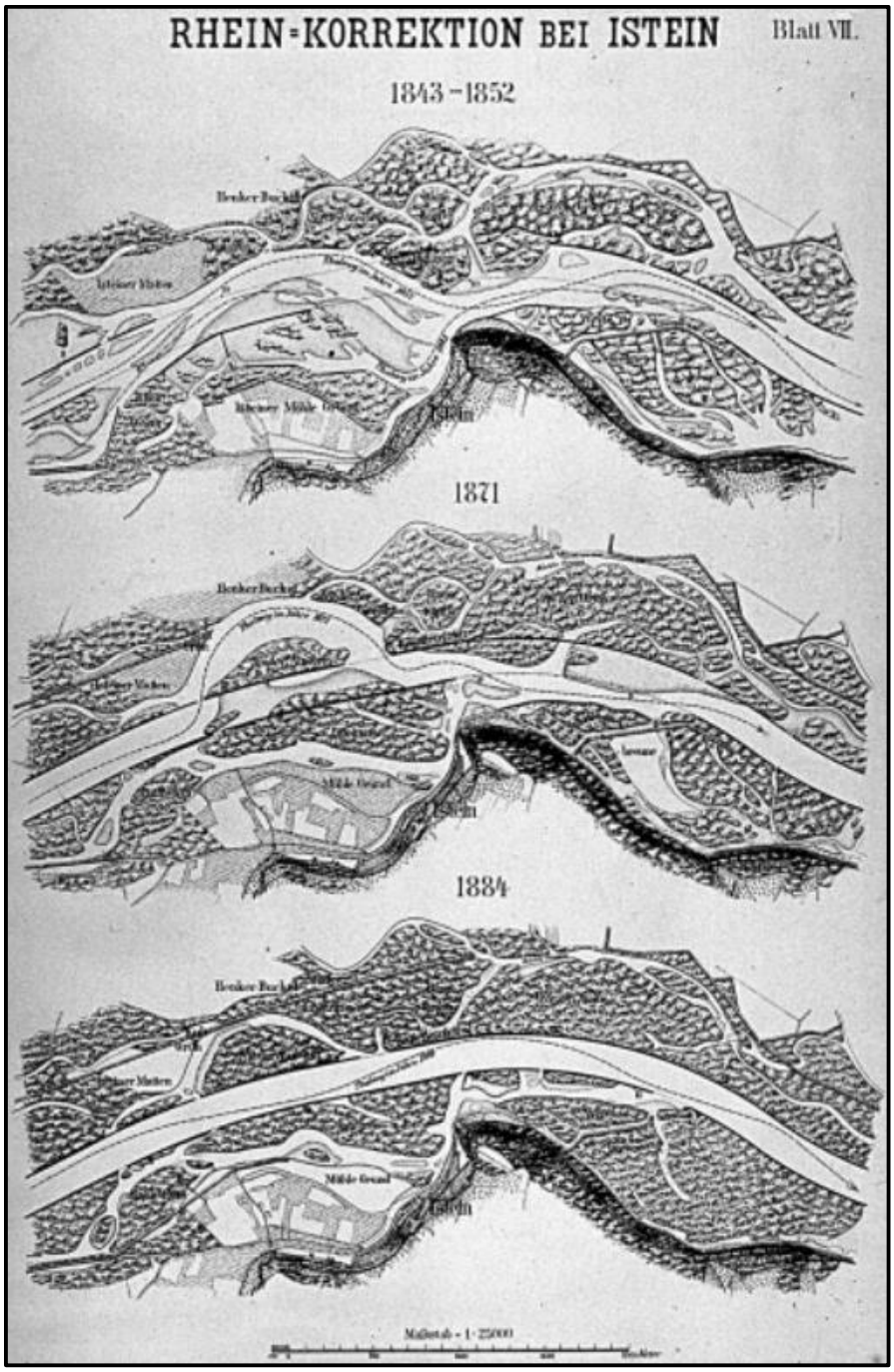


Figure 5 : River constructions near Istein between the measures by TULLA and HONSELL. Source : Herget.J 2005

Les premiers aménagements du Rhin dit « correction du Rhin », commencent en 1840. Ces aménagements consistaient à convertir dans un chenal unique les différents méandres dont le Rhin était constitué (Diaz, 2016). De plus, le talweg[3] constituait une séparation politique entre la France et l'Allemagne de l'époque. Le talweg changeait régulièrement de trajectoire. De ce fait, l'endiguement du lit mineur

[3] Un talweg ou thalweg correspond à la ligne formée par les points ayant la plus basse altitude soit dans une vallée, soit dans le lit d'un cours d'eau. Source : « les mots de la géographie, dictionnaire critique » BRUNET.R et al.

a évolué pendant la construction des aménagements (Johnstone, 2010). Les premières constructions de 1840 ont été améliorées pour offrir un meilleur niveau de protection lors des crues.

Entre 1930 et 1958, d'autres aménagements sont réalisés. Cette période est appelée période de régulation (Diaz, 2016). Durant cette période, le lit est encombré par des graviers et un talweg jugé encore trop instable. Cette accumulation rend difficile la circulation entre Strasbourg et Bâle. La plupart des pays limitrophes au Rhin sont tous convaincus que cet encombrement des bancs ralentit leur économie. Car à l'époque une grande partie de la richesse était le charbon. Celui-ci circulait par les transports de grands bateaux (Johnstone, 2010).

« Le but du projet de régularisation était de créer un chenal permanent dans le lit du Rhin de 75m de large et 2m de profondeur lors qu'il y a un débit d'au moins 540m3/s à Bâle pour faciliter la navigation » (Johnstone, 2010).

Les ouvrages proposés pour la régularisation sont les épis, les digues, les seuils et le Grand Canal d'Alsace.

Les épis étaient disposés pour freiner en partie la vitesse du courant de l'eau et pour limiter dans une moindre mesure le mouvement des sédiments tout en laissant un chenal libre à la forme sinusoïdale (Figure 6).

Les digues longitudinales sont quant à elles utilisées pour renforcer les berges. Les seuils de fonds se raccordent aux digues longitudinales et les épis s'appuient directement aux digues déjà existantes de la correction (Département Fédérale de l'Intérieur, 1929) (Figure 7).

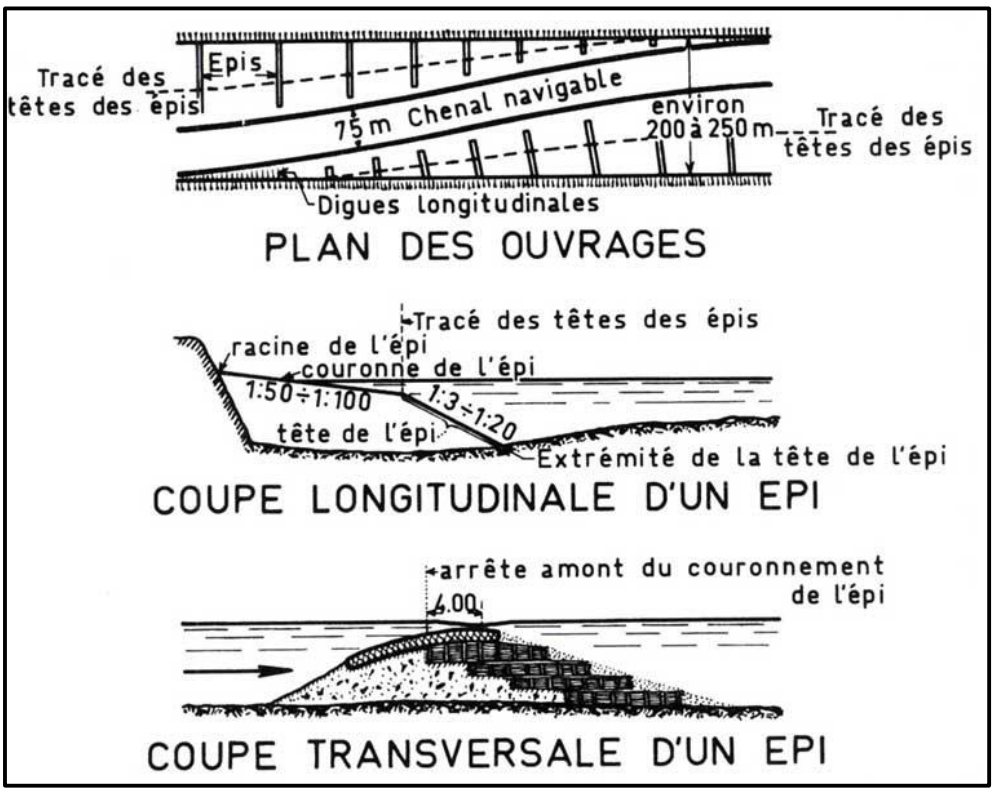


Figure 6 : Plan de construction des épis et seuils de fond. Source : Johnstone.2010, extrait de Poitrat, 1950

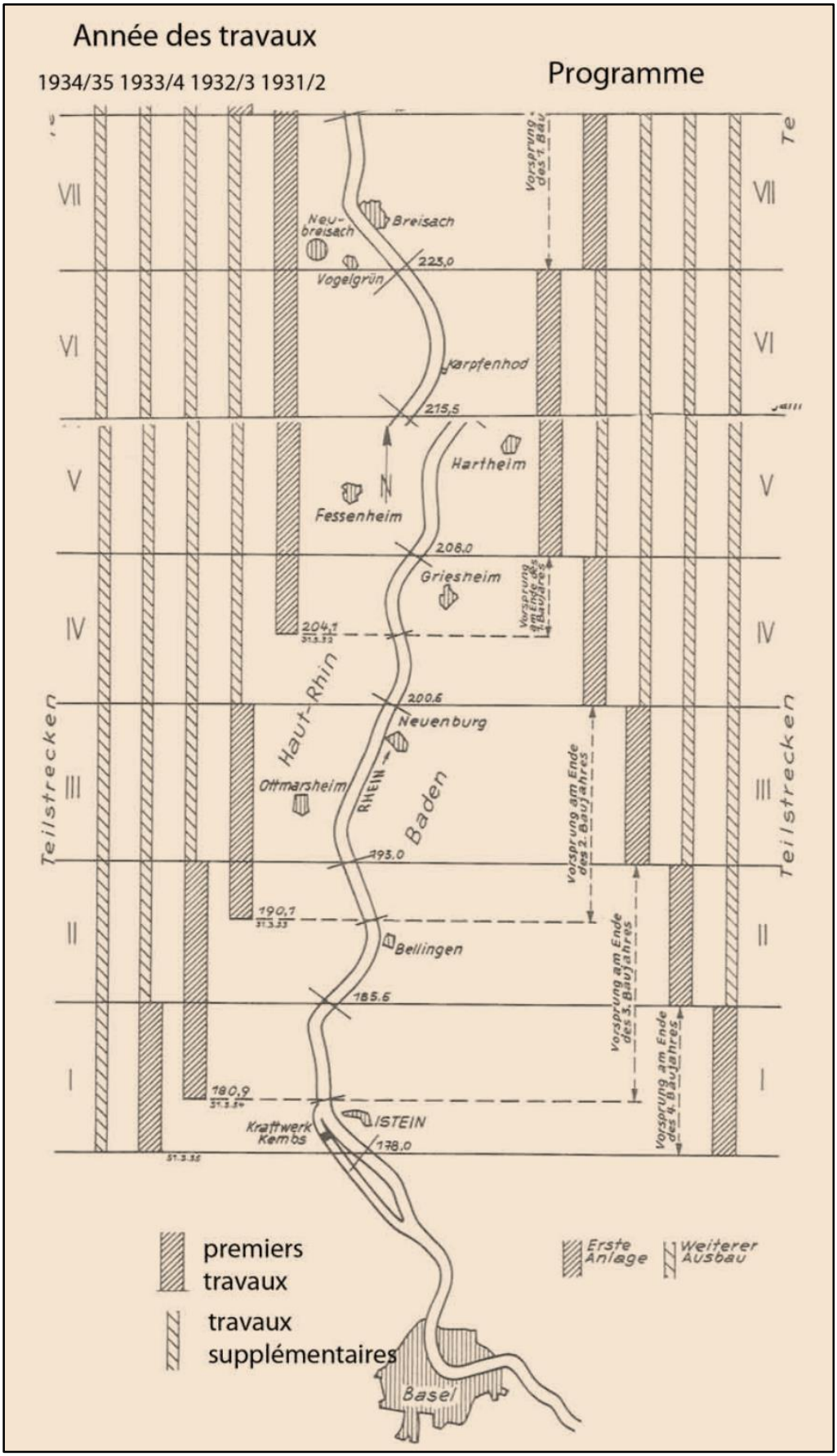


Figure 7 : Construction des premiers travaux et des travaux supplémentaires de la régularisation sur le Rhin entre Bâle et Schonau. Source : (Schneider, 1966)

Les problèmes causés par les travaux de Tulla apportent une nouvelle réflexion sur les aménagements avenir. Deux solutions seront proposées.

La première sera de créer un canal latéral au Rhin. La seconde sera d'aménager directement le fleuve.

II.2 Impactes des aménagements sur le Rhin.

Les pressions exercées sur le Rhin existent depuis bien longtemps. En effet, l'Homme a très rapidement apprivoisé les cours d'eau en général pour en exploiter leurs nombreuses ressources. D'autres parts l'Homme a utilisé les fleuves pour développer son commerce et ses technologies. Cette appropriation des cours n'a pas été sans conséquence. D'autant plus que l'intensité et la nature des pressions exercées sur les fleuves ont considérablement évolué à travers l'histoire (Arnaud, 2012). L'urbanisation des fleuves est rapidement devenue le principal agent perturbateur des systèmes fluviaux. Il existe trois pressions directes qui affectent le lit mineur et les berges (Wasson, 1995).

-l'entretien : élimination de la végétation, nettoyage du bois, tri des déchets…

-les terrassements : extractions, recalibrage, rectification, reprofilage, curage.

-Les ouvrages : barrages, épis, seuils, endiguements, protections de berges.

Nous allons nous focaliser principalement sur la pression directe des ouvrages. En effet, nous pouvons considérer que sur notre tronçon (Marckolsheim–Rhinau), la correction et la régulation ont été les principaux agents perturbateurs du fonctionnement hydromorphologique de ces dernières années. Le taux de polluant a augmenté, le cours naturel du Rhin a été rectifié ce qui a eu des conséquences sur toutes formes d'habitats naturelles sur le fleuve. Nous présenterons donc, plus en détail, le Grand Canal d'Alsace ainsi que la centrale de Fessenheim (industrialisation) qui entrent dans notre programme d'étude Juxta-Rhenum et l'Observatoire Hommes-Milieux (OHM) de Fessenheim.

II.3 Le Grand Canal d'Alsace et la centrale de Fessenheim.

Construit entre 1928 et 1959 le Grand Canal d'Alsace a été réalisé pour sécuriser la navigation entre Bâle et Strasbourg. Celui-ci assure également une fonction énergétique grâce à des barrages hydro-électriques. Lors de la signature du Traité de Versailles en juin 1919, un droit exclusif de la production énergétique est accordé à la France. Dès lors, un canal latéral sur la rive gauche du fleuve de plus de

120 km est divisé en 8 biefs[4] : Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim, Vogelgrun, Marckolsheim, Rhinau, Gerstheim et Strasbourg (Hubert, 2018).

En 1925, la Commission Centrale pour la Navigation du Rhin (CCNR) autorise la réalisation du Grand Canal (Johnstone, 2010). Après la mise en service de la centrale d'Ottmarsheim à la fin de 1952, les travaux du Grand Canal d'Alsace entrepris par Electricité de France se poursuivent à un rythme accéléré (Ritter, 1957) (Figure 8). Les barrages de Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim et Vogelgrun assurent une production d'électricité annuelle moyenne d'environ 4 milliards de kilowattheures (kWh) grâce à la force hydraulique du canal. Ce qui représente en 2007, selon EDF, plus de 20 % des besoins d'électricité en Alsace (Hubert, 2018).

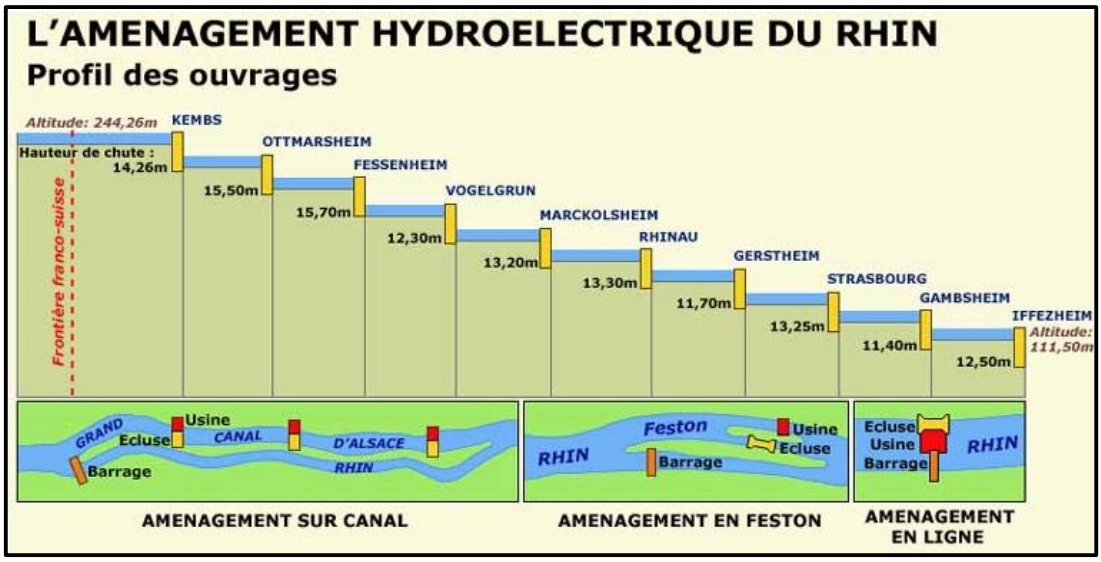


Figure 8 : Infrastructures sur le Grand Canal d'Alsace entre 1928 et 1959 centrale, écluses, festons.

La mise en eau des différents biefs a engendré une dérivation de la majorité des eaux du Rhin dans le canal, par conséquent le Rhin a perdu en débit. De plus durant les périodes de moyennes et hautes eaux, la fréquence de l'intensité a diminué.

D'autre part, le canal fragilise l'écosystème. L'endiguement du cours d'eau supprime des parties des plaines alluviales, ce qui revient à priver le fonctionnement d'auto-épuration de celles-ci. S'ensuit également, une eutrophisation du cours d'eau et donc un appauvrissement de la faune, et notamment des espèces nobles de poisson comme le saumon.

Une dimension longitudinale avec une déconnexion des bras secondaires de l'amont à l'aval, une dimension latérale avec une diminution de la fréquence de débordements et enfin une dimension verticale avec un abaissement du toit de la nappe (Arnaud, 2012). Ainsi la création du Grand Canal d'Alsace n'est pas sans

[4] Partie d'un canal ou d'une rivière canalisée comprise entre deux écluses. Source : NNRTL (Centre national de ressources textuelles et lexicales.)

conséquence sur l'écosystème et l'hydromorphologie du Rhin dans notre zone d'étude.

II.4 Les polluants historiques

Depuis les premiers aménagements et tout au long de ces dernières années, le Rhin a été confronté à des pollutions diverses. Ces pollutions étaient d'origine inorganique, telles que ce que rejettent l'industrie ou les mines, des déchets radioactifs, des matières inorganiques provenant des eaux usées souvent d'origine domestique et/ou industrielle, des bactéries et micro-organismes et enfin des huiles minérales et des matières toxiques spécifiques.

Pour rappel et selon la définition de Wasserrecht.K : « Un cours d'eau est considéré comme étant pollué lorsque la composition ou l'état de ses eaux est, directement ou indirectement, modifié du fait de l'activité de l'homme dans une mesure telle que celles-ci se prêtent moins facilement à toutes les utilisations auxquelles elle pourrait servir à leur état naturel ou à certaines d'entre elles ». La gravité de pollution d'un cours d'eau se fait bien évidemment en fonction des propriétés hydrologiques et biologiques du bassin récepteur (Wolfrom, 1964). De ce fait, le degré de pollution est plus ou moins difficilement exprimable selon le cours d'eau étudié. Sur notre zone d'étude entre Marckolsheim et Rhinau, il est difficile de déterminer précisément la localisation les polluants. Néanmoins, nous pouvons retrouver quelques traces de polluants sur l'ensemble du Rhin.

Selon un groupe d'experts, la première cause de pollution des eaux dans le Rhin est la décharge de déchets industriels. La COMMISSION SPÉCIALE CHARGÉE D'ÉTUDIER LA POLLUTION DU RHIN a fait un choix sur les éléments polluants à surveiller de près, car leur impact sur l'eau utilisée pour l'agriculture, la population, l'industrie et la faune et flore aquatique pouvait être très néfaste.

De ce qui est cité dans la littérature, on retrouve certaines classes de polluants qui ont été et qui sont encore présents dans le Rhin. C'est le cas des trihalométhanes (THMs), qui regroupent le chloroforme, le bromodichlorométahne, le dibromochlométhane et le bromoforme. Il y a aussi la présence de métaux lourds comme le cadmium, le mercure, le plomb, le zinc, le cuivre, le nickel ou encore le chrome. Encore une fois, l'identification et l'intérêt porté sur la pollution dépendent de la zone d'étude (en Aval ou plus en Amont), mais aussi de ses caractéristiques propres (température, pH, pression, etc.). Pour avoir une idée générale, selon la Commission Internationale de la Protection Radiologique (ICPR) les polluants circulants actuellement dans le Rhin sont les chlorures, le phosphore, le cadmium et le cuivre.

