

Évolution des paysages dans la plaine alluviale de la Petite-Seine depuis le Néolithique, restitution des tracés fluviaux et contexte paléoenvironnemental

Jean-Louis Grimaud^{1*}, Arnaud Huguet², Patrick Gouge³, Damien Huyghe¹, Christophe Petit⁴, Laurence Lestel²

¹ PSL Research University/ MINES ParisTech/ Centre de Géosciences, 35 rue St Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex, France

² Sorbonne Université, UPMC, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

³ Département de Seine-et-Marne / Centre départemental d'archéologie de la Bassée, 11 rue des Roises 77118 Bazoches-lès-Bray

⁴ Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR 7041 ArScAn, 6, rue Michelet, 75006 Paris

* jean-louis.grimaud@mines-paristech.fr

Résumé

Les plaines alluviales sont des entités dynamiques du point de vue géomorphologique. Elles se construisent par sédimentation lors des crues, générant aussi les déplacements et abandons des réseaux de rivières. On retrouve donc à la surface des plaines alluviales des chenaux abandonnés remplis de sédiments fins qui constituent non seulement des témoins des paléo-tracés fluviaux mais aussi des archives paléo-environnementales. Dans cette étude, nous investiguons les paléo-chenaux de la Petite-Seine, dans la plaine alluviale de la Bassée entre Nogent-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne. Une cinquantaine de sondages mettent en évidence les changements du cours de la Seine d'un chenal à autre avec des évidences de réactivation et de fonctionnement suivant un mode anastomosé. Les datations radiocarbone permettent de préciser ce calendrier depuis le Néolithique, et peuvent localement suggérer l'action anthropique sous forme de curage. Enfin, une première reconstitution des paléo-températures par la méthode des tétraéthers bactériens permet de restituer les variations climatiques associées à l'évolution de la plaine sur les derniers 1800 ans.

Points clefs

- ✓ *Eclairage sur l'évolution géomorphologique et les conditions paléo-environnementales et climatiques d'abandon des chenaux de la Bassée*
- ✓ *Première application des tétraéthers comme marqueurs de température sur une archive sédimentaire dans le bassin de la Seine*
- ✓ *Reconstruction des conditions climatiques par l'étude de chenaux abandonnées de la Bassée, principaux événements identifiés*

Abstract

Alluvial plains are geomorphic, dynamics entities, which build up during floods by depositing overbank sediments but also through the displacement and abandonment of alluvial channels. Therefore, abandoned channels are widely recognized at the surface of alluvial plains, and that are filled with fine-grained sediment recording paleo-alluvial paths as well as paleo-environmental evolution. In this study, we investigate paleo-channels of the “Petite-Seine”, in the Bassée alluvial plain between Nogent-sur-Seine and Montereau-Fault-Yonne. About fifty hand auger boreholes were analyzed to study the changes associated with the Seine River migration. We find evidence for channel reactivation and multithreads activity during the studied periods. Radiocarbon dating allows précising the timing of these changes since the Neolithic, and suggest locally the impact of humans, perhaps through dredging. Finally, a first reconstitution of paleo-temperatures using the bacterial tetraethers allowed restituting climatic variations associated with the evolution of the plain in the last 1800 years.

Key points

- ✓ Highlight of the geomorphic evolution as well as paleoenvironmental and paleoclimatic conditions associated with channel abandonments in the Bassée
- ✓ First application of thetrathers as markers of temperature on sedimentary archives in the Seine drainage basin
- ✓ Reconstruction of climatic condition by studying of abandoned channels in the Bassée, the main events are identified

Introduction

L'évolution des paysages fluviaux au sein des plaines alluviales a une influence directe sur les sociétés humaines vivant aux abords des cours d'eau. Les sociétés anciennes et modernes, quant à elles, transforment les environnements naturels en réaménageant sans cesse les corridors fluviaux pour leurs usages (exploitation pastorale des zones humides, pêcheries, minoteries, transport fluvial, extraction de granulats alluvionnaires, gestion des crues...). Reconstituer l'évolution des paysages alluviaux revient donc à la fois à retracer les changements qui ont pu affecter ces sociétés, mais aussi à potentiellement décrypter comment celles-ci ont pu s'approprier ces environnements et éventuellement les modifier. Sans connaissance du contexte paléo-environnemental précis (climat, type de végétation, occupations humaines, etc.), il n'est pas aisé de distinguer les différents forçages sur l'évolution de ces paysages.

Les chenaux abandonnés sont des objets communs au sein des plaines alluviales qui sont les témoins de leur construction et de leur évolution depuis les temps géologiques jusqu'aux périodes modernes dans lesquelles l'Homme intervient (Pastre, 1997 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2010 ; Vayssière *et al.*, 2016 ; van Dinter *et al.*, 2017). Là où les alluvions de fond de vallée sont majoritairement constituées de graviers et de sables, les comblements des chenaux sont en grande partie argilo-limoneux, ce qui affecte les écoulements hydrologiques (Jeannot *et al.*, 2019). Ils présentent également des parties plus sableuses, donc plus perméables, qui peuvent s'étendre de manière significative sur la surface du chenal (Szewczyk *et al.*, 2020, 2021). Il est donc nécessaire de caractériser la géométrie des différents types de remplissage de ces chenaux (sableux, argileux) afin d'alimenter les modèles d'hétérogénéités des plaines qui serviront à modéliser les dynamiques de circulation de l'eau dans la Bassée (Phase VII PIREN ; Flipo *et al.*, 2015).

Dans le Bassin parisien, l'enfoncement du réseau de drainage durant le Quaternaire est associé à l'étagement et l'emboîtement de nappes alluviales. Le développement de celles-ci est à mettre en lien avec les alternances entre cycles glaciaires et interglaciaires (Lautridou *et al.*, 1999 ; Antoine *et al.*, 2007). Les phases d'incision

et de dépôt de nappes alluviales résultent de l'ajustement des profils en long des rivières corrélé au changement des conditions hydrodynamiques (débit, charge sédimentaire) ainsi qu'aux variations tectoniques et/ou eustatiques (Bridgland and Westaway, 2008). Ces modifications vont favoriser le dépôt d'éléments grossiers (graviers et sables), juste après l'incision majeure qui se produit à la transition entre les périodes interglaciaires et glaciaires (et de façon plus limitée à la transition glaciaire et interglaciaire), engendrant une forte perméabilité de ces nappes, comme c'est le cas en Bassée (Mégnyen *et al.*, 1965 ; Deleplanque, 2016).

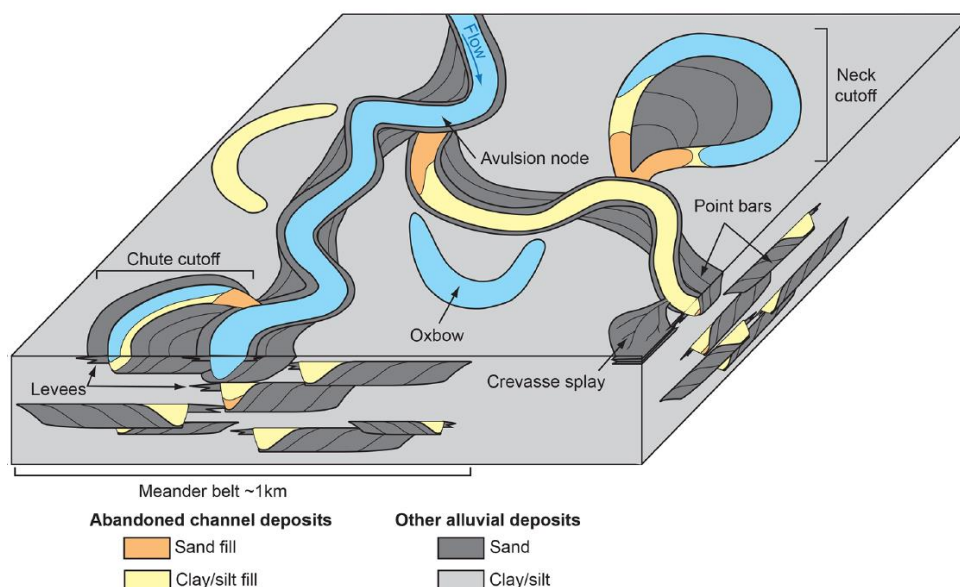


Figure 1. Schéma des différentes hétérogénéités sédimentaires observées dans les plaines alluviales avec notamment les remplissages des chenaux (Szewczyk *et al.*, 2020).

La plaine alluviale de la Petite-Seine, qui s'étend entre la confluence Seine-Aube, proche de Romilly-sur-Seine, et la confluence Seine-Yonne à Montereau, est un exemple de zone très aménagée dès l'Époque Moderne (fin XV^e – fin XVIII^e siècles) où les enjeux corporatistes sont, encore aujourd'hui, très prégnants (mise à grand gabarit de la Seine, zone d'expansion des crues, exploitation de gravières, protection de la dernière grande zone humide du bassin de la Seine...). Les recherches menées avant l'essor de l'exploitation des granulats alluvionnaires ont montré la présence de très nombreux paléo-chenaux (Mégnyen, 1965). Leur étude révèle l'évolution morpho-climatique du paysage (Leroy *et al.*, 2003) à laquelle s'ajoutent une importante documentation archéologique issue des fouilles préventives (Mordant *et al.*, 2006) et de nombreux documents d'archives (Steinmann *et al.*, 2016 ; Eschbach et Lestel, 2018).

On observe donc en Bassée de nombreux chenaux avec un remplissage principalement argileux à leur sommet. On ignore en revanche sur quelles profondeurs et comment se sont effectués ces remplissages. Il apparaît également qu'ils sont des témoins de l'évolution du cours de la Seine sans savoir à quelles échelles et dans quel contexte paléo-environnemental.

