

Master 2 de Géographie, Aménagement, Environnement et Développement
Parcours Fonctionnement et Gestion des Environnements Ruraux et Naturels

HEITZ Nicolas

**Reconstitution de la trajectoire temporelle (XVIII^e - XXI^e s.) du
Rhin Supérieur entre Neuf-Brisach (68) et Marckolsheim (67)**

Soutenue le 26 Juin 2019 à Strasbourg



Vue sur la plaine du Rhin depuis le rocher d'Istein (Peter Dirmann, vers 1830)

Tuteur de stage :

M. SCHMITT Laurent : Enseignant-Chercheur à la Faculté de Géographie de Strasbourg

Jury :

M. SCHWARTZ Dominique : Responsable du Master

Mme. STAENTZEL Cybill : Post doctorante au Laboratoire Image Ville Environnement (UMR 7362) de Strasbourg

**Reconstitution de la trajectoire temporelle (XVIII^e –
XXI^e s.) du Rhin Supérieur entre
Neuf-Brisach (68) et Marckolsheim (67)**

HEITZ Nicolas

*J'aime les fleuves. Les fleuves charrient les idées aussi bien que les
marchandises ... entre tous les fleuves, j'aime le Rhin.*

Victor Hugo (1839)

À François

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Laurent Schmitt qui m'a fait confiance pour la réalisation de cette étude. Je le remercie pour sa passion pour le Rhin et surtout pour sa rigueur de travail. Cela m'a beaucoup apporté pour mes futurs travaux post-maîtrise.

Je remercie également Dominique Schwartz et Cybill Staentzel pour avoir accepté d'évaluer mon travail de Master 2 ; Grzegorz Skupinski pour avoir su répondre à mes questions sur les systèmes d'informations géographiques mais aussi nos demandes de données ; Pierre-Alexis Herrault pour ses explications concernant le plugin Historical Map ; les professeurs et les étudiants impliqués dans le projet Juxtha Rhénum.

Je remercie très particulièrement les étudiants de la salle master, Boisson Sébastien et Wenger Romain, pour ces quatre premiers mois passés ensemble à réaliser nos études. Je n'ai pas vu le temps passer grâce à vous ! Je remercie également Le Mentec Marie-Anne pour m'avoir supporté à coté d'elle, Jautzy Timothée (malgré son départ dans le bureau d'en face) pour nos nombreux cafés et discussions autour de nos mémoires respectifs, Boudoua Abd Elatif pour sa bonne humeur à chaque fois que l'on venait au quatrième étage, Callega Aurélie et Siegwald Laura pour leurs soutiens malgré la distance et enfin les doctorants et professeur du troisième étage de la Faculté de Géographie.

Pour finir j'adresse ces derniers remerciements à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu dans mes choix d'étude. Petite pensée pour ma mère qui a corrigé tous mes travaux malgré sa totale incompréhension de la géographie physique et notamment de la géomorphologie fluviale. Maman c'était le dernier !

Table des matières

Remerciements	5
Introduction	8
Partie I - Etat de l'art	10
1.1 Etude temporelle des cours d'eaux par les cartes historiques et photographies aériennes	10
1.2 Les fleuves et styles fluviaux	11
1.3 Sédimentation des chenaux	13
1.4 Aménagement des cours d'eau : quelques exemples	14
1.5 Pollution des cours d'eaux	15
1.6 Les travaux précurseurs	15
Partie II - Sites d'études	17
2.1 Le Rhin	17
2.1.1 Bref historique géomorphologique	17
2.1.2 Les caractéristiques générales	17
2.1.3 Les aménagements du Rhin Supérieur	20
2.1.3.1 Le Rhin « sauvage »	20
2.1.3.2 La correction (1842-1876)	21
2.1.3.3 La régularisation (1930-1950)	23
2.1.3.4 La canalisation (1928-1977)	24
2.1.4 Les impacts des aménagements sur le Rhin Supérieur	27
2.2. Le tronçon d'étude : Le Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim	28
2.3. La centrale nucléaire de Fessenheim	31
2.3.1 Son historique	31
2.3.2 Les rejets de la centrale	31
Partie III - Matériel et méthode d'étude	33
3.1. Etude des cartes historiques	33
3.1.1 Sélection des cartes historiques	33
3.1.2 Traitement des cartes	35
3.1.3 Le géoréférencement	35
3.1.3.1 Le géoréférencement des cartes historiques	35
3.1.3.2 Les points de contrôle	36
3.1.3.3 La transformation	36
3.1.3.4 L'erreur quadratique ou Root Mean Square Error (RMSE)	37
3.1.4 La digitalisation	38

3.1.5 Les méthodes d'extraction automatique	38
3.1.6 Photo aérienne	40
3.2. Les unités hydro-morphologiques	41
3.2.1 Les unités hydro-morphologiques : bancs, chenaux à sec et végétation	41
3.2.2 Les chenaux en eaux	41
Partie IV - Résultats et interprétations	43
4.1 Présentation des cartes digitalisées	43
4.2 Evolution du tronçon du Rhin étudié	49
4.2.1 Evolution géomorphologique de la zone d'étude	49
4.2.2 Evolution des unités hydro-morphologiques	52
4.2.3 Discussion	55
4.3 Identification des zones de contraction des chenaux par dépôt de sédiments fins	58
4.3.1 Présentation des cartes représentant la contraction des chenaux	58
4.3.2 Contraction des chenaux en eau entre 1828 et 1926.	63
4.3.3 Repérage de zones de contraction par dépôts de sédiments fins	64
4.4 Limites des méthodes	68
Conclusion et perspectives	69
Bibliographie	70
Sitographie et vidéographie	73
Table des figures	74
Annexes	76

Introduction

Les cours d'eau sont depuis des centaines d'années aménagés de la main de l'Homme. Ils sont aujourd'hui pour la plupart des anthroposystèmes.

En Europe le Rhin n'y a pas échappé. En effet depuis le XIXe siècle, le « Vater Rhein » pour les Allemands, a subi plusieurs phases d'intense aménagements. Ces derniers débutèrent en 1840 avec la correction du lit du Rhin. L'impact de cet aménagement entraîna une phase de régularisation entre 1930 et 1950. Dans le même temps, le projet du Grand Canal d'Alsace de René Koechlin fut approuvé et lancé.

Comme la plupart des fleuves, le Rhin a aussi subi une phase d'aménagements hydrauliques sur ses rives. Des usines hydroélectriques ont été installées mais aussi une centrale nucléaire : celle de Fessenheim. Cette centrale devant être fermée prochainement, la trajectoire temporelle du fonctionnement du socio-écosystème passé, actuel et futur, intéresse les scientifiques. C'est pourquoi cette étude s'intègre dans les travaux en cours du projet IDEX Interdisciplinaire Unistra-CNRS « Juxtha Rhénum » et de l'Observatoire Hommes-Milieus de Fessenheim.

Ce mémoire, réalisé au Laboratoire Image, Ville, Environnement (LIVE) de Strasbourg (UMR 7362), consiste à effectuer une analyse planimétrique diachronique fine (depuis la fin du XVIIIe siècle) de l'hydrosystème rhénan Supérieur entre Neuf-Brisach et Marckolsheim à partir de cartes anciennes.

Cette étude vise plusieurs objectifs : Le premier est d'étudier la dynamique du fleuve avant et après les aménagements du XIXe siècle. Le deuxième est de caractériser et de quantifier les ajustements géomorphologiques induits par ces aménagements. Avec cette base, un troisième objectif peut être abordé : celui des zones potentiellement polluées par les rejets industriels, agricoles, etc. En effet, le dernier objectif de cette étude est d'identifier les zones de contractions des chenaux qui sont potentiellement des zones de dépôts privilégiés de sédiments fins pollués (hotspots de pollution). Cette pollution pourrait provenir de l'industrialisation des berges du fleuve après la correction de ce dernier.

Nous pouvons donc nous poser la question suivante :

- L'étude de l'évolution temporelle du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim depuis les aménagements du XVIII^e siècle peut-elle nous permettre d'identifier des zones de contractions des chenaux qui sont potentiellement des zones de dépôts privilégiés de sédiments fins pollués ?

Pour répondre au mieux à cette question et aux objectifs, nous allons dans une première partie faire l'état de l'art de notre étude. Dans une seconde partie, nous allons présenter plus en détails nos zones d'études. La troisième partie sera, elle, consacrée aux matériels et méthodes utilisés. Enfin la quatrième, et dernière partie, sera consacrée à l'interprétation des résultats obtenus.

Partie I - Etat de l'art

Dans cette première partie du mémoire, qui est l'état de l'art, nous allons voir le cadre général de l'étude.

1.1. Etude temporelle des cours d'eaux par les cartes historiques et photographies aériennes

Les cours d'eaux sont des systèmes de plus en plus étudiés dans le monde et notamment en France (risques hydrologiques, etc.). Pour étudier l'évolution de leurs dynamiques, les cartes historiques et les photographies aériennes sont plébiscitées.

Comme le dit Herrault (2015) : « Les cartes historiques contiennent une riche quantité d'information sur le passé concernant l'occupation du sol, leur structure, la morphologie des villes, les monuments, etc. ». Les cartes historiques peuvent donc permettre d'observer la dynamique fluviale, comme l'évolution latérale, sur des périodes de temps relativement longues. En France les cartes imprimées les plus anciennes dateraient du XVI^e siècle en se basant sur la « Géographie » de Ptolémée. La première carte correcte serait l'œuvre de Bernardo Silvano avec la *Gallia* en 1511 (Broc, 1983). Les cartes de Cassini du XVIII^e et les cartes d'Etat-Major du XIX^e siècle sont, elles, bien souvent, les cartes de bases pour une étude historique.

En ce qui concerne la photographie aérienne, c'est un outil désormais classique pour analyser la géomorphologie fluviale (Gilvear et Bryant, 2003). En effet, les photographies apportent deux avantages majeurs (Malavoi et Bravard, 2010) :

- Leur mise à jour est fréquente
- Leur possibilité d'analyse est bien supérieure : on y distingue le type d'occupation des sols, les bancs alluviaux, le type de végétation, etc.

En France, c'est l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) qui gère la production de données photographiques aériennes et ceci depuis 1940. Cependant, les photographies (verticales) disponibles les plus anciennes datent de 1919.

1.2. Les fleuves et styles fluviaux

Les fleuves sont des cours d’eaux qui se jettent dans la mer (Bethemont, 1999).

Les cours d’eaux sont des systèmes fluviaux qui peuvent être séparés en plusieurs zones (Schumm, 1977). La première zone est celle de la production sédimentaire où l’érosion est le principal moteur. La deuxième zone est la zone de transfert où le cours d’eau transporte les sédiments récemment érodés. Et enfin la troisième zone est celle de stockage où les sédiments sont déposés, notamment dans la plaine d’inondation lorsque le débit à plein bord est dépassé (Petit et Daxhelet, 1988 ; Heitz, 2018). Le système fluvial des cours d’eaux est soumis à des variables qui influent sur sa dynamique. Les caractéristiques morphologiques comme la pente ou la sinuosité par exemple sont contrôlées par les débits liquides et solides qui, eux, dépendent du relief, de la géologie, du climat mais aussi de l’occupation du sol dans le bassin versant (Bravard et Petit, 1997). Au sein du système fluvial des échanges ont lieu : c’est l’hydrosystème fluvial. Ce système, en quatre dimensions, est adapté aux grands cours d’eau (Malavoi et Bravard, 2010). La première dimension est longitudinale avec des échanges entre l’amont et l’aval. La deuxième est latérale entre le lit mineur et la plaine alluviale. La troisième est verticale entre le talweg et la nappe. Enfin pour finir la quatrième et dernière dimension est la temporalité. Le système fluvial est donc un ensemble d’interactions et de rétroactions complexes (Schumm, 1977).

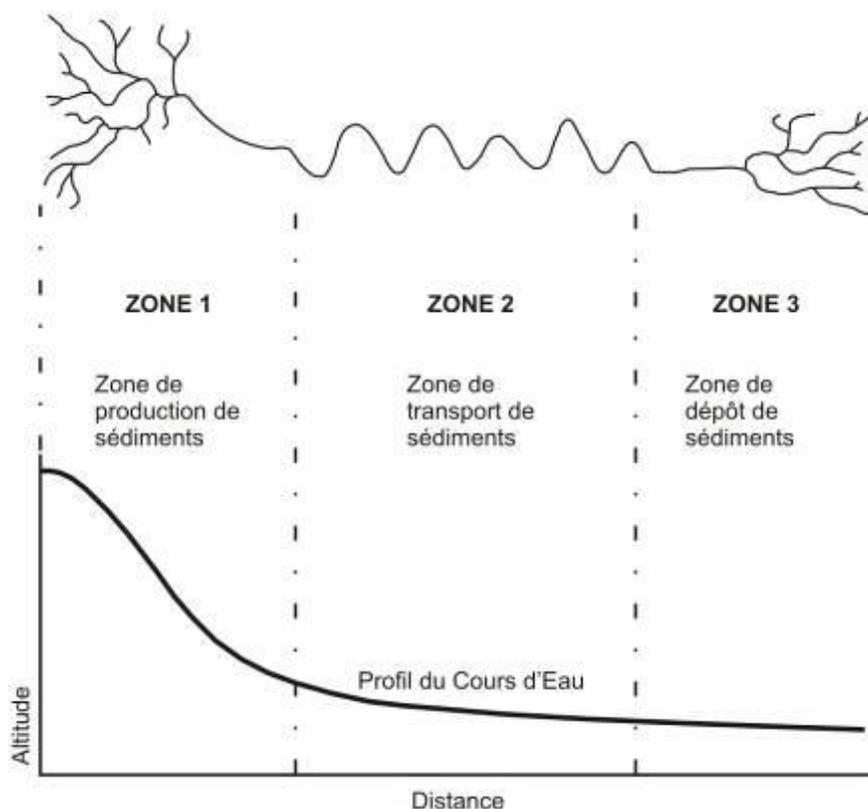


Figure 1 : Les zones d'un bassin versant d'après Shumm en 1977 (Source : Maurer, 2008)

Les lits des cours d'eau, notamment les fleuves, peuvent être classifiés selon la forme des chenaux (Tricart, 1977). Les styles fluviaux (figure 2) dépendent de plusieurs facteurs comme la sinuosité (I) et la multiplicité des chenaux.

Les quatre styles fluviaux sont :

- Rectiligne : le chenal est unique et la sinuosité est faible (I inférieur à 1,05 d'après Brice en 1964).
- A méandres : le chenal est, là encore, unique mais la sinuosité est forte (I supérieur à 1,50).
- A tresses : les chenaux sont multiples mais leurs sinuosités sont faibles. Ces chenaux ont une dynamique latérale très forte. Ils sont séparés par des bancs (parfois végétalisés). Les tresses sont un style fluvial du lit mineur
- A anastomose : les chenaux sont multiples mais ici la sinuosité est moyenne. Les chenaux sont séparés par des îles végétalisées. Les anastomoses se localisent dans le lit majeur du cours d'eau.

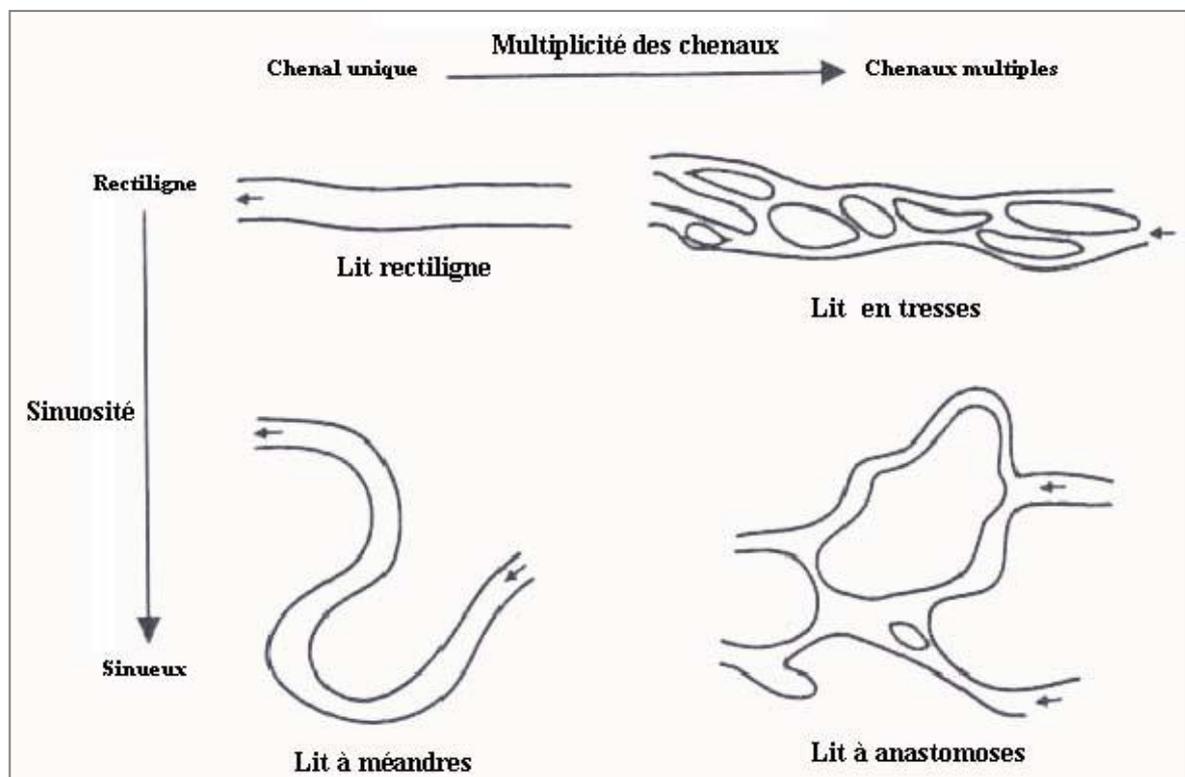


Figure 2 : Les différents types de styles fluviaux selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux

(Source : Rust, 1978 ; modifié par Amoros & Petts, 1993)

Dans notre cas d'étude, nous allons plus particulièrement nous intéresser aux tresses et aux anastomoses.

Pour que les tresses apparaissent, il faut deux conditions majeures (Malavoi et Bravard, 2010) : que la charge de fond soit abondante et que les berges soient érodables. Cependant, il y a des conditions secondaires comme le débit, la pente ou encore le régime hydrologique du cours d'eau. En ce qui concerne les anastomoses (terme créé par Schumm en 1968), elles apparaissent lors d'épisodes de débordements dans la plaine alluviale. Ces dernières seraient des chenaux de crues avec une durée de vie importante ou d'anciens talwegs après une défluviation (avulsion) du lit principal. De plus, la subsidence tectonique (abaissement néo-tectonique) serait une condition locale du fait de l'accentuation de la sédimentation.

1.3. Sédimentation des chenaux

La sédimentation des chenaux dépend de la vitesse mais aussi de la turbulence des eaux qui se dirigent vers l'aval (Chamley, 1988). En effet, les cours d'eau charrient les matériaux précédemment érodés sur le fond (galets) mais aussi en suspension (matériaux fins). De ce fait, selon le débit du cours d'eau et du diamètre du matériau, ce dernier va soit être transporté, soit être sédimenté (d'après le diagramme de Hjulström en 1935, figure 3 suivante). Cette sédimentation se déroule principalement dans les creux ou en bordure des rives convexes (Chamley, 1988). Comme dit précédemment, dans le lit majeur (plaine d'inondation), le phénomène de sédimentation a lieu lorsque le débit à pleins bords est dépassé (Petit et Daxhelet, 1989).

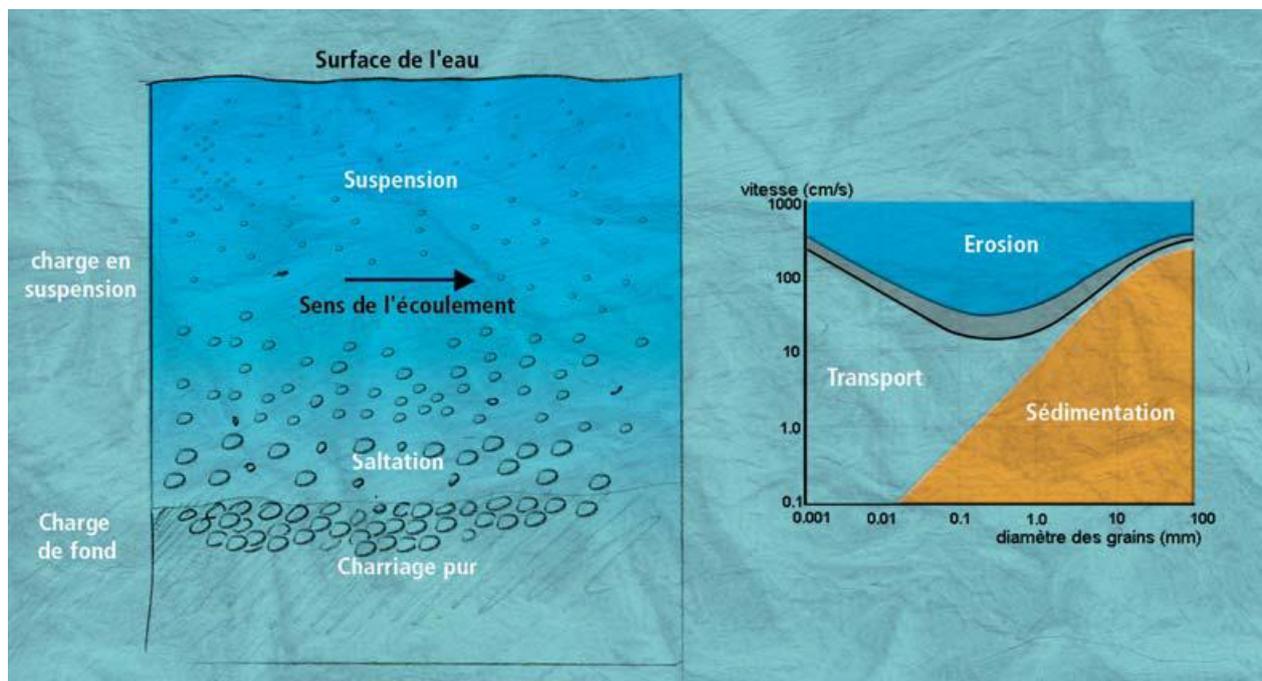


Figure 3 : Le transport des sédiments à gauche et le diagramme de Hjulström à droite

(Source : Malavoi et Bravard, 2010)

1.4. Aménagement des cours d'eau : quelques exemples

Les cours d'eau sont des espaces que l'Homme a aménagés au fil du temps afin de pouvoir exploiter les ressources que ces derniers peuvent offrir. Cependant, il y a des risques à vivre le long de ces espaces fluviaux. En effet il n'est pas rare, par exemple, que des inondations ou des maladies aient lieu. La mobilité latérale est aussi un problème comme le montre l'exemple de la destruction d'une douzaine de villages le long du fleuve (Descombes, 2010) ou encore le déménagement du village de Kunheim au cours du 18^{ème} siècle.

Un des aménagements est la chenalisation. Cet aménagement, dont le but est de modifier le tracé en plan du cours d'eau avec des digues et de stabiliser les berges, engendre l'accélération des écoulements (Wasson, 1998). Dans le passé, cet aménagement a été réalisé pour faciliter la navigation fluviale, réduire les inondations et pouvoir ainsi utiliser les plaines d'inondations pour l'agriculture. C'est le cas, il y a 4000 ans, avec un ancien bras du Nil qui a été endigué afin de pouvoir irriguer les cultures (Bethemont, 1999). Les fleuves européens ont, eux, été chenalisés durant le 19^{ème} siècle (Amoros et Petts, 1993) (Voir 2.1.3 page 20 pour notre zone d'étude).

Un autre aménagement est la mise en place d'épis dans le cours d'eau. Le but de cet aménagement est de favoriser la sédimentation (pour l'agriculture) mais aussi, comme la chenalisation, d'améliorer la navigation.

L'aménagement phare des cours d'eaux reste le barrage. Les premiers barrages ont, comme pour la chenalisation, été implantés en Egypte il y a 5 000 ans (Bethemont, 1999). D'abord réalisés pour l'irrigation et la régulation des débits, les barrages sont aujourd'hui au sein d'aménagements hydroélectriques. Bethemont (1999) classe ce type de barrage en trois catégories : les barrages de haute chute implantés en tête de bassin, les barrages de moyenne chute implantés sur le cours moyen du cours d'eaux (exemple du barrage des Trois-Gorges en Chine) et enfin les barrages de basse chute qui sont implantés sur le cours inférieur des rivières et des fleuves navigables (exemple des usines sur le Rhin, voir 2.1.3.4 pages 23). En revanche, ces aménagements dépendent de la configuration locale comme la topographie et la géologie (Alcayaga, 2013).

Nous étudierons plus en détails les aménagements et leurs impacts de notre zone d'étude dans le partie II.

1.5. Pollution des cours d'eaux

A l'heure actuelle, la majorité des étendues d'eau est impactée à différents degrés par la pollution (Smol, 2008). Cette pollution est souvent chimique (métaux, pesticides, médicaments, etc.) mais aussi physique (chaleur, radioactivité, etc.). Elle peut, dans une autre mesure, être biologique (toxines, germes pathogènes, parasites, etc.). Selon l'ONU, en 2024, deux tiers de la population mondiale n'aura pas un accès adéquat à l'eau potable (Smol, 2008).

Comme exemple de pollution actuelle, nous pouvons parler des antibiotiques. En effet une étude des chercheurs de l'Université de York (Grande-Bretagne) montre que dans les rivières et fleuves du monde, leurs concentrations dépassent les niveaux autorisés. Sur 711 cours d'eau étudiés, 65% sont contaminés. C'est le cas en Europe avec notamment le Danube et la Tamise.

En ce qui concerne le Rhin plus précisément, il y a eu le 31 octobre 1986, l'accident de l'usine Sandoz à Bâle. En effet durant cette même nuit, l'usine contenant 1 200 tonnes de pesticides, de solvants et d'autres produits chimiques prit feu. L'eau utilisée pour éteindre l'incendie s'écoula, contaminée par les produits chimiques, directement dans le Rhin comme 200 kilogrammes de composés de mercure. Six jours après l'incendie, la nappe de pollution s'étend sur 400 kilomètres. Ceci décima environ 150 000 anguilles et la population vivant aux abords du fleuve a dû être alimentée en eau potable par camions-citernes. Même le patrimoine allemand, la bière, a été touchée. En effet, les brasseries de Düsseldorf ont dû interrompre leurs productions.

1.6. Les travaux précurseurs

Ce mémoire s'inscrit dans un prolongement de travaux touchant le Rhin dans sa partie dite Supérieure (voir 2.1.2, page 17). Le mémoire de base est celui de Christophe Kleinas réalisé en 2003 à l'Université Louis Pasteur I de Strasbourg. Son mémoire de maîtrise a eu pour but d'élaborer une base de données afin de réaliser une analyse quantitative de l'évolution du style fluvial du Rhin entre Bâle et Lauterbourg avant les travaux de rectification. Pour ce faire il avait utilisé la carte datant de 1828 (18 feuilles à l'échelle 1/20 000). Dans son travail, Kleinas (2003) avait défini une typologie des chenaux afin de les regrouper en sous-ensembles. Elle fut élaborée essentiellement à partir de critères morphologiques. Cette typologie a ensuite été réutilisée et modifiée par Arnaud (2012). Analysant l'évolution du Rhin dans son tronçon d'étude, elle a utilisé

cette typologie pour la numérisation des cartes anciennes. Nous avons donc utilisé cette typologie pour l'étude ici présente (Voir 3.2 page 41).

En ce qui concerne les pollutions historiques, c'est la thèse de Eschbach (2017) et l'article de Eschbach et al (2018) qui sont la genèse du deuxième axe de notre étude. Son étude sur l'hydrosystème de l'île du Rohrschollen a montré l'importance de recréer un nouveau chenal au lieu de reconnecter les annexes hydrauliques entre elles et ainsi limiter la remobilisation de sédiments fins potentiellement pollués. Dans son cas, les sédiments prélevés étaient fortement pollués (essentiellement) par le zinc.

Partie II - Sites d'études

Dans cette grande seconde partie, nous allons nous intéresser dans un premier temps au Rhin en lui-même. Dans un second temps nous allons présenter notre zone d'étude située entre Neuf-Brisach et Marckolsheim puis dans un troisième temps la centrale de Fessenheim.

