

Rapport de synthèse

Version du 22 janvier 2024

Volume 7

Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie

Coordonné par Catherine Carré, Laurence Lestel et Nicolas Flipo



Les partenaires opérationnels de la phase 8 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 8 du PIREN-Seine



Sommaire général

Introduction	3
Considérations sur le fonctionnement hydrologique de la Bassée	9
Connectivité et réactivité de l'interface nappe-rivière dans la plaine alluviale de la Bassée	29
Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée	55
Du suivi de la température au sol au suivi thermique par drone, dans la Bassée	75
Trajectoires de la plaine alluviale de la Bassée	107

Introduction

Catherine Carré^{1,*}, Laurence Lestel², Nicolas Flipo³

¹ professeure émérite Université Paris 1 Sorbonne et LEESU

² UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE

³ Centre de Géosciences, Mines Paris – PSL

* Catherine.Carre@univ-paris1.fr

En faisant de la Bassée un des axes du programme du PIREN-Seine pour sa phase 8, l'objectif était de capitaliser le travail fait par les chercheurs d'une plaine alluviale étudiée depuis 1989, car rien n'avait été écrit depuis le rapport sur le fonctionnement de la Bassée de 2001 (Fustec et al., 2001) qui suivait le premier ouvrage de synthèse du PIREN-Seine paru en 1998 (Meybeck et al., 1998), avec une approche essentiellement par les sciences de l'environnement.

Les quatre années du programme ont montré la nécessité de travailler cet espace à toutes les échelles, du local à l'ensemble du bassin de la Seine, et ont apporté par rapport à 2003 un enrichissement des questions traitées. Avec le changement climatique, l'attention est portée sur la quantité d'eau disponible (en surface et souterrain) et les prélèvements possibles pour répondre aux besoins, tout en respectant le fonctionnement des milieux, la nécessité d'une bonne connaissance des usages et des prélèvements, l'amélioration de la connaissance des différents compartiments hydriques de la plaine et des échanges nappe-rivière, et l'apport possible des modélisations du PIREN-Seine pour les acteurs locaux, les membres de la CLE ¹, l'AESN ² pour les usages et les prélèvements (eau potable, centrale de Nogent-sur-Seine, irrigation agricole, etc.). La gestion des inondations de la Seine et ses affluents pose la question de l'articulation des acteurs locaux et régionaux, comme l'EPTB ³ Seine Grands Lacs, VNF ⁴ et la MGP ⁵, du choix des mesures de protection (barrage réservoir, casier, ou sur-inondation des terrains amont) et d'une gestion solidaire entre l'amont et l'aval (Gobert and Deroubaix, 2022). La poursuite des équipements de la Seine, comme les futures tranches de la centrale de Nogent-sur-Seine et la mise en grand gabarit dans la partie auboise, interroge la construction d'un axe Seine et le positionnement de la Bassée à l'amont de cet axe. Car si cette plaine fait l'objet de nombreuses recherches et questionnements des chercheurs et des gestionnaires, pour autant elle ne fait pas territoire. La gestion de la plaine est partagée entre trois régions, Grand Est, Île-de-France, Bourgogne-Franche-Comté, et quatre départements (Aube, Marne, Yonne et Seine-et-Marne). Même si son périmètre est couvert par un SAGE ⁶ Bassée-Voulzie avec une CLE réunissant des usagers de l'ensemble de la plaine et lui donnant ainsi une identité, découpages administratifs, structures de gestion, services publics et privés morcellent la plaine alluviale. La Seine ne fait pas projet de territoire non plus, l'axe Seine n'étant pas formalisé comme tel dans le SAGE (si ce n'est à propos des inondations et leur gestion, des prélèvements et des rejets notamment industriels et de la navigation mais uniquement pour les pressions apportées par les aménagements) et l'amont de la Seine n'étant pas vraiment pris en compte par l'institution de l'axe Seine (la réflexion part de l'estuaire et des équipements portuaires d'HAROPA ⁷ pour s'arrêter à l'agglomération parisienne et l'Île-de-France).

Au démarrage de la phase 8 s'exprimaient des attentes à la fois des chercheurs pour capitaliser et valoriser leur recherche, et des acteurs de la CLE pour participer à la construction d'une identité de la plaine alluviale, son appropriation par l'ensemble des habitants, et mobiliser les résultats de la recherche pour gérer la ressource et

1. Commission Locale de l'Eau

2. Agence de l'Eau Seine Normandie

3. Établissement Public Territorial de Bassin

4. Voies Navigables de France

5. Métropole du Grand Paris

6. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

7. Grand port fluvio-maritime de l'axe Seine HAVre-ROuen-PARis

les milieux. C'est sur cette convergence d'attentes qu'a démarré la création en 2021 d'un collectif réunissant des chercheurs et des acteurs régionaux et locaux. Le chapitre présente ce collectif, à travers l'originalité de son fonctionnement. A l'arrivée de cette phase 8, deux actions ont été décidées par ce collectif pour faire travailler ensemble chercheurs et acteurs : d'une part la connaissance partagée du fonctionnement hydrogéologique de la plaine alluviale et l'utilisation du modèle CaWaQS-Seine⁸ (Flipo et al., 2023; Gallois and Flipo, 2023) à l'appui des questions portées par la CLE pour l'élaboration de son SAGE, d'autre part, la formalisation pour le grand public d'une histoire partagée des relations des hommes et de la vallée de la Seine dans la Bassée depuis la préhistoire, pour soutenir la construction d'une identité de la plaine alluviale et la compréhension de ses enjeux actuels et futurs.

Nous profitons de cette introduction pour présenter le collectif Bassée, à travers l'originalité de son fonctionnement. A l'arrivée de cette phase 8, deux actions ont été décidées par ce collectif pour faire travailler ensemble chercheurs et acteurs : d'une part la connaissance partagée du fonctionnement hydrogéologique de la nappe alluviale et l'utilisation du modèle CaWaQS-Seine à l'appui des questions portées par la CLE pour l'élaboration de son SAGE (chapitres 1 à 4, p. 9, 29, 55 et 75), d'autre part, la formalisation pour le grand public d'une histoire partagée des relations des hommes et de la vallée de la Seine dans la Bassée depuis la préhistoire, pour soutenir la construction d'une identité de la plaine alluviale et la compréhension de ses enjeux actuels et futurs (chapitre 5, p. 107).

Le collectif Bassée

Inscrit dans la phase 8 du programme PIREN-Seine le collectif Bassée a réuni à partir de 2021 des chercheurs du PIREN-Seine et des personnes vivant ou travaillant en Bassée-Voulzie à la gestion de l'eau et des milieux aquatiques. Les raisons de la mise en place de ce collectif ont été présentées par Carré et al. (2020). Le périmètre de travail a finalement été centré sur la plaine alluviale de la Bassée, avec une attente de la connaissance de son fonctionnement, dans une vision transverse et holistique. L'ambition du collectif était de développer dans des groupes mixtes, animés par un binôme associant chercheur et acteur, des actions permettant de valoriser les travaux des chercheurs sur la plaine alluviale de la Bassée et de participer à un projet de territoire accepté localement et porté par les acteurs à l'échelle du bassin de la Seine.

Entre septembre 2021 et juin 2023, neuf réunions ont été menées. La première réunion le 6 septembre 2021 a accueilli une trentaine de personnes, chercheurs et acteurs de la Bassée, et a permis de définir les attentes des membres du collectif (Fig. 1). Trois réunions en 2022 ont abouti à la constitution puis au démarrage du collectif chercheurs – acteurs de l'eau de la Bassée-Voulzie. Les réunions de période 2022 – 2023 ont été faites par groupe, selon les actions choisies. Des groupes de travail dédiés ont précisé le contenu et la forme des actions à réaliser pour la fin du 8^e programme du PIREN-Seine, en vue de la préparation de la phase 9 (2025-2028).

Principe d'action et fonctionnement

Les actions doivent donc être conduites en lien avec les préoccupations et les attentes des personnes travaillant et vivant dans le périmètre de la Bassée-Voulzie sur l'eau, les cours d'eau et les milieux aquatiques, et en convergence avec ce qui est porté par la CLE dans le cadre du SAGE Bassée-Voulzie.

Choisies et menées dans des groupes de travail associant chercheurs et acteurs, animés par un binôme chercheur-acteur, ces actions doivent permettre une mise en commun des ressources, avec la production d'un regard si ce n'est commun au moins croisé, permettant la confrontation d'informations de disciplines scientifiques et d'acteurs multiples, avec des chercheurs extérieurs au territoire (plus objectifs ? Moins impliqués ?). Elles doivent déboucher dans des supports élaborés collectivement (Fig. 2), supports scientifiques (comme des

8. CaWaQS est distribué sous licence EPL v2.0. Sa version la plus à jour est téléchargeable sur son [dépôt de développement](#)

PLANNING 2021 - 2023

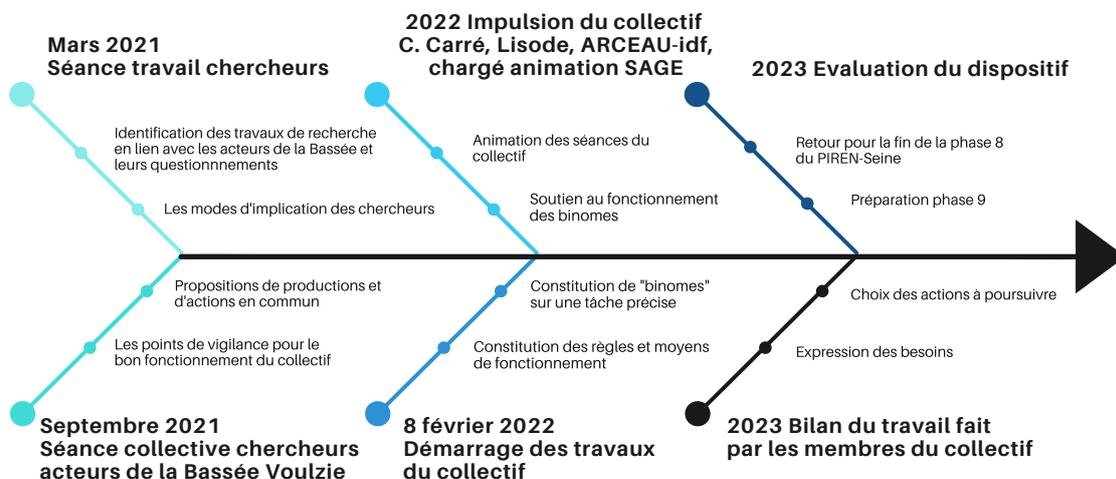


Figure 1. Les différentes étapes du travail du collectif

scénarios issus des modélisations des chercheurs) à l'appui des questions que se posent chercheurs et acteurs, et supports à destination du « grand public », permettant de valoriser et diffuser les productions du collectif.

LE TRAVAIL DU COLLECTIF PAR "BINOME" CHERCHEURS ET ACTEURS DE LA BASSÉE-VOULZIE



A partir des propositions faites le 6 septembre 2021

Objectifs

Mettre en commun les connaissances et leur interprétation
Produire et agir ensemble

Productions

Un récit partagé de l'histoire du territoire
Une synthèse des connaissances
Un diagnostic des enjeux, des actions, des urgences
Des scénarios communs

Mutualiser, coproduire

Des données
Des modèles
Des cartes, un atlas
Des récits, une histoire
Des scénarios

Communiquer, diffuser

Auprès des élus, des scolaires, du grand public,
Variétés des médias : presse, atelier, world café
Variétés des supports : plaquette, vidéo, jeu

Figure 2. Les objectifs et les modes d'actions attendues du collectif

Le choix des thématiques et les productions décidées par les membres du collectif

Les réunions en 2021 ont permis de définir quatre types d'action, recueillant l'intérêt de l'ensemble des participants (Fig. 3). Un premier point d'attente mutuelle a concerné les données existantes, disponibles et partageables entre les chercheurs et les acteurs, sous forme d'un géocatalogue. Au fil des échanges, 3 niveaux de besoins sont ressortis : comment capitaliser les apports en données des différents participants, selon le type de données, leur statut ? Comment partager ces données, avec quelle accessibilité ? Comment accéder aux résultats des scénarios produits avec ces données, comment les entreposer ? Cependant, certains acteurs ont rappelé que l'important est ce que l'on veut faire des données et pour le collectif, qu'il s'agit de comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème de la Bassée et de proposer rapidement un tel modèle de fonctionnement de la plaine s'appuyant sur ces données, à pouvoir présenter à la CLE pour l'aider dans la rédaction de son SAGE.

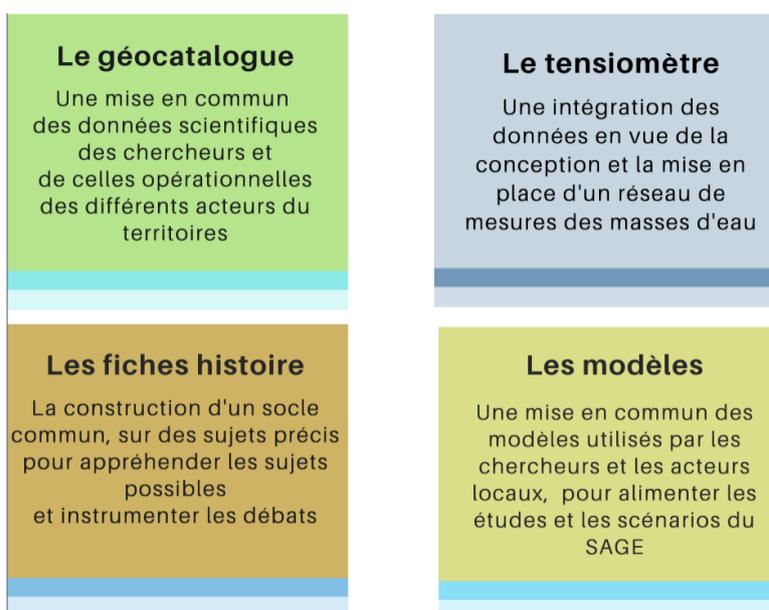


Figure 3. Les quatre thématiques identifiées en 2021 au démarrage du collectif

Si finalement aucun groupe de travail sur les données n'a été institué, pour autant une demande d'un annuaire des producteurs de données a été posée collectivement, permettant de savoir au sein du collectif qui dispose de données (personne et structure), mobilisables sous quelle forme et pour quelle utilisation possible. Un deuxième point plus ténu a porté sur les données utiles pour prendre le pouls des cours d'eau et des milieux aquatiques, les types de données, leur localisation et leur suivi dans le temps. Baptisée Tensiomètre, cette attente n'a cependant pas trouvé de binôme pour le porter et a donc été mise de côté pour l'instant.