Tout l'intérêt de cette étude n'est pas de connaître en détail les polluants présents dans le Rhin, mais de comprendre leur comportement et si possible leur emplacement. En effets, les polluants cités précédemment sont susceptibles de se retrouver préférentiellement dans les sédiments fins accumulés aux débuts des aménagements. Ces sédiments se stockent ensuite dans des milieux dits « récepteurs ». Ces milieux sont les anciens chenaux présents avant le début des

aménagements. Il est donc pertinent de faire une reconstitution de la trajectoire du Rhin pour montrer son évolution avant et après les aménagements et de saisir le fonctionnement hydromorphologique du fleuve afin de repérer les anciens chenaux morts et d'identifier ces zones de dépôts pouvant être des hotspots de pollutions à travers une étude planimétrique fine.

C'est ainsi que nous entamerons notre seconde partie dédiée à l'analyse planimétrique diachronique fine (fin XVIIIe, début XXe) entre Marckolsheim et Rhinau.

ETUDE CARTOGRAPHIQUE

I. Histoire de l'analyse planimétrique et carte anciennes

I.1 Qu'est-ce que la planimétrie ?

Il existe très peu d'études scientifiques sur la planimétrie. Nous savons simplement que la planimétrie mesure les figures géométriques formées par représentation d'un point d'un terrain. Bien évidemment, cette projection se fait sur un plan horizontal.

Depuis la fin du XIXe siècle, la transmission des formes dans les documents cartographiques contemporains a été utilisée pour reconstituer le paysage ancien. L'analyse planimétrique est une approche multiscalaire[5] et temporelle. C'est à la fin du XIXe que les documents planimétriques détaillés ont conduit les historiens, géographes et archéologues à travailler sur les cartes anciennes (Robert, 2006). À partir de 1931, certains scientifiques proposent une méthode dite « régressive » de l'étude des paysages à partir de documents planimétriques. (Bloch, 1931) parle de travail en sens inverse de la ligne des temps. Ainsi « ce qu'elle prétend saisir (la méthode régressive), c'est la dernière pellicule d'un film, qu'elle s'efforcera ensuite de dérouler à reculons, résignée à y découvrir plus d'un trou, mais décidée à en respecter la mobilité » (Robert, 2006). C'est la méthode que nous utiliserons pour l'élaboration de ce mémoire. Nous allons partir du plus récent (donc du mieux représenté géographiquement) pour aller vers le plus ancien. Comme je l'expliquerai par la suite dans la partie « Méthode de traitements », le fait de commencer par des cartes récentes minimise les erreurs lors du géoréférencement des cartes de plus en plus anciennes.

I.2 L'étude des cartes anciennes

L'étude des cartes anciennes est souvent utilisée en géographie fluviale. Il y a un double intérêt à cette étude. Dans un premier temps, elle permet de comprendre la géomorphologie historique. Il est ainsi possible, si les cartes le permettent, de visualiser l'activité humaine sur l'environnement. Elle est souvent révélatrice de changements d'occupation du sol et de leur répartition. Dans un second temps, cette étude des cartes anciennes permet de voir l'évolution des phénomènes spatiaux dans le temps. Que ce soit dans un temps « T » ou sur plusieurs dates. Il y a donc un enjeu très important et nécessaire dans notre cas d'étude : étudier l'évolution de l'occupation du sol géographiquement.

[5] Une méthode est dite multiscalaire et pluridimensionnelle quand elle fait appel à plusieurs méthodes. Source : site internet Glosbe le dictionnaire multilingue en ligne.

Le début de l'étude des cartes anciennes remonte en France au XVIIIe siècle. C'est à partir de ce moment que les cartes commencent à avoir un vrai intérêt cartographique et deviennent exploitables. Bien évidemment des cartes étaient créées avant cela, mais la précision de celles-ci restait discutable et la comparaison entre deux époques n'était pas significative. À cette époque l'utilité scientifique des cartes de qualité permettait de cartographier entre autres des événements marquants, des aménagements importants, des défenses militaires et des réseaux fluviaux. Ainsi c'est avec Sr. Broutin (1710-1734) que les cartes sont évoquées comme étant des documents fondateurs de la cartographie à échelle fine (Houssier, 2014). Les cartes antérieures à 1778 ne montrent généralement pas les bras du Rhin. Hormis quelques zones de conflits où la précision de l'occupation du sol a été fournie. Dans son ouvrage publié en 1986, M. Levy parle de cette difficulté à obtenir des informations fiables concernant les différents bras du Rhin. Il est donc nécessaire dans notre projet d'utiliser les cartes anciennes pour comprendre le fonctionnement du fleuve avant les aménagements et pour pouvoir trouver les zones de hotspot des polluants. Bien évidemment, l'étude des cartes anciennes ne se fait pas aussi simplement que l'étude des cartes actuelles. Cela demande un tri des données en amont et une bonne méthode pour les traiter.

I.3 Sélection des cartes anciennes à étudier

Nous avons choisi de travailler sur les cartes de 1778, 1828, 1838, 1872 et 1926 (Annexe 2). Ces cartes ont été choisies pour leurs qualités graphiques et pour voir l'évolution du système fluvial à travers des comparaisons. Ainsi nous avions cinq dates. Les écarts de temps entre chaque carte ne sont pas homogènes, mais cela ne pose pas de problème pour la compréhension et l'intérêt de notre sujet. La plus ancienne de nos cartes a pour intérêt de montrer un hydrosystème fluvial peu anthropisé. La carte de 1778 est censée être très riche en informations avec beaucoup d'espace en végétation en eau et en banc. La carte suivante de 1828 quant à elle marque le début d'un nouvel air. Le fleuve reste toujours peu anthropisé même si toutefois, les grandes villes immergent et le fleuve perd une partie de sa dynamique. Cette modification légère se voit avec une modification du talweg principal du Rhin et d'une perte en espace végétalisé.

Le pas de temps entre notre première carte et la carte de 1828 n'est pas sans intérêt, car plus de 100 ans séparent les deux cartes et les modifications sont relativement minimes. Autre intérêt de la comparaison c'est de voir la qualité des données. La carte de 1828 est d'une qualité nettement supérieure à celle de 1778. La carte de 1838 est d'ailleurs souvent une prise comme référence par les géographes voulant digitaliser ou géoréférencer une zone d'étude. En effet, sa qualité pour l'époque est très appréciable, car les tracés sont précis et fins. De plus, la carte est en couleur, ce qui facilite les méthodes de traitements. Dans notre jeu de cartes, celle de 1838 représente le Rhin juste avant le début de ses grands aménagements (phase de correction). Notre avant-dernière carte a été sélectionnée pour ce qu'elle illustre. Nous apercevons le début des aménagements du Rhin. La

carte de 1872 marque un contraste important entre l'avant et l'après-aménagement. Pour finir, la carte de 1926 n'est pas de très bonne qualité. La typologie est difficilement utilisable et certains tracés sont flous. De plus, le manque de couleur sur ne facilite pas la compréhension typologique. Néanmoins, elle est assez ressemblante avec ce que nous avons de nos jours. L'hydrosystème fluvial actuel est assez ressemblant avec ce que nous avions en 1926. Ainsi nous avons pu la comparer directement avec les cartes des années précédentes. Nous pourrions voir dès lors un net contraste entre l'hydrosystème fluvial du XVIIIe et du XXe siècle. Voici deux représentations déjà géoréférencées des cartes retenues (Figure 9 et 10).

Nous commencerons notre phase de création et de modifications des données dans la partie « méthodes de traitements » qui va suivre.

Carte géoréférencé de 1838 entre Marckolsheim et Rhinau.

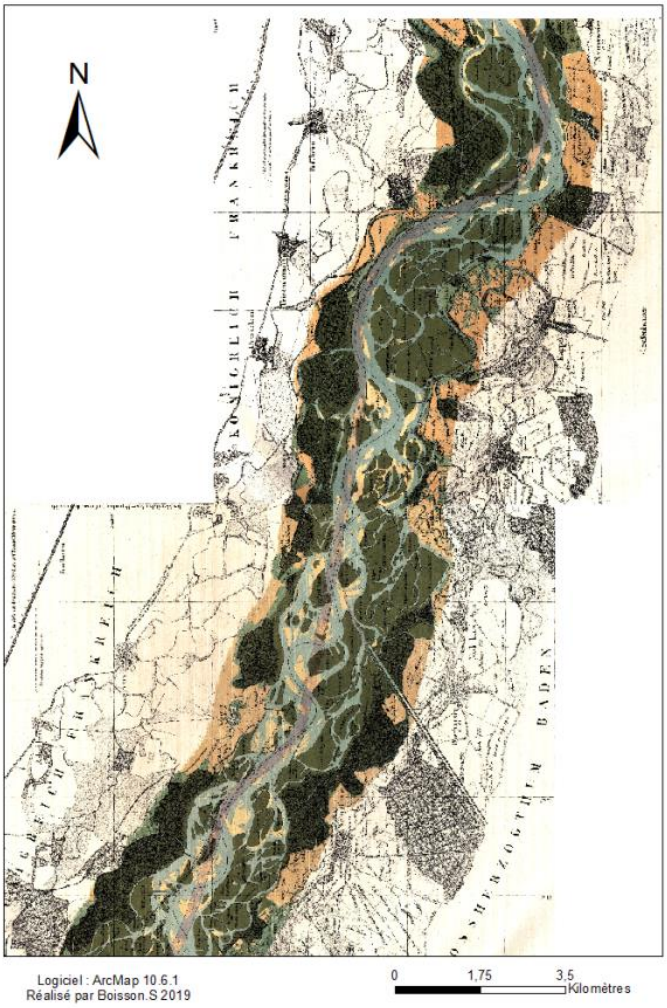


Figure 10 : Travail de géoréférencement sur les cartes anciennes de 1838. Source : PCA (Petite Camargue Alsacienne)

Carte géoréférencé de 1872 entre Marckolsheim et Rhinau.

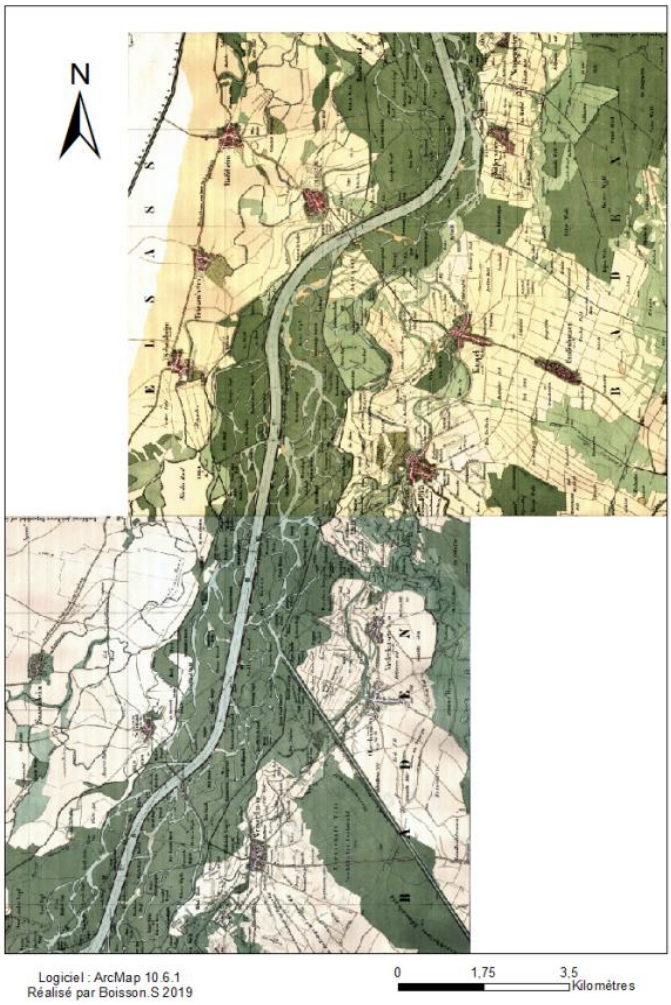


Figure 9 : Travail de géoréférencement sur les cartes anciennes de 1872. Source : PCA (Petite Camargue Alsacienne)

II. Méthodes de traitement

II.1 Le géoréférencement

Notre tronçon d'étude par sa position frontalière a été le lieu de nombreux conflits. Les guerres, ainsi que la dynamique fluviale naturelle du Rhin, ont modifié d'année en année les cartes étudiées. Le tronçon étudié (le tronçon entre Marckolsheim et Rhinau), n'était pas sur une et unique carte. Les cartes que nous voyons en Figure 9 et 10 sont une juxtaposition de plusieurs feuilles (Annexe 3). Ainsi il a fallu géoréférencer les cartes par dates, mais aussi faire attention à bien découper et géoréférencer si nécessaire les cartes d'une même année entre elles (Annexe 4). En effet, les cartes attribuées ainsi que le géoréférencement n'étaient pas dans la même méthode de projection. La méthode de projection par défaut est le Lambert 93. Deux de nos cartes étaient déjà bien géoréférencées en Lambert II étendu. Nous avons donc décidé de continuer cette méthode de projection pour l'intégralité de nos cartes. Le travail a donc été dans un premier temps, de mettre les cartes avec le mode de projection en Lambert II étendu. Il était pertinent de travailler les cartes sur des logiciels tiers afin d'avoir l'entièreté des cartes sans les bordures qui leur étaient attribuées. Une fois les cartes découpées et la méthode projection définies (Lambert II étendu), le géoréférencement pouvait commencer.

Le géoréférencement devait être homogène sur les cartes afin d'avoir un bon couvert. Le seul problème étant peut-être que sur la carte de l'IGN (Institut national de l'information géographique), la partie allemande n'était pas présente. De ce fait, il y a potentiellement un moins bon géoréférencement du côté droit du Rhin sur nos cartes. La rigueur et l'organisation des données pour le géoréférencement devaient être de mise afin de proposer des résultats satisfaisants pour la suite de nos travaux.

Se focaliser sur des points précis tels que les églises et les routes a facilité le travail de géoréférencement. Comme nous l'avons évoqué plus haut, nous avons géoréférencé avec une méthode régressive. Comme carte de référence, nous avons choisi la carte de l'IGN de 2012 fournie par Grégoire Skupinsky du LIVE. Ainsi, la carte de 1926 a été géoréférencée sur la base de la carte de 2012. Pour donner suite à cela, la carte de 1926 a permis de géoréférencer la carte de 1872. Il a été un peu plus compliqué de géoréférencer celle de 1838 sur celle de 1872, car l'occupation du sol a fortement évolué durant la période séparant ces deux dates. De plus, la typologie ainsi que la qualité des cartes, notamment celle de 1778, pouvaient être moindres et donc réduire la qualité du géoréférencement. Même si les cartes étaient géoréférencées en fonction de dates antérieures, il y avait bien évidemment un retour fréquent sur la carte de base de l'IGN confirmant l'exactitude des données. Le fait de géoréférencer une carte sur la carte postérieure à celle-ci et de répéter l'opération sur chaque date peut biaiser le géoréférencement. Nous pouvons rapidement nous retrouver avec de grosses marges d'erreur entre les cartes de 1828 et 2012. C'est pour cela que nous avons pris la précaution de refaire constamment un retour sur la carte de base de 2012. Pour les cartes de 1838 et 1828 nous ne voyons pas de réels changements, du moins, en termes de bâti, sur l'une ou l'autre

carte. Il a été assez simple de géoréférencer la carte de 1828 sur la base de celle de 1838. La carte de 1778 quant à elle, étant une carte très ancienne, n'a pas pu être géoréférencée aussi précisément que les cartes postérieures.

En moyenne, une vingtaine de points étaient effectués sur l'ensemble des cartes. Pour plus de rigueur et de précision, seuls les points ayant moins d'une quinzaine de mètres d'erreur étaient géoréférencés. Selon (Arnaud, 2012) le seuil d'erreur de vingt mètres est la limite à partir de laquelle le géoréférencement ne peut plus être considéré comme pertinent. Dans de rares cas, il est possible de dépasser ce seuil et d'être dans un géoréférencement précis. Cette précision dépend fortement des modes de projections et des cartes étudiées. Pour des résultats plus pertinents sur la vingtaine de points effectués, seulement une dizaine ou une quinzaine de points étaient retenus selon la carte. La moyenne des points de transformation de degré polynomial de premier ordre était en dessous de dix mètres d'erreur. Sur certaines cartes, l'erreur moyenne était inférieure à cinq mètres. Une grande partie des points de géoréférencement a été sauvegardée. Cela pourra d'une part enrichir les bases de données, mais permettre également aux futurs utilisateurs d'étoffer et de reprendre les coordonnées pour un travail éventuel.

Il a été essentiel de prendre soin à bien géoréférencer les cartes. Cela peut paraître parfois insignifiant, mais dans le cas où le géoréférencement n'est pas bien réalisé cela peut engendrer de gros problèmes par la suite lors d'une digitalisation, par exemple. L'étude même sur laquelle nous travaillons demande de la précision et de la rigueur. Sans cette précision, les données peuvent être biaisées et conduire donc à de fausses pistes quant aux zones de dépôts de polluants. Par ailleurs, le géoréférencement est le support de notre travail cartographique.

II.2 La digitalisation

Il est bon de noter qu'il existe des méthodes de digitalisation de raster automatique. Le plugin *Historical Map* sur Qgis permet de digitaliser rapidement. Celui-ci a été développé par Nicolas Karasiack et Antoine Lomellini qui se sont basés sur le travail de Pierre-Alexis Herrault, maître de conférences en géographie à l'Université de Strasbourg. Cela peut être un avantage, mais cette méthode ne s'applique pas bien dans notre cas. La méthode est trop précise et se base sur la couleur des pixels. Or les pixels de couleur sur nos cartes ne sont pas bien définis et ne sont pas monochromes. Ainsi avec cette méthode certaines parties ne sont pas bien digitalisées. Nous avons donc continué de façon manuellement afin d'avoir un rendu précis. De ce fait, plusieurs méthodes sont possibles afin d'arriver à un résultat identique.

II.2.a Qu'est-ce que la digitalisation ?

Après l'étape de géoréférencement vient l'étape de digitalisation, qui permet de tirer des résultats concrets afin de comparer l'évolution de la portion du Rhin étudiée sur la période de temps donnée. La digitalisation des cartes s'effectue en respectant des étapes de travail simples. Premièrement, il s'agit de créer un nouveau fichier de forme. Cela ouvre une fenêtre où il faut indiquer le nom de la couche voulue, la forme (dans notre cas, polygone) et de mettre le mode de projection (Lambert II étendu), comme pour le géoréférencement. Ensuite, il suffit de sélectionner « créer des entités » et de sélectionner l'entité à représenter.

Avant toute chose, il faut choisir l'entité que nous souhaitons digitaliser et comment la digitaliser. Nous avons digitalisé les surfaces en eau, les bancs et la végétation. Ces trois entités sont les principaux éléments révélateurs de l'évolution de l'hydrosystème fluvial dans notre zone d'étude. L'outil ArcMap permet de fusionner, combiner, extraire, etc., mais le but est d'être le plus efficace possible, d'une part, pour ne pas perdre de temps et d'autre part pour ne pas ajouter de la donnée inutile.

II.2.b Étapes et méthode de digitalisation de notre typologie

L'idée de créer une typologie visant à caractériser la morphologie de chenaux actifs en milieu alluvial existe à partir de la seconde moitié du XXe siècle. L'étude de (Leopold et Gordon, 1957) semble être l'étude pionnière à proposer trois styles fluviaux de bases. Le premier, le *straight*, que l'on peut traduire comme représentant un style rectiligne. Le second appelé *meandering* est la dynamique de méandrage et enfin le *braiding* se caractérise par des chenaux multiples et par une dynamique de tressage. Bien évidemment d'autres typologies ont été accordées aux XXes siècles. (Church, 2006) crée une classification, bien que plus complexe, tout aussi intéressante. Sa discrimination des styles fluviaux se fait à travers le type de sédiments que les chenaux transportent. (Figure 11).

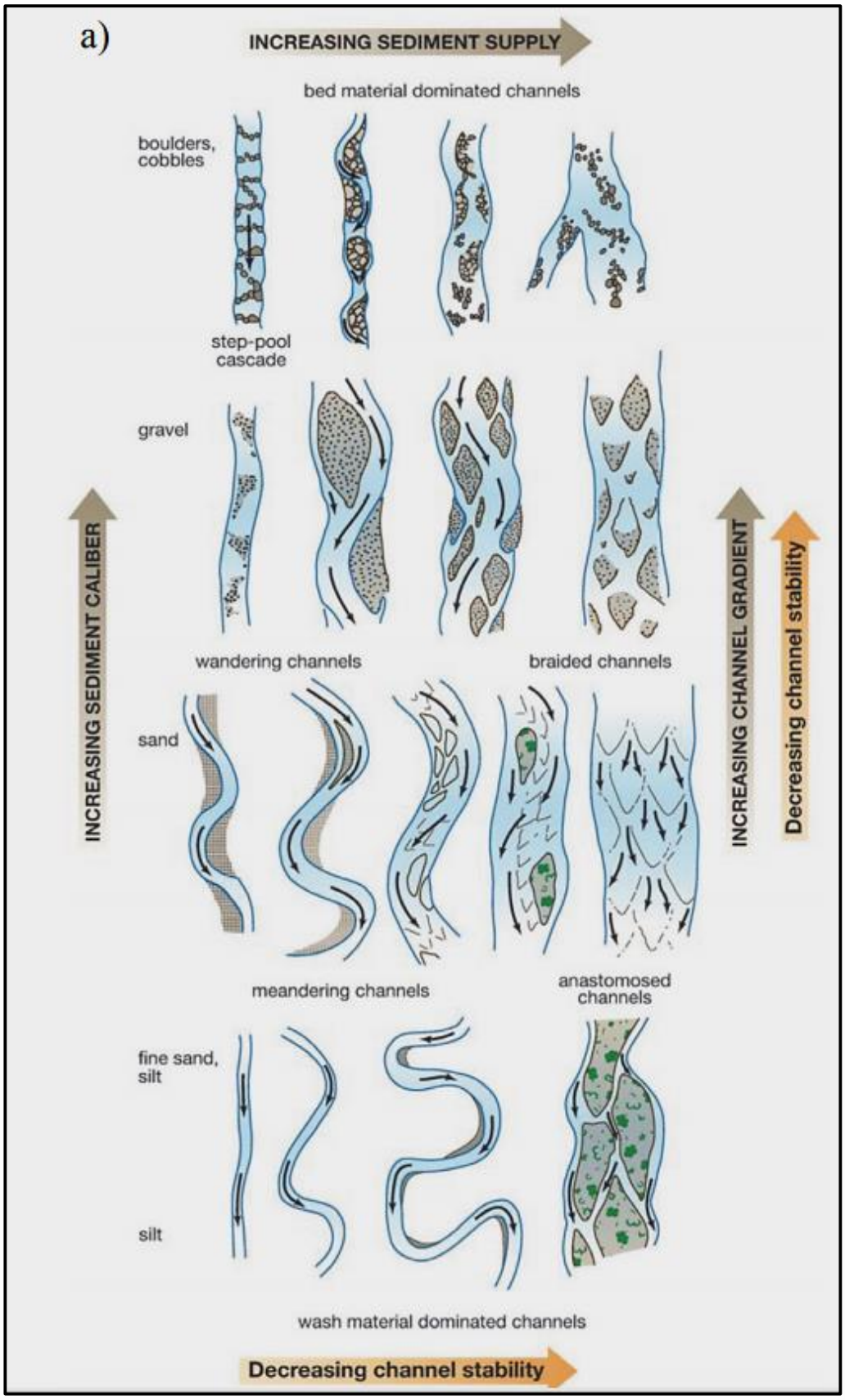


Figure 11 : Diversité des morphologies pouvant être adoptées par les chenaux alluviaux et principales caractéristiques physiques associées. Source : (Riquier, 2015) tiré de (Church, 2006).

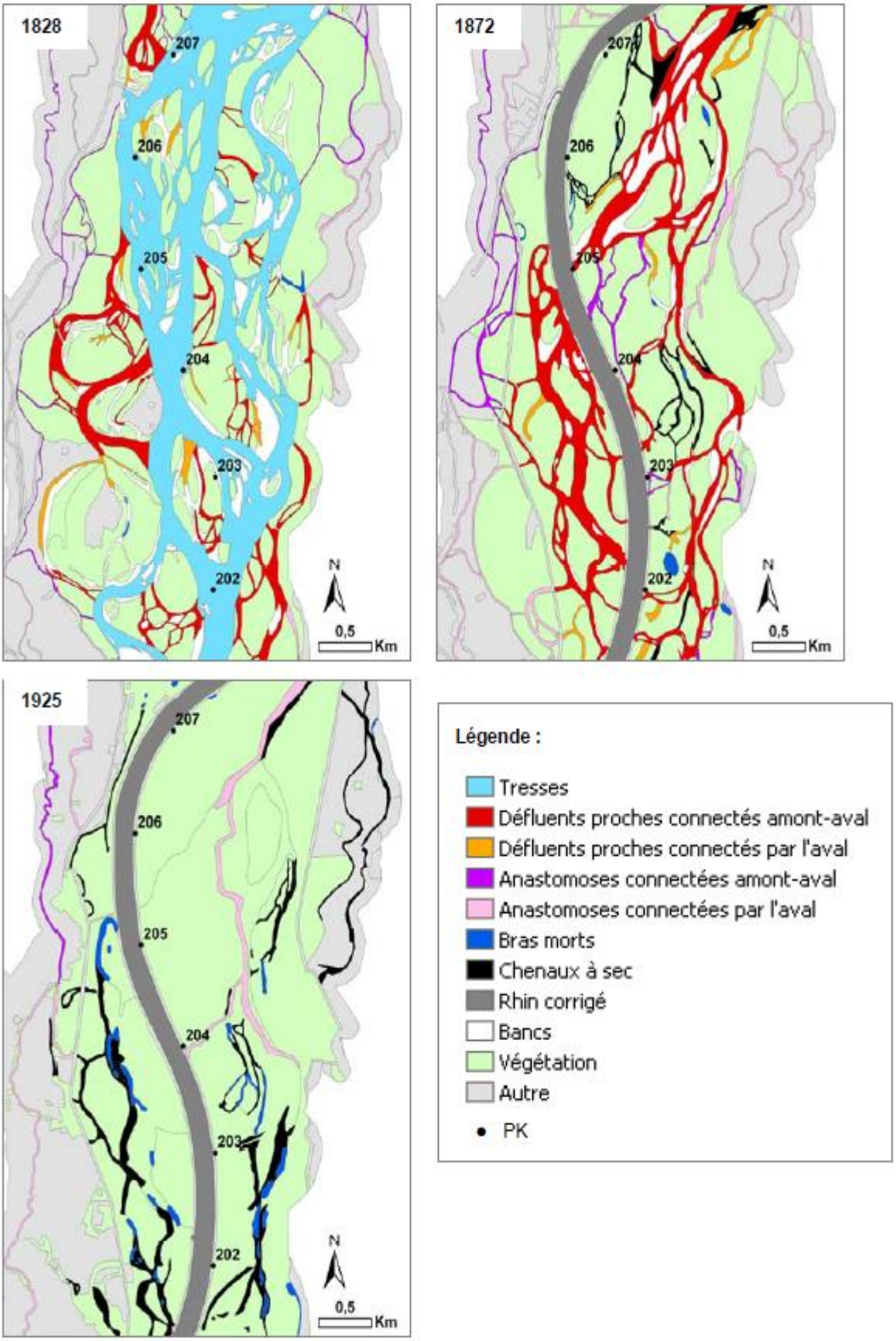


Figure 12 : Extrait de la cartographie des chenaux en 1828, 1872 et 1925 entre PK 202 et 207. Source : Thèse de Arnaud, 2012.

Avant de commencer toute méthode de traitement, nous avons dû mettre en place une typologie des chenaux. Ainsi, nous nous sommes inspirées d'une typologie réalisée par Arnaud. et Schmitt. (Figure 12). Comme nous pouvons le remarquer sur ses cartes (Figure 12) Arnaud à décider de représenter graphiquement les chenaux en distinguant les tresses, les défluents proches connectés et déconnectés et les anastomoses connectées et déconnectées par l'amont. Dans notre typologie inspirée de celle-ci, nous avons décidé de représenter graphiquement les tresses, les défluents, les anastomoses (Figure 16).

Voici trois types de chenaux que nous possédons sur notre tronçon :

Figure 13 : Chenaux en tresses du Rhin en 1838. Source : Boisson.S

Un fleuve tressé est composé de chenaux multiples entremêlés, enserrant des bancs de sables, graviers ou galets, qui peuvent être mobilisés à nouveau lors de chaque crue (Houssier, 2014). Ce style fluvial est très mobile à la fois dans l'espace, mais aussi dans le temps. Cela est généralement dû à une pente forte qui augmente son transport de débit solide (Figure 13).

Figure 14 : Chenaux en anastomose du Rhin en 1838. Source : Boisson.S

Les anastomoses (terme créé par Schumm, 1969) décrivent des formes et des processus distincts du tressage. Ces chenaux sont multiples, sinueux étroits, stables et profonds. Contrairement aux tressages, la pente est faible, isolant dans la plupart des cas, des îles de grandes dimensions. Ces îles se caractérisent par une granulométrie assez fine. La végétation peu si installer formant par moment une strate arborée (Figure 14).

Figure 15 : Chenaux en anastomose du Rhin en 1838. Source : Boisson.S

Les défluents sont principalement d'anciens chenaux de tressage. Ils apparaissent généralement après un déplacement du talweg. Ces chenaux sont principalement étroits et courts. La végétation sur les bancs et les berges est une strate arbustive. Elle occupe en moyenne 50% des berges (Figure 15).

Nous avons donc simplifié la typologie des chenaux. Cette typologie plus fine sera peut-être réalisée après le rendu de ce mémoire.

Critères \ Types de chenaux	Tresses	Défluents proches connectés par l'amont	Défluents proches déconnectés par l'amont	Anastomoses connectées par l'amont	Anastomoses déconnectées par l'amont
Connexion au chenal principal	Amont et aval	Amont et aval	Aval	Amont et aval	Aval
Distance au chenal principal	< 0,5 km	0,5-1 km *ou* anciens chenaux de tressage moins parcourus par les écoulements après le déplacement du talweg		> 0,5-1 km (au-delà des digues de hautes eaux) *ou* entre deux bandes de tressage séparées par de larges îles végétalisées	
Sinuosité	Faible (1 à 1,2)	Faible (1,1 à 1,3)		Elevée (1,2 à 1,5 voire plus)	
Largeur, longueur	Variable	Relativement étroits et courts		Etroits à très étroits, parfois très longs (17 km au maximum)	
Occupation des sols	Bancs vifs dominants (gravier ou sable), végétation occupant moins de 50 % des berges	Bancs vifs (gravier ou sable), végétation occupant plus de 50 % des berges		Pas de bancs, végétation ou surfaces cultivées occupant quasiment 100 % des berges	

Figure 16 Critères de discrimination des types de chenaux extraits des cartes (Kleinas, 2003). Modifié par (Arnaud et Schmitt et al. 2007) Source : Thèse de Arnaud. 2012.

Toute la digitalisation des chenaux et des bancs a été faite manuellement. Nous avons commencé par digitaliser les espaces en eaux. Une fois les espaces en eaux digitalisés, nous avons sélectionné les polygones effectués et nous leurs avons attribué une typologie individuelle, selon si le chenal était en anastomose en tresse ou défluent. La digitalisation des bancs n'a pas été longue, mais ce sont les éléments qui demandaient un maximum de précision, car ils n'étaient pas bien représentés sur les cartes anciennes. Pour ne pas perdre d'information, il a fallu sélectionner les sommets des points auparavant utilisés pour l'eau. Ainsi il n'y avait pas d'espace entre un banc et son chenal. L'espace était entièrement digitalisé.

La végétation[6] fait quant à elle l'objet d'une manipulation qui nous a permis de gagner énormément de temps. Cependant, pour avoir une bonne précision et faire l'intégralité de nos tronçons, pas moins de 2000 polygones ont été réalisés.

La digitalisation de la végétation s'est faite en deux étapes.

Nous avons tout d'abord extrait/copié certains chenaux déjà digitalisés afin de les replacer/coller dans d'autres cartes. Bien évidemment, les travaux de géoréférencement et de digitalisation faits précédemment devaient être exacts pour assurer un copiage et une spatialisation corrects.

Dans un second temps, il a fallu vérifier que les points de géoréférencement des cartes traitées précédemment se juxtaposent sans erreurs. Seuls les chenaux

[6] La végétation ainsi nommée, englobe toute forme de strates (arbustives, arborée) et quelques zones agricoles en faible quantité.

dont la juxtaposition était identique ont été sélectionnés. Cela a très bien fonctionné pour certains chenaux de 1828 à 1838. Nous avons ensuite fusionné les deux couches des chenaux et des bancs entre elles pour en créer une seule. Enfin, nous avons créé deux ou trois grands polygones capables d'englober l'intégralité de la carte**.** Une fois le ou les polygones créés il a suffi d'extraire les surfaces digitalisées afin de connaître les surfaces qui ne le sont pas encore, qui correspondent à la végétation (Erase sur ArcMap 10.6.1). Ainsi nous obtenons la différence entre la couche fusionnée (bancs plus chenaux) et la végétation (Figure 16).

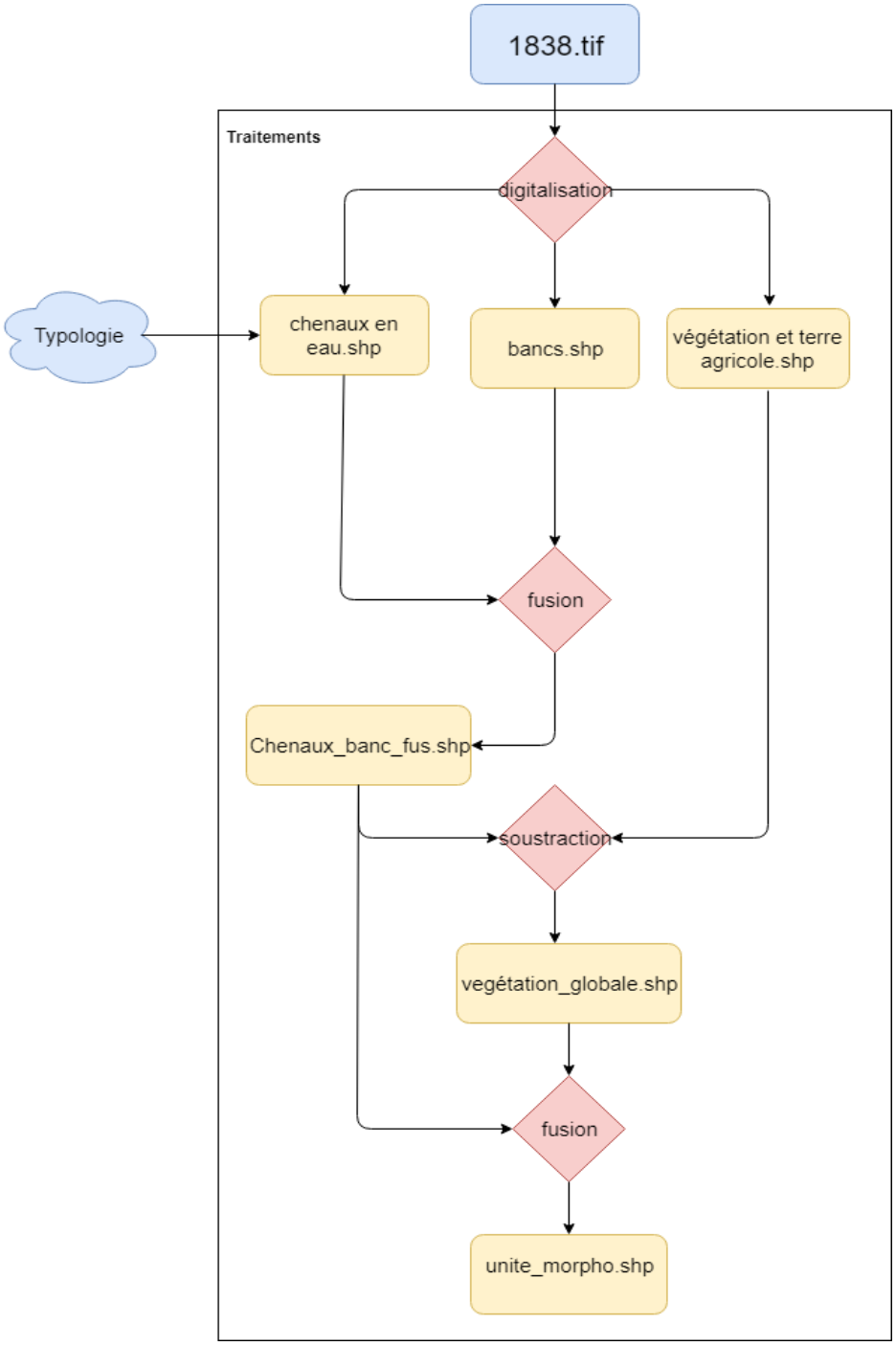


Figure 16 : étapes effectuées pour digitaliser notre tronçon de 1838. Source : Draw.io. Réalisé par Boisson.S

Finalement, tout ce qui n'est pas un chenal ou un banc est de la végétation ou des terres agricoles. Cette technique prend en compte la différence entre ce qui est déjà digitalisé et ce qu'il ne l'est pas. Dès lors, nous avions une couche végétation, avec des données exactes de l'espace qu'elle occupe**.**

II.3 Les zones d'études prioritaires

Le géoréférencement et la digitalisation des tronçons sont les deux principales étapes du traitement des données. Les traitements effectués sur les cartes sont nécessaires pour en tirer des résultats pertinents. Les cartes traitées sont désormais révélatrices de données capables de répondre à notre problématique. Étudier les cartes de 1778, 1828 et 1838 nous permet de comprendre et d'appréhender ce que pouvait être un hydrosystème pérenne.

Réaliser une étude de l'évolution de l'hydrosystème consiste à comprendre le passé pour anticiper le futur. Dans une volonté d'aménager au mieux le Rhin et de vouloir garder une partie « naturelle » du fleuve, l'étude planimétrique de cartes anciennes a toute sa place. Réaliser des comparaisons sur l'occupation du sol d'une année à l'autre, apporter des données statistiques et montrer d'éventuelles zones de polluants sont au cœur de notre problématique.

La comparaison des cartes de 1778 et 1828 nous montre une évolution du fleuve non affectée par l'Homme. À partir de 1838 les cartes auront un autre intérêt. D'une part, ces cartes auront pour objectifs de montrer l'impact de l'anthropisation sur l'hydrosystème fluvial et d'autre part elles permettront de trouver les zones de contractions où les polluants pourraient être stockés.

Les zones de contractions des chenaux pouvant contenir des polluants se sont formées lorsque le Rhin a été corrigé vers 1850. La bande fluviale a drastiquement été canalisée laissant une partie des sédiments fins dans les anciens chenaux.

À présent, nous allons tenter d'analyser les résultats obtenus afin d'en tirer des informations sur l'évolution de l'hydrosystème fluvial et sur les potentielles zones pouvant contenir des polluants historiques liées à des sédiments fins.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

I. Évolution de l'hydrosystème fluvial du tronçon

I.1 Évolution naturelle de l'hydrosystème fluvial de 1778 à 1838

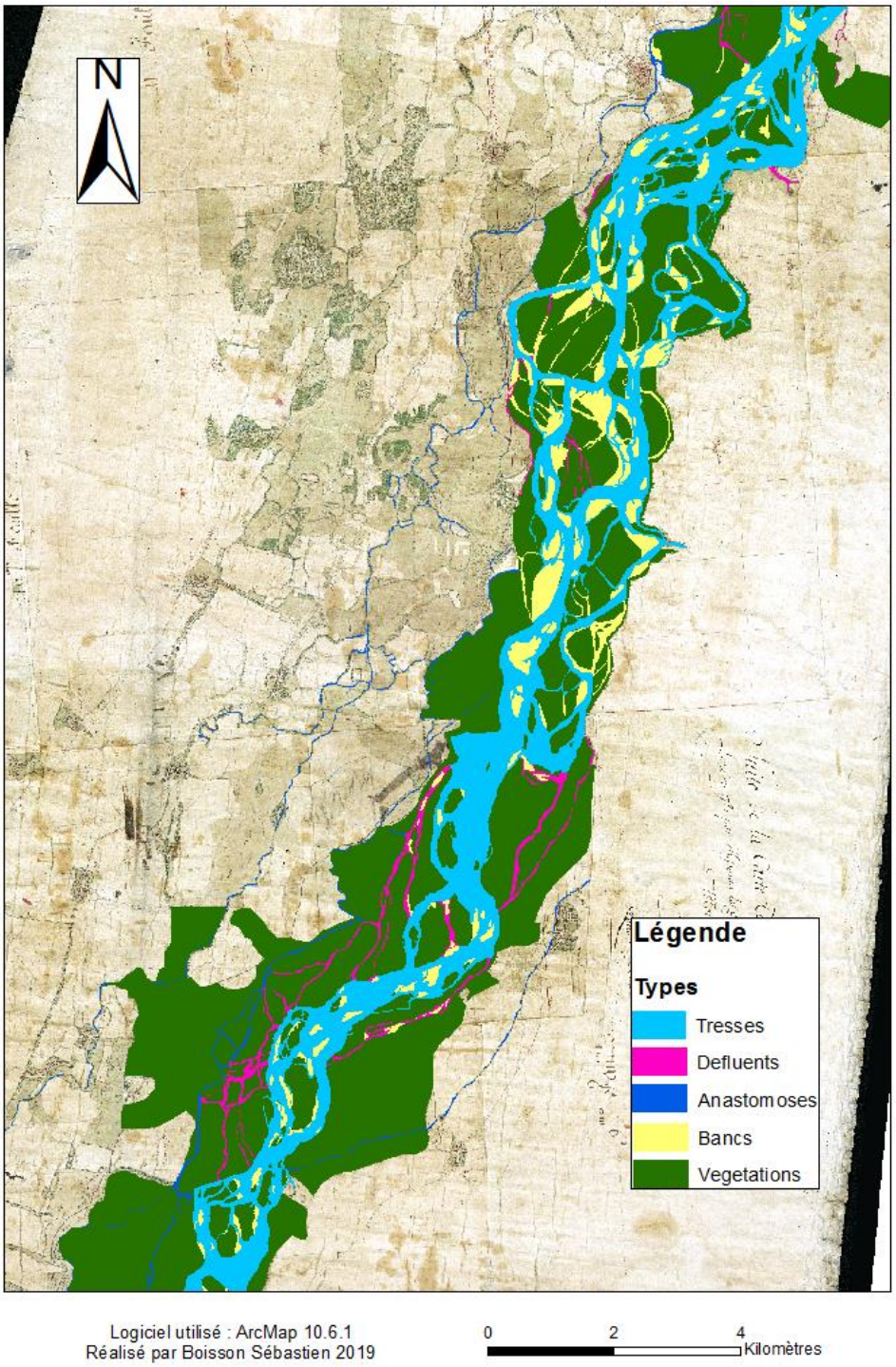


Figure 17 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1778

La carte de 1778 possède comme nous pouvons le remarquer des chenaux tressés en abondance (Figure 17). Plus en amont près de Marckolsheim de notre tronçon, nous remarquons un tressage assez uniforme. À l'inverse plus en aval près de Diebolsheim (ville actuelle) le tressage se complexifie formant plusieurs chenaux séparés par de grands bancs et de la végétation. À cette époque, le fleuve n'est pas encore affecté par les aménagements. De ce fait, l'hydrosystème fluvial montre une diversité importante d'habitats. Le fleuve se déplace à sa guise, changeant de talweg dans un frome non rectiligne. Malheureusement, nous n'avons pas la partie allemande sur carte ancienne, mais nous pouvons nous imaginer la largeur de l'hydrosystème. Celle-ci correspond en moyenne à plus de sept kilomètres sur certaines parties du tronçon. Cette première carte ainsi que la carte suivante sont des références quant à un hydrosystème fluvial non modifié par l'homme.