2.1. Le Rhin

2.1.1 Bref historique géomorphologique

Le bassin d'effondrement du fossé rhénan débuta au cours de l'Oligocène entre -34 et -23 millions d'années jusqu'au Quaternaire. Durant le Pléistocène, les eaux du fleuve se dirigent vers la Saône et l'Aar. Le Rhin Alpin, lui, se dirige vers le Danube. C'est au début du quaternaire que le fleuve et ses autres affluents se frayèrent un passage dans la plaine en direction du Nord après la subsidence du fossé. Ce n'est que vers -400 000 ans (au Mindel-Riss) que le Rhin Alpin s'orienta vers l'Ouest pour rejoindre le fleuve. Le fleuve s'est donc dans un premier temps dirigé vers la Mer Noire grâce au Danube puis dans un second temps vers la Méditerranée par la Saône et le Rhône (Preusser, 2008) avant de se jeter dans la Mer du Nord.

2.1.2 Les caractéristiques générales

C'est à 2 343 mètres d'altitude au niveau du lac Toma dans les Alpes Suisse, plus précisément dans le canton des Grisons, que le Rhin prend officiellement sa source. Avec un bassin versant d'environ 185 260 km² et une longueur de 1 250 km, le Rhin est le 9^{ème} fleuve du continent eurasiatique (Uehlinger, 2009). Il est surtout le troisième fleuve européen après la Volga et le Danube. Du fait de sa longueur le Rhin peut être divisé en cinq tronçons (figure 4 suivante). En effet, la géomorphologie et la géologie change de sa source jusqu'à son delta.

Le premier tronçon est le *Rhin Alpin* (Alpenrhein en bleu sur la figure 4) entre le lac Toma et le lac de Constance. Ce dernier, d'une superficie de 542km² et d'une longueur de 76 kilomètres, se situe à 395 mètres d'altitude et est le point de départ du kilométrage du fleuve. C'est aussi un des plus grands lacs d'Europe (Preusser, 2008). Chaque année dans ce lac, 3 millions de m³ de sédiments en provenance de l'amont sont déposés (Mikos, 1994).

Le *Haut Rhin* (Hochrhein en cyan), quant à lui, se situe de Constance jusqu'à Bâle. Le fleuve s'écoule ici sur 140 km entre le granite du « Schwarzwald » et les calcaires du Jura où l'Aar est son principal affluent. Au niveau de Schaffausen, le fleuve fait une chute de 21 mètres. Ce tronçon du Rhin constitue la frontière entre l'Allemagne et la Suisse.

Arrivé à Bâle, le Rhin change de direction et rentre dans la plaine du fossé d'effondrement qui s'étend sur 310 km de long et 35 km de large jusqu'à Bingen (Allemagne) : C'est le *Rhin Supérieur* (Oberrhein en vert) (Preusser, 2008). Le fleuve, se dirigeant vers le Nord, est bordé par la Forêt Noire à l'Est et les Vosges à l'Ouest. Ses principaux affluents ici sont l'Ill à Gamsheim (au Nord de Strasbourg, France), le Neckar à Mannheim et le Main à Mayence (Allemagne). Au niveau de cette dernière ville, le « Rheinische Schiefergebirge » oriente le fleuve vers l'Ouest jusqu'à Bingen où il arrive à se rediriger vers le Nord (Eschweiler, 1959). Comme précédemment, ce tronçon constitue aussi une frontière naturelle, entre l'Allemagne et la France avec le tronçon allant de Bâle à Lauterbourg.

De Bingen à Bonn, le Rhin franchit le massif schisteux rhénan sur environ 100 km : c'est le *Rhin Moyen* (Mittelrhein en jaune). Ses principaux affluents sont la Lahn en amont de Coblenze et la Moselle dans Coblenze même.

Enfin pour finir le dernier tronçon est le *Rhin inférieur* (Niederrhein en orange). La Ruhr à Duisbourg, l'Emscher à Dinslaken et la Lippe à Wesel sont ses principaux affluents ici, en Allemagne. Une fois dans les Pays-Bas et dans son delta (formé par la confluence entre le Rhin et la Meuse), le fleuve se divise en trois branches : l'Ijssel, la Lek et la Waal. Ces trois branches rejoignent la mer du Nord au niveau de Rotterdam.

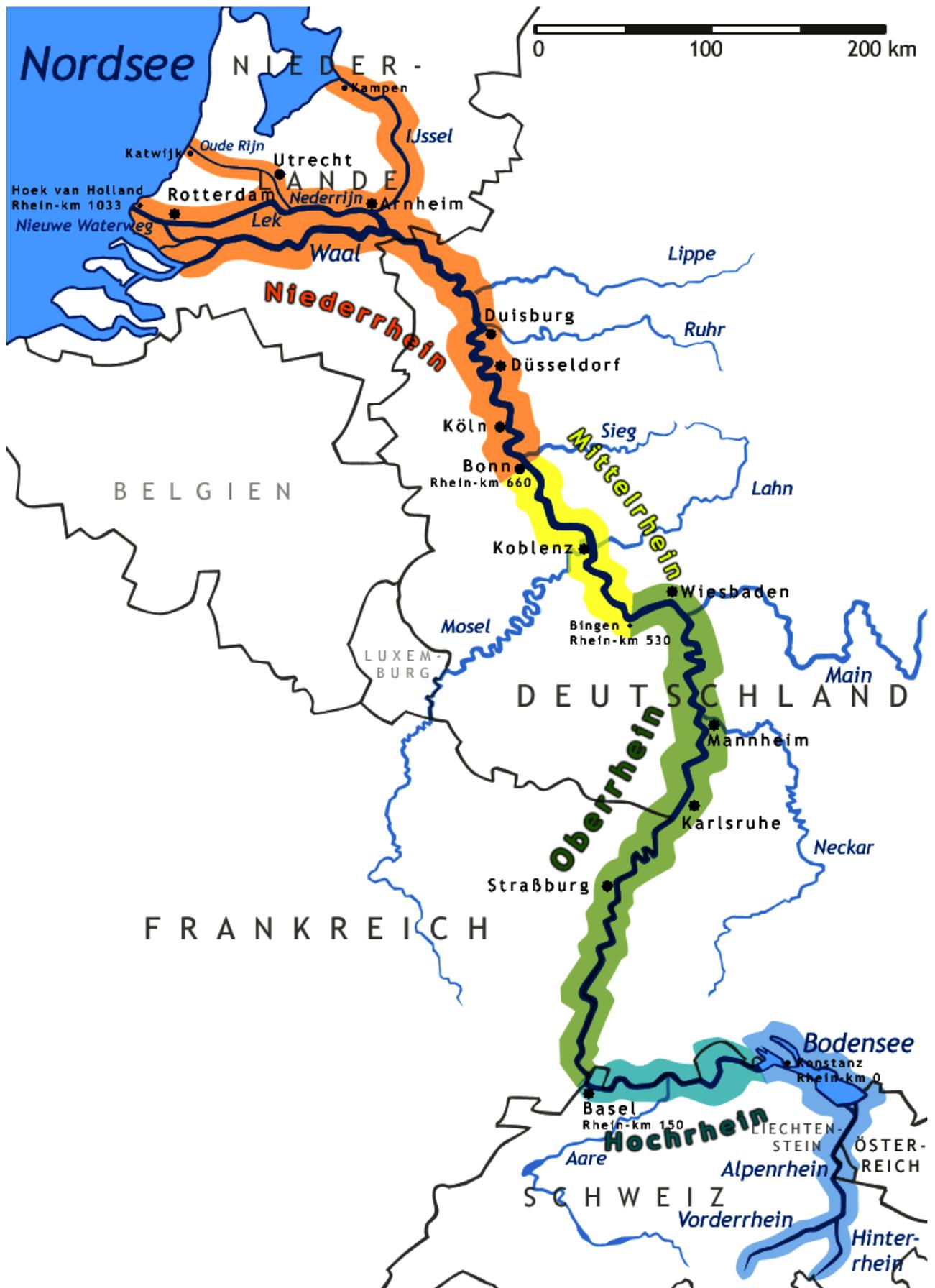


Figure 4 : Les cinq tronçons du Rhin (Source : <https://archives.strasbourg.eu>)

2.1.3 Les aménagements du Rhin Supérieur

2.1.3.1 Le Rhin « sauvage »

Avant les aménagements de 1840, le Rhin était un fleuve sauvage où sa dynamique latérale était forte (Zimmermann, 2012). En effet, le Rhin était très divaguant et était constitué de chenaux en tresses, en anastomoses, de bancs granuleux ou encore d'îles végétalisées (Arnaud, 2012) (Figure 5 suivante). Par exemple Vieux-Brisach (Allemagne) s'est localisée sur plusieurs rives du Rhin du fait de la divagation de ce dernier (Werner, 1928).

S'étendant sur une largeur de 2 à 3 km, le fleuve avait une profondeur d'eau faible ce qui gênait la navigation (Marchal, 1959). C'est ce que disait un rapport de 1833 : « Les haleurs sont fréquemment obligés de changer de rive à cause de l'irrégularité du lit, ce qui fait perdre un temps considérable » (in Marchal, 1959). De plus cette dynamique (mobilité latérale) entraînait des inondations catastrophiques. Lors des décrues de ces dernières, les bras morts étaient propices à l'insalubrité et donc aux maladies graves comme le paludisme (Tricart et Bravard, 1991). Afin de réduire les effets des inondations, des fascines ou des digues ont été construites par les populations locales. Cependant, il n'y avait pas une vraie organisation par rapport à ce problème.

Ce n'est qu'à partir de 1789 qu'un projet global de correction a été présenté. Ce projet était l'œuvre d'un général français : le général d'Arçon. Il voulait : « fixer un tracé naturel au fleuve en ne heurtant jamais les directions qu'il affecte, de profiter des creusages déjà opérés et de solliciter le courant lui-même pour creuser le nouveau lit » (d'Arçon, 1789 in Humbert et Descombes, 1985).

Vingt-trois ans plus tard un colonel badois, Johann Gottfried Tulla, propose-lui aussi un projet pour corriger le cours du Rhin. Contrairement au général d'Arçon, le badois veut rendre le tracé du Rhin rectiligne pour provoquer l'incision de ce dernier afin éviter les inondations (Tulla, 1827 ; Tricart et Bravard, 1991 in Huber 2018). C'est cette dernière proposition qui a été choisie lors de la Convention du 5 avril 1840 entre la France et le Grand-Duché de Bade (Arnaud, 2012).



Figure 5 : Carte de 1778 (Source : Région Alsace)

2.1.3.2 La correction (1842-1876)

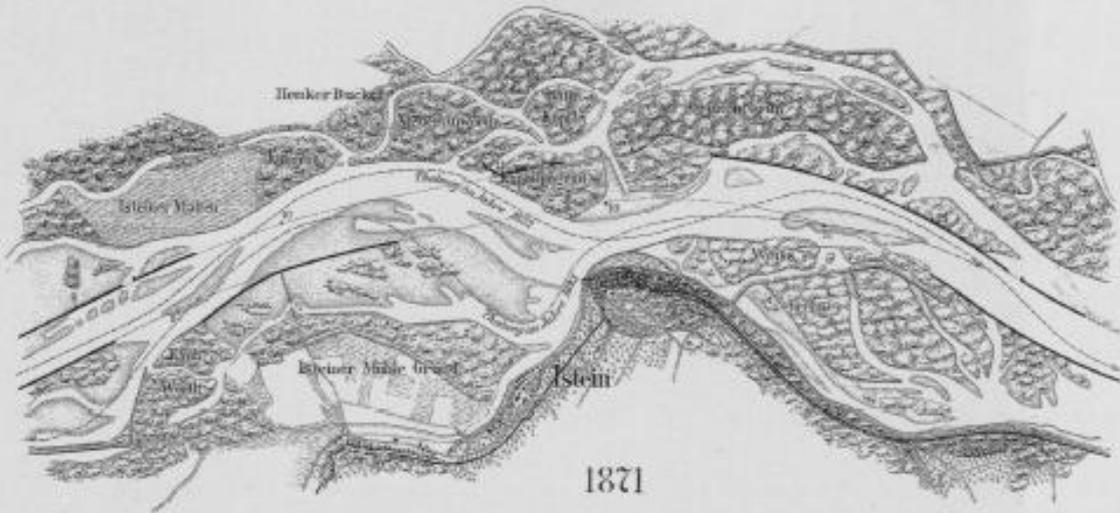
Le principal but de la correction (figure 6) était de protéger les villages se trouvant le long du fleuve. Le deuxième but était de fixer la frontière entre l'Alsace et le Duché de Bade en utilisant le talweg comme frontière politique (Humbert et Descombes, 1985).

Pour rendre le Rhin rectiligne, des digues parallèles d'une largeur de 200 à 250 mètres ont été installées de part en part. De plus, des digues des hautes eaux ont elles aussi été implantées 1km en retrait pour encadrer le lit majeur (Humbert et Descombes, 1985). Les digues n'ont pas été construites d'amont en aval mais selon les tronçons qui étaient le plus impactés par les inondations.

Au final, le Rhin fut raccourci de 32 km entre Bâle (Suisse) et Lauterbourg (France) soit près de 14% de son cours d'origine (Arnaud, 2012). Tulla avait donc réussi son pari d'inciser le fleuve. Cependant au niveau d'Istein (68), le Rhin s'incisa de 7 mètres ce qui provoqua l'affleurement de la fameuse « barre d'Istein ». En 1928, cet affleurement rocheux constituait un seuil infranchissable pour les bateaux plus de 300 jours par an (Humbert et Descombes, 1985). Nous allons voir ceci plus en détails dans le paragraphe détaillant la canalisation.

RHEIN-KORREKTION BEI ISTEIN

1843 - 1852



Maßstab = 1 : 25000

Figure 6 : Exemple de correction du Rhin (Source : Honsell, 1885)

2.1.3.3 La régularisation (1930-1950)

L'objectif de la régularisation (projet de M.Honsell (Johnstone, 2010)) du fleuve était de créer un chenal de 75m de large et de 2 m de profondeur pour que le Rhin ait un débit d'étiage minimal de 540 m³ et soit navigable entre Bâle et Strasbourg au moins 318 jours par an (Arnaud, 2012). Pour fixer les bancs de graviers et forcer le cours d'eau à creuser un chenal unique (Zimmermann, 2012), des épis (figure 7) ont été implantés en alternance sur la rive droite et la rive gauche. Plus de 700 épis ont donc été installés (Arnaud, 2015). Cette régularisation eut des résultats rapides sur la navigation (Marchal, 1959) mais n'avait pas pour autant réglé le problème de l'incision (Arnaud, 2012). Les épis se dégradant étaient entretenus mais seulement jusqu'à la mise en fonction du bief du Grand Canal d'Alsace correspondant (Johnstone, 2010).

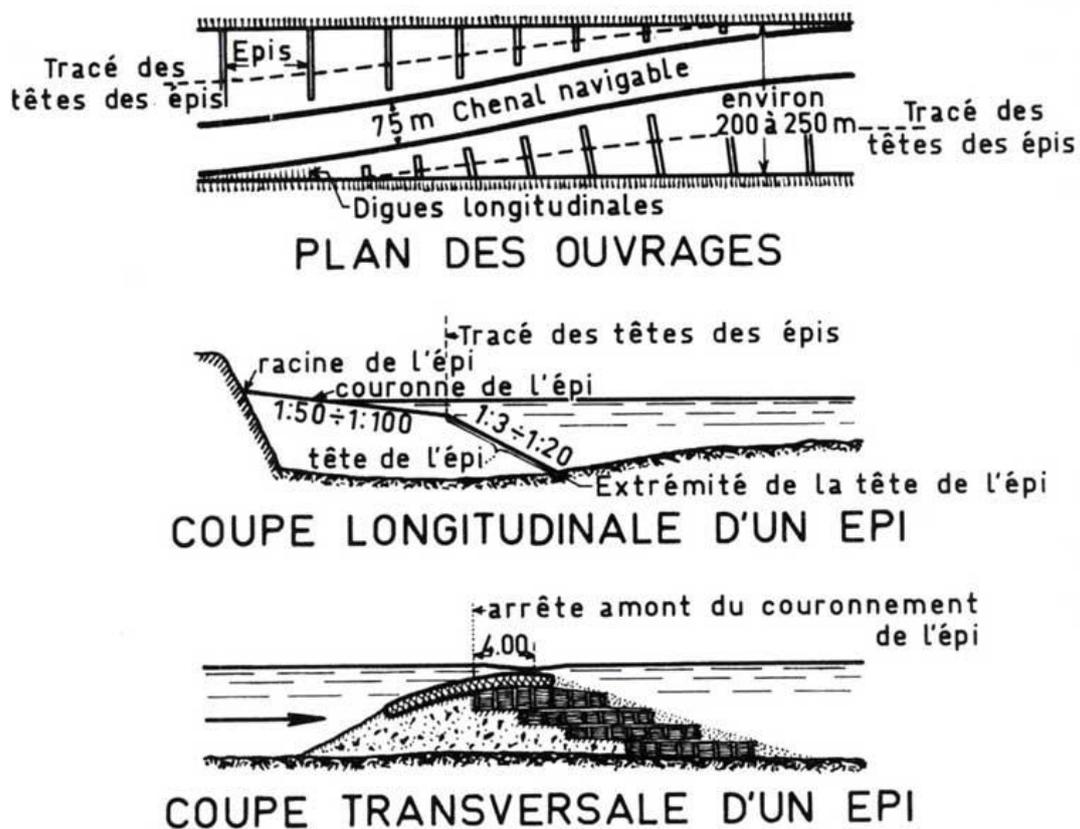


Figure 7 : Principe des épis transversaux du Rhin (Source : Encyclopédie BS Edition)

2.1.3.4 La canalisation (1928-1977)

A la suite du traité de Versailles de 1919, la France avait les droits exclusifs sur le fleuve. C'est pourquoi un projet de canalisation latérale de la rive gauche entre Bâle et Strasbourg fut porté par René Kœchlin (Zimmermann, 2012). Dès 1909, l'ingénieur mulhousien avait déjà un projet de canal latéral pour pouvoir contourner la barre d'Istein mais ce n'est qu'en 1925 (comme la régularisation) que la canalisation et la construction du Grand Canal d'Alsace (GCA) fut approuvée par la Commission Centrale pour la navigation du Rhin (Arnaud, 2012).

La construction du Grand Canal d'Alsace débuta donc en 1928 et se finit en 1959 (voir figure 8 suivante). Quatre biefs ont été construits : le barrage de Kembs en 1932, le bief d'Ottmarsheim en 1952, le bief de Fessenheim en 1956 et le bief de Vogelgrün en 1959 (Lefoulon, 1959). Sur chaque bief des usines hydro-électriques ont été installées.

Le GCA devait à l'origine aller jusqu'en aval de Vogelgrün mais le barrage de Kembs, qui alimente les quatre usines hydro-électriques, avait pour conséquence d'assécher l'ancien lit du Rhin et de faire baisser la nappe phréatique. L'écosystème rhénan fut alors impacté. C'est pourquoi, avec les accords de Luxembourg en 1956, le GCA fut réduit à 52km et que l'aménagement en feston (figure 9) fut choisi (Humbert et Descombes, 1985). Là encore, quatre aménagements furent créés : Marckolsheim en 1961, Rhinau en 1963, Gerstheim en 1967 et Strasbourg en 1970. En aval de la capitale alsacienne, deux ouvrages hydro-électriques seront construits et cela au « fil de l'eau » (Tricart et Bravard, 1991). En 1984, un barrage agricole sera rajouté entre Strasbourg et Kehl (Zimmermann, 2012). La figure 10 suivante présente les aménagements (bief et feston) du Rhin entre Kembs (France) et Iffezheim (Allemagne).

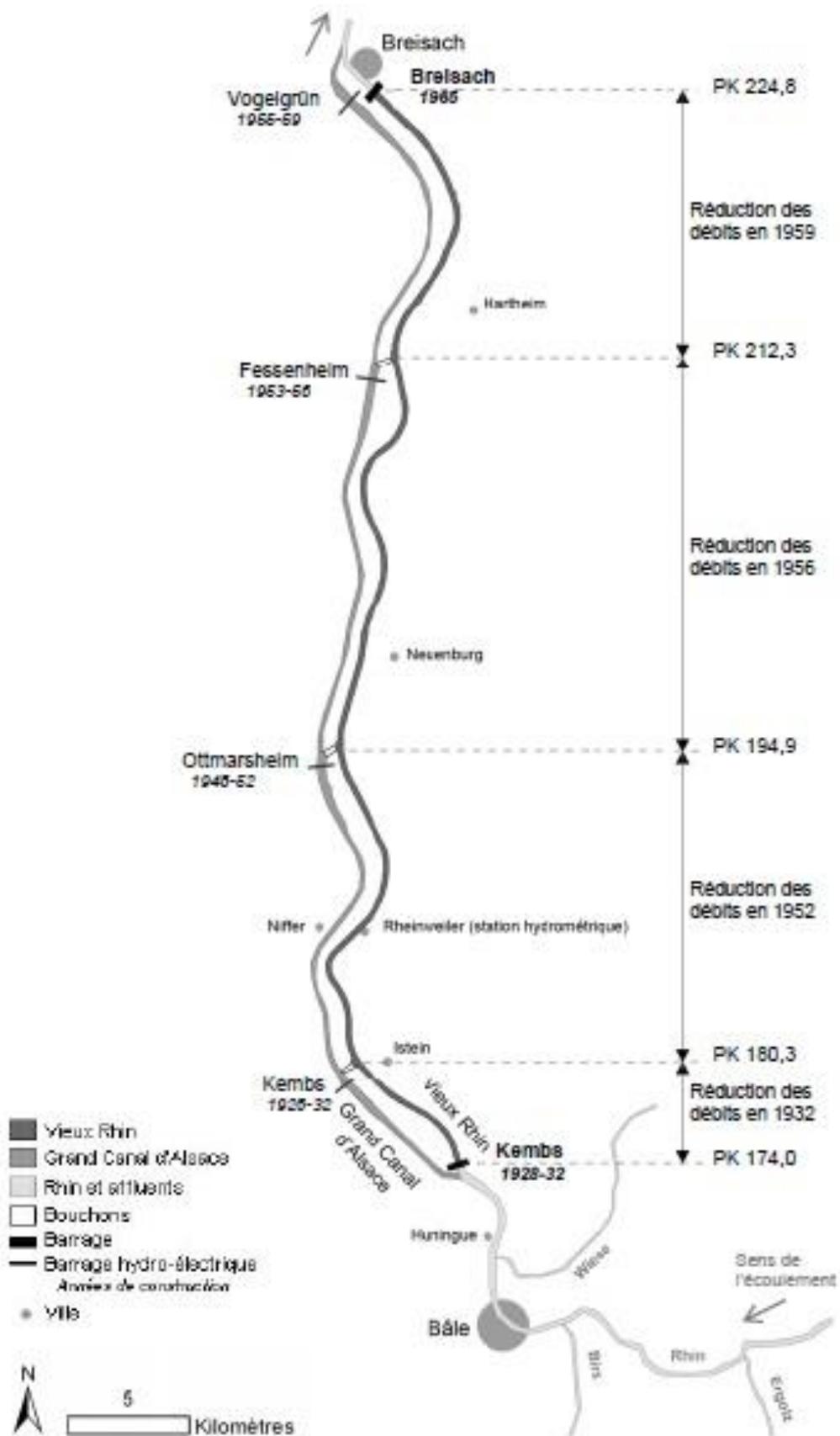


Figure 8 : Carte du Vieux Rhin et du GCA entre Bâle et Breisach

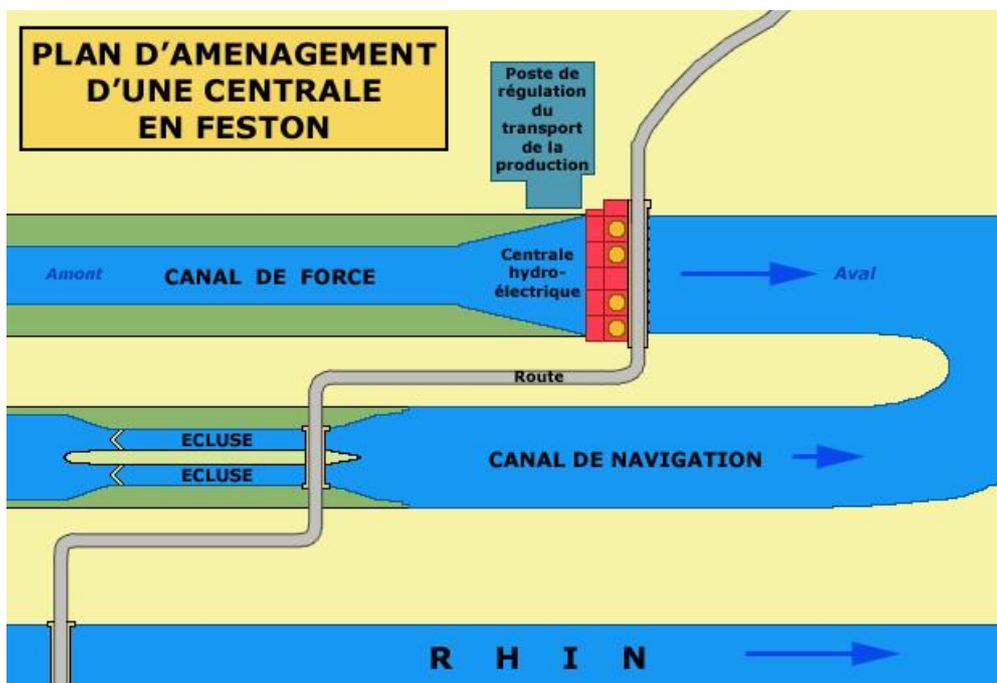


Figure 9 : Exemple de l'aménagement d'un feston (Source : Encyclopédie BS Edition)

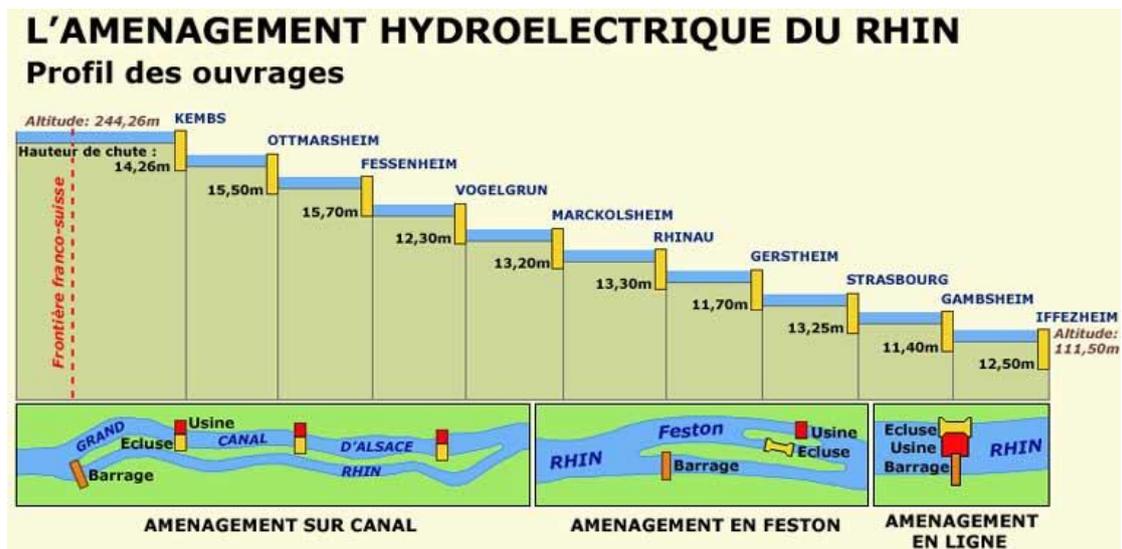


Figure 10 : Les aménagements hydro-électrique de Bâle à Iffezheim (Source : Encyclopédie BS Edition)

2.1.4 Les impacts des aménagements sur le Rhin Supérieur

La succession d'aménagements depuis le XIX^e siècle a entraîné une série d'impacts sur l'hydrosystème et le système fluvial.

La correction provoqua l'incision rapide du Rhin et ceci dès la moitié du XIX^e siècles (Johnstone, 2010). En effet le lit du fleuve étant significativement rétréci, il a ajusté sa pente augmentant ainsi le débit et de ce fait les écoulements. De plus, en période de crue, du fait de l'installation des digues, le Rhin ne déborde quasiment plus entraînant donc l'incision (Schmitt, 2001).

La création des épis durant la régularisation ont fait disparaître un grand nombre de bancs (Zimmerman, 2012). L'incision provoquée par la correction se poursuit durant cette phase des travaux (Johnstone, 2010).