Avec l'instauration d'un annuaire des personnes ressources pour les données, deux autres actions ont pris forme, sur la mise au point d'un modèle de l'hydrosystème de la plaine de la Bassée et sur une mise en récit de l'histoire de la Bassée.

Le Groupe de travail pour la mise au point d'un modèle de l'hydrosystème de la plaine de la Bassée Les attentes du côté des acteurs concernent d'abord la disponibilité en eau et son utilisation, tout en garantissant les fonctionnalités des milieux. À court terme, les membres de la CLE demandent à pouvoir disposer d'une expertise scientifique concernant le fonctionnement hydrogéologique de la nappe alluviale de la Seine. Effectivement, il est difficile pour les membres de la Commission Locale de l'Eau de proposer des éléments de rédaction du SAGE sur la thématique quantitative sans connaissances approfondies du système alluvial de la Seine. Les questions portent précisément sur le bilan hydrologique de la Bassée, les recharges possibles des nappes et

les volumes potentiellement prélevables sans compromettre le bon fonctionnement des milieux humides. Pour l'Agence de l'eau et les services de l'État, les attentes sont similaires et portent également sur le fonctionnement de la nappe alluviale, afin d'identifier jusqu'où il est possible d'aller en matière de prélèvements des eaux souterraines et de la Seine, sans rompre l'équilibre de l'hydrosystème de la Bassée ni compromettre les besoins à l'aval. Une aide à la compréhension du fonctionnement futur de l'hydrosystème dans le cadre du changement climatique est également attendue.

À moyen et long terme, l'attente porte plus largement sur une aide à la compréhension générale du « système Bassée » en fonctionnement actuel, sur les entrées / sorties du système en périodes de basses et hautes eaux, avec des interrogations particulières sur les fonctionnalités des zones humides, le cycle hydrologique de la Seine, la contribution de la Bassée comme zone d'expansion de crue et l'impact des lacs-réservoirs à l'amont sur le fonctionnement de la Seine et la gestion des inondations.

Le groupe de travail Histoire L'ambition de ce groupe de travail est d'abord de stabiliser et diffuser des connaissances sur l'histoire de la relation des habitants de la plaine alluviale avec la ressource en eau, son fonctionnement, les paysages et milieux aquatiques attenants, à destination des habitants d'une plaine accueillant régulièrement de nouveaux venus, et des personnes au sein d'institution en charge de leur gestion (élus, personnels administratifs, techniques). Autour de moments clés de cette relation, il s'agit donc de mobiliser les connaissances des scientifiques en miroir des connaissances des habitants de la Bassée. Trois histoires différentes sont ressorties des propositions :

- Une histoire de l'évolution des paysages et des usages de la ressource en eau et des milieux, depuis le Néolithique jusqu'à nos jours, en particulier sur le périmètre du SAGE et l'axe Seine, de Romilly à Montereau
- Une histoire des grands aménagements structurants de la plaine alluviale, depuis la période de leur mise en place jusqu'à aujourd'hui (1820 /1850 – 2030), et en intégrant l'amont (grands lacs) et l'aval (jusqu'à Paris)
- Une histoire des enjeux autour de la plaine alluviale et leurs évolutions, en considérant des périodes différentes selon l'apparition ou la disparition de certains enjeux (inondation, pollution, gravières, services d'eau potable, paysages et fonctionnalités écologiques /le transport ne semblant pas être un enjeu mais un driver du fonctionnement de la plaine) et leur appropriation et leur partage (voir les coalitions d'acteurs).

Finalement, le choix d'un 6 pages a été acté, avec 4 périodes à traiter sous forme de bloc diagramme et leurs commentaires, en croisant paysage de la vallée, dynamique du cours d'eau, implantation et utilisation de la ressource et du milieu, pour faire connaître le territoire, la diversité, le passé, la qualité d'un territoire perçu comme servant, et ce que cela a apporté aux personnes habitants la Bassée. Comme première période, l'occupation de la vallée par les humains à partir de -4500 avant notre ère. Il esquisse des blocs diagrammes pour faire comprendre les transitions dans l'occupation de la vallée par la Seine, selon les variations de son débit (voir page suivante). Un deuxième temps va concerner la période du moyen âge et les différents usages de la vallée. Le troisième temps sera celui de la transformation de la Seine par les équipements à partir de 1830. Le moyen-âge est le temps de la révolution hydraulique et la période 1830 celui de la révolution industrielle. La dernière période sera à partir des années 1960 l'histoire des équipements de la Seine (avec la construction de la centrale nucléaire, des barrages réservoirs, la mise en grand gabarit du fleuve) et la transformation des paysages avec l'essor des gravières, et une multiplication par cinq de la superficie en eau dans la vallée.

Remerciements *Le collectif a bénéficié du soutien de la CLE du SAGE Bassée-Voulzie, à travers son président, Monsieur Juillet, la directrice adjointe du SDDEA porteur du SAGE, madame Gaillard, et son animateur Eric Bonnot. L'ensemble des participantes et participants aux nombreuses réunions du collectif Bassée sont chaudement remerciées : Mathieu Ballansat, Anne-Sophie Ballard, Vincent Barat, Fulvia Baratelli, Frédéric*

Barrez, Eric Bonnot, Alain Boyer, Joanna Brunelle, Christophe Cailleux, Manon Cassagnole, Gwennaëlle Clermont, Gurpreet Dass, Marie De Sainte Maresville, Alexandre Deloménie, Valérie Derossi, Jose-Frédéric Deroubaix, Christele Duval, Lucile Gaillard, Julie Gobert, Patrick Gouge, Jean-Louis Grimaud, Marc-Éric Joffroy, Anne Jost, Magali Journet, Raphaëlle Lanthiez, Fabienne Laure, Charlotte Magnan, François Mercier, Grégory Moreau, Christophe Parisot, Michel Poulin, Mathilde Resch, Jean-Baptiste Revillon, Florence Roy, Marie Silvestre, Raphaëlle Solé, Thomas Weinbreck.

Références

- Carré, C., D. Courbil, J.-F. Deroubaix, A. Deloménie, N. Juillet, and S. Lumbroso (2020). Produire et valoriser localement les connaissances scientifiques du PIREN-Seine avec les acteurs de la Bassée-Voulzie. Technical report, PIREN-Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2023). Modélisation couplée de l'ensemble du système aquifère du bassin de la Seine avec CaWaQS : innovations méthodologiques. In N. Flipo (Ed.), *Trajectoires hydrologiques, passée, présente, et futures du bassin de la Seine*, Volume 3 of *rapport de synthèse phase VIII*, pp. 5–44. PIREN Seine.
- Fustec, E., H. Bendjoudi, S. Gaillard, P. Weng, F. Boyer, P. Boët, O. Shannen, S. Crogenec, and G. Billen (2001). Fonctionnement du Territoire 'Bassée'. Technical report, PIREN-Seine.
- Gallois, N. and N. Flipo (2023). Fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine au XXIème siècle. In N. Flipo (Ed.), *Trajectoires hydrologiques, passée, présente, et futures du bassin de la Seine*, Volume 3 of *rapport de synthèse phase VIII*, pp. 45–68. PIREN Seine.
- Gobert, J. and J.-F. Deroubaix (2022). Interdépendances et nouvelles solidarités : (a)ménager les territoires de la Seine amont. Technical report, PIREN-Seine.
- Meybeck, M., G. de Marsily, and Fustec (Eds.) (1998). *La Seine en son bassin, Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier.

Considérations sur le fonctionnement hydrologique de la Bassée ¹

Nicolas Flipo^{1,*}, Anne Jost², Nicolas Gallois¹

¹ Centre de Géosciences, Mines Paris – PSL, Fontainebleau

² UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, 75005 Paris, France

* nicolas.flipo@minesparis.psl.eu

Résumé

Un premier bilan hydrologique de la plaine alluviale de la Bassée (340 km²) repose sur une modélisation régionale du bassin versant de la Seine, composé de 8 couches représentant les formations géologiques majeures. Le modèle se base sur un maillage d'une résolution de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres, avec un pas de temps journalier. Les simulations couvrent la période de 2003 à 2020, forcées par les données hydrométéorologiques issues des réanalyses SAFRAN.

Le bilan hydrologique moyen sur la plaine alluviale, établi sur cette période, indique une pluie annuelle moyenne de 674,5 mm. L'évapotranspiration représente 68,3 % de la pluie (461 mm), l'infiltration 30,6 % (206 mm), tandis que le ruissellement est limité à 1,1 % de la pluie. Les gravières, couvrant 8 % de la superficie, ont un impact significatif, générant un déficit d'alimentation d'environ 6 millions de m³ par an pour le système aquifère de la Bassée. Cela est comparable aux prélèvements humains qui s'élèvent à près de 10 millions de m³ par an. L'étude souligne ainsi l'influence majeure des activités humaines, en particulier l'exploitation des gravières, sur le fonctionnement hydrologique de cette région stratégique, affectant non seulement le bilan hydrologique mais aussi les niveaux d'eau souterraine.

Ce bilan révèle une pluie efficace en Bassée équivalente à celle du bassin de la Seine. Sur la base de la modélisation, le fractionnement de la pluie efficace en Bassée se singularise également des mécanismes à l'œuvre en moyenne à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine, puisque quasiment toute la pluie efficace recharge l'aquifère en Bassée. Les deux principaux mécanismes de la recharge de l'aquifère alluvial, par son impluvium et via les écoulements régionaux au sein de l'aquifère de la craie, sont d'intensités équivalentes d'environ 190 mm.a⁻¹.

Points clés

- bilan hydrologique reposant sur une modélisation régionale du bassin de la Seine ;
- en moyenne (2003-2020), pluie = 674,5 mm, répartie en évapotranspiration (68,3 %) et infiltration (30,6 %) ;
- les gravières génèrent des prélèvements d'eau dans l'aquifère alluvial (4 % de sa recharge).

1. Pour citer cet article : Flipo, N., Jost, A., Gallois, N. Considérations sur le fonctionnement hydrologique de la Bassée. Dans Carré, C., Lestel, L., et Flipo, N. (eds), *Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 7, 2023, pp. 9-28

Abstract

A preliminary hydrological assessment of the Bassée alluvial plain (340 km²) is based on a regional modeling of the Seine watershed, consisting of 8 layers representing major geological formations. The model relies on a grid with a resolution ranging from a few hundred meters to several kilometers, with a daily time step. Simulations cover the period from 2003 to 2020, driven by hydrometeorological data from SAFRAN reanalyses. The average hydrological balance over this period indicates an annual average rainfall of 674.5 mm. Evapotranspiration accounts for 68.3 % of the rainfall (461 mm), infiltration for 30.6 % (206 mm), while runoff is limited to 1.1 % of the rainfall. Gravel pits, covering 8 % of the area, have a significant impact, generating a supply deficit of about 6 million m³ per year for the aquifer system of the Bassée. This is comparable to human withdrawals, which amount to nearly 10 million m³ per year. The study underscores the major influence of human activities, especially gravel exploitation, on the hydrological functioning of this strategic region, affecting not only the hydrological balance but also groundwater levels. This assessment reveals effective rainfall in Bassée equivalent to that of the Seine basin. Based on the modeling, the partitioning of effective rainfall in Bassée also differs from mechanisms at work on average at the scale of the entire Seine basin, as almost all effective rainfall recharges the aquifer in Bassée. The two main mechanisms for alluvial aquifer recharge, through its watershed and *via* regional flow within the chalk aquifer, have equivalent intensities of about 190 mm.a⁻¹.

Key points

- Hydrological balance based on regional modeling of the Seine watershed ;
- On average (2003-2020), rainfall equals 674.5 mm, distributed into evapotranspiration (68.3 %) and infiltration (30.6%);
- Gravel pits generate water withdrawals from the alluvial aquifer (4% of its recharge).

Table des matières

1	La Bassée : une plaine alluviale à forts enjeux	11
2	Le contexte géologique de la plaine alluviale	11
3	Fonctionnement hydrologique global de la plaine	13
3.1	Comprendre les écoulements en Bassée	13
3.2	Bilan hydrologique	15
3.3	L'influence des gravières	16
3.4	Carte piézométrique de référence	18
3.5	Écoulements en boucles imbriquées dans la plaine alluviale	18

1 La Bassée : une plaine alluviale à forts enjeux

La Bassée représente l'une des dernières vastes zones humides de la région Île-de-France, dont le rôle, notamment en matière de dénitrification des eaux souterraines et, dans certains cas, des eaux de surface, a été confirmé (Curie et al., 2003; Curie, 2006; Fustec et al., 2001). Désignée comme "Zone Naturelle d'Intérêt écologique, Faunistique et Floristique" depuis 1997, cette zone humide présente une rentabilité économique de 6700 euros par hectare en termes de dégradation des polluants et de préservation de la biodiversité (Bonnet et al., 2012). De plus, la plaine alluviale de la Bassée abrite l'une des réserves d'eau souterraine les plus importantes de la région parisienne (Mégrien, 1965). Par ailleurs, les nombreux aménagements du lit majeur de la Seine au fil du temps (Eschbach and Lestel, 2018) (dont la mise au grand gabarit en aval de Montereau) et la mise en activité des grands lacs de Seine ont permis de réduire les zones inondables de la plaine alluviale, favorisant ainsi une communication rapide avec la région parisienne. Ainsi, l'aménagement de la Seine dans la Bassée a favorisé le développement de l'agriculture intensive en fournissant des espaces arables et des voies de communication (Bonnet et al., 2012).

La plaine alluviale de la Bassée renferme également l'un des principaux gisements de granulats de la région Île-de-France (Bonnet et al., 2012), et leur exploitation a entraîné la submersion de plus de 8 % de la surface de cette plaine (Picourlat et al., 2018). L'exploitation des alluvions anciennes pour la production de granulats dans le val de Seine amont a donné naissance depuis les années 1960 à près d'un millier de gravières, disséminées au cœur de la plaine d'inondation de la Bassée, le long des principaux cours d'eau. Ces lacs artificiels sont autant de fenêtres ouvertes sur des ressources en eau souterraine d'importance stratégique pour la région Ile-de-France, qu'il convient de mieux connaître afin de préserver (Jost et al., 2019). Nouveaux objets dans un paysage déjà très remanié au cours du siècle dernier, ils n'ont été que peu étudiés sur le long terme et dans leur globalité. On leur reconnaît cependant généralement un rôle de puits vis-à-vis des nappes adjacentes, du fait de l'emprise qu'offre à l'évaporation leur surface d'eau libre, en particulier lors des années sèches (Schanen, 1998). Le remplacement du matériau granulaire par un plan d'eau altère aussi la piézométrie localement ainsi que les chemins d'écoulement à son voisinage, par l'établissement d'une surface d'égal potentiel hydraulique, néanmoins possiblement représentative d'un niveau piézométrique moyen dans la nappe des alluvions (Jost et al., 2023).

Enfin, compte tenu de son positionnement entre les confluences des deux principaux affluents de la Seine en amont de Paris et de la largeur de sa plaine alluviale, la région de la Bassée représente un secteur stratégique pour la mise en place de bassins de stockage supplémentaires à l'appui des quatre barrages-réservoirs, afin de réduire les effets d'une crue centennale sur la région parisienne (Levassor, 2005).

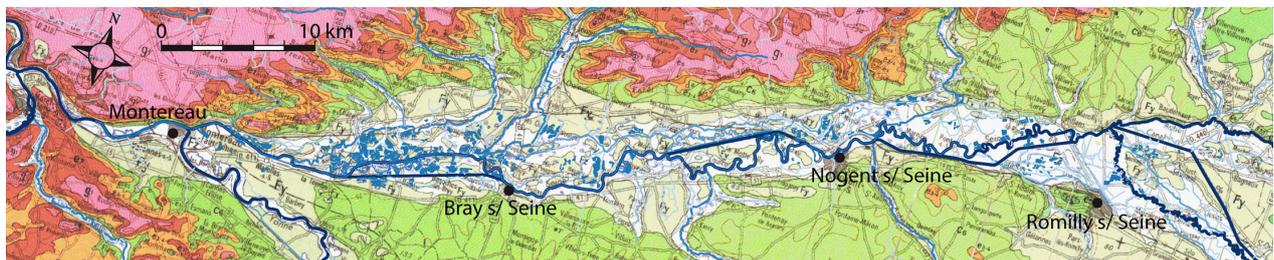


Figure 1. Carte géologique au 1/250 000 du secteur de la Bassée, réseau hydrographique et entités hydrographiques de surface (plans d'eau, canaux, etc.)

2 Le contexte géologique de la plaine alluviale

Weill et al. (2016) ont décrit le contexte géologique de la plaine alluviale de la Bassée. Elle se situe entre la confluence de la Seine et de l'Aube à l'amont (Romilly-sur-Seine) et la confluence de la Seine et de l'Yonne à

l'aval (Montereau). Longue d'une soixantaine de kilomètres, elle est encaissée dans la craie blanche à silex du Turonien-Santonien (Fig. 1) et s'écoule parallèlement à la cuesta d'Ile-de-France dans une direction Nord-Est / Sud-Ouest.

En raison de la nature du substratum encaissant, la plaine alluviale de la Bassée présente une largeur importante, entre 3 et 4 kilomètres. Au niveau de certains affluents, cette largeur peut dépasser les 5 kilomètres. La plaine alluviale commence à se réduire graduellement à partir de la confluence de la Seine et de l'Yonne, au moment où elle entre en contact avec les formations tertiaires plus résistants.

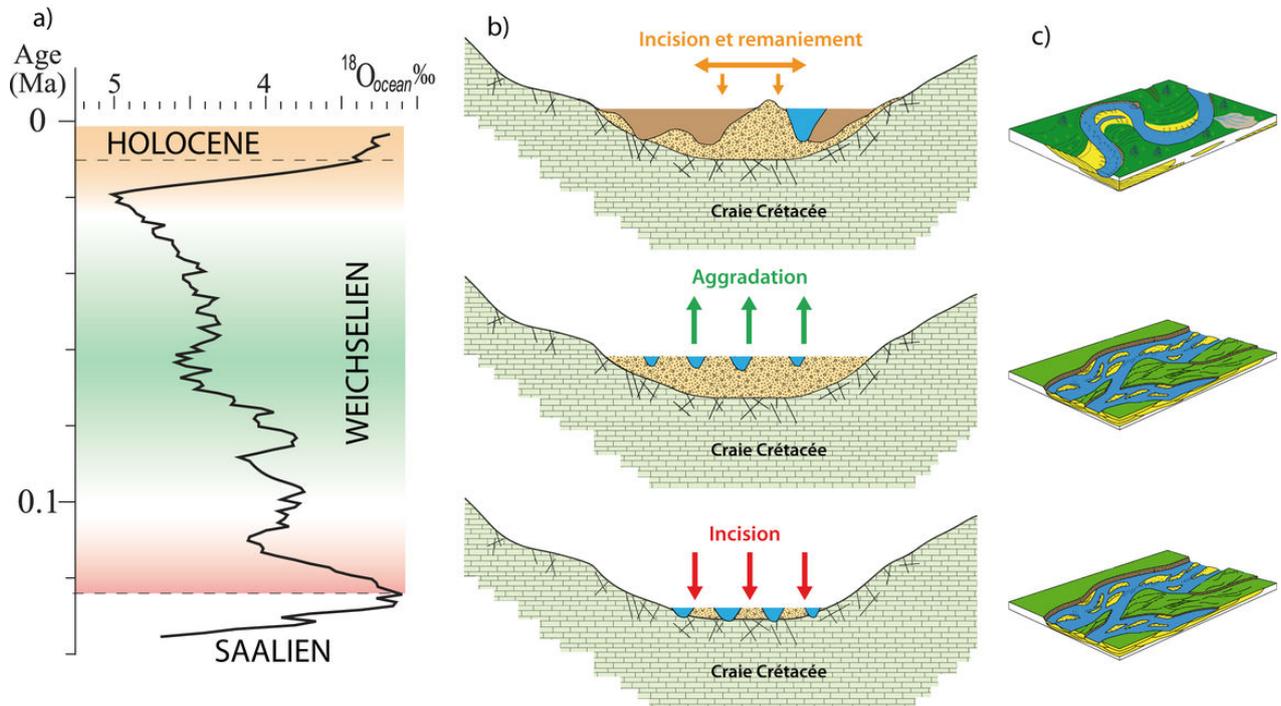


Figure 2. (a) Courbe isotopique du $\delta^{18}O$ marin au Pléistocène supérieur et à l'Holocène (d'après Gibbard and Cohen, 2008); (b) Schématisation de la réponse globale de la Seine supérieure aux fluctuations climatiques du Pléistocène supérieur et de l'Holocène et (c) styles fluviaux associés (d'après Miall, 1996)

Comme la plupart des plaines alluviales du Nord-Ouest de l'Europe, la plaine alluviale de la Bassée a été façonnée au cours des récents cycles climatiques du Quaternaire (Antoine et al., 2010). Le Pléistocène moyen et le Pléistocène supérieur se caractérisent en effet par une cyclicité climatique d'environ 100 000 ans, marquée par des périodes glaciaires et interglaciaires de durées variables (respectivement 80 000 et 20 000 ans). Ces alternances induisent des réponses des systèmes fluviaux par incision ou aggradation. Les périodes de transition climatique, en particulier, provoquent une instabilité des systèmes fluviaux et des transformations morphologiques profondes. Les optimums climatiques et les maxima glaciaires, en revanche, représentent des périodes de remaniement des sédiments. En amont de la limite d'influence de l'eustatisme, dans un contexte de soulèvement continental lent et régulier (Lautridou et al., 1999), ce sont principalement les modifications du couvert végétal et du fonctionnement hydrologique qui influent sur le rapport débit liquide / débit solide, et par conséquent, sur les périodes d'incision ou d'aggradation du système fluvial de la Seine supérieure (Cojan et al., 2007).

À la dernière transition interglaciaire-glaciaire (environ 100 000 ans), l'instauration d'un régime nival et la préservation d'une végétation stabilisant les sols (Vandenberghé, 1995) entraînent une incision large mais relativement peu profonde des cours d'eau, généralement par un système fluvial en tresses (Fig. 2). Avec la disparition du couvert végétal en contexte périglaciaire, une importante quantité de sédiment est libérée, permettant une aggradation au Weichsélien, avec le dépôt de sédiments grossiers par un système en tresses. Au Tardiglaciaire (environ 18 000 ans), la transition vers la période interglaciaire de l'Holocène débute, marquée

par le passage à un système fluvial méandrique ou anastomosé de moindre énergie. Le développement de la végétation limite l'apport sédimentaire et, en association avec les périodes de débâcles persistantes, provoque une incision étroite et profonde des chenaux. La divagation de la Seine dans sa plaine alluviale remanie partiellement les dépôts en tresses des périodes glaciaires. Les crues de débordement permettent le dépôt de sédiments fins à la surface de la plaine alluviale dans les zones dépressionnaires.

3 Fonctionnement hydrologique global de la plaine

3.1 Comprendre les écoulements en Bassée

Étant donné l'importance de la Bassée d'un point de vue économique, environnemental et pour la protection des crues, elle a été l'objet de nombreuses études hydrologiques menées dans le cadre du PIREN-Seine lors des phases précédentes (Tajjar, 1993; Greiner, 1997; Schanen, 1998; Weng et al., 1998, 1999; Gaillard, 1999; Fustec et al., 2001; Bendjoudi et al., 2002; Curie et al., 2003; Labarthe, 2016; Deleplancque, 2016; Jost et al., 2017). La plupart de ces études se sont intéressées aux interfaces nappes-rivières et elles ont permis une meilleure compréhension des échanges entre eaux souterraines et eaux de surface et des fonctionnements hydrologique et biogéochimique des zones humides.

La plupart de ces études ont été réalisées à l'échelle locale, cependant, les processus hydrologiques et hydrogéologiques des interfaces nappe-rivière sont des problèmes multi-échelles. En effet, comme démontré par Weng et al. (1998, 1999) et Bendjoudi et al. (2002), l'aquifère régional contribue de manière significative à l'alimentation de l'aquifère alluvial. Ainsi ce sont les écoulements régionaux qui contrôlent, dans un premier lieu, les écoulements souterrains dans le champ proche de la rivière. De plus, Greiner (1997) et Schanen (1998) indiquent que la variabilité spatiale des perméabilités du lit et des berges de la rivière, ainsi que des gravières, influence les flux aux interfaces. Cette variabilité découle en partie des héritages morpho-sédimentaires tardi- et postglaciaires, de la diversité des flux hydriques impliqués dans la submersion du lit majeur (Gaillard, 1999; Gaillard et al., 2002), ainsi que de l'historique d'aménagement des berges et du lit majeur de la rivière (de même pour les gravières, Schanen, 1998). Enfin, Tajjar (1993) montre le rôle que joue la morphologie de la rivière ainsi que les aménagements hydrauliques qui y sont mis en place (dragage et protection des berges, dérivation des méandres, installation de barrages et d'écluses, etc.), sur le régime hydrologique et sur la dynamique des échanges nappe-rivière.

L'ensemble de ces études souligne ainsi l'importance d'analyser les interactions nappe-rivière selon une double perspective régionale et locale en raison du caractère résolument multi-échelle des interfaces nappe-rivière (Flipo et al., 2014). Cela a conduit Labarthe (2016) à mettre en place la stratégie, toujours en cours, de caractérisation hydrodynamique des échanges hydriques dans la plaine alluviale de la Bassée, en se fondant sur une vision multi-échelle des processus d'échanges, en imbriquant des modèles de résolutions différentes.

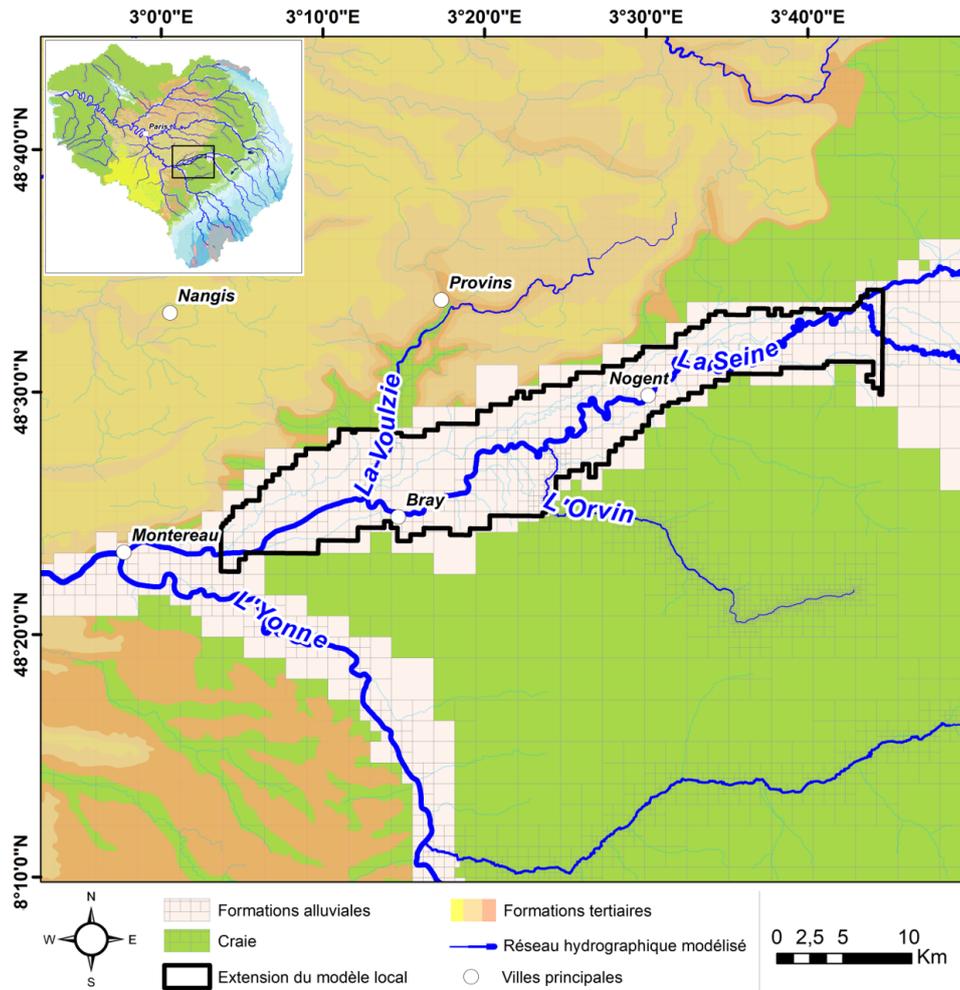
La modélisation multi-échelle effectuée s'appuie ainsi sur la simulation de deux modèles de résolutions différentes¹ :

- CaWaQS-Seine, de résolution "grossière" ;
- un modèle CaWaQS de la plaine alluviale de la Bassée de résolution fine.

L'ensemble des bilans sont établis à l'échelle de la plaine alluviale de la Bassée à l'aide de l'application régionale CaWaQS-Seine (Gallois and Flipo, 2023), basée sur le logiciel CaWaQS (Flipo et al., 2022, 2023b). Le modèle régional du bassin versant de la Seine est composé de 8 couches représentant la majorité des formations géologiques constitutives de ce bassin sédimentaire (Flipo et al., 2023a). Le maillage présente une

1. La première version de la modélisation emboîtée, développée par Labarthe and Flipo (2016), comprenait un troisième modèle de taille intermédiaire, aujourd'hui supprimé. Cependant ce modèle dit Marne-Loing a été récemment transféré sous CaWaQS. Il est positionné à la limite Sud-Est du modèle Seine.

résolution pouvant aller de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres au pas de temps journalier. CaWaQS-Seine simule également les niveaux en rivière au pas de temps journalier. Les bilans sont établis à l'échelle des 320 km² de la plaine alluviale (cf. extension spatiale du domaine modélisé en figure 3) sur une période de stationnarité des grandeurs hydrologiques (Massei et al., 2010; Flipo et al., 2012), soit de 2003 à 2020.



Les données de forçages hydrométéorologiques sont les réanalyses SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie, Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal et al., 2010). Elles servent à forcer un modèle conceptuel à réservoirs (Girard et al., 1980) qui assure la transformation de la pluie en évapotranspiration réelle, ruissellement rapide de surface et proche subsurface et infiltration dans le sol.

Afin d'étudier plus précisément les échanges au sein de la plaine alluviale de la Bassée un modèle local de la plaine alluviale de la Bassée a été mis en place. Ce modèle est constitué d'un maillage plus fin que le modèle régional, de 50 à 100 m de côté, et s'étend sur une surface de 320 km². Le modèle local représente deux couches aquifères superposées représentant l'aquifère alluvial et l'aquifère de la Craie. Le modèle CaWaQS-Seine contraint les flux aux limites de l'aquifère de la Craie de la Bassée qui est parfaitement emboîté dans l'application régionale.

3.2 Bilan hydrologique

La pluie moyenne annuelle sur la période est de 674,5 mm. L'évapotranspiration représente 68,3 % (461 mm) de la pluie, l'infiltration 30,6 % (206 mm), alors que le ruissellement est largement minoritaire, ne représentant que 1,1 % de la pluie. À cette échelle de temps, le stock d'eau dans les sols est en moyenne nul, ce qui cache une variabilité inter-annuelle importante (Fig. 4).

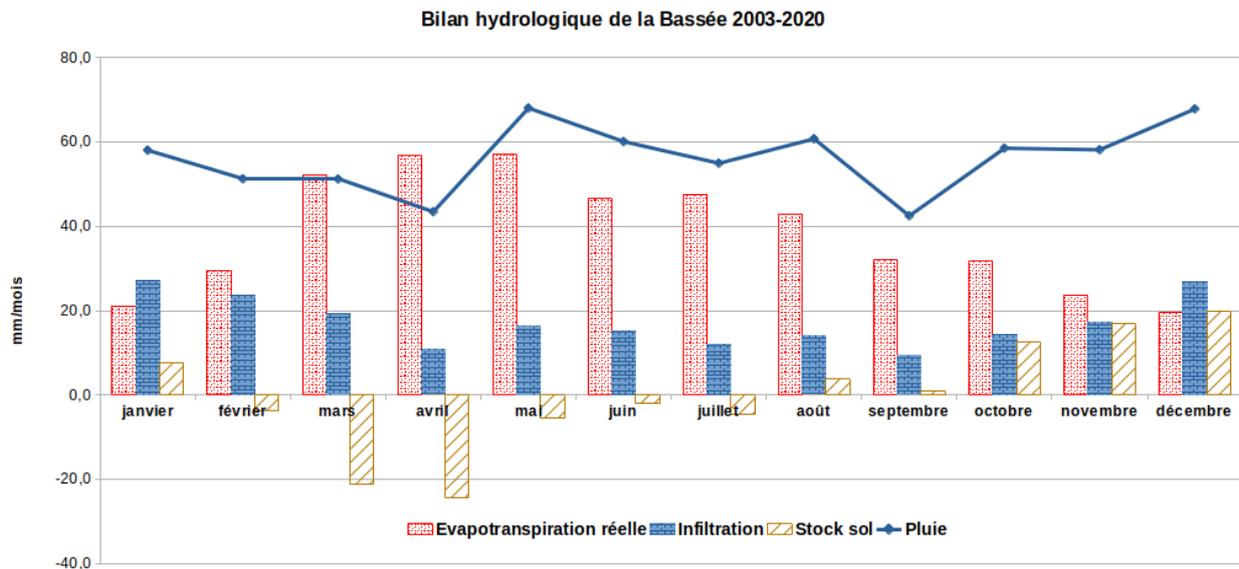


Figure 4. Bilan hydrologique mensuel moyen de la Bassée pour la période 2003-2020

Même si les précipitations sont globalement bien réparties tout au long de l'année avec une moyenne mensuelle de 56 mm, les précipitations les plus faibles sont recensées au printemps en avril et à la fin de l'été en septembre (environ 45 mm), alors que les plus conséquentes sont enregistrées en mai et décembre (quasiment 70 mm). Ces extrêmes relatifs ne sont pas des plus intuitifs et génèrent une variabilité particulière dans le secteur. Ainsi les pics d'évapotranspiration apparaissent-ils au printemps dans cette zone, en avril et mai (55 mm). Globalement cette dernière est conséquente (supérieure à 45 mm) de mars à août, pour atteindre de faibles valeurs, mais loin d'être négligeables en hiver, d'environ 25 mm de novembre à février. La recharge des aquifères par l'impluvium est quant à elle minimale en avril et septembre (10 mm) et présente une assez faible variabilité annuelle pour atteindre un maximum en décembre et janvier (25 mm). La paramétrisation du modèle de production génère une dynamique de stockage dans les sols de la plaine alluviale assez particulière qu'il conviendrait de valider par une réalité terrain, puisque l'eau est stockée dans ce dernier dès le mois d'octobre jusqu'en janvier pour commencer à se destocker dès le mois de février, et ce jusqu'en juillet avec un maximum au moment des pics d'évapotranspiration de mars et avril (-20 mm).

Toujours en lien avec le modèle hydrologique, il apparaît que le bilan hydrologique du territoire de la Bassée se singularise de celui du bassin de la Seine établi sur une même période de 17 ans par Gallois and Flipo (2023). En effet, les précipitations en Bassée sont en moyenne 90 mm plus faibles qu'en moyenne à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine (Tableau 1). Les processus complexes d'évaporation et de croissance de la végétation génèrent cependant des pluies efficaces équivalentes² dans les deux cas, de l'ordre de 200 mm.a⁻¹. Par contre, le fractionnement de cette dernière en ruissellement rapide de surface et infiltration vers la nappe est très singulier en Bassée. En effet, d'après le modèle l'ensemble de la pluie efficace s'infiltrerait vers la nappe en Bassée, alors qu'en moyenne à l'échelle du bassin de la Seine, cette fraction est de deux tiers.

2. la pluie efficace est la lame d'eau disponible aux écoulements

	Seine	Bassée
Pluie [mm.a^{-1}]	765	675
Évapotranspiration [mm.a^{-1}] (% pluie)	564 (74)	461 (68)
Infiltration [mm.a^{-1}] (% pluie)	134 (18)	206 (31)
Ruissellement [mm.a^{-1}] (% pluie)	66 (8)	8 (1)

Tableau 1. Comparaison des termes du bilan hydrologique à l'échelle du bassin de la Seine et du territoire de la plaine alluviale de la Bassée

3.3 L'influence des gravières

La Bassée est un site exemplaire pour l'étude de l'impact des activités humaines sur son fonctionnement hydrodynamique, cette plaine alluviale ayant été profondément remaniée au fil des siècles (e.g., Lestel et al., 2018). Parmi les nombreux aménagements, nous avons retenu en particulier ceux liés à l'exploitation des sables et graviers alluvionnaires (Jost et al., 2017; Picourlat et al., 2018; Jost et al., 2019; Dass et al., 2022), comme caractéristique majeure de ce site d'étude. Nous en analysons ici l'impact sur le bilan hydrologique de la plaine.

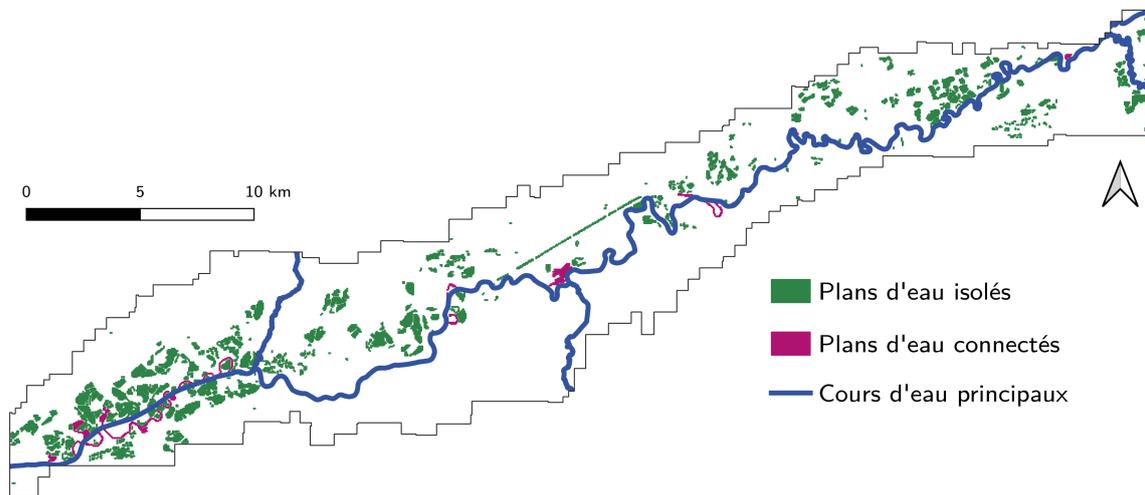


Figure 5. Recensement des plans d'eau à l'échelle du modèle hydrogéologique local de la Bassée

Une première étape a consisté à recenser tous les plans d'eau de la plaine, pour en quantifier l'étendue spatiale. Ce travail, déjà effectué au cours de la phase précédente (Picourlat et al., 2018), a été mis à jour sur la base des archives Landsat et Google Satellite librement accessibles pour le mois de septembre 2020, compte tenu du caractère très fluctuant du parc des gravières au gré de l'avancée des exploitations. Nous avons ainsi dénombré plus de mille plans d'eau éparpillés dans la plaine, couvrant un total d'environ 3000 hectares, soit 8 % de la superficie couverte par les alluvions, principalement à l'aval, bien que l'extraction de granulats ait tendance à en grignoter petit à petit l'amont. Leur superficie individuelle varie de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs dizaines d'hectares mais la plupart d'entre eux sont de petite taille (médiane inférieure à 1 ha). Dans l'emprise et à la résolution du modèle local de la plaine de la Bassée, nous avons extrait environ 400 plans d'eau, distinguant les plans d'eau connectés aux cours d'eau (souvent des bras morts de la Seine), plus rares, des plans d'eau qui en sont isolés (Fig. 5). Nous ne tiendrons ici compte que de ces derniers.

Dans un second temps, ces plans d'eau ont été introduits dans le modèle local sus-cité. Ce dernier fonctionne par emboîtement au sein de l'application CaWaQS-Seine qui l'alimente. Constitué des deux seules couches des alluvions et de la craie, il autorise la réalisation de simulations plus ciblées, grâce à sa résolution spatiale plus fine (de 50 à 100 m). La prise en compte des gravières isolées dans le modèle hydrogéologique a été rendue possible par le développement d'un module dédié, *libwet*, au sein de CaWaQS lors de la précédente phase

(Wang et al., 2016; Jost et al., 2023).

Pour les gravières isolées, l'évaporation de ces surfaces en eau libre est calculée indépendamment à l'aide du modèle de lac FLake (Freshwater Lake model, Mironov, 2008), forcé par les mêmes variables atmosphériques issues des réanalyses SAFRAN. Ce modèle de lac à base physique est choisi comme référence pour le calcul de l'évaporation, faute de mesures *in situ*. Il est désormais utilisé comme entrée dans la chaîne de modélisation de la Bassée.

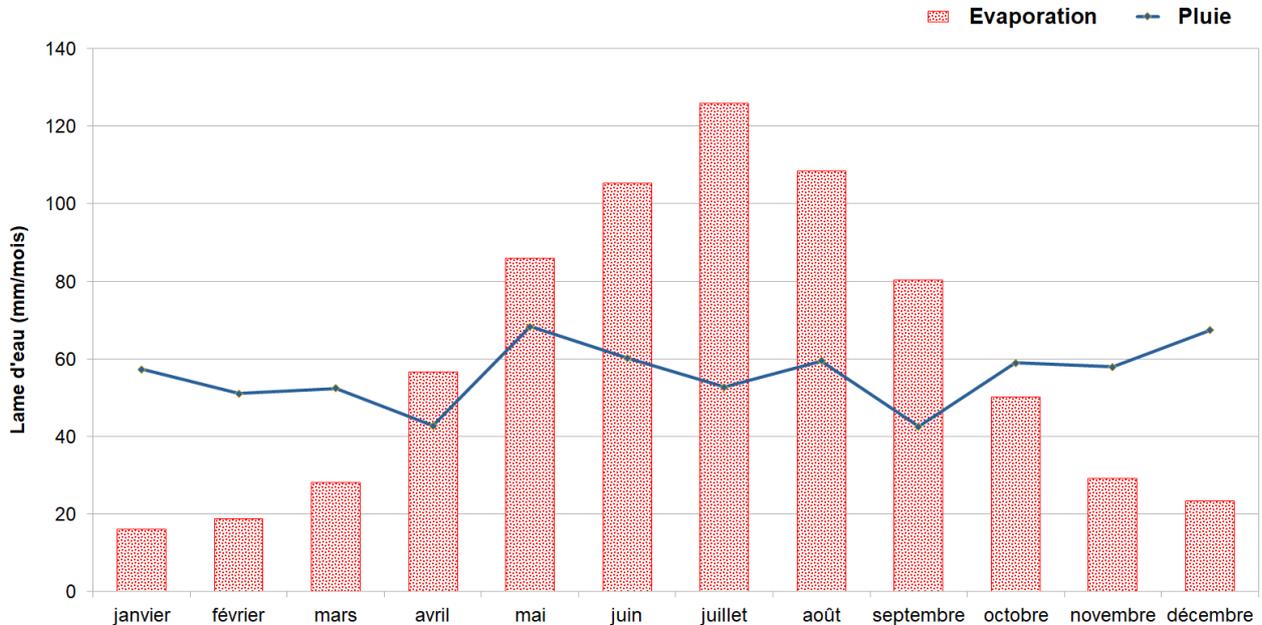


Figure 6. Bilan hydrologique mensuel moyen pour les gravières de la Bassée entre août 2003 et juillet 2020. La différence entre précipitations P et évaporation E est égale au flux net souterrain $\Delta G : P - E = G_{out} - G_{in}$, pour un ruissellement considéré nul. Les précipitations sont issues des réanalyses SAFRAN.

Le bilan hydrologique souterrain de la plaine est établi sur l'emprise locale à partir des simulations de l'application régionale CaWaQS-Seine. Il est calculé en moyenne sur la période août 2003 - juillet 2020. Sont extraits aux limites latérales du modèle local les flux nets échangés par chaque aquifère tels que simulés par le modèle régional, soit une entrée nette de $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, assurée très majoritairement par l'aquifère de la craie au nord de la zone d'étude. En entrée est également considérée l'infiltration qui résulte du bilan hydrologique de surface et qui, rapportée à la superficie couverte par le modèle local, atteint $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En l'absence de gravières, ces entrées nettes sont intégralement évacuées en rivière (Fig. 7a). Cette première estimation illustre de nouveau la part conséquente des flux régionaux à l'alimentation de la plaine *sensu stricto*.

La prise en compte des gravières modifie le bilan hydrologique souterrain, en créant une nouvelle porte de sortie pour les eaux souterraines (Fig. 7b), lorsque l'évaporation est supérieure aux précipitations (d'avril à septembre) (cf. Fig. 6). L'analyse s'étend à l'échelle d'une année hydrologique moyenne, pour laquelle la différence $P - E$ est de $-57 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. Ce chiffre est à mettre au regard de la recharge des surfaces, essentiellement agricoles, que les gravières ont peu à peu grignoté, estimée à $+206 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ par le module de surface du modèle régional à l'échelle de la plaine. La recharge globale en est d'autant diminuée (Fig. 7b). Au total, c'est un déficit d'alimentation d'environ 6 millions de $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ pour le système aquifère de la Bassée du fait des seules gravières isolées, déficit qui se répercute au niveau de l'exutoire principal que constitue la Seine. Ce résultat vient corroborer les conclusions généralement tirées de l'étude du bilan hydrologique des plans d'eau de faibles extension et profondeur, qu'ils soient ou non artificiels (e.g., Reis et al., 2006; Saplaïroles et al., 2007; Mollema and Antonellini, 2016), bien que cela dépende des conditions initiales d'occupation du sol et du climat. Ainsi, malgré leur petite taille, les gravières sont-elles une composante non négligeable d'évaporation directe de l'eau

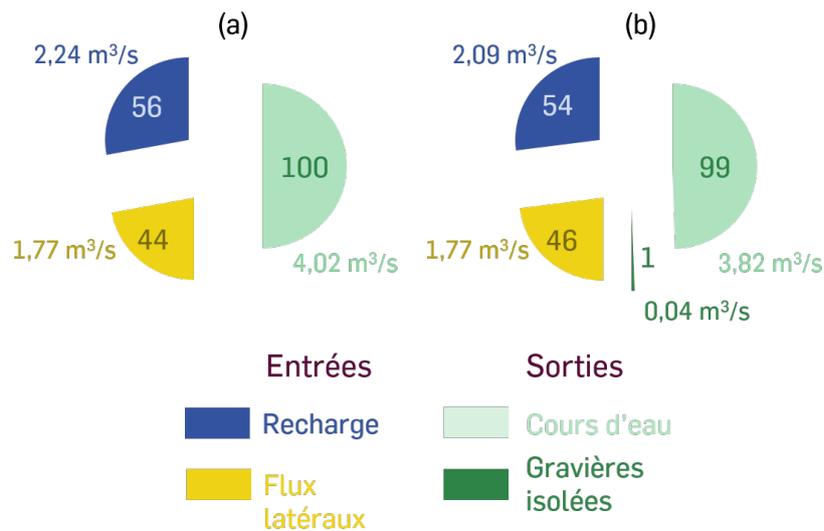


Figure 7. Bilan hydrologique net du système aquifère de la Bassée (2003-2020) : (a) en l'absence de gravières ; (b) avec gravières. Les flux sont exprimés en $m^3 \cdot s^{-1}$ et en pourcentage des entrées (à gauche) ou des sorties (à droite) à l'intérieur des camemberts.

depuis les lacs (Zhan et al., 2019; Zhao et al., 2022), qu'il convient de répertorier.

Cette estimation peut être comparée à une première quantification des volumes d'eau souterraine directement prélevés par l'homme dans le périmètre considéré, établie d'après les données de la banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) pour l'année 2018. Le gîte aquifère de la Bassée a été identifié depuis longtemps comme une réserve d'eau stratégique en région parisienne. Les pompages captent, très majoritairement dans la partie supérieure de l'aquifère de la craie, un volume annuel de près de 10 millions de m^3 . Ces prélèvements souterrains couvrent aujourd'hui des besoins industriels (38 %), d'alimentation en eau potable (35 %) et d'irrigation (27 %).

3.4 Carte piézométrique de référence

Une carte piézométrique de référence a été obtenue par Labarthe (2016). Elle s'appuie sur le krigeage de deux jeux de données collectés respectivement en Septembre 65 (Mégnien, 1965) et Septembre 94 (Weng et al., 1999). Ce regroupement s'appuie, d'une part, sur le fait que les débits de basses eaux des années 1965 et 1994 sont comparables, et d'autre part sur le fait que cela induit des observations piézométriques comparables pour ces deux années car le principal facteur de contrôle de ces niveaux est justement le niveau d'eau dans la rivière.

La distribution des charges piézométriques de l'aquifère alluvial de la Bassée est obtenue suivant la méthodologie de Mouhri et al. (2013); Maillot et al. (2019) en retranchant l'épaisseur krigée de la zone vadose à la topographie du MNT au 25m pour obtenir la carte piézométrique de référence (Fig. 8). C'est au centre de la plaine alluviale que l'écart type de l'erreur d'estimation de l'épaisseur de la zone vadose est le plus faible. L'estimation de la piézométrie dans le corridor alluvial (hors coteaux) est plus fiable.

3.5 Écoulements en boucles imbriquées dans la plaine alluviale

Labarthe and Flipo (2016) ont décrit les écoulements dans la plaine alluviale de la Bassée sur la base des modélisations emboîtées. La définition des propriétés hydrodynamiques locales au sein de la plaine alluviale de la Bassée est réalisée par inversion de données piézométriques. La méthodologie d'inversion mise en œuvre se base sur des données piézométriques obtenues à l'échelle intermédiaire (carte piézométrique de référence)

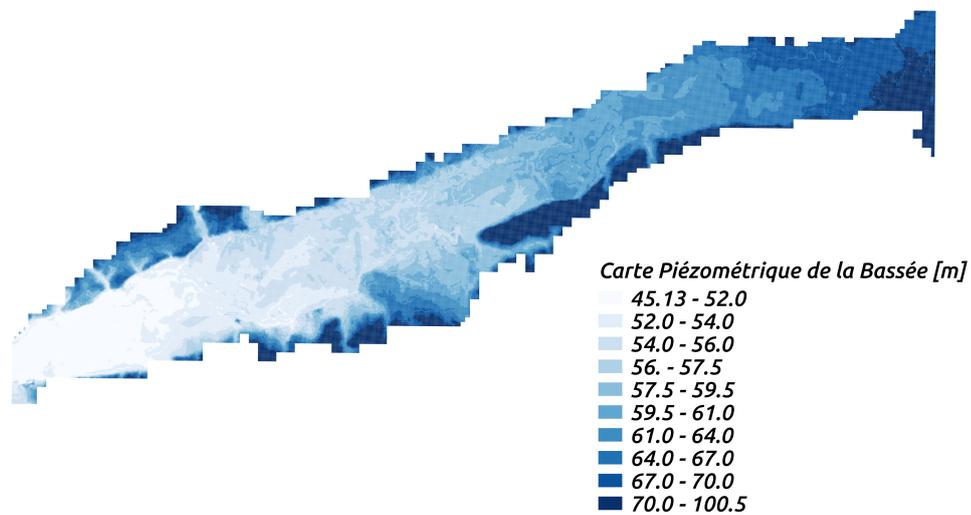


Figure 8. Carte piézométrique des alluvions dans la plaine alluviale de la Bassée

tout en tenant compte du contexte hydrogéologique régional (via les conditions limites fixées par le modèle régional). Les propriétés hydrodynamiques locales estimées intègrent à la fois les contextes locaux et régionaux (Labarthe, 2016). Ces travaux ont ainsi permis d'étudier les dynamiques de la plaine dans trois contextes hydrologiques : un contexte hydrologique moyen calculé sur une période de 17 ans, un événement extrême sec (période de août à octobre 2003) et une période humide (période de mars à fin mai 2001). Les chroniques de débit correspondant à ces périodes, à la station de Bazoches-les-Bray, à l'exutoire de la Bassée, sont présentées figure 9. Il est à noter que la période sèche d'août à octobre est précédée par une période de crue dont le débit maximal est comparable à celui de la crue sur la période humide. Afin d'étudier plus précisément l'influence de ce pic de crue sur les échanges hydriques au sein de la plaine alluviale en période de basses eaux, la dynamique des échanges au cours de la période sèche est étudiée pour l'année civile 2003. D'autre part, la dynamique de la plaine alluviale de la Bassée en période de crue est étudiée sur la période de mars à fin mai 2001. La période humide est divisée en trois phases (Fig. 9) : la phase 1 d'augmentation du débit, la phase 2 de haut débit relativement stable, et la phase 3 de récession.

3.5.1 Dynamique de la plaine alluviale de la Bassée en période de crue

Afin de caractériser l'hydrodynamique de la Bassée pendant les périodes de crue, une analyse approfondie des échanges est entreprise. Pour ce faire, la période de crue est subdivisée en trois phases (Fig. 9). La première phase correspond à la montée des eaux, couvrant le mois de mars 2001. La deuxième phase est dédiée aux hautes eaux, s'étalant d'avril à mi-mai. Enfin, la dernière période concerne la récession, englobant les 15 derniers jours de mai. Pour chacune de ces phases, un bilan global des échanges est calculé (tab. 2). En outre, étant donné que la dynamique de la crue est influencée par les variations rapides du débit, une analyse des échanges journaliers est également présentée (Fig. 10).

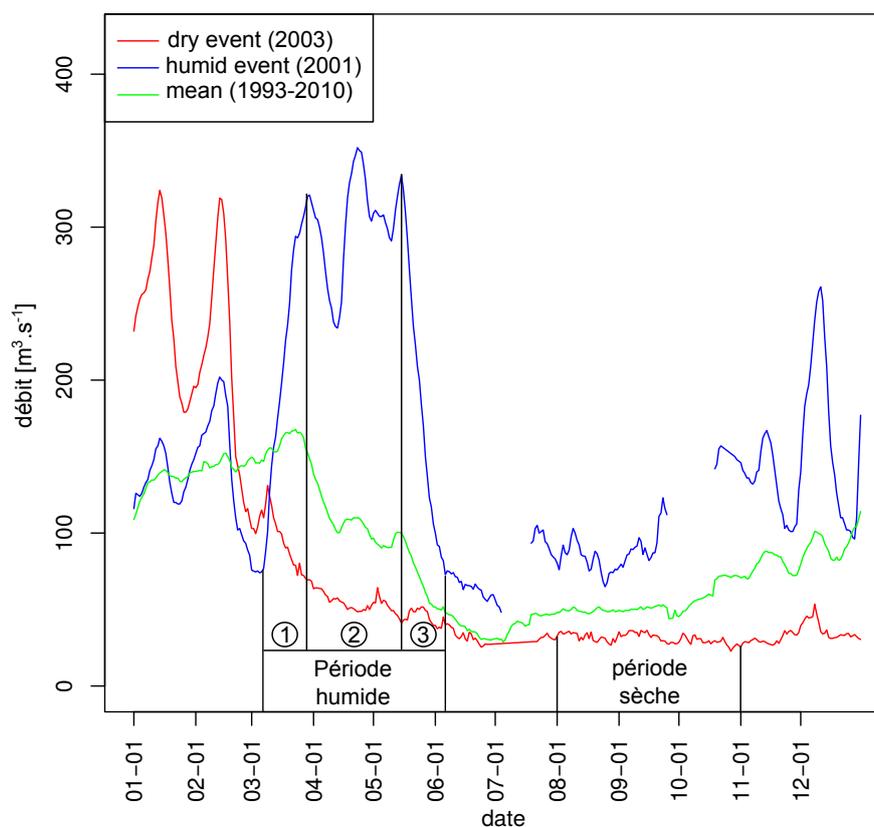


Figure 9. Chroniques de débit des années civiles 2001 et 2003 comparées à la moyenne journalière des débits sur la période 1993-2010 à Bazoches-les-Bray

Tableau 2. Tableau du bilan hydrique sur la plaine alluviale durant les différentes phases de crue (voir Fig. 9) $[m^3.s^{-1}]$

Période	Echanges nappe-rivière			Echanges Alluvion-Craie			Recharge	BC*	stock
	Inf	Exf	Net	Inf	Exf	Net			
Phase 1 3 semaines Montée des eaux	-6.18	4.97	-1.21	-9.12	5.10	-4.02	4.71	-0.43	1.47
Phase 2 1.5 mois Maximum de crue	-3.27	8.23	4.96	-7.33	7.43	0.1	5.73	-0.57	0.30
Phase 3 3 semaines Récession	-1.66	12.08	10.42	-4.31	11.11	6.80	2.57	-0.53	-1.58
Moyenne 1993-2010	-3.28	5.62	2.34	-4.42	5.56	1.14	1.42	-0.22	0.00

* Les conditions limites correspondent aux sorties du système, elles prennent en compte les prélèvements, les débordements et les flux aux limites

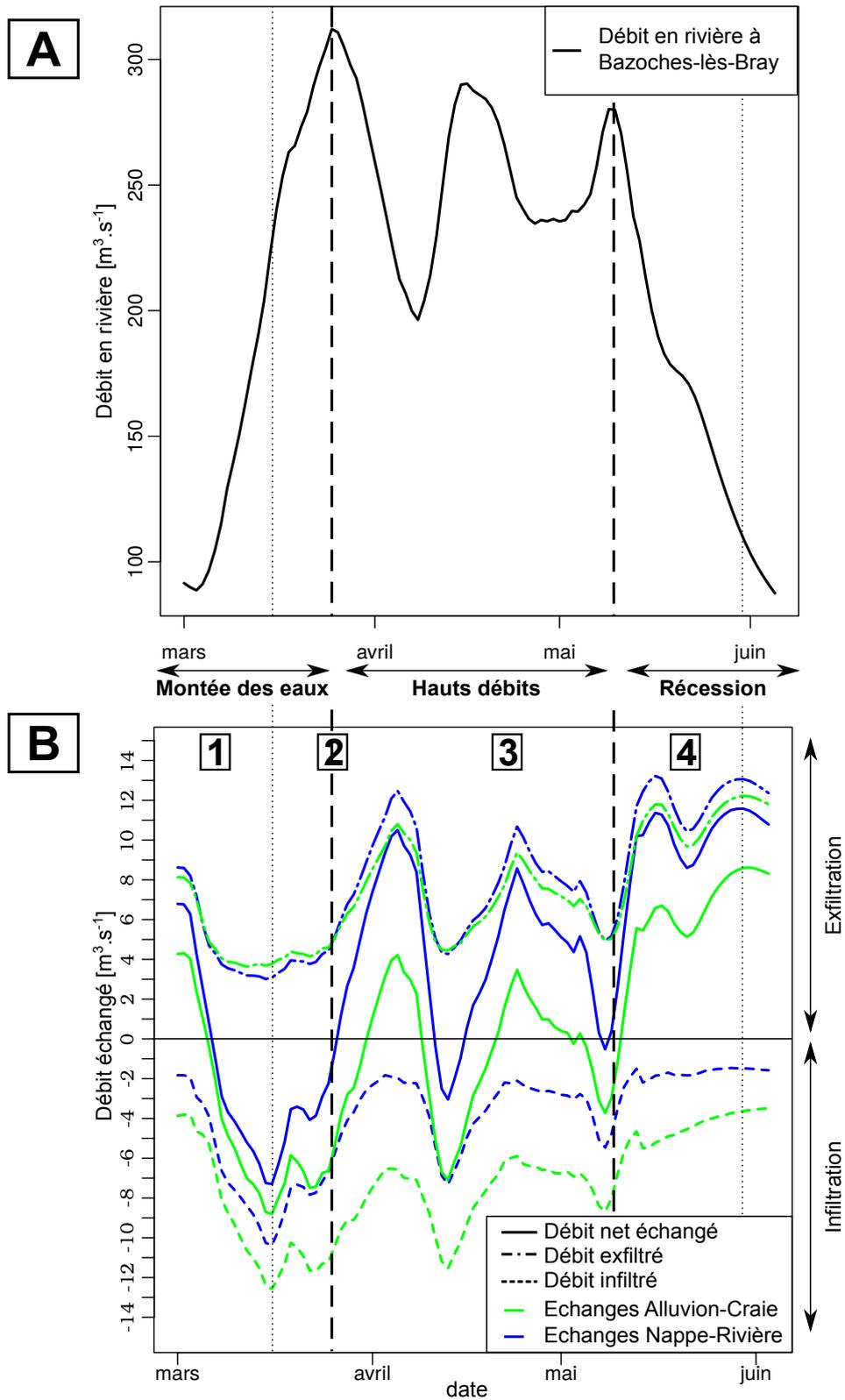


Figure 10. Evolution des échanges journaliers sur la plaine alluviale de la Bassée au cours de la période de crue mars-mai 2001. A) chronique de débit à la station de Bazoches-lès-Bray, B) Chronique des échanges journaliers globaux sur la zone de la Bassée. Sont distingués les échanges nets (ligne pleine), les débits infiltrés (pointillés), les débits exfiltrés (point-pointillé), pour les échanges nappe-rivière (bleu foncé) et les échanges Alluvion-Craie (vert). (D'après Labarthe and Flipo, 2016)

La phase de montée des eaux se caractérise par une infiltration significative des eaux de la rivière dans l'aquifère alluvial. En effet, le débit d'infiltration des eaux de la rivière double pendant la phase d'ascension par rapport au débit moyen d'infiltration ($-6.18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, Tab. 2). Une augmentation de l'infiltration en rivière est simulée au cours des deux premières semaines de cette phase d'ascension (cf. période 1, Fig. 10B). Le pic d'infiltration, coïncidant avec le point le plus bas d'exfiltration au cours de cette période, est atteint alors que la phase d'augmentation du débit n'est pas encore achevée. Cette observation peut s'expliquer par la forme de la courbe de tarage déterminée par l'équation de Manning, où au-delà d'un certain débit, une augmentation significative du débit entraîne une modification relativement faible de la charge simulée en rivière.

Conjointement à l'augmentation de l'infiltration en rivière, une infiltration des eaux de la plaine alluviale vers l'aquifère régional est globalement simulée (Tab. 2). Bien que la phase d'ascension des eaux se caractérise par une augmentation de l'infiltration, une diminution de l'exfiltration est également simulée pendant cette période (Tab. 2, Fig. 10B, cadre 1). Cependant, en raison de la réactivité significative de la plaine alluviale aux variations du niveau d'eau en rivière, la phase d'infiltration intense et de diminution de l'exfiltration est de courte durée (Fig. 10B, cadre 1). Néanmoins, cela permet de modifier le régime global de la plaine alluviale, qui devient globalement infiltrante pendant cette période. Les échanges nets entre la plaine alluviale et la craie sont de $-4.02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tandis que les échanges entre la rivière et la plaine alluviale sont de $-1.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 2).

Dès le début de la phase de hautes eaux, l'infiltration importante en rivière observée pendant la montée de la crue prend fin (Fig 10B, cadre 3). Environ une semaine après le pic de crue, l'infiltration en rivière retrouve son niveau antérieur à la crue (environ $-2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), indiquant l'atteinte d'un équilibre. Ce rétablissement de l'équilibre s'explique par le stockage de l'eau dans la plaine alluviale en raison de la montée des eaux en rivière, qui bloque les écoulements latéraux le long du gradient topographique (écoulements emboîtés selon [Tóth \(1962\)](#)). Au fil de la période, avec la stabilisation du débit en rivière, le débit net échangé entre la nappe et la rivière retrouve sa valeur initiale d'avant la crue (Fig 10B, cadre 3). La phase de hauts débits est associée à une infiltration significative des eaux de la plaine alluviale vers l'aquifère de la Craie (Fig 10B, cadre 3).

Pendant la phase de récession, le système aquifère tend à être majoritairement exfiltrant, avec une infiltration constante en rivière (Fig. 10B, cadre 4). Le début de la phase de récession se caractérise par une augmentation rapide de l'exfiltration de l'aquifère alluvial et de l'alimentation de l'interface nappe-rivière par l'aquifère de la Craie (Fig. 10). Les débits échangés se stabilisent dès la première semaine. La phase de récession s'accompagne également d'une diminution progressive de l'infiltration des eaux de la plaine alluviale vers l'aquifère de la Craie. Sur l'ensemble de la période, l'infiltration de la plaine alluviale vers l'aquifère de la Craie demeure plus importante par rapport à l'infiltration moyenne au cours de la phase de récession (+50 %).

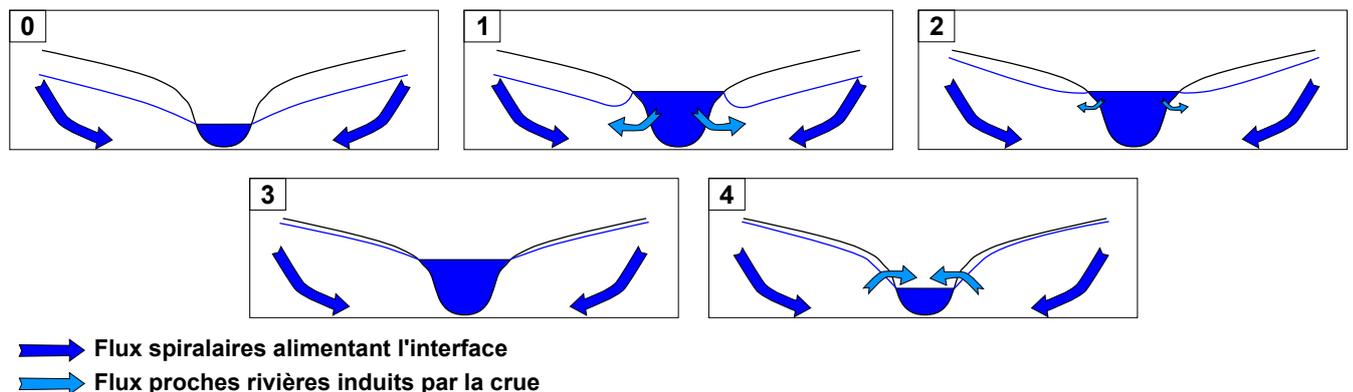


Figure 11. Schéma conceptuel des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée en période de crue. Les étapes 1,2,3,4, correspondent aux situations notées 1,2,3,4, dans la figure 10. La situation 0 correspond à la situation supposée avant la crue. (D'après [Labarthe and Flipo, 2016](#))

Ces analyses du bilan hydrique sur la plaine alluviale et des échanges journaliers en période de crue permettent

d'avancer des hypothèses sur le fonctionnement de ces échanges lors de cette période. Tout d'abord, il semble que l'augmentation rapide du débit pendant la crue modifie localement les conditions limites de la plaine alluviale, induisant ainsi des réinfiltrations locales de la rivière (Fig 11-1). Cependant, la réactivité significative de l'aquifère alluvial, résultant de l'augmentation de la recharge et de la stabilisation de la charge en rivière, favorise un retour rapide à un état d'équilibre (Fig 11-2).

Pendant les périodes de hauts débits, une certaine stabilité est ainsi atteinte (Fig 11-3). Les échanges entre la nappe et la rivière retrouvent leurs valeurs d'avant la crue. L'alimentation maximale de l'aquifère sous-jacent est compensée par une augmentation de l'exfiltration à proximité de la rivière.

La phase de décrue s'accompagne, quant à elle, d'une augmentation brusque de l'exfiltration de l'aquifère alluvial. Cette augmentation présente une double dynamique. Dans un premier temps, la chute rapide de la condition limite définie par la hauteur d'eau en rivière entraînerait une vidange de la zone proche de la rivière, suivie de la mobilisation des zones périphériques (drainant les eaux stockées dans la plaine alluviale), et entraînant la diminution progressive de l'infiltration de la plaine alluviale dans l'aquifère de la Craie (Fig 11-4).

La dynamique des échanges en période de hautes eaux peut ainsi être conceptualisée selon deux boucles emboîtées :

- une première boucle entre l'aquifère alluvial et l'aquifère de la Craie induite par les flux spirales.
- une deuxième boucle au sein de la plaine alluviale elle-même, liée à l'élévation du niveau d'eau en rivière. Initialement, cette élévation en rivière provoque une infiltration de la rivière vers la nappe alluviale, suivie d'un blocage des eaux de la plaine qui s'écoulent latéralement selon le gradient topographique. Pendant la phase de récession, un drainage des eaux stockées dans la plaine alluviale se produit, amorçant le resserrement des flux spirales autour de la rivière.

3.5.2 Dynamique de la plaine alluviale de la Bassée en période sèche

La dynamique des échanges pendant la période de crue est principalement influencée par l'évolution rapide du débit sur cette période. En revanche, durant la période de basses eaux, la dynamique des échanges est davantage déterminée par les écoulements souterrains se développant sur une échelle temporelle plus étendue. La période de faible débit de l'année 2003 s'étend de août à octobre et succède à une période de crue de décembre 2002 à avril 2003. Étant donné que la dynamique rapide des échanges pendant la période de crue a été préalablement caractérisée, les échanges mensuels sont ici examinés sur une période annuelle afin de détailler l'évolution globale des échanges entre les phases de hautes et de basses eaux (Fig. 12).

Pendant la période de basses eaux, une réduction des échanges entre la nappe et la rivière, ainsi qu'entre l'aquifère et la plaine alluviale, est observée. Au cours des 8 mois de basses eaux, le débit net échangé en rivière diminue de $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à $-0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tandis que le débit net d'alimentation de la plaine alluviale diminue de manière proportionnelle, passant de 4 à $-0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Au cours de cette période de basses eaux, en raison de l'inertie de l'aquifère régional, une diminution progressive de l'exfiltration de l'aquifère alluvial est simulée. Cette diminution de l'exfiltration s'accompagne initialement d'une réduction graduelle de l'infiltration en rivière ainsi que de l'infiltration de la plaine alluviale. Cette diminution progressive peut refléter le resserrement des flux spirales autour de la rivière. À partir d'octobre, une augmentation significative de l'infiltration à la fois dans la plaine alluviale et dans la rivière est simulée, et cette infiltration est accompagnée d'une augmentation du débit en rivière.

Cette analyse des débits mensuels moyens sur la zone de la Bassée met en évidence, la diminution progressive de l'exfiltration de l'aquifère de la Craie vers l'aquifère alluvial au cours de la période de basses eaux ainsi qu'une diminution de l'infiltration en rivière et de la plaine alluviale. En période d'étiage, les flux spirales sont minimaux, et l'alimentation de l'interface nappe-rivière est principalement attribuée à une alimentation régionale.

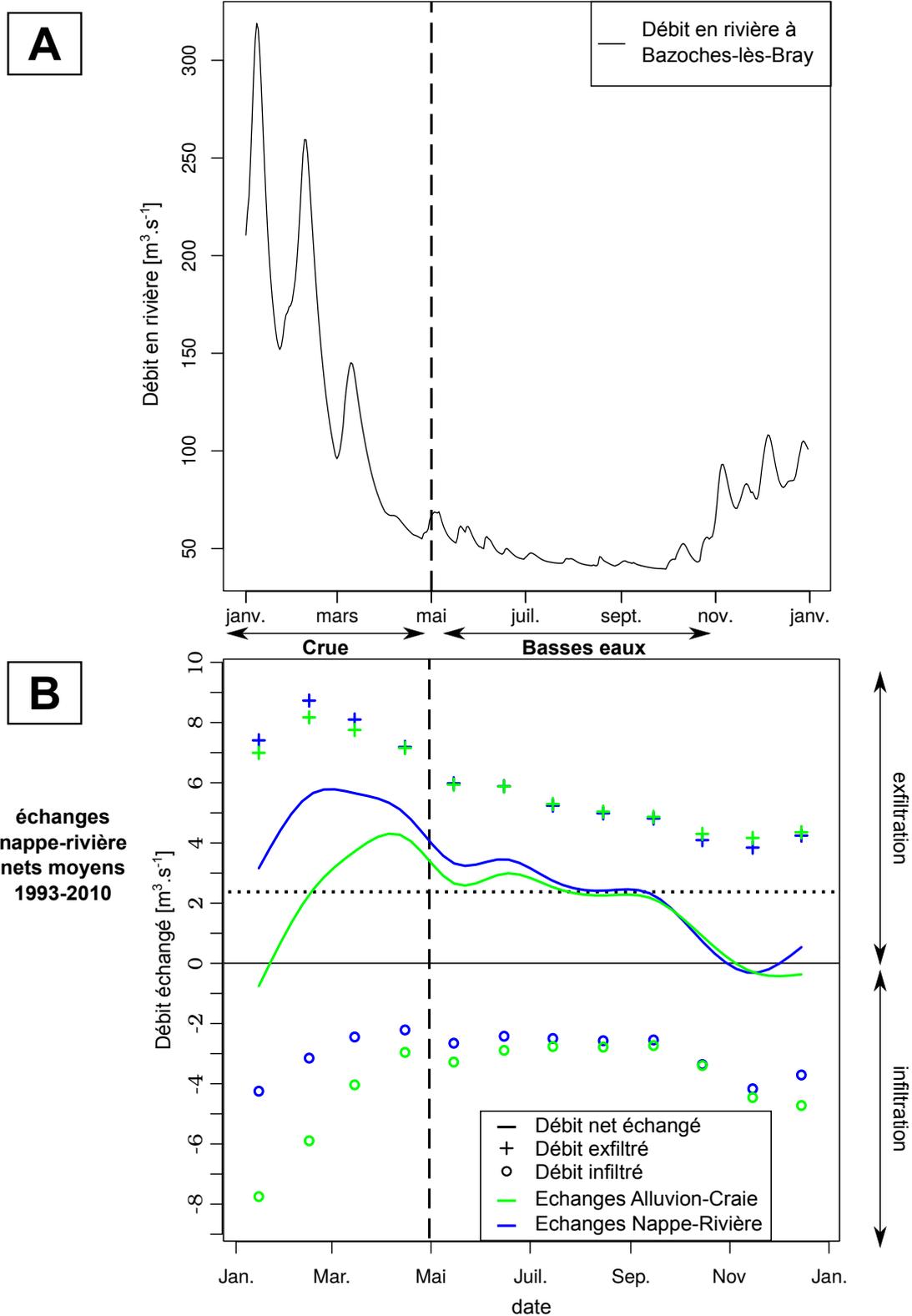


Figure 12. Evolution des échanges mensuels sur la plaine alluviale de la Bassée au cours de l'année civile 2003. A) chronique de débit à la station de Bazoches-les-Bray, B) Chronique des échanges mensuels moyens sur la zone de la Bassée. Sont distingués les échanges nets (ligne pleine), les débits infiltrés (rond), les débits exfiltrés (croix), pour les échanges nappe-rivière (bleu) et les échanges Alluvion-Craie (vert). (D'après Labarthe and Flipo, 2016)

L'analyse de l'hydrodynamique de la plaine alluviale au cours d'une période de crue suivie d'une période de basses eaux suggère que les échanges au cours de l'année hydrologique sont principalement influencés par les phases de crues. En effet, ces périodes d'élévation du niveau de la rivière entraînent une modification des conditions limites de l'hydrosystème, favorisant ainsi la mise en place de processus se déroulant à des échelles spatio-temporelles différentes. Ainsi, les phases de crues engendrent :

- des processus d'infiltration et d'exfiltration rapides, dont les effets locaux sont limités à la période de crue elle-même (montée des eaux, débit élevé, et récession),
- des processus à une échelle plus large qui influent sur le contexte hydrogéologique régional, permettant un stockage de l'eau qui est ensuite redistribuée selon une dynamique plus lente au cours des périodes de basses eaux.

Conclusions

Ce chapitre établit le premier bilan hydrologique de la plaine de la Bassée, qui correspond à un zoom dans l'application CaWaQS-Seine (Flipo et al., 2023a; Gallois and Flipo, 2023). Il révèle une pluie efficace en Bassée équivalente à celle du bassin de la Seine, d'environ 200 mm.a^{-1} malgré de forts écarts entre les précipitations moyennes entre ces deux échelles. Sur la base de la modélisation, le fractionnement de la pluie efficace en Bassée se singularise également des mécanismes à l'œuvre en moyenne à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine, puisque quasiment toute la pluie efficace recharge l'aquifère en Bassée.

Les deux principaux mécanismes de la recharge de l'aquifère alluvial, par son impluvium et *via* les écoulements régionaux au sein de l'aquifère de la craie, sont d'intensités équivalentes d'environ $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ou 190 mm.a^{-1} . Le territoire de la Bassée illustre parfaitement la notion d'Anthropocène, puisque les gravières, intégralement créées par l'Homme et qui recouvrent aujourd'hui 8 % de la surface totale du territoire, contribuent à favoriser l'évaporation sur leur surface à hauteur de 4 % de la recharge.

Pour retrouver les outils et données

Le logiciel CaWaQS est distribué sous licence EPL v2.0. Sa version la plus à jour est téléchargeable sur son [dépôt de développement](#). Le logiciel CaWaQS intègre la librairie dédiée à la simulation des gravières *libwet*. Celle-ci est également distribuée de manière indépendante sous licence EPL v2.0. Sa version la plus à jour est téléchargeable sur son [dépôt de développement](#). L'installation de CaWaQS implique une installation automatique de *libwet*.

Références

- Antoine, P., P. Auguste, J.-J. Bahain, C. Chaussé, C. Falguères, B. Ghaleb, N. Limondin-Lozouet, J.-L. Lochet, and P. Voinchet (2010). Chronostratigraphy and palaeoenvironments of Acheulean occupations in Northern France (Somme, Seine and Yonne valleys). *Quaternary International* 223-224, 456–461.
- Bendjoudi, H., P. Weng, R. Guérin, and J. F. Pastre (2002). Riparian wetlands of the middle reach of the Seine river (France) : historical development, investigation and present hydrologic functioning. A case study. *Journal of Hydrology* 263(1), 131–155.
- Bonnet, X., H. Boucasse, P. Defrance, C. Duprez, P. Strosser, Y. Beley, and S. Morardet (2012). Evaluation

économique des services rendus par les zones humides : la cas de la plaine alluviale de la Bassée. Technical report, Commissariat général du développement durable.

- Cojan, I., J. Brulhet, J. Corbonnois, A. Devos, J. Gargani, D. Harmand, S. Jaillet, A. Jouve, M. Laurain, O. Lejeune, J. Le Roux, B. Losson, A. Marre, M.-G. Moreau, C. Ricorde, R. Simon-Coinçon, O. Stab, M. Thiry, and P. Voinchet (2007). Morphologic evolution of eastern Paris Basin : "ancient surfaces" and Quaternary incisions. *Mémoire de la Société géologique de France 178*, 135–155.
- Curie, F. (2006). *Rétention de nitrate dans les zones humides riveraines : Rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le bassin de la Seine*. PhD Thesis, Université Paris 6.
- Curie, F., A. Ducharne, H. Bendjoudi, and S. Gaillard (2003). Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates. Technical report, PIREN Seine.
- Dass, G., A. Jost, D. Eschbach, and A. Ducharne (2022). Impact des aménagements de la Seine et lacs de gravières sur le fonctionnement hydrogéologique de la plaine alluviale de la Bassée. Technical report, PIREN-Seine.
- Deleplancque, B. (2016). *Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires d'une plaine alluviale : Exemple de l'évolution de la Seine supérieure depuis le dernier maximum glaciaire*. Ph. D. thesis, Université Paris sciences et lettres.
- Eschbach, D. and L. Lestel (2018). Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval. Technical report, PIREN-Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2023a). Modélisation couplée de l'ensemble du système aquifère du bassin de la Seine avec CaWaQS : innovations méthodologiques. In N. Flipo (Ed.), *Trajectoires hydrologiques, passée, présente, et futures du bassin de la Seine*, Volume 3 of *rapport de synthèse phase VIII*, pp. 5–44. PIREN Seine.
- Flipo, N., N. Gallois, and J. Schuite (2023b, January). Regional coupled surface–subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. *Geoscientific Model Development 16*(1), 353–381.
- Flipo, N., B. Labarthe, N. Gallois, A. Rivière, S. Wang, F. Baratelli, M. Maillot, and D. Kiliç (2022, April). CaWaQS.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. d. Fouquet, and M. Krimissa (2012). Hybrid fitting of a hydrosystem model : long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research 48*, W05509.
- Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill (2014). Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences 18*, 3121–3149.
- Fustec, E., H. Bendjoudi, S. Gaillard, P. Weng, F. Boyer, P. Boët, O. Schannen, S. Croguennec, and G. Billen (2001). Fonctionnement du territoire Bassée. Technical report, Piren-Seine.
- Gaillard, S. (1999). *L'Aube : Dynamique morphosédimentaire holocène et fonctionnement actuel d'un hydro-système à faible énergie*. PhD Thesis, Université Paris IV.
- Gaillard, S., M. Sebilou, D. Brunstein, D. N'Guyen-The, M. Grably, E. Fustec, H. Bendjoudi, J.-P. Bravard, A. Amezal, G. Billen, and A. Mariotti (2002). Typologie et fonctions des zones humides riveraines. Technical report, PIREN Seine.

- Gallois, N. and N. Flipo (2023). Fonctionnement hydrologique du bassin de la Seine au XXI^{ème} siècle. In N. Flipo (Ed.), *Trajectoires hydrologiques, passée, présente, et futures du bassin de la Seine*, Volume 3 of *rapport de synthèse phase VIII*, pp. 45–68. PIREN Seine.
- Gibbard, P. and K. Cohen (2008). Global chronostratigraphic correlation table for the last 2.7 million years. *Episodes* 31, 243–247.
- Girard, G., E. Ledoux, and J.-P. Villeneuve (1980). An integrated rainfall, surface and underground runoff model. *La Houille Blanche* 4/5, 315–320.
- Greiner, I. (1997). *Analyse de la variabilité fonctionnelle de la plaine alluviale de la Seine et modélisation des transferts de nitrates*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Jost, A., S. Wang, L. Labarthe, and N. Flipo (2017). Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport technique, PIREN-Seine.
- Jost, A., S. Wang, F. Picourlat, F. Colleoni, T. Verbeke, B. Labarthe, N. Flipo, N. Gallois, F. Baratelli, and A. Rivière (2019). Les Gravières, Fenêtres Ouvertes Sur La Plaine de La Bassée. In A. Rivière (Ed.), *Fonctionnements hydrogéophysiques et biogéochimiques des interfaces nappe-rivière : conséquences sur la ressource en eau* (PIREN-Seine ed.), Number 4 in Rapport de Synthèse de la phase VII.
- Jost, A., S. Wang, T. Verbeke, F. Colleoni, and N. Flipo (2023, January). Hydrodynamic relationships between gravel pit lakes and aquifers : brief review and insights from numerical investigations. *Comptes Rendus. Géoscience* 355(S1), 1–25.
- Labarthe, B. (2016). *Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle*. PhD Thesis, MINES ParisTech, PSL Research University.
- Labarthe, B. and N. Flipo (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. Technical report, PIREN Seine.
- Lautridou, J., J. Auffret, F. Lécolle, D. Lefebvre, G. Lericolais, A. Roblin-Jouve, S. Balescu, G. Carpentier, J.-M. Cordy, J. Descombes, S. Occhietti, and D. Rousseau (1999). Le fleuve Seine, Le fleuve Manche. *Bulletin de la Société Géologique de France* 170, 545–558.
- Lestel, L., D. Eschbach, and N. Gastaldi (2018). *Archiseine : Une Approche Géohistorique Du Bassin de La Seine* (ARCEAU-IdF ed.). Number 18 in Fascicules du PIREN-Seine.
- Levassor, A. (2005). Etude globale pour l'aménagement de la Bassée. Etude hydrogéologique de faisabilité. Technical report, ARMINE.
- Maillot, M., N. Flipo, A. Rivière, N. Desassis, D. Renard, P. Goblet, and M. Vincent (2019, November). Technical note : Water table mapping accounting for river-aquifer connectivity and human pressure. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(11), 4835–4849.
- Massei, N., B. Laignel, J. Deloffre, J. Mesquita, A. Motelay, R. Lafite, and A. Durand (2010). Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *Int. J. Climatol.* 30(14), 2146–2154.
- Miall, A. (1996). *The geology of fluvial deposits*. Springer Verlag. Publication Title : Springer Verlag.
- Mironov, D. (2008). Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model. COSMO Technical Report 11, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany.
- Mollema, P. N. and M. Antonellini (2016, August). Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes : A review and outlook. *Earth-Science Reviews* 159, 247–270.

- Mouhri, A., N. Flipo, Q. Vitale, L. Bodet, G. Tallec, P. Ansart, and F. Rejiba (2013). Influence du contexte hydrogéologique sur la connectivité nappe-rivière. In *L'observation long terme de l'environnement, exemple du bassin versant de l'Orgeval* (Quae ed.), pp. 89–98. QUAE.
- Mégniën, C. (1965). Possibilité aquifère des alluvions du val de Seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau. Technical report, Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Picoulat, F., A. Jost, S. Teillaud, P. Passy, F. Baratelli, and N. Flipo (2018). Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la Bassée : le cas des gravières. Rapport technique, PIREN-Seine.
- Quintana-Seguí, P., P. L. Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92–107.
- Reis, B. J. D., G. T. Batista, M. D. S. Targa, and C. D. S. Catelani (2006, December). Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. *Rem : Revista Escola de Minas* 59(4), 391–396.
- Saplaïroles, M., J.-F. Desprats, G. Delpont, and A. Bourguignon (2007). Evaluation de l'impact Sur La Ressource En Eaux Souterraines de l'exploitation de Granulats Dans Le Milieu Alluvionnaire de La Garonne (Haute-Garonne). Technical Report RP-55673-FR, BRGM.
- Schanen, O. (1998). *Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique et biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du val de Seine*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Tajjar, M. H. (1993). *Modélisation de l'hydrodynamique des échanges nappe-rivière. Simulation d'une lachûre expérimentale en Seine en période d'étiage*. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Tóth, J. (1962). A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research* 67(11), 4375–4387.
- Vandenbergh, J. (1995). Timescales, climate and river development. *Quaternary Science Reviews* 14, 631–638.
- Vidal, J.-P., E. Martin, L. Franchistéguy, F. Habets, J.-M. Soubeyroux, M. Blanchard, and M. Baillon (2010). Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 459–478.
- Wang, S., A. Jost, B. Labarthe, and N. Flipo (2016). Création du module Libwet de simulation des interactions gravières-aquifères. Rapport technique, PIREN-Seine.
- Weill, P., B. Labarthe, A. Jost, J. Amestoy, I. Cojan, B. Deleplancque, and N. Flipo (2016). Complexité hydrosédimentaire de la plaine alluviale de la Bassée. Technical report, PIREN Seine, Rapport de synthèse 2011-2015.
- Weng, P., A. Coudrain-Ribstein, A. Talbi, and H. Bendjoudi (1998). Groundwater circulation between alluvial aquifer and underlying Senonian chalk in the Seine valley. *Phys. Chem. Earth (B)* 24, 151–154.
- Weng, P., A. Coudrain-Ribstein, C. Kao, H. Bendjoudi, and G. d. Marsily (1999). Demonstration of strong temporary vertical circulation between wetlands and alluvial and regional aquifers. *Surface Geosciences*.
- Zhan, S., C. Song, J. Wang, Y. Sheng, and J. Quan (2019, March). A Global Assessment of Terrestrial Evapotranspiration Increase Due to Surface Water Area Change. *Earth's Future* 7(3), 266–282.
- Zhao, G., Y. Li, L. Zhou, and H. Gao (2022, June). Evaporative water loss of 1.42 million global lakes. *Nature Communications* 13(1), 3686.

Connectivité et réactivité de l'interface nappe-rivière dans la plaine alluviale de la Bassée ¹

Fulvia Baratelli^{1,*}, Edith Parlanti², Josette Garnier¹, Sophie Guillon³, Anne Jost¹, Agnès Rivière³, Mahaut Sourzac², Benjamin Mercier¹, Anun Martinez¹, Romane Nespoulet¹, David Eschbach¹, Gilles Varrault⁴, Jean-Marie Mouchel¹, Nicolas Flipo³

¹ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR Metis 7619, F-75005 Paris, France

² Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, F-33600 Pessac, France

³ Centre de Géosciences, Mines Paris, Université PSL, Fontainebleau, France

⁴ LEESU, Univ Paris Est Créteil, Ecole des Ponts, Créteil, France

* fulvia.baratelli@sorbonne-universite.fr

Résumé

La plaine alluviale de la Bassée est un territoire caractérisé par la nécessité de concilier des usages différents mais dont le fonctionnement hydro-biogéochimique complexe reste largement méconnu. Cinq campagnes multi-traceurs ont été organisées entre 2017 et 2021 afin de mesurer différentes variables biogéochimiques dans les eaux de surface et souterraines (nappes des alluvions et de la craie). Dans ce travail, les campagnes sont classées selon deux critères : un critère hydrologique, basé sur le débit en rivière, qui contrôle les flux d'eau mais aussi des éléments biogènes, et un critère basé sur la température de l'air, qui représente le potentiel d'activité biologique du système alluvial. Au regard de cette grille d'analyse, les campagnes peuvent être regroupées en trois classes. Les variables biogéochimiques mesurées sont ensuite présentées pour chaque classe de campagnes et interprétées de façon intégrée afin de caractériser la connectivité hydrologique entre les compartiments (rivière, nappe des alluvions et nappe de la craie) et la réactivité de l'interface nappe-rivière le long du corridor fluvial dans la Bassée. L'analyse des résultats des campagnes a montré que les eaux souterraines dans la Bassée seraient le siège d'une activité de dénitrification permettant l'abattement des nitrates accumulés à l'amont de la plaine.

Points clés

- Cinq campagnes multi-traceurs ont été réalisées en conditions hydrologiques contrastées pour comprendre le fonctionnement hydro-biogéochimique de la Bassée ;
- Les campagnes sont classées selon un critère hydrologique (débit) et selon le potentiel d'activité biologique, basé sur la température de l'air ;
- Les eaux souterraines dans la Bassée semblent être le siège d'une activité de dénitrification permettant l'abattement des nitrates accumulés à l'amont de la plaine.

1. Pour citer cet article : Baratelli, F., Parlanti, E., Garnier, J., Guillon, S., Jost, A., Rivière, A., Sourzac, M., Mercier, B., Martinez, A., Nespoulet, R., Eschbach, D., Varrault, G., Mouchel, J.-M., Flipo, N. Connectivité et réactivité de l'interface nappe-rivière dans la plaine alluviale de la Bassée. Dans Carré, C., Lestel, L., et Flipo, N. (eds), *Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 7, 2023, pp. 29-53

Abstract

La Bassée alluvial plain is challenging because of the need of reconciling its various usages. However, its hydro-biogeochemical functioning remains largely unknown. Five field campaigns were organized between 2017 and 2021 in order to measure different biogeochemical variables in surface water and groundwater (alluvial plain and chalk aquifers). In this work, the campaigns are classified according to two criteria : a hydrological criterion, based on river flow, which not only controls the flows of water but those of biogenic elements as well, and a criterion, based on air temperature, which represents the biological activity potential of the alluvial system. Based on this analysis grid, the campaigns can be grouped into three classes. The measured biogeochemical variables are then presented for each class and interpreted in an integrated manner to characterize the hydrological connectivity between the compartments (river, alluvial and chalk aquifer) and the reactivity of the groundwater-river interface along the river corridor in La Bassée. The analysis of the data collected during these campaigns showed that a denitrification activity occurs in the chalk aquifer underlying La Bassée alluvial plain, allowing a reduction of nitrate accumulated upstream of the plain.

Key points

- Five sampling campaigns were carried out in different hydrological conditions (flood and low flow) to understand the hydro-biogeochemical functioning of La Bassée alluvial plain ;
- The sampling campaigns are classified according to a hydrological criteria (river discharge) and a biological activity potential, based on air temperature ;
- A denitrification activity seems to occur in the chalk aquifer underlying La Bassée, allowing the reduction of nitrate accumulated upstream of the plain.

Table des matières

1	La zone d'étude : la plaine alluviale de la Bassée	32
2	Le système de suivi en continu des variables physiques	33
3	Les campagnes d'échantillonnage	33
3.1	Le contexte hydrologique et climatique des campagnes	33
3.2	Prélèvement et analyse des échantillons d'eau	35
4	Résultats et discussion	39
4.1	Classification des campagnes	39
4.2	Comparaison des résultats pour chaque classe de campagnes	40

Introduction

Les plaines alluviales accueillent une grande partie de la population humaine mondiale : par exemple, environ 50 % de la population européenne habite sur d'anciennes plaines alluviales (Tockner et al., 2022). En effet, ces structures contiennent des cours d'eau et des aquifères qui contribuent de manière importante à l'approvisionnement en eau potable et à l'irrigation, de sorte que, tout au long de l'histoire, l'Homme a naturellement eu tendance à choisir ces sites pour développer les villes, l'agriculture et les voies de circulation (Tockner et al., 2008, 2010; Baillieux et al., 2014). En plus de représenter un stock d'eau, de nutriments et de nourriture, les plaines alluviales fournissent d'autres services écologiques, sociétaux et économiques tels que la régulation des crues et la protection de la qualité de l'eau par des mécanismes d'atténuation des polluants (Tockner et al., 2010). Plusieurs études soulignent l'importance de la filtration dans les berges, des propriétés tampons de la zone hyporhéique et des processus de dénitrification qui se déroulent dans les plaines alluviales (par exemple, Doussan et al., 1997; Hiscock and Grischek, 2002; Curie et al., 2009; Flipo et al., 2007; Sun, 2015; Xu et al., 2018). Les plaines alluviales sont également riches en biodiversité et abritent différents habitats (Wantzen, 2023; Tockner and Stanford, 2002). Pour toutes ces raisons, les plaines d'inondation peuvent être considérées comme des « écosystèmes d'importance stratégique mondiale pour l'homme et la nature » (Tockner et al., 2022).

L'exploitation intensive des plaines alluviales pour le développement agricole et urbain en fait l'un des écosystèmes les plus menacés au monde, principalement en raison de la contamination et de l'altération des écoulements et du régime thermique. En Europe, jusqu'à 90 % des anciennes plaines alluviales ont été dégradées et ont disparu sur le plan fonctionnel (Tockner et al., 2008, 2010). Connaître le fonctionnement hydrologique et biogéochimique des plaines alluviales est donc crucial pour aider les décideurs politiques à planifier la gestion durable de ces environnements, en tenant compte des nombreux facteurs de stress anthropiques et climatiques qui les caractérisent.

Les plaines alluviales sont des environnements complexes en raison des processus géologiques qui ont conduit à leur formation. En particulier, les aquifères alluviaux peuvent être très hétérogènes en raison d'une succession complexe de sédimentation, d'érosion et de diagenèse, contrôlée par les cycles climatiques, et de l'évolution tectonique. Une telle hétérogénéité se produit généralement à différentes échelles spatiales (Koltermann and Gorelick, 1996; Anderson et al., 1999; Heinz et al., 2003; Fleckenstein et al., 2006). L'architecture interne des sédiments alluviaux peut être caractérisée par la présence de voies d'écoulement préférentielles, qui sont des bandes connectées de sédiments très perméables, par exemple des graviers ou des graviers sableux, où l'eau et les solutés peuvent se déplacer plus rapidement que dans les sédiments à grains fins. Au contraire, des barrières hydrauliques se forment également dans ces milieux. Elles se composent de zones à faible perméabilité, par exemple des lentilles de sable fin ou d'argile. Comme indiqué par Flipo et al. (2014), ces structures d'hétérogénéités ont un effet majeur sur les hauteurs piézométriques dans les plaines alluviales (Bendjoudi et al., 2002), sur les échanges entre rivières et aquifères (Fleckenstein et al., 2006) et sur le transport des contaminants dans les sédiments alluviaux (Baratelli et al., 2014).

En raison de leur hétérogénéité à plusieurs échelles, la compréhension et la prévision des fonctionnements hydrologique et biogéochimique des plaines alluviales constituent un véritable défi. Connaître les connexions hydrologiques complexes entre les différents compartiments d'un système alluvial est crucial, car ces connexions hydrologiques contrôlent les flux de carbone organique et de nutriments à travers le bassin versant et le long du réseau hydrographique (Covino, 2017). Cependant, une caractérisation complète des flux hydriques et des hétérogénéités à fine échelle est difficile à réaliser pour les grands systèmes alluviaux. Il s'agit donc de développer des méthodes pour comprendre le lien entre les processus à petite échelle spatiale et temporelle et le fonctionnement aux échelles saisonnières et annuelles et à l'échelle du bassin versant (Covino, 2017). Les plaines alluviales représentent par ailleurs l'interface nappe-rivière à l'échelle régionale (Flipo et al., 2014), