

Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles

Ronan Steinmann^{1,2*}, Laurence Lestel¹, Annie Dumont²

¹Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, France.

²Université de Bourgogne, Laboratoire ArTeHis UMR 6298, 21000 DIJON, France.

*steinmann.ronan@yahoo.fr

Résumé

Il est aujourd'hui difficile d'appréhender la forme et le fonctionnement passés d'un fleuve par la simple observation du lit majeur sur des documents actuels. Nous montrons ici que l'approche géohistorique, par l'analyse de documents d'archives, permet d'évaluer et de quantifier les transformations d'un tronçon de la Seine (la Bassée aval, de Nogent-sur-Seine à Montereau-Fault-Yonne) depuis 1839.

Les cartes des fonds de l'Institut Géographique National, des Archives Nationales et de la Bibliothèque Nationale de France, numérisées, redressées, géoréférencées et digitalisées ont permis d'extraire des grandeurs morphométriques qui constituent autant d'indices de la dynamique alluviale au moment du levé du plan.

Un profil en long de 1839, antérieur à la première phase d'aménagement, a été comparé à des documents de 1903 et à la bathymétrie VNF acquise dans les années 2009-2015. Les différentes mesures de l'altitude du fond, de la tranche d'eau à l'étiage et des berges ont été converties dans le système IGN 69.

Afin de pouvoir comparer les mesures en plan et en hauteur, tous les points ont été reportés sur un axe commun, qui passe par le centre du lit majeur. Ce travail de normalisation des données permet d'évaluer les effets des deux grandes phases d'aménagements de la Bassée : les années 1850 et les années 1970. La première a une faible incidence sur la forme en plan et le profil. Les principaux hauts-fonds sont écrêtés, mais cette action n'affecte pas de façon significative le fond du lit. Toutefois, la ligne d'eau à l'étiage, après la construction des premiers barrages, est remontée d'un mètre. C'est entre 1903 et 2010 que l'on voit les plus lourds aménagements : recreusement de canaux augmentant la largeur et diminuant la sinuosité en plan, abaissement du fond du lit de plus de 150 cm et nouvelle remontée de la ligne d'étiage (20 cm).

L'analyse des paramètres morphométriques a permis de mettre en évidence les ajustements naturels de la Seine, même s'ils ne sont perceptibles que comme un bruit de fond par rapport à l'ampleur des transformations générées par les travaux d'aménagement du lit.

1 Introduction

Le lit majeur de la Seine dans la Bassée aval, c'est-à-dire le tronçon de vallée de Nogent-sur-Seine à Montereau-Fault-Yonne (Fustecet *al.* 2001, p.3), présente de nos jours une morphologie héritée des nombreuses activités humaines qui s'y sont déroulées tout au long de son histoire (Figure 1). Cet espace a tout particulièrement été bouleversé dans la seconde moitié du 20^e s. L'exploitation de gravières dans le lit majeur, le creusement de dérivations, le rescindement de méandres et la chenalisation à grand gabarit ont en effet profondément modifié le fonctionnement des annexes hydrauliques, du fleuve et, en conséquence, de l'interface nappe-rivière. L'ampleur des transformations empêche aujourd'hui d'appréhender la forme et la dynamique du fleuve avant la première phase d'aménagements, survenue dans les années 1850.

Le travail présenté ici propose donc de reconstituer l'évolution de la Bassée aval sur près de deux siècles à l'aide de cartes et de profils en long. L'objectif de cette étude géohistorique est de discuter qualitativement et quantitativement des transformations survenues tant en plan que dans la dimension verticale, et de les comparer aux données existantes sur les aménagements directs de ce tronçon et le fonctionnement hydromorphologique du fleuve. La période choisie (1839-2015) correspond, pour le fond cartographique analysé, à l'intervalle de temps séparant le document le plus ancien du plus récent.

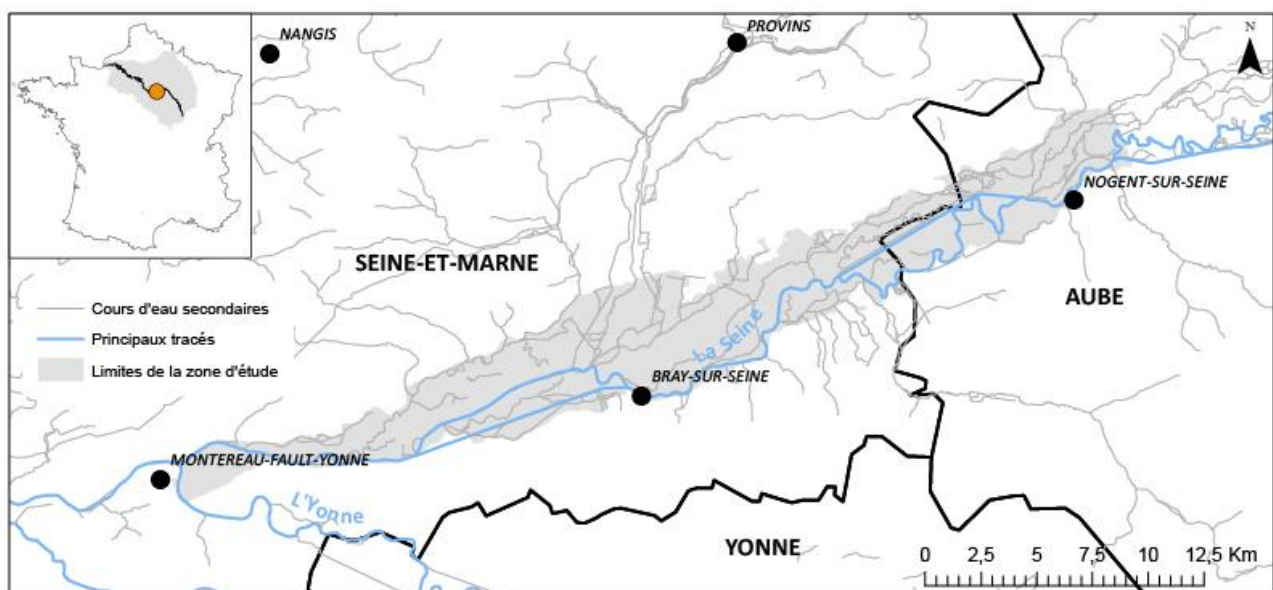


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude de Bassée aval

1.1 Historique des aménagements dans la Bassée aval

Le recensement des aménagements du secteur a été effectué en étudiant différentes sources (Ponts et Chaussées 1903 ; Verdier de Pennery 1959 ; Pierre 1978 ; Dzana 1997 ; Fustecet *al.* 2001). Sans nier l'importance des modifications réalisées en amont du fleuve, notamment l'effet des lacs-réservoirs, nous nous sommes ici concentrés uniquement sur le tronçon Nogent-Montereau. Les différents types d'aménagements ont été répartis en quatre catégories :

- Le creusement de canaux de dérivation et de chenaux de navigation recoupant de nombreuses sinuosités
- La mise en place d'écluses ou/et de barrages sur le chenal principal de la Seine
- Le rescindement de méandres. Si ce type d'aménagement semble redondant avec la première catégorie, il semblait pertinent de mentionner séparément ce type d'intervention, qui se fait boucle par boucle et en un temps assez court. Séparer cette information permet de ne pas en perdre la précision en la noyant dans une catégorie plus large.
- Les grandes campagnes de protection des berges, qui limitent la migration latérale du fleuve. Au 19^e siècle, il s'agit surtout de protéger les chemins de halage.

La chronologie des aménagements dans la Bassée et sur la période étudiée a ainsi été résumée sur un schéma de synthèse (Figure 2). Dans la première partie du 19^e siècle, avant la construction des barrages, la navigation en amont de Montereau était limitée, avec un tirant d'eau inférieur au mètre, à 160 jours par an (Boyer dans Fustecet *al.* 2001, p.12).

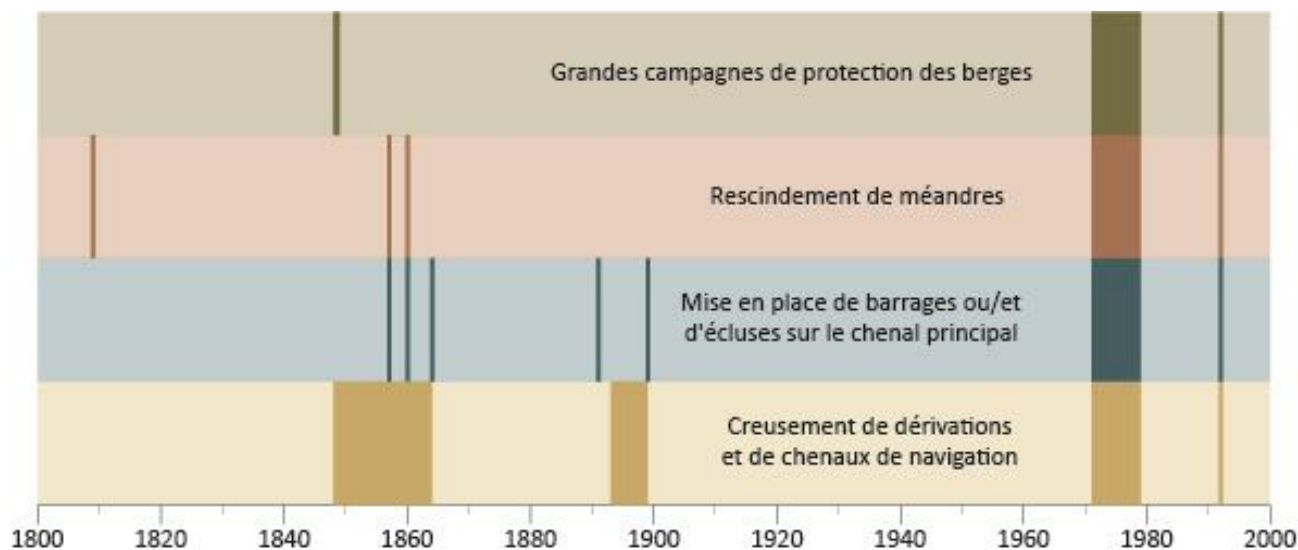


Figure 2 : Synthèse des aménagements réalisés sur la Bassée aval depuis 1800

La première phase de travaux se déroule principalement de 1848 à 1864 environ. Elle correspond au creusement des déviations de Beaulieu à Villiers et de Conflans à Bernières, ce dernier lieu se situant immédiatement en amont de Nogent-sur-Seine. Ces deux ouvrages, d'une dizaine de kilomètres de long sont des canaux au gabarit Freycinet (Dzana 1997, p.183). Ces dérivations, associées à trois écluses chacune pour compenser la pente dans le canal qui prend un trajet plus direct (Ponts et Chaussées 1903, pl.II), sont contemporaines de plusieurs rescindements de méandres, de l'installation de barrages et d'une campagne généralisée de protection des berges par des rampes d'enrochements. Ces défenses seront par la suite régulièrement entretenues (Dzana 1997, p.184).

La seconde phase de travaux est centrée sur la période 1886-1899, même si deux phases distinctes, 1881-1886 et 1893-1899, semblent avoir eu lieu. On y note la mise en place de barrages et des « travaux divers », mais surtout le creusement de la dérivation de Bray à La Tombe, mise en service en 1899. Au début du 20^e siècle, la navigation à 1,6 m de tirant d'eau est donc possible en permanence sur la Bassée (Ponts et Chaussées 1903, p.3).

La troisième phase de travaux se concentre entre le barrage de la Grande-Bosse, en aval de Bray, et la ville de Montereau. Il s'agit de la mise à grand gabarit de ce tronçon, qui dura de 1971 à 1979 (en deux tranches). En plus de nombreux rescindements entre la Grande-Bosse et la Tombe, on adapte le lit au passage des péniches d'au moins 1600 tonnes (56,8 m de large au sommet de la tranche d'eau, 44 m de large au fond, 3,2 m de profondeur), on modifie les barrages existants et l'on protège les berges reprofilées par des palplanches ou des pavés alvéolés sur du géotextile (Dzana 1997, pp.186-191).

La dernière phase, qui date de 1992, est la troisième tranche du projet de mise à grand gabarit. Elle a concerné la section Jaulnes-le Vezoult et a vu le même type d'aménagements que précédemment, mais sur un tronçon bien plus réduit.

Si l'on résume ces phases d'aménagements, on a donc principalement deux projets d'amélioration de la navigation de la Bassée. Le premier date des années 1850 à 1900 et le second des années 1970 à 1995.

1.2 État de la recherche dans la Bassée aval

Dans le cadre du PIREN Seine, de nombreux travaux ont déjà permis d'aborder les changements survenus au cours des trois derniers siècles sur ce territoire. Un bilan des travaux réalisés et des données éventuellement disponibles s'est donc imposé pour situer le présent travail et l'intégrer dans les recherches du PIREN-Seine.

Les travaux de François Boyer et de ses collègues ont constitué un socle de connaissances aujourd'hui encore utilisables, notamment grâce à la collecte et à l'étude de nombreux documents anciens renseignant sur la forme de la Seine et sa plaine alluviale au cours du temps, ainsi que sur l'historique des aménagements de la Bassée (Berthier *et al.* 1998 ; Fustecet *al.* 2001). Son encadrement de mémoires de Master a également apporté des informations inédites sur le fonctionnement de ce secteur (De Cazenove 1997 ; Lemaire 2000). A. De Cazenove, sur une zone d'étude identique à la nôtre, a traité un grand nombre de documents. Les superpositions des cartes anciennes devaient alors se faire soit par photocopies remises à l'échelle, soit par saisie sur le logiciel Mapinfo si le système de coordonnées était le même. Il résultait des photocopies des erreurs de distorsion dues aux qualités des documents originaux et des prises de vue, tandis qu'on n'a aucune idée de la précision du géoréférencement logiciel. Aucune de ces données ne peut donc être réutilisée. La conclusion de ce travail à grande échelle était que le tracé avait peu varié en 100 ans (De Cazenove 1997, p. 34), ce qui est une appréciation qualitative à noter mais ne permet pas de réfléchir quantitativement aux transformations. Le mémoire d'A.-C. Lemaire, quant à lui, a permis le géoréférencement de plusieurs cartes anciennes sur le tronçon Nogent-sur-Seine/Saint-Sauveur-lès-Bray, mais la précision horizontale est très faible, des tracés levés à cinq années d'écart se trouvant décalés de plus de cent mètres l'un de l'autre.

La thèse de Jean-Guy Dzana, soutenue en 1997, a participé à la compréhension du fonctionnement de la Bassée sur le temps long et est encore un document de référence indispensable. L'évolution de la forme en plan du fleuve au cours des derniers siècles a été abordée quantitativement sur le tronçon de Bar-sur-Seine à Montereau-Fault-Yonne, bien qu'à une échelle relativement grande et avec deux cartes seulement (1828 et 1945-1955). La section la plus mobile, entre Marcilly et Nogent, a été étudiée plus finement avec cinq documents (Dzana 1997, p. 138). Les tracés ont été reportés à la main sur un même document géoréférencé puis simplifiés pour obtenir la ligne centrale du thalweg, et enfin numérisés sous forme de points. Les paramètres d'évolution mesurés ont été les aires balayées, la sinuosité et la courbure des arcs. Ces mesures montrent une complexité croissante des courbures au cours du temps (Dzana 1997, p.163), ainsi qu'une élongation significative du cours d'eau, principalement en aval de Troyes (Dzana 1997, p.172). Les surfaces érodées sont plus grandes en aval de Troyes, et plus le tracé se complexifie, moins les aires balayées sont importantes. Ces mesures globales mériteraient d'être précisées en évaluant les modifications à l'échelle de la sinuosité (Dzana 1997, p.173).

L'étude de l'évolution en plan de la Bassée a ensuite été poursuivie dans les années 2000 (Le Pichon 2003 ; Gaillard 2004). Les documents étudiés se sont multipliés, mais uniquement pour la seconde moitié du 20^e siècle avec l'intégration de photographies aériennes, le 19^e siècle n'étant renseigné que par les levés des Minutes d'État-Major au 1/40.000. La zone étudiée s'est étendue plus systématiquement à la Bassée aval, mais les paramètres d'évolution se sont limités à la longueur du tracé, sa sinuosité et le calcul des aires balayées, toujours à partir d'une ligne de thalweg déduite du tracé en plan.

En 1998, suite aux travaux du groupe « Corridor fluvial » de la phase II du PIREN-Seine, un projet de typologie des unités hydrogéomorphologiques à l'échelle du bassin, sous forme de données SIG, voit le jour (Gaillard *et al.* 1998). Il est poursuivi et étendu sur différents sous-bassins en 1999 et en 2000 (Gaillard *et al.* 1999 ; 2000), puis plus centré sur les zones humides riveraines (Gaillard *et al.* 2002). Ces dernières ont ensuite été analysées, entre autres, du point de vue de la rétention des nitrates (Curie *et al.* 2003). La base de données SIG est disponible en 2005 (Gaillard *et al.* 2005), et par la suite utilisée pour calculer des indices de fonctionnalité des cours d'eau du bassin (Abdou Daggaet *al.* 2006). Ces données spatialisées sont exploitables et certaines d'entre elles ont été utilisées dans ces travaux. Ce point souligne l'intérêt de la normalisation des données spatialisées, directement réutilisables plusieurs années après leur élaboration.

Plus récemment, une estimation de la vitesse de migration des méandres de la Bassée entre la moitié du 19^e siècle et les années 1950 a été réalisée (Weill *et al.* 2014). Elle est la plus forte dans la Bassée amont, un peu moins dans la première partie de la Bassée aval et très faible après Bray-sur-Seine. Il faut préciser que ces vitesses ne sont pas celles des ajustements naturels, car une première phase d'aménagements a eu lieu entre 1850 et 1900, et comportait notamment, dans la Bassée aval, des protections de berge ayant pu limiter la migration des méandres.

De nombreux documents ont été rassemblés dans le cadre du programme Archiseine mené par Laurence Lestel, et ont été consultés dans le cadre de ce travail (Lestel *et al.* 2011 ; 2012 ; 2015 ; Galibert *et al.* 2014). Afin de nourrir cette cartothèque, les documents traités dans ce travail ont été versés au fonds d'Archiseine et ont donc vocation à être mis en ligne sur le site du projet.

1.3 Positionnement du travail mené en 2016

L'objectif de la présente étude est de compléter les travaux menés précédemment sur la Bassée aval, à l'aide de documents inédits et de méthodes qu'il serait ensuite pertinent d'étendre petit à petit le long du corridor fluvial pour aller au-delà de la description de l'évolution en plan par grands secteurs menée précédemment, et d'interroger l'ensemble des échelles grâce à l'outil SIG. Le travail présenté ici se propose donc :

- D'élaborer une méthodologie d'analyse quantitative de l'évolution de la morphologie sur deux siècles.
- D'améliorer la résolution de l'emplacement des tracés anciens en digitalisant à petite échelle le lit grâce à un géoréférencement robuste, sur lequel il est possible de revenir, sur des documents déjà connus comme sur des couches inédites.
- D'observer les variations d'amont en aval et de quantifier les changements de forme, sans sectorisation arbitraire du tracé, ce qui permet une analyse à toutes échelles.
- D'augmenter le nombre de paramètres morphométriques mesurés pour les comparer à d'autres travaux et cerner plus finement les caractéristiques de la forme en plan.
- De quantifier pour la première fois les modifications du profil en long dues à chaque phase de travaux depuis 1839.

2 Recherche et traitement des sources

2.1 Documents utilisés

La recherche d'archives de la forme en plan et du profil en long de la Seine a été facilitée par les travaux antérieurs, en particulier les documents qui avaient été repérés et commencés à être étudiés par F. Boyer, sans toutefois pouvoir être traités quantitativement. Ils ont ensuite été récupérés, ou du moins la mention de leur existence ou des extraits, par L. Lestel, ce qui a permis l'étude présentée ici.

2.1.1 Représentations planimétriques

Les documents utilisés sont tous des documents cartographiques, par souci de cohérence et afin d'éviter de mélanger des photographies aériennes, où la largeur du lit peut être faussée (Valette et Cunillera 2010, p. 70), avec la représentation du lit à plein bord des cartes. On dispose de cinq représentations de la Seine dans la Bassée aval (Figure 3) :

- Une carte au 1/5.000 du lit de la Seine et son entourage immédiat entre Nogent-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne. Ce document, associé à un profil en long, est conservé à la Bibliothèque Nationale de France (BNF, site Richelieu) sous la cote Ge BB 988. Selon les indications de la première feuille, cet ensemble a fait partie de l'Inventaire de l'Ingénieur en chef de la 2^e section de la Navigation de la Seine (n°1057), mais on ne connaît pas les auteurs du document. D'après De Cazenove (1997, p.13), ce document aurait été réalisé par M. Chanoine, ingénieur des Ponts et Chaussées. Cependant aucune mention sur le document consulté à la BNF ne permet de confirmer cette assertion. Les cartes sont au nombre de 10. Elles sont très détaillées et comprennent la ligne de thalweg, les rives, les îles, les bâtiments et les points kilométriques de l'époque. Aucune date de réalisation n'est précisée, mais elle a pu être déduite du profil en long. L'ensemble des documents date de 1839.
- Un « Plan général de la Vallée de la Seine entre Marcilly et Montereau » dressé par l'Ingénieur des Ponts et Chaussées Wender, qui le signe en 1888. Il a été retrouvé et photocopié par François Boyer au service de Navigation de la Seine de Nogent. Ce document au 1/50.000 a été mis à jour jusqu'en 1903 pour mentionner les travaux réalisés chaque année, et comporte donc de nombreuses mentions d'écluses ou de barrages. Cette carte est malheureusement moins précise, mais il s'agissait du meilleur document disponible, à notre connaissance, pour cette période, qui couvrait l'ensemble de la zone d'étude. Il avait de plus l'avantage de montrer un grand nombre

de points cotés dans le lit majeur, ce qui peut être intéressant pour observer l'évolution du comblement.

- Une série de 12 cartes IGN au 1/20.000 et une feuille au 1/50.000 permettant de compléter un manque, dont les levés datent de 1943. Elles font partie des cartes dites de « Type 1922 », levées à partir d'une nouvelle triangulation de la France et par photogrammétrie (Costa *et al.* 2009, p.61).
- Vingt cartes au 1/5.000 dont 18 réalisées à partir de levés de 1968 à 1971, et 2 de 1978, en amont de la zone d'étude et donc hors de portée des travaux de chenalisation à grand gabarit. Ces cartes très précises ont été réalisées à partir de photographies aériennes pour la région Île-de-France, dont l'urbanisation croissait alors très rapidement (Costa *et al.* 2009, p.71). Pour la partie de notre zone d'étude située dans le département de l'Aube, à l'amont de la Bassée aval, cette phase de relevés a été complétée par deux cartes IGN au 1/25.000 révisées en 1979, toujours dans une zone non touchée par la mise à grand gabarit. L'âge médian de ces documents étant 1970, on se référera dans la suite de ce travail à ce relevé comme étant celui de 1970.
- Le SCAN 25 de l'IGN, révision de 2010. L'échelle de cette carte est le 1/25.000.

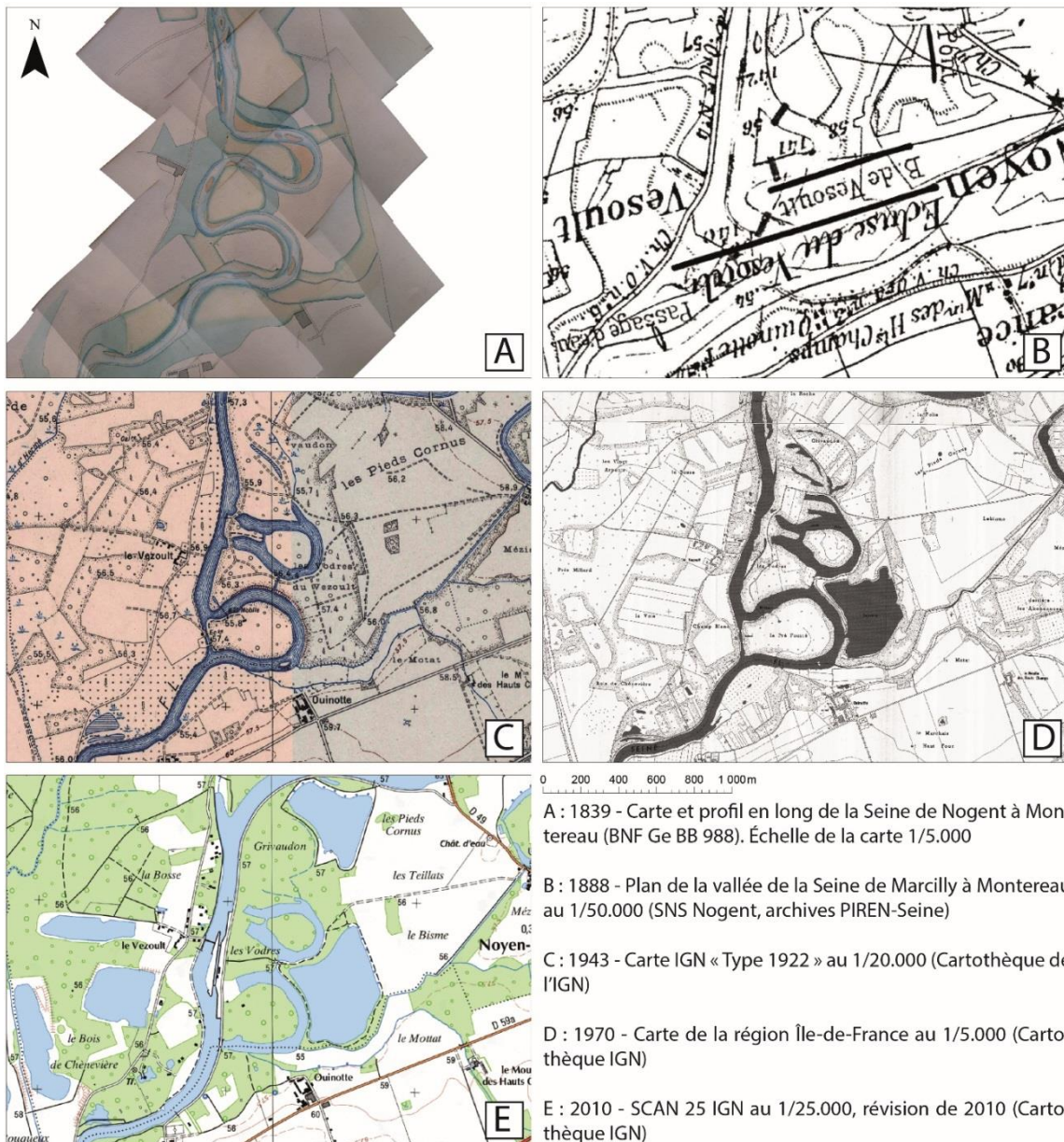


Figure 3 : Vue de la même emprise sur les cinq documents cartographiques utilisés

2.1.2 Représentations altitudinales

Ces données se sont présentées sous des formes différentes, à savoir trois profils en long et des fichiers de points de bathymétrie (Figure 4) :

- Le profil en long associé à la carte de 1839 (BNF Ge BB 988) comprend 10 feuilles couvrant une soixante de kilomètres de tracé entre Nogent et Montereau. Ce document est très précis, on compte en effet un point de mesure du fond du lit tous les 27 m en moyenne. En plus de la profondeur du fond, on note la présence de lignes représentant les altitudes des berges, ainsi que celles de la ligne d'eau et de bornes kilométriques espacées de 500 m les unes des autres. On note également de nombreuses indications sur les hauts-fonds, et la ligne d'eau projetée après la mise en place de barrages sur le cours. Le document est aujourd'hui recollé sur papier bristol, mais le papier d'origine est très fin, et parfois assez abîmé. On constate deux manques entre les PK 136 à 134 et 121 à 120, très vraisemblablement au niveau de plis. On a pu dater ce document de 1839 grâce à une mention manuscrite sur la dernière feuille du profil. Il avait été vu par F. Boyer et A. De Cazenove (1997), mais n'avait pu être décrypté étant donné le caractère peu évident de cet ensemble d'annotations juxtaposées. Ce document a nécessité un long traitement et une transcription minutieuse avant de servir à la présente étude. Dressé avant la première phase d'aménagements, il donne une image très différente de la Seine observable aujourd'hui.
- Un second profil a pu être retrouvé à la BNF (site François Mitterrand, FOL-V-3086 (6)). Il s'agit de données parues dans un ouvrage réalisé par les Ponts et Chaussées (1903) sur les voies navigables du territoire français. Le 6^e fascicule est consacré à la Seine en amont de Paris. En plus d'éléments historiques sur les aménagements réalisés dans le but d'améliorer la navigation, on y trouve de nombreuses planches illustrant ponts, écluses, et document particulièrement important ici, des profils en long de la Seine et de l'Yonne. Malheureusement, le profil entre Marcilly et Montereau est assez peu précis puisque l'échelle horizontale est au 1/100.000 tandis que l'échelle verticale est au 1/200. Par ailleurs, ce profil suit les dérivations nouvellement installées, pas le chenal de la Seine qui coule en parallèle de ces canaux. Les tronçons où l'on observe la bathymétrie du fleuve sont donc assez réduits. Il sera peut-être possible, à l'avenir, de trouver des documents plus précis, car le volume stipule que les figures ont été réalisées avec les documents fournis par les ingénieurs (Ponts et Chaussées 1903). Des documents plus précis ont donc pu servir à dresser ces profils très généraux. On trouve tout de même des informations importantes sur ce document, puisque la ligne d'eau à l'étiage, le fond et les berges sont figurés et cotés.
- Le troisième profil, daté de 2007, a été fourni par VNF, il s'agit des altitudes de la ligne d'eau, des écluses et des barrages entre Marcilly et Montereau. Les emprises des dérivations sont également indiquées sur ce document.
- Les dernières données ont également été confiées par VNF. Il s'agit de fichiers de points XYZ, autant de coordonnées dans les trois dimensions représentant la bathymétrie du lit mesurée entre 2009 et 2015. Cette représentation du lit était séparée en 70 fichiers différents qui couvrent le tracé de Montereau à Courceroy, village situé à 12 km en aval de Nogent-sur-Seine en suivant la Seine. Il y a donc un manque de données sur la partie amont de la zone d'étude, non couverte par la bathymétrie. Le lit principal de la Seine a été couvert, ainsi que certains méandres recoupés et des portions amont ou aval de dérivations. Ces données ont été extrêmement précieuses pour comparer les situations actuelles et passées.

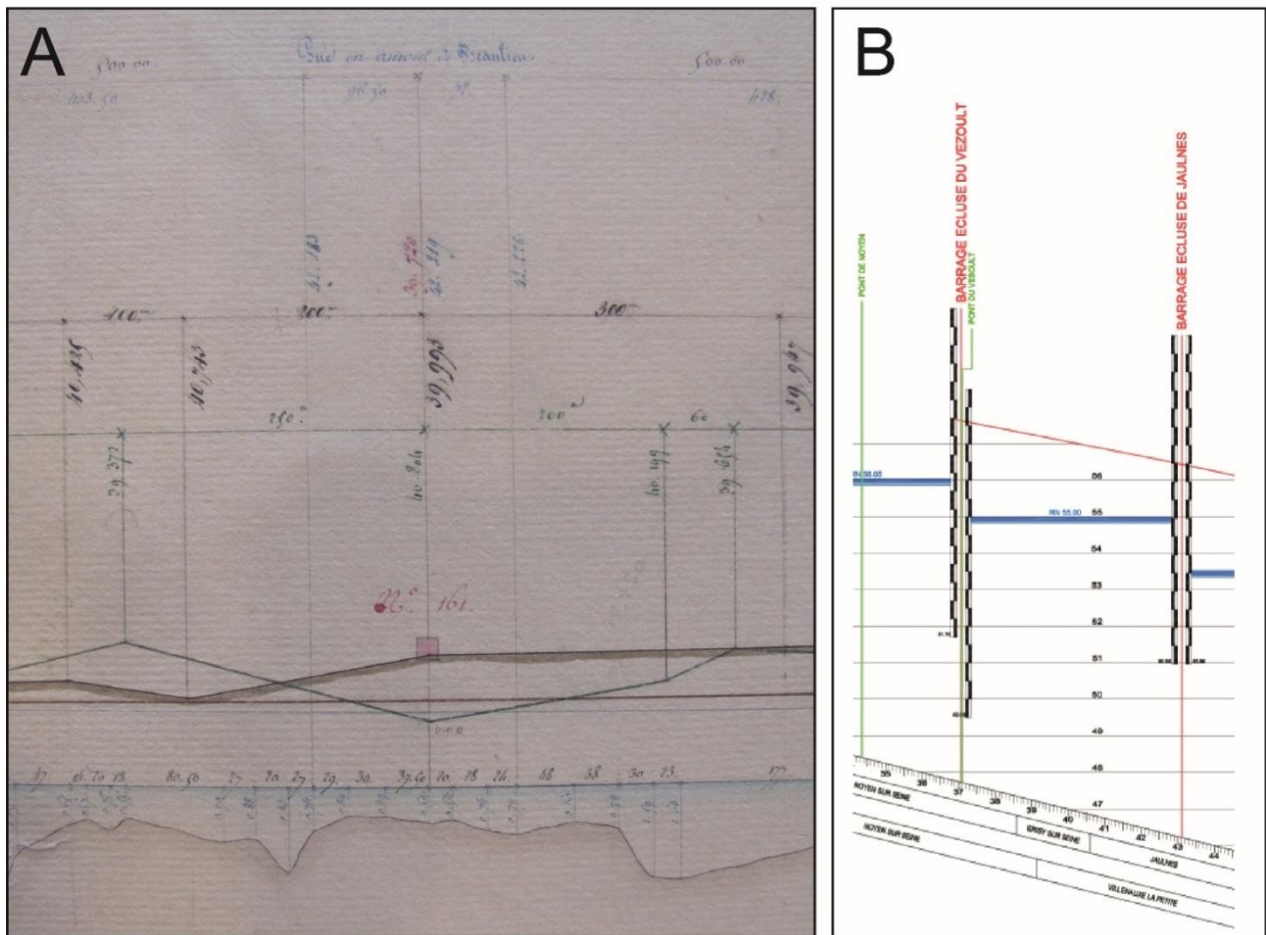


Figure 4 : Profils en long utilisés. A – Vue de détail du profil en long de 1839 (BNF Ge BB 988) ; B – Détail du profil en long de 2007 fourni par VNF ; C – Pages du profil de 1903 (Ponts et Chaussées 1903, planche II ; BNF FOL-V-3086 (6))

2.2 Traitement et normalisation des données

On peut constater que les sources interrogées ont fourni des données de natures et formats très disparates. Le plus gros du travail mené ici a donc été d'harmoniser et normaliser les informations pour pouvoir les comparer et obtenir des résultats quantitatifs.

2.2.1 Cartes

- Numérisation

La numérisation des documents de 1943, 1970 et 2010 a été assurée par l'IGN. Celle du plan de 1888 a été réalisée par L. Lestel, et les sept feuilles de la carte de 1839 ont été photographiées à la BNF. Cette opération a été choisie préférentiellement à une demande de numérisation par scanner en raison des travaux qui allaient avoir lieu au printemps 2016 sur le site Richelieu, empêchant l'accès au fond cartographique pendant un temps important. Un protocole de prise de vue a donc été mis en place pour corriger les déformations engendrées par le mode de numérisation. Il était impossible de prendre les planches en entier en un seul ou même une dizaine de clichés, car on perdait alors le niveau de détail du relevé originel et l'image était très déformée.

- Redressement et assemblage des cartes de 1839

Les clichés ont été réalisés dans un cadre rectangulaire de 10x16 cm, gradué tous les 5 mm, en centrant bien la prise de vue pour éviter la déformation. Les photographies obtenues ont ensuite été redressées sous le logiciel Adobe Photoshop et rassemblées pour reformer les planches entières. Il résulte de ces opérations des problèmes de contraste entre les différents clichés assemblés, erreurs inévitables étant données les mauvaises conditions d'éclairage lors des prises de vue.

- Géoréférencement

À l'exception du SCAN 25, aucun document ne disposait de coordonnées spatiales. Les différentes couches ont donc été géoréférencées à l'aide de points d'amer, c'est-à-dire en désignant les points communs entre le document ancien et le document de référence, ici le SCAN 25 de l'IGN, auquel on a parfois superposé le cadastre actuel (Conolly et Lake 2006, pp. 86-89 ; Grosso 2011). Le logiciel opère ensuite des transformations plus ou moins importantes pour superposer les points communs désignés. Il s'agit principalement de croisements de chemins, de bâtiments et dans une moindre mesure, de limites parcellaires reconnaissables. Il est bien entendu très important d'éviter de placer des points sur l'objet d'étude, à savoir le fleuve lui-même et ses rives, et de répartir le plus possible les points sur l'ensemble du document pour réaliser une déformation uniforme (Steinmann 2015). Le type de transformation et le nombre de points d'amer dépendent de la qualité du document d'origine. Certains auteurs estiment que l'erreur quadratique moyenne (QM) résultant d'une opération de géoréférencement ne doit pas dépasser 1/3.000 de l'échelle du document d'origine (Conolly et Lake 2006, p.83). Dans le cadre de ce travail, seule la carte de 1888 a dépassé cette valeur, l'emplacement des croisements étant parfois assez peu précis. L'erreur QM est de 30 m pour ce document pour une erreur souhaitable de 17 m. Sur l'ensemble des 43 fichiers traités la moyenne de l'erreur QM est 3,41. Les documents IGN de 1943 et 1970 ont été les plus simples à géoréférencer, car ils étaient quadrillés de coordonnées du système Lambert I, qu'il a simplement fallu convertir. Le document de 1839 a nécessité de nombreux points d'amer, jusqu'à 100, pour pouvoir être replacé convenablement. Le redressement opéré en amont sur les photos n'élimine en effet pas toutes déformations, qui n'ont donc été gommées qu'après le géoréférencement, du moins pour le centre de la carte, les bords du document étant moins utiles à l'analyse de la forme du lit (Figure 3). L'ensemble des points d'amer utilisés ont été stockés sous forme de fichier texte, ce qui permet de revenir sur le géoréférencement en cas de problème.

- Digitalisation et mesure des paramètres morphométriques

L'emplacement du chenal principal a été dessiné avec le plus de précision possible sur chaque carte. Le polygone représentant l'emprise du chenal principal comporte ainsi, en moyenne, 13500 points par document. Les paramètres morphométriques de la forme en plan, qui sont autant d'indicateurs de la dynamique au moment de l'élaboration du document, correspondent aux principales caractéristiques habituellement mesurées dans ce type d'étude et présentées dans les synthèses d'Allen (1982) et Malavoit et Bravard (2010). Les grandeurs ont été mesurées sous SIG puis analysées à l'aide du logiciel Excel (Figure 5).

L'emprise du chenal sert à dessiner l'enveloppe de méandrage, qui est constituée de l'ensemble des longueurs d'onde λ , qui est un indice du rythme auquel se succèdent les sinuosités. On mesure également l'amplitude A qui est la largeur de la bande de méandrage, ainsi que la moyenne de vingt mesures du rayon de courbure, qui est le segment séparant le centroïde d'une sinuosité et la ligne de thalweg. Cette dernière a été tracée au centre du chenal, sauf pour la carte de 1839 où la ligne de thalweg était dessinée plus précisément. Cette grandeur permet de mesurer l'élongation ou la rétractation du tracé à l'échelle de la Bassée aval, mais aussi de calculer l'indice de sinuosité I_s pour chaque méandre ou courbure du tracé. Cet indice est obtenu en divisant la longueur du chenal entre deux points d'inflexion par la distance qui sépare ces derniers à vol d'oiseau. On la calcule également à l'échelle de l'ensemble du tracé de la Bassée aval. La position des points d'inflexion a été déterminée en croisant la base des segments d'amplitude A avec la ligne de thalweg. C'est au niveau des points d'inflexion qu'est mesurée la largeur du lit, cette position évitant de mesurer des surlargeurs (Malavoi et Bravard 2010, p.65).

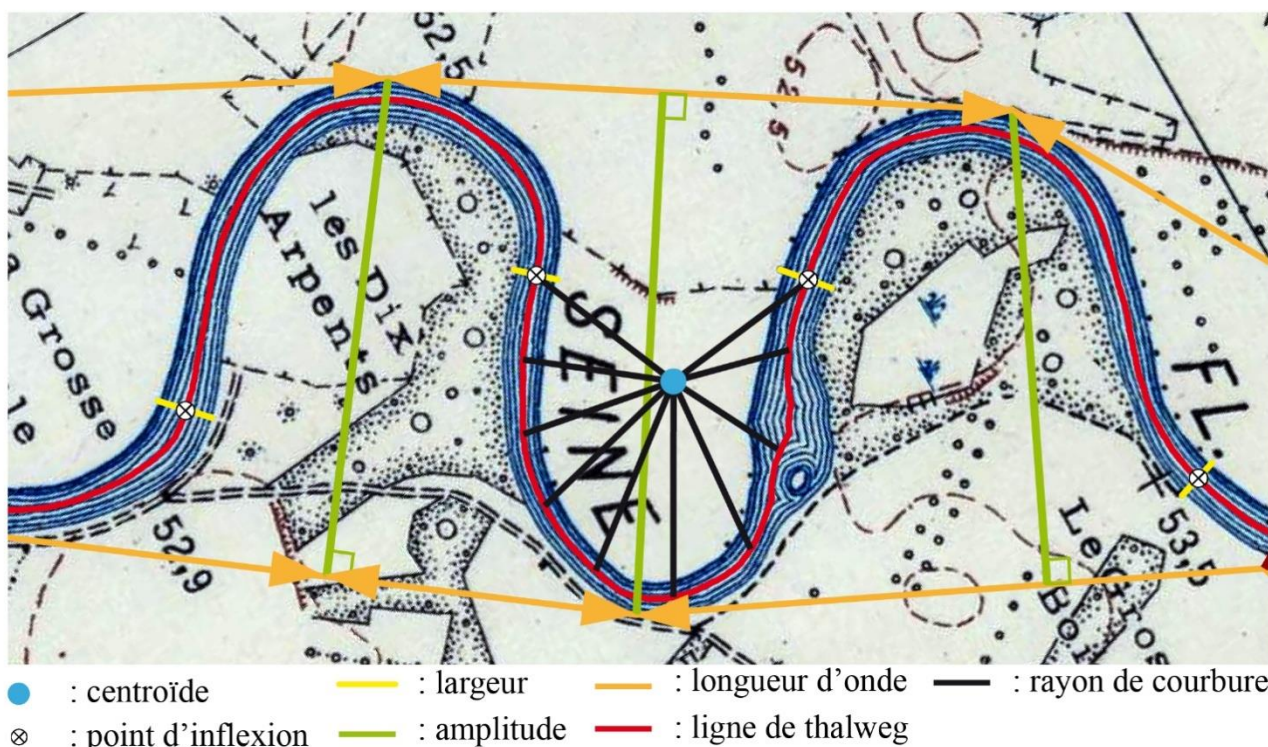


Figure 5 : Paramètres morphométriques mesurés

2.2.2 Profils en long

- Décryptage des informations

La première étape du travail consiste en la compréhension des informations portées sur le document. On prendra d'abord le cas du profil de 1839, qui s'est révélé extrêmement difficile à décrypter (Figure 4-A), raison pour laquelle il n'avait été que sommairement traité dans le travail d'E. De Cazenove (1997). Cependant, l'observation de l'ensemble des feuilles permet, petit à petit, de décrire et comprendre ce document qui représente 66 km de tracé, entre les bornes kilométriques échelonnées de 166 (Nogent) à 100 (confluence avec l'Yonne). On distingue tout d'abord la ligne de fond, séparée de la surface de l'eau par une hauteur d'eau qui varie le long du profil. La ligne supérieure correspond en effet, selon une mention, à la « pente à la surface de l'eau ». Une note manuscrite au crayon sur une des feuilles, recensant des altitudes lors de différents régimes hydrologiques, a permis de déduire qu'il s'agit de la ligne d'eau à l'étiage en 1839. Des chiffres placés à la surface de l'eau indiquent les écarts de mesure entre les différentes lignes verticales qui représentent les mesures de profondeur. Les cotes du plan d'eau à l'étiage sont indiquées sur toutes les bornes semi-kilométriques en bleu, tandis que le chiffre rouge représente l'altitude de la borne elle-même. D'autres valeurs de la cote à l'étiage sont indiquées au niveau des gués ou « baissiers », nombreux en 1839 sur cette portion de la Seine. Les lignes vertes et noires (avec un trait brun), ainsi que les chiffres qui y sont associés, représentent les altitudes des berges ainsi que les distances séparant les points de mesure. La

ligne verte représente la rive gauche jusqu'au demi-kilomètre 131,5, après lequel c'est la ligne noire qui représente la rive gauche. Une erreur est certainement à l'origine de cette inversion, mais elle a vraisemblablement forcé les auteurs à écrire quelle rive était laquelle avant l'inversion, ce qui nous permet à notre tour de savoir quelle ligne correspond à quelle berge. Sont enfin mentionnés, tout en haut de la feuille et en plus des gués, les différents ponts rencontrés ainsi que quelques points remarquables (arrivée d'un affluent, ancienne écluse, marque de crue).

Pour le profil en long de 1903, les choses étaient bien moins complexes puisqu'il s'agit d'un ouvrage édité, avec des légendes ne laissant pas planer de doute quant à la signification des figurés portés sur le document (Figure 4-C). Le profil en long de 2007 ne présentait également pas de difficulté d'interprétation, d'autant plus que les informations importantes dans notre cas se limitaient aux écluses et à la ligne d'eau à l'étiage (Figure 4-B). Les fichiers de la bathymétrie enregistrée entre 2009 et 2015 ne posaient pas de problème non plus, à part pour ce qui était de leur système de coordonnées sur lequel nous allons revenir (Figure 6).

- Transcription et calage des données dans l'espace

Une fois les informations comprises, il a fallu les retranscrire pour pouvoir les traiter numériquement. Le plus gros du travail a une nouvelle fois concerné le profil en long de 1839. Les valeurs numériques ont systématiquement été saisies dans un tableur qui visait à remettre toutes ces données dans un même repère, notamment pour disposer d'un axe des abscisses continu et non pas remis à zéro à chaque point kilométrique comme c'est le cas sur le document original. Par ailleurs, il fallait également calculer l'altitude des cotes du fond, uniquement référencées par rapport à la ligne d'eau à l'étiage qui était, elle, cotée en altitude tous les demi-kilomètres. Les mentions de gués ou de points remarquables ont également été intégrées au tableau de transcription. La taille des caractères du document original, la plupart du temps de quelques millimètres de haut, associée au mauvais vieillissement de l'encre, ont rendu ce travail particulièrement long.

Tableau1 : Transcription du profil de 1839

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Pk	Z Pk (ref)	Z étiage (ref)	Tranche d'eau		Berge noire		Berge verte		Annotations et aménagement divers		
2				Dist X/pts	H eau	Dist X/pts	Z (ref)	Dist X/pts	Z (ref)	Dist X cum	Z (ref)	Texte
213				29	0,49							
214				30	0,49							
215				37,5	0,69							
216	161	39,72	42,219	0	0,69		39,993		40,804			
217				20	0,54	300	39,947	200	40,199	72	42,228	Fin Gué en amont de Beaulieu
218				28	0,74	200	39,901	60	39,654			
219				24	0,79			240	39,963			
220				48	0,6							
221				38	0,54							
222				30	1,59							
223				23	1,64							
224				177	0,88							
225				77	1,1							
226				35	2,24							
227	160,5	39,682	42,236	0	2,24		39,901		39,963			
228				9	2,24	200	40,213	40	40,38	187,6	42,312	Début Gué en aval de Beaulieu
229				12	0,92	300	40,162	200	40,257	443,6	42,489	Fin Gué en aval de Beaulieu
230				6	2,32			200	39,949			

Le profil en long de 1903 a également été retranscrit sur un tableau similaire. Toutefois, on ne disposait pas cette fois des chiffres qui avaient servi à construire le profil. Il a donc fallu reprendre le document original et mesurer les distances entre les points à la main et les convertir selon l'échelle du document. L'échelle des X était de 1/100.000 et l'échelle des Y de 1/200. Une certaine imprécision était donc attendue quant aux données de ce profil. Il était cependant particulièrement important de le traiter pour évaluer les modifications induites par la première phase d'aménagement, entre 1850 et 1900.

Le profil en long de 2007 a été transcrit de la même façon que celui de 1903, à la différence que le fichier fourni était sous forme numérique, et que les longueurs des segments séparant les données pouvaient donc être mesurées très précisément. Du reste, ce document a pu être traité assez rapidement car seule la ligne d'eau à l'étiage, les canaux de dérivation ainsi que les cotes et emplacements des écluses étaient pertinents dans le cadre de ce travail.

Les données bathymétriques ont toutefois nécessité un traitement assez long. En effet, les fichiers fournis ne couvraient chacun qu'une petite emprise, et certains d'entre eux étaient exprimés dans le système de

coordonnées planaires Lambert II étendu. Il a donc fallu projeter ces mesures dans le système Lambert 93 pour pouvoir les comparer aux autres données bathymétriques, ainsi qu'aux autres données de ce travail, toutes référencées dans ce système. Tous les fichiers de données XYZ ont ensuite été fondus en un seul fichier de points, et ce dernier transformé en modèle numérique de terrain (MNT). Les différentes campagnes de relevé n'avaient pas la même résolution, probablement en raison de l'appareillage utilisé. Les pixels du MNT final mesurent deux mètres de côté, cette résolution offrant le meilleur compromis entre le maillage des données les plus précises et les relevés les plus lâches sans avoir besoin de trop interpoler ces derniers. La réalisation du MNT a permis de tracer la ligne de thalweg de la Seine actuelle (Figure 6).

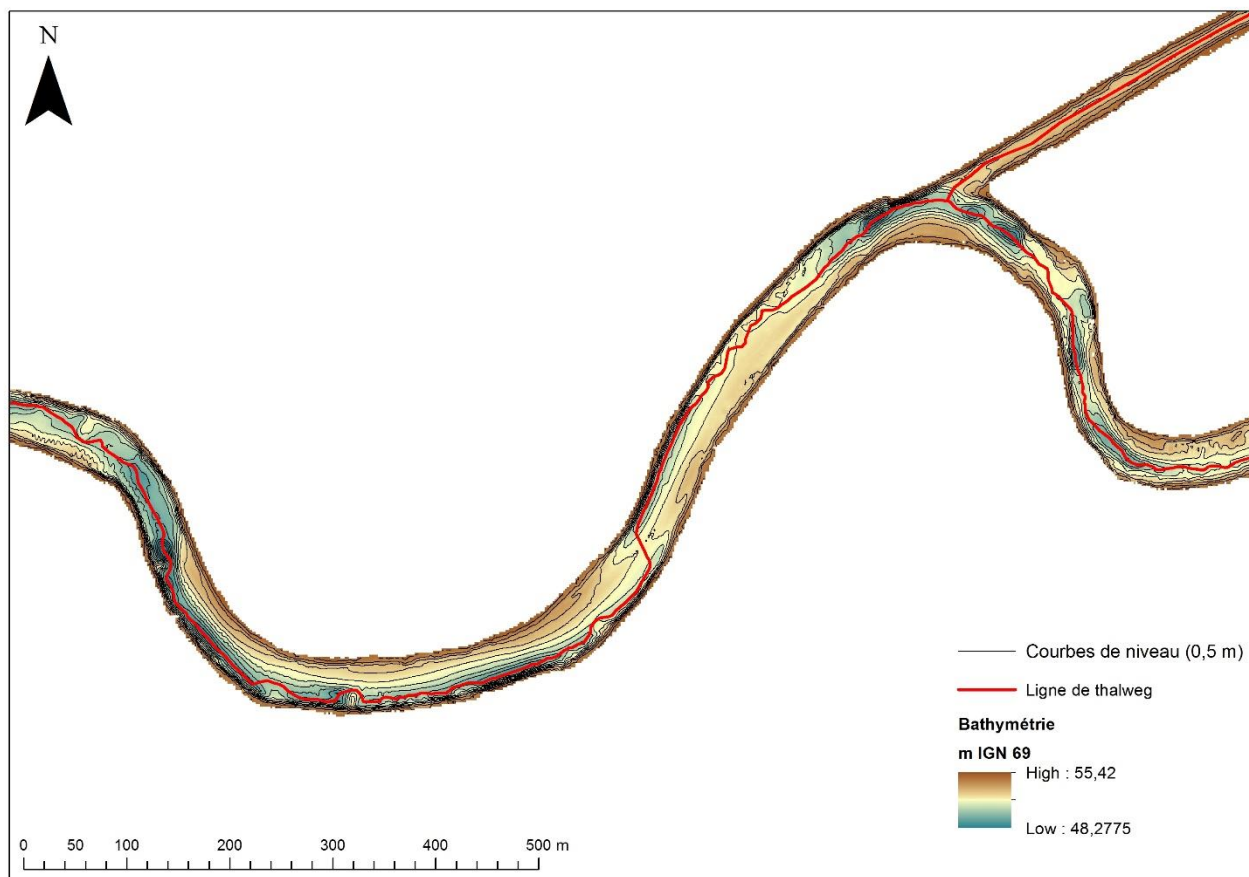


Figure 6 : Modèle numérique de terrain réalisé et ligne de thalweg tracée à partir des données VNF

- Conversion des altitudes vers le référentiel IGN 69

Les données des profils de 1839 et 1903 n'étaient pas exprimées dans le système de référence actuel des altitudes, et il fallait donc convertir ces valeurs pour pouvoir comparer les données anciennes au profil de 2007 et à la bathymétrie.

Une fois de plus, c'est le document de 1839 qui s'est avéré le plus complexe à traiter. En effet, aucune indication n'est donnée quant aux altitudes exprimées, de l'ordre de la quarantaine de mètres. L'examen attentif du profil révèle que ces valeurs correspondent à des hauteurs sous un axe de référence, représenté en partie haute des feuilles (Figure 4-A). Pour retrouver la valeur de cet axe, on s'est tourné vers les bornes semi-kilométriques présentes sur le profil, dont la valeur en rouge exprimait également la hauteur les séparant de l'axe de référence. Ces bornes ont pour la plupart disparu, mais certaines sont encore présentes dans le serveur de fiches géodésiques de l'IGN¹, où leur altitude est exprimée en m IGN 69. Par ailleurs, ce service de l'IGN met également à disposition des profils en long de la ligne d'eau relevés dans la première moitié du 20^e siècle². Ces documents se basent sur un certain nombre de points de référence qui sont indiqués en marge des profils. Ces données ne sont pas exprimées en IGN 69, mais ont été corrigées par la suite à

¹ Disponible à l'adresse suivante : <http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>

² Disponibles à l'adresse suivante : http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils

l'encre rouge pour donner les valeurs dans ce système. On dispose ainsi de 32 bornes dont l'altitude est exprimée en IGN 69. Par une simple addition, il est possible de calculer à quelle altitude se situe l'axe de référence selon chacune des bornes. Ce travail montre que 80% des altitudes ainsi calculées se situent entre 101,24 et 101,51 m IGN 69 (Figure 7). On a donc choisi la valeur médiane comme altitude de l'axe de référence. L'écart à cette valeur est, en moyenne, de 2,3 cm, ce qui est une bonne précision sur un tracé de soixante kilomètres. On a donc recalculé toutes les altitudes du profil de 1839 à partir de cette valeur médiane. Postérieurement à ce travail de conversion des altitudes, un profil en long moins détaillé, réalisé à partir des données du document original, a été observé aux Archives Nationales et apportent des informations complémentaires sur le niveau de référence (AN F/14/6749). En réalité ce dernier correspond au « Plan du niveau passant à 50 mètres au-dessus du niveau légal du bassin de la Villette ». Les deux points géodésiques les plus proches de la surface du bassin de la Villette sont en accord avec cette mesure. Ils sont à une altitude de 52,5 et 52,8 m NGF, sur la berge, tandis que notre référence se trouve à 101,3215-50 soit 51,321 m NGF. Les deux points géodésiques de la berge sont donc 1,2 à 1,5 m au-dessus du niveau légal du bassin en 1839. Sans être aussi précise que la valeur obtenue grâce aux bornes IGN, cette indication confirme que l'on n'a pas réalisé d'erreur majeure dans la conversion des données.

Le document de 1903 présentait des valeurs exprimées dans le système Lallemand. La conversion des données a été assez facile, puisque la consultation du personnel du service Géodésie de l'IGN a permis de montrer qu'une simple soustraction de 30 cm aux valeurs exprimées en Lallemand permettait, dans ce secteur, d'obtenir les valeurs en IGN 69 avec une bonne précision, de l'ordre du millimètre, ce qui est amplement suffisant pour un document dont l'échelle verticale est au 1/200.

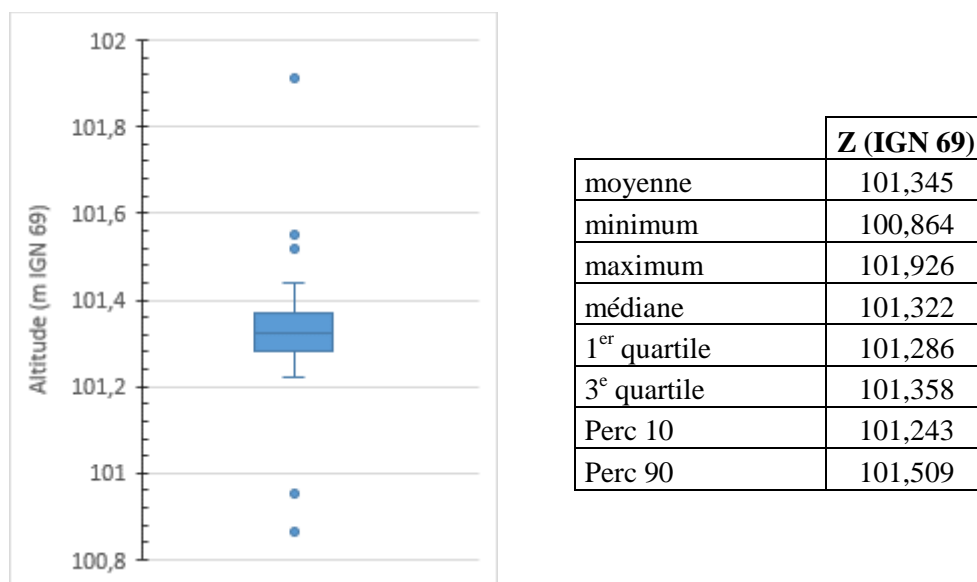


Figure 7 : Variabilité des valeurs possibles de l'axe de référence d'après les données IGN

2.2.3 Définition d'un axe de référence

Un des problèmes inhérents à l'étude morphométrique en plan comme à celle des profils en long est la représentativité des comparaisons des tracés d'une date à l'autre (Malavoi et Bravard 2010, p.169). Comme l'emplacement du lit change, il est en effet difficile de comparer une mesure réalisée en un point de coordonnées données avec un point mesuré nécessairement à un emplacement différent en raison du déplacement du chenal. Ce problème est parfois résolu en divisant le lit majeur d'amont en aval en segments (David 2016, p. 86), l'évolution étant alors mesurée dans chaque tronçon. Cependant, comme les paramètres d'évolution morphologiques sont interdépendants, la subdivision arbitraire du système hydrologique et de sa vallée n'est pas toujours pertinente (Alber et Piégay 2011, p. 358). Si par exemple une boucle de méandre, entièrement comprise dans un compartiment sur une carte ancienne, évolue et se retrouve par la suite à demi sur le compartiment suivant, la sinuosité de chaque compartiment est modifiée sans que l'on prenne en compte l'évolution de la forme elle-même, la sinuosité sera, dans ce cas, diluée dans deux tronçons distincts. Pour les profils en long, on prend souvent comme référence les points kilométriques, auxquels on rattache les valeurs d'altitude mesurées (Parrot 2015, p110). Toutefois, cette méthode est adaptée à des études globales,

mais manquent de précision à l'échelle infrakilométrique, et peuvent faire perdre des distances importantes en cas de changement important du tracé (Malavoi et Bravard 2010, p.169). Pour cette raison et dans notre cadre d'étude, où l'on dispose de données fines pour 1839 et la période actuelle, ainsi que pour tout projet dans lequel on cherche à comprendre les modifications survenues au sein même des sinuosités, il convient de trouver une méthode permettant de reporter les valeurs dans un repère commun.

Cette problématique, qui se pose autant pour les données en plan que pour les profils, nous a poussé à élaborer une méthodologie spécifique. Elle repose sur la mise en place d'un axe de référence pouvant être utilisé pour reporter l'ensemble des mesures sans déformer l'écart relatif entre ces dernières. Un point mesuré correspond ainsi toujours à une abscisse donnée. Cet axe de référence est la ligne qui passe par le centre de du lit majeur et définie par les travaux précédents du PIREN-Seine (Gaillard *et al.* 2005). Son origine est ici définie par l'entrée dans la zone d'étude et se termine à la sortie de celle-ci.

Pour les données des profils en long, on génère, *via* les distances qui les séparent, les points de mesure sur la ligne de thalweg du document planimétrique le plus proche temporellement (Figure 8-A) : la carte de 1839 pour le profil contemporain, la carte de 1888 pour les données de 1903 et la ligne de thalweg du MNT de la bathymétrie actuelle. On a donc, en plan, la position des altitudes que l'on vérifie au niveau de points remarquables (ponts et écluses par exemple). Les points situés aux emplacements des mesures de la morphologie en plan et les points des profils en long sont reportés sur l'axe de référence par le biais de segments perpendiculaires à cet axe (Figure 8-B). Ces segments autorisent ensuite la génération des points reportés le long de l'axe de référence, et l'on acquiert ensuite la distance de chaque position par rapport à l'origine de l'axe de référence (Figure 8-C). Il est ensuite possible d'interpoler les valeurs des différents points pour avoir des abscisses X régulièrement espacées et ainsi comparer les données dans le temps (Figure 8-D). Il a ainsi été possible de calculer l'approfondissement du fond du lit au entre 1839 et 2015 tous les 50 m.

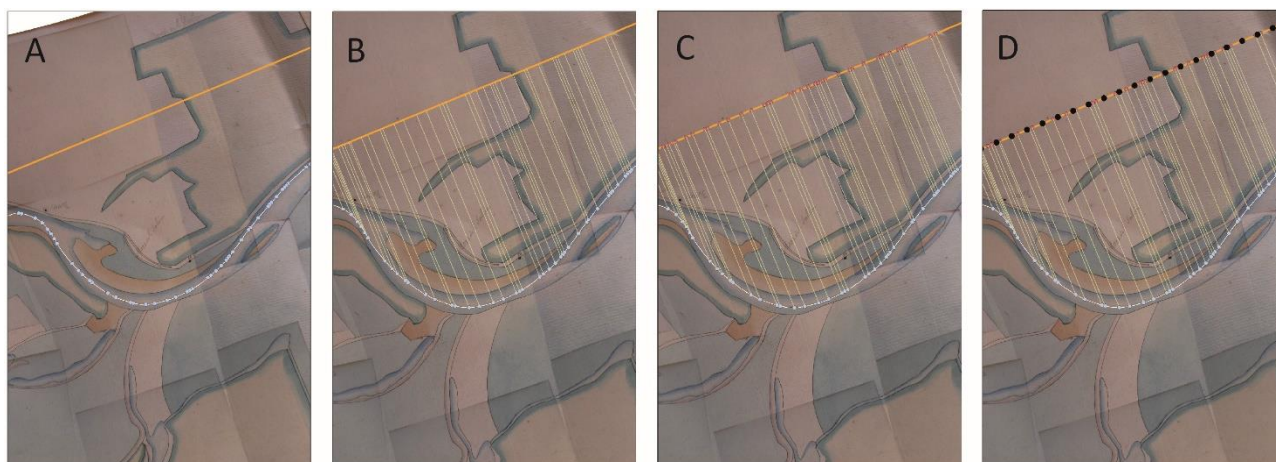


Figure 8 : Report de la position des mesures sur l'axe médian de la vallée

Le principal intérêt de cette méthode est d'éviter l'utilisation de points arbitraire entre lesquels on déforme l'espacement entre les données, puisque qu'avec l'axe de référence, chacune des mesures effectuées correspond à une coordonnée en X. Par ailleurs, cette méthode permet d'étendre les mesures aux paléochenaux de la plaine alluviale, puisque l'axe de référence suit la direction de l'incision postglaciaire. Pour illustrer l'intérêt de la méthode ainsi que le travail de transcription des profils en long, les représentations finales de chaque mesure replacée par rapport à l'axe de référence ont été regroupées par date de document (Figure 9).

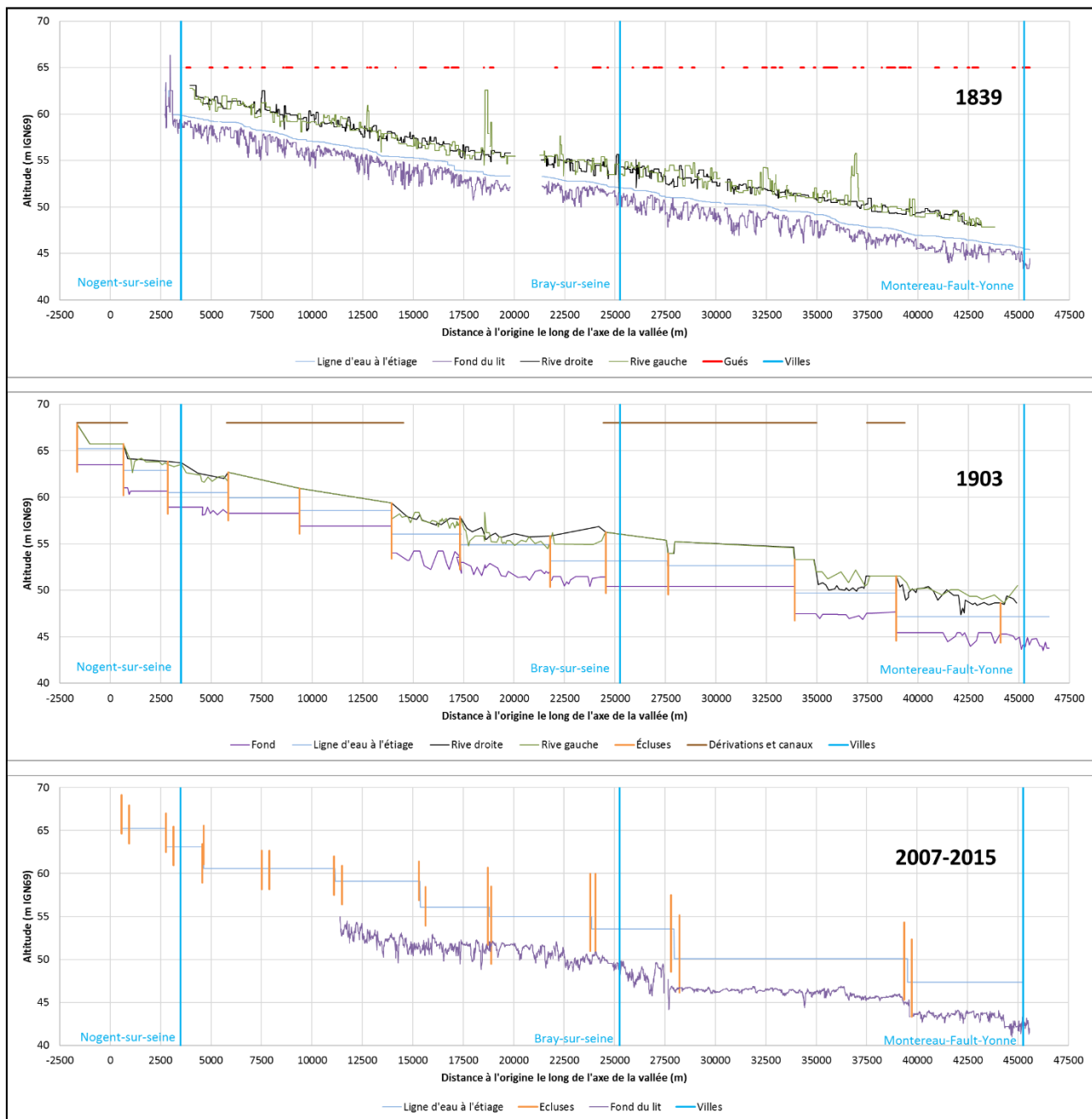


Figure 9 : Résultats de la normalisation et des profils en long et du report sur l'axe de référence

3 Résultats obtenus

3.1 Transformations de la forme en plan

3.1.1 Amplitude, longueur d'onde et rayon de courbure des sinuosités

L'amplitude des sinuosités indique la capacité de la bande active à migrer latéralement. Dans le cas de la Bassée aval, ces valeurs oscillent plutôt entre 200 et 600 m (Figure 10-A). L'amplitude médiane est tout d'abord assez faible, puis augmente en 1888 avant de diminuer petit à petit jusqu'à la période actuelle. La première augmentation pourrait être liée à la faible résolution du plan de 1888, mais cette hypothèse semble peu probable au regard de la faible diminution ultérieure, tout à fait compatible avec une valeur haute en 1888. Il est possible qu'entre 1839 et 1888, le fleuve soit assez dynamique et cherche à élargir sa bande de méandrage, tandis que la légère diminution postérieure indiquerait une baisse d'énergie.