La canalisation a eu un impact fort sur la nappe phréatique rhénane. En effet, une atténuation des oscillations du toit de la nappe fut observée (annexe 1) (Schmitt, 2001). Avant la construction de l'usine de Marckolsheim, la nappe oscillait environ de 1,5 à 2 mètres. Après la mise en service, cette oscillation était au maximum de 0.5 mètre. Cette diminution des oscillations de nappe due à la déconnection du fleuve provoqua l'assèchement de la forêt alluviale (Schmitt, 2001). Les seuils provoqués par l'installation des usines hydroélectriques ont aussi impacté la faune et la flore. Par exemple nous pouvons citer le saumon du Rhin qui a fortement diminué tout au long des aménagements (figure 11 suivante tirée de Zimmerman, 2012).

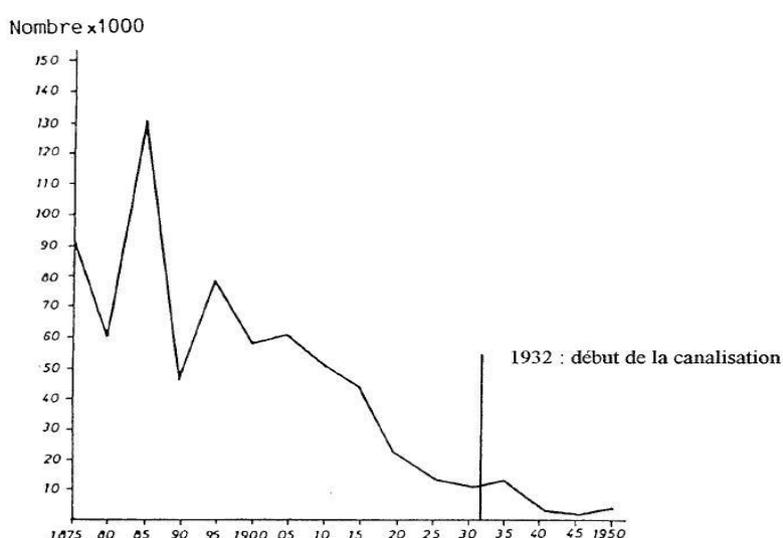


Figure 11 : Graphique représentant l'évolution du saumon dans le Rhin avant et après les aménagements (Zimmerman, 2012)

2.2. Le tronçon d'étude : Le Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim

Notre zone d'étude se situe dans le Rhin Supérieur (voir 2.1.2) entre Bâle en Suisse et Strasbourg en France. Plus précisément, la zone que nous allons étudier dans ce mémoire s'étale du Haut-Rhin au Bas-Rhin. En effet notre tronçon du fleuve, représenté sur la figure 14 suivante, débute à Neuf-Brisach (68) et se termine au niveau de Marckolsheim (67) au sein du « Grand Ried Centrale d'Alsace » (Schmitt, 2001). Sa longueur est d'environ une quinzaine de kilomètres et la largeur de l'hydrosystème est d'environ 6 kilomètres avec une pente de 0,8 à 06 ‰ (Schmitt, 2016).

Cette zone est un secteur de transition des aménagements. En effet comme le montre la figure 10 (page 26), les aménagements sur le canal passent en aménagement en feston.

Géologiquement, cette partie du Rhin Supérieur est une zone d'accumulation de sédiments fins (Schmitt, 2006) qui sont issus de l'incision du fleuve en amont durant l'holocène (Lammermann-Barthel, 2009). La figure 12 suivante est une coupe en travers du graben du Rhin Supérieur où l'on peut voir que les alluvions holocènes se reposent sur de l'argile marneuse, argile dont la surface s'abaisse du Sud vers le Nord (Johnstone, 2010).

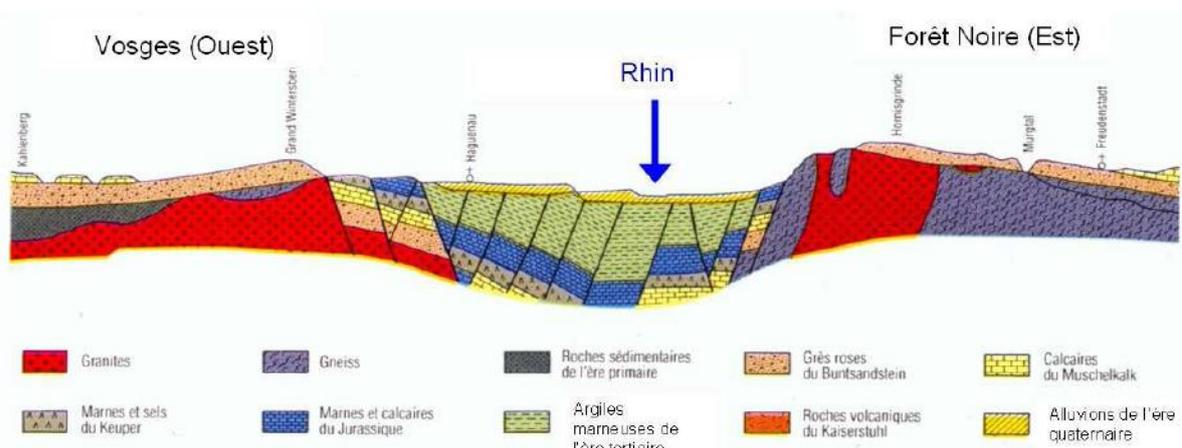


Figure 12 : Coupe en travers du graben rhénan (Tiré de Sell et al., 1998)

D'un point de vue hydrologique le régime du fleuve dans notre zone d'étude est de type nivo-glaciaire de transition (Pardé, 1959) (figure 13). Le module est de $1050 \text{ m}^3/\text{s}$, l'étiage inter-annuel est de $450 \text{ m}^3/\text{s}$ et les crues biennales sont de $2800 \text{ m}^3/\text{s}$ (Arnaud, 2014). Les lacs situés en amont régulent les débits en retenant l'eau résultant de la fonte des glaces. A l'heure actuelle, le Grand Canal d'Alsace détourne une grande partie des débits (Zimmermann, 2012). Le vieux Rhin a un débit réservé de $52 \text{ m}^3/\text{s}$ de Novembre à Mars, de 54 à $80 \text{ m}^3/\text{s}$ d'Avril à Mai et de 95 à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ de Juin à Août.

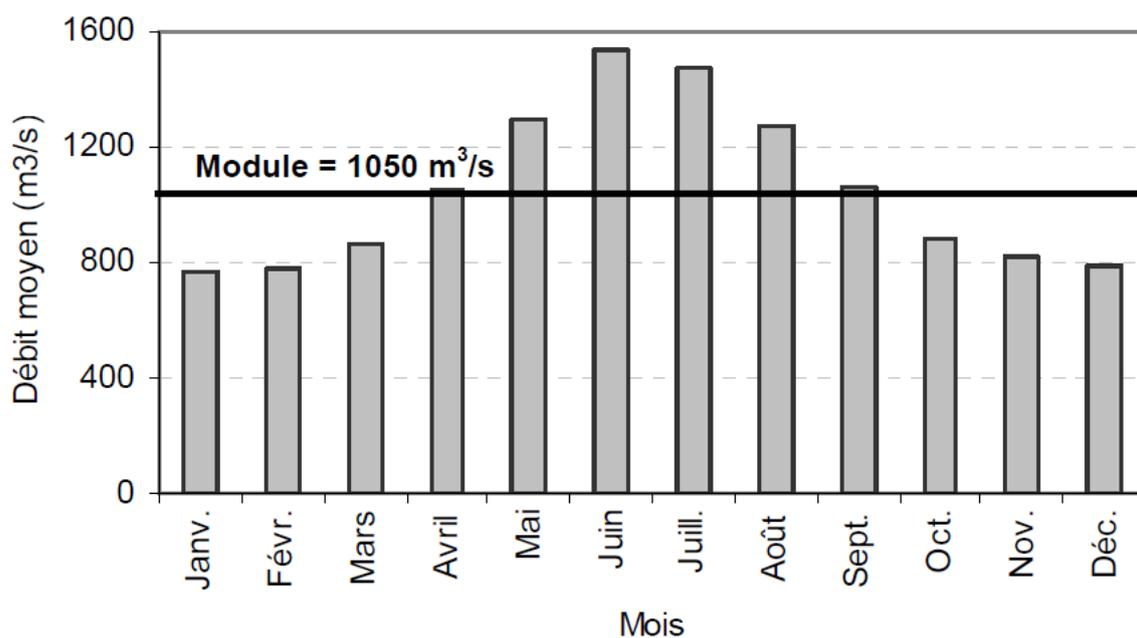
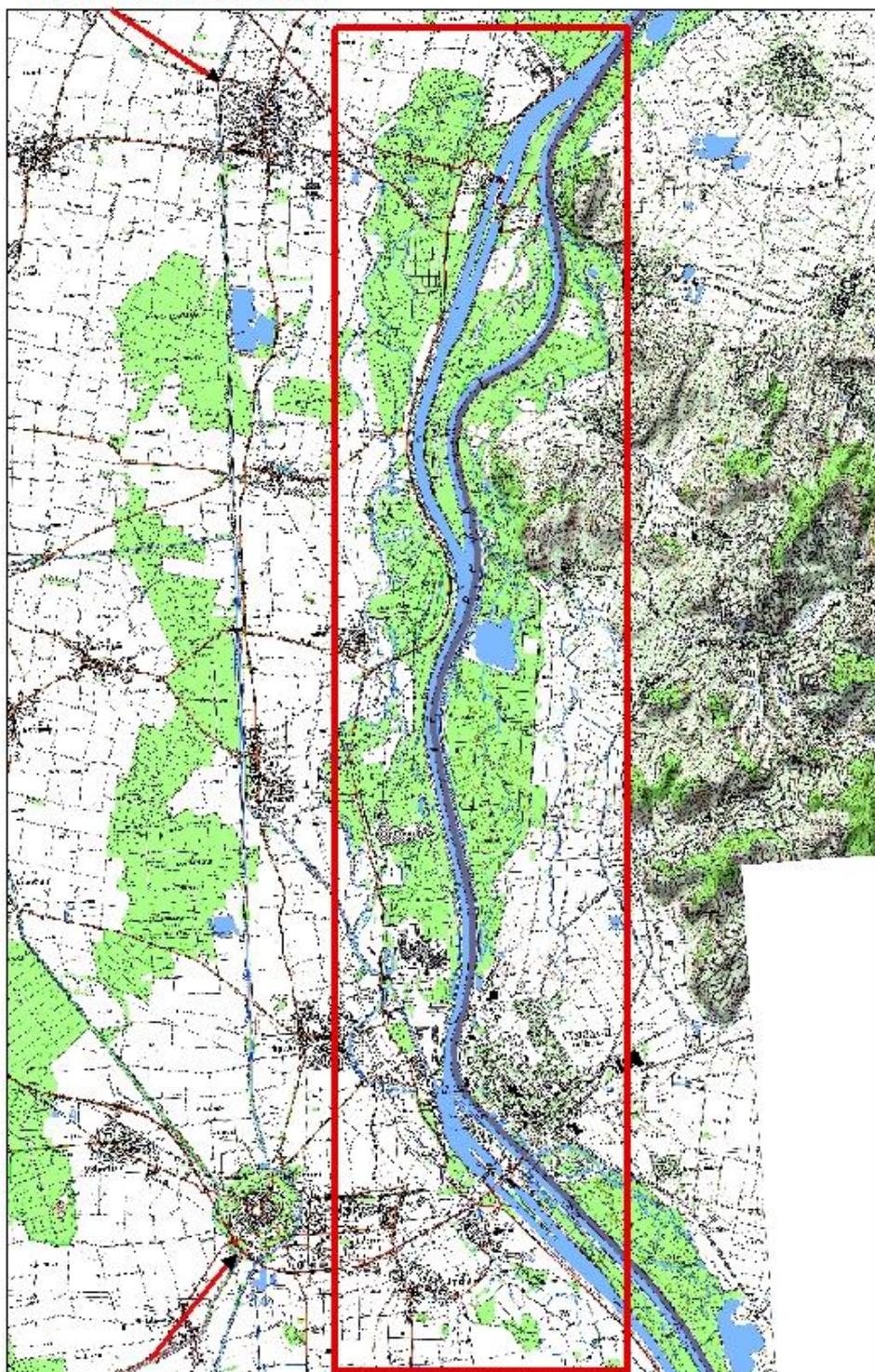


Figure 13 : Débits moyen du Rhin à Bâle (Source : CHR, 1977)

Marckolsheim



Neuf-Brisach

Source: IGN (2012)
Logiciel utilisé: ArcMap 10.6.1
Réalisé par Heitz Nicolas (2019)

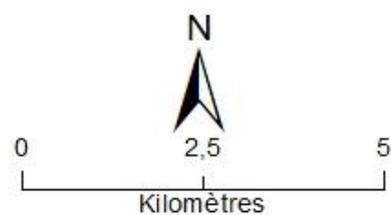


Figure 14 : Carte de localisation de la zone d'étude (Réalisation : Heitz, 2019)

2.3. La centrale nucléaire de Fessenheim

Notre mémoire étant intégré dans le projet « Juxtha Rhenum » (UNISTRA-CNRS) et dans l'Observatoire Hommes-Milieux (OHM) Fessenheim, il importe de faire une sous-partie sur cette centrale.

2.3.1 Son historique

Construite entre 1971 et 1977, la centrale nucléaire de Fessenheim est la plus ancienne centrale en fonctionnement en France.

Cette centrale se situe en amont de notre zone d'étude, à environ une quinzaine de kilomètres, au bord de la rive gauche du GCA. La centrale fut installée ici afin d'utiliser l'eau circulant dans le canal. En effet l'eau y étant froide et son débit relativement constant, cela permet d'alimenter le circuit de refroidissement (Huber, 2018). De plus, d'autres raisons jouent aussi pour implantation d'une centrale nucléaire. Trois critères sont à prendre en compte (Merenne-Schoumaker in Huber, 2018) : la proximité avec des lieux de consommation, l'existence d'une zone faiblement peuplée et l'absence de matières énergétiques alternatives pouvant concurrencer la centrale. Le premier critère est ici présent. En effet en regardant la carte topographique de l'IGN, nous observons plusieurs zones industrielles mais aussi des ports fluviaux. Pour le deuxième critère, la centrale se situe à des distances quasiment identiques des grandes villes de la région que sont Colmar et Mulhouse en France et Fribourg-en-Brisgau en Allemagne. Enfin le troisième critère n'est pas vraiment applicable ici car il y a plusieurs centrales hydroélectriques le long du Rhin qui sont proche de la centrale (Huber, 2018).

2.3.2 Les rejets de la centrale

Comme expliqué auparavant, l'eau du GCA alimente le circuit de refroidissement grâce à une prise d'eau où le débit est de $50\text{m}^3/\text{s}$ (Huber, 2018). Après avoir refroidi, cette eau est rejetée dans le GCA. Ne touchant pas d'éléments radioactifs, l'eau de refroidissement ainsi rejetée n'est pas polluée. Cependant, les rejets peuvent être de natures différentes comme thermiques (les eaux de refroidissements), chimiques ou encore d'effluents radioactifs (EDF, 2018). Tous ces rejets sont traités en amont et contrôlés afin de respecter la réglementation par rapport aux rejets dans les milieux naturels

En 2017, les rejets de la centrale nucléaire de Fessenheim restent très largement en dessous des niveaux réglementaires (figure 15 et 16). De ce fait l'impact sur l'environnement est très largement réduit en termes de pollution. Cependant les eaux de refroidissement étant rejetées chaudes, elles ont un impact direct sur la faune et la flore proche de la centrale.

REJETS LIQUIDES RADIOACTIFS EN 2017				
	Unité	Limite annuelle réglementaire	Activité rejetée	% de la limite réglementaire
Tritium	TBq	45	11,6	25,7%
Carbone 14	GBq	130	4	3,1%
Iodes	GBq	0,2	0,002	1%
Autres PF PA	GBq	18	0,3	1,7%

1 TBq (t.rabecquerel) = 10^{12} Bq
 GBq (gigabecquerel) = 10^9 Bq

Figure 15 : Tableau des rejets liquides radioactifs en 2017 (Source : EDF, 2017)

REJETS CHIMIQUES POUR LES RÉACTEURS EN FONCTIONNEMENT		
Paramètres	Quantité annuelle autorisée (kg)	Quantité rejetée en 2017 (kg)
Acide borique	10000	5594
Hydrazine	9	0,415
Morpholine	800	36,7
Phosphates	530	360
Azote	5000	915
Métaux	60	18,9
Détergents	5000	0,38
Chlorures	Sans Objet	35622
Sodium	Sans Objet	15832

Figure 16 : Tableau des rejets chimiques en 2017 (Source : EDF, 2017)

Partie III - Matériel et méthode d'étude

Dans cette troisième partie nous allons voir les matériels et méthodes que nous avons utilisés. Dans un premier temps nous allons voir comment nous avons étudié les cartes historiques puis les unités hydro-morphologiques que nous allons utiliser.

3.1. Etude des cartes historiques

Dans cette première sous partie de la partie III, nous allons voir comment nous avons traité les cartes historiques.

3.1.1 Sélection des cartes historiques

Les cartes que nous avons pour réaliser l'étude planimétrique diachronique, c'est-à-dire comparer des cartes de différentes époques sous un Système d'Information Géographique (Malavoi et Bravard, 2010), datent de 1778, 1828, 1838, 1840, 1872 et 1926. Etant numérisées, ces cartes sont de type « rasters ». Selon ESRI (le développeur d'Arcgis) un raster est : « composé d'une matrice de cellules (ou pixels) organisée en lignes et en colonnes (grille) dans laquelle chaque cellule contient une valeur représentant des informations ».

Après discussion avec Laurent Schmitt et Sébastien Boisson (travaillant lui aussi dans le projet IDEX interdisciplinaire Unistra-CNRS « Juxtha Rhenum » et de l'Observatoire Hommes-Milieux Fessenheim), nous avons décidé d'étudier les cartes de 1778, 1828, 1838, 1872 et 1926. En effet Houssier en 2014 avait donné des notes (scores) aux cartes historiques en fonctions de plusieurs critères. Nous avons donc choisi les cartes avec les plus hauts scores. Les cartes de 1778, 1828 et 1838 sont situées temporellement avant les travaux de correction. Nous allons, avec ces cartes, pouvoir observer les dynamiques des unités hydro-morphologiques antérieures aux aménagements. Les cartes de 1872 et 1926 vont, elles, nous permettre de voir le fleuve post-aménagements.

Les cartes datant d'avant 1842 avaient pour but de localiser les futurs travaux (Römer, 1981). C'est le cas pour les cartes de 1828 et 1838 (annexe 3 et 4) qui sont extrêmement précises pour l'époque de leur production. Ces cartes sont plus précises que les cartes de Cassini datant du XVIII^e siècle ou encore que les cartes d'états-majors du XIX^e siècle. La carte de 1778 (annexe 2) est composée ici de 3 feuilles. Créées par les officiers du Corps Royal du Génie, ces feuilles sont vraiment très précises, surtout pour

l'année de leur confection. La cartes de 1828 a été créée par le Baden Rheingreanz-berichtigungs bureau. La carte de 1828 et de 1838 sont composées de 18 feuilles chacune entre Bâle et Lauterbourg. L'échelle de ces dernières est au 1/20 000ème.

La carte de 1872, quant à elle, représente l'hydrosystème fluvial post-correction. Là encore, la carte est composée de 18 feuilles. Cependant elle est, selon nous, moins précise que les cartes précédentes. La dernière carte est celle de 1926. Elle représente le tracé de la correction 50 ans après cet aménagement. Contrairement aux autres cartes, l'échelle de celle-ci est au 1/25 000ème.

Années	Auteur	Nom des cartes	Echelle	Nombre de feuilles	Feuilles utilisées	Couleur
1778	Corps Royal du Génie	Carte topographique du cours du Rhin et de ses environs sur les deux rives	1/14500	Minimum 4	2-3-4	Oui
1828	Baden, Rheingreanz-berichtigungs bureau	Topographische Karte des Rheinstromes und seiner beriderseitiger Ufer von Hüningen bis Lauterburg.	1/20 000	18	6-7	Non
1838	/	/	1/20 000	18	6-7	Oui
1872	/	/	1/20 000	18	6-7	Oui
1926	/	/	1/25 000	Minimum 9	394-395	Noir – Blanc - Bleu

Figure 17 : Tableau des cartes historiques utilisées (Réalisation : Heitz, 2019)

3.1.2 Traitement des cartes

Avant de commencer à travailler sur les cartes choisies, nous avons d'abord dû regarder les données obtenues une par une. En effet, certaines cartes étaient géoréférencées et d'autres non. De plus, les cartes étant scannées, certaines d'entre elles avaient un contour (1828 et 1926 notamment).

Afin d'avoir des cartes propres à la création d'un profil de notre zone d'étude. Nous avons, sur les cartes de 1828 et 1926, réalisé un *clip* avec le logiciel ArcGis 10.6.1. Le but de cette manipulation est d'enlever les contours qui vont nous gêner plus tard. Pour ce faire, sur chaque feuille, nous avons créé un polygone autour de la zone voulue. Nous avons ensuite « clippé » le polygone et la feuille (6 et 7 pour 1828 et 395 et 396 pour 1926) pour obtenir la nouvelle feuille sans les contours. La feuille étant en format tiff, nous avons « clippé » un raster avec un polygone.

Comme dit précédemment, certaines cartes étaient déjà géoréférencées. N'étant pas satisfaits du géoréférencement de certaines cartes, nous avons préféré le refaire nous-même afin de créer des données mieux exploitables.

3.1.3 Le géoréférencement

3.1.3.1 Le géoréférencement des cartes historiques

Le géoréférencement ou recalage géométrique est une étape importante dans le traitement des données, ici des cartes historiques. Cette étape permet le passage d'un jeu de données qui est dans une projection initiale vers la projection du jeu de données de référence (Herrault, 2015).

De ce fait nous avons dû trouver la projection spatiale des données que nous voulions utiliser. Après étude des cartes historiques avec Grzegorz Skupinski, ingénieur d'études à la faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg, nous avons observé que les cartes étaient projetées en Lambert II Etendu. Voulant garder certaines feuilles déjà géoréférencées (pour le travail post-mémoire), nous avons décidé d'utiliser cette projection pour le géoréférencement. Connaissant la projection spatiale, Grzegorz Skupinski nous a fait parvenir un jeu de données de référence en Lambert II Etendu. Ce jeu de données est le scan 25 de l'Alsace. C'est une carte topographique, réalisé par l'IGN, datant de 2012.

3.1.3.2 Les points de contrôle

Pour faire le géoréférencement des cartes historiques, nous avons utilisé le Système d'Information Géographique développé par ESRI : ArcMap 10.6.1. Pour réaliser ce traitement, il faut dans un premier temps repérer, par exemple, des ponts qui apparaissent dans la feuille devant être recalée et dans le jeu de données de référence. Ces objets (éléments anthropiques) sont des points de contrôle remarquables, donc des objets stables dans le temps (Benavides et Koster, 2006). Une fois ces points de contrôle repérés, il faut les faire coïncider entre eux (Heitz, 2018). Pour ce faire, il faut sélectionner le premier point dans la feuille à recaler et le deuxième dans la donnée de référence. Il faut répéter ceci plusieurs fois afin d'obtenir un grand nombre de points de contrôle et avoir le moins d'erreurs possible (voir 3.2.4).

Dans notre cas, nous avons dans un premier temps géoréférencé les feuilles de 1872 sur la carte de l'IGN. En effet, certaines feuilles (7, 8 et 9) étaient déjà bien géoréférencées à l'époque. Pour les feuilles datant de 1828 et 1838, nous avons utilisé les feuilles de 1872 comme données de références. En effet, nous avons préféré utiliser la carte géoréférencée la plus proche d'un point de vue temporel. En revanche, en ce qui concerne la carte de 1926, nous l'avons géoréférencée sur la carte de l'IGN. Nous avons fait cela car il nous manquait la partie au sud de Neuf-Brisach sur la carte de 1872, partie qui est présente sur la carte de 1926. Nous avons donc utilisé des points de contrôle remarquables comme des ponts, des croisements mais surtout des églises. Afin d'éviter les distorsions, nous avons principalement choisi des points proches du fleuve (Lallias-Tacon, 2016).

Les feuilles géoréférencées se trouvent en annexe 2,3,4,5 et 6.

3.1.3.3 La transformation

Une fois les points de contrôles placés, ils permettent de réaliser la transformation de la carte historique pour que la superposition soit la plus exacte entre elle et la carte de référence. Plusieurs méthodes de transformation sont possibles. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser une transformation polynomiale d'ordre 1. En effet, cette transformation permet d'avoir une précision globale de la feuille (Houssier, 2014). Les transformations polynomiales d'ordre supérieur augmentent, elles, une précision locale. Mais ceci déforme la carte.

3.1.3.4 L'erreur quadratique ou Root Mean Square Error (RMSE)

Une erreur quadratique est calculée après chaque transformation. Cela permet d'évaluer la qualité du géoréférencement (Arnaud, 2012). Pour chaque point de contrôle, un résidu « r » est associé. Ce résidu correspond à l'écart en mètres entre l'emplacement de départ sur la carte non-géoréférencée et l'emplacement d'arrivée sur la carte de référence (Winterbottom et Gilvear, 2000). Nous avons essayé d'avoir pour cette étude une RMSE inférieure à 10 mètres quand cela était possible. Arnaud quant à elle avait choisi une RMSE de 18 mètres maximum. Le tableau suivant représente l'erreur quadratique pour les feuilles que nous allons utiliser dans la présente étude. Pour la carte de 1778, l'erreur quadratique atteint 21 mètres pour la 4^{ème} feuille du fait de la distorsion et de l'imprécision (Eschbach, 2018).

Date	Feuille	Nombre de points	Plus basse erreur	Plus haute erreur	RMS
1778	2	5	4,57	11,64	8,9
1778	3	7	3,57	15,27	9,51
1778	4	15	2,22	34,57	21,94
1828	6	15	1,96	7,48	3,81
1828	7	12	1,36	6,31	4,06
1838	6	14	1,17	5,36	3,06
1838	7	14	1,19	5,92	3,8
1872	6	15	1,49	19,09	13,34
1872	7	/	/	/	/
1926	394	12	4,02	15,53	10,32
1926	395	12	3,1	15,92	9,87

Figure 18 : Tableau représentant l'erreur quadratique dans nos géoréférencements (Réalisation : Heitz, 2019)

3.1.4 La digitalisation

Afin de caractériser l'évolution temporelle du Rhin nous avons sur chaque carte géoréférencée, digitalisé les unités hydro-morphologiques que nous allons expliquer dans la partie 3.2. Le but de la digitalisation est de numériser (vectoriser) par-dessus les cartes afin de faire ressortir les unités physiologiques pour mieux les analyser.

Pour réaliser cela, nous avons utilisé le logiciel Qgis 2.18.10 (Las Palmas). Pour chaque année, nous avons créé un projet Qgis mais aussi des fichiers de formes appelés *shapefile*. Ces fichiers nous ont servi à stocker les informations des entités géographiques, ici des polygones, créés. Pour chaque unité physiologique de chaque date, un *shapefile* (en Lambert II étendu) a donc été créé. Une fois ceci effectué, nous avons pu numériser feuille par feuille les unités morphologiques que nous voulions étudier. Ensuite pour chaque feuille, nous avons regroupé les *shapefiles* en un seul en utilisant la fonction « fusionner des couches vecteurs » pour synthétiser les données. Préalablement, nous avons créé dans chaque *shapefile* une colonne « type » pour que nous puissions reconnaître chaque polygone dans le *shapefile* général. En outre, créer cette colonne nous a aidé pour la mise en page des cartes.

Au final nous avons utilisé cette méthode pour numériser les années 1778, 1828, 1872 et 1926.

Voulant être précis, ce travail a duré quasiment 40% voire 50% du temps du stage. Le résultat de ces numérisations est visible dans la partie IV (page 43) analyse des résultats

3.1.5 Les méthodes d'extraction automatique

Voulant tester une autre méthode de numérisation, nous avons décidé d'utiliser le plugin *Historical Map* sur Qgis pour les feuilles de 1838. Ce plugin a été développé par Nicolas Karasiak et Antoine Lomellini qui se sont basés sur le travail de Pierre-Alexis Herrault, maître de conférences en géographie à l'Université de Strasbourg. Le but de ce plugin est de filtrer une image en tif afin d'obtenir automatiquement un *shapefile*.