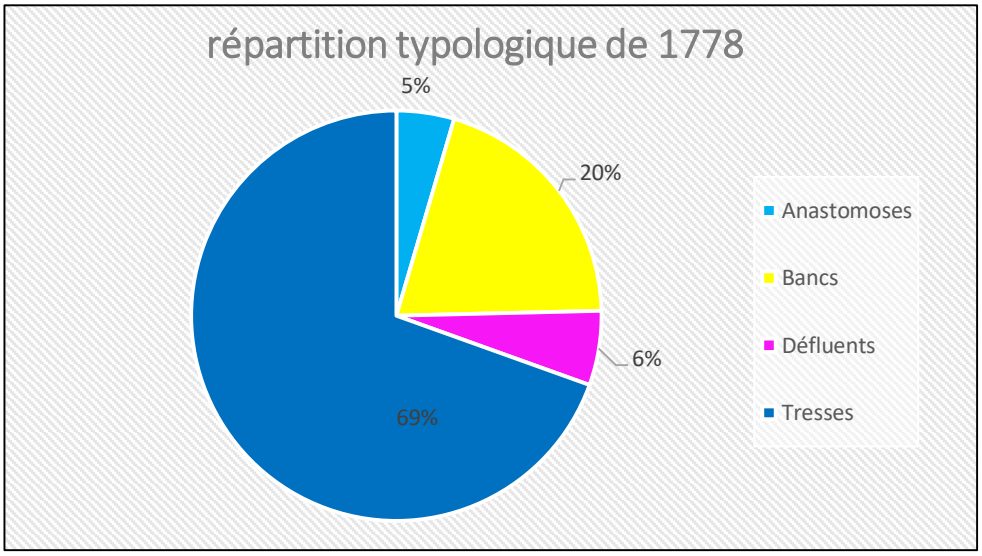
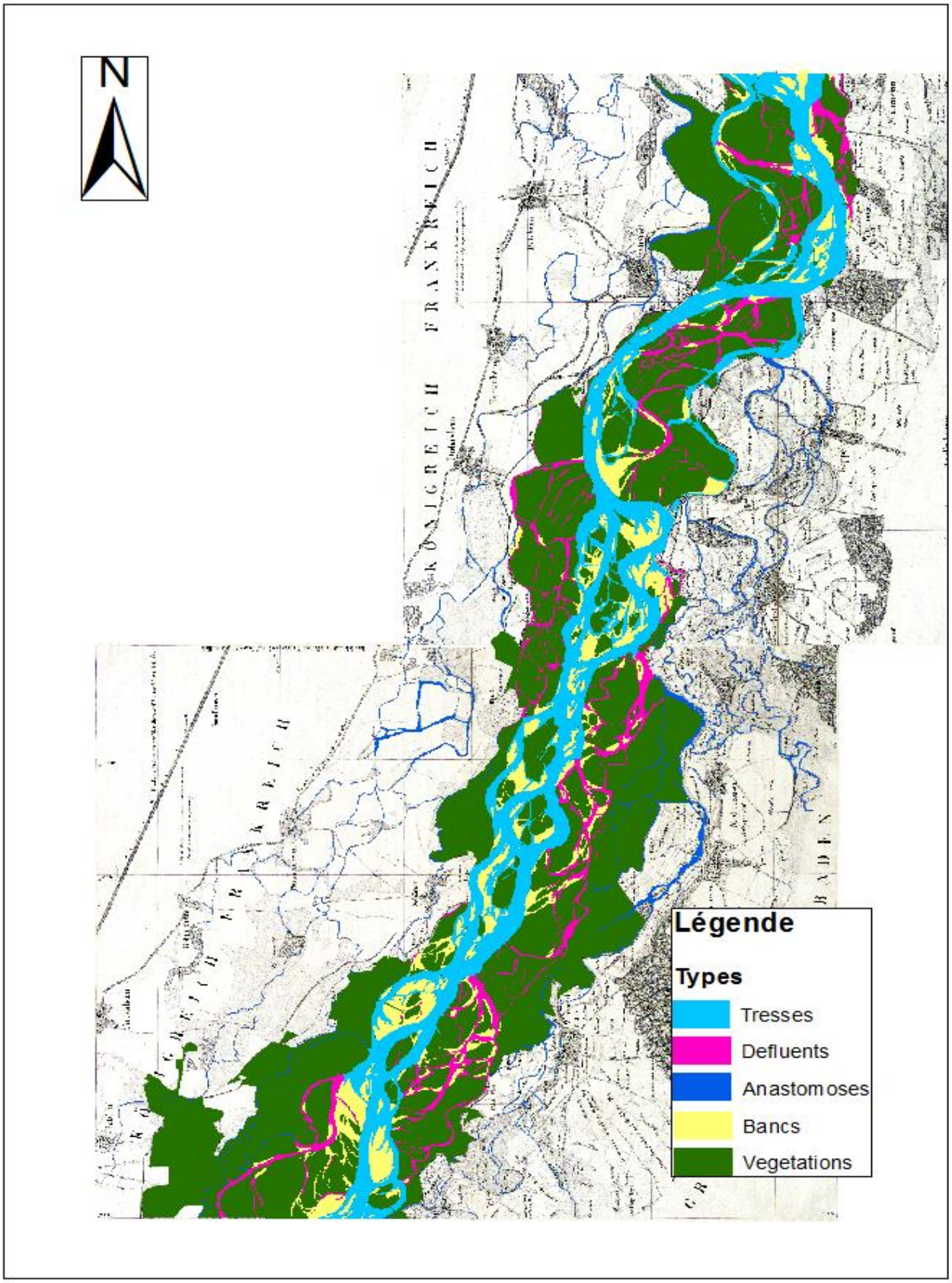


Figure 18 : Diagramme circulaire de la typologie de 1778. Réalisé par Boisson.S

Données surfaciques de notre typologie		
1778	Surface (m2)	Surface (%)
Anastomoses	1197221	5
Bancs	5287725	20
Défluents	1544594	6
Tresses	18311239	70
Total	26340779	100

Tableau 1 : Données surfaciques de 1778 en mètre carré et pourcentages

Les répartitions typologiques de 1778 à 1838 seront comparées afin de voir comment « naturellement » le fleuve se comporte au fils des cartes. Cette première situation est donc le point de départ de nos comparaisons futures. Nous remarquons tout simplement que la végétation occupe une grande partie du tronçon et que la bande active (surface en eau plus banc) de tressage représente à elle seule 37% de la superficie de l'hydrosystème fluvial.



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

0 2 4 Kilomètres

Figure 19 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1828

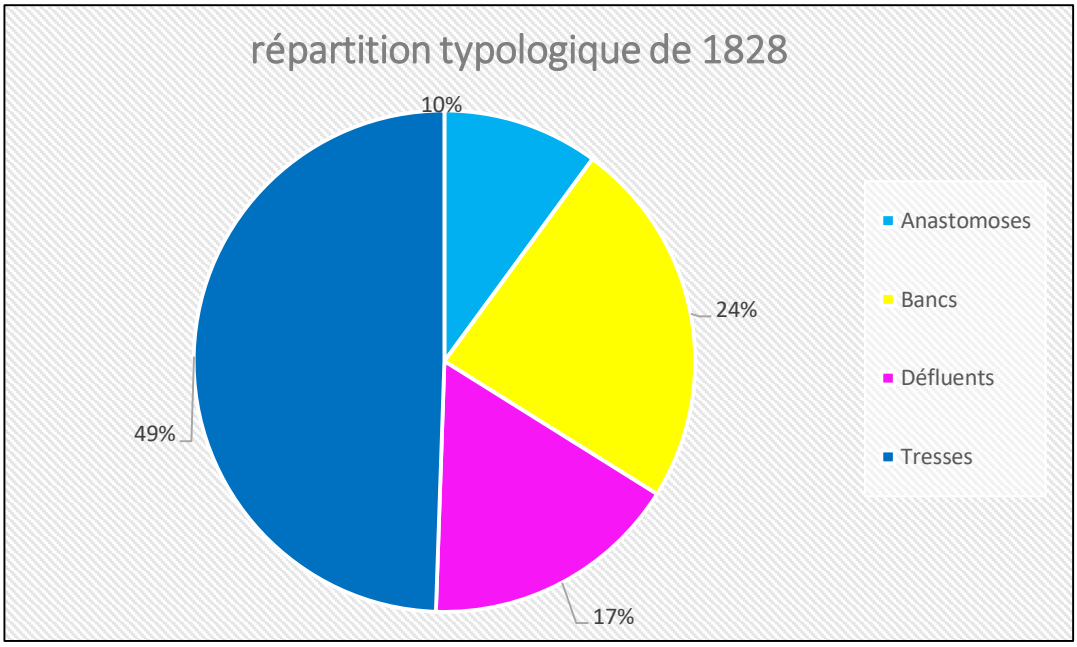


Figure 20 : Diagramme circulaire de la typologie de 1828

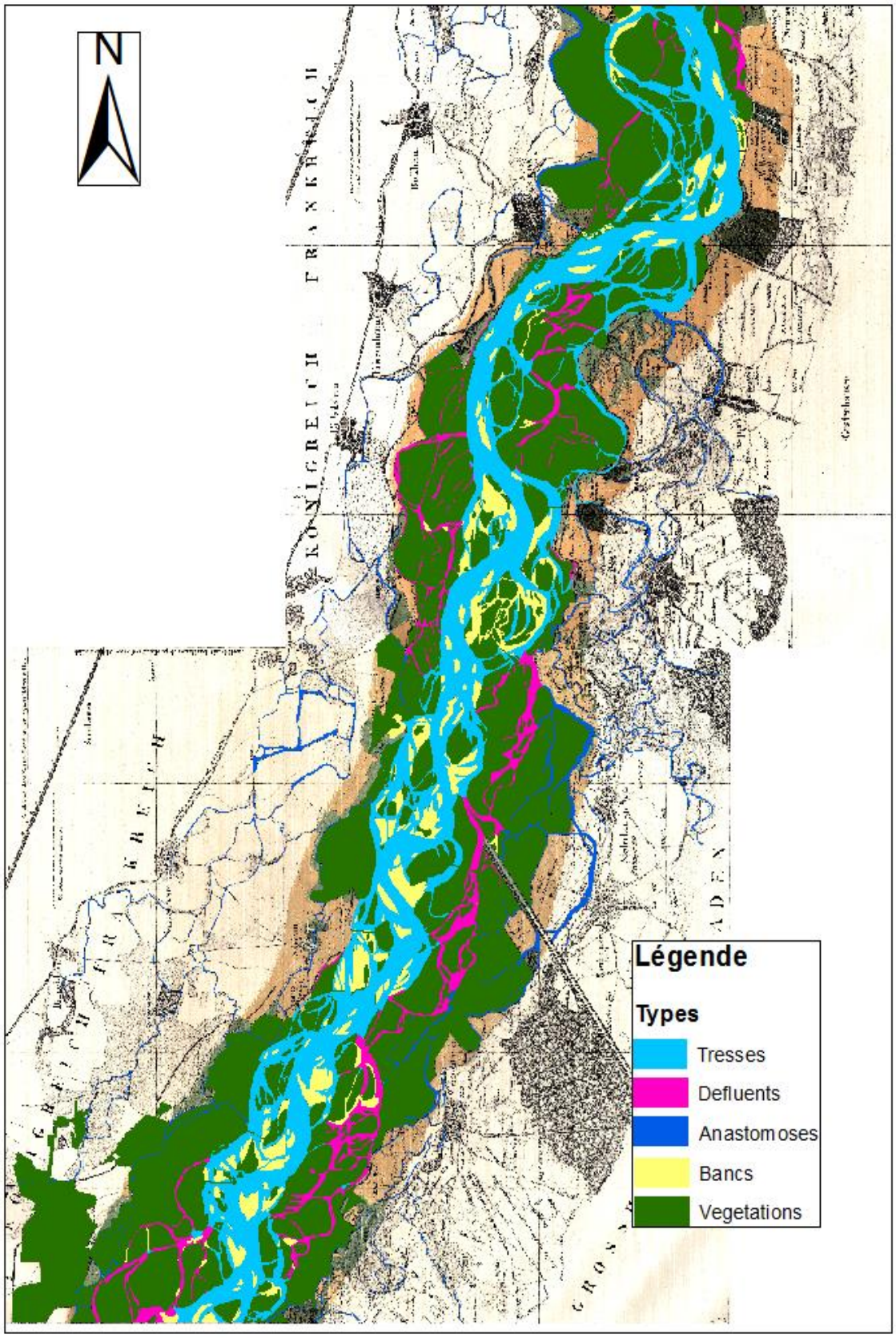
Données surfaciques de notre typologie		

1828	Surface (m2)	Surface (%)
Anastomoses	2526125	10
Bancs	5983759	24
Défluents	4180330	17
Tresses	12419101	49
Total	25109316	100

Tableau 2 : Données surfaciques de 1828 en mètre carré et pourcentages

Cinquante ans plus tard, nous pouvons observer encore une majorité de la bande de tressage (Figure 19). Cette bande de tressage est toujours bien divisée ce qui apporte un nombre important de berges. Les berges sont importantes, car elles apportent des habitats précieux pour la faune et la flore. On peut remarquer néanmoins que les chenaux sont moins sinueux. Il semble qu'une partie des chenaux en tresses soient devenues des défluents. De manière générale, les anastomoses sont aussi plus nombreuses. Cela peut s'expliquer pour deux raisons. Premièrement, nous possédons cette fois-ci la partie allemande, nous avons donc une digitalisation plus conséquente.

Secondement, la carte de 1778 possède des erreurs de scanne, ainsi la digitalisation n'a pas pu être bien réalisée. Nous remarquons également une augmentation des anastomoses de 2 points comparés à 1778. La végétation a quand a-t-elle un peu diminué. Il n'y a pas de modifications significatives entre les deux cartes malgré leur écart de cinquante ans. Nous pouvons dire que le fleuve peu anthropisé a tendance à se déplacer de lui-même.



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

0 2 4 Kilomètres

Figure 21 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1838

La carte de 1838 est ressemblante à notre carte de 1828 (Figure 21). Nous pouvons remarquer néanmoins une extension des villages. La largeur du tissu urbain semble s'agrandir. Nous voyons également la construction du Canal Leopold.

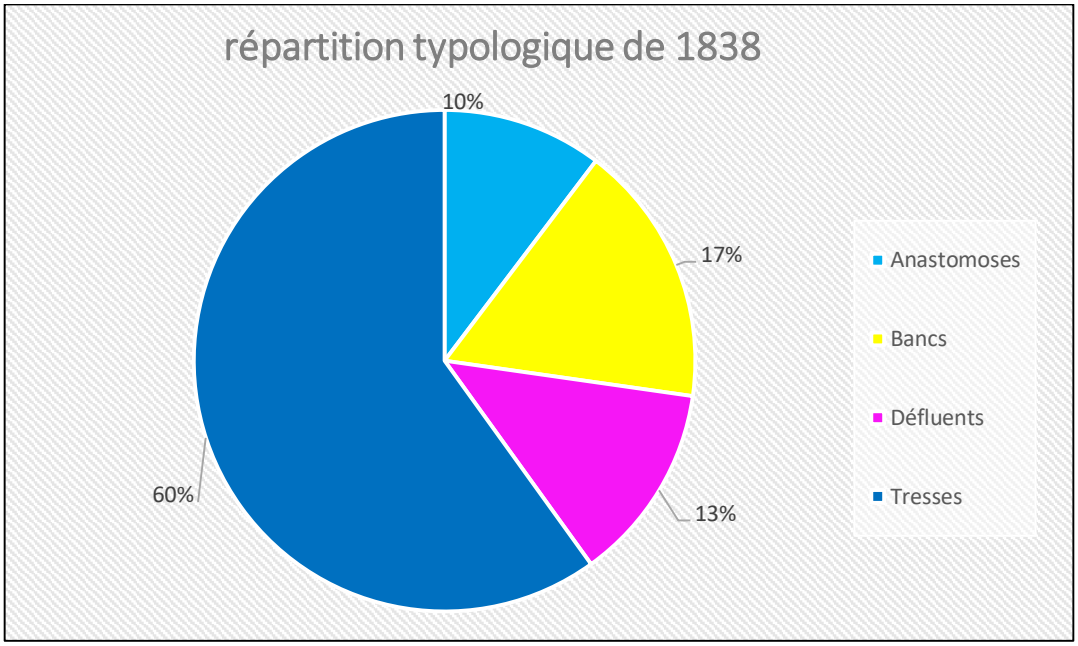


Figure 22 : Diagramme circulaire de la typologie de 1838

Données surfaciques de notre typologie		

1838	Surface (m2)	Surface (%)
Anastomoses	2620324	10
Bancs	4302186	17
Défluents	3253275	13
Tresses	15220677	60
Total	25396462	100

Tableau 3 : Données surfaciques de 1838 en mètre carré et pourcentages

La modification de l'hydrosystème fluvial se fait lentement. Dix années d'écart séparent notre carte actuelle de la précédente. Néanmoins, l'hydrosystème ne semble pas avoir changé. Les modifications naturelles se font lentement.

L'évolution de l'hydrosystème fluviale de 1778 à 1838 n'est pas significative. Seule la bande active de tressage a diminué. Nous pouvons remarquer une légère hausse des défluents en 1828, mais la dizaine d'année entre les deux dates montre que le tressage se complexifie avec des chenaux plus sinueux. Il serait intéressant d'avoir davantage de dates sur la période 1778-1828 afin de voir si l'oscillation entre le tressage et les défluents se fait de façon récurrente. Dès lors, nous pourrions considérer que Rhin s'ajuste au fil du temps, les chenaux deviennent plus sinueux ou moins sinueux d'une année sur l'autre. Nous pouvons faire également un petit lien entre une diminution des chenaux tressés en 1828 et une augmentation des bancs. Les chenaux tressés ont tendance à avoir un débit solide assez important et à inciser plus facilement le lit. Les chenaux incisent plus

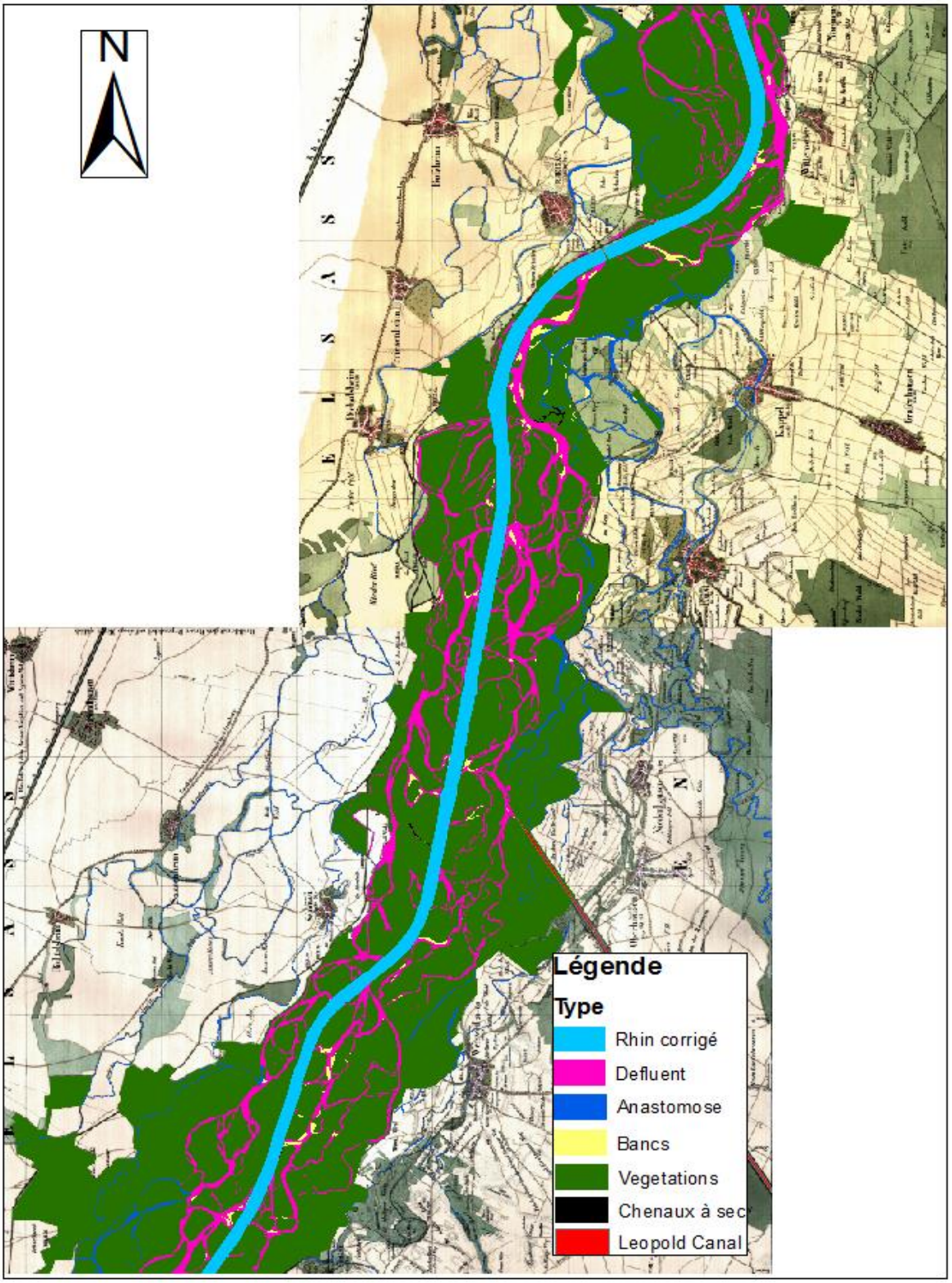
qu'ils ne déposent. Cette augmentation ou diminution des bancs est très certainement due au niveau d'eau au moment où les cartes ont été réalisées. Le niveau d'eau peut varier d'une année à l'autre ce qui révéler plus facilement les bancs ou la végétation.

Les pourcentages de chenaux, bancs et végétations semblent constants au cours des trois dates. Cela est possible dans la mesure où le fleuve n'est pas affecté par les aménagements anthropiques. Cette première partie s'est focalisée sur l'évolution de notre tronçon d'étude avant les aménagements. L'évolution dans le temps de l'hydrosystème étudier semble cohérente avec ce que nous pouvons retrouver en tant qu'évolution naturelle.

I.2 Évolution de l'hydrosystème fluvial à partir des aménagements anthropiques.

Sur cette partie, nous décrirons comme précédemment l'évolution de l'hydrosystème fluvial. De plus, nous réaliserons une comparaison entre les cartes montrant l'hydrosystème fluvial avant les aménagements et durant les aménagements.

Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1872



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

0 2 4 Kilomètres

Figure 23 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1872

La carte de 1872 marque un tout autre hydrosystème fluvial sur notre tronçon (Figure 23). En effet, le Rhin a été corrigé. De ce fait, les chenaux tressés ont totalement disparu, laissant place à un chenal rectiligne. Nous pouvons visualiser également la création d'un petit chenal nommé Léopold canal à L'Est de notre carte. Une grande partie des chenaux tressés à défaut d'être canalisés se sont transformés en défluents directs. Ainsi la superficie des défluents a très largement augmenté.

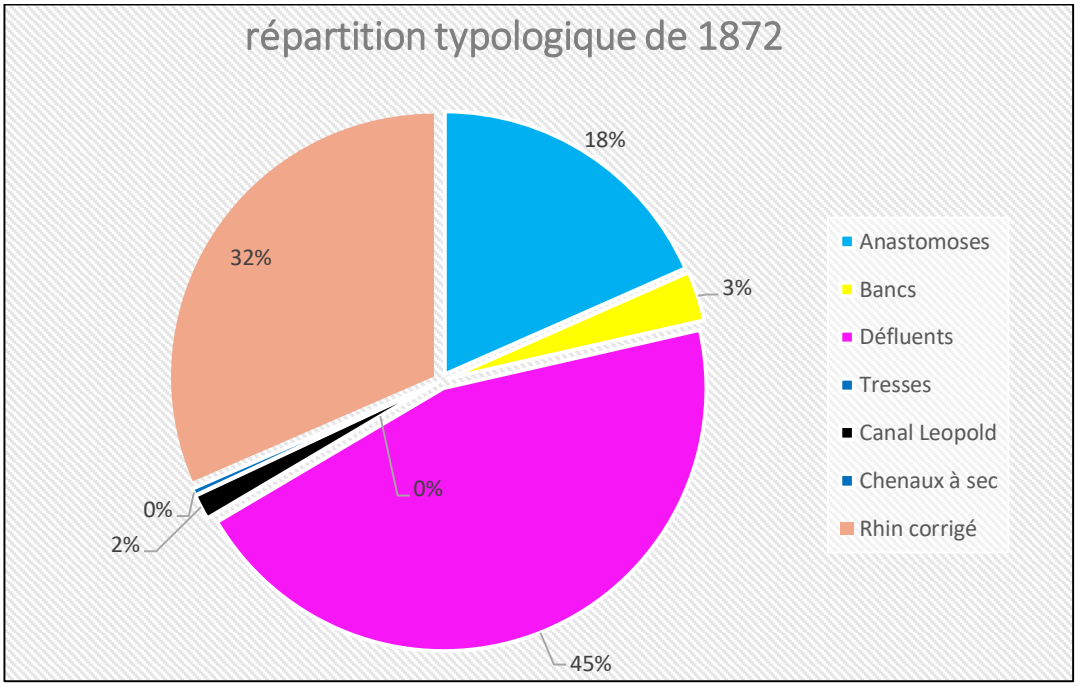


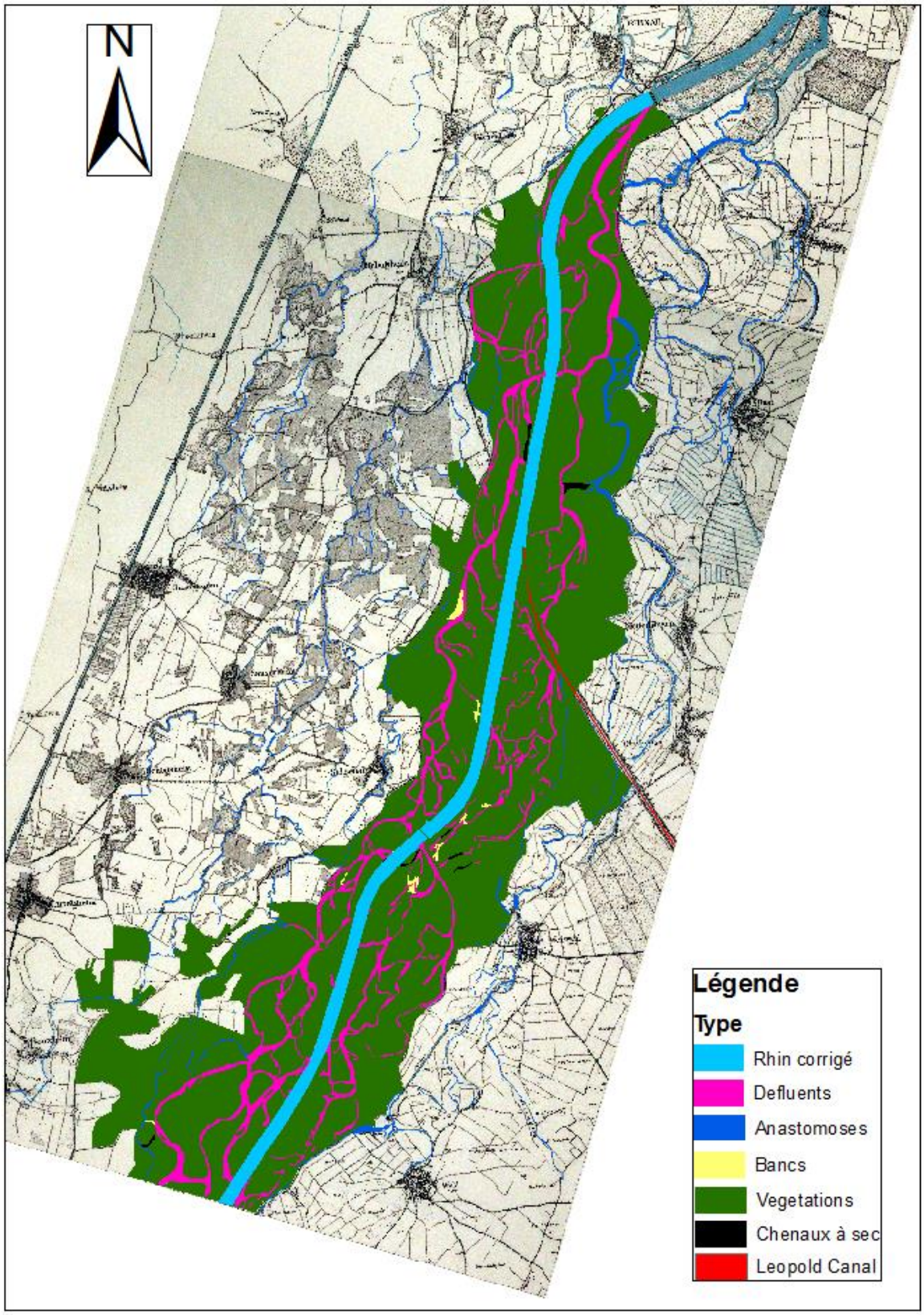
Figure 24 : Diagramme circulaire de la typologie de 1872

Données surfaciques de notre typologie		

1872	Surface (m2)	Surface (%)
Anastomoses	2725024	18
Bancs	452346	3
Défluents	6678319	45
Canal Leopold	227301	2
Chenaux à sec	64423	0
Rhin corrigé	4671394	32
Total	14818807	100

Tableau 4 : Données surfaciques de 1872 en mètre carré et pourcentages

La surface d'anastomose ne semble quant à lui ne pas avoir diminué. Les anastomoses étant relativement éloignées du talweg principal, elles ne sont pas directement impactées par la correction du fleuve. Il est intéressant de voir que le taux de la végétation a augmenté de 16 %. Cela peut s'expliquer pour deux raisons. Premièrement, pour compenser la correction du Rhin, une partie des bancs et des chenaux en tresses perdus ont dû être reboisés. Deuxièmement, la végétation peut être plus abondante en fonction du tirage de la bande active. Ce n'est peut-être pas le cas des cartes de 1870 qui considèrent la végétation dès lors qu'elle atteint une strate arbustive/arborée.



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

0 2 4 Kilomètres

Figure 25 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1926

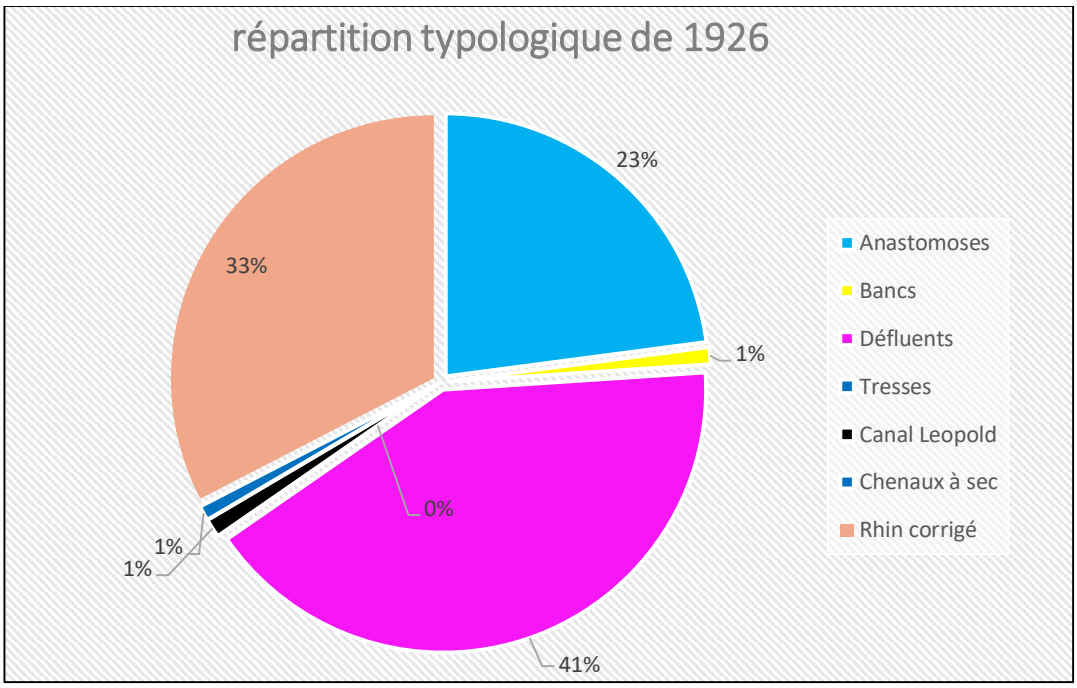


Figure 26 : Diagramme circulaire de la typologie de 1926

Données surfaciques de notre typologie		

1926	Surface (m2)	Surface (%)
Anastomoses	2601718	23
Bancs	117933	1
Défluents	4701808	41
Canal Leopold	129720	1
Chenaux à sec	102946	1
Rhin corrigé	3699229	33
Total	11353354	100

Tableau 5 : Données surfaciques de 1926 en mètre carré et pourcentages

L'hydrosystème fluvial en superficie de 1926 est relativement similaire à celui de 1872 (Figure 25). Nous remarquons une légère augmentation des anastomoses. Ceci est dû à une diminution des défluents. La végétation a aussi augmenté d'un point. Nous n'avons presque plus de bancs. La surface des chenaux à sec a presque doublé. Nous n'avons pas une carte très précise, mais nous pouvons imaginer que le bâti s'est largement développé. Les aménagements dans le Rhin sont aussi plus nombreux.

Les statiques que nous proposons sont une représentation de ce que pouvait être l'hydrosystème fluvial. Certaines données peuvent être biaisées en fonction de la qualité de la carte digitalisée ou simplement de la digitalisation elle-même. Nous remarquons que la surface totale pour chacune de nos cartes n'est pas identique.

Le point important à soulever c'est la vitesse à laquelle le fleuve a évolué. Avant la phase de correction, le Rhin possédait une stabilité globale. Le pourcentage de la

bande active était régulier pour nos années 1778, 1828 et 1838. Le changement du talweg et l'augmentation ou la diminution des chenaux n'étaient pas des facteurs alarmants et dévastateurs pour l'hydrosystème fluvial. À partir de 1850 et principalement sur notre carte de 1872 les chenaux en tresses et les bancs ont fortement diminué, voir disparut. Le nombre d'arbres formant un écosystème complexe et singulier ont dû être coupés pour construire du bâti et replanter des arbres destinés à l'exploitation. Augmenter le taux de végétation pour avoir une végétation stérile n'est pas un avantage pour la pérennité du fleuve.

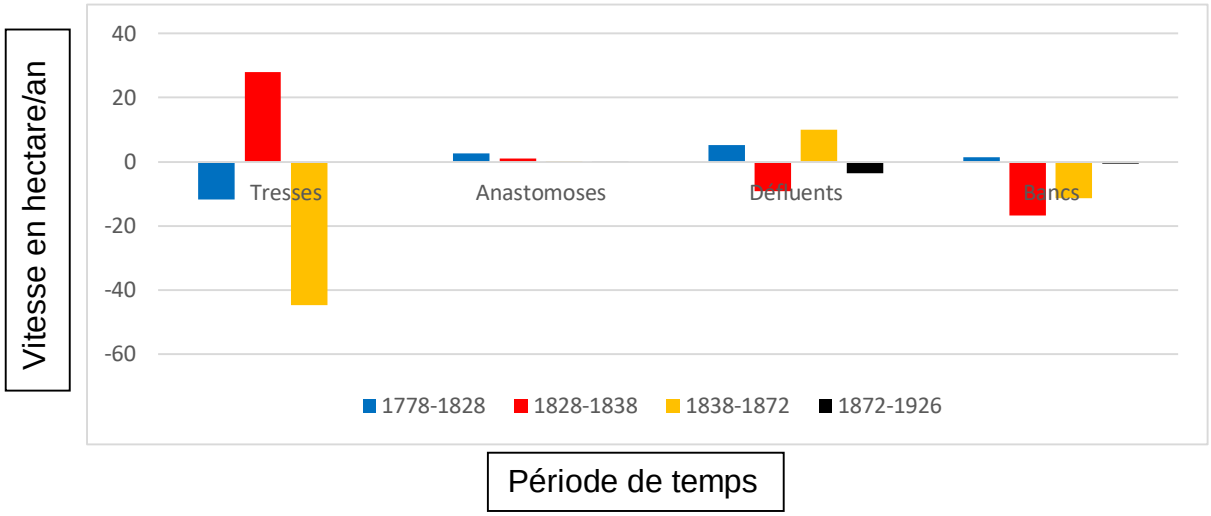


Figure 27 : Taux annuel moyen des unités éco-morphologiques

Voici un tableau récapitulatif permettant de voir l'évolution des unités éco-morphologique exprimé en kilomètre carré dans le temps par année. Ce tableau permet d'avoir une vision globale sur l'entièreté de nos dates et du tronçon étudié.

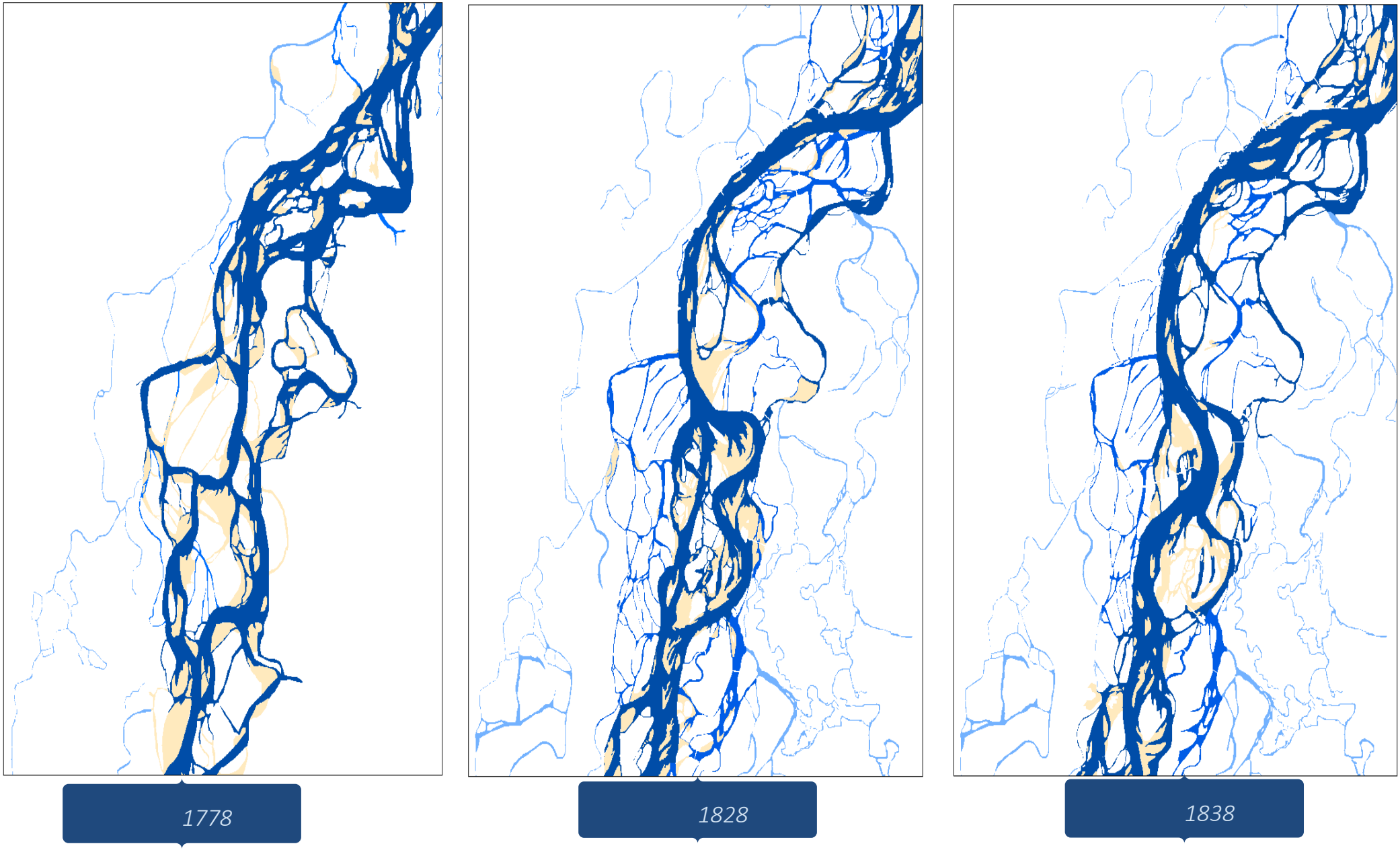


Figure 28 : Évolution de l'hydrosystème fluvial avant les aménagements de 1778 à 1838 représentant les surfaces en eaux et les bancs.