Le présent rapport de deuxième année de la phase 8 du PIREN-Seine s'appuie sur le précédent (Grimaud *et al.*, 2020) et complète les connaissances sur l'évolution géomorphologique de la plaine alluviale de la Petite-Seine, précisant le contexte paléo-environnemental de cette évolution et son influence sur les hétérogénéités du substrat. La pandémie en cours a empêché tout accès à de nombreuses ressources documentaires, notamment à la BNF, mais il a tout de même été possible d'effectuer une campagne de terrain début 2021.

Les avancées majeures de cette année sont :

- ✓ De nouvelles précisions sur l'évolution géomorphologique et la chronologie d'abandon des chenaux de la Bassée ;
- ✓ Une première application des tétraéthers comme marqueurs de température sur une archive sédimentaire dans le bassin de la Seine ; dans ce cadre, les principaux événements climatiques connus ont pu ainsi être identifiés.

1. Evolution des paysages et restitution de paléo-tracés

1.1. Matériel et méthodes

1.1.1. Sites étudiés

Le précédent rapport (Grimaud et al., 2020) s'appuyait en grande partie sur le site pilote de la Vieille Seine à Vimpelles. Les résultats principaux de ce site seront repris, car c'est sur ce site que porte l'analyse des tétraéthers comme marqueurs de température. Des analyses des environnements végétaux sont également en cours sur ce même site, effectuées à partir du contenu en pollen et de la composition globale (C, N, $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) et spécifique (composés comme les n-alcanes) de la matière organique ainsi que de géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47}) appliquée à des coquilles de mollusques. Ces analyses ont été retardées en raison de la pandémie.

En 2021, des prélèvements et descriptions d'alluvions ont été réalisés sur quatre nouveaux sites (Catry, 2021) : Balloy (où deux sous-sites sont reportés), Noyen-sur-Seine, la Motte-Tilly ainsi qu'un second chenal proche de Vimpelles et baptisé « Demi-Lune » en raison de sa forme (Figs. 2 et 3), mais en réalité sur le territoire d'Égligny, au lieu-dit « La Trottine ». Les sites de Balloy et de Vimpelles sont présentés en détail du fait de leur proximité géographique. Le site de Noyen-sur-Seine est également abordé du fait de son aspect temporel proche de celui de la Vieille-Seine de Vimpelles. Le site de la Motte-Tilly est considéré principalement pour l'analyse géométrique.

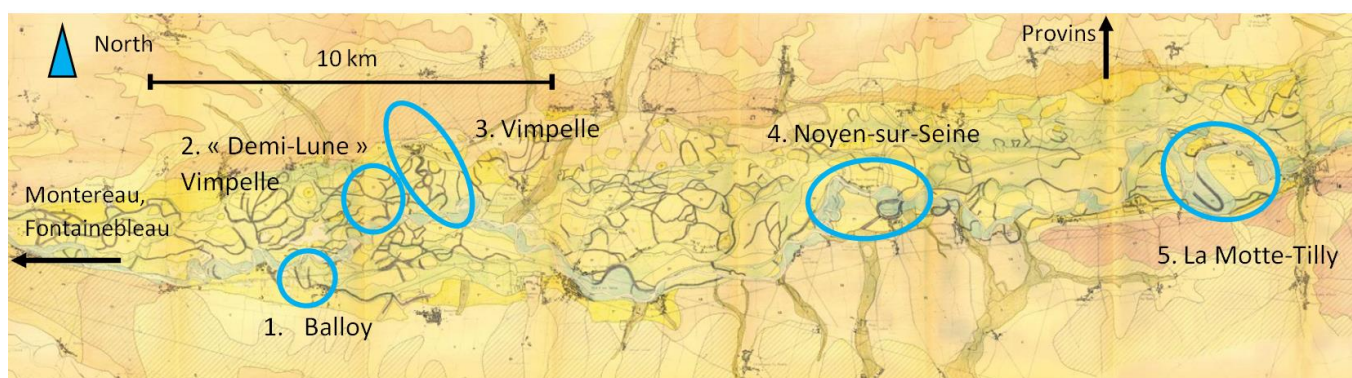


Figure 2. Carte géomorphologique du secteur ouest de la Bassée avec la localisation des 5 sites étudiés (Catry, 2021 ; d'après Mégrien et al., 1965).

1.1.2. Travail de terrain

Les analyses de terrain présentées sont proches de celles décrites dans le rapport de première année (Grimaud et al., 2020). A l'aide du modèle numérique de terrain de précision métrique mis à disposition par Voies Navigables de France (VNF), il a été possible de repérer par leurs empreintes topographiques les dépressions que forment les chenaux abandonnés.

Une analyse des paramètres géométriques des chenaux a été effectuée lorsque possible. Sur la base de l'identification des levées, des mesures de largeurs de plein bord des chenaux ont été effectuées. Elles ont été complétées par la mesure du rayon de courbure des boucles associées (Catry, 2021).

En parallèle, des transects de sondages à la tarière ont été réalisés suivant des sections transverses à l'axe de ces chenaux. Les différentes lithologies / granulométries traversées ont pu être décrites sur le terrain afin de dresser des logs sédimentaires pour chaque sondage. Ces logs sédimentaires ont permis de proposer des coupes interprétatives des géométries des corps sédimentaires au sein des chenaux (voir Fig. 5 pour l'ensemble des coupes de la Vieille-Seine à Vimpelles). Les échantillonnages à la tarière ont été l'occasion d'effectuer des prélèvements pour différents usages (datations par le radiocarbone ; échantillonnage pour géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47})). Enfin, un nouveau sondage a été effectué au carottier russe sur un des sites de Balloy dans une section très organique.

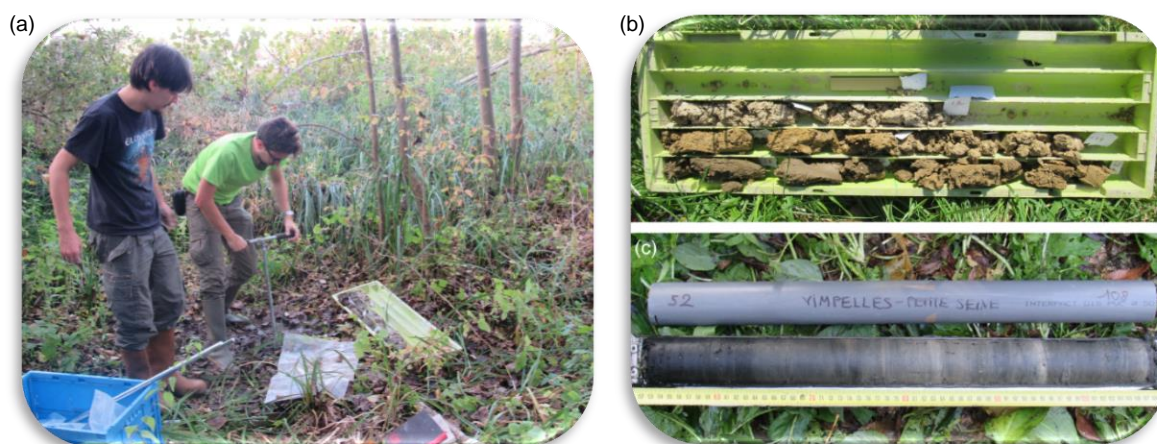


Figure 3. Photographies montrant les travaux effectués sur le terrain. (a) Réalisation d'un sondage à la tarière. (b) Echantillonnage à la tarière. (c) Exemple d'un sondage carotté continu réalisé au carottier russe à Vimpeles.

1.1.3. Analyse des tétraéthers

- *Présentation des tétraéthers en tant que marqueurs environnementaux*

Etant donné qu'aucune donnée instrumentale directe n'est disponible avant le XIX^{ème} siècle, notre connaissance des variations climatiques passées se base principalement sur l'utilisation de marqueurs d'environnement, sédimentologiques, minéralogiques, géochimiques, isotopiques ou biologiques. Les lipides membranaires produits par certains microorganismes peuvent ainsi être utilisés dans ce but. Les microorganismes sont en effet capables d'adapter la composition de leur membrane lipidique en réponse aux changements de conditions environnementales pour maintenir une fluidité suffisante et assurer un état optimal de la membrane cellulaire (e.g. Denich *et al.*, 2003). La structure des alkyl tétraéthers de glycérol, qui sont des lipides membranaires produits par les archées et certaines bactéries, est ainsi connue pour être dépendante des paramètres environnementaux (Schouten *et al.*, 2013). Les archées sont des microorganismes ubiquistes dans les environnements naturels, dont les membranes sont principalement composées de chaînes alkyles isopréniques liées au glycérol, formant des diéthers et des tétraéthers de glycérol (Fig. 4a). Dans les environnements aquatiques, l'abondance relative des différents tétraéthers produits par un phylum spécifique d'archées (les Thaumarchées) a été corrélée à la température à la surface de l'eau, conduisant au développement d'un marqueur de température (TEX₈₆ ; Schouten *et al.*, 2002) largement appliqué aux paléoenregistrements marins et lacustres.

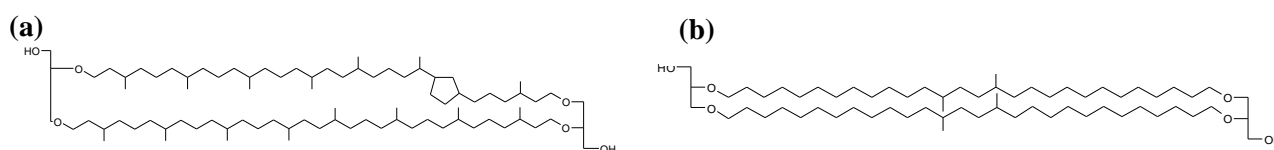


Figure 4. Exemples de structure de tétraéther d'origine (a) archéenne et (b) bactérienne.