La première étape est de filtrer la carte que nous voulons numériser. Plusieurs paramètres peuvent être changés comme le filtre médian ou encore le nombre d'itérations. Les images suivantes sont la feuille 6 pour 1838. La première est la feuille de base et la deuxième est la feuille filtrée.



Figure 19 : Carte de 1838 en haut et carte de 1838 filtrée en bas (Réalisation : Heitz, 2019)

Avant la deuxième étape, il faut créer un *shapefile* avec plusieurs polygones d'une unité morphologique, par exemple la végétation. Dans la table attributaire, il faut créer une colonne « class » et mettre le chiffre qui correspond à la végétation (par exemple 1). Nous pouvons faire ceci pour les autres unités physionomiques (chenaux, bancs, etc.). Une fois cela effectué, il faut mettre dans le plugin la carte filtrée et le fichier *shapefile* récemment créé. Le plugin va créer un « model » qui va nous être utile pour la troisième étape.

Lors de la troisième et dernière étape, il faut là encore mettre l'image filtrée mais aussi le « model » que le logiciel vient de créer. Ensuite, il faut choisir quelle classe nous voulons. Par exemple la classe 1 pour avoir la végétation. Il faut donner un nom au fichier *shapefile* de sortie puis lancer la classification. Le plugin va donc créer un fichier *shapefile* de polygones en se basant sur les polygones créés auparavant dans la deuxième étape. En effet, le plugin va utiliser la couleur des pixels des polygones de la deuxième étape comme base pour créer, dans la troisième étape, les polygones. Dans le cas présent, c'est un fichier *shapefile* contenant la végétation qui a été créé. Il faut donc répéter cette troisième étape, en changeant les classes, pour obtenir tous les fichiers *shapefile* des unités physionomiques voulues.

3.1.6 Photo aérienne

Pour répondre au dernier objectif de notre d'étude, nous allons utiliser une orthophotographie de 2015 de l'IGN. Afin d'éviter d'utiliser un fichier avec toute l'Alsace, Grzegorz Skupinski a découpé notre zone d'étude. Il a aussi changé la projection de base du fichier de l'IGN pour que ne nous puissions l'utiliser dans notre système de projection qui est le Lambert II étendu.

3.2. Les unités hydro-morphologiques

Dans sa thèse, Fanny Arnaud avait défini huit unités hydro-morphologiques et anthropiques : chenaux en eau, bancs, chenaux à sec, zones aquatiques déconnectées, végétation ligneuse, prairies (cultures), bâti et les digues.

Pour la présente étude, nous avons décidé d'étudier uniquement les chenaux en eau, les bancs, les chenaux à sec et la végétation ligneuse donc les unités hydro-morphologiques.

3.2.1 Les unités hydro-morphologiques : bancs, chenaux à sec et végétation

Les bancs et les chenaux à sec (et les bras-mort) sont des unités hydro-morphologiques que nous avons décidé de digitaliser. Les bancs peuvent être de sable ou de gravier. Cette unité hydro-morphologique se localise principalement au sein des chenaux comme des tresses par exemple ou en bordure de ces dernières. Les chenaux à sec sont d'anciens chenaux qui se sont déconnectés du talweg et qui étaient vraisemblablement asséchés certains mois de l'année.

Pour cette étude nous avons décidé de nous intéresser uniquement à la végétalisation ligneuse. En effet, les zones forestières sont très facilement repérables sur les cartes anciennes.

3.2.2 Les chenaux en eau

Comme expliqué dans la partie I, Fanny Arnaud avait distingué cinq types de chenaux en eau d'après une typologie établie par Christophe Kleinas mais aussi Laurent Schmitt. Ces types étaient : les tresses, les défluent proches connectés par l'amont, les défluent proches déconnectés par l'amont, les anastomoses connectées par l'amont et les anastomoses déconnectées par l'amont (Figure 17 suivante). En raison d'un manque de temps, nous avons décidé de ne pas séparer les défluent et les anastomoses pour la digitalisation (voir 3.1.4).

Les tresses sont connectées au chenal principal par l'amont et l'aval avec une distance au talweg inférieur à 500 mètres. La sinuosité est faible, leur longueur et leur largeur sont variables. En ce qui concerne l'occupation du sol des milieux environnant les tresses, ce sont les bancs de sable ou de gravier qui sont dominant. La végétation occupe ici moins de 50% des berges. Cet environnement montre une instabilité latérale des tresses

(Kleinas,2003).

Les anastomoses (Giessen, Brunnenwasser ou Altwasser, Schmitt 1995) se localisent généralement à plus d'un kilomètre du talweg. La sinuosité de ce type de chenal est élevée (jusqu'à 1.5). Contrairement aux autres chenaux, les anastomoses sont généralement longues. Etant loin du talweg, les berges des anastomoses sont occupées à 100% par de la végétation ou par des zones agricoles.

Les défluent sont des types de chenaux intermédiaires entre les tresses et les anastomoses. Ces types de chenaux sont des anabranche selon la classification de Gerald Nanson et David Knighton en 1996. Les défluent ont une distance au chenal entre 0.5 et 1 kilomètre. Il peut s'agir d'anciens chenaux de tressage. Là encore la sinuosité de ces chenaux est faible. Ces chenaux relativement étroits et courts, présentent des bancs vifs mais aussi des zones forestières (plus de 50%) le long de leurs berges.

Types de chenaux	Tresses	Défluent proches connectés par l'amont	Défluent 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 20 : Tableau des critères de discrimination des types de chenaux

(Source : Kleinas, 2003 ; modifié par Arnaud, 2012)

Partie IV - Résultats et interprétations

Dans cette quatrième et dernière grande partie, nous allons d'abord présenter les cartes digitalisées. Ensuite nous allons voir l'évolution du tracé en plan du tronçon d'étude puis dans un troisième temps nous allons essayer d'identifier les zones de contraction des chenaux qui sont potentiellement des zones de dépôts privilégiés de sédiments fin pollués.

4.1. Présentation des cartes digitalisées

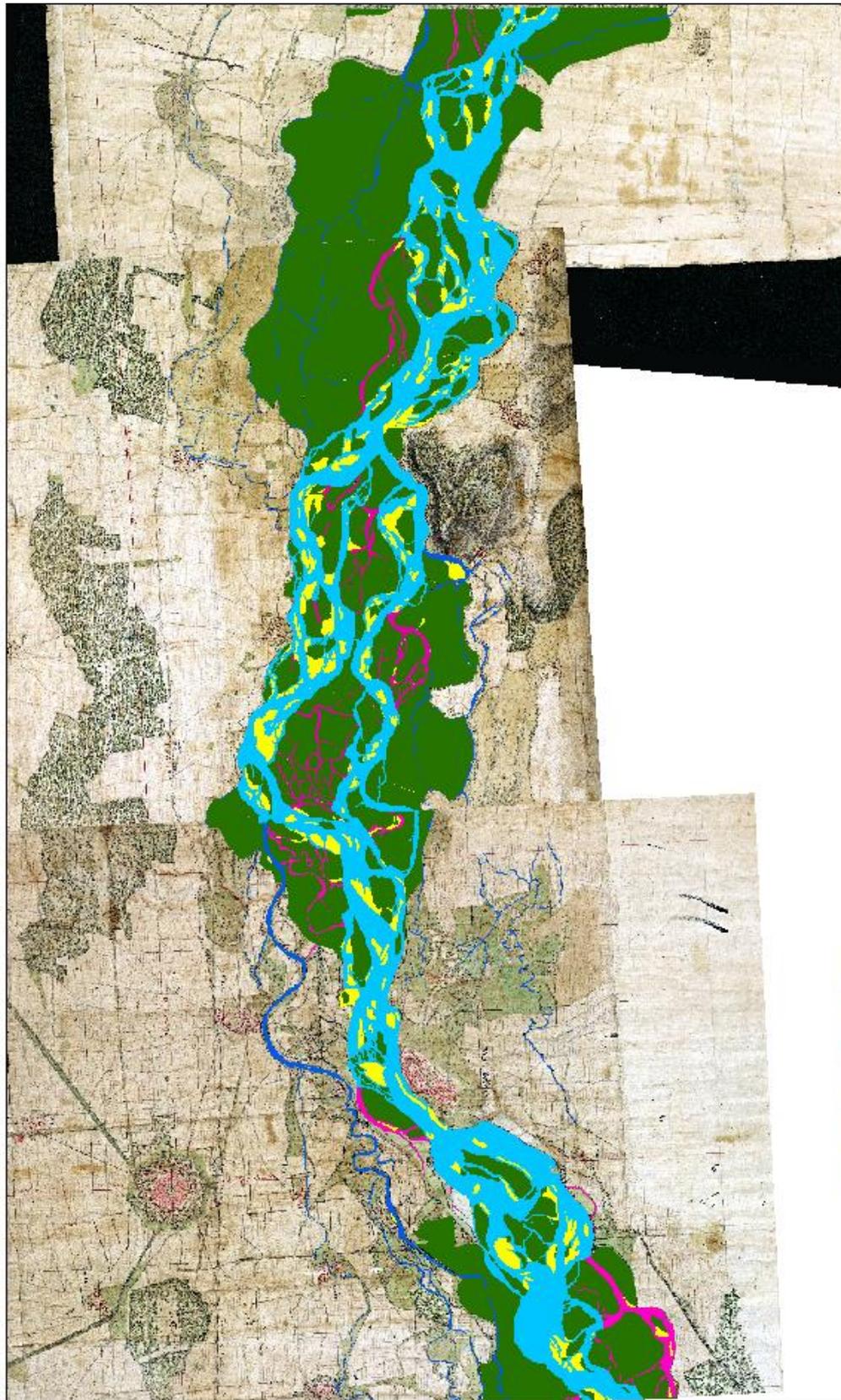
Les résultats de la digitalisation que nous avons effectuée en utilisant les cartes anciennes géoréférencées se trouvent dans cette première sous-partie. Comme expliqué auparavant, nous avons choisis cinq dates : 1778, 1828, 1838, 1872 et 1926.

Les trois premières cartes vont représenter les unités hydro-morphologiques de notre zone d'étude avant les aménagements de correction et les deux dernières vont montrer l'impact de ces aménagements sur les habitats et donc l'hydrosystème fluvial.

Comme expliqué précédemment, nous avons utilisé la typologie établie par Kleinas puis modifiée par Schmitt et Arnaud. Utiliser cette typologie va nous permettre d'évaluer l'évolution temporelle de notre zone d'étude mais aussi les impacts des aménagements.

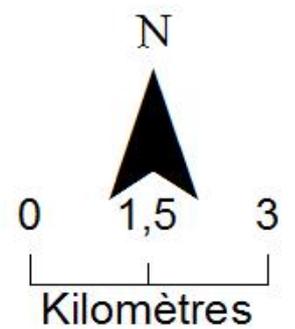
Nous avons essayé de digitaliser le plus précisément possible, cependant des erreurs de notre part sont possibles. La précision des cartes n'étant pas identique, nous avons peut-être confondu certains chenaux.

Les cartes uniquement géoréférencées (sans la digitalisation) se trouvent en annexe.



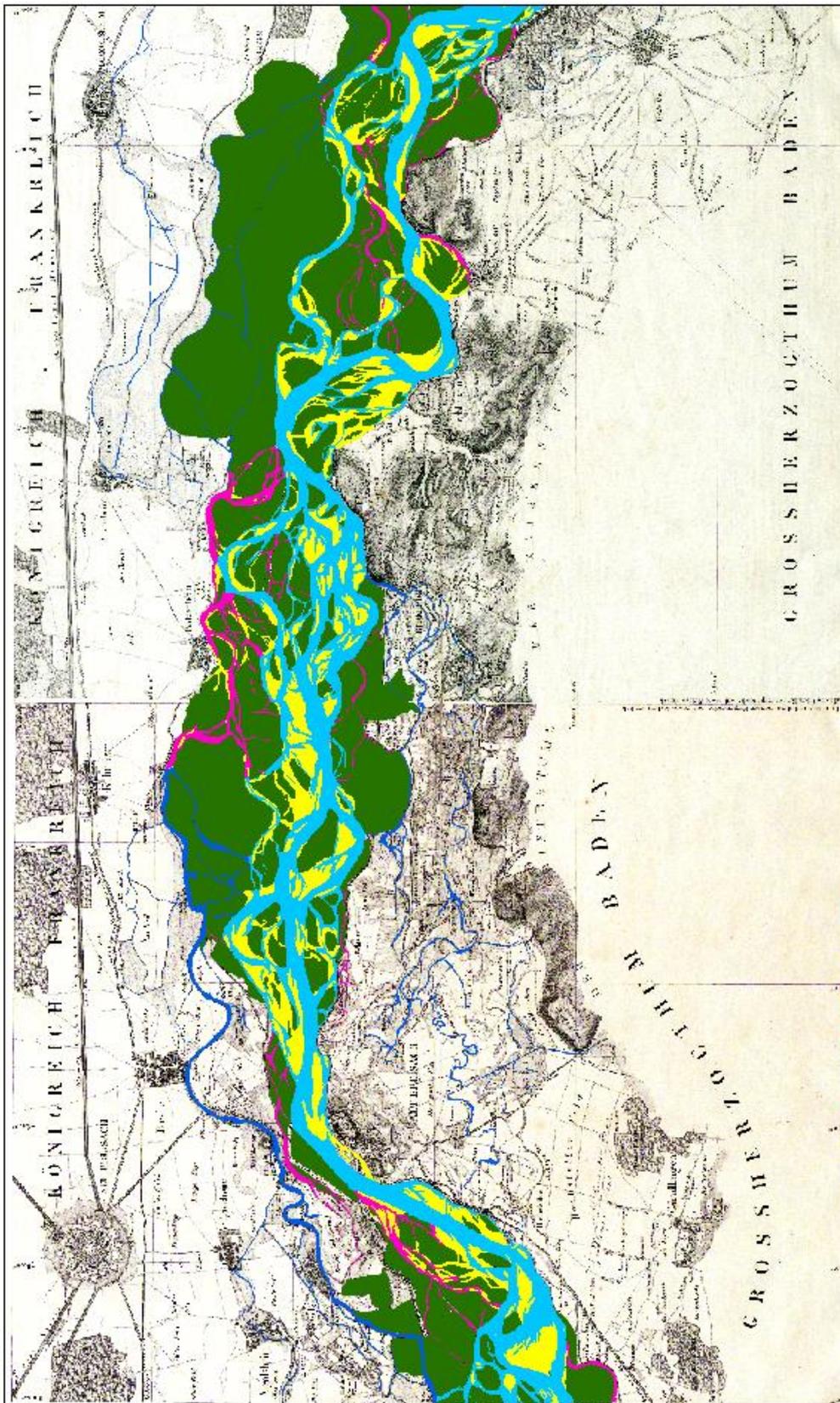
Légende

- Tresses
- Anastomoses
- Défluent
- Bancs
- Végétation



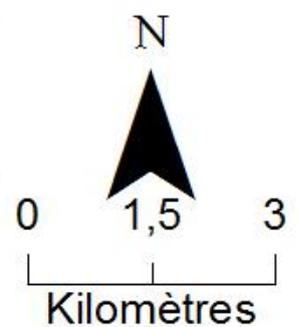
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1
 Source: Région Alsace

Figure 21 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1778 (Réalisation : Heitz, 2019)



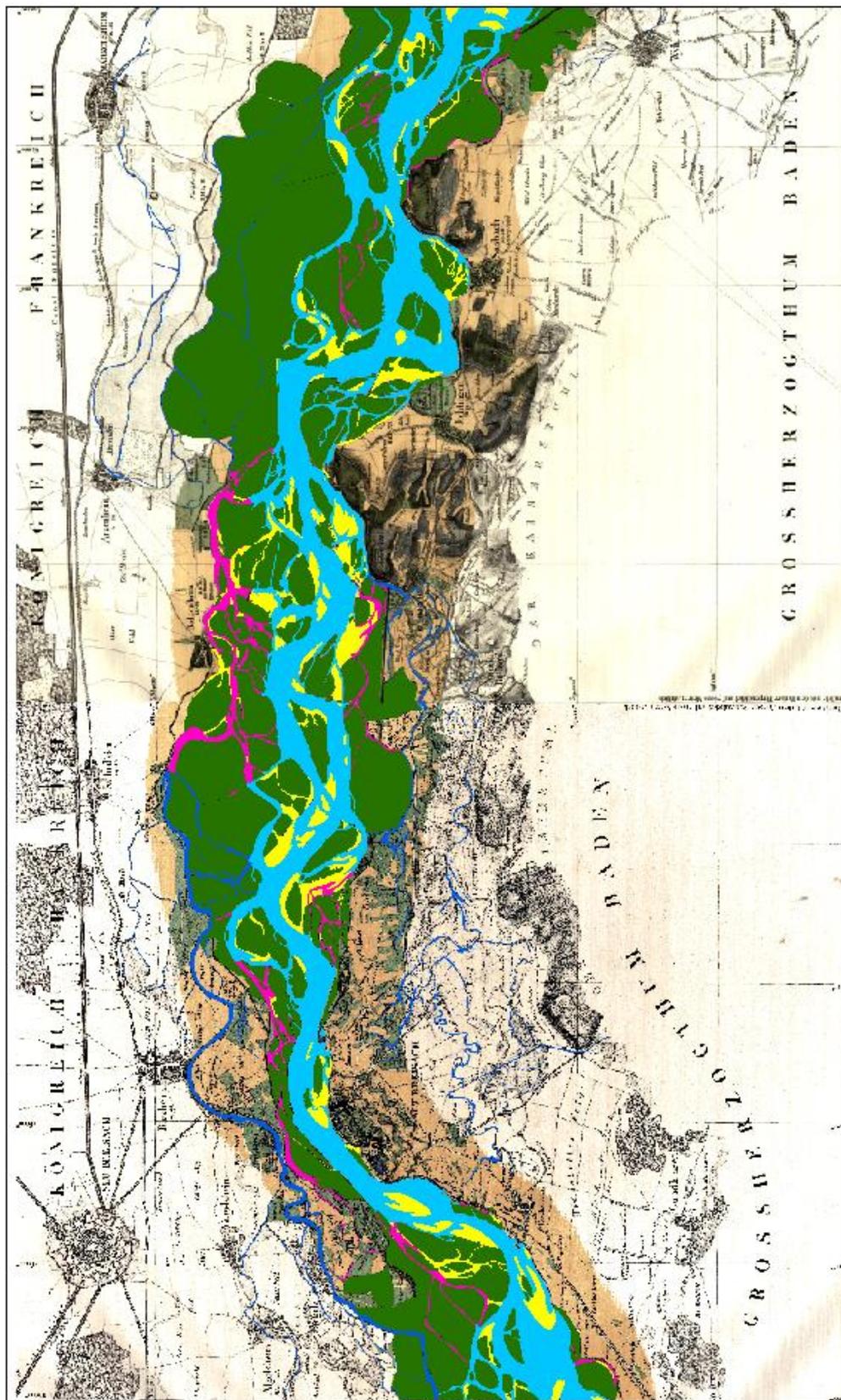
Légende

- Tresses
- Anastomoses
- Défluent
- Bancs
- Végétation



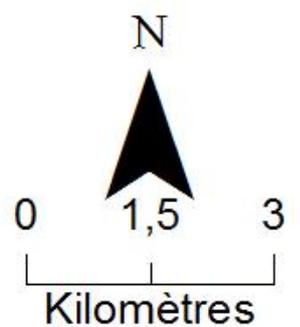
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1
 Source: BNU Strasbourg

Figure 22 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1828 (Réalisation : Heitz, 2019)



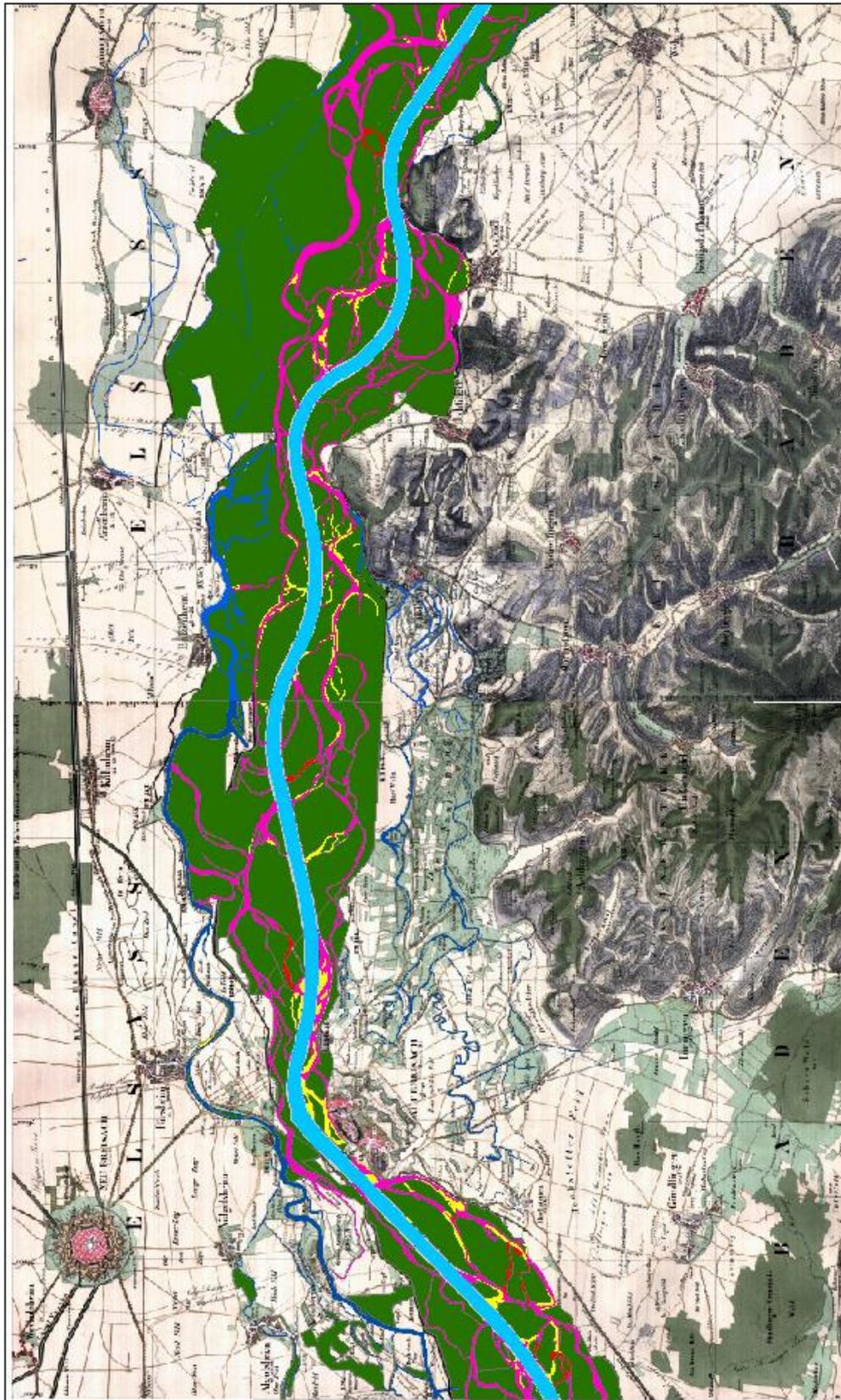
Légende

- Tresses
- Anastomoses
- Défluent
- Bancs
- Végétation



Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1
 Source: Petite Camargue Alsacienne

Figure 23 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1838 (Réalisation : Heitz, 2019)



Légende

- Rhin corrigé
- Anastomoses
- Défluent
- Chenaux à sec
- Bancs
- Végétation
- Berge du Rhin

N



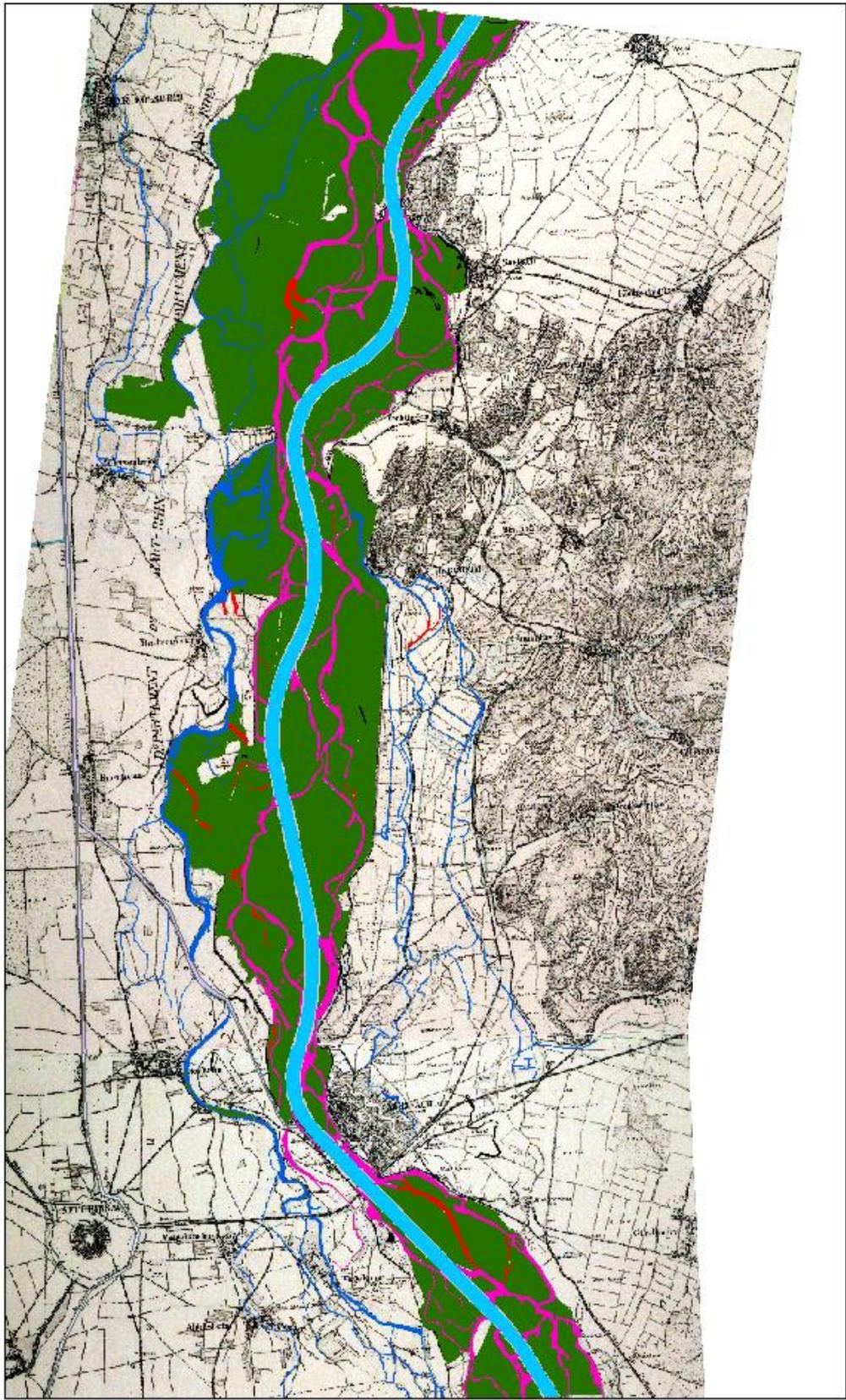
0 1,5 3



Kilomètres

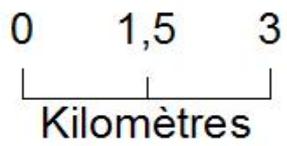
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1
 Source: Petite Camargue Alsacienne

Figure 24 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1872 (Réalisation : Heitz, 2019)



Légende

- Rhin corrigé
- Anastomoses
- Défluent
- Chenaux à sec
- Bras morts
- Végétation
- Berge du Rhin



Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1
 Source: Archive Départementale 68

Figure 25 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1926 (Réalisation : Heitz, 2019)

4.2. Evolution du tronçon du Rhin étudié

Nous allons dans cette sous-partie discuter des résultats que nous avons obtenus après avoir digitalisé les unités hydro-morphologiques sur les cinq cartes que nous étudions. Dans la première sous-partie, nous allons discuter de l'évolution géomorphologique du fleuve de notre zone d'étude. Dans la seconde sous-partie, nous allons quantifier les résultats afin de les interpréter dans une troisième sous-partie.