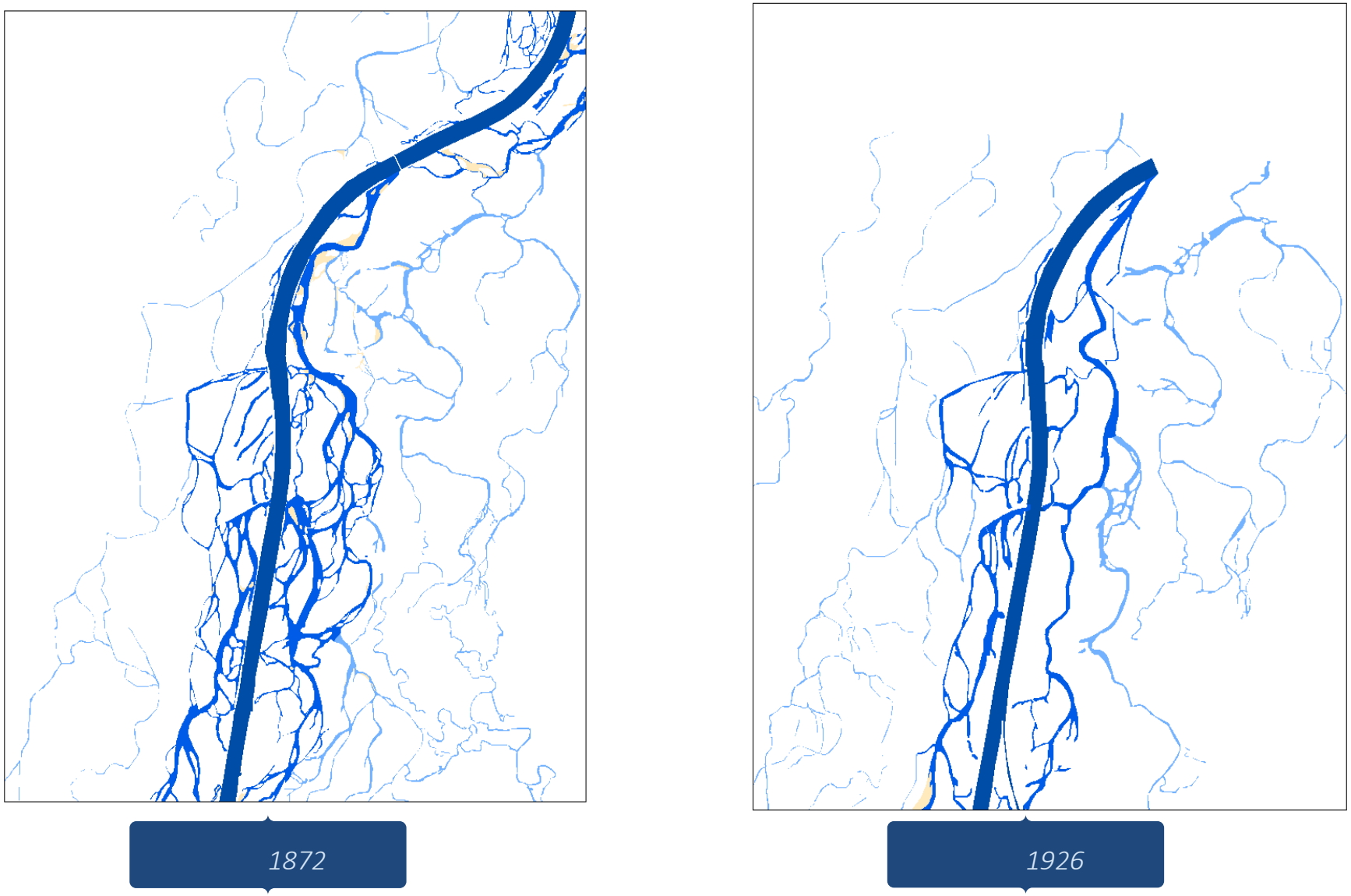


Figure 29 : Evolution de l'hydrosystème fluvial pendant les aménagements de 1872 à 1926 représentant les surfaces en eaux et les bancs.

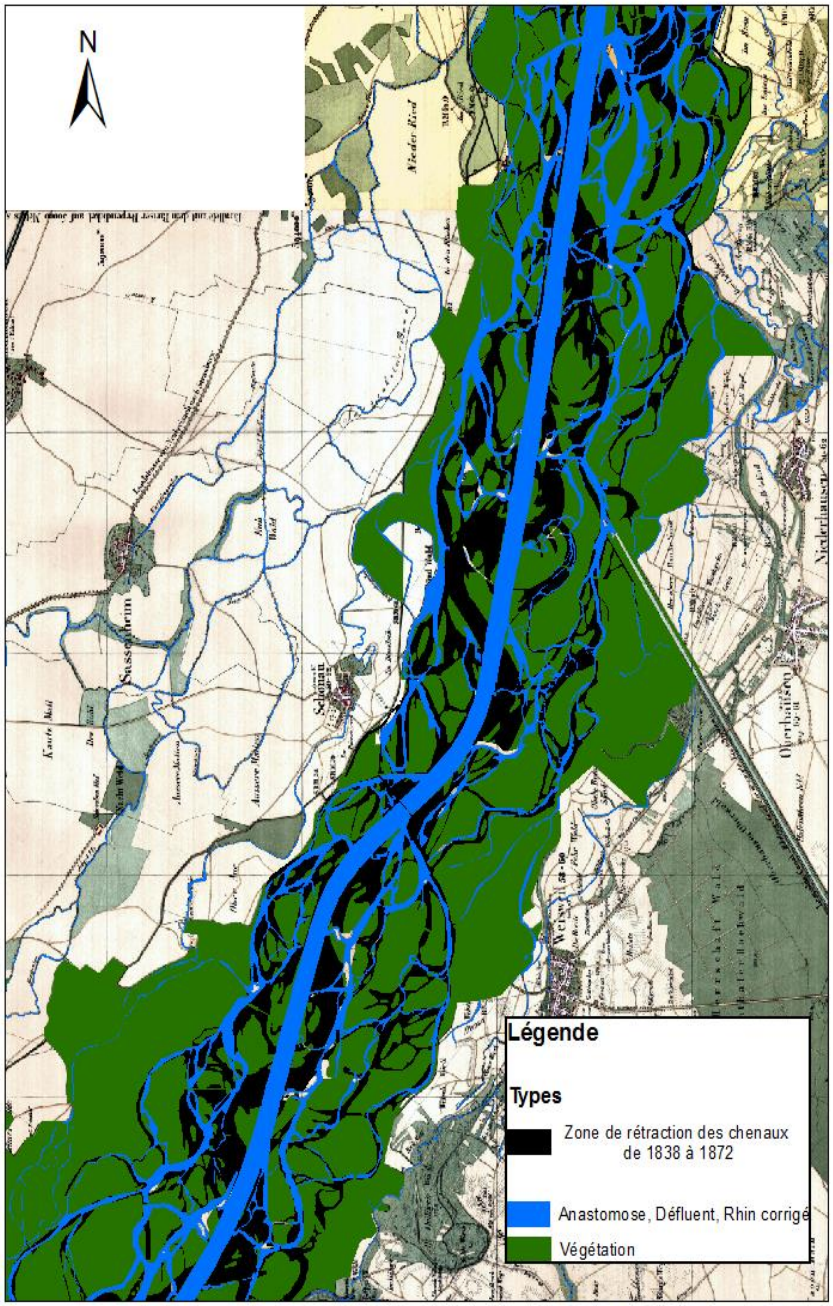
II. Identifications des zones de contractions des chenaux potentiellement pollués

II.1 Contractions des chenaux

Afin de pouvoir localiser de façon pertinente les zones de polluants historiques, il faut comprendre l'évolution des chenaux durant la post-correction et pré-canalisation du Rhin. La contraction des chenaux s'effectue lorsque les débits du cours d'eau dans les chenaux diminuent du fait de l'aménagement anthropique. Les sédiments fins se déposent de ce fait, lors des inondations et peuvent devenir des lieux de stockage de polluants historique. Les polluants que nous recherchons sont dans les sédiments.

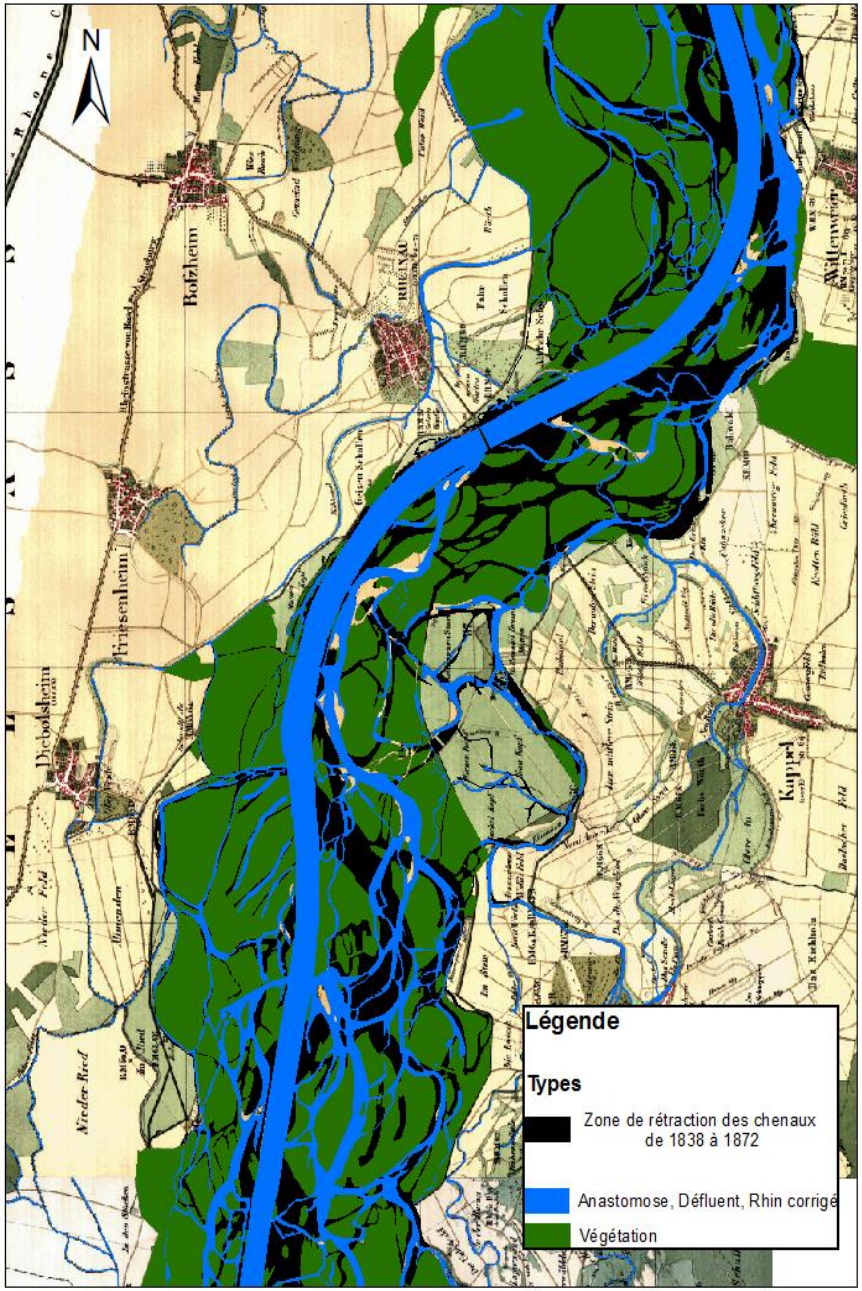
Ainsi pour représenter cette contraction, nous avons choisi deux temporalités : de 1838 à 1872 et de 1872 à 1926. La première période représente l'impact de la correction sur les chenaux en eau (tresses, anastomoses, défluents) et la seconde période représente l'évolution post-correction et pré-canalisation. Ne sont retenues que les chenaux qui ne sont plus en eaux. Il faudra pour la suite inclure également les chenaux qui sont encore en eau.

Nous avons préféré représenter la contraction des chenaux sur deux feuilles pour chacune des dates. Cela permet d'avoir une meilleure visibilité de notre tronçon (Figure 29 et 30).



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

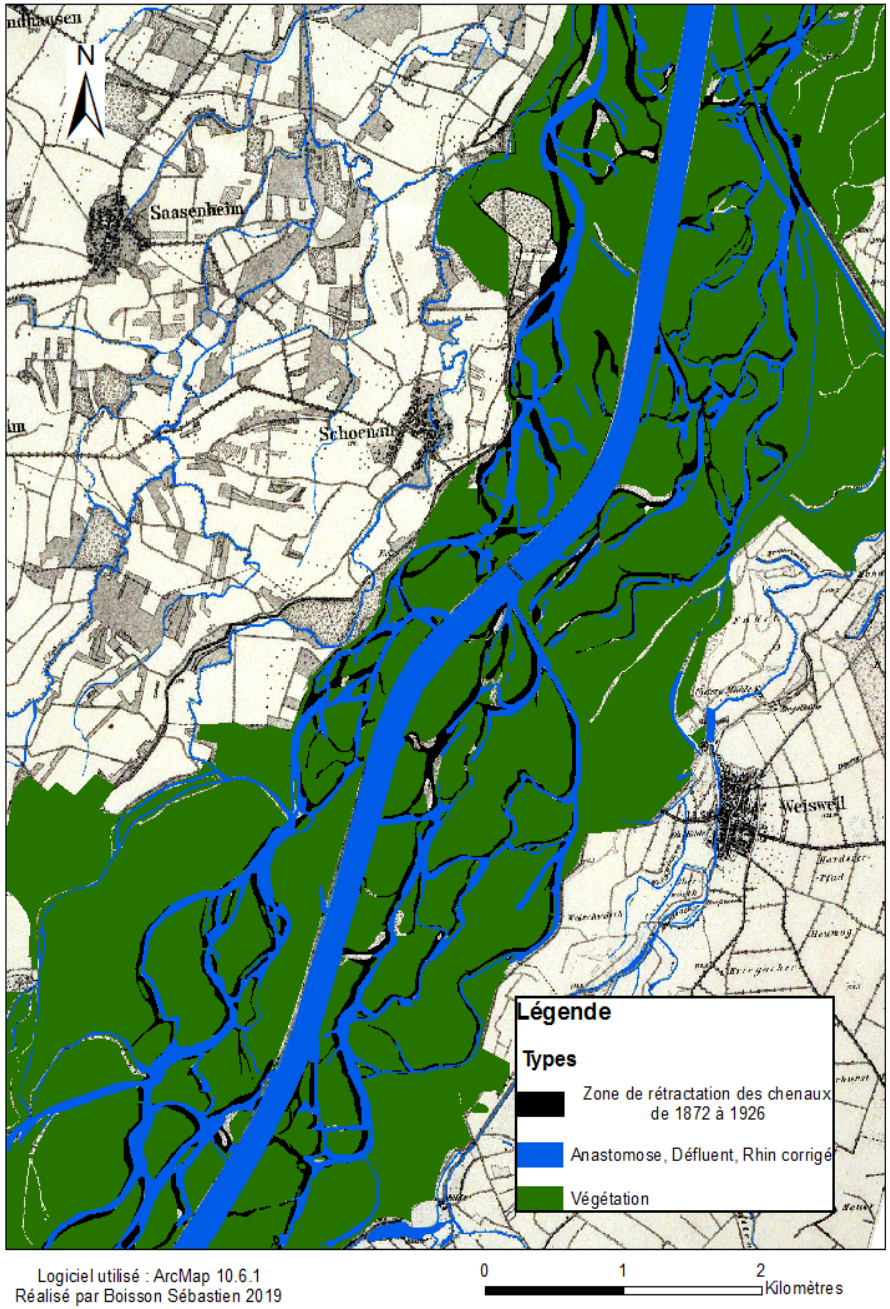
0 1 2 Kilomètres



Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson Sébastien 2019

0 1 2 Kilomètres

Figure 30 : Cartographie des contractions des chenaux de 1838 à 1872.



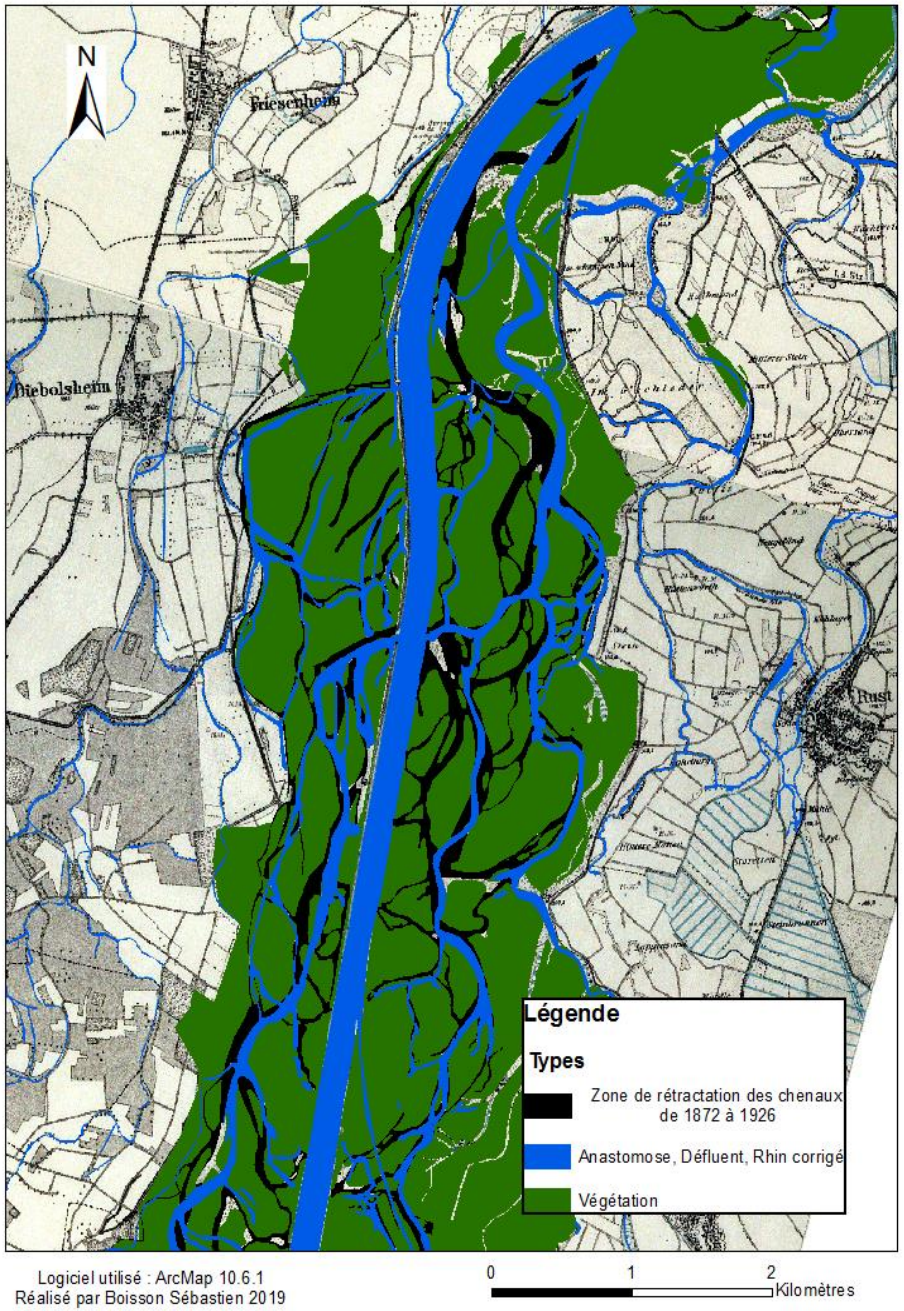


Figure 31 : Cartographie des contractions des chenaux de 1872 à 1926

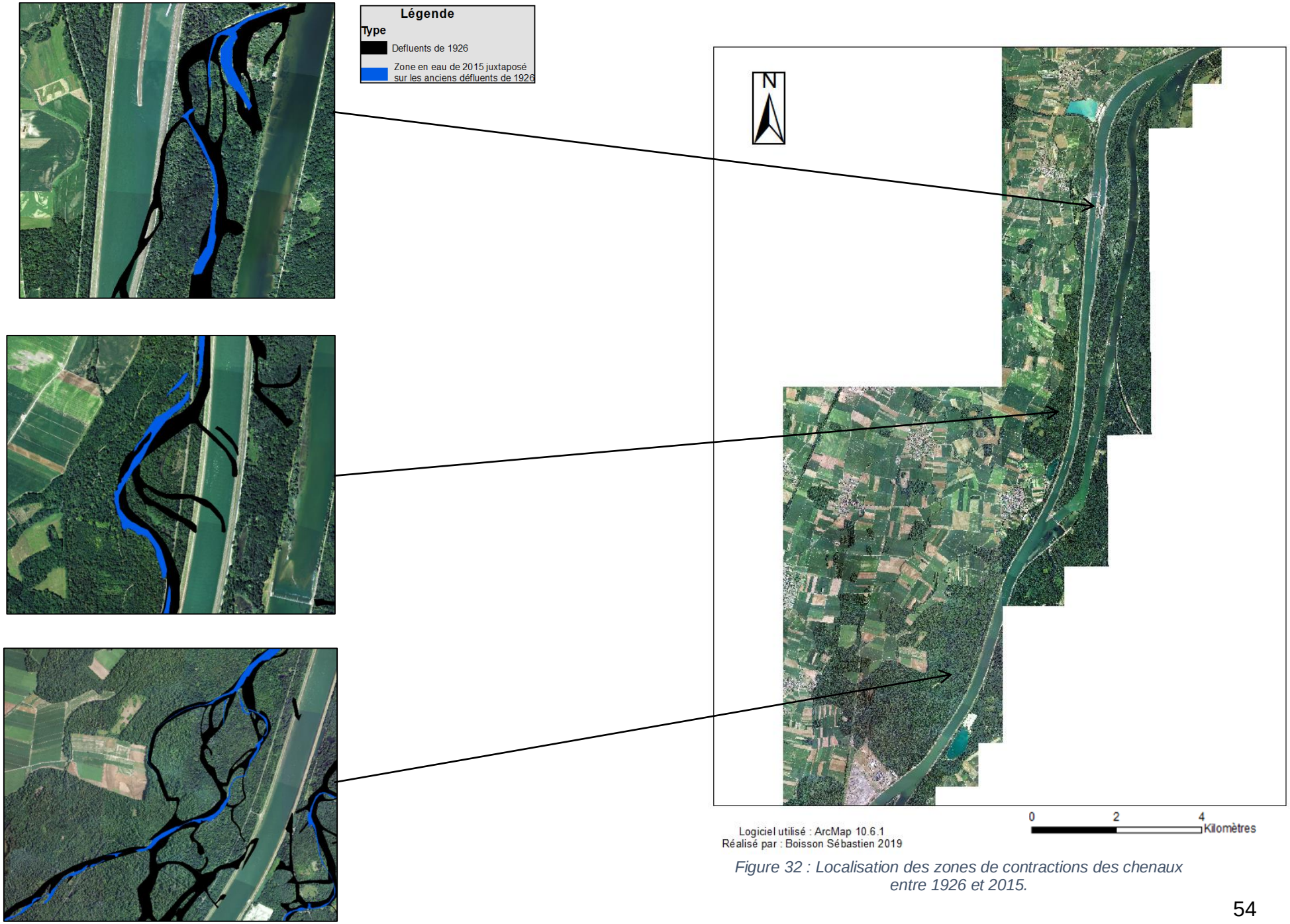


Figure 32 : Localisation des zones de contractions des chenaux entre 1926 et 2015.