La longueur d'onde médiane varie très peu au cours des deux derniers siècles, et tourne autour d'une valeur de 1000 m (Figure 10-B). Elle est légèrement plus importante en 1888, mais la principale variation observable est la présence de valeurs importantes entre 1970 et 2010. La simplification du tracé lors de la chenalisation à grand gabarit a en effet augmenté considérablement la distance entre les apex des sinuosités à l'aval de Bray-sur-Seine.

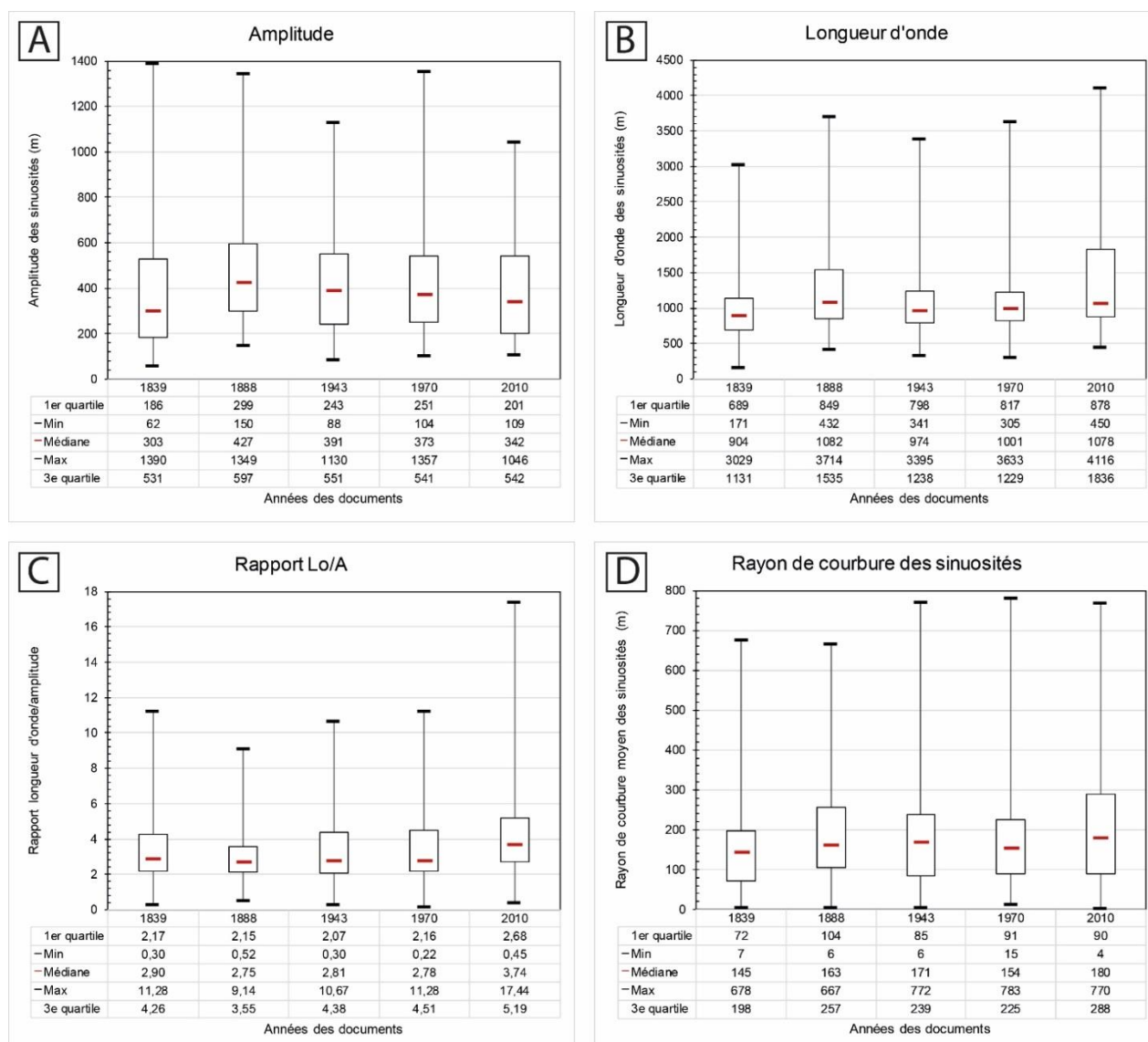


Figure 10 : Valeurs de l'amplitude, de la longueur d'onde, du rapport amplitude/longueur d'onde et du rayon de courbure moyen au cours du temps

Le rapport Lo/A, qui donne une idée de la forme en plan des sinuosités, est plutôt constant de 1839 à 1970. Il montre que les sinuosités sont, à la médiane, 2,7 à 2,9 fois plus développées vers l’aval que latéralement. Ce type de rapport peut traduire la présence de berges relativement cohésives, forçant les sinuosités à migrer plus facilement vers l’aval que latéralement. Après 1970, le rapport Lo/A est largement modifié par la chenalisation qui fait passer la valeur médiane à 3,7.

Le rayon de courbure moyen montre une très grande variabilité sur l’ensemble de la période. La valeur médiane augmente de 1839 à 1943, diminue en 1970 avant d’augmenter en 2010, toujours en raison de la présence des chenaux rescindés en aval, qui sont très rectilignes et possèdent donc des valeurs de Rc très fortes à leur amont et leur aval.

3.1.2 Largeur du chenal

La largeur médiane du lit de la Seine a diminué de 24 % entre 1839 et 2010, mais elle a commencé par augmenter après la première phase d’aménagements. L’augmentation de la largeur du lit entre 1839 et 1888 pourrait être causée par l’échelle peu précise du document de 1888. Toutefois, la différence d’une dizaine de mètres que l’on observe sur la largeur médiane est très probablement également la conséquence de la mise en eau des barrages, qui font remonter la ligne d’eau dans le fleuve.

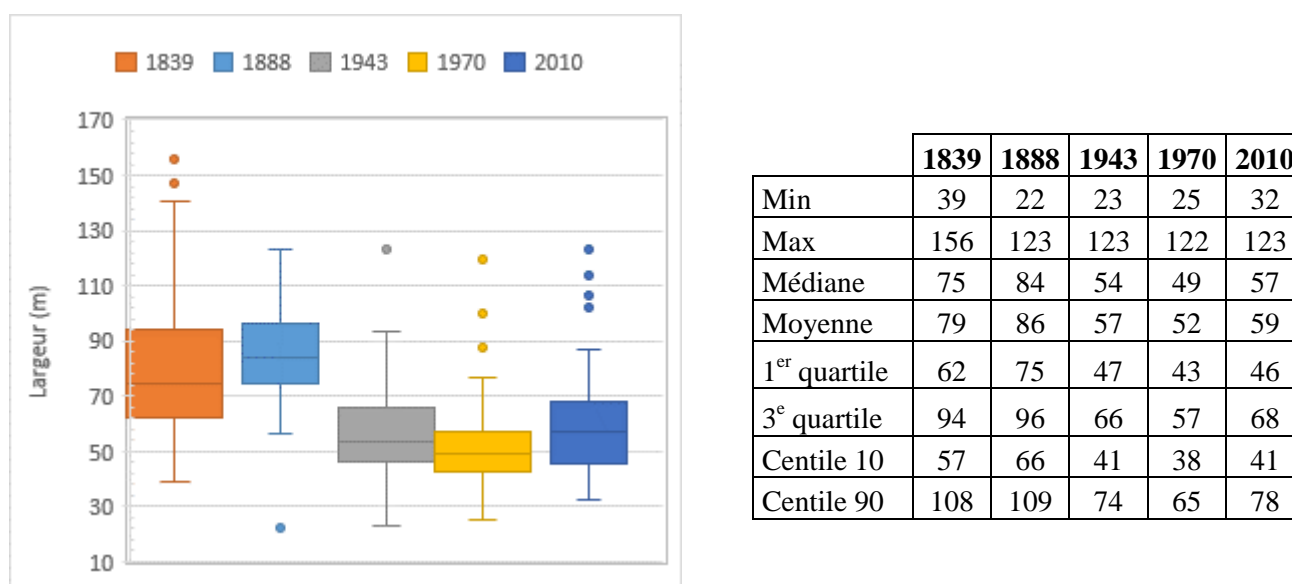


Figure 11 : Largeur du chenal principal au cours du temps

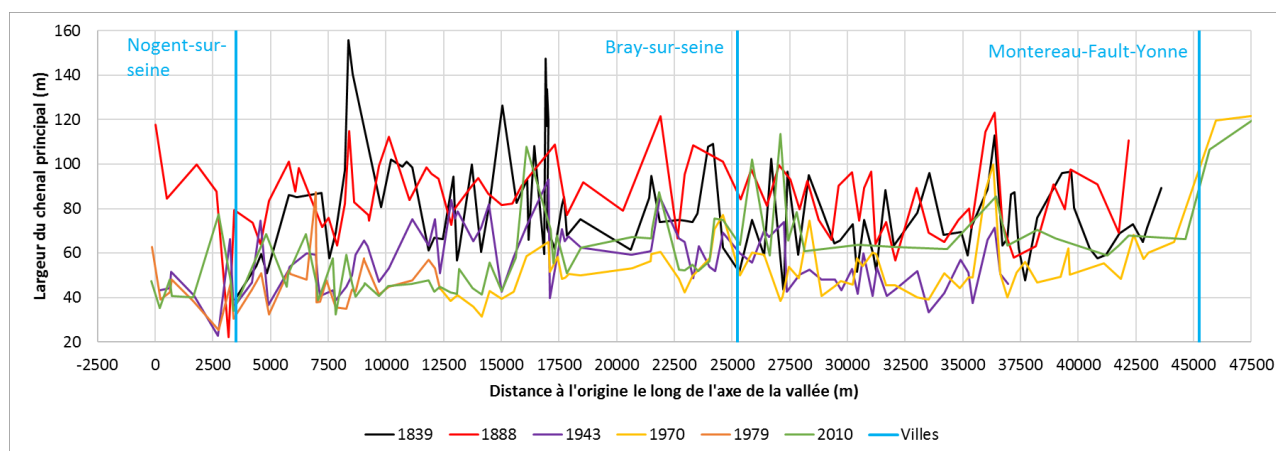


Figure 12 : Largeur du lit de la Seine d’amont en aval au cours des deux derniers siècles

Entre 1888 et 1943, la largeur médiane du lit diminue de 30 m (36 %), phénomène qui se poursuit jusqu’en 1970. Cet approfondissement du lit est soit le signe d’un enfoncement, soit une diminution de la quantité d’eau dans le fleuve. Cette dernière hypothèse est peu vraisemblable, le niveau étant contrôlé pour garantir la

navigation. Les valeurs actuelles de la largeur montrent une augmentation de 14 % de la valeur médiane. Cette croissance est due à la chenalisation à grand gabarit de la Seine, principalement en aval de Bray, où le lit a été élargi de 10 à 20 m (Figure 12).

3.1.3 Rapports à la largeur

La largeur du lit actif est un paramètre important qui sert à calculer des rapports adimensionnels reflétant la dynamique du cours d'eau. Les comparaisons et valeurs de référence évoquées ici sont issues de la synthèse élaborée par Malavoi et Bravard (2010).

Le rapport longueur d'onde/largeur est en moyenne compris entre 8 et 15, avec une médiane entre 10 et 12. Sur la Seine, la valeur médiane de ce rapport augmente sur toute la période 1839-2010 (Figure 13-A). Il est déjà situé dans la fourchette haute en 1839, et termine bien au-dessus des valeurs moyennes. Cette valeur forte peut être due à des berges assez cohésives, probablement plus argileuses que sableuses, qui empêchent la largeur d'être trop importante. Le lit aurait alors tendance, du moins sur la période 1839 à 1970, à s'enfoncer.

Le rapport amplitude/largeur s'échelonne le plus souvent entre 5 et 20, avec une médiane de 10 à 12 sur des cours d'eau peu anthropisés. Il est normalement plutôt faible sur les cours d'eau actifs et peu sinueux, et fort sur les systèmes sinueux et étroits. Dans le cas de la Bassée aval, la valeur médiane de ce rapport augmente sur la période 1839-1970, puis diminue légèrement en raison de la diminution de l'amplitude sur les secteurs rescindés (Figure 13-B). Les valeurs sont ici dans la fourchette basse, alors que la Seine est plutôt sinueuse. Ce fait montre que l'amplitude est très faible sur ce secteur, car même la diminution de la largeur ne fait pas beaucoup progresser ce rapport. Il faut probablement une fois de plus se tourner vers la nature des berges, dont la cohérence limite l'extension latérale de la bande active, pour expliquer ce phénomène.

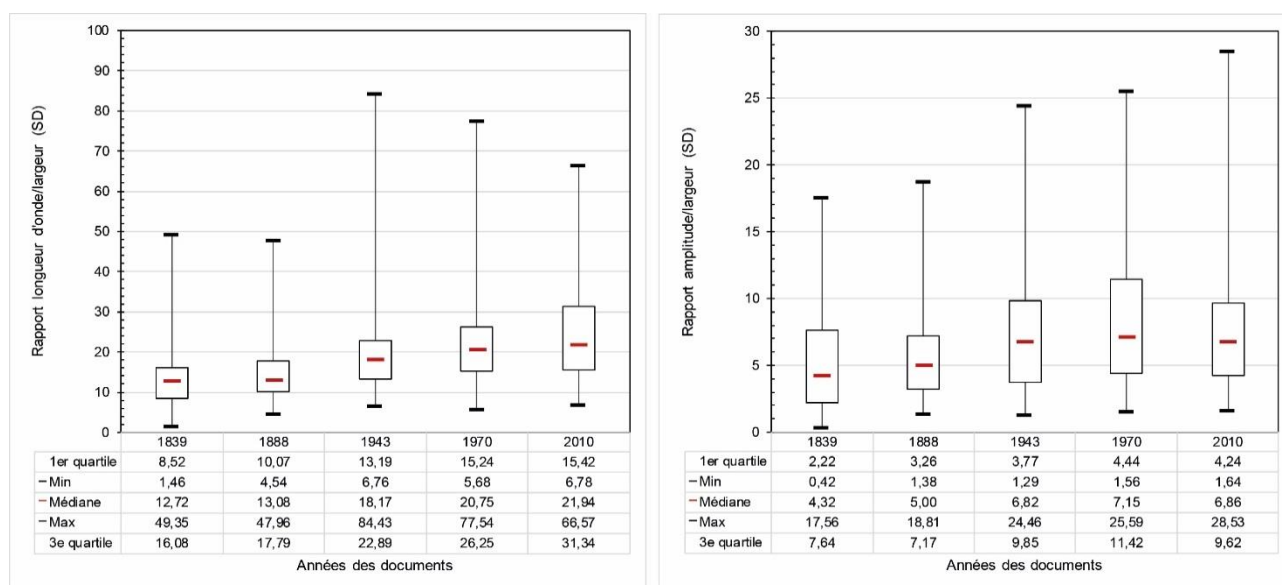


Figure 13 : Évolution des rapports Lo/w et A/w au cours du temps

Le dernier rapport à la largeur concerne le rayon de courbure, et indique le degré de maturité d'un méandre. Les taux d'érosion les plus importants sont le plus souvent associés à un rapport d'une valeur comprise entre 2 et 3 environ. Dans le cas de la Bassée, ces valeurs sont tout à fait celles que l'on retrouve tout au long de la période étudiée, et qui augmentent légèrement au cours du temps (Figure 14). On aurait donc des sinuosités plutôt actives. L'effet des aménagements se sent surtout ici après 1970, quand le rayon de courbure moyen augmente et fait chuter le rapport, malgré l'augmentation de la largeur suite aux travaux.

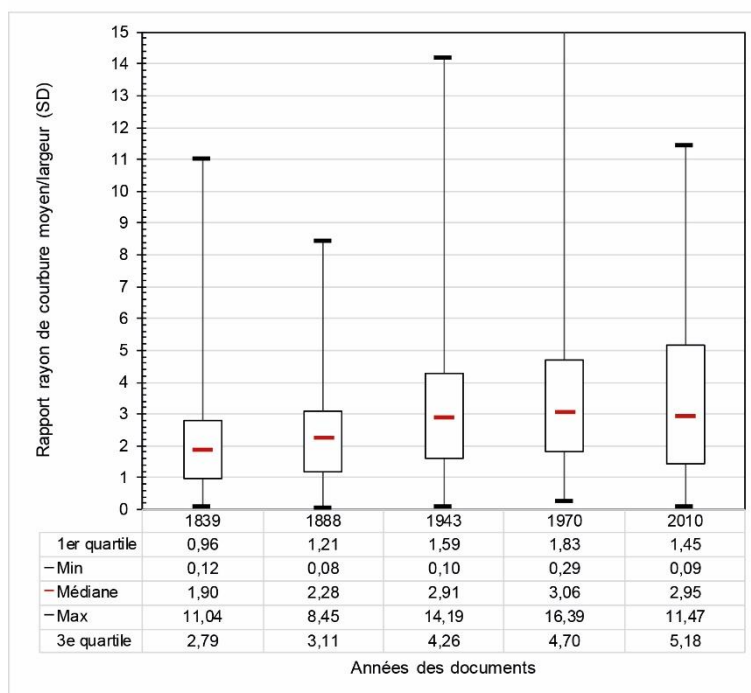


Figure 14 : Évolution du rapport R_c/w au cours du temps

3.1.4 Sinuosité et longueur de la ligne d'eau

L'évolution de l'indice de sinuosité au cours des deux derniers siècles montre une assez bonne correspondance avec les principales phases de travaux d'amélioration de la navigation (Figure 15). En effet, ces dernières ont pour effet de diminuer la sinuosité globale du tracé, tandis qu'en l'absence de travaux importants, entre 1888 et 1971, le système redevient méandrique. L'indice I_s diminue fortement après les travaux de chenalisation à grand gabarit débutés dans les années 1970, et ce en raison des nombreux recoupements de chenaux qu'ils ont provoqués.