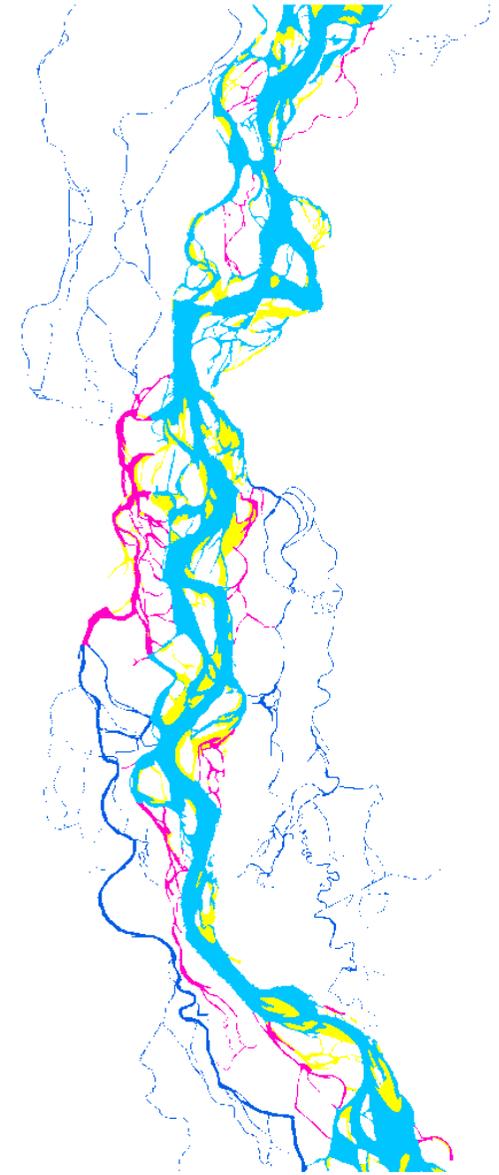
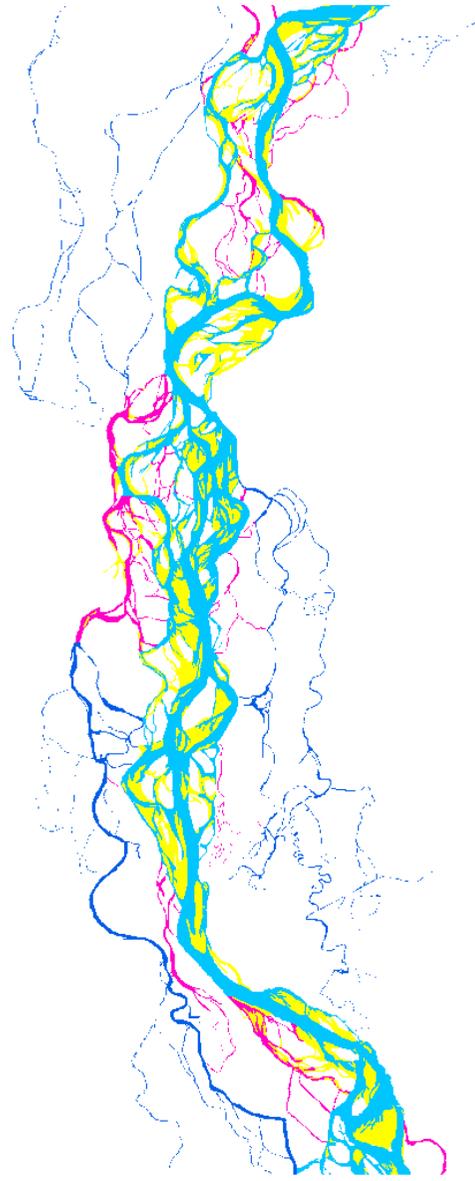
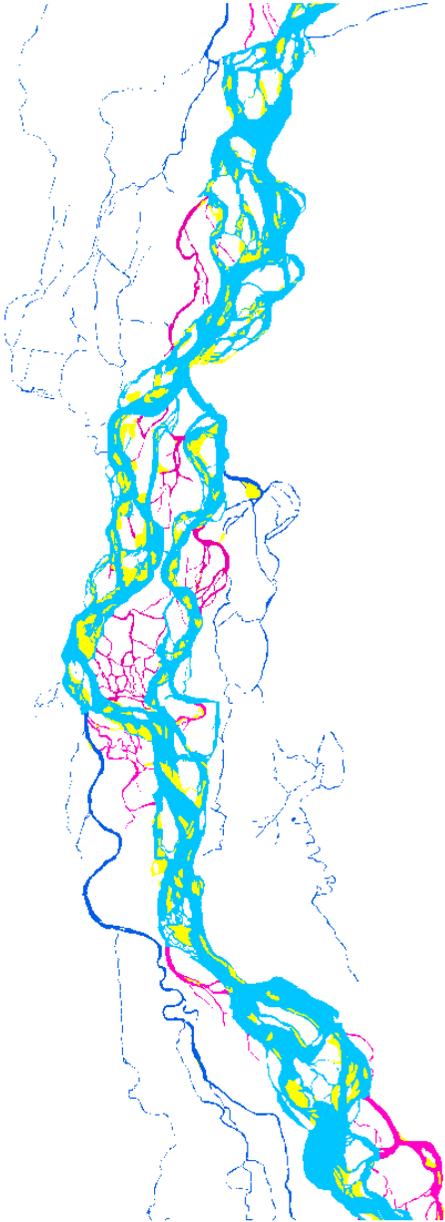
4.2.1 Evolution géomorphologique de la zone d'étude

Les figures 26 et 27 suivantes nous permettent d'observer l'évolution de la géomorphologie fluviale de la zone d'étude. En 1778, les tresses sont assez larges (plus de 200 mètres en moyenne) et se divisent localement légèrement en deux bandes de tressage. Cela montre une charge de fond très important mais surtout une dynamique forte. Cette dernière s'observe en 1828 où la bande de tressage s'individualise tout en se déplaçant vers l'est. Avec un transect perpendiculaire au fleuve nous pouvons compter jusqu'à une dizaine de chenaux, tous types confondus. En 1838, une simplification de la bande active est visible. En effet, il y a moins de chenaux de tressages que 10 ans auparavant. En 1872 et 1926, la géomorphologie fluviale de la zone d'étude semble se figer brutalement du fait des aménagements pour corriger le Rhin.

1778

1828

1838



1872

1926

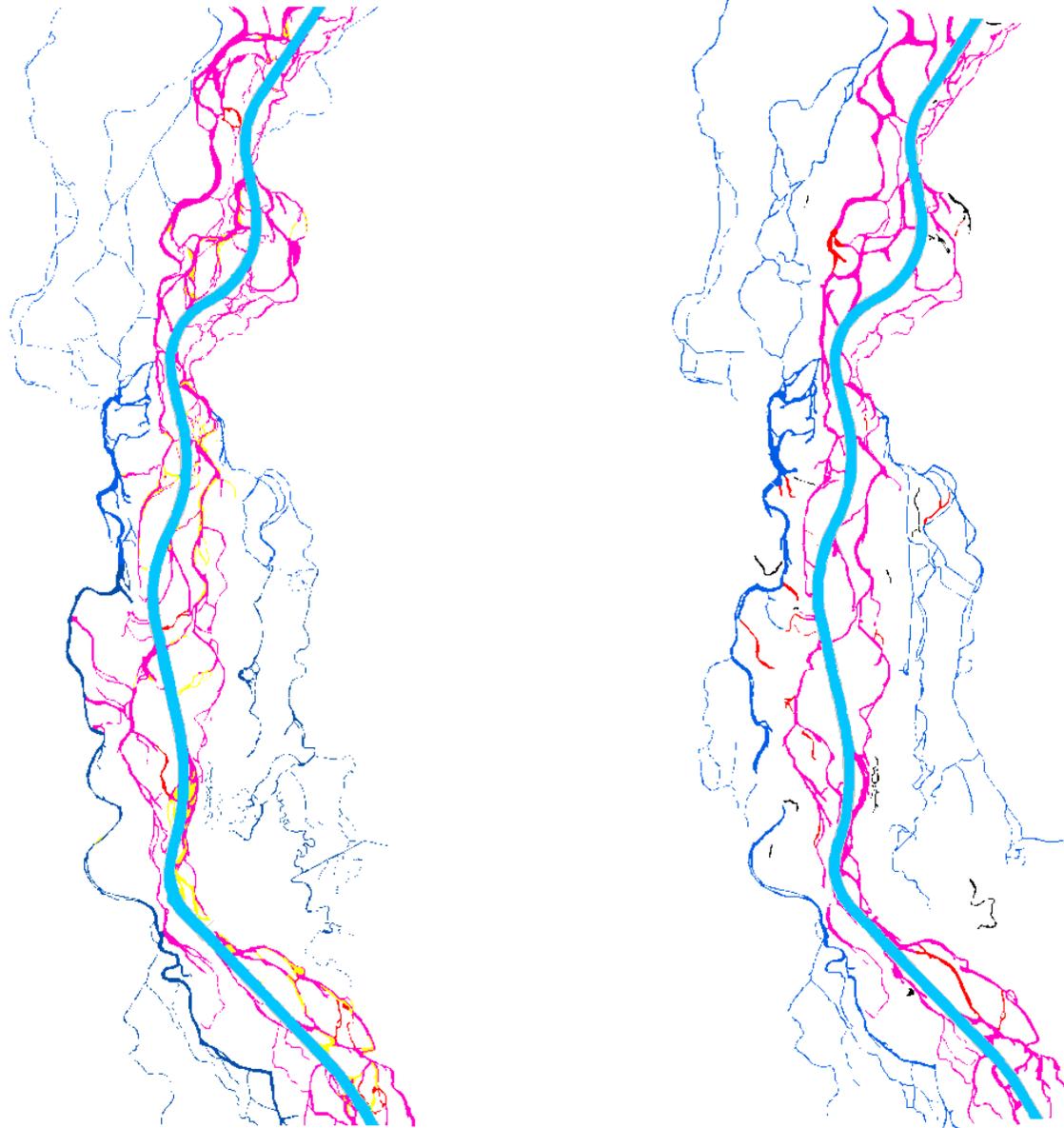


Figure 27 : Evolution des chenaux en eaux entre 1872 et 1926 (Réalisation : Heitz, 2019)

4.2.2 Evolution des unités hydro-morphologiques

Avec la digitalisation des unités hydro-morphologiques, nous avons pu quantifier leurs surfaces par période. Le tableau et le graphique suivants représentent les données obtenues. Les diagrammes des unités morphologiques pour chaque année sont eux en annexe 7.

	1778	1828	1838	1872	1926
Tresses	1521	1117	1365	0	0
Anastomoses	185	205	205	256	298
Défluent	173	201	189	484	446
Bancs	316	612	439	91	0
Végétation	3190	2828	2955	3500	3269
Rhin corrigé	0	0	0	427	422
Chenaux à sec	0	0	0	18	43
Bras mort	0	0	0	0	24
Berge Rhin corrigé	0	0	0	71	78
Surface totale digitalisée (ha)	5384	4963	5153	4846	4580

*Figure 28 : Tableau des surfaces des unités hydro-morphologiques par années (En bleu ce sont les unités morphologiques, en orange les années avant les aménagements et en vert ce sont les années post-correction)
(Réalisation : Heitz, 2019)*

- Carte de 1778 : en 1778, nous pouvons observer que la végétation représente 59% (soit 3190 ha) de l'hydrosystème que nous avons digitalisé (c'est le cas pour chaque date), les tresses, elles, représentent 28% (1521 ha). Il y a très peu d'anastomoses (185 ha) et de défluent (173 ha). C'est aussi le cas pour les bancs (316 ha).
- Carte de 1828 : pour 1828, la végétation représente 57% soit donc 2828 hectares, les tresses 23% (1117 ha), les anastomoses et défluent 4% (205 et 201 ha) chacun et les bancs 12% (612 ha).
- Carte de 1838 : ici, la végétation représente 2955 ha soit 57%, les tresses 1364 ha, les anastomoses 205 ha, les défluent 189 ha et les bancs 439 ha.

- Carte de 1872 : la végétation représente 3500 ha (72%), le Rhin corrigé 427 ha, les défluent 484 ha, les anastomoses 256 ha, les bancs 91 ha, les berges du Rhin corrigé 2% et les chenaux à sec moins de 1%
- Carte de 1926 : la végétation représente 3269 ha, les anastomoses 298 ha, les défluent 446 ha, le Rhin corrigé 422 ha, les chenaux à sec 43ha, les bras morts 24 ha et les berges du Rhin corrigé 78 ha.

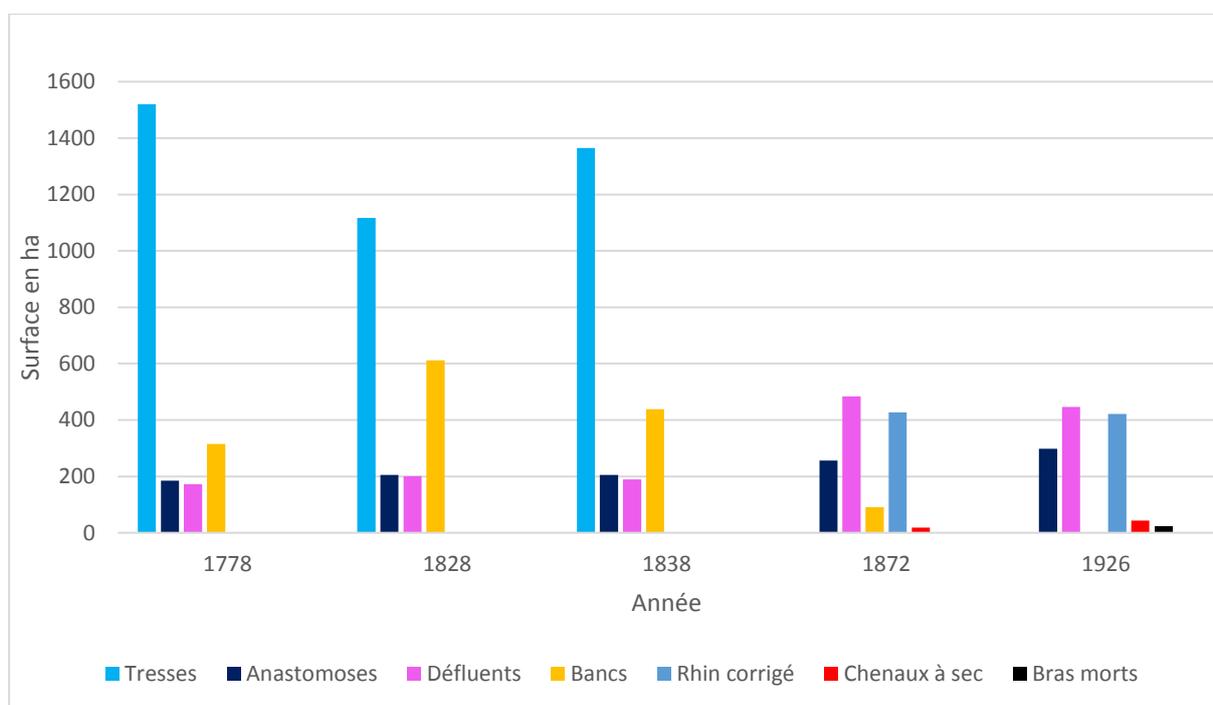


Figure 29 : Graphique représentant la surface en hectares par année des unités morphologiques (Réalisation : Heitz, 2019)

Avec ce graphique, nous pouvons observer l'évolution des surfaces des unités hydro-morphologiques du tableau précédent. Les tresses diminuent dans un premier temps puis re-augmentent avant de disparaître totalement avec les travaux de correction du Rhin. Les anastomoses augmentent au fil du temps, notamment après la correction : cet aménagement va entraîner la disparition des tresses et donc l'apparition d'anastomoses. Les défluent n'évoluent pas vraiment avant les premiers travaux mais dès lors que ces derniers ont été effectués, la surface des défluent est doublée (de 189 ha en 1838 à 484 ha en 1872). Les bancs augmentent dans un premier temps puis diminuent jusqu'à disparaître. Les chenaux à sec et les bras morts n'apparaissent qu'après les travaux de correction. Cependant sur notre zone d'étude, nous n'en avons pas vraiment observé.

Cela n'est pas indiqué sur ce graphique mais la végétation diminue entre 1778 et 1828 avant d'augmenter jusqu'en 1872 ; ensuite elle diminue à nouveau. Ceci est probablement dû à l'anthropisation des rives du fleuve au XX^e siècle.

La figure 30 suivante représente le taux annuel moyen d'évolution des unités hydro-morphologiques entre nos dates d'étude : 1778 - 1828 / 1828 - 1838 / 1838 - 1872 / 1872 - 1926. Le taux d'évolution en moyenne est ici représenté en hectares par an.

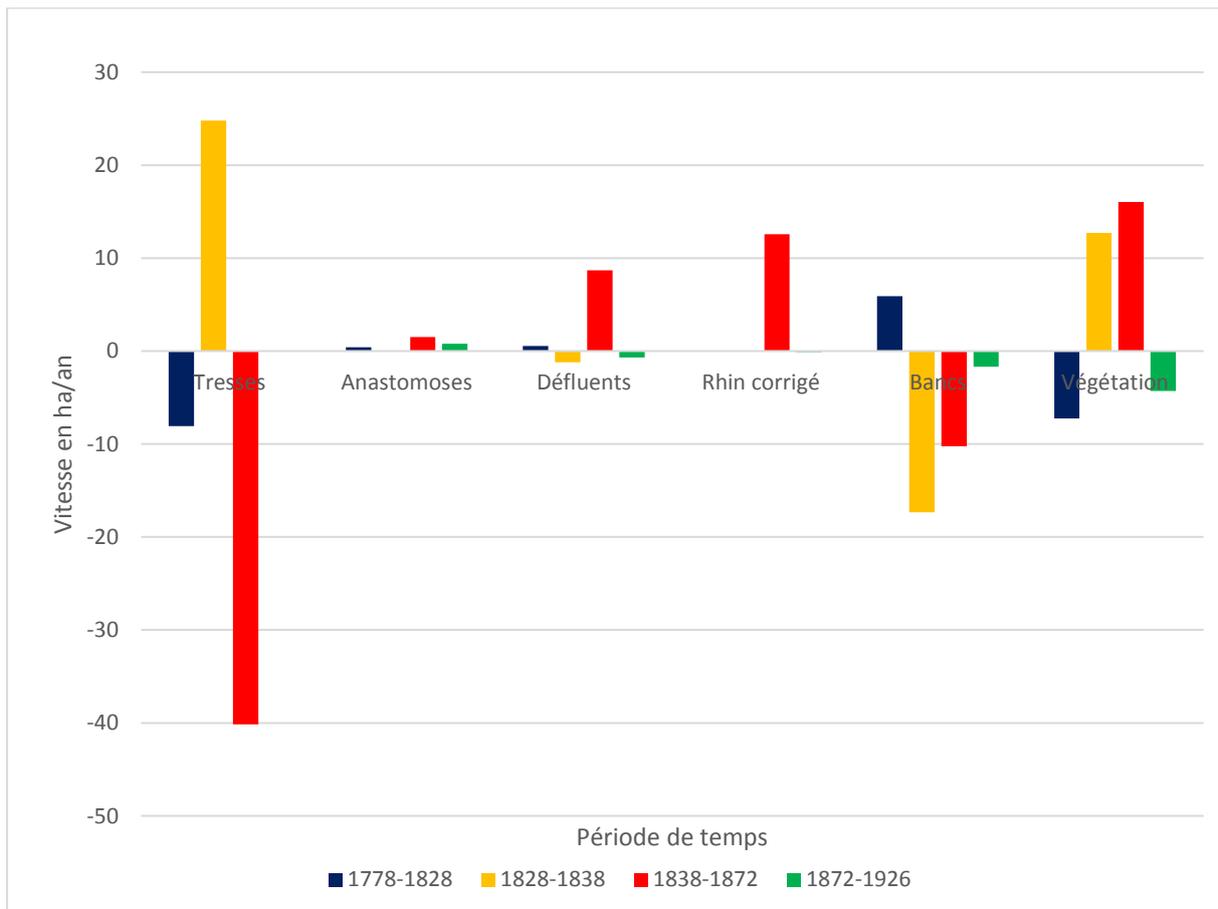


Figure 30 : Taux d'évolution annuels moyen des unités hydro-morphologiques (Réalisation : Heitz, 2019)

Entre 1778 et 1828, les tresses diminuent de 8 hectares par an. Les anastomoses et les défluent augmentent très légèrement (0,4 et 0,56 ha en moyenne). Les bords, eux, augmentent de près de 6 hectares par an et la végétation diminue de 7,2 hectares par an. De 1828 à 1838, les tresses augmentent de 24,8 ha par an en 10 ans, les anastomoses n'évoluent pas, les défluent diminuent de 1,2 ha en moyenne, les bords diminuent de 17,34 ha. La végétation augmente à nouveau de 12,69 ha par an durant cette période. C'est entre 1838 et 1872, que nous observons la plus grande évolution en terme de

surfaces par an (visible sur les figures 23 et 24). Les tresses diminuent fortement de 40 ha par an (ceci sur trente-quatre ans) jusqu'à disparaître totalement. Les anastomoses augmentent de 1,5 ha, les défluent de 8,6 ha, les bancs diminuent dans le même temps de 10,24 ha par an. Ceci profite à la végétation qui augmente de 16,04 ha par an. Enfin de 1872 à 1926, les anastomoses augmentent très légèrement de 1,5 ha par an, les défluent diminuent de 0.7 ha par an, les bancs de 1,68 ha par an jusqu'à disparaître et la végétation de 4,28 ha par an.

4.2.3 Discussion

De Neuf-Brisach à Marckolsheim nous pouvons observer une évolution du Rhin pré et post-correction.

En 1778 (figure 21), le tracé du Rhin dans notre zone d'étude passe d'une direction sud-est nord-ouest à sud nord. Comme expliqué dans la première sous-partie, la bande de tressage se dédouble en aval de Vieux-Brisach. C'est ici, entre les deux bandes, que nous trouvons notamment le plus de défluent, principalement connectés par l'amont. Les bandes de tressages se rejoignent plusieurs kilomètres en amont de Marckolsheim afin de reformer une seule bande de tressage (en aval de Marckolsheim cette bande de tressage est toujours visible - voir le mémoire de Boisson Sébastien, 2019). Nous pouvons aussi observer qu'en 1778 il y a de nombreux bancs mais leurs tailles restent moyennes (surface de 316 ha au total). Des anastomoses sont présentes de part et d'autre du fleuve, notamment sur la rive gauche. La végétation est ici très présente, comme au nord de notre zone d'étude.

La figure 22 présente le Rhin cinquante ans plus tard, soit en 1828. Comme nous l'avons observé précédemment, durant cette période de temps, la surface des tresses diminue, tout comme leurs largeurs. Les défluent et les anastomoses augmentent de leurs coté ce qui peut indiquer qu'il y a eu un glissement typologique. Des tresses sont donc devenues, au cours du temps, des anastomoses ou des défluent. Cela s'est déroulé en même temps que le déplacement de la bande active vers l'est. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les anastomoses et les défluent sont apparus par avulsion. Les calculs d'évolution nous indiquent que des bancs sont apparus durant ce laps de temps. Ceci est peut-être dû à l'interprétation cartographique de 1828. En effet, nous pouvons faire l'hypothèse que, du fait du bas niveau de l'eau, des bancs pourraient ne plus être immergés et donc auraient été cartographiés.

Entre 1828 et 1838, nous pouvons observer une augmentation de la surface des tresses et une diminution forte du nombre de bancs. Là encore le niveau d'eau lors du levé de la carte peut jouer un rôle quant à nos résultats. En effet, nous observons moins de tresses alors que la surface totale en hectares augmente. Avec la figure 23 on arrive à distinguer les prémices du tracé du futur Rhin corrigé, du fait d'aménagements préparant sa correction mis en place localement. Avec cette carte et les graphiques précédents, nous pouvons voir l'évolution du Rhin en dix ans et comment il se présentait juste avant les importants travaux de correction.

La figure 24 présente le Rhin en 1872. Comme nous pouvons le voir les travaux de correction ont eu lieu. L'hydrosystème de notre zone d'étude a totalement changé en 34 ans. C'est durant cette période qu'on observe les plus fortes diminutions. Les tresses ont totalement disparu (une diminution d'environ 40ha par an en moyenne) laissant place à de nombreux défluent de part en part du Rhin corrigé. Ceci est logique. En effet les défluent sont d'anciennes tresses. Les tresses disparaissant pour laisser place au Rhin corrigé, des défluent apparaissent. Certains de ces défluent sont, à cette époque, encore connectés au Rhin corrigé. Il ne reste quasiment plus de bancs. La végétation ligneuse a pris du terrain et augmenté sa surface. Les anastomoses, elles, ont continué d'augmenter. En effet des anastomoses sont apparues, c'est notamment le cas au milieu de notre zone d'étude sur la rive gauche du fleuve. A cette date, une nouvelle unité morphologique apparaît, ce sont les chenaux à sec. Quelques chenaux étaient donc potentiellement à sec lors du levé de cette carte en 1872.

Enfin cinquante-quatre ans plus tard, en 1926, nous pouvons observer sur la figure 25 une diminution totale des bancs qui étaient localisés le long de certains défluent en 1872. En ce qui concerne ces derniers, nous observons une diminution de leurs nombres mais aussi une rétraction de certains de ces chenaux au nord de notre zone d'étude. Ceci va nous être utile pour la sous-partie suivante. Des bras morts apparaissent et les chenaux à sec augmentent durant cette période de temps. Tout ceci montre une évolution des habitats post-aménagements.

En ce qui concerne la bande active (les tresses et les bancs), nous avons plusieurs choses à dire. En effet la figure 30 nous montre qu'entre 1778 et 1828 les tresses diminuent et les bancs augmentent, qu'entre 1828 et 1838 c'est l'inverse (mais avec des

vitesses plus élevées de chaque côté) et qu'entre 1838 et 1872 les deux unités hydro-morphologiques diminues fortement, notamment les tresses. Avec ceci nous aurions tendance à dire que la bande active varie fortement. Cependant en quantifiant les données de la figure 29, nous observons qu'en 1778 elle est de 1838 ha, en 1828 elle est de 1729 ha et en 1838 elle est de 1804 ha. De ce fait, pré-corrrection, la bande active reste relativement stable dans le temps. Ce n'est qu'en 1872 que nous observons une bande active quasi nulle, du fait de la diminution totale des tresses entre 1838 et 1872 avec les aménagements de Tulla.

L'impact de l'Homme avec la correction du Rhin a donc modifié radicalement les habitats. Avant les aménagements du XIX^e siècle, il y avait de nombreux chenaux avec une ripisylve bien fournie. Cette dernière étant très importante pour l'écosystème, les aménagements pour la correction ont réduit le nombre de chenaux donc de berges pouvant abriter potentiellement des espèces. De 1838 à 1872, la réponse de l'hydrosystème aux aménagements a été très violente. Ceci a donc dû nuire à de nombreuses espèces animales comme végétales présentes entre 1778 et 1838 (exemple du saumon du Rhin).

4.3. Identification des zones de contraction des chenaux par dépôt de sédiments fins

Dans cette troisième sous-partie de la partie IV, nous allons dans un premier temps présenter les cartes réalisées montrant la contraction, totale ou partielle, des chenaux en eau entre 1828 et 1926 ; dans un second temps nous allons présenter ces résultats ; puis dans un troisième et dernier temps nous allons présenter les zones de contraction des chenaux par dépôts de sédiments fins potentiellement pollués que nous avons repérées sur notre zone d'étude.

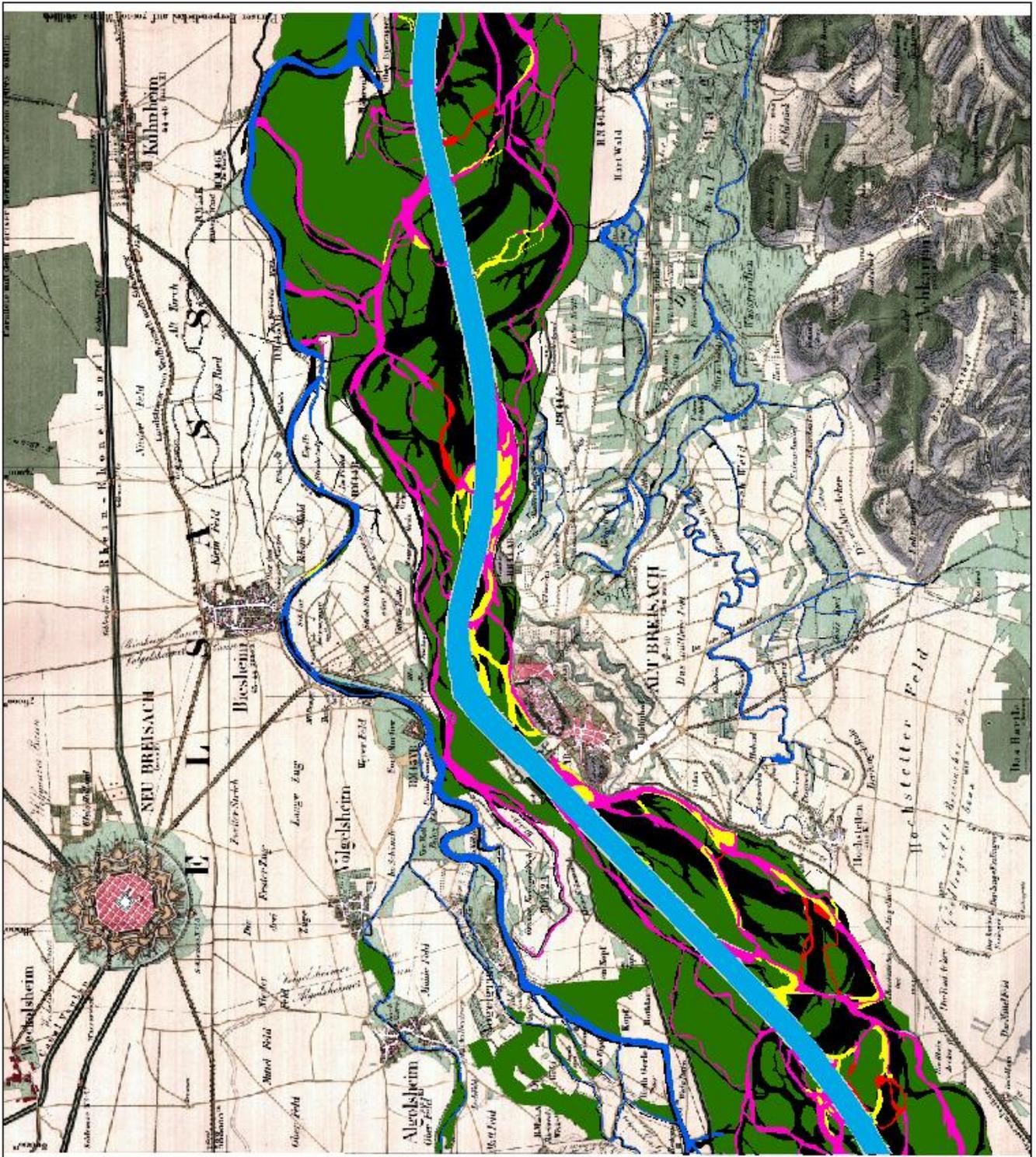
La contraction en largeur des chenaux apparaît lorsque les débits de ces derniers diminuent du fait, principalement, de la correction ; les sédiments fins se déposent pendant les inondations et peuvent devenir des hotspots de pollutions si des polluants sont potentiellement stockés liés aux sédiments.

4.3.1 Présentation des cartes représentant la contraction des chenaux

Dans cette première sous-partie nous allons discuter de la contraction des chenaux entre 1828 et 1872 puis de 1872 à 1926. Nous avons choisi d'utiliser la période 1828-1872 pour bien voir l'impact de la correction sur les chenaux en eau (tresses, anastomoses, défluent) puis la période 1872-1926 pour voir l'évolution post-correction et pré-canalisation. Nous pouvons rajouter que cette dernière période va nous être utile pour la partie 4.3.3 et le repérage des zones de contraction par dépôts de sédiments fins potentiellement pollués par l'industrialisation naissante à l'amont de Neuf-Brisach.

Afin de mieux visualiser les résultats cartographiques, nous avons divisé notre zone d'étude en deux : de Neuf-Brisach à Kunheim puis de Baltzenheim à Marckolsheim.

Sur chaque carte, les unités hydro-morphologiques en couleur représentent l'année la plus récente donc 1872 sur les figures 31 et 32 et 1926 sur les figures 33 et 34. Les chenaux contractés sont ici représentés en noir et correspondent aux chenaux en eau de l'année la plus ancienne soit 1828 (fig. 31 et 32) et 1872 (fig. 33 et 34).



0 0,75 1,5
Kilomètres



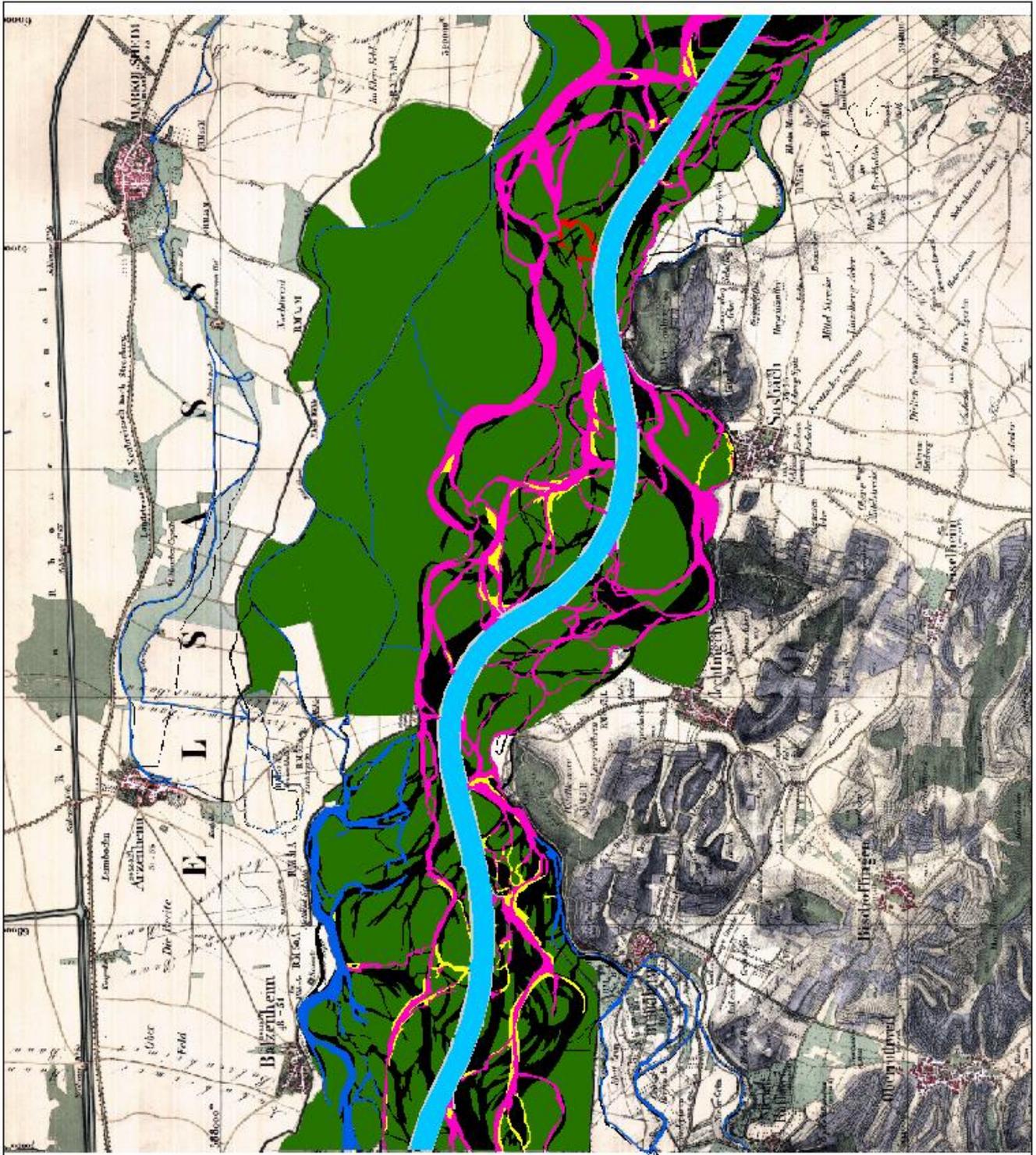
Légende

- | | | | |
|---|--------------------|---|---------------|
|  | Chenaux contractés |  | Chenaux à sec |
|  | Rhin corrigé |  | Bancs |
|  | Anastomoses |  | Végétation |
|  | Défluent |  | Berge du Rhin |

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1

Figure 31 : Carte représentant les chenaux en eaux contractés entre 1828 et 1872 à l'aval de Neuf-Brisach (Réalisation : Heitz, 2019)



0 0,75 1,5
Kilomètres



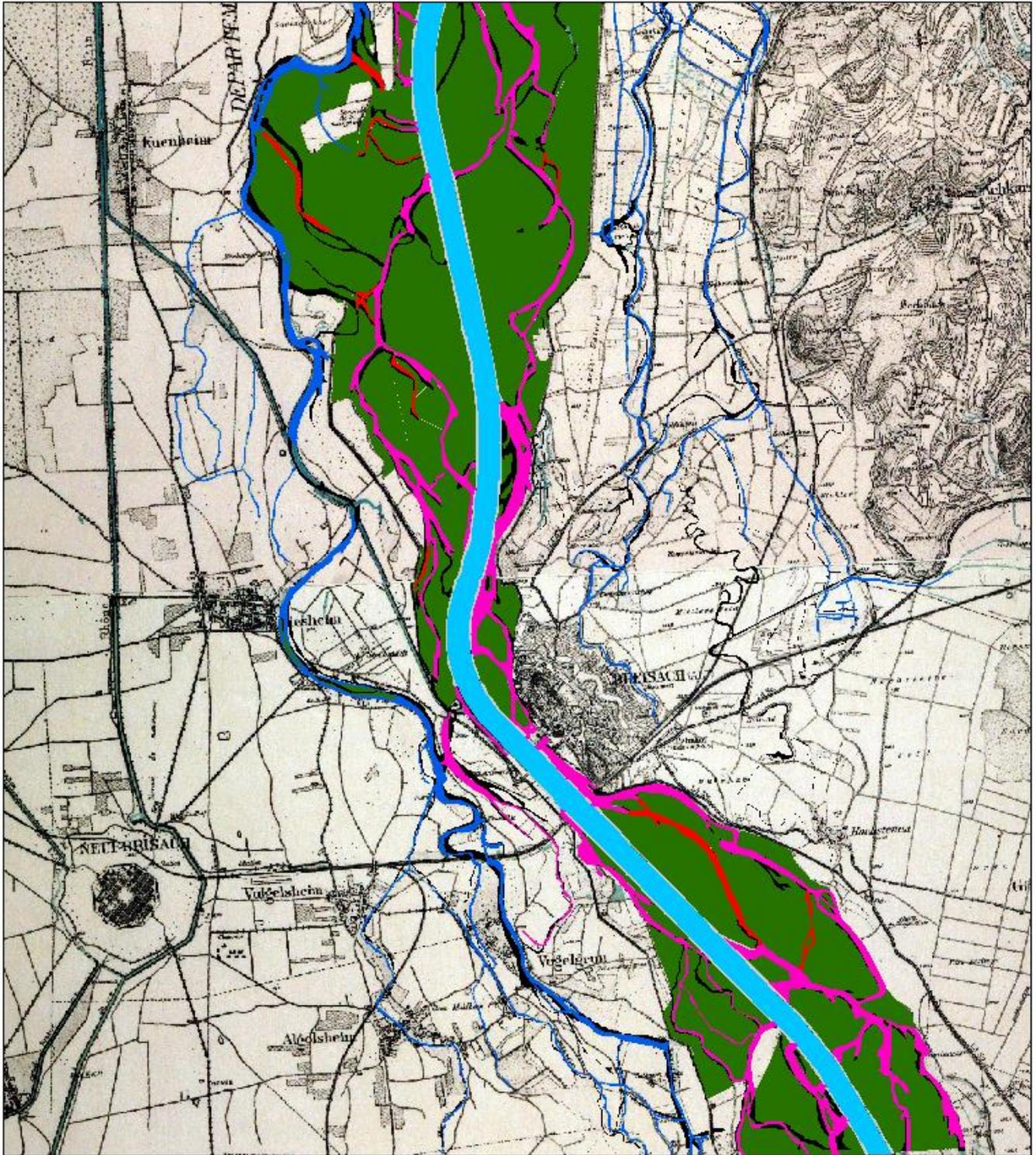
Légende

- | | | | |
|---|--------------------|---|---------------|
|  | Chenaux contractés |  | Chenaux à sec |
|  | Rhin corrigé |  | Bancs |
|  | Anastomoses |  | Végétation |
|  | Défluent |  | Berge du Rhin |

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1

Figure 32 : Carte représentant les chenaux en eaux contractés entre 1828 et 1872 à l'amont de Marckolsheim (Réalisation : Heitz, 2019)



0 0,75 1,5
Kilomètres



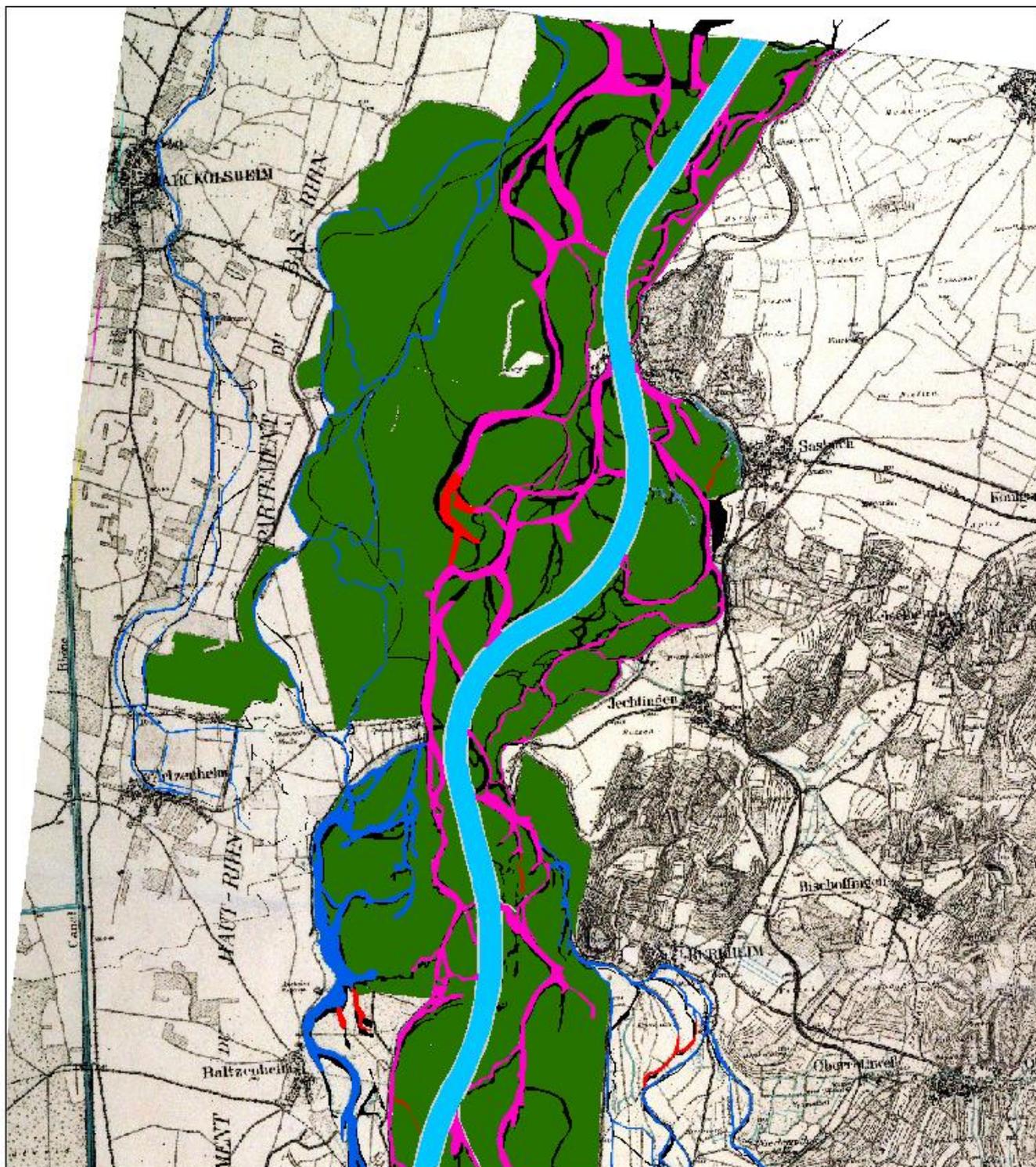
Légende

- | | |
|--|---|
|  Chenaux contractés |  Chenaux à sec |
|  Rhin corrigé |  Végétation |
|  Anastomoses |  Berge du Rhin |
|  Défluents | |

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1

Figure 33 : Carte représentant les chenaux en eaux contractés entre 1872 et 1926 à l'aval de Neuf-Brisach (Réalisation : Heitz, 2019)



0 0,75 1,5
Kilomètres



Légende

- | | |
|--|---|
|  Chenaux contractés |  Chenaux à sec |
|  Rhin corrigé |  Végétation |
|  Anastomoses |  Berge du Rhin |
|  Défluent | |

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciels utilisés: Qgis 2.18.10 & ArcMap 10.6.1

Figure 34 : Carte représentant les chenaux en eaux contractés entre 1872 et 1926 à l'amont de Marckolsheim (Réalisation : Heitz, 2019)

4.3.2 Contraction des chenaux en eau entre 1828 et 1926.

Entre 1828 et 1872 :

Les figure 31 et 32 précédentes représentent bien l'impact des aménagements sur les chenaux en eau et donc leurs contractions. Entre Neuf-Brisach et Kunheim, les anciennes tresses se sont très fortement contractées. En effet certaines existant en 1828 se sont totalement contractées jusqu'à disparaître. La végétation ligneuse a donc pu s'établir sur ces anciennes tresses disparues entre 1828 et 1872. D'autres tresses, quant à elles, se sont contractées jusqu'à devenir des défluent. Avec le logiciel ArcGis, nous avons pu mesurer des contractions pouvant atteindre 250 mètres. Ceci est bien visible au sud-est (sur la rive gauche) et au nord-ouest (rive droite) du tronçon d'étude.

Entre Balzenheim et Marckolsheim, deux zones sont visibles : en amont et en aval de Artzenheim. En amont du village, la contraction des chenaux est plus forte. En effet des tresses disparaissent totalement, certaines deviennent des anastomoses ou des défluent. En aval d'Artzenheim, les chenaux se contractent moins et forment des défluent connectés au Rhin corrigé qui sont majoritairement situés sur la rive gauche du fleuve. Entre 1828 et 1872 les anastomoses ne varient que très peu mais en observant les cartes, elles sembleraient se rétracter. Or nous venons de voir que la surface des anastomoses ne cesse d'augmenter. Ceci peut être dû à la précision des géoréférences. En effet cette précision peut altérer les résultats de nos digitalisations qui donc ne se superposent pas au pixel près.

Entre 1872 et 1926 :

La fin de la correction se situant en 1876, cette période de temps va nous montrer l'impact des aménagements préparant la canalisation. Comparée aux dates précédentes, la contraction des chenaux (défluent et anastomoses) est moindre. C'est notamment le cas sur la figure 33, entre Neuf-Brisach et Kunheim. Certains défluent se contractent jusqu'à devenir des chenaux à sec (en rouge sur les cartes) en 1926. Cependant ces chenaux peuvent être en eau durant les périodes de fortes précipitations. Entre Baltzenheim et Marckolsheim (fig. 34) cette contraction est aussi présente et est bien visible. En effet au centre et au nord de cette zone, nous pouvons observer sur la rive gauche une diminution très nette de la taille des défluent entre ceux de 1872 et ceux de 1926. Ceci se retrouve donc sur la figure 34 où des zones contractées de chenaux se localisent de part en part de certains défluent.

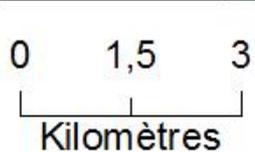
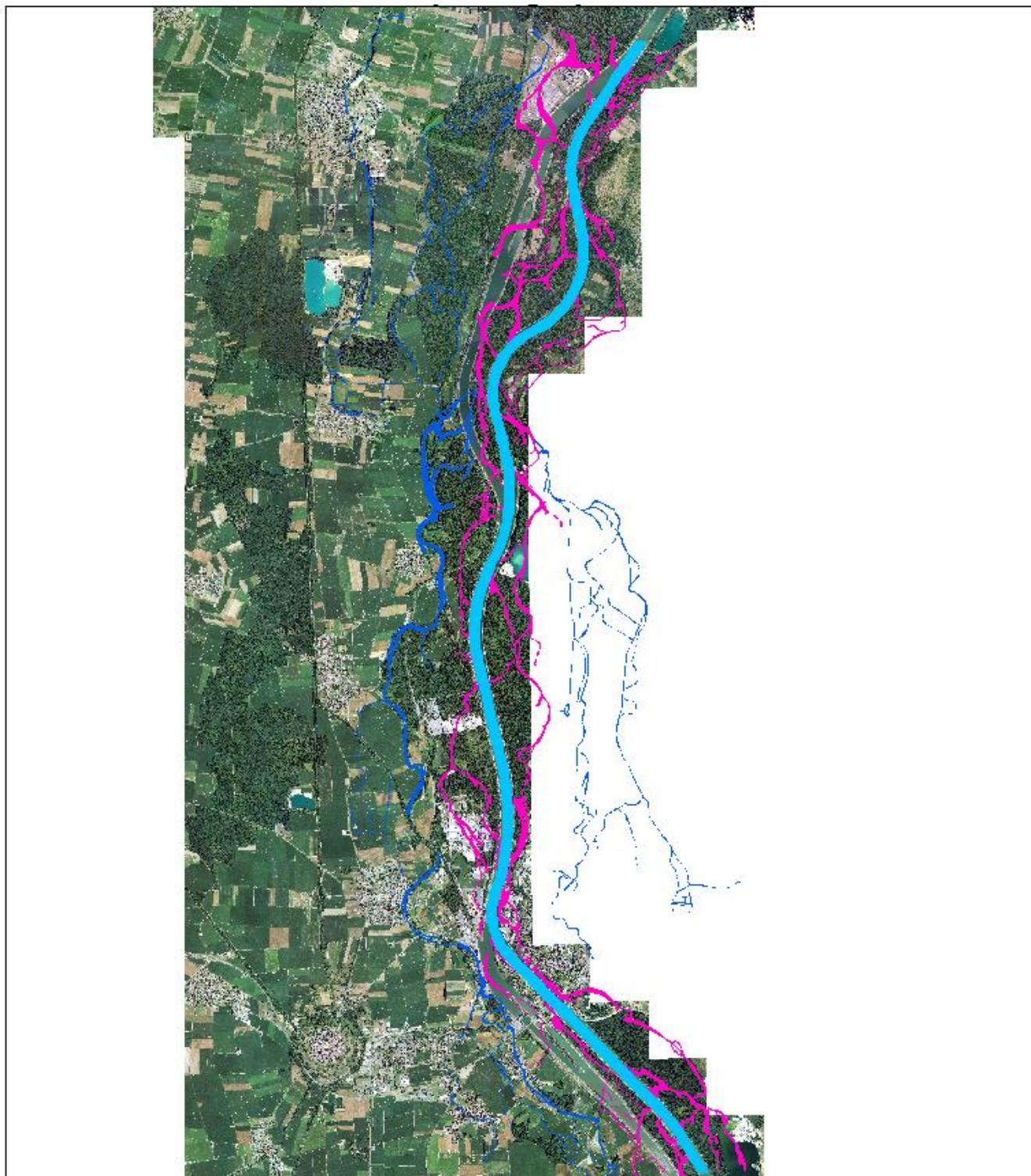
4.3.3 Repérage de zones de contraction par dépôts de sédiments fins

Avec les cartes que nous avons réalisées, il est possible d'identifier des zones de contractions des chenaux qui sont potentiellement des zones de dépôts privilégiés de sédiments fins pollués. Pour ce faire nous avons utilisé les données que nous avons créées (*shapefile* des zones rétractées), une orthophotographie datant de 2015 et une carte topographique de 2012. Ces deux dernières proviennent de l'IGN. L'orthophotographie montre principalement la rive gauche du Rhin donc le côté alsacien. De ce fait il était impossible pour nous de représenter toutes les zones possibles.

En interprétant ces données projetées sur ArcGis, nous avons pu digitaliser des zones de dépôts privilégiés de sédiments fins potentiellement pollués du fait des aménagements anthropiques historiques. Les figures 36 et 37 suivantes représentent donc ces zones sur une orthophotographie de 2015. En effet avec cette image aérienne, il est plus facile de localiser les zones à l'heure actuelle. En annexe 8 et 9 se trouvent ces zones localisées sur une carte topographique de l'IGN datant de 2012.

La figure 35 suivante représente les chenaux en eau de 1926 sur l'orthophotographie de 2015. Cette carte permet de nous rendre comptes de l'évolution de la zone d'étude durant 89 ans. La fin du GCA à Neuf-Breisach est visible ici, comme l'aménagement en feston de l'usine hydroélectrique de Marckolsheim.

Sur les figures 36 et 37, les zones que nous avons digitalisées se localisent soit le long de chenaux encore actifs soit au niveau de paléochenaux qui se localisent actuellement sous forêts. Nous avons représenté un certain nombre de zones, notamment entre le « Vieux-Rhin » et le GCA ou encore entre les aménagements fluviaux et le Rhin (voir figure 9 page 26). Cette première cartographie des zones doit très certainement être incomplète. Cependant, cela peut nous donner une idée des futures zones à investiguer dans des travaux géochimiques.