L'échelle étant trop grande, il était nécessaire de faire des focus sur la photographie aérienne de 2015 afin d'avoir un rendu plus précis. Toutes les zones n'ont pas été représentées sur ce focus. Seule les plus pertinentes et dans un souci d'exactitude ont été sélectionnées. D'autre part, les anastomoses n'ont pas été sectionnées. Seuls les défluents sont représentés sur cette carte. Ce choix a été fait, car les anastomoses passaient dans la grande majorité des cas sur de nouvelles zones agricoles. La terre a dû être travaillé et les polluants s'il y en a, ont dû très certainement disparaître.

Nous avons décidé de digitaliser une partie des zones en eau encore présente dans les anciens chenaux de 1926 (bleu). Nous apercevons la contraction de certains chenaux de 1926 à 2015. La zone de contraction des chenaux est représentée en noir (Figure 32). Ce qui est en bleu est la zone ou l'eau passe encore. La zone en bleu peut également être anciens chenaux à sec.

Nous voyons que les zones de contraction des chenaux sont relativement étendues et reparties sur l'entièreté du tronçon. Il faut nuancer, car une partie des défluents a pu encore se contracter laissant plus de place pour d'éventuels prélèvements.

II.3 Limites de la méthode

Plusieurs problèmes sont survenus dans notre travail ce qui a pu par moment limiter notre réflexion. Notre premier obstacle a été le géoréférencement.

Même si celui-ci a bien été réalisé, certaines dates ne se juxtaposent pas bien. En effet, en fonction du scan de base réalisé sur les cartes anciennes, certains morceaux des cartes peuvent avoir été déformés. Visuellement, l'erreur n'est pas forcement perceptible, mais lors du géoréférencement les cartes ne peuvent pas être parfaitement juxtaposées. Le manque des précisions du géoréférencement se répercute par la suite sur la digitalisation.

En effet, digitaliser sur une carte ayant des défauts de géoréférencement peut avoir des conséquences pour les comparaisons entre deux dates. Cela a par exemple posé un problème pour la comparaison des anastomoses. Même si la digitalisation pour chaque date était précise, les anastomoses semblent s'être déplacées au cours des périodes étudiées.Or, ce type de chenaux à faible sinuosité se déplace latéralement. Par ailleurs, les anastomoses se sont peu contractées, car elles sont étroites par définition. Ainsi sur nos cartes contractions des chenaux (Figure 32) les chenaux en anastomoses avant la correction n'ont pas été prises en compte.

Autre problème majeur, c'est la taille des cartes réalisées. Le tronçon étudié est assez grand de ce fait certains détails que nous pouvons retrouver dans nos graphiques ou cartes ne sont peut-être pas compréhensible ou interprétable. Notamment sur l'augmentation de la végétation ou de la perte de certains bancs entre deux dates.

Néanmoins, certains points négatifs rencontrés pour l'élaboration de ce mémoire peuvent être corrigés dans la continuité du stage. En effet, nous allons pouvoir par la suite ajouter de la donnée, notamment à une échelle plus fine. Nous pourrons nous focaliser plus profondément sur une zone d'étude plus spécifique pour pouvoir réaliser par exemple une analyse piézométrique et un profil en long détaillé.

CONCLUSION

Le but de notre travail dans le cadre du projet Juxta Rhenum, L'OHM de Fessenheim et de notre mémoire, était d'effectuer une analyse planimétrique diachronique fine du tracé en plan de l'hydrosystème fluvial du Rhin entre Marckolsheim et Rhinau.

Cette analyse avait pour but de caractériser et de quantifier les ajustements géomorphologiques induits par les aménagements effectués au milieu du XIXe siècle.

Les aménagements effectués sur le Rhin ont permis l'industrialisation qui a elle-même induit une partie des polluants dans le Rhin. Les polluants rejetés ont pu se stocker dans les sédiments fins formés lors de la contraction des chenaux.

Comment l'analyse planimétrique du tronçon du Rhin entre Marckolsheim–Rhinau permet-elle de voir une évolution de l'hydrosystème fluvial du Rhin, de localiser et quantifier des zones de contractions des chenaux recoupés par dépôts de sédiments fins potentiellement pollués liés aux aménagements du fleuve du XIXe siècle ?

Pour répondre à notre problématique et répondre aux objectifs à atteindre, l'analyse planimétrique que nous avons effectuée sur notre tronçon a permis de visualiser et de comprendre l'évolution de l'hydrosystème fluvial naturelle et anthropique de 1778 à 1926. Cette évolution a mis en perspective les impacts majeurs de l'anthropisation sur le fleuve. Les caractéristiques géomorphologiques ont été caractérisées et quantifiées grâce à un géoréférencement et une digitalisation s'inspirant de travaux déjà réalisés. La digitalisation a également été un outil crucial pour cartographier les zones de contraction des chenaux pouvant être des zones privilégiées de polluants.

Ce qui est proposé vise notamment à établir une base scientifique solide sur la trajectoire temporelle du fonctionnement du socio-écosystème de Fessenheim.

Par la suite, la méthode de traitement utilisé sur notre tronçon d'étude sera également faite sur le tronçon Rhinau-Strasbourg. Cela permettra d'avoir davantage de données, mais aussi de voir potentiellement un impact plus important des aménagements du milieu du XIXe siècle.

De plus il est prévu de réaliser une étude sur l'évolution du profil en long de l'hydrosystème fluvial, une étude sur l'évolution du niveau piézométrique, une analyse Lidar et pour finir de créer une reconstitution de l'histoire des crues.

BIBLIOGRAPHIE

AMOROS.C et PETTS G.E, 1993, Hydrosystème fluviaux. *Masson.* Paris. 300pp.

ARNAUD.F, 2012, Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse présentée à l'université Lumière Lyon 2. 280pp.

ARNAUD.F, SCHMITT.L, JOHNSTONE.K, ROLLET.A-J, PIEGAY, 2019, Engineering impacts on the Uper Rhine channel and fllodplain over two centuries. *Geomorphology*. 280pp.

BENYOUCEF.I, 2013, WIKHYDRO. *Ministère de la transition écologique et solidaire.* URL : http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Fleuve_Rhin

BLOCH.M, 1931, Les caractères originaux de l'histoire rurale française. Tome 1. *Armand colin.* 265pp.

CARBIENER.R, 1969, Le grand Ried Central d'Alsace. Ecologie d'un paysage. Bulletion de la Société Industrielle de Mulhouse. Numéro spécial. Pages 15-44.

Département Fédérale de l'Intérieur (Suisse), 1929. La régularisation du Rhin entre Bâle et Strasbourg. Communications du Service Fédéral des Eaux, Buchdruckerei Neukomm & Salchrath, Bern, 14pp.

DESCHODT.L et SALVADOR.P-G, 2003, Contribution à la connaissance du paléoenvironnement de la vallée de la Deûle (Nord, France) : approche stratigraphique. *Revue du Nord.* Page 23-33.

DESCOMBES.R, 2012, Les villages d'Alsace détruits par les inondations du Rhin. Bulletin de la Société des amis du Musée Régional du Rhin et de la navigation. Pages 87-91.

DIAZ-REDONDO.M, EGGER.G, MARCHAMALO.M, HOHENSINNER.S and DISTER.E, 2016, Benchmarking fluvial dynamics for process-based river restoration: the upper Rhine river (1816-2014). *River research and applications.* 12pp.

DOLLFUS.J, 1960, L'homme et le Rhin.N°32. *Gallimard.*400pp.

ESCHBACH.D, 2017, Trajectoire temporelle et monitoring hydro-morphologique d'une anastomose rhénane restaurée: Le Bauerngrundwasser dans l'île du Rohrschollen (Strasbourg, France). Thèse présenté à l'université de Strasbourg. 235pp.

ESCHBACH.D, SCHMITT.L, IMFELD.G, MAY.J-H, PAYRAUDEAU.S, PREUSSER.F, TRAUERSTEIN.M, AND SKUPINSKI.G, 2018, Long-term temporal trajectories to enhance restoration efficiency and sustainability on large rivers: an interdisciplinary study. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21pp.

FRECAUT.R 1961, Hydrologie fluviale de l'Europe continentale. *Revue géographique de l'Est.* Tome 1, n°4. Pages 393-406.

GALLUSSER.W et SCHENKER.A, 1992, Die Auen am Oberrhein, Les zones alluviales du Rhin supérieur. *Springer Basel AG.*

GRENIER.A, 1920, La découverte du Rhin. Mélanges d'archéologie et d'histoire Tome 38. Page 5-28.

HOUSSIER.J, 2014, Etude hydromorphologique Holocène du compartiment médian de la plaine ello-rhénane. Mémoire présenté à l'université de Strasbourg. 105pp.

HERGET.J, ECKHARD.B, COCH.T, DIX.E, EGGENSTEIN.G, EWALD.K, 2005, Engineering impact on river channels in the River Rhine Catchment. *Erdkunde Band N°59.* Page 294-319.

HUBER.L, 2018, Évolution spatio-temporelle de la pollution industrielle et domestique dans le Grand Canal d'Alsace suite à sa construction. Mémoire présenté à l'université de Strasbourg. 89pp.

JOHNSTONE.K, 2010, Impacts hydro-géomorphologiques des aménagements humains. Mémoire présenté à l'université Lumière Lyon 2. 152pp.

KLEINAS.C, 2003, L'évolution du style fluviale du Rhin supérieur de Bale à Lauterbourg. Mémoire de Maîtrise, Université Louis Pasteur I, Strasbourg, 98 pp.

KNIGHTON.D, 1984, Fluvial Forms and Processes*. Edward Arnold*. 218pp.

LEOPOLD.L. B et GORDON WOLMAN.M, 1957, « River Channel patterns : Braided, Meandering, and Straight ». Univercity of California berkley. United states governement printing office, Washington. Page 39-85.

LEVY.M, 1986, Géomorphologie et archéologie, In Butenheim, Une motte castrale en Alsace. Bilan de quatre campagnes de fouilles archéologiques, (Mulhouse : société d'Histoire Sundgauvienne), Page 89-111 pp.

MALAVOI.J-R et BRAVARD.J-P, 2010, Eléments d'hydromorphologie fluviale, Office national de l'eau et des milieux aquatiques, 228pp.

MARCHAL.M, DELMAS.G, 1959, L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâme à Lauterbourg. *La houille Blanche.* Pages 177-202.

RIQUIER.J, 2015, Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français. Université lumière Lyon 2. 294pp.

RITTER.J, 1957, La poursuite des travaux du Grand Canal d'Alsace (compte-rendu), Annales de géographie. Page 549-553.

ROBERT.S, 2006, Des outils pour l'analyse de la transmission des trames et réseaux planimétriques : approches multiscalaires et traitements sur SIG. Des outils pour l'analyse de la transmission des trames et réseaux planimétriques : approches multiscalaires et traitements sur SIG, Chilhac, France. 14pp. URL : https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00409104/document

SCHMITT.L, TREMOLIERES.M, BOBELIS.P et MAIRE.G, 2007, Complémentarité entre typologie hydro-géomorphologique et biologique de rivières dans l'hydrosystème fluvial ello-rhénan français,123pp.

SCHMITT.L, HOUSSIER.J, MARTIN.B, BEINER.M, SKUPINSKI.G, BOES.E, SCHWARTZ.D, ERTLEN.D, ARGANT.J, GEBHARDT.A, SCHNEIDER.N, MARINA.L TRINTAFILLIDIS.G, OLLIVE.V, 2016, Des fleuves et des Hommes à l'époque mérovingienne, partie Paléo-dynamique fluviale Holocène dans le compartiment Sud-Occidental du fossé rhénan, *Archéologie de l'Est,* 15-33pp.

SCHMITT.L, MAIRE.G, HUMBERT.J, 2000, Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau : vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-

occidental du fossé rhénan. / An hydro-geomorphic typology of rivers : a management model adapted to the physical environment of the south-west watershed of the Rhine rift valley. In: Géocarrefour,L'interface nature-sociétés dans les hydrosystèmes fluviaux. vol. 75, n°4, 347-363pp.

SCHUMM.S.A, 1969, «River metamorphosis». *Journal of the hydraulics division.* N°95. Pages 255-309.

SCHNEIDER.G, 1966. Zusammenfassende darstellung der Rheinregulierung Strassburg/Kehl - Istein. Baukommission des Unternehmens “Regulierun des Rheinszwischen Strassburg/Kehl und Istein”. 477 pp.

SYNDEX, 2012, CNPE de Fessenheim Étude d’impact socioéconomique et conséquences d’une éventuelle fermeture, 124 pp.

URL :http://ecolo.org/documents/documents_in_french/Fessenheim-rapport-SYNDEX-Expertise%20Socio-Economique.pdf

TRICART.J, BRAVARD J.P, 1991, Le cours périalpin du Rhin, du Rhône et du Danube : aménagement fluvial et dérives de l’environnement, *Annales de Géographie*, n°561-562, 668-713.

URL : https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1991_num_100_561_21654

UEHLINGER.U, MANTZEN.K, LEUVEN.R, ARNDT.H ,2009, The Rhine River Basin, 199-245, 47pp.

UHRY.A, 1932, L’évolution de la navigation du Rhin, *Annales de géographie.* 419-424pp.

SCHUKTESS.K, 1955, Das internationale Wasserrecht, Zurich.

WASSON.JG, MALAVOI.JR, MARIDET.L, SOUCHON.Y, PAULIN.L, 1995, Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. *Cemagref*. 167pp.

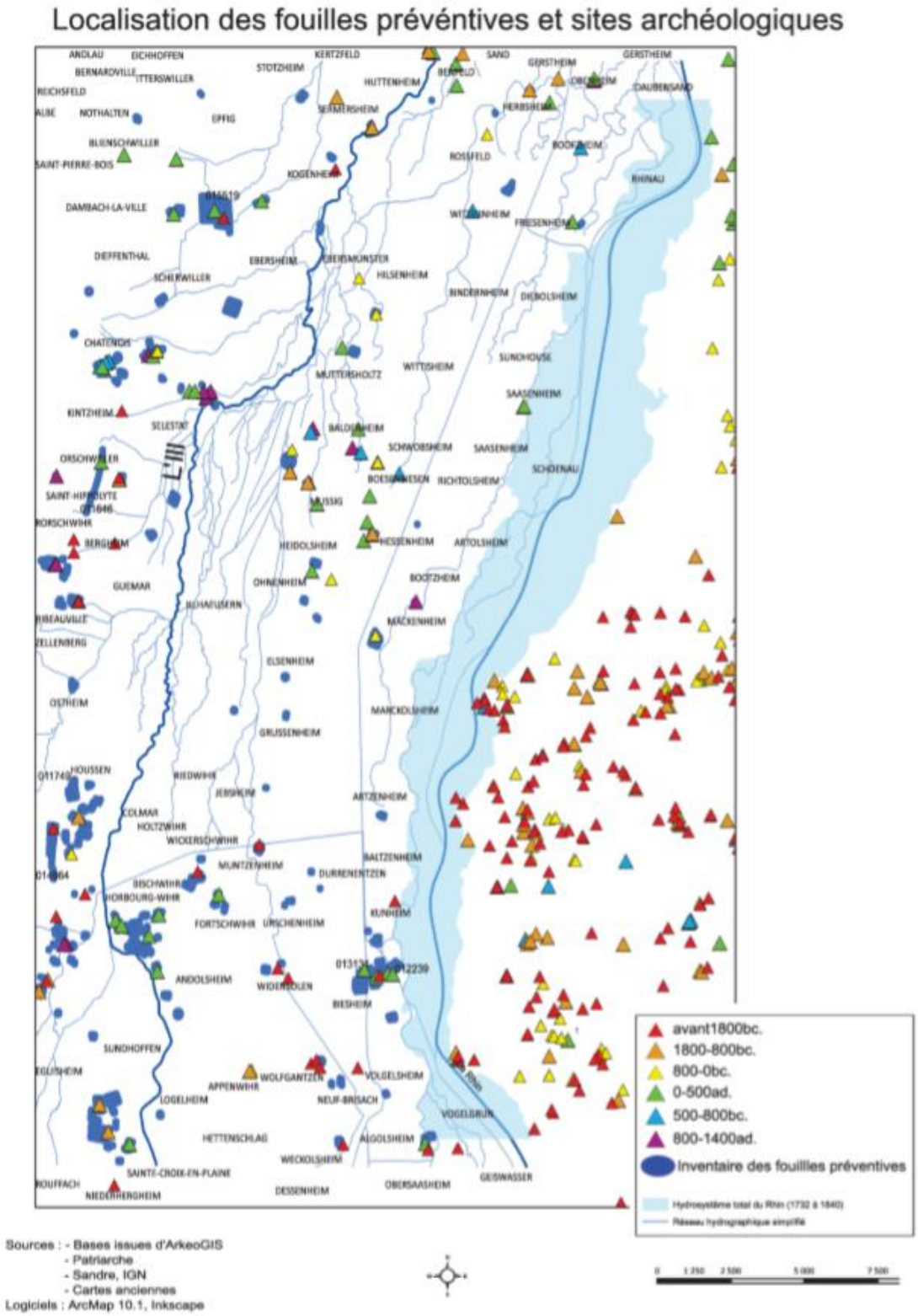
WOLFROM.M, 1964, La pollution des eaux du Rhin. *Annuaire française de droit international*. 737-763pp.

WOOLSEY.S, WEBER.C, GONSER.T, HOEHN.E, HOSTMANN.M, JUNKER.B, ROULIER.C, SCHWEIZER.S, TIEGS.S, TOCKNER.K, PETER.A, 2005, Guide du suivi des projets de revitalisation fluviale, Eawag. 113pp.

ZIMMERMANN.A, 2012, Évolution hydro-morphologique de la Reserve naturelle du Rohrschollen (1828-2010) : Implications pour une restauration fonctionnelle du Bauerngrundwasser. Mémoire présenté à l’université de Strasbourg. 126pp.

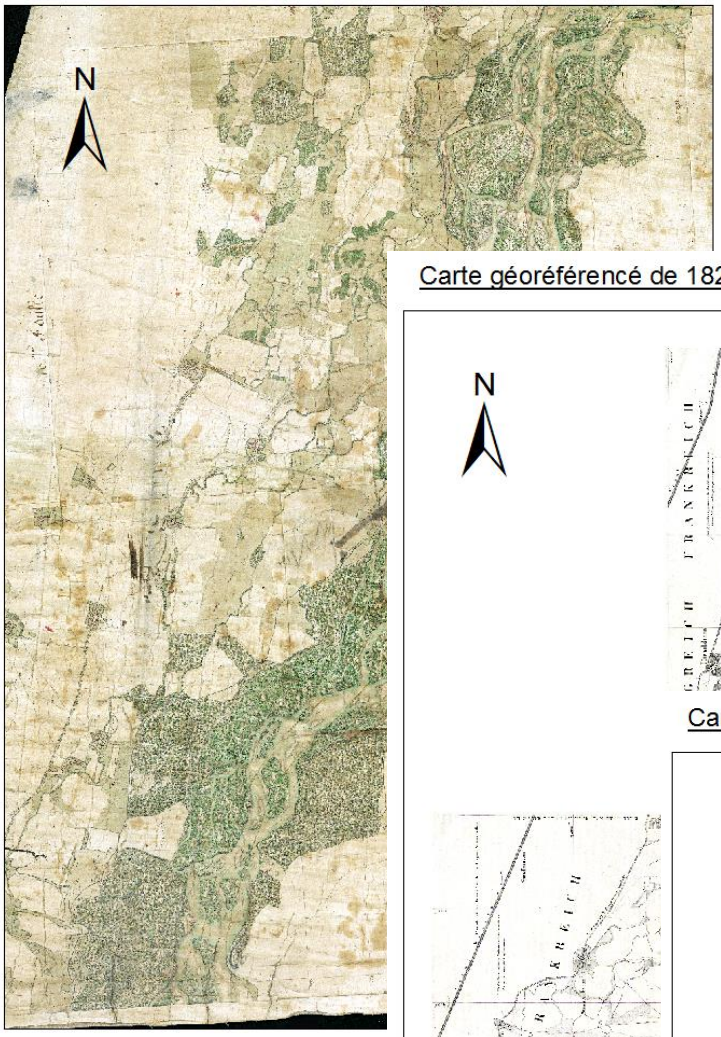
ANNEXES

Annexe 1 :



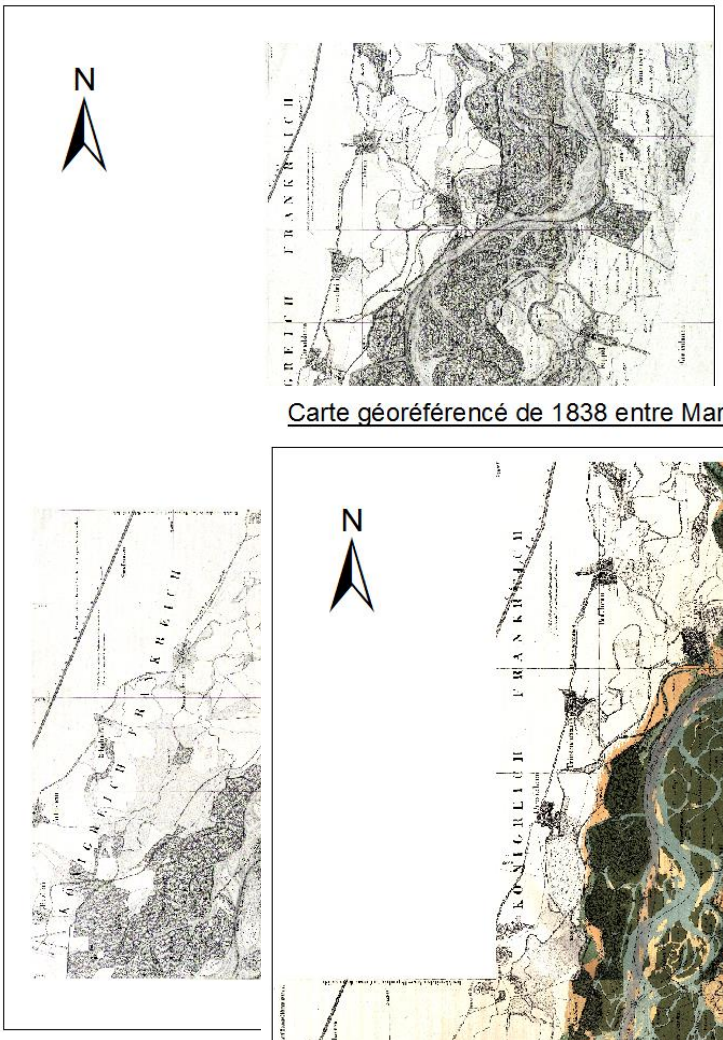
Annexe 2 :

Carte géoréférencé de 1778 entre Marckolsheim et Rhinau.