Un autre type de tétraéthers, avec des chaînes alkyles ramifiées et non isopréniques (Fig. 4b), a par la suite été détecté dans une tourbière (Sinninghe Damsté *et al.*, 2000). Ces composés, suggérés comme étant d'origine bactérienne, se sont révélés être ubiquistes dans les environnements terrestres et aquatiques. Leur analyse dans les sols, tourbières et sédiments lacustres du monde entier (e.g. Pearson *et al.*, 2011 ; De Jonge *et al.*, 2014 ; Naafs *et al.*, 2017) a montré que leur structure varie principalement avec la température de l'air et le pH, permettant ainsi de les utiliser comme marqueurs de température et de pH dans des archives sédimentaires. Les tétraéthers bactériens sont à ce jour les seuls marqueurs organiques pouvant être utilisés pour la reconstruction des températures à la fois dans les environnements terrestres et aquatiques, les rendant de plus en plus populaires au cours des quinze dernières années. Les données paléoenvironnementales issues des tétraéthers bactériens doivent cependant être interprétées avec précaution, car (i) ces composés peuvent

avoir de multiples sources (autochtone, allochtone) en milieu aquatique, (ii) les microorganismes qui les produisent n'ont pas précisément été identifiés et (iii) l'incertitude sur les valeurs de température reconstruites reste à l'heure actuelle supérieure à 4°C. Une approche multi-marqueurs est en général développée pour les reconstructions paléoenvironnementales afin de tenir compte de ces biais potentiels.

- *Préparation des échantillons*

Trente échantillons ont été analysés pour leur distribution en tétraéthers. Ils correspondent à des tranches d'un cm, prélevées tous les 5 cm le long d'une carotte de 150 cm de long prélevée à Vimpeles au centre d'un chenal abandonné (carotte F1). Chaque échantillon a été lyophilisé après avoir été congelé à -20°C. Entre 1 à 1,5 g d'échantillon préalablement broyé a ensuite été extrait aux solvants organiques avec un mélange de dichlorométhane/méthanol 9/1. L'extraction, automatisée, a été réalisée à l'aide d'un Speedex E-916 (Buchi), à 100 °C et sous 100 bars de pression. Trois cycles d'extraction ont été effectués pour chaque échantillon.

L'extrait lipidique ainsi obtenu a été séché à l'évaporateur rotatif. Il a ensuite été séparé en deux fractions de polarité croissante sur colonne d'alumine préalablement activée à 150 °C pendant une nuit. La première fraction, contenant les lipides apolaires, a été éluée avec 30 mL d'un mélange heptane/dichlorométhane 9/1. La seconde fraction, contenant les tétraéthers, a été éluée avec 30 mL d'un mélange dichlorométhane/méthanol 1/1. Elle a ensuite été séchée à l'évaporateur rotatif puis dissoute dans 1 mL de dichlorométhane/méthanol 5/1.

300 µL d'échantillon ont été séchés sous azote, redissous dans de l'heptane puis introduits dans un tube Millipore de 500 µL avec un filtre PTFE 0,2 µm. L'échantillon a été filtré et centrifugé pendant 1 min à 7000 rpm. 45 µL de surnageant et 5 µL de standard à une concentration de 10 µg/mL ont été ajoutés dans un vial avec inserts.

Les tétraéthers ont été analysés par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse (HPLC/MS), avec un appareil LCMS 2020 Shimadzu. Deux colonnes de silice en série de type Waters BEH HILIC (150mm x 2.1mm, 1.7 µm) ont été utilisées. Elles se situent dans un four à 40°C. A la sortie des colonnes, les molécules sont ionisées à l'aide d'une source APCI (ionisation à pression atmosphérique) puis analysées avec un quadripôle.

Les différents tétraéthers étant des molécules de structure proche, un gradient de solvant est mis en place afin de les séparer. Ce mélange de solvant est à base d'hexane et d'isopropanol. La méthode analytique consiste à (i) utiliser une solution pure A d'hexane et un mélange B hexane/isopropanol 9 : 1 (v/v), (ii) commencer par une élution isocratique à 18% en B pendant 25 minutes puis l'augmenter à 35% de manière linéaire en 25 minutes, (iii) passer en 10 minutes à 100% en B puis le diminuer à 18% en 10 minutes et enfin maintenir cette composition pendant 10 minutes (Huguet et al., 2019).

Les analyses sont réalisées en mode SIM (*Single Ion Monitoring*), c'est-à-dire que seuls les ions de *m/z* préalablement sélectionnés seront détectés. Le rapport Signal/Bruit est ainsi amélioré par rapport au mode *full scan*, ce qui permet de détecter spécifiquement les ions voulus qui seraient non ou difficilement détectables en travaillant en mode *full scan*. Dans le présent cas, il s'agit des ions correspondant aux masses suivantes : pour les tétraéthers archéens 1302, 1300, 1298, 1296, 1294 et pour les tétraéthers bactériens 1050, 1048, 1046, 1036, 1034, 1032, 1022, 1020, 1018. L'abondance relative des différents tétraéthers par rapport au standard interne (*m/z* 744) a été déterminée.

1.2. Résultats

1.2.1. La Vieille Seine à Vimpeles

La Vieille-Seine à Vimpeles est un site exceptionnellement bien marqué dans la topographie sur 3 km de long. Sa morphologie a pu être cartographiée en combinant relevés de terrain et étude topographique à partir du MNT (Szewczyk, 2020 ; Petit *et al.*, sous presse).

Une trentaine de sondages réalisés sur toute sa longueur ont permis de proposer des coupes interprétées des corps sédimentaires au sein du chenal (Fig. 5). Elles illustrent le remplissage en deux étapes du chenal : d'abord une déconnexion rapide (probablement de l'ordre d'une dizaine d'années) par l'amont puis un remplissage plus long (de l'ordre de milliers d'années) par débordement des particules fines depuis les chenaux actifs lors des crues. Les sondages les plus en amont montrent le bouchon sableux (Fig. 5a) qui a permis la déconnexion du chenal par comblement. On observe le long des autres sections une proportion plus faible d'éléments grossiers à l'exception de certaines sections (Fig. 5f) où une barre sableuse centrale peut être identifiée.

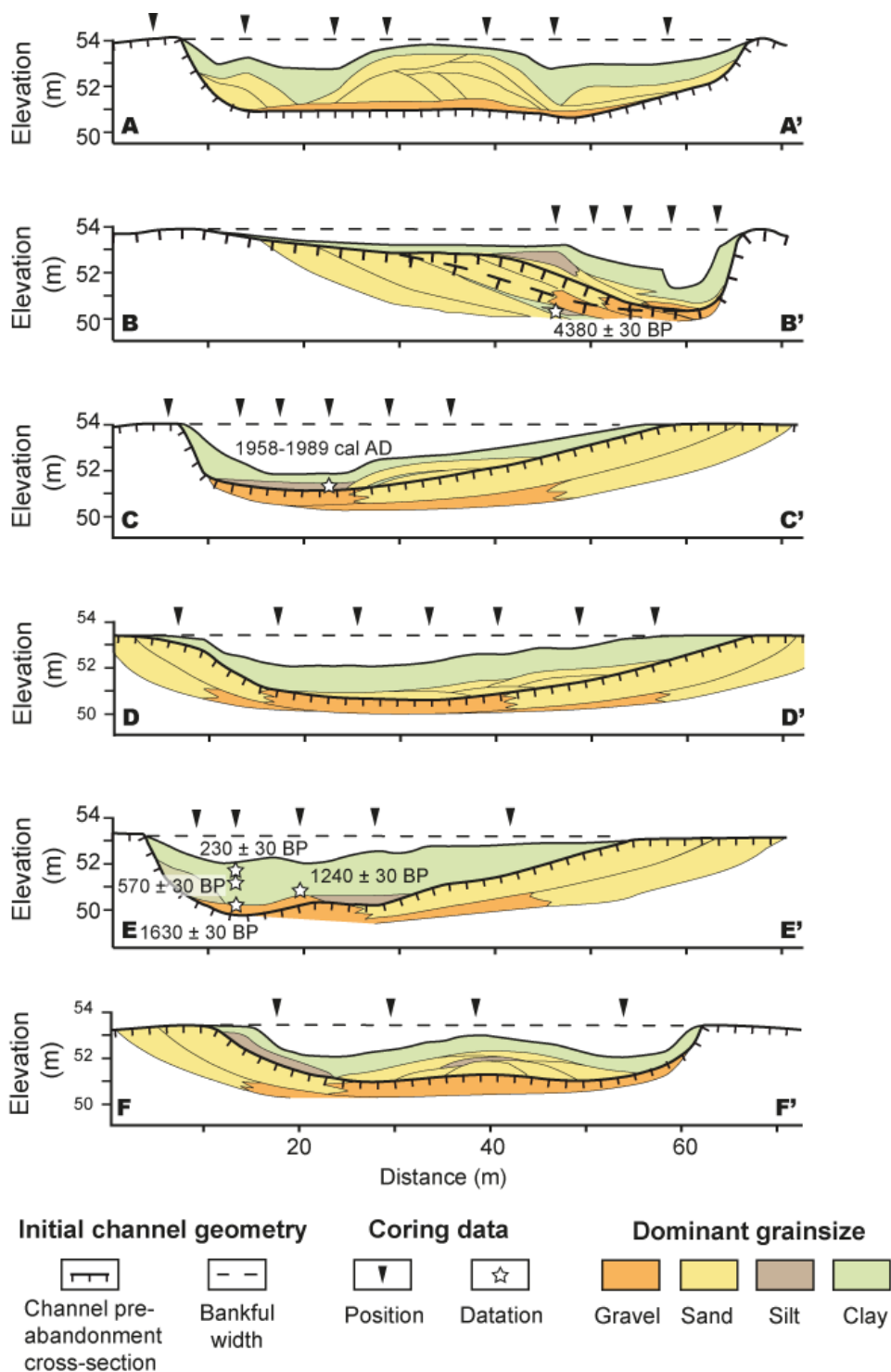


Figure 5. Coupes interprétées montrant d'amont vers l'aval la géométrie des remplissages sédimentaires au sein du chenal de la Vieille-Seine à Vimelles (Szewczyk, 2020).