Les modifications de la longueur du chenal principal montrent encore plus clairement la portée des modifications opérées par les diverses phases de travaux (Figure 11-B). Entre 1839 et 1888, la ligne de thalweg diminue d'un kilomètre, ce qui correspond exactement au recoupement très important opéré sur le méandre amont du Vezoult (Figure 3-B). En effet, si les autres recoupements ont simplement consisté en la mise en place d'un canal au niveau de l'ombilic des méandres, celui-ci a vu le percement d'un nouveau chenal de taille similaire à l'ancien lit. Cette opération a eu lieu vers 1860 (Fustecet *al.* 2001, p.12). La ligne de thalweg est donc restée relativement fixe entre 1839 et 1888, ce qui est probablement un effet cumulé de la protection des berges, du recoupement et d'une dynamique relativement faible. Ces observations tendent à faire penser que, même si le tracé de 1888 est peu précis, il permet tout de même d'étudier la forme générale de la Seine, qui montre des caractéristiques distinctes des périodes précédentes et postérieures, mais cohérentes en termes de fonctionnement hydrogéomorphologique.

Entre 1888 et 1943, cette dynamique semble reprendre, le chenal gagnant six kilomètres en 55 ans. Cette progression de 9,3 % de la longueur totale (111 m.an^{-1}) est à rapprocher des données obtenues par J.-G. Dzana sur le tracé Conflans-Montereau, où l'élongation atteint 14,7 % (174 m.an^{-1}) entre 1828 et 1945, avec un secteur plus mobile en amont de Nogent (Dzana 1997, p.161). D'autres travaux du PIREN-Seine menés sur le tronçon de la Bassée aval (Le Pichon *et al.* 2003, p.16), indiquent, pour la période 1828-1945, une élongation de 7,43 % (36 m.an^{-1}). La valeur calculée pour la période 1888-1943 dans le cadre des présents travaux est proche de la moyenne des valeurs des deux travaux cités, qui montrent des taux très différents pour la même période. En plus d'illustrer la difficulté de comparer ces analyses menées sur des tronçons de tailles différentes, ce résultat traduit la différence entre la Seine de Conflans à Nogent par rapport au secteur plus en aval (Dzana 1997). La faible valeur retrouvée dans la Bassée aval par Le Pichon *et al.* (2003) au regard de nos résultats s'explique par notre utilisation d'un document supplémentaire entre la première moitié du 19^e siècle et les années 1950, qui nous a montré une première phase de rétractation du tracé consécutive aux travaux de la première phase d'aménagement. Les valeurs trouvées par Le Pichon *et*

al.(2003) sont lissées sur l'ensemble de la période, ce qui montre les limites des études de morphométrie en plan en général, très dépendantes du nombre et de la qualité des documents.

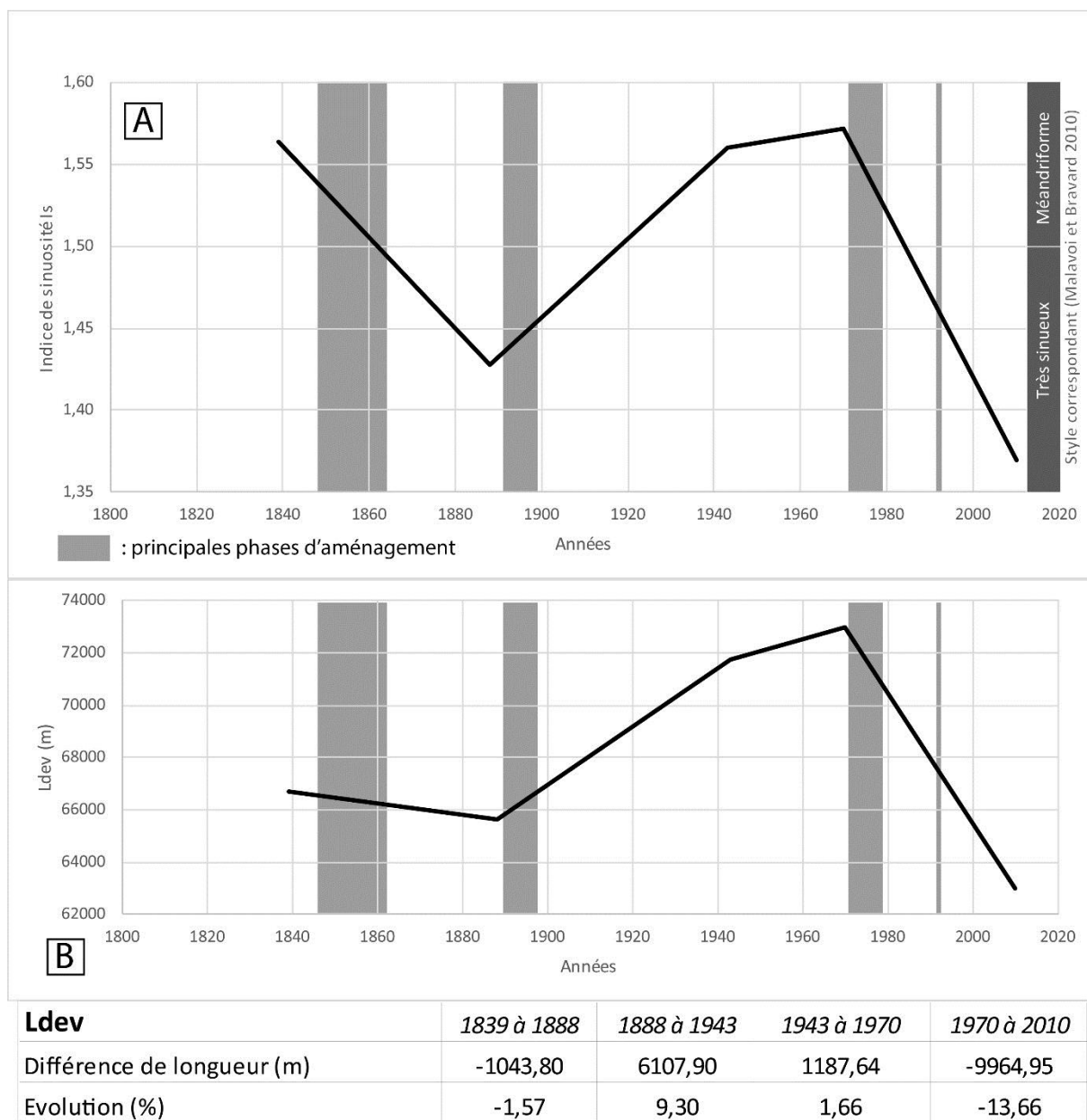


Figure 15 : Changements de la sinuosité et de la longueur du thalweg (Ldev) au cours du temps

La tendance à l'élongation s'est poursuivie sur notre zone d'étude entre 1943 et 1970, avant de diminuer brusquement suite aux travaux menés sur le tracé avant la période actuelle. Environ dix kilomètres de chenal ont ainsi été recoupés, soit une diminution de 13 % de la longueur totale. Dans les travaux de Le Pichon *et al.* (2003, p.16), cette diminution est de 11,4 % entre 1945 et 1990, ce qui est assez proche.

Si l'on fait le bilan entre 1839 et 2010, on s'aperçoit que la Seine, malgré une tendance à méandrer en l'absence de travaux majeurs, présente un bilan quasi-nul de son élongation avec une perte de 11 km pour un gain de 10,6 km. Les aménagements anthropiques ont donc rendu nul en bilan qui aurait autrement été largement positif, et aurait traduit une élongation substantielle de la ligne de thalweg. Ce type de conclusion montre que le secteur de la Bassée aval, sans les aménagements, aurait peut-être été plus dynamique, peut-être même autant que la section Conflans-Nogent, considérée comme très mobile.

3.1.5 Bilan

Le chenal actif de la Seine montre une faible variation latérale, probablement en raison de berges cohésives qui poussent le fleuve à sinuer et creuser le fond du chenal sur la période considérée. Les rives de la Seine sont constituées, d'une manière schématique, par des graviers et cailloutis calcaires à la base des berges et au fond du lit, surmontés par des dépôts holocènes argilo-limoneux (Dzana 1997, p.44). Ces derniers sont probablement résistants à l'érosion, tandis que les premiers doivent être sensibles à l'ablation, ce qui pourrait expliquer que le lit se creuse verticalement plutôt que de migrer latéralement. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la présence des renforcements de berge visant à se protéger de l'érosion, aménagements systématisés dans les années 1850.

La Seine, dans la Bassée aval, présente un lit qui devient de plus en plus en plus sinueux en l'absence de travaux, tandis que les deux périodes d'aménagement voient cet indice baisser. Les variations de sinuosité sont à rapprocher des fluctuations de la largeur, qui sont inversement corrélées à l'évolution de l'indice Is. Ainsi, le fleuve a tendance, lors des deux phases d'aménagement, à voir augmenter la largeur de son lit et baisser la sinuosité, tandis que le chenal se rétrécit en largeur et accentue ses sinuosités en l'absence de travaux. Cette observation montre que le chenal a tendance à s'enfoncer entre les périodes de travaux, la baisse de la largeur et l'augmentation de la sinuosité étant corrélées à l'incision du fond du lit (Schumm dans Malavoi et Bravard 2010, p.69).

3.2 Modifications du profil en long

3.2.1 Altitude de la ligne d'étiage au cours du temps

Le graphique montrant les changements opérés sur la ligne d'eau à l'étiage remplit deux objectifs : observer les transformations opérées et constater le décalage en X des données de 1903 (Figure 16). En effet, le profil en long des Ponts et Chaussées présente une erreur importante dans ses coordonnées en X, de l'ordre de deux kilomètres en direction de l'amont. Cette erreur est causée par le manque de précision du tracé en plan de 1888 et de l'échelle importante des abscisses (1/100.000) sur le profil en long de 1903. Il résulte de ces deux imprécisions une erreur importante qu'il n'a pas été jugé judicieux de corriger manuellement, au risque d'engendrer de nouvelles erreurs. Dans la suite de l'analyse, on écartera donc les données de 1903 lorsqu'il s'agira de comparaisons comprenant les abscisses de l'axe de référence.

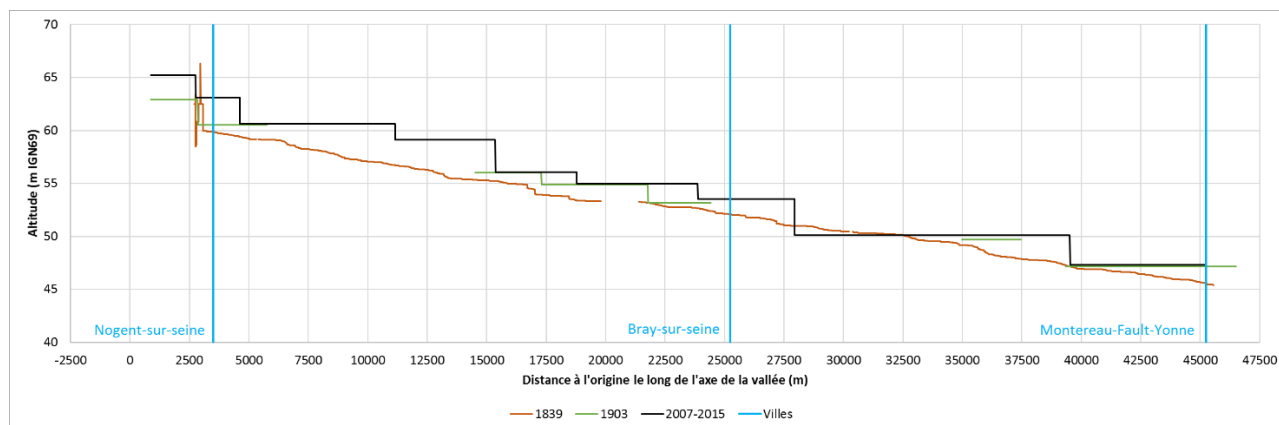
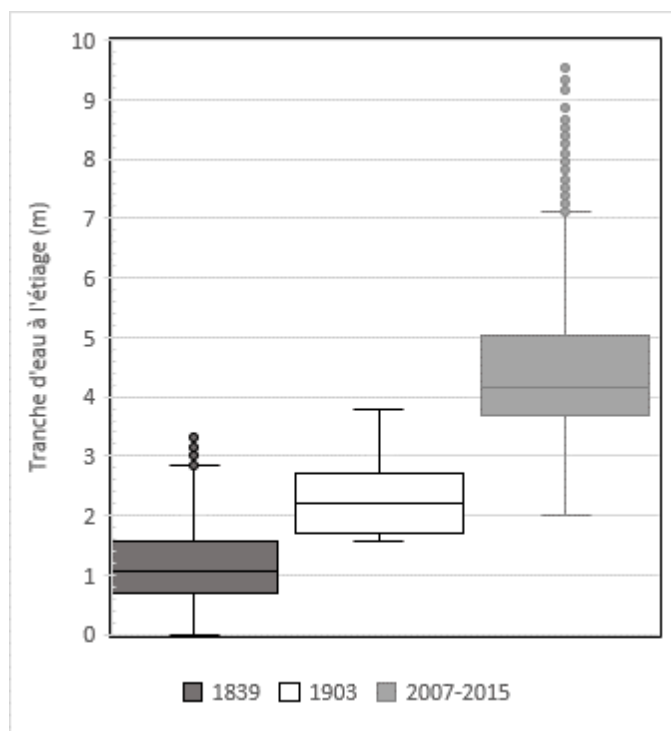


Figure 16 : La ligne d'eau à l'étiage sur les trois profils

Avec les réserves énoncées précédemment, ce graphique autorise tout de même plusieurs remarques. Tout d'abord, malgré le décalage des X, on constate la proximité des altitudes de la ligne d'eau de 1903 et 2010. Il semblerait que cette dernière soit restée relativement constante depuis la première période d'aménagements de la Bassée, les nouveaux barrages mis en place ne rehaussant la ligne d'eau que de 20 cm. L'autre remarque à formuler est bien évidemment l'importance des bouleversements opérés sur la forme du profil en long du fleuve lors de la première phase d'aménagements. Les écoulements naturels sont interrompus et les sédiments probablement retenus en amont des barrages, puis chassés ou dragués pour éviter le colmatage.

3.2.2 Tranche d'eau à l'étiage

L'examen de l'évolution de la tranche d'eau au cours du temps a permis de quantifier plus précisément les transformations survenues (Figure 17). Cette grandeur n'implique pas de comparaisons entre les valeurs en abscisse des documents, et autorise donc la prise en compte du profil en long de 1903.



	1839	1903	2007-2015
Minimum	0,00	1,56	2,02
Maximum	3,40	3,80	9,53
Médiane	1,08	2,22	4,16
1 ^{er} quartile	0,70	1,71	3,67
3 ^e quartile	1,56	2,72	5,04
Centile 10	0,50	1,69	3,45
Centile 90	2,07	3,29	6,32

Figure 17 : Évolution de la tranche d'eau à l'étiage

On constate que la tranche d'eau a augmenté entre chacun des documents consultés. En 1839, la hauteur d'eau médiane était d'un mètre à l'étiage, mais n'atteignait que 0,25 à 0,3 m en été au niveau des gués (Verdier de Pennery 1959, p.732). Cette tranche d'eau médiane double entre 1839 et 1903 après la première période de travaux. Cette augmentation de 1,14 m correspond à un relèvement de la ligne d'eau d'1 m, associé à une diminution de la cote du fond d'une quinzaine de centimètres, valeur médiane due à l'écrêtement des hauts-fonds sur l'ensemble du tronçon. Ces dragages n'ont probablement concerné, dans un premier temps, que les hauts-fonds présents sur le chenal principal navigué, et pas sur les tronçons en parallèle desquels une dérivation a été mise en place. On est certain qu'il existait, en 1839, 54 gués distincts, mais ils ont tous été détruits entre 1839 et les années 1950, et probablement dès la fin de la première période de travaux, vers 1900, où les vestiges restants de ces passages sont de toutes façons noyées par la mise en eau des derniers barrages (Verdier de Pennery 1959, p.742).

Entre 1903 et les données VNF de 2007-2015, on constate un nouveau doublement de la tranche d'eau. Comme la ligne d'eau n'est que faiblement remontée au cours de cette période (0,2 m), c'est que la cote du fond du lit s'est abaissée d'une valeur médiane d'1,96 m. Cet abaissement est largement dû aux travaux de chenalisation à grand gabarit, le chenal devant atteindre au moins 3,2 m de profondeur (Dzana 1997, p.189). On constate que cette valeur est dépassée sur l'ensemble du tronçon, la tranche d'eau étant d'une valeur médiane de 4,16 m.

3.2.3 Altitude du fond du lit au cours du temps

La question de l'approfondissement du lit ne peut être précisée qu'avec l'étude de l'altitude de la ligne de fond au cours du temps (Figure 18). Les données de 1903 ne peuvent pas être prises en compte en raison du décalage de leurs coordonnées en X vers l'amont. On peut toutefois remarquer que ces données montrent que l'altitude de la ligne de fond n'était pas foncièrement différente après la première période d'aménagements. C'est surtout entre 1903 et la période actuelle que le fond du chenal a été transformé.