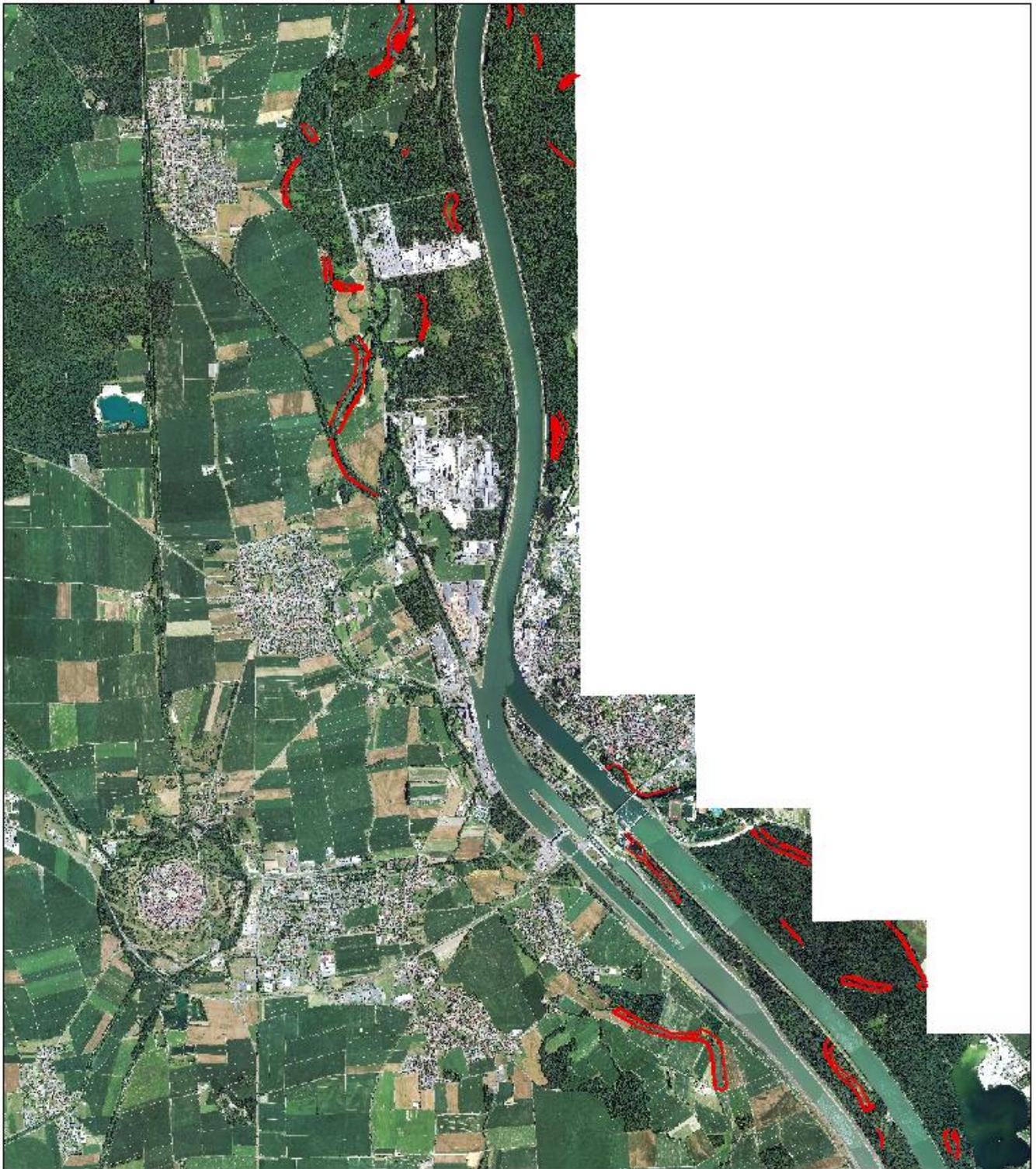


Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
 Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1
 Source : IGN (2015)

Légende

- Rhin corrigé
- Anastomoses
- Défluent

Figure 35 : Carte représentant les chenaux en eaux de 1926 sur une orthophotographie de 2015 (Réalisation : Heitz, 2019)



Légende

 "Hotspots" de pollution potentielle

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1

Source : IGN (2012)

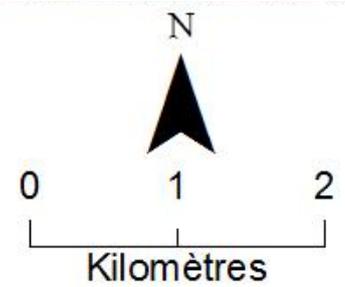
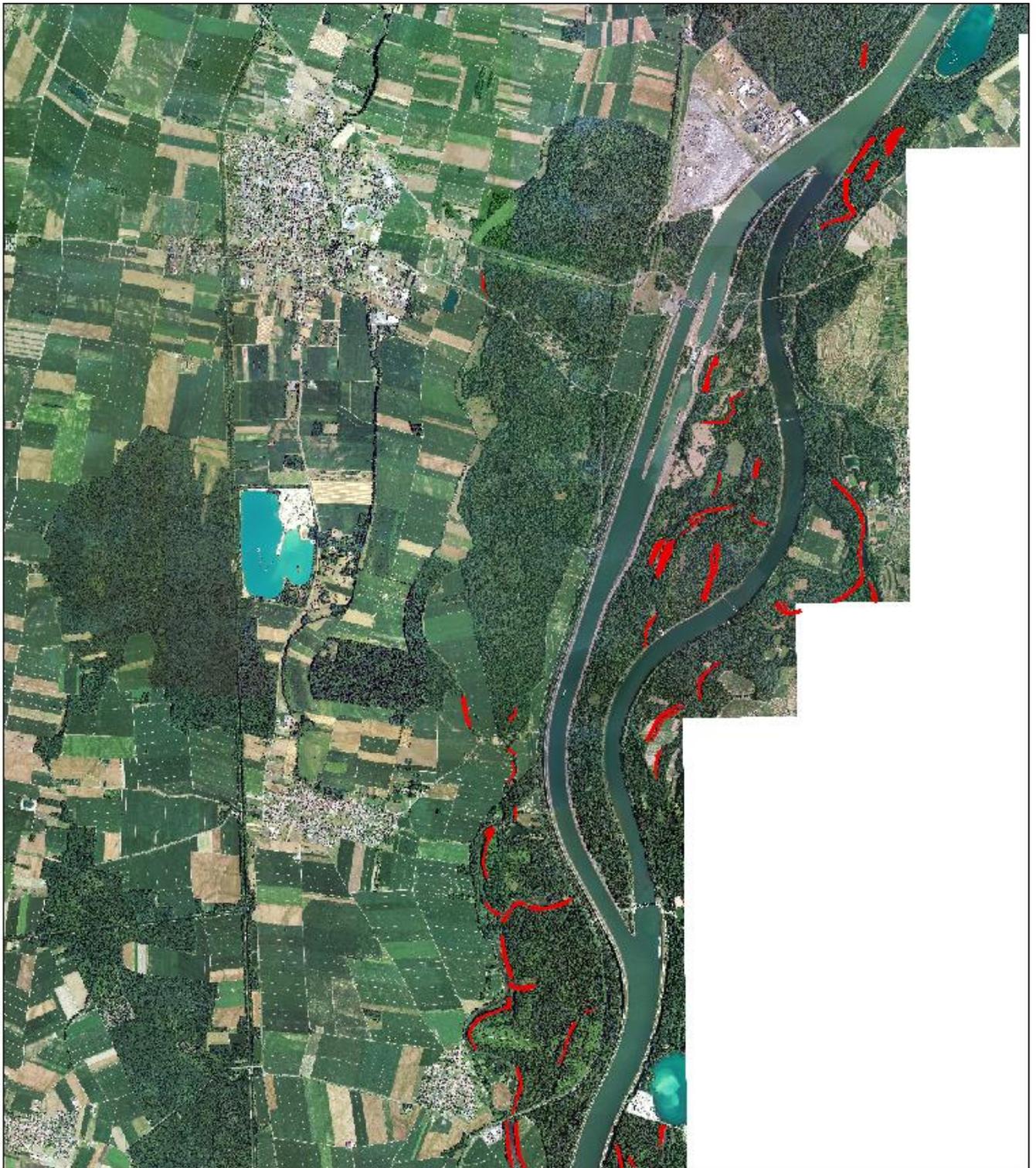


Figure 36 : Carte des zones de contraction des chenaux constitués de sédiments fins potentielles pollués en aval de Neuf-Brisach
(Réalisation : Heitz, 2019)



Légende

 "Hotspots" de pollution potentielle

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1

Source : IGN (2015)

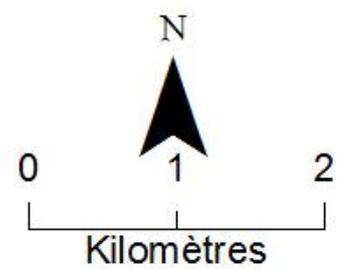


Figure 37 : Carte des zones de contraction des chenaux constitués de sédiments fins potentielles pollués en amont de Marckolsheim
(Réalisation : Heitz, 2019)

4.4. Limites des méthodes

Après avoir travaillé durant plusieurs mois sur ce sujet, nous pouvons dire que les méthodes utilisées pour créer de la donnée comportent certaines limites.

Pour commencer, nous pouvons parler du géoréférencement. Même si les cartes sont globalement précises pour l'époque de leurs créations, il a été difficile d'avoir un minimum d'erreurs quadratiques. En effet, sur certaines feuilles, l'Allemagne n'était pas représentée nous n'avons donc pas pu placer des points de contrôles de ce côté-ci du fleuve.

En ce qui concerne la digitalisation. L'utilisation du plugin Historical Map pour les feuilles de 1838 nous a fait perdre du temps. Ce logiciel est parfait pour les grands espaces, notamment forestiers, mais n'était clairement pas adapté pour les cartes que nous avons utilisées dans cette étude. Le problème principal est que le logiciel est trop précis. En effet la digitalisation automatique se fait au pixel près. De ce fait par exemple, certains pixels qui auraient dû être des tresses ont été représentés en végétation. Nous avons donc dû corriger manuellement les erreurs du plug-in.

Pour digitaliser la localisation des zones potentiellement polluées, les erreurs de géoréférencement de la carte de 1926 se sont fait ressentir. En effet au niveau de la forêt de Marckolsheim, il était très difficile pour nous de digitaliser les « hotspots ». Les anastomoses digitalisées sur la carte de 1926 correspondaient aux anastomoses de 2015 mais avec un décalage de plusieurs mètres.

Conclusion et perspectives

L'étude de la trajectoire temporelle du Rhin Supérieur entre Neuf-Brisach et Marckolsheim montre bien l'impact des aménagements humains depuis le XIXe siècle. Ce sont les cartes historiques et les données de digitalisation des unités hydro-morphologiques créées qui nous ont permis de mettre cela en évidence.

Avant les travaux de correction, le Rhin, dans notre zone d'étude, avait une dynamique forte où les tresses prédominaient. Cette bande de tressage était même dédoublée. A l'aube de la correction, le Rhin commence à prendre la forme son futur tracé, du fait d'aménagements locaux préparatoires. A la fin du XIXe siècle l'hydrosystème a grandement évolué. Les tresses ont totalement disparu, laissant place au nouveau tracé du fleuve corrigé et à un grand nombre de défluent. Entre la fin du XIXe et le début du XXe siècle, l'hydrosystème s'était adapté à cette correction du fleuve. Mais les travaux de régularisation et de canalisation ont encore une nouvelle fois modifié cela.

Avec l'étude de l'évolution du tracé en plan du Rhin au fil du temps, nous avons pu identifier des zones de contractions des chenaux. En effet les travaux de correction ont modifié les unités hydro-morphologiques, dont les chenaux en eaux comme les défluent. Lors des inondations, des dépôts de sédiments fins se sont déposés de part et d'autre des chenaux les plus larges. Du fait de l'industrialisation des berges en amont, favorisée par les aménagements, ces sédiments fins ont potentiellement été pollués. Avec nos résultats, nous avons pu réaliser une cartographie des zones de « hotspots » de pollutions historiques du début du XXème siècle. Ces zones peuvent donc être à prospecter pour des futurs travaux en géochimie.

Les données créées durant cette étude seront complétées par la suite. En effet avec Boisson Sébastien, dans le cadre des projets « Juxtha Rhénum » et l'OMH de Fessenheim, nous avons étudié l'évolution temporelle du Rhin Supérieur entre Neuf-Brisach et Rhinau. Les perspectives futures sont de créer de la donnée sur la trajectoire temporelle du Rhin entre Rhinau et Strasbourg, en utilisant la méthodologie appliquée dans cette étude. Ce faisant, nous allons pouvoir trouver d'autres zones de pollutions potentielles dans les sédiments et ainsi avoir une cartographie de Neuf-Brisach à Strasbourg. Nous allons aussi étudier le profil en long, les données piézométriques, le lidar et l'historique des crues afin de mettre tout cela en relation avec l'évolution temporelle du tracé en plan du Rhin Supérieur.

Bibliographie

ALCAYAGA H., 2013. Impacts morphologiques des aménagements à l'échelle du bassin versant. Thèse, Université de Grenoble Alpes, 155 pages.

AMOROS C., PETTS G-E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. *Masson*, Paris, 300 pages.

ARNAUD F., 2010. Etude historique des évolutions morphologiques du Vieux Rhin depuis 1800. Lyon, 74 pages.

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. Thèse, Université Lumière Lyon 2, 280 pages.

ARNAUD F., PIEGAY H., SCHMITT L., ROLLET A.J., BEAL D., 2014. Intérêts de la géomorphologie historique et expérimentale pour la restauration de cours d'eau : le cas du vieux Rhin en aval du barrage de Kembs (France, Allemagne). *La Houille Blanche*, n°4, pp. 5-13. DOI 10.1051/lhb/2014032.

ARNAUD F., PIEGAY H., SCHMITT L., FERRIER V., BEAL D., 2015. Historical geomorphic analysis (1932-2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, pp. 163-177. DOI 10.1016/j.geomorph.2015.02.009.

ARNAUD F., SCHMITT L., JOHNSTONE K., ROLLET A.J., PIEGAY H., 2019. Engineering impacts on the Upper Rhine channel and floodplain over two centuries. *Geomorphology*, 330, pp. 13-27. DOI 10.1016/j.geomorph.2019.01.004.

BENAVIDES J., KOSTER E., 2006. Identifying surviving landmarks on historical maps. *e-Perimtron*, pp. 194-208.

BETHEMONT J., 1999. Les grands fleuves : entre nature et société. *Armand Colin*. 248 pages.

BRAVARD J-P., PETIT F., 1997. Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. *Armand Colin*, Masson, Paris, 222 pages.

BROC N., 1983. Quelle est la plus ancienne carte « moderne » de la France ? *Annales de Géographie*, n°513, pp. 513-530.

CHAMLEY H., 1988. Les milieux de sédimentation. *BRGM Editions*. 173 pages.

DESCOMBES R., 2010. 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*, n°24, 7 pages.

EDF., 2017. Rapport annuel d'information du public relatif aux installations nucléaires du site de Fessenheim. 52 pages.

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

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

- ESCHWEILER W., 1959. L'hydrologie du Rhin à l'aval de Bâle : Le Rhin entre Bâle et Emmerich. *La Houille Blanche*, n°2 Mars-Avril, pp. 125-160. DOI 10.1051/lhb/1959029
- GILVEAR D., BRYANT R., 2003. Analysis of aerial Photography and Other Remotely Senses Data. *Fluvial Geomorphology*, 36 pages.
- HEITZ N., 2018. La Zorn : Etude de l'accumulation sédimentaire en lien avec les crues de Janvier 2018. Mémoire de Master 1, Université de Strasbourg, 77 pages.
- HERRAULT P.A., 2015. Extraction de fragments forestiers et caractérisation de leurs évolutions spatio-temporelles pour évaluer l'effet de l'histoire sur la biodiversité : une approche multi-sources. Thèse, Université de Toulouse, 397 pages.
- HERRAULT P.A., SHEEREN D., FAUVEL M., PAEGELOW M., 2015. Vectorisation automatique des forêts dans les minutes de la carte d'Etat-Major du 19^{ème} siècle. *Revue internationale de Géomatique*, 18 pages.
- HOUSSEIER J., 2014. Etude hydromorphologique holocène du compartiment médian de la plaine ello-rhénane. Mémoire Master 2, Université de Strasbourg, 105 pages.
- HUBER L., 2018. Evolution spatio-temporelle de la pollution industrielle et domestique dans le Grand Canal d'Alsace suite à sa construction. Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg, 89 pages.
- HUMBERT J., DESCOMBES R., 1985. Rhin. *Encyclopédie de l'Alsace*, pp. 6391-6400.
- JOHNSTONE K., 2010. Impacts hydro-géomorphologiques des aménagements humains : Etude historique du Rhin Supérieur entre Bâle et Breisach (1800-2009). Thèse, Université Lumière Lyon 2, 152 pages.
- KLEINAS C., 2003. L'évolution du style fluviale du Rhin Supérieur de Bale à Lauterbourg. Mémoire de Maîtrise, Université Louis Pasteur I, Strasbourg, 98 pages.
- LALLIAS-TACON S., LIEBAULT F., PIEGAY H., 2016. Use of airborne LiDAR and historical aerial photos for characterizing the history of braided river floodplain morphology and vegetation responses. *Catena*, 18 pages. DOI 10.1016/j.catena.2016.07.038
- LAMMERMANN-BARTHEL J., NEEB I., HINDERER M., FRECHEN M., 2009. Last glacial to Holocene fluvial aggradation and incision in the Southern Upper Rhine graben: climatic and neotectonic controls. *Quaternaire*, pp. 25-34.
- LEFOULON R., 1959. L'aménagement du Rhin sur le tronçon entre Bâle et Strasbourg. *La Houille Blanche*, n°2 Mars-Avril, pp. 203-206. DOI 10.1051/lhb/1959033
- MALAVOI J-R., BRAVARD J-P., 2010. Elément d'hydromorphologie fluviale. *ONEMA*, 224 pages.
- MARCHAL M., DELMAS G., 1959. L'aménagement du Rhin à courant libre de Bâle à Lauterbourg. *La Houille Blanche*, n°2 Mars-Avril, pp. 177-202. DOI 10.1051/lhb/1959032
- MIKOS M., 1994. The downstream fining of gravel-bed sediments in the alpine Rhine River. *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*, Berlin, vol. 52, pp. 93-108.
- NANSON G.C, KNIGHTON A.D., 1996. Anabranching rivers: Their cause, character and classification. *Earth surface processes and landforms*, vol. 21, pp. 217-239.

- PARDE M., 1959. Quelques considérations générales sur l'hydrologie du Rhin et sur l'aménagement de ce fleuve. *La houille blanche*, 14 pages.
- PETIT F., DAXHELET C., 1989. Détermination du débit à pleins bord et de sa récurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, pp. 69-84.
- PREUSSER F., 2008. Characterisation and evolution of the River Rhine system. *Netherlands Journal of Geosciences*, 87, pp. 7-19.
- ROMER G., 1981. Die Oberrheinlande in alten Landkarten. Von Dreissigjährigen Krieg bis Tulla (1618-1828). Ein Ausstellung der Badischen Landesbibliothek. Selbstverlag der Badischen Landesbibliothek, Karlsruhe, 131 pages.
- SCHMITT L., 1995. Approche méthodologique pour une restauration des anciens bras du Rhin. Mémoire de Maîtrise, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- SCHMITT L., HOUSSIER., MARTIN B., BEINER M., SKUPINSKI G., BOES E., SCHWARTZ D., ERTLEN D., ARGANT J., GEBHARDT A., SCHNEIDER N., LASSERRE M., TRINTAFILLIDIS G., OLLIVE V., 2016. Paléo-dynamique fluviale holocène dans le compartiment sud-occidental du fossé rhénan (France). In : Des Fleuves et des Hommes à l'époque mérovingienne. *Revue archéologique de l'Est*, pp. 15-33.
- SCHMITT L., 2001. Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace. Thèse, Université Louis Pasteur Strasbourg, pp. 217.
- SCHMITT L., 2010. Dynamique fluviale et gestion environnementale durable des hydrosystèmes : application à une grande plaine alluviale (Rhin-Ill, Alsace et à un hydrosystème périurbain (Yzeron, Ouest lyonnais). Habilitation à diriger des Recherches, Strasbourg, Université de Strasbourg, 296 pages.
- SCHUMM S-A., 1977. The fluvial system. *John Wiley & Sons*, 338 pages.
- SMOL J-P., 2008. Pollution of lakes and rivers : A Paleoenvironmental Perspective. *Blackwell*, 362 pages.
- TRICART J., 1977. Types de lits fluviaux en Amazonie brésilienne. *Annales de Géographie*, n°473, pp. 1-54.
- TRICART J., BRAVARD J-P., 1991. L'aménagement des trois plus grands fleuves européens : Rhin, Rhône et Danube. Problèmes et méfaits. *Annales de Géographie*, n°561-562, pp. 668-713. DOI 10.3406/geo.1991.21654
- TULLA J-G, 1827. Mémoire sur la rectification du cours du Rhin. *Journal de la société des sciences, agriculture et arts, de Strasbourg*, pp. 5-68.
- UEHLINGER U., WANTZEN K.M., LEUVEN R., 2009. The Rhine River Basin. In: Rhivers of Europe. *Elsevier*, pp. 199-246.
- WASSON J-G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. *Cemagref*, n°14, 158 pages.
- WERNER L-G., 1928. Les divagations du Rhin dans le Haut-Rhin. *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse*, pp. 184-193.

WINTERBOTTOM S.J., GILVEAR D.J., 2000. A GIS-based approach to mapping probabilities of riverbank erosion: Regulated River Tummel, Scotland. *Regulated Rivers: Research & Management*, pp. 127-140.

ZIMMERMANN A., 2012. Evolution hydro-morphologique de la Reserve Naturelle du Rohrschollen (1828-2010). Implications pour une restauration fonctionnelle du Bauerngrundwasser. Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg, 126 pages.

Sitographie et vidéographie

Sitographie :

Site de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

Site de l'Université de York (G-B) : <https://www.york.ac.uk/>

Vidéographie :

Arte, 2014 : « Le Rhin, visage d'un fleuve »

Arte, 2016 : « Le Rhin, au fil de l'histoire »

France 3 - Des racines et des ailes, 2014 : « Au fil du Rhin »

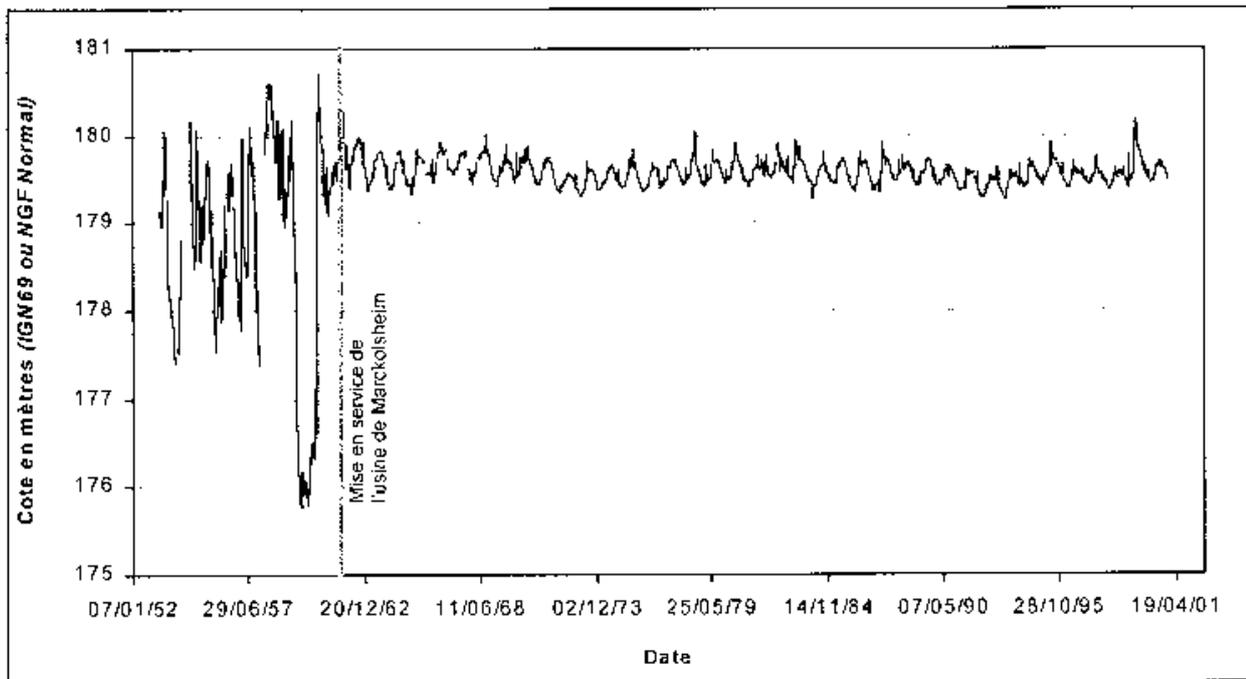
Table des figures

Figure 1 : Les zones d'un bassin versant d'après Shumm en 1977 (Maurer, 2008).....	11
Figure 2 : Les différents types de styles fluviaux selon la sinuosité et la multiplicité des chenaux.....	12
Figure 3 : Le transport des sédiments à gauche et le diagramme de Hjulström à droite (Malavoi et Bravard, 2010).....	13
Figure 4 : Les cinq tronçons du Rhin (https://archives.strasbourg.eu).....	19
Figure 5 : Carte de 1778 (Région Alsace).....	21
Figure 6 : Exemple de correction du Rhin (Honsell, 1885).....	22
Figure 7 : Principe des épis transversaux du Rhin (Encyclopédie BS Edition).....	23
Figure 8 : Carte du Vieux Rhin et du GCA entre Bâle et Breisach.....	25
Figure 9 : Exemple de l'aménagement d'un feston (Encyclopedie BS Editions).....	26
Figure 10 : Les aménagements hydro-électrique de Bâle à Iffezheim (Encyclopedie BS Editions).....	26
Figure 11 : Graphique représentant l'évolution du saumon dans le Rhin avant et après les aménagements (Zimmerman, 2012).....	27
Figure 12 : Coupe en travers du graben rhénan (Tiré de Sell et al., 1998).....	28
Figure 13 : Débits moyen du Rhin à Bâle (CHR, 1977).....	29
Figure 14 : Carte de localisation de la zone d'étude (Heitz, 2019).....	30
Figure 15 : Tableau des rejets liquides radioactifs en 2017 (EDF, 2017).....	32
Figure 16 : Tableau des rejets chimiques en 2017 (EDF, 2017).....	32
Figure 17 : Tableau des cartes historiques utilisées (Heitz, 2019).....	34
Figure 18 : Tableau représentant l'erreur quadratique dans nos géoréférences (Heitz, 2019).....	37
Figure 19 : Carte de 1838 en haut et carte de 1838 filtrée en bas (Heitz, 2019).....	39
Figure 20 : Tableau des critères de discrimination des types de chenaux (Kleinas, 2003 ; modifié par Arnaud, 2012).....	42
Figure 21 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1778 (Heitz, 2019).....	44
Figure 22 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1828 (Heitz, 2019).....	45
Figure 23 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1838 (Heitz, 2019).....	46

Figure 24 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1872 (Heitz, 2019).....	47
Figure 25 : Carte des unités hydro-morphologiques de la zone d'étude en 1926 (Heitz, 2019).....	48
Figure 26 : Evolution des chenaux en eau entre 1778 et 1872 (Heitz, 2019).....	50
Figure 27 : Evolution des chenaux en eaux entre 1872 et 1926 (Heitz, 2019).....	51
Figure 28 : Tableau des surfaces des unités morphologiques par années Heitz, 2019)	52
Figure 29 : Graphique représentant la surface en hectares par année des unités morphologiques (Heitz, 2019)	53
Figure 30 : Taux d'évolution annuels moyen des unités morphologiques (Heitz, 2019)..	54
Figure 31 : Carte représentant les chenaux en eau contractés entre 1828 et 1872 à l'aval de Neuf-Brisach (Heitz, 2019)	59
Figure 32 : Carte représentant les chenaux en eau contractés entre 1828 et 1872 à l'amont de Marckolsheim (Heitz, 2019)	60
Figure 33 : Carte représentant les chenaux en eau contractés entre 1872 et 1926 à l'aval de Neuf-Brisach (Heitz, 2019)	61
Figure 34 : Carte représentant les chenaux en eau contractés entre 1872 et 1926 à l'amont de Marckolsheim (Heitz, 2019)	62
Figure 35 : Carte représentant les chenaux en eau de 1926 sur une orthophotographie de 2015 (Heitz, 2019)	65
Figure 36 : Carte des zones de "hotspots" de pollution potentielle en aval de Neuf-Brisach (Heitz, 2019).....	66
Figure 37 : Carte des zones de "hotspots" de pollution potentielle en amont de Marckolsheim (Heitz, 2019).....	67

Annexes

Annexe 1 : Evolution des battements du toit de la nappe phréatique (Schmitt, 2001)



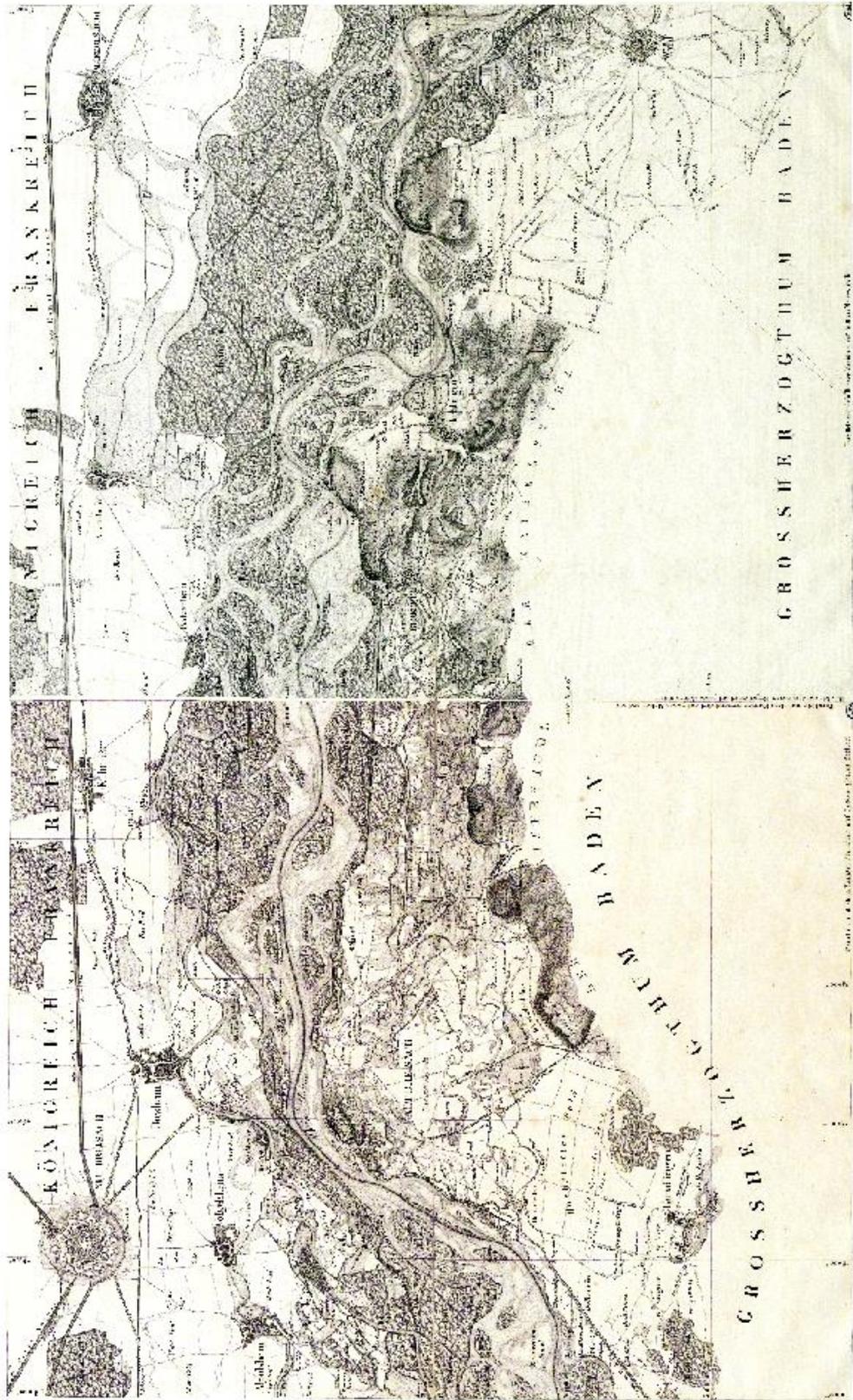
Annexe 2 : Feuilles géoréférencées du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim en 1778