Du point de vue chronologique, on observe au sein d'une barre d'accrétion latérale en amont du chenal un âge radiocarbone vieux (Beta-512047 : 4380 ± 30 ans BP), soit entre 3090 et 2913 avant notre ère à 95,4 % de probabilité) dans des sédiments fins (Fig. 5b). Cette occurrence suggère une première phase d'abandon et de remplissage fin du chenal. En aval, les âges dans les remplissages fins montrent un taux de sédimentation assez continu depuis 1630 ± 30 ans BP (Beta-512049), soit entre 346 et 536 de notre ère à 95,4 % de probabilité. Il y a donc entre ces deux âges une reprise de l'activité, suggérant que le chenal réoccupe un tracé plus ancien après une phase d'activité moins intense.

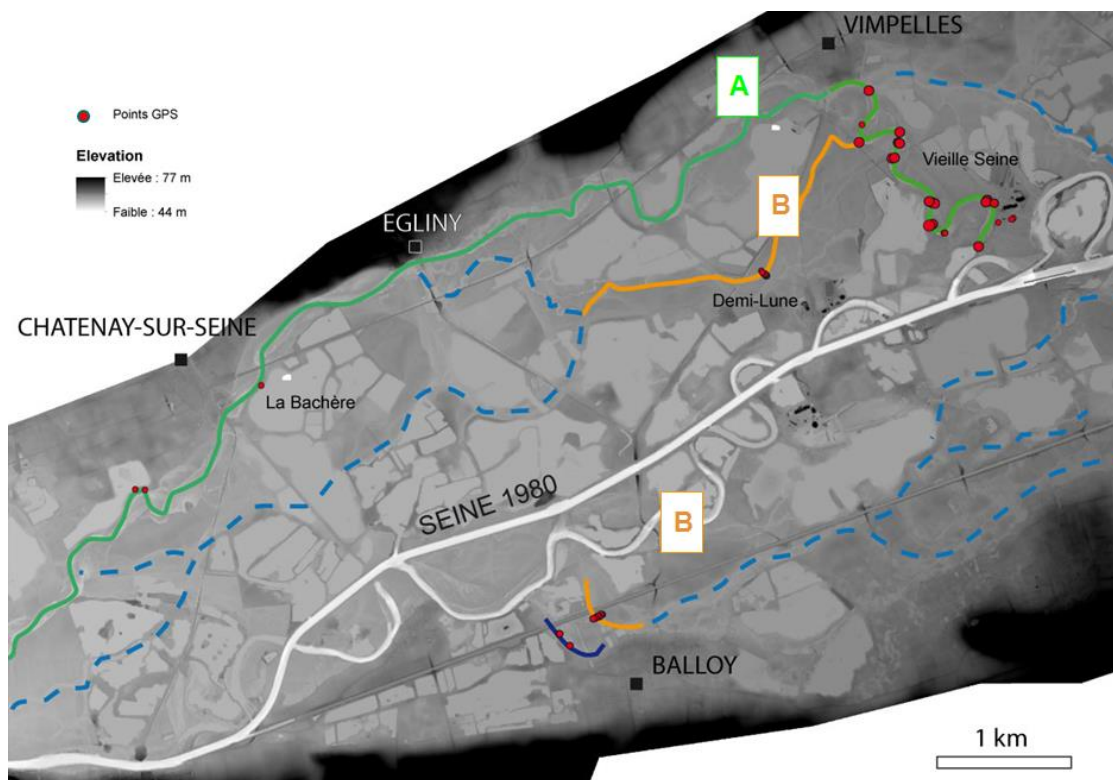


Figure 6. Localisation des sites étudiés en aval de Vimpelles. Les systèmes A et B sont interprétés comme ayant été actifs de manière contemporaine par le passé (voir discussion et Fig. 9).

Les observations effectuées le long de la Vieille-Seine à Vimpelles sont à mettre en parallèle d'autres éléments qui viennent appuyer les résultats obtenus. Le comblement de la Vieille Seine s'est donc effectué de manière progressive. Dans la monographie communale d'Égligny (commune voisine située en aval de Vimpelles), il est indiqué qu'une connexion hydraulique de moindre importance a été conservée jusqu'au XIV^{ème} siècle entre la Seine actuelle et l'aval de la Vieille Seine, qui n'est plus aujourd'hui alimentée que par l'Auxence (Delettre, 1849 ; Songeux, 1888). À Châtenay-sur-Seine, au lieu-dit « La Bachère » (Fig. 6), des observations réalisées lors d'un rabattement de la nappe phréatique durant l'exploitation d'une sablière ont permis de retrouver, le long de l'Auxence en continuité de la « Vieille Seine » de Vimpelles, des éléments comparables à ceux décrits ci-avant (Gouge, 1985). On y a en effet observé des indices de remaniement des sédiments par une reprise ou une accélération de la dynamique alluviale, puis un comblement de chenal dont une date radiocarbone (Ly-5559 : 4830 ± 40 BP, soit entre 3688 et 3525 av. notre ère et 3525 à 95,4% de probabilité) a permis de caler une séquence pollinique (Leroyer, 2003).

Un sondage au carottier russe a été réalisé dans une partie plus tourbeuse de la zone où de nombreuses datations par le radiocarbone sont accessibles (Fig. 5e). C'est sur ce sondage que se concentrent les analyses géochimiques, palynologiques et organiques pour préciser les paléo-environnements. L'analyse d'une partie du contenu en matière organique de ce sondage est présentée en section 2 afin de proposer une restitution de l'évolution de la température lors de phase d'abandon de chenal.

1.2.2. Apports des nouveaux sondages

Un total de 18 nouveaux sondages, qui ont permis d'apporter de nouveaux éléments à la compréhension de la zone, ont été réalisés durant l'hiver 2020-2021.

Au niveau de la commune de Balloy, un chenal dont l'abandon est daté du début de l'âge du Bronze est retrouvé en position emboîtée dans un second chenal d'âge plus vieux (> 8000 BP) (Figs. 6, 7 et 9). Une reconstitution de la géométrie du remplissage de ce chenal a pu être proposée grâce à 6 sondages réalisés perpendiculairement à son axe (Fig. 7). La coupe montre la complexité du remplissage, avec notamment la présence d'une barre graveleuse latérale à sa base (sondages 377, 378, 383 et 384). Cette barre correspond à un dépôt synchrone de la déconnexion du chenal : soit une barre d'accrétion latérale soit la terminaison du bouchon sableux (voir Szewczyk *et al.*, 2021). Le reste du remplissage est de type argileux. On note des passées plus organiques que l'on peut retrouver sur un niveau avec une bonne extension latérale au sein de ces niveaux fins. Sur les bordures des chenaux, on retrouve des éléments de type graviers qui sont probablement à mettre en lien avec l'érosion de matériel plus grossier provenant des berges et qui vient participer au comblement du chenal.

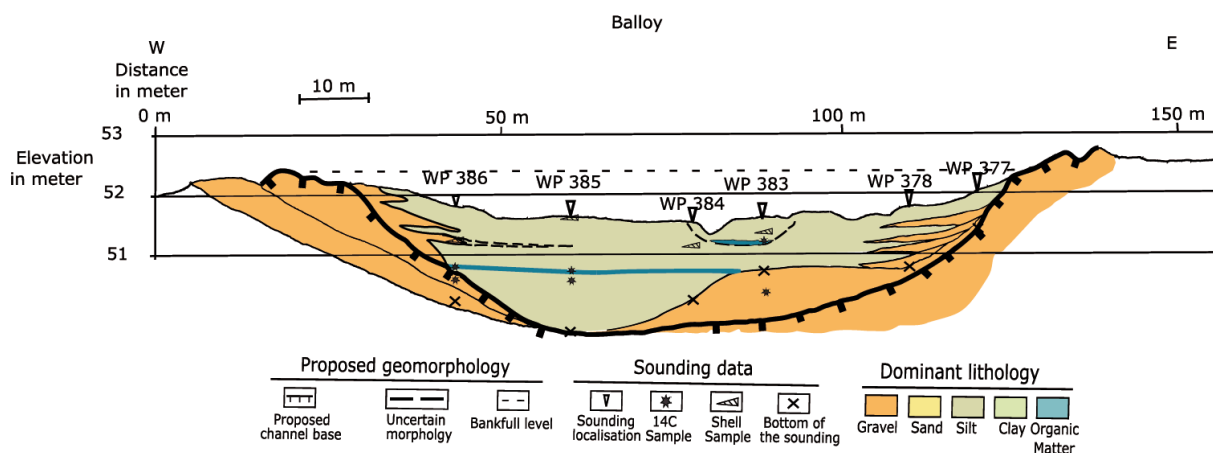


Figure 7. Coupe interprétée du chenal est de Balloy (Catry, 2021).

Plusieurs autres sites sont en cours d'analyse sur la base des sondages réalisés. Sur la commune de Vimpeles, le site dit « Demi-Lune » montre une topographie et un remplissage complexes. Des aménagements anthropiques compliquent par exemple l'identification précise de la position exacte des levées, et donc l'estimation de la largeur de plein bord. Le remplissage est très argileux avec des passées organiques localement continues mais qui semblent s'interrompre vers le centre du chenal. L'âge du plus vieux remplissage acquis pour le moment est datée de la fin du Néolithique. Curieusement, une date radiocarbone estimée au milieu de l'âge du Bronze est retrouvée plus profonde dans le chenal le long du même transect. Elle suggère un remaniement des sédiments dont l'origine reste à déterminer. Il est possible que cette inversion soit liée à un curage du chenal, comme cela a pu être démontré dans la Boire-Torse, ancien bras de la Loire, à Varades (Miéjac, 2007). Ce curage se situerait donc au début de l'âge du Bronze, ce qui est rarement démontré dans la littérature. Il convient donc de préciser l'analyse de ce site avant de proposer définitivement cette interprétation.