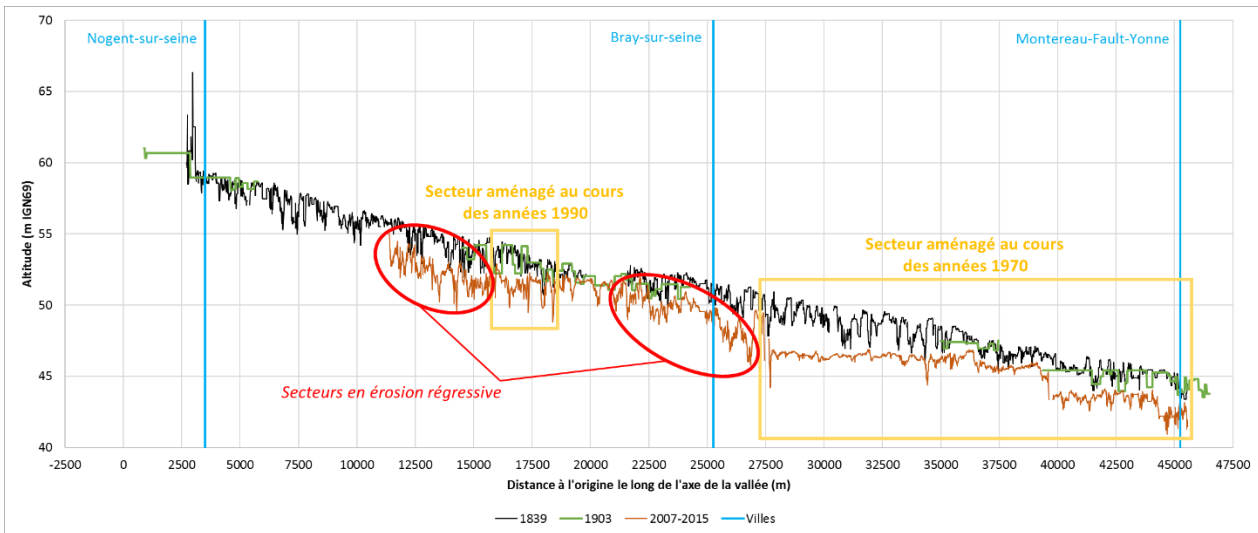


Figure 18 : Altitude de la ligne de fond des profils de 1839, 1903 et 2007-2015

Les modifications sont de très grande ampleur sur les tronçons ayant subi la chenalisation à grand gabarit, tout particulièrement immédiatement en aval du barrage de la Grande Bosse, dans la partie amont du secteur aménagé entre 1971 et 1979. En réponse à ces travaux, des zones en érosion régressive se sont mises en place en amont des aménagements. Ce phénomène avait été observé en amont de la Grande Bosse sur 600 m (Dzana 1997, p.210), mais il concerne ici une longueur de tracé bien plus importante, de plus de 10 km le long de l'axe de référence.

3.2.4 Le creusement du fond du lit entre 1839 et 2015

La question des secteurs en érosion régressive peut être approchée plus finement à l'aide de la comparaison des différences d'altitudes entre la période actuelle et 1839 (Figure 19). Ces zones d'érosion montrent un approfondissement de la ligne de fond de 3 m environ, remontant vers l'amont pour atteindre 1 m par rapport au fond du lit en 1839. Le secteur le moins touché est situé au niveau de Grisy-sur-Seine et Toussac, immédiatement en aval du secteur à grand gabarit du Vezoult.

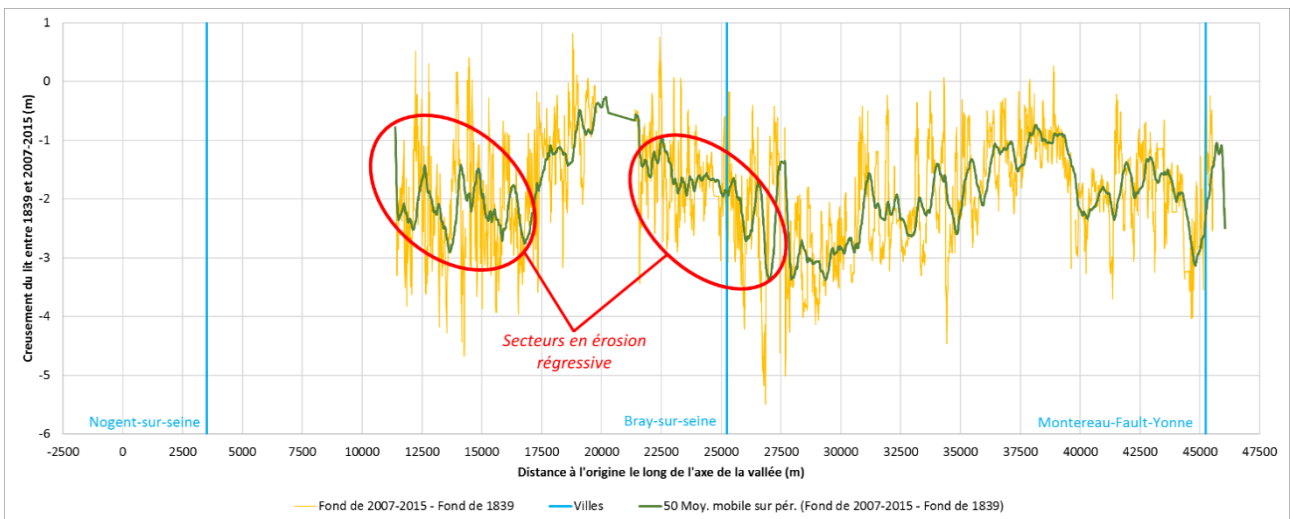


Figure 19 : Valeurs de l'incision du fond du lit entre 1839 et la période actuelle

3.2.5 Bilan

Pour résumer les informations livrées par l'étude des profils en long, on peut tout d'abord constater que le lit de 1839 est aujourd'hui méconnaissable, et n'a pu être restitué que grâce à l'étude géohistorique. La première phase d'aménagements, si elle voit la destruction des hauts-fonds, consiste principalement en un rehaussement de la ligne d'eau par des retenues. La seconde période de travaux voit la modification complète

du profil du fond de la Seine, abaissé d'1,96 m. Ces aménagements ont provoqué l'apparition de zones en érosion régressive, ce qui peut être lourd de conséquences en termes de sapement des berges et de déchaussement des ouvrages. Sur l'ensemble de la période 1839-2015, la valeur médiane de l'approfondissement est d'1,86 m, ce qui n'est forcément pas sans impacts sur le fonctionnement de la Seine et doit être pris en compte lors de simulations du fonctionnement hydrologique au-delà des années 1970.

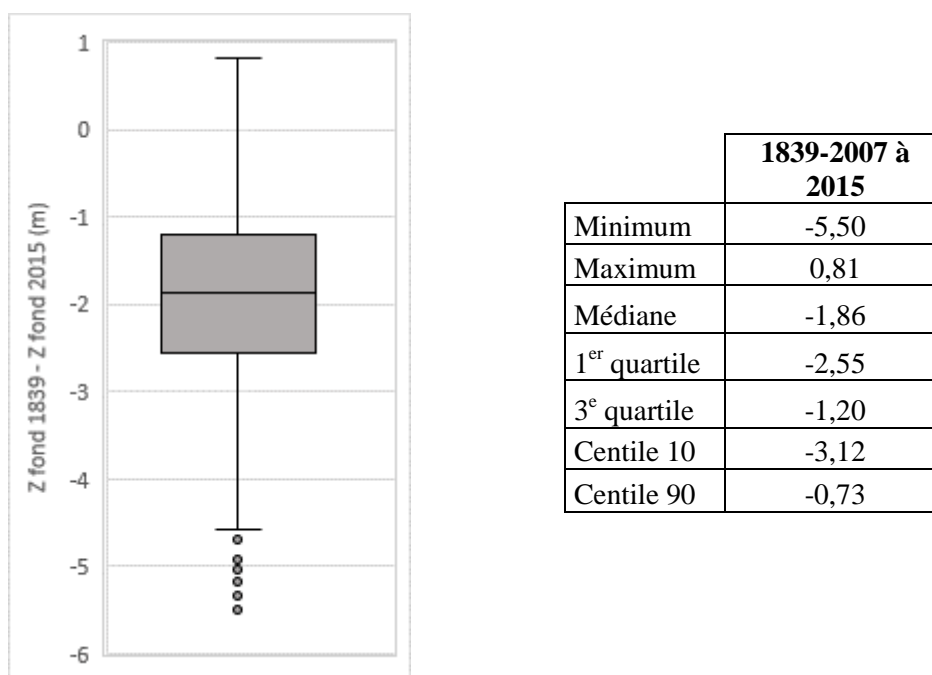


Figure 20 : Approfondissement du fond du lit de la Seine entre 1839 et 2007-2015

4 Synthèse et discussion

4.1 Effets de la première période d'aménagements (1850-1900)

Lors de cette phase, les principaux hauts-fonds sont écrêtés, mais cette action n'affecte pas de façon significative le fond du lit. Elle détruit en revanche des franchissements anciens ayant été utilisés sur plusieurs millénaires.

Les écoulements de la Seine ont été modifiés par la mise en eau des barrages, qui a fait remonter la ligne d'eau à l'étiage d'un mètre. L'installation de ces structures a très certainement eu des effets importants sur la propagation de la charge sédimentaire comme sur le courant vers l'aval, puisque le cours du fleuve était régulièrement interrompu par ces structures.

L'étude de la forme du fleuve en plan semble montrer, avec des réserves dues à la qualité de la carte de 1888, une augmentation de la largeur associée à une diminution de la sinuosité, ces deux phénomènes étant liés aux travaux d'amélioration de la navigation, la mise en eau des barrages augmentant la largeur mouillée et le rescindement de sinuosités simplifiant le tracé.

4.2 Effets de la seconde période (1970-1995)

Comme lors de la phase précédente, la forme en plan est modifiée par les travaux réalisés, tout particulièrement pour ce qui est de la sinuosité et de la largeur. Cette dernière augmente avec la création de chenaux plus larges et le tracé devient plus rectiligne grâce au recoupement de nombreux méandres, principalement en aval de Bray-sur-Seine. Les modifications sont d'une telle ampleur qu'elles font jouer, faiblement, des paramètres restés quasi-fixes pendant 180 ans (amplitude, rayon de courbure, longueur d'onde et les rapports associés). À l'échelle pluridécennale voire centennale, il est fort probable que ces transformations induiront une réponse de la Seine à l'échelle de l'enveloppe de méandrage.

La ligne d'étiage, après la mise en place des nouveaux barrages, est remontée d'une vingtaine de cm d'après les données des profils en long. C'est dans le fond du chenal de la Seine que l'on va cette fois chercher à

augmenter la tranche d'eau pour faire naviguer des péniches de volumes de plus en plus importants. La cote du fond est ainsi descendue d'une valeur médiane de 2 m. En amont des secteurs aménagés, des zones d'érosion régressive se sont mises en place sur plusieurs kilomètres, et la cote du fond du lit continue probablement de diminuer au fur et à mesure de la remontée du *knickpoint* vers l'amont. Il est difficile de savoir, en l'absence d'un profil en long ou de bathymétrie relevée avant les travaux des années 1970, à quel point le lit s'était déjà enfoncé depuis 1903, et donc de quantifier uniquement les effets des aménagements de la seconde phase.

4.3 Discussion

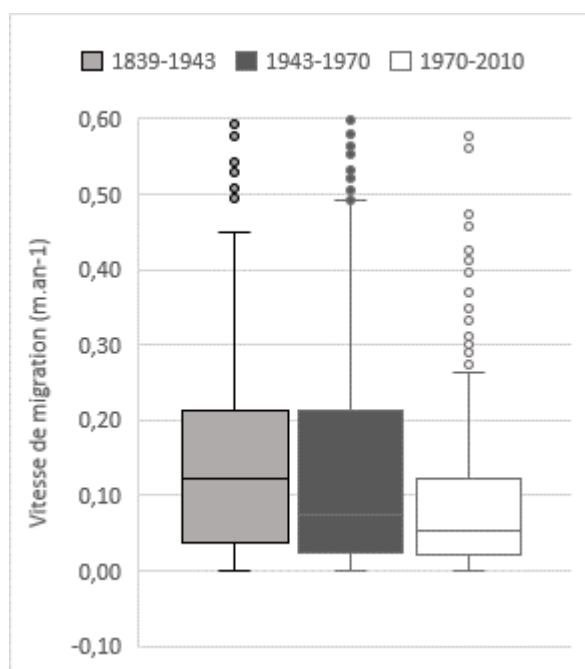
On peut se demander si le lit s'est enfoncé naturellement ou s'il a été approfondi entre 1903 et les travaux des années 1970. La seine montre en effet, au cours de cette période, une tendance à la méandrisation et à la diminution de la largeur, ce qui est un signe d'approfondissement du lit (Schumm dans Malavoï et Bravard 2010, p.69). Cette observation semble traduire, en bruit de fond, la dynamique, peut-être naturelle, de la Seine telle qu'observée dans d'autres parties de son cours amont (Dzana 1997 ; Le Pichon 2003 ; Gaillard 2004), c'est-à-dire celle d'un fleuve ayant tendance à devenir de plus en plus méandrique depuis le 19^e siècle.

Il se peut aussi que cette tendance globale soit l'écho du dérèglement engendré par la coupure de la propagation de la charge sédimentaire après la mise en place des barrages : la Seine aurait cherché, en aval de ces retenues, à rééquilibrer sa charge sédimentaire en sapant ses propres berges, ce qui est un phénomène assez fréquent (e.g. Crepet 2000 ; Rollet *et al.* 2006 ; Steinmann 2015).

Les différents effets engendrés par les aménagements conduisent à faire penser, à partir de la simple étude des cartes, que la Seine est très peu dynamique dans sa traversée de la Bassée aval (Dzana 1997 ; Le Pichon 2003 ; Gaillard 2004). Or l'analyse croisée des plans et des phases d'aménagements menée dans cette étude montre que ce sont les travaux de navigation qui freinent largement une dynamique qui, si elle avait pleinement pu s'exprimer, aurait peut-être été comparable à d'autres secteurs de la vallée de la Seine considérés comme très mobiles. Cette hypothèse va dans le sens de certaines observations réalisées au cours de cette étude, notamment la faible valeur du rapport R_c/w , plutôt typique de sinuosités présentant des taux d'érosion importants.

En guise de bilan de cette discussion, on a calculé la vitesse de déplacement de la Seine au cours du temps selon la méthode des aires apparentes, utilisée notamment par des chercheurs ayant travaillé sur la Bassée (Dzana 1997 ; Le Pichon *et al.* 2003 ; Weill *et al.* 2014). Les résultats de ce travail (Figure 21), où l'on n'a pas pris en compte la carte de 1888, trop imprécise, montrent des valeurs de migration extrêmement faibles, qui diminuent au cours du temps. Cette appréciation qualitative rejoint les conclusions des travaux antérieurs, qui montraient une diminution importante de la migration latérale dans la Bassée aval par rapport à la partie amont (Weill *et al.* 2014). Sur la période de 1828 à 1945, Le Pichon *et al.* (2003, p.17) obtiennent une valeur de $0,116 \text{ m.an}^{-1}$, soit une valeur analogue à la médiane calculée ici entre 1839 et 1943.

Après 1943, les valeurs montrent une diminution importante des valeurs de migration, malgré des points extrêmes très importants entre 1970 et 2010 en raison de la chenalisation à grand gabarit. L'étude de la vitesse de déplacement de la seine va dans le sens des conclusions précédentes, à savoir que le fleuve, lourdement transformé par les aménagements, migre peu mais creuse son lit, à part au niveau de quelques sinuosités encore relativement libres.



	1839 à 1943 (104 ans)	1943 à 1970 (27 ans)	1970 à 2010 (40 ans)
Minimum	0,00	0,00	0,00
Maximum	1,64	1,38	8,24
Centile 10	0,01	0,01	0,01
Centile 90	0,35	0,39	0,29
1 ^{er} Quartile	0,04	0,03	0,02
3 ^e Quartile	0,21	0,21	0,12
Médiane	0,12	0,08	0,05
Moyenne	0,16	0,15	0,26

Figure 21 : Vitesses déplacements sinuosités de la Bassée aval entre 1839 et 2010

5 Conclusion et perspectives

5.1 Intérêts et limites de la démarche engagée

L'étude menée a permis un certain nombre de comparaisons avec les travaux antérieurs, notamment pour ce qui est de l'évolution de la sinuosité du tronçon et l'élongation de la ligne de thalweg. Les comparaisons se sont révélées difficiles en raison des échelles choisies dans les études antérieures, qui concernaient des tronçons importants sans possibilité de s'intéresser à une zone en particulier. Les résultats consultés sont globalement similaires, malgré une grande variabilité des valeurs en fonction de la qualité et du nombre de documents utilisés, notamment pour calculer les vitesses de migration. En effet, l'utilisation de deux cartes seulement ne permet pas de percevoir les rythmes des variations. C'est un des intérêts des travaux présentés ici, puisque la chronologie des sources choisies permettait de discuter des effets des aménagements, critère crucial pour comprendre la dynamique d'un secteur aussi transformé.

L'augmentation du nombre de paramètres morphométriques mesurés permet de croiser les informations sur la dynamique du fleuve au cours du temps, et d'arriver à une meilleure compréhension du système. L'utilisation de données spatialisées favorise la mutualisation des informations acquises dans le cadre de ce travail, et pourront être nourries par la suite en augmentant le nombre de couches et en étendant la zone étudiée.

L'utilisation de profils en long a permis de compléter la vision planimétrique du fleuve et de pointer l'ampleur des transformations qu'a connues la ligne de fond, ce qui peut avoir des conséquences importantes dans les zones en érosion régressive, tant du point de vue de la stabilité des berges que pour les ouvrages de génie civil.