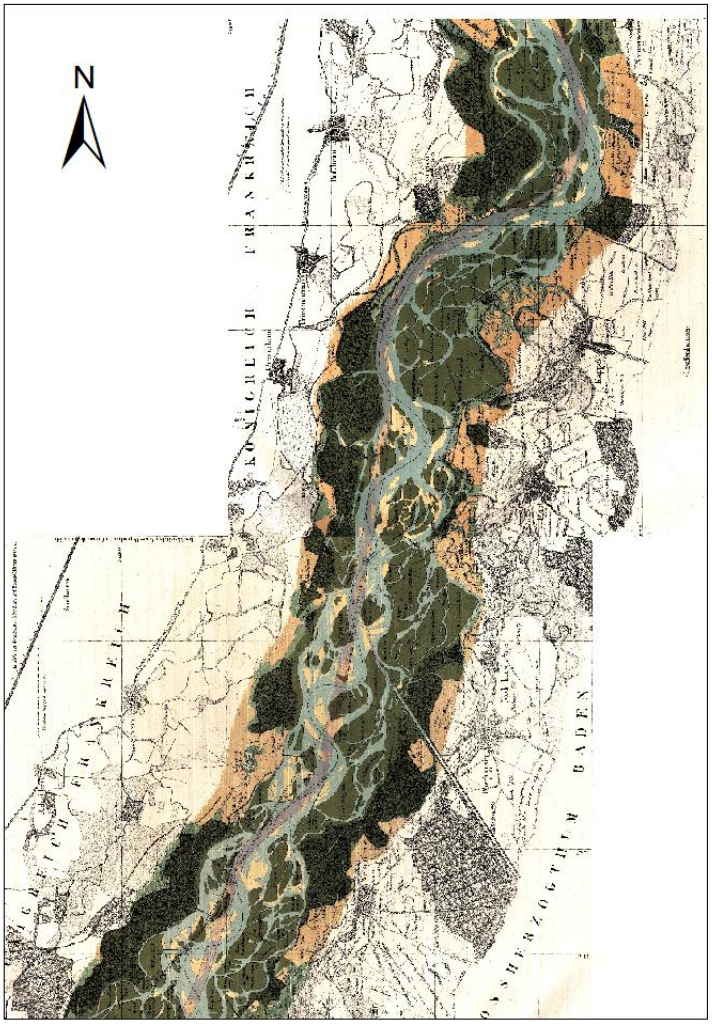
Logiciel : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson.S 2019

Carte géoréférencé de 1828 entre Marckolsheim et Rhinau.



Logiciel : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson.S 2019

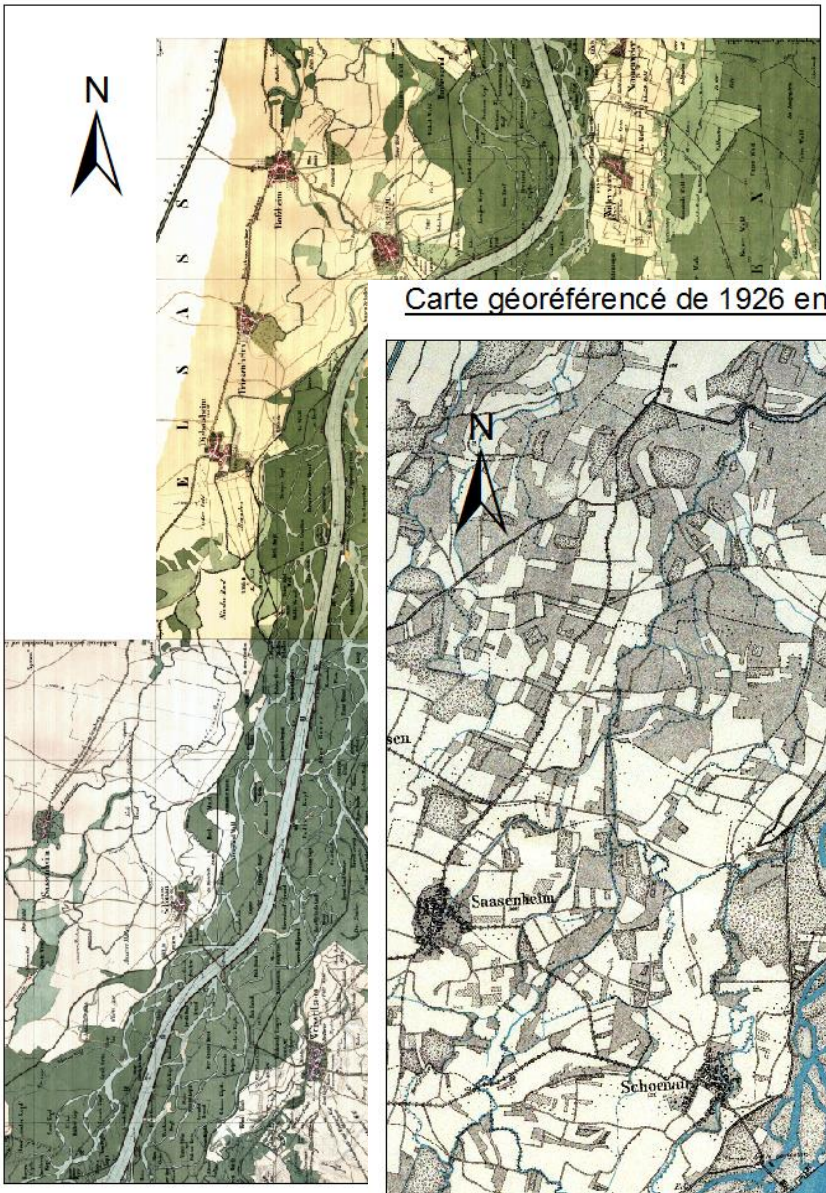
Carte géoréférencé de 1838 entre Marckolsheim et Rhinau.



Logiciel : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson.S 2019

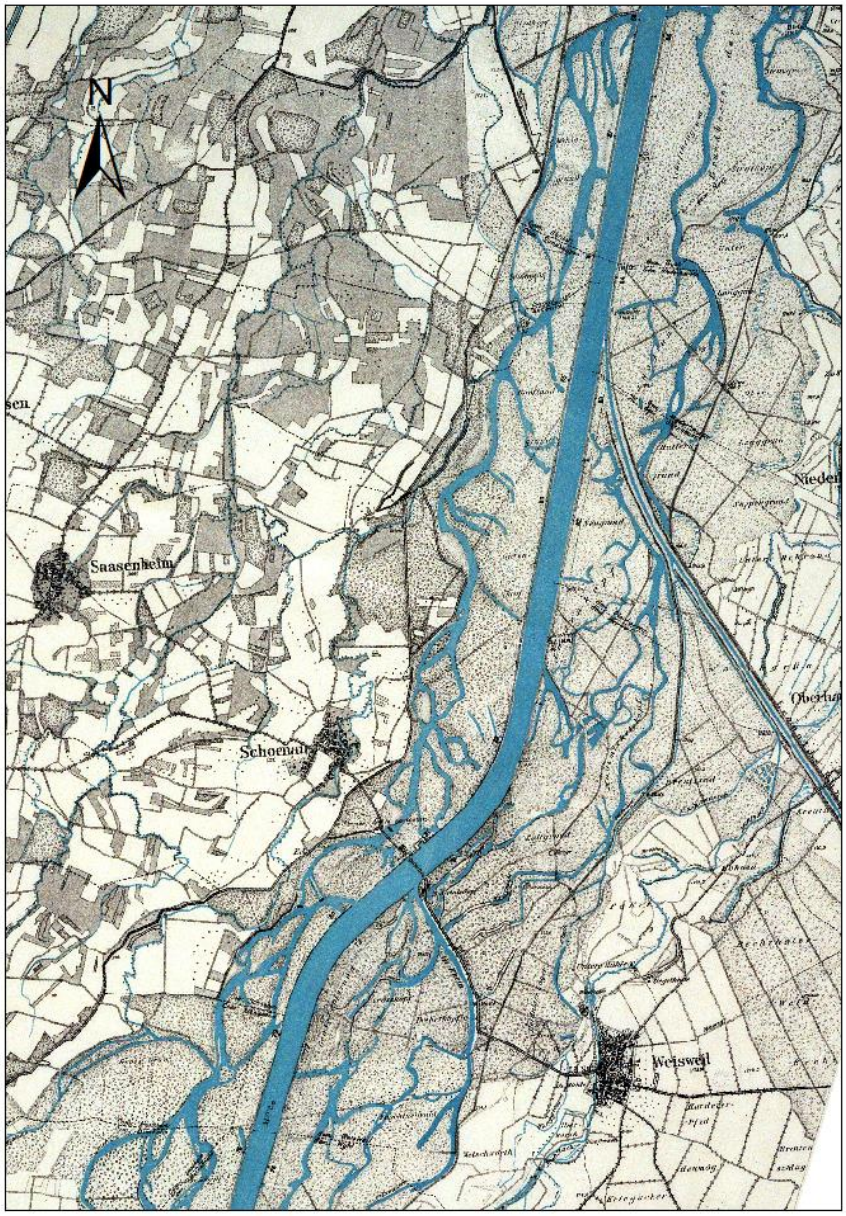
0 1,75 3,5 Kilomètres

Carte géoréférencé de 1872 entre Marckolsheim et Rhinau.



Logiciel : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson.S 2019

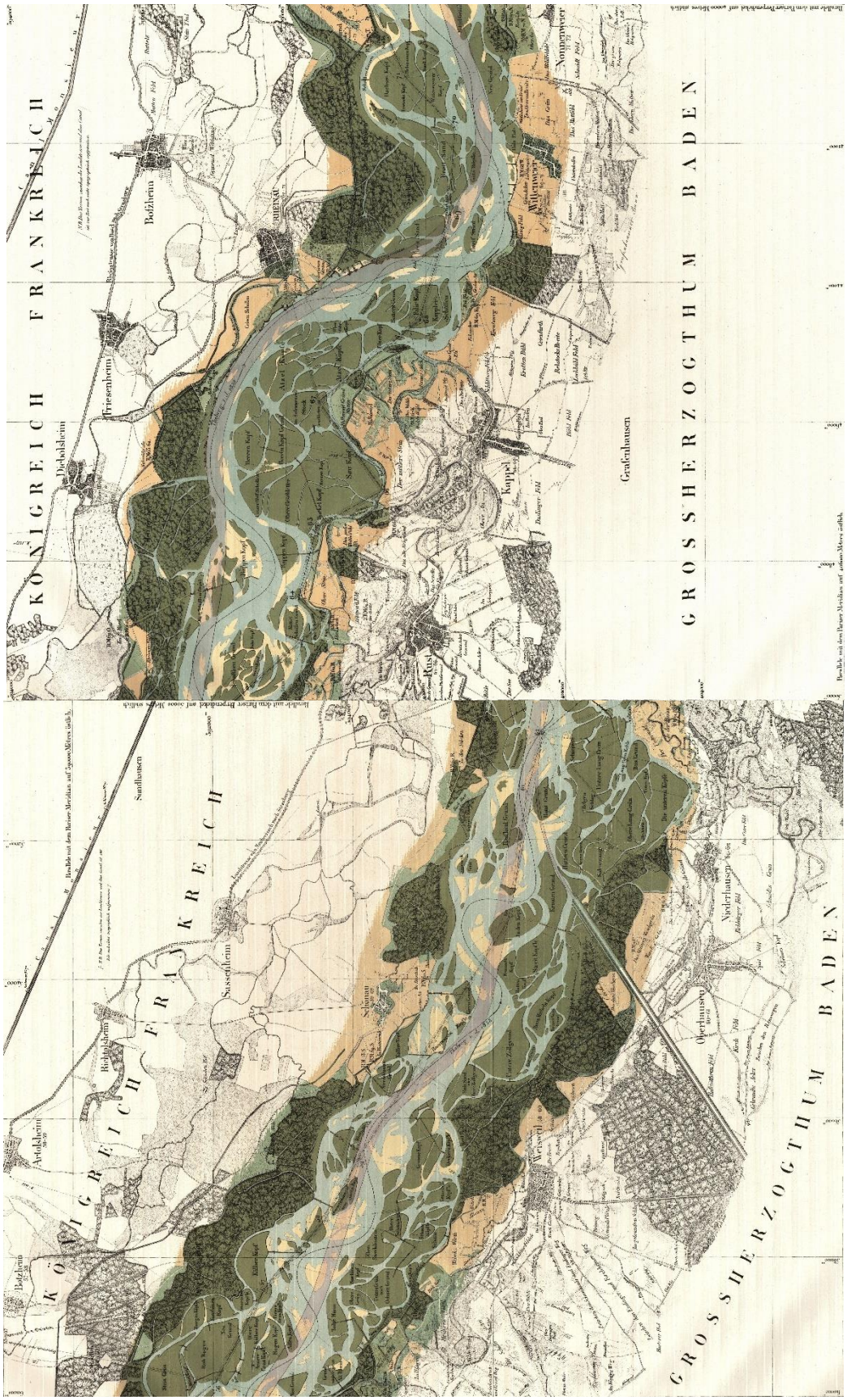
Carte géoréférencé de 1926 entre Marckolsheim et Rhinau.



Logiciel : ArcMap 10.6.1
Réalisé par Boisson.S 2019

0 0,75 1,5 Kilomètres

Annexe 3 :


KÖNIGREICH FRANKREICH
GROSSHERZOGTHUM BADEN
Diebolsheim
Triesenheim
Boßlheim
Kappel
Grafenhausen
Nonnenweier
Rust
Sundhausen
Sasbach
Rheinhausen
Weisweil
Oberhausen
Niederhausen

Annexe 4 :

Blatt N° 11.
RHEINGRÄNZ-CARTE
Altenheim
Schoenau
FRAD068 - carte et plan 396
Rhinau
FRAD068 - carte et plan 397
Nº6. Wyhl
Nº7. Kappel
Blatt N° 10
RHEINGRÄNZ-CARTE
Ottenheim
KÖNIGREICH FRANKREICH
Ottenheim
Gerstheim
Ottenheim
Meissenheim
Nonnenweier
Allmannsweier
Ichenheim
GROSSHERZOGTHUM BADEN

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Naufrage du Rhin au XVIIIe. Source : Encyclopédie 2007, le Rhin 10
Figure 2 : Déluge du Rhin, inondation de l'été 1480 entre Bâle et Strasbourg 1628. Source : Cosmographie de S.Mûnster,mémoire de Houssier 10
Figure 3 : Carte du Rhin et de ses différents tronçons : Sources : Archives Strasbourg.eu 13
Figure 4 : Le Rhin en tresse et anastomose vers 1830. Source : peinture de Birmann, 1758-1844. 14
Figure 5 : River constructions near Istein between the measures by TULLA and HONSELL. Source : Herget.J 2005 16
Figure 6 : Plan de construction des épis et seuils de fond. Source : Johnstone.2010, extrait de Poitrat, 1950..... 17
Figure 7 : Construction des premiers travaux et des travaux supplémentaires de la régularisation sur le Rhin entre Bâle et Schonau. Source : (Schneider, 1966) 18
Figure 8 : Infrastructures sur le Grand Canal d'Alsace entre 1928 et 1959 centrale, écluses, festons. 20
Figure 9 : Travail de géoréférencement sur les cartes anciennes de 1872. Source : PCA (Petite Camargue Alsacienne) 25
Figure 10 : Travail de géoréférencement sur les cartes anciennes de 1838. Source : PCA (Petite Camargue Alsacienne) 25
Figure 11 : Diversité des morphologies pouvant être adoptées par les chenaux alluviaux et principales caractéristiques physiques associées. Source : (Riquier, 2015) tiré de (Church, 2006)..... 29
Figure 12 : Extrait de la cartographie des chenaux en 1828, 1872 et 1925 entre PK 202 et 207. Source : Thèse de Arnaud, 2012. 30
Figure 13 : Chenaux en tresses du Rhin en 1838. Source : Boisson.S 31
Figure 14 : Chenaux en anastomose du Rhin en 1838. Source : Boisson.S 31
Figure 15 : Chenaux en anastomose du Rhin en 1838. Source : Boisson.S 31
Figure 16 : étapes effectuées pour digitaliser notre tronçon de 1838. Source : Draw.io. Réalisé par Boisson.S 33
Figure 17 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1778 35
Figure 18 : Diagramme circulaire de la typologie de 1778. Réalisé par Boisson.S... 36
Figure 19 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1828 37
Figure 20 : Diagramme circulaire de la typologie de 1828..... 38
Figure 21 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1838 39
Figure 22 : Diagramme circulaire de la typologie de 1838..... 40
Figure 23 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1872 42
Figure 24 : Diagramme circulaire de la typologie de 1872..... 43
Figure 25 : Hydrosystème du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau en 1926 44
Figure 26 : Diagramme circulaire de la typologie de 1926..... 45

Figure 27 : Taux annuel moyen des unités éco-morphologiques 46
Figure 28 : Évolution de l'hydrosystème fluvial avant les aménagements de 1778 à 1838 représentant les surfaces en eaux et les bancs..... 47
Figure 29 : Evolution de l'hydrosystème fluvial pendant les aménagements de 1872 à 1926 représentant les surfaces en eaux et les bancs..... 48
Figure 30 : Cartographie des contractions des chenaux de 1838 à 1872..... 50
Figure 31 : Cartographie des contractions des chenaux de 1872 à 1926 51
Figure 32 : Localisation des zones de contractions des chenaux entre 1926 et 2015..... 54

ABSTRACT/RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet Juxta Rhenum et OHM de Fessenheim, nous avons tenté de visualiser des zones prioritaires de polluants historiques. Ainsi, nous avons été menés à effectuer une analyse planimétrique diachronique fine du tracé en plan de l'hydrosystème fluvial du Rhin entre Marckolsheim et Rhinau.

Pour comprendre au mieux les événements passés, nous avons analysé les cartes anciennes de 1778 à 1926. Nous avons alors émis l'hypothèse selon laquelle l'hydrosystème fluvial du Rhin supérieur entre Marckolsheim et Rhinau a drastiquement évolué à partir du milieu du XIXe. Passant d'un système fluvial en tresse à un chenal unique, le Rhin s'est totalement métamorphosé. Ce changement de paysage a été géoréférencé et digitalisé. Les méthodes de traitements géomatiques nous ont permis d'apporter une base de données solide capable de visualiser et de quantifier cette évolution. Enfin, nous avons réalisé une cartographie basée sur la contraction des chenaux liés aux aménagements dans le but de localiser les chenaux abritant d'anciens polluants historiques.

As part as the Juxta Rhenum and OHM of Fessenheim project, we attempted to visualize priority areas of historical pollutants. Therefore, we carried out a fine diachronic planimetric analysis of the planar alignment of the Rhine river's hydrosystem between Marckolsheim and Rhinau.

To better understand past events, the old maps from 1778 to 1926 lead us to make the hypothesis that the Upper Rhine river's hydrosystem between Marckolsheim and the Rhine started to evolve significantly in the mid-19th century. From a braided river system to a single channel, the Rhine has been completely transformed. This change of landscape has been geo-referenced and digitalized. Geomatics processing methods enabled us to provide a solid database capable of visualizing and quantifying this evolution. As a result, we created maps of the river, based on the retraction of the channels linked to their evolution in order to locate the channels that contain former historical pollutants.