Plus en amont, les travaux ont porté sur le site de Noyen-sur-Seine, proche du lieu où une barque monoxyle carolingienne a été découverte à l'occasion des travaux de rescindement d'une boucle de la Seine mis en œuvre par Voies navigables de France (Mordant, 1998). En raison de l'urgence, à l'époque, du sauvetage de la barque, l'analyse complète du site, notamment celle du contexte géomorphologique, n'a été effectuée que sommairement. Nous nous focalisons sur un chenal situé dans la continuité morphologique du site où la barque a été découverte. Le long de la coupe étudiée, le remplissage du chenal étudié est asymétrique et sa partie orientale est plus profonde et plus argileuse que sa partie occidentale. Cette asymétrie est à mettre en relation avec la courbure importante du chenal. Des datations radiocarbone sont en cours dans des niveaux proches de la base du chenal. Les premiers âges obtenus donnent 1405-1308 cal BP à 95,4% de probabilité, ce qui indique que ce chenal était récemment abandonné à l'époque carolingienne et qu'il avait plus de tirant d'eau que durant l'actuel. Il n'est pas exclu qu'il ait pu être encore utilisé à cette époque à des fins de

navigation comme celui de Vimpelles. L'analyse encore en cours des données acquises sur ce site devrait permettre d'avancer sur la compréhension de l'évolution morphologique du site lors de son activité puis durant son abandon.

1.3. Éléments de discussion

1.3.1. Géométrie des chenaux

Les nouvelles données sur les chenaux étudiés ont permis de compléter la gamme des tailles de paléo-chenaux observée en Bassée (Fig. 2). Elles permettront progressivement de construire une base de données mettant en relation épaisseur des remplissages argileux et géométrie des chenaux. Des résultats préliminaires portant simplement sur des paramètres géométriques bien contraints dans la littérature (Williams, 1984, 1986 ; Held, 2011) sont présentés en Fig. 8.

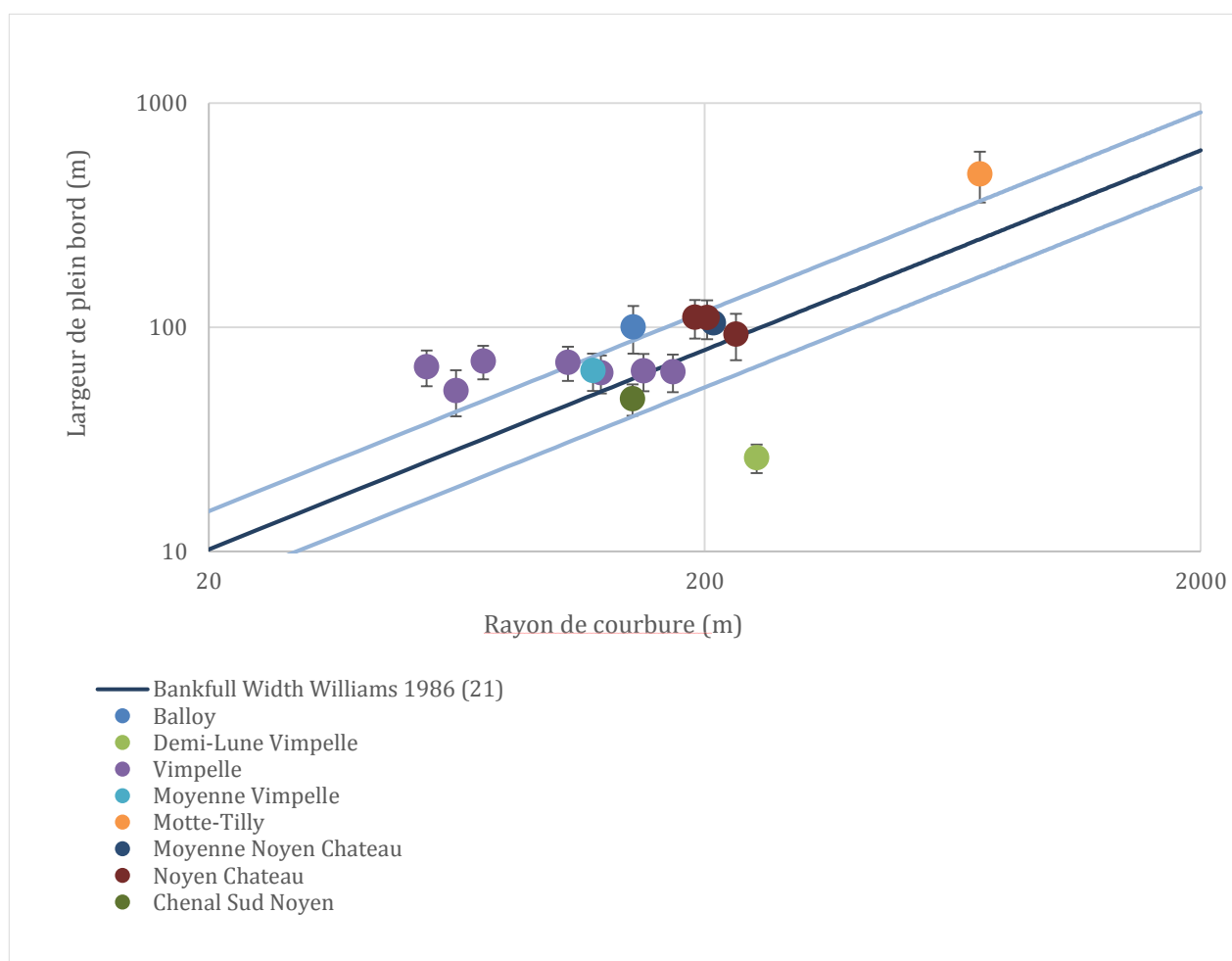


Figure 8. Mesures de la géométrie des chenaux présentés dans ce rapport en comparaison avec la relation largeur de plein bord-rayon de courbure des méandres définie par Williams (1986) (Catry, 2021).

Sur la base des systèmes de chenaux étudiés présentés en Fig. 2, plusieurs observations peuvent être faites en comparant la largeur de plein bord des sections des chenaux avec le rayon de courbure des méandres associées. La plupart des systèmes méandriformes étudiés présentent des géométries cohérentes avec ceux d'autres systèmes compilés par Williams (1986) (Fig. 8). Dans le système de la Vieille Seine de Vimpelles, on note une grande disparité des rayons de courbure pour des largeurs globalement constantes (seuls certains sites comme celui de la Motte-Tilly se démarquent clairement en termes de largeur de plein bord). Ainsi, des méandres sortent de la relation proposée par Williams (1986). Deleplancque (2016) propose que certaines inadéquations entre ces deux paramètres soient liées à des réoccupations de tracés plus anciens. La constance généralement observée des largeurs de plein bord suggère que ce paramètre se réajuste le plus vite, comme couramment suggéré (Métivier *et al.*, 2017).

Si une partie des chenaux de la Vieille-Seine semble plus larges par rapport à leur rayon de courbure, on observe en revanche que le chenal d'Égligny dit « Demi-Lune » (« La Trotte », point vert clair sur la Fig. 8) possède un rayon de courbure très important par rapport à sa largeur. Cette morphologie pourrait s'expliquer de deux manières : il peut s'agir d'une réoccupation d'un chenal plus ancien de plus grande taille ou alors des conséquences des aménagements anthropiques. Dans ce second cas, les levées utilisées pour mesurer les largeurs de plein bord pourraient alors être en partie artificielles, compliquant l'interprétation des relations géométriques.

A l'inverse, le chenal de la Motte-Tilly présente une largeur assez forte par rapport à son rayon de courbure. On note la taille très imposante de ce chenal, dont des dépôts ont pu être datés jusqu'à $7\,455 \pm 30$ cal BP à 95% de probabilité, sans que le fond ne soit daté (Deleplancque, 2016 ; Rejiba et al., 2017). On peut donc rapporter l'histoire de ce chenal à l'Holocène inférieur, dans des conditions climatiques et hydrologiques probablement très différentes des autres chenaux étudiés. On peut proposer que son origine soit préboréale, ce qui demande à être confirmé par de nouvelles datations.

1.3.2. Géométrie des réseaux

La Fig. 8 présente les éléments de synthèse des âges d'abandon des chenaux de la zone étudiées (Figs. 1 et 6). Un essai de corrélation est présenté entre deux systèmes observables en carte sur la Fig. 5 (A et B). Le système A est représenté en vert sur la carte de la Fig. 6, il correspond au système de la Vieille-Seine auquel on peut rattacher la partie aval de l'Auxence (*i.e.*, passant par le lieu-dit « la Bachère »). Dans le précédent rapport (Grimaud *et al.*, 2020), il ressortait que ce système est un ancien bras de Seine dont l'abandon débute à la fin de l'Antiquité (A2) et qui résulte probablement de la réoccupation d'un système encore plus ancien (Néolithique (A1)). Etant donné le faible paléo-débit estimé par analyse géométrique de ce chenal, on peut supposer que la Seine n'avait alors pas un chenal unique, mais fonctionnait en anabranché.

Les résultats acquis cette année permettent de préciser le contexte de fonctionnement de ces paléo-bras. Les âges obtenus sur le site de Noyen-sur-Seine permettent par exemple de rattacher l'abandon du chenal échantillonné à la seconde phase de fonctionnement du système A (A2). Etant donné l'éloignement de ce site par rapport aux autres, il est néanmoins difficile de reconstituer précisément comment ce chenal pouvait se connecter avec la Vieille-Seine de Vimpelles.

Sur les sites de Balloy et « Demi-Lune » Vimpelles, on observe un remplissage démarrant à la fin du Néolithique et au début de l'âge du Bronze. On peut donc rassembler ces deux chenaux au sein d'un même système (B) dont l'abandon est synchrone. Ces résultats montrent avant tout que ces chenaux ont fonctionné simultanément. Ainsi, ils renforcent la vision d'un système anabranché. Des précisions seront apportées au cours de la prochaine année afin de compléter cette chronologie.

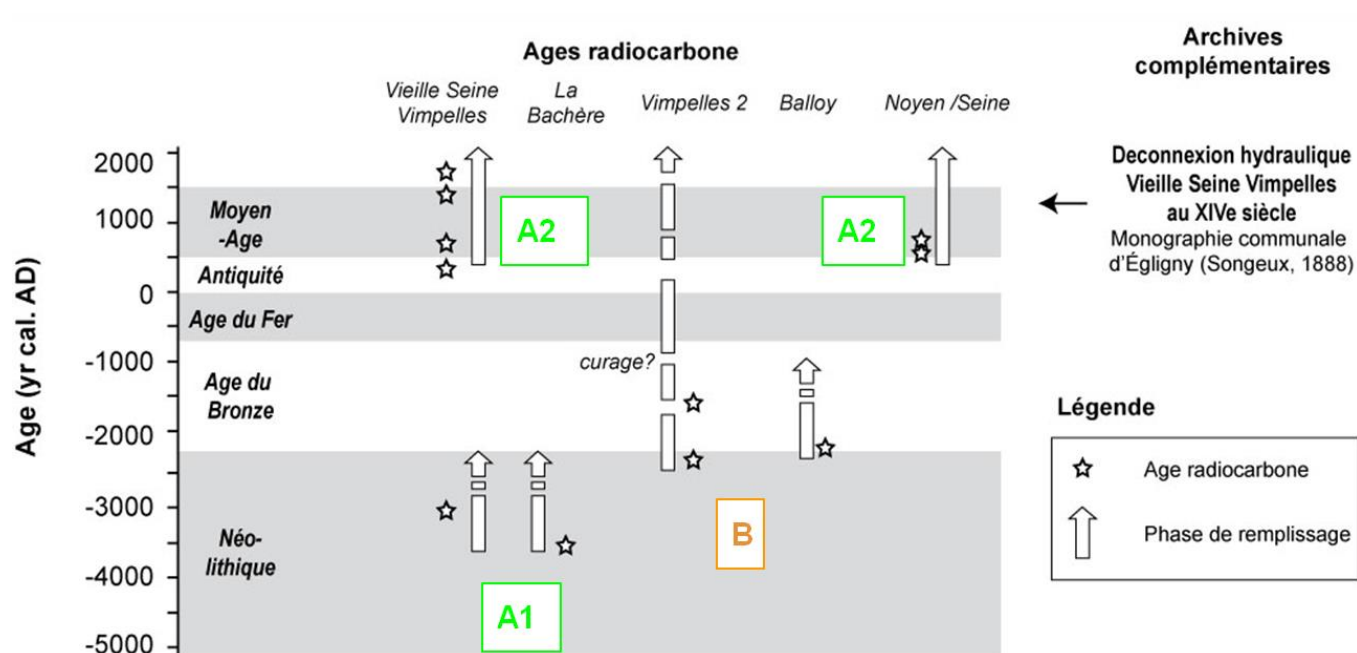


Figure 9. Chronologie d'abandon et de remplissage des chenaux étudiés sur la base des datations radiocarbones.

2. Reconstitution des paléo-environnements : pH et température

2.1. Détection des tétraéthers

Les tétraéthers ont été détectés dans l'ensemble des échantillons analysés. Comme le montre la Fig. 10, les tétraéthers biosynthétisés par les archées éluent en premier, suivi par le standard interne (molécule synthétique utilisé pour la quantification relative des tétraéthers), puis les tétraéthers d'origine bactérienne.

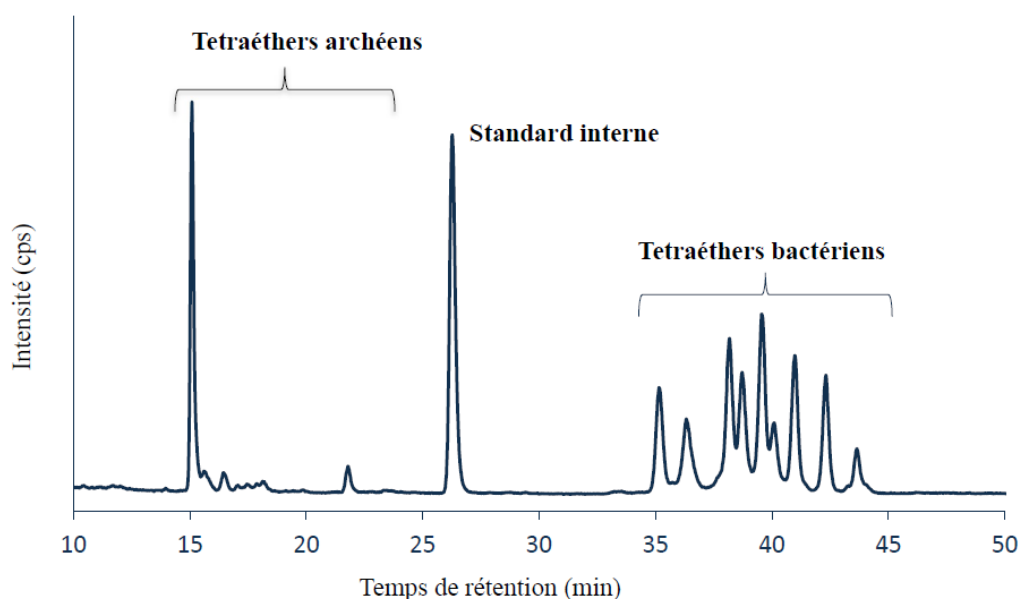


Figure 10. Chromatogramme HPLC/MS de l'échantillon prélevé à 72-73 cm de profondeur à Vimpelles, présentant les différents tétraéthers et le standard interne.

L'aire de chaque pic (correspondant à un composé) a été déterminée. Différentes calibrations (*i.e.* fonctions de transfert) entre les paramètres environnementaux (pH, température) et l'abondance relative des tétraéthers bactériens ont été développées ces dernières années, à la fois pour les milieux aquatiques et terrestres. Les résultats obtenus à partir des fonctions de transfert en vue de la reconstruction du pH et de la température au cours de 1 800 dernières années à Vimpelles ont été comparées, comme décrit ci-dessous.

2.2. Reconstruction du pH

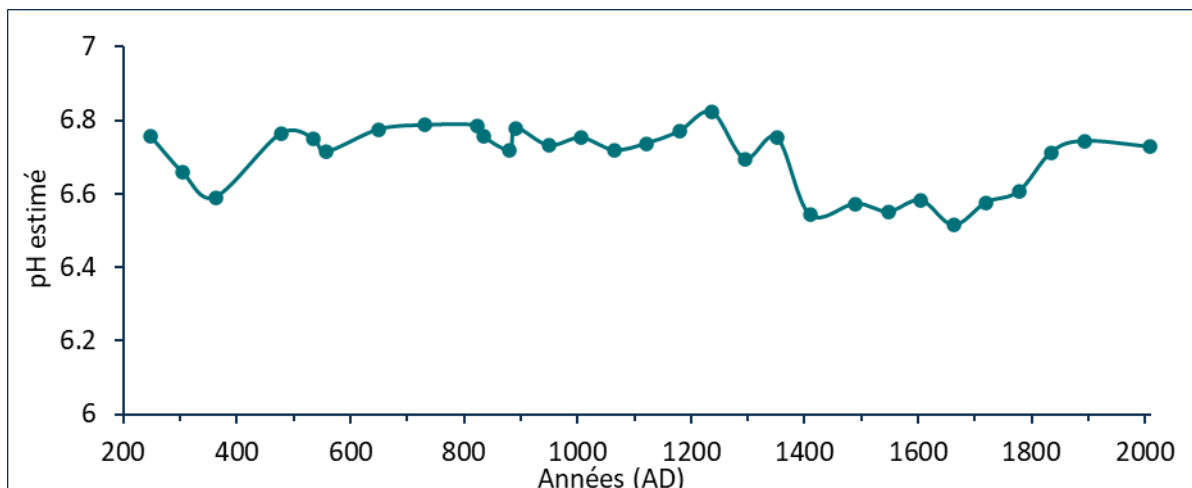


Figure 11. Reconstruction du pH au cours des 1800 dernières années à Vimpelles à partir de la calibration globale terrestre de De Jonge *et al.* (2014).

L'évolution du pH au cours des 1 800 dernières années a été déterminée à partir de la calibration globale de De Jonge *et al.* (2014). Ces derniers ont établi une relation linéaire entre le degré de cyclisation moyen des tétraéthers bactériens et le pH dans 221 sols provenant du monde entier. Selon cette calibration, le pH n'a que très peu évolué au cours des deux derniers millénaires à Vimpelles (0,3 unité maximum ; Fig. 11), cette gamme de variation étant inférieure à l'incertitude de la calibration de De Jonge *et al.* (2014), de 0,8 unités. Les tétraéthers peuvent avoir de multiples sources : production dans les sols, dans la colonne d'eau et/ou le sédiment. La faible variation de pH (Fig. 11) suggère que l'origine des tétraéthers bactériens n'a pas changé de manière notable le long de l'archive sédimentaire de Vimpelles.

2.3. Reconstruction de la température

De nombreux modèles ont été développés ces dernières années pour reconstruire la température à partir des tétraéthers bactériens, à la fois dans les milieux terrestres et aquatiques. Trois des calibrations globales les plus récentes ont été appliquées à l'archive de Vimpelles : (i) la première est basée sur une régression linéaire multiple entre l'abondance relative des tétraéthers bactériens dans 222 sols du monde entier et la température moyenne annuelle de l'air (De Jonge *et al.*, 2014) ; (ii) la seconde correspond à un modèle non-linéaire (*random forest*) entre l'abondance relative des tétraéthers bactériens dans plus de 770 sols du monde entier et la température moyenne annuelle de l'air (Véquaude *et al.*, soumis) ; (iii) la troisième correspond à une régression linéaire entre le degré de méthylation moyen des tétraéthers bactériens dans 272 sédiments lacustres et la température moyenne annuelle de l'air (Martínez-Sosa *et al.*, 2021). L'incertitude sur les températures reconstruites est de l'ordre de 3 à 5 °C en fonction du modèle considéré.