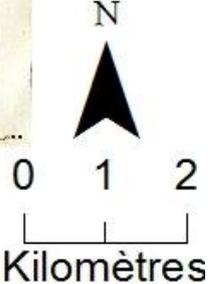
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
Logiciel utilisé: ArcMap 10.6.1
Source: Région Alsace

0 1 2
Kilomètres

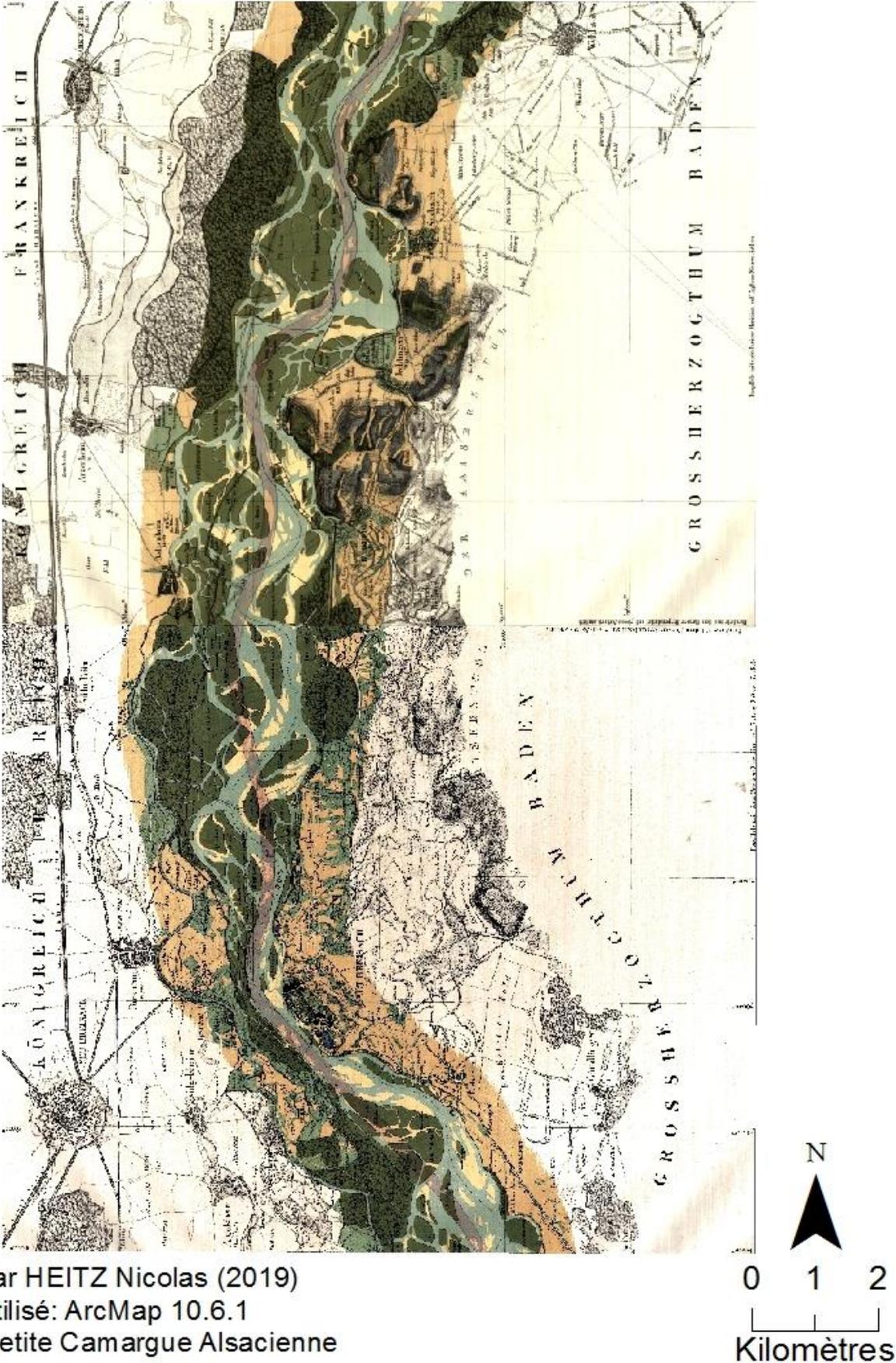
Annexe 3 : Feuilles géoréférencées du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim en 1828



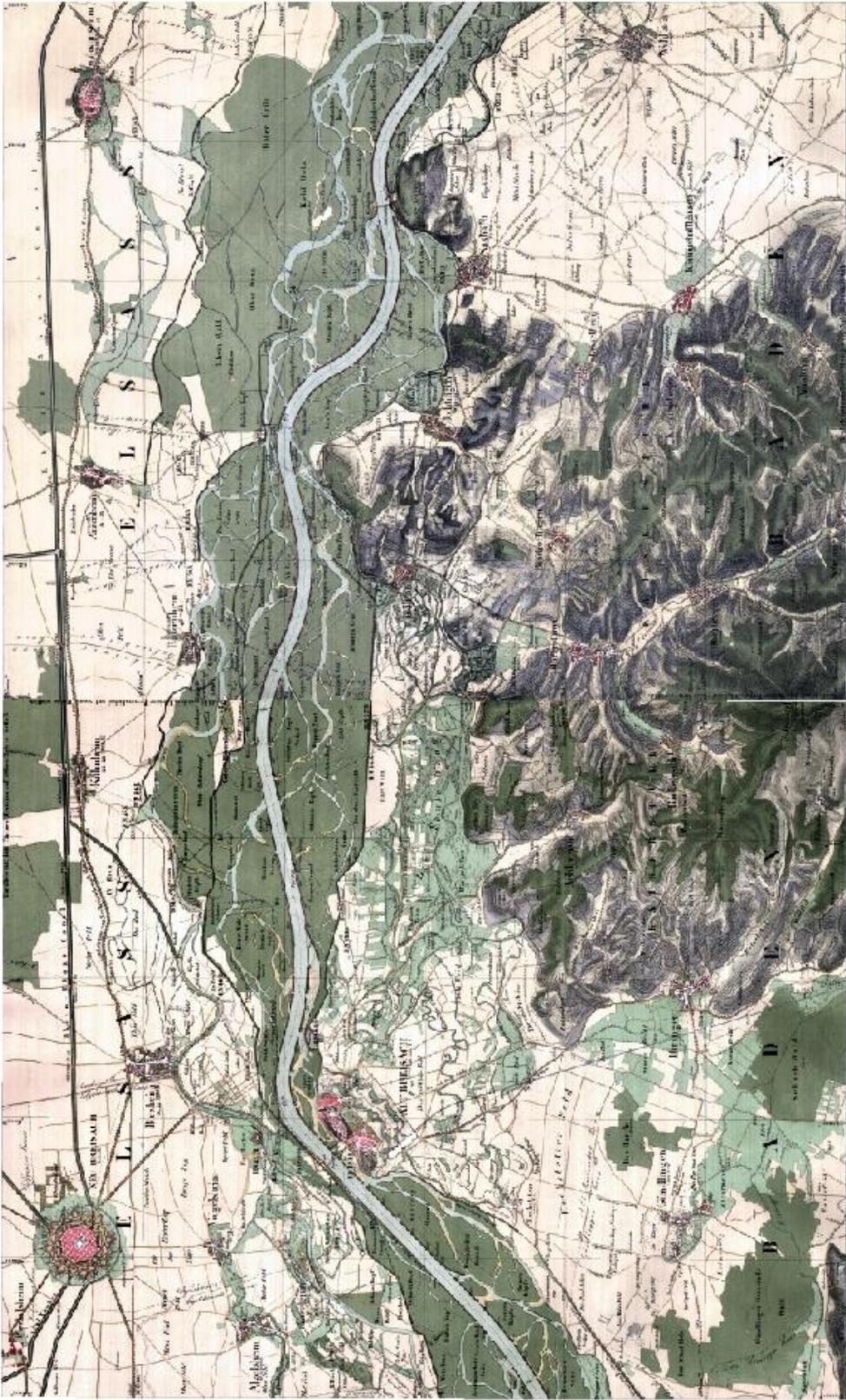
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
Logiciel utilisé: ArcMap 10.6.1
Source: Bibliothèque Nationale et Universitaire de Strasbourg



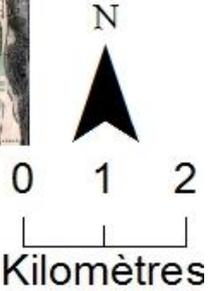
Annexe 4 : Feuilles géoréférencées du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim en 1838



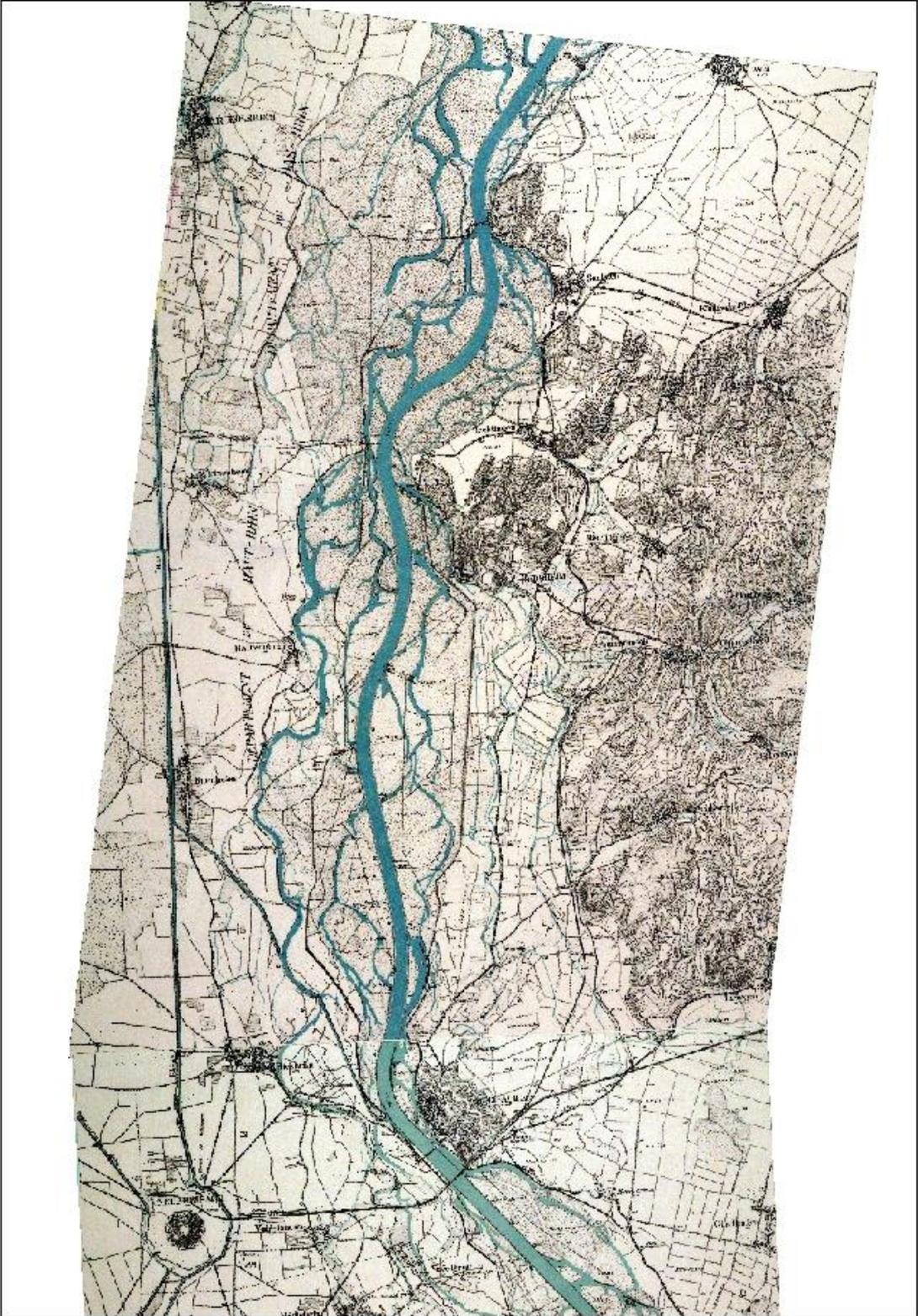
Annexe 5 : Feuilles géoréférencées du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim en 1872



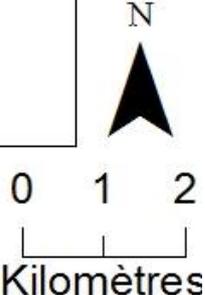
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
Logiciel utilisé: ArcMap 10.6.1
Source: Petite Camargue Alsacienne



Annexe 6 : Feuilles géoréférencées du Rhin entre Neuf-Brisach et Marckolsheim en 1926

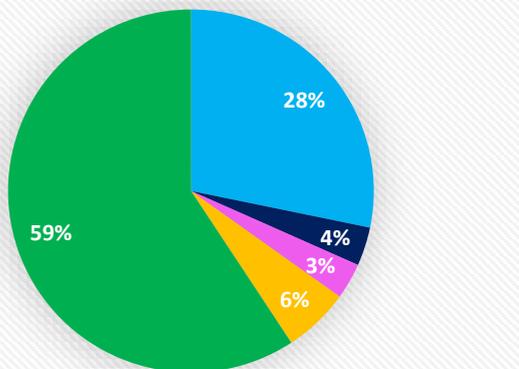


Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)
Logiciel utilisé: ArcMap 10.6.1
Source: Archive Départementale 68



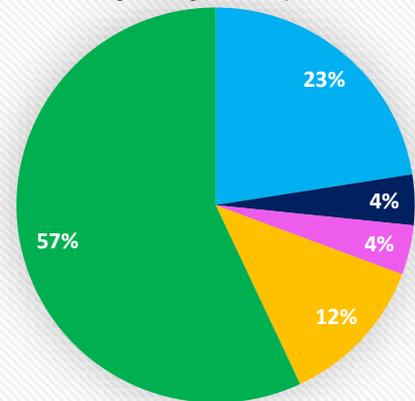
Annexe 7 : Diagramme des unités hydro-morphologiques par années

Diagramme des unités hydro-morphologiques en 1778 (en % de l'hydrosystème)



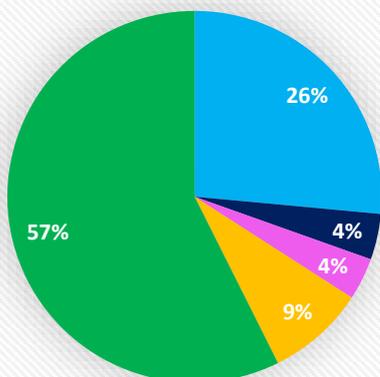
■ Tresses ■ Anastomoses ■ Défluent ■ Bancs ■ Végétation

Diagramme des unités hydro-morphologiques en 1828 (en % de l'hydrosystème)



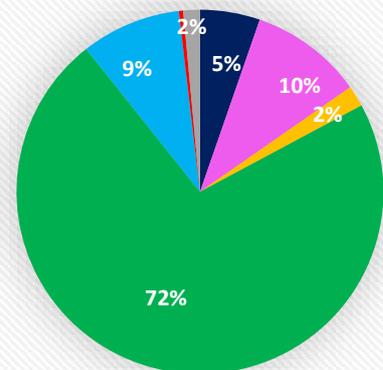
■ Tresses ■ Anastomoses ■ Défluent ■ Bancs ■ Végétation

Diagramme des unités hydro-morphologiques en 1838 (en % de l'hydrosystème)



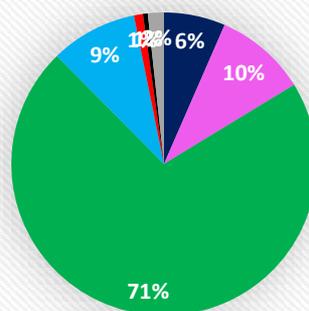
■ Tresses ■ Anastomoses ■ Défluent ■ Bancs ■ Végétation

Diagramme des unités hydro-morphologiques en 1872 (en % de l'hydrosystème)



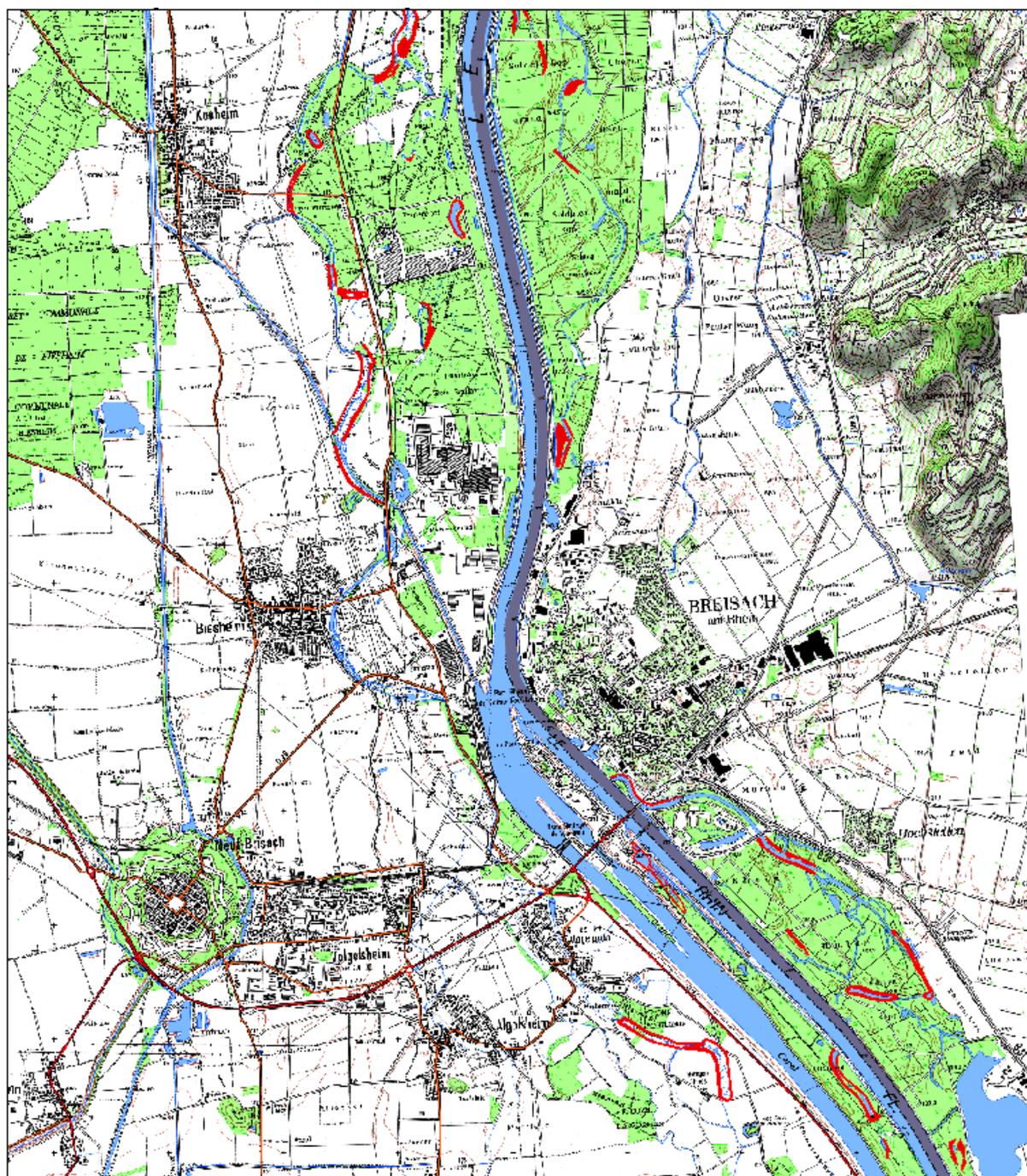
■ Anastomoses ■ Défluent ■ Bancs ■ Végétation ■ Rhin corrigé ■ Chenaux à sec

Diagramme des unités hydro-morphologiques en 1926 (en % de l'hydrosystème)



■ Anastomoses ■ Défluent ■ Végétation ■ Rhin corrigé ■ Chenaux à sec ■ Bras morts ■ Berge Rhin corrigé

Annexe 8 : Carte des zones de contraction des chenaux constitués de sédiments fins potentiellement pollués (Aval de Neuf-Brisach)



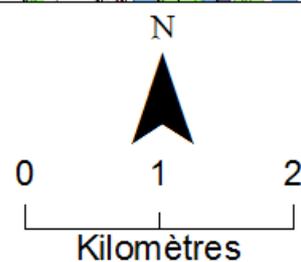
Légende

 "Hotspots" de pollution potentielle

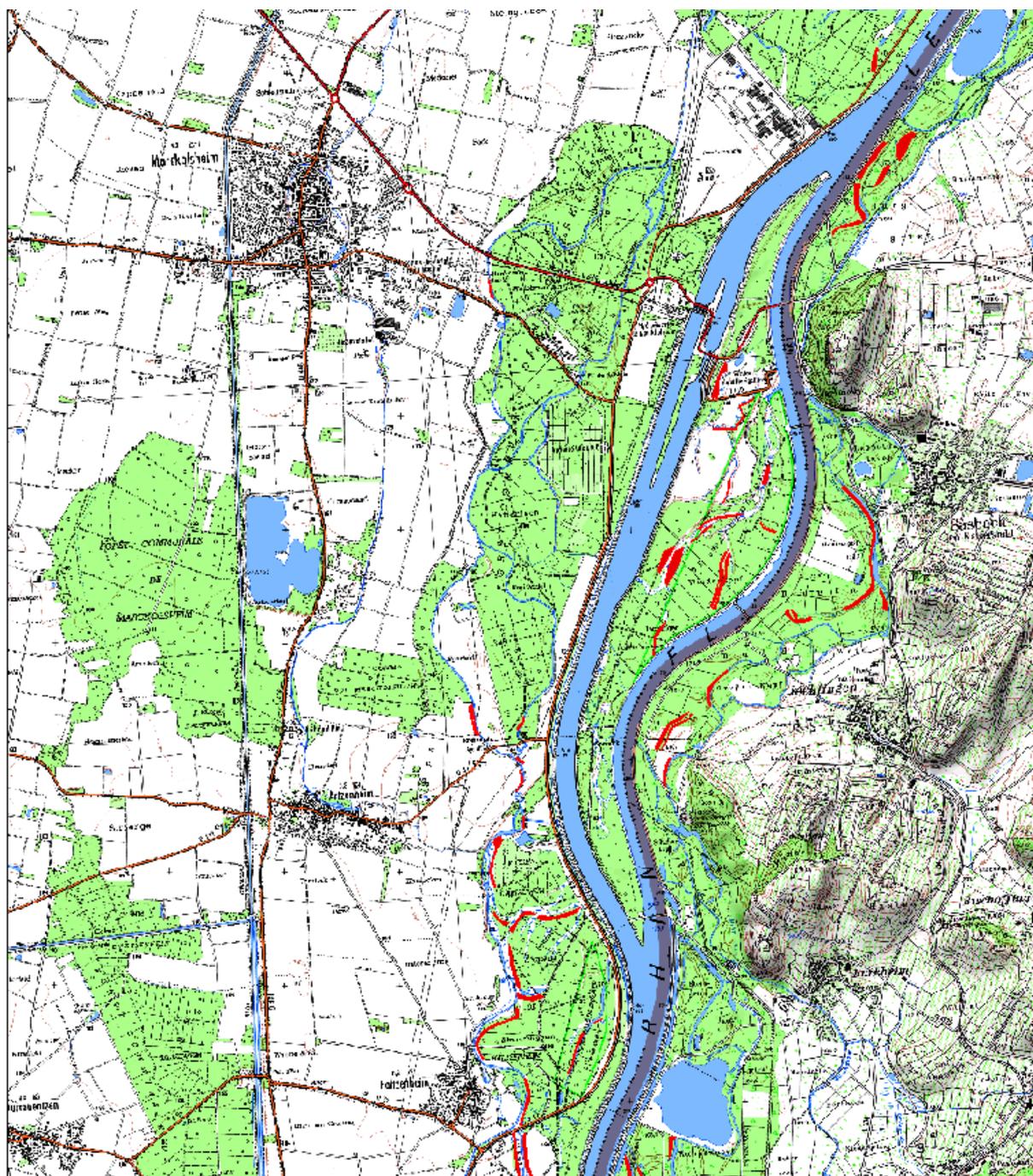
Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1

Source : IGN (2012)



Annexe 9 : Carte des zones de contraction des chenaux constitués de sédiments fin potentiellement pollués (Amont de Marckolsheim)



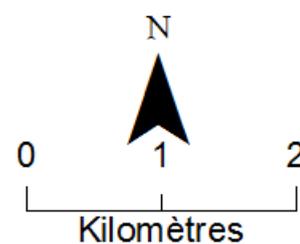
Légende

 "Hotspots" de pollution potentielle

Réalisé par HEITZ Nicolas (2019)

Logiciel utilisé : ArcMap 10.6.1

Source : IGN (2015)



RESUME

Les projets « Juxtha Rhénum » du CNRS et de l'Observatoire Hommes-Milieus Fessenheim ont pour but d'établir une base scientifique sur la trajectoire temporelle du Rhin Supérieur dans la perspective de la fermeture prochaine de la centrale nucléaire. L'objectif de cette étude était de reconstituer la trajectoire temporelle du Rhin Supérieur entre Neuf-Brisach et Marckolsheim grâce à une étude planimétrique des cartes anciennes. Les résultats obtenus nous indiquent que les aménagements de correction du XIXe siècle ont très clairement impacté les unités hydro-morphologiques de notre site d'étude, passant d'un fleuve tressé et anastomosé à un fleuve fortement anthropisé. L'étude de l'évolution temporelle nous a permis d'identifier des zones de contraction des chenaux qui sont potentiellement des zones de dépôts privilégiés de sédiments pollués par les activités anthropiques du XIXe siècle, situées à l'amont de notre zone d'étude. Ces zones sont susceptibles de jouer le rôle de mémoire des rejets historiques de polluants.

Mots clés : Rhin Supérieur – Analyse planimétrique – Evolution temporelle – pollution potentielle

ABSTRACT

"Juxtha Rhenum" of the CNRS and the Observatoire Hommes-Milieus Fessenheim projects aims to establish a scientific basis on the temporal trajectory of the Upper Rhine in view of the upcoming closure of the nuclear power plant. The objective of this study was to reconstruct the temporal trajectory of the Upper Rhine between Neuf-Brisach and Marckolsheim by using a planimetric study of old maps. Results obtained indicate that the corrective measures of the 19th century have had a very clear impact on the hydro-morphological units of our study site, moving from a braided and anastomosed river to a highly anthropized river. The study of temporal evolution has enabled us to identify areas of channel contraction that are potentially areas of privileged sediment deposition polluted by the 19th century anthropogenic activities located upstream of our study area. These areas are likely to play the role of memory of historical pollutant releases.

Keywords : Upper Rhine - Planimetric analysis - Time evolution - Potential pollution