La mise en place d'un axe de référence est une des avancées de ce travail, car la question de la confrontation rigoureuse de données spatialisées séparées dans le temps est un problème récurrent dans ce type d'étude. La méthodologie élaborée permet de replacer tous les points d'observations le long d'un axe qui permet leur comparaison d'amont en aval, ainsi que l'intégration de données issues de plans anciens, de bathymétrie ou de profils en long. Il est ensuite possible, après interpolation des données, de réaliser des opérations entre les données de deux documents espacés dans le temps, comme le calcul de l'enfoncement du fond du lit de la Seine entre 1839 et 2015.

La possibilité de prendre en compte différentes échelles spatiales et de décompartmenter l'étude du continuum fluvial est un point important dans ces travaux, puisqu'on peut interroger la dynamique alluviale à l'échelle du tronçon de vallée comme les variations observables au sein d'une sinuosité. Dans le cadre de ce

rapport, seule l'évolution globale a été traitée, mais on peut envisager d'étudier l'évolution d'une seule ou plusieurs sinuosités sur les deux cent dernières années, par exemple dans le cadre d'un projet de restauration comme celui des méandres recoupés de la Bassée aval, pour prendre en compte la trajectoire d'évolution du lit. Cette possibilité de changement d'échelle est particulièrement importante (Dzana 1997, p.173), car les paramètres de fonctionnement du système fluvial sont interdépendants et les variations locales peuvent avoir des conséquences à l'échelle du lit majeur.

Les principales limites à relever pour le travail mené sur la Bassée sont l'extension réduite des observations, qu'il serait intéressant de mener à plus grande échelle. Il faut également souligner que le temps de mise en œuvre d'un tel travail, dont certaines étapes restent assez manuelles et mériteraient une meilleure automatisation sous SIG, est très important, ce qui complique la possibilité de l'étendre à grande échelle. On peut enfin faire remarquer que le résultat obtenu dépend étroitement de la qualité et de la quantité des documents historiques disponibles. Dans ce cadre, la poursuite du recensement et de la numérisation de documents anciens paraît tout à fait indispensable.

5.2 Perspectives

Les travaux menés sur la Bassée ouvrent un certain nombre de perspectives de travail qu'il pourrait être intéressant de mener pour mieux comprendre ce secteur et continuer d'exploiter les données mises en forme dans ce travail. L'utilisation d'équations pour évaluer la puissance spécifique en différents points du tracé, comme l'estimation des débits anciens avec les équations de Chézy-Manning (Vayssièreet al. 2016), permettrait de discuter de l'évolution du courant au cours des deux derniers siècles. Comme l'on dispose des données actuelles des mesures de débit, il serait possible d'évaluer l'erreur engendrée par l'utilisation de ces équations, et de choisir les coefficients adaptés à la Bassée avant de transposer les calculs à la période précédant les aménagements lourds, à savoir le profil en long de 1839.

Un développement intéressant serait de concevoir des scripts et boîtes à outils utilisables sous SIG pour faciliter le traitement des données spatiales, encore trop manuel.

Au regard des résultats obtenus et compte tenu des transformations qu'a subies le lit de la Seine dans la Bassée aval au cours des deux derniers siècles, il semble crucial d'intégrer les observations faites aux modélisations du fonctionnement alluvial de ce secteur si l'on cherche à reconstituer la dynamique passée. En effet, les transformations de la forme du lit, et surtout l'enfoncement de deux mètres observé entre 1839 et 2015, montrent que la zone de contact entre la nappe phréatique et la rivière a pu radicalement changer si la composition lithologique du remplissage de la Bassée au contact du lit n'est plus le même qu'il y a 180 ans, ce qui peut avoir d'importantes conséquences sur le fonctionnement des échanges nappes-rivière.

Remerciements

Tous nos remerciements à François Boyer pour nous avoir fourni les très nombreux documents qu'il avait rassemblés, et qui nous ont en particulier permis de retrouver la carte et le profil en long de 1839, un document extrêmement précieux pour comprendre le fonctionnement de la Bassée avant les premiers aménagements du chenal. Nous sommes également très reconnaissants à Hervé Audebert, retraité de l'IGN, pour ses érudites indications sur les cartes anciennes dont nous disposons. Nous remercions également la Cartothèque de l'IGN et son personnel pour nous avoir fourni de nombreux fonds de cartes. Les données bathymétriques données par VNF ont également été d'une grande aide pour quantifier les transformations survenues entre 1839 et 2015.

Références des documents utilisés

Carte et profil en long de 1839

Document disponible à la BNF, site Richelieu, sous la cote Ge BB 988.

Carte de 1888

Photocopie effectuée par F. Boyer d'un document du service de Navigation de la Seine de Nogent-sur-Seine ; numérisé par L. Lestel pour les archives du PIREN-Seine, disponible au laboratoire Metis de l'Université Paris VI.

Profil en long de 1903

Document édité dans un livre (voir Ponts et Chaussées 1903 dans la bibliographie) consultable à la BNF, site François Mitterrand, sous la cote FOL-V-3086 (6).

Cartes de 1943

Feuilles au 1/20.000, cartothèque de l'IGN, site de Saint-Mandé :

- XXV-16 « Nangis » n° 7 (levés 1943)
- XXV-16 « Nangis » n° 8 (levés 1943)
- XXV-17 « Montereau-Faut Yonne » n° 1 (levés 1943)
- XXV-17 « Montereau-Faut Yonne » n° 3 (levés 1943)
- XXV-17 « Montereau-Faut Yonne » n° 4 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 3 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 4 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 5 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 6 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 7 (levés 1943)
- XXVI-16 « Provins » n° 8 (levés 1943)
- XXVI-17 « Sergines » n° 1 (levés 1943)

Feuille au 1/50.000, cartothèque de l'IGN, site de Saint-Mandé :

- XXV-17 « Montereau-Fault-Yonne » (levés 1943)

Cartes de 1970

Feuilles au 1/5.000, cartothèque de l'IGN, site de Saint-Mandé :

- XIV-07 « Montereau – Faut – Yonne » N-E (1968)
- XV-07 « Cannes – écluse » N-O (1969)
- XV-07 « Cannes – écluse » N-E (1970)
- XV-08 « Montigny-Lencoup » S-E (1970)
- XVI-07 « Vinneuf » N-O (1970)
- XVI-08 « Vimpelles » N-O (1970)
- XVI-08 « Vimpelles » N-E (1970)
- XVI-08 « Vimpelles » S-O (1970)
- XVI-08 « Vimpelles » S-E (1970)
- XVII-08 « Bray-sur-Seine » N-O (1970)
- XVII-08 « Bray-sur-Seine » N-E (1970)
- XVII-08 « Bray-sur-Seine » S-O (1970)
- XVII-08 « Bray-sur-Seine » S-E (1970)
- XVII-09 « Gouaix » S-O (1971)
- XVII-09 « Gouaix » S-E (1970)
- XVIII-08 « Trainel » N-O (1971)
- VIII-09 « Melz-sur-Seine » N-O (1978)
- VIII-09 « Melz-sur-Seine » N-E (1978)
- VIII-09 « Melz-sur-Seine » S-O (1971)

Feuilles au 1/25.000, cartothèque de l'IGN, site de Saint-Mandé :

- XXVI-16 Est « Nogent sur-Seine » (1979)
- XXVI-16 Ouest « Provins » (1979)

Cartes IGN de 2010

BD CARTO IGN, fournie par le laboratoire Metis, Université Paris VI.

Bibliographie

- ABDOU DAGGA N., GAILLARD S., BENDJOUDI H., et BILLEN G., 2006** - *Exploitation de la base de données sur les Corridors Fluviaux du district Seine-Normandie*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2006, Thème « Résultats des activités d'"Atelier" et approfondissement d'actions de recherche - Zones humides riveraines », 64 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/39
- ALBER A. et PIEGAY H., 2011** - Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, **125** (3), pp. 343-360.
- ALLEN J.R.L., 1982** - *Sedimentary structures: their character and physical basis. Volume II*. Éd. Wiley, Amsterdam, Collection Developments in sedimentology, **30B**, 663 p.
- BERTHIER K., BOYER F., BENOÎT P. et FUSTEC E., 1998** – *La reconstitution de l'histoire des zones humides dans le bassin de la Seine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 1998, Thème 2 « Zones humides riveraines », 7 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/591
- CONOLLY J. et LAKE M., 2006** – *Geographical Information Systems in Archaeology*. Éd. Cambridge University Press, Collection Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge, 338 p.
- COSTA L. (dir.), ROBERT S. (dir.) et FOUCAULT M. (collab.), 2009** - *Guide de lecture des cartes anciennes : illustrations dans le Val d'Oise et le Bassin parisien*. Éd. Errance, Paris, 104 p.
- CREPET F., 2000** - Impact des aménagements hydrauliques sur le régime et la dynamique de la Loire amont. Implications pour la gestion du fleuve. *Geocarrefour*, **75** (4), pp. 365-374.
- CURIE F., DUCHARNE A., BENDJOUDI H. et GAILLARD S., 2003** - *Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2003, Thème « Relations entre paysage hydrologique et peuplements biologiques. Rôle des zones humides », 11 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/349
- DAVID M., 2016** - *Dynamique fluviale de la Garonne à l'anthropocène : trajectoire d'évolution du tronçon fluvial compris entre les confluences de l'Ariège et du Tarn (Garonne toulousaine, 90 km)*. Thèse de doctorat en géographie sous la direction de J.-M. Carozza et P. Valette, Université de Toulouse – Jean Jaurès. 284 p.
- DE CAZENOVE, A., 1997** – *Paléohydrologie de la Seine en amont de Montereau : Hydrologie du couloir alluvial, Bilan des cartes anciennes, Étude des gués*. Mémoire de maîtrise du laboratoire de Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) sous la direction de F. Boyer et A. Khammari. 51 p. + annexes.
- DZANA J.-G., 1997** - *Le lit de la Seine de Bar à Montereau : étude morphodynamique ; rôle des aménagements*. Thèse de doctorat en Géographie sous la direction d'A. Godard, Université Paris I panthéon-Sorbonne, 347 p. + annexes.
- FUSTEC E., BENDJOUDI H., GAILLARD S., WENG P., BOYER F., BOËT Ph., SHANNEN O., CROGENNEC S. et BILLEN G., 2001** - *Fonctionnement du Territoire 'Bassée'*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2001 (rapport de synthèse 1998-2001), Thème « Applications régionales », 58 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/445
- GAILLARD S., BRAVARD J.-P. et FUSTEC E., 1998** – *Bases méthodologiques pour une typologie des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 1998, Thème 2 « Zones humides riveraines », 8 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/592
- GAILLARD S., BRAVARD J.-P., FUSTEC E., BRUNSTEIN D. et PASQUIER D., 1999** – *Typologie hydrogéomorphologique des zones humides riveraines dans le bassin de la Seine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 1999, Thème 2 « Les zones humides riveraines : typologie, fonctionnement, évolution, restauration », 12 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/508
- GAILLARD S., BRUNSTEIN D., FUSTEC E., BRAVARD J.-P., BENDJOUDI H., NGUYEN-THÉ D. et PASQUIER D., 2000** – *Typologie hydrogéomorphologique des zones humides riveraines dans le bassin de la Seine : application aux bassins de l'Yonne, de l'Eure et du Grand Morin*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2000, Thème 2 « Fonctionnement écologique du continuum aquatique et du paysage hydrologique », 11 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/470
- GAILLARD S., BRUNSTEIN D., BENDJOUDI H., AMEZAL A., et RICHARD D., 2002** – *Inventaires*

typologiques et fonctions des zones humides riveraines. Rapport d'activité PIREN-Seine 2002, Axe « Fonctionnement écologiques et Paysages », 14 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/409

GAILLARD S., 2004 – *Morphologie des lits fluviaux dans le bassin de la Seine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2004, Thème « Écologie du continuum fluvial et du paysage aquatique : Géomorphologie et rôle des zones humides riveraines », 9 p. <http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=book/573>

GAILLARD S., BENDJOUDI H., BRUNSTEIN D., AMEZAL A., THERY S., BRAVARD J.-P., ABDOU DAGGA N. et JOYEUX E., 2005 – *Inventaires typologiques et fonctions des zones humides riveraines*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2005 (rapport de synthèse 2002-2005), Thème « Écologie du continuum fluvial et du paysage aquatique », 16 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/233

GALIBERT A., DAVODET J., BRAULT A., BONNET C., MARTY P., MOUCHEL J.-M. et LESTEL L., 2014 – *Le site Archiseine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2014, Axe transversal 8 « Cartographie historique », Bloc 1 « Constitution d'un fond de cartes anciennes en ligne » pp. 129-130. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1516

GROSSO E., 2011 – Seredona: a Web platform to integrate historical geographic data into current georeferenced frameworks, In Ruas A. (dir.) : *Advances in Cartography and GIScience, Selection from ICC 2011 Paris*, Éd. Springer-Verlag, Vol.2, pp.117-128.

LEMAIRE A.-C., 2000 – *Les annexes hydrauliques de la Seine en Bassée, entre Nogent-sur-Seine et St-Sauveur-lès-Bray : Évolution historique aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles*. Mémoire de maîtrise du laboratoire de Géologie appliquée, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) sous la direction de F. Boyer et S. Gaillard, 36 p. + annexes.

LE PICHON C., GORGES G., TALES E., FAURE T., GOREAUD F., GAILLARD S., RICHARD D., BONTÉ P., LEFÈVRE I. et BOMBLED B., 2003 – *Relations entre paysage hydrologique et peuplements biologiques. Rôle des zones humides*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2003, Thème « Écologie du continuum fluvial et du paysage aquatique », 27 p. + Annexes. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/344

LESTEL L., BENOÎT P., TIGREAT P., GEORGESCU S., BARO A., MEYBECK M. et GUILLERME A., 2011 - *Projet transversal « Cartographie historique » Action 2011*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2011, Thème « Cartographie historique », 18 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1173

LESTEL L., ALEXANDRE P., BARO A., ROUILLARD J. et BENOÎT P., 2012 - *Projet transversal « Cartographie historique » Action 2012*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2012, Thème « Modèles et données », 14 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1116

LESTEL L., ALEXANDRE P., BARO A., ROUILLARD J. et BENOÎT P., 2015 - *Cartographie historique du bassin de la Seine*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2015, Thème « Modèles et données », 14 p. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1116

MALAVOI J.-R. et BRAVARD J.-P., 2010 – *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Éd. Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), Vincennes, Collection « Comprendre pour agir », 224 p.

PARROT E., 2015 – Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. Thèse de doctorat en Géomorphologie fluviale dirigée par H. Piégay et M. Tal, Université Lyon II Jean Moulin, 350 p. + Annexes.

PIERRE M., GALLAIS A., THÉVENIN, VALIRON F. (dir.), TIXERONT J. (dir.) et BENEDETTI E. (collab.), 1978 – Les Bassins de la Seine et des cours d'eau normands. Tome II – Besoins et utilisation d'eau. Pollution. Fascicule 6 – hydraulique fluviale et voies navigables. Mission déléguée de Bassin Seine Normandie et Agence Financière de Bassin Seine Normandie, publication hors-série du bulletin Seine-Normandie, 133 p.

Ponts et Chaussées (Ministère des Travaux Publics, École Nationale des Ponts et Chaussées, Service des cartes et plans), 1903 – Navigation de la Seine en amont de Paris et l'Yonne entre Auxerre et Montereau. *Atlas des voies navigables de la France - Dressé d'après les documents fournis par les Ingénieurs des Ponts et Chaussées*, 2^e Série, 6^e Fascicule, Éd. Imprimerie Nationale, Paris, 22 p. + 34 planches.

ROLLET A.-J., PIÉGAY H. et CITTERIO A., 2006 - Impact des extractions de graviers dans le lit mineur sur la géométrie des zones aquatiques périfluviales du Doubs (France). *Géographie physique et Quaternaire*, **60** (3), pp. 253-269.

STEINMANN R., 2015 - *L'influence climatique et anthropique sur trois cours d'eau bourguignons : géoarchéologie de sites de franchissement sur la Loire, la Saône et le Doubs au cours de l'Holocène*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre sous la direction de Jean-Pierre Garcia et d'Annie Dumont, Université de Bourgogne, Dijon, 2 vol. Vol. I : 421 p. ; Vol. II : 260 p. + Annexes.

VALETTE L. et CUNILLERA A., 2010 – *Cahiers techniques SYRAH-CE*. Document technique ONEMA et Cemagref, produit dans le cadre du « Partenariat 2010 – Hydro-morphologie et altérations physiques – Action 1 : Descripteurs pour les cours d'eau ». 93 p.

VAYSSIÈRE A., DEPRET T., CASTANET C., GAUTIER E., VIRMOUX C., CARCAUD N., GARNIER A., BRUNSTEIN D., et PINHEIRO D., 2016 – Étude des paléoméandres holocènes du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, **22** (2), pp. 163-176.

VERDIER DE PENNERY P., 1959- Les gués de la Seine et de l'Yonne de Nogent-sur-Seine et d'Auxerre à Paris. *Bulletin de la Société préhistorique de France*, **56**(11-12), pp. 731-748.

WEILL P., DELEPLANCQUE B., AMESTOY J. et COJAN I., 2014 – *Empreintes de l'évolution de la Seine méandrique dans la plaine alluviale de la Bassée*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2014, Axe 2 « Interfaces nappe-rivière », Bloc 2 « Interface craies-plaines alluviales. La zone humide de la Bassée » pp. 47-49. http://www.metis.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/1516