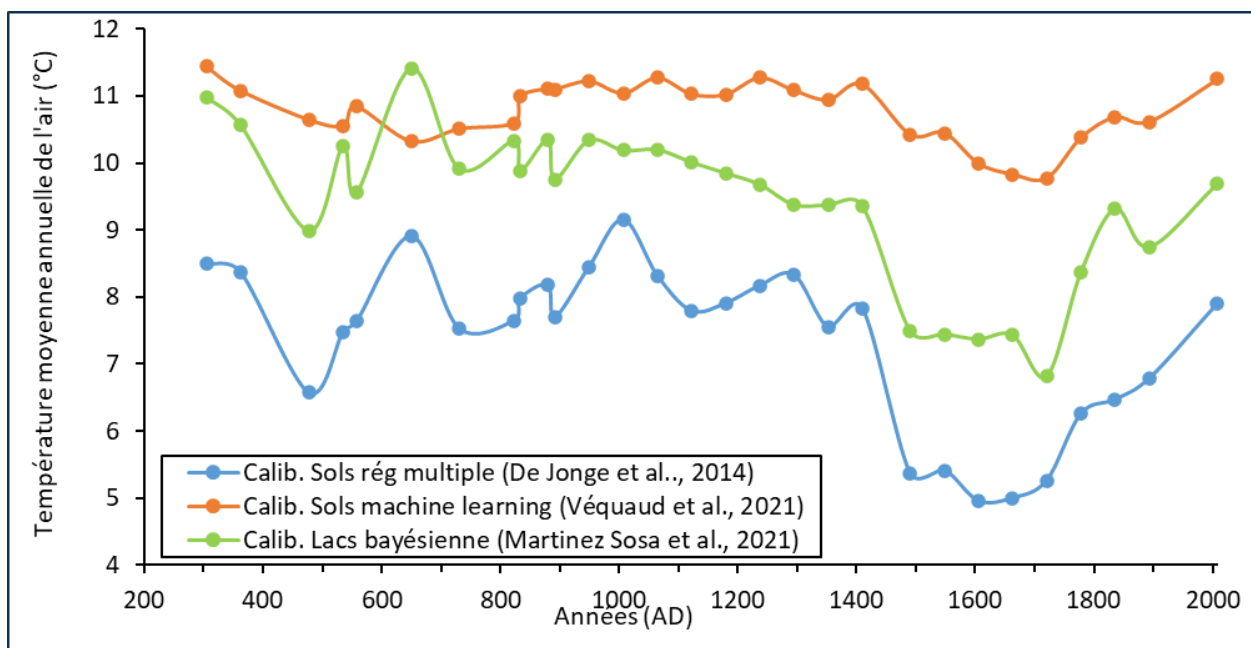


Figure 12. Reconstruction de la température moyenne annuelle de l'air à partir de l'abondance relative des tétraéthers bactériens le long de la carotte de Vimpelles à partir de différentes calibrations globales terrestres (De Jonge et al., 2014 ; Véquaud et al., soumis) et lacustre (Martínez Sosa et al., 2021).

Si l'on excepte la période comprise entre 600 et 800 AD, il apparaît que les différentes calibrations fournissent globalement les mêmes tendances qualitatives (Fig. 12), notamment une diminution progressive de la température entre les années 1000 et 1400 AD, diminution qui se fait ensuite plus brutale entre 1400 et 1500 AD avant que la température ne réaugmente à partir de 1700 AD. Cependant, les valeurs absolues de température diffèrent entre les trois calibrations testées, de même que les amplitudes de variation au cours du temps, montrant l'influence du choix du modèle sur les résultats obtenus.

Le modèle non-linéaire *random forest* développé par Véquaud et al. (soumis) fournit les estimations de température moyenne annuelle de l'air les plus proches des valeurs instrumentales mesurées sur la période actuelle à Vimpelles (autour de 11 °C). Par ailleurs, l'amplitude de température estimée à partir des modèles de De Jonge *et al.* (2014) et Martínez Sosa *et al.* (2021) au cours des 1800 dernières années (4-5 °C) est plus élevée que celle obtenue à partir de la calibration de Véquaud et al. (< 2 °C), qui est la plus cohérente avec l'amplitude attendue au cours de l'Holocène (2 à 3°C maximum ; Liu *et al.*, 2014). Le modèle développé par Véquaud et al. (soumis) sera le seul considéré dans la suite de ce rapport, puisqu'il fournit à la fois les amplitudes et les valeurs de température les plus proches de celles attendues.

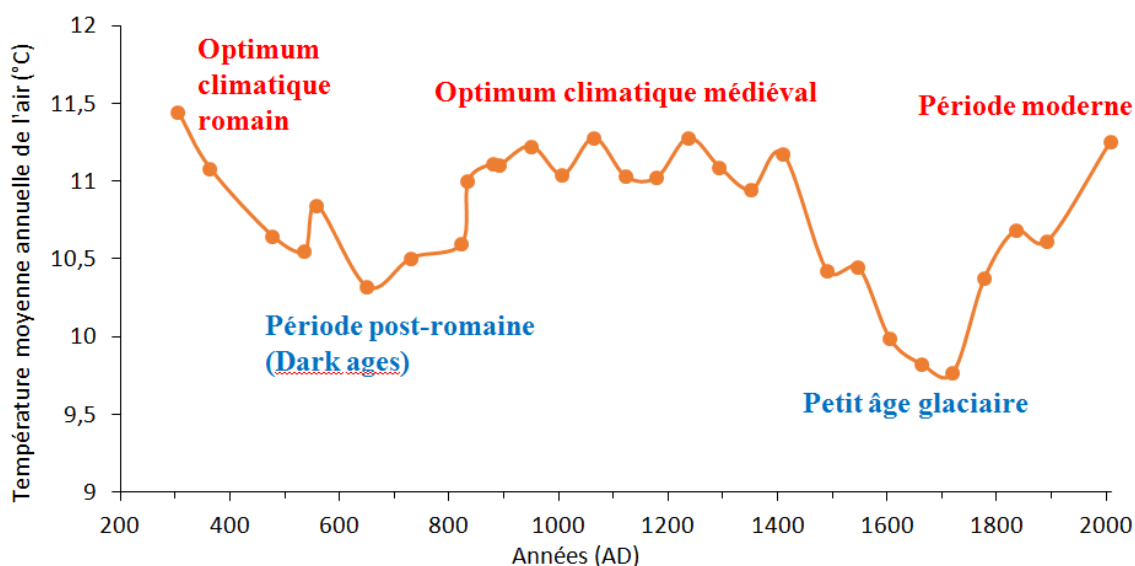


Figure 13. Reconstruction de la température moyenne annuelle de l'air à partir de l'abondance relative des tétraéthers bactériens le long de la carotte de Vimpelles à partir de la calibration globale terrestre de Véquaud et al. (soumis).

Il apparaît que les principaux événements climatiques documentés dans la littérature (e.g., Ljungqvist, 2010) sont reconstruits par les tétraéthers bactériens à Vimpelles (Fig. 13). On observe ainsi une alternance de périodes de réchauffement (période moderne, optimum climatique médiéval et optimum climatique romain en rouge sur la Fig. 13) et de refroidissement (Petit âge glaciaire et période post-romaine, en bleu sur la Fig. 13). Ces premiers résultats confirment le potentiel des tétraéthers bactériens pour la reconstruction des températures à partir d'archives sédimentaires continentales. Ils seront complétés par l'analyse de ces mêmes composés à différentes profondeurs et celle d'autres marqueurs de température (Δ_{47}) et de végétation (pollen, *n*-alcanes) pour affiner la reconstruction des paléoenvironnements au cours des 1800 dernières années à Vimpelles.

Conclusions

Les investigations sur les paléo-chenaux de la Petite-Seine, dans la plaine alluviale de la Bassée entre Nogent-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne ont été poursuivies. Une cinquantaine de sondages ont mis en évidence les changements du cours de la Seine d'un chenal à l'autre avec des évidences de réactivation et de fonctionnement suivant un mode anastomosé. Les datations radiocarbones ont permis de préciser ce calendrier depuis le Néolithique, et peuvent localement suggérer l'action anthropique sous forme de curage.

Au cours de cette dernière année, la première application des tétraéthers bactériens en tant que marqueurs de température a été réalisée sur une archive sédimentaire du bassin de la Seine. Cette nouvelle méthodologie, prometteuse, a permis de reconstruire les conditions climatiques passées au niveau du chenal abandonné de Vimpelles. Les principaux événements climatiques répertoriés dans la littérature ont pu être identifiés, démontrant l'intérêt des tétraéthers bactériens en tant que marqueurs de température. Nous chercherons dans les mois à venir à améliorer la robustesse des reconstructions de température en adoptant une approche multi-marqueurs, via notamment l'analyse des *clumped isotopes* des carbonates ($\Delta_{47}\text{Ca}$), qui permet d'établir la proportion de liaison ^{13}C - ^{18}O dans un cristal de carbonate. Nous améliorerons également nos connaissances du contexte paléo-environnemental en reconstruisant la végétation passée et utiliserons pour ce faire d'autres marqueurs (pollen, *n*-alcanes). Au final, l'ensemble des données obtenues apporteront un nouvel éclairage sur l'évolution géomorphologique et les conditions paléo-environnementales et climatiques d'abandon des chenaux de la Bassée.

Bibliographie

- Antoine, P., Lozouet, N. L., Chaussé, C., Lautridou, J. P., Pastre, J. F., Auguste, P., Bahain, J.J, Falguères, C. & Galehb, B. (2007). Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme): synthesis, and new results from interglacial deposits. *Quaternary Science Reviews*, 26(22-24), 2701-2723.
- Arnaud-Fassetta, G., Carcaud, N., Castanet, C., & Salvador, P. G. (2010). Fluvial palaeoenvironments in archaeological context: Geographical position, methodological approach and global change—Hydrological risk issues. *Quaternary International*, 216(1-2), 93-117.
- Bridgland, D., & Westaway, R. (2008). Climatically controlled river terrace staircases: a worldwide Quaternary phenomenon. *Geomorphology*, 98(3-4), 285-315.
- Catry, J., (2021). Relation between abandoned channels morphology and clay fill thickness: insight from the Bassée, upper Seine River France. DENATURA research semester.
- De Jonge C. et al. (2014). Occurrence and abundance of 6-methyl branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers in soils: Implications for palaeoclimate reconstruction. *Geochim. Cosmochim. Acta* 141, 97-112.
- Delettre, F.-A. (1849), Histoire de la province du Montois comprise dans les cantons de Bray, Donnemarie, Provins et Nangis, arrondissement de Provins, Nogent-sur-Seine, impr. de Garreau et Raveau, 1849, t. 1, p. 403.
- Deleplancque, B. (2016). *Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires d'une plaine alluviale: Exemple de l'évolution de la Seine supérieure depuis le dernier maximum glaciaire* (Doctoral dissertation, Paris Sciences et Lettres).
- Deleplancque, B., Cojan, I., Beucher, H., Mehl, C., & Stab, O. (2018). Spatial and temporal patterns of the upper Pleistocene alluvial fill deposits of the upstream Seine River alluvial plain, la Bassée, France. *Geomorphology*.
- Denich T.J. et al. (2003). Effect of selected environmental and physico-chemical factors on bacterial cytoplasmic membranes. *J. Microbiol. Methods* 52, 149-182.
- Eschbach, D., & Lestel, L. (2018). Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval. *Rapport PIREN-Seine*
- Flipo, N., Mouhri, A., Labarthe, B., Biancamaria, S., Rivière, A., & Weill, P. (2014). Continental hydrosystem modelling: the concept of nested stream–aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3121-3149.
- Gouge, P., (1985) *Châtenay-sur-Seine « Les Sécherons » 1985 et campagne de sauvetage programmé pour 1986 : estimation du potentiel archéologique*, [Rapport au Directeur de la Circonscription des antiquités préhistoriques d'Île-de-France].
- Held, A. E. (2011). Apport de la paléohydrologie dans la quantification des rôles respectifs du climat et de la tectonique des systèmes fluviaux méandriformes fossiles: application à des systèmes oligo-miocènes d'Europe occidentale (PhD, ENSM, Paris).
- Huguet A., Roussel A., Anquetil C. et al. (2019). Evaluation of 3-hydroxy fatty acids as a pH and temperature proxy in soils from temperate and tropical altitudinal gradients. *Org.Geochem.* 129, 1-13.
- Jeannot, B., Weill, S., Eschbach, D., Schmitt, L., Delay, F., 2019. *Assessing the effect of flood restoration on surface-subsurface interactions in Rohrschollen Island (Upper Rhine River - France) using integrated hydrological modeling and thermal infrared imaging*. Hydrology and earth system sciences. **23** pp. 239–254.

- Lautridou, J. P., Auffret, J. P., Baltzer, A., Clet, M., Lecolle, F., Lefebvre, D., Lericolais, D., Roblin-Jouve, A., Balescu, S., Carpentier, G., Descombes, J.-C., & Occhietti, S.. (1999). Le fleuve Seine, le fleuve Manche. *Bulletin de la Société géologique de France*, 170 (4), 545-558.
- Leroyer, C. (2003). Environnement végétal des structures funéraires et anthropisation du milieu durant le Néolithique récent/final dans le Bassin parisien. *Revue archéologique de Picardie*, 21 (1), 83-92.
- Liu Z., Zhu J., Rosenthal Y., Zhang X., Otto-Bliesner B.L., Timmermann A., Smith R.S., Lohmann G., Zheng W., Timm O.E (2014). The Holocene temperature conundrum. *PNAS* 111, <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1407229111>.
- Ljungqvist F.C. (2010). A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical northern hemisphere during the last two millennia. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 92, 339-351.
- Martínez-Sosa P., Tierney J., et al. (2021). A global Bayesian temperature calibration for lacustrine brGDGTs. *Geochim. Cosmochim. Acta* 305, 87-105.
- Métivier, F., Lajeunesse, E., & Devauchelle, O. (2017). Laboratory rivers: Lacey's law, threshold theory, and channel stability. *Earth Surface Dynamics*, 5(1), 187-198.
- Miéjac, E. (2007) La Boire Torse - section amont. *Rapport Diagnostic INRAP*, 171 pp.
- Mégrien, C., Berton, Y., Dassibat, C., Diffre, P., Duermael, G., Jonquet, P., ... & Berger, G. (1965). *Possibilité aquifère des alluvions du val de seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau*. Technical report, Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Mordant, D. (1998). La barque monoxyle carolingienne de Noyen-sur-Seine (Seine-et-Marne). *Archaeonautica*, 14 (1), 23-27.
- Mordant, D. (2006). *PCR "Dynamique d'occupation humaine de la Bassée et du confluent Seine/Yonne dans le contexte local et régional, à partir de 7000 avant notre ère"*.
- Naafs B.D.A., Inglis G.N., (...) Huguet A., (...) Pancost R.D. (2017). Introducing global peat-specific temperature and pH calibration based on brGDGT bacterial lipids. *Geochim. Cosmochim. Acta* 208, 285-301.
- Pastre, J. F., Fontugne, M., Kuzucuoglu, C., Leroyer, C., Limondin-Lozouet, N., Talon, M., & Tisnérat-Laborde, N. (1997). L'évolution tardi- et postglaciaire des lits fluviaux au nord-est de Paris (France). Relations avec les données paléoenvironnementales et l'impact anthropique sur les versants / The evolution of river beds in the North-East region of Paris (France) during the Lateglacial and the Holocene. Relation to the palaeoenvironments and to the human impact on the slopes. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3 (4), 291-312.
- Pearson E.J. et al. (2011). A lacustrine GDGT-temperature calibration from the Scandinavian Arctic to Antarctic: Renewed potential for the application of GDGT paleothermometry in lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 6225-6238.
- Petit C. , Charrondière-Lewis P. , Cojan I., Cruz F. , Deborde G. , Deleplancque B., Durost R., Fechner K. , Fontana L., Frouin M., Gouge P., Granai S., Grimaud J.-L., Peltier V. , Riquier V. , Szweczyk, L., Tegel W. , Vanmorkerke J. (sous presse). Relations sociétés - milieux en Petite-Seine du Mésolithique à la fin du Moyen Âge : nouvelles problématiques et résultats récents d'archéologie environnementale. In V. Riquier (ed.) : *L'Aube, un espace clé sur le cours de la Seine*.
- Rejiba, F., Schamper, C., Chevalier, A., Deleplancque, B., Hovhannissian, G., Thiesson, J., & Weill, P. (2018). Multiconfiguration electromagnetic induction survey for paleochannel internal structure imaging: a

case study in the alluvial plain of the River Seine, France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 159-170.

Rivière, A., Maillot, M., Weill, P., Goblet, P., & Ors, F. (2015). Impact of sedimentary heterogeneities and sinuosity on river-aquifer exchanges in a meandering alluvial plain. *AGUFM*, 2015, H12A-06.

Schouten S. et al. (2002). Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth Planet. Sci. Lett.* 204, 265–274.

Schouten S., Hopmans E.C., Sinninghe Damst J.S. (2013). The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraethers: a review. *Org. Geochem.* 54, 19-61.

Sinninghe Damst J.S., Hopmans E.C. et al. (2000). Newly discovered nonisoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids in sediments. *Chem. Comm.* 17, 1683-1684.

Songex, G. (1888). Monographie communale d'Egigny. Archives départementales de Seine-et-Marne [en ligne]. <https://archives.seine-et-marne.fr/fr/monographies-communales>, Document 30Z155

Steinmann, R., Lestel, L., & Dumont, A. (2016). Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles. *Rapport PIREN-Seine*.

Szewczyk, L., Grimaud, J. L., & Cojan, I. (2020). Experimental evidence for bifurcation angles control on abandoned channel fill geometry. *Earth Surface Dynamics*, 8(2), 275-288.

Szewczyk, L. (2020). Bedload fill of abandoned channels. (Doctoral dissertation, Paris Sciences et Lettres).

Szewczyk, L., Grimaud, J. L., Cojan & Piégay, H. (2021). Gravel fill dynamics and depositional patterns in chute cutoffs channels of a bedload dominated river: the Ain River, France. *Earth surface processes and landforms*.

Van Dinter, M., Cohen, K. M., Hoek, W. Z., Stouthamer, E., Jansma, E., & Middelkoop, H. (2017). Late Holocene lowland fluvial archives and geoarchaeology: Utrecht's case study of Rhine river abandonment under Roman and Medieval settlement. *Quaternary Science Reviews*, 166, 227-265.

Vayssière, A., Depret, T., Castanet, C., Gautier, E., Virmoux, C., Carcaud, N., Garnier, A., Brunstein, D., Pinheiro, D. (2016). *Étude des paléoméandres holocènes de la plaine alluviale du Cher (site de Bigny, moyenne vallée du Cher)*. Géomorphologie : relief, processus, environnement. 22 (2), pp. 163–176.

Véquaud P., Thibault A. et al. (2021). Application of a machine-learning algorithm for the development of a global branched GDGT temperature calibration in soils and peats. Soumis à *Geochim. Cosmochim. Acta*.

Williams, G. P. (1984). Paleohydrologic equations for rivers. In *Developments and Applications of Geomorphology* (pp. 343-367). Springer, Berlin, Heidelberg.

Williams, G. P. (1986). River meanders and channel size. *Journal of hydrology*, 88(1-2), 147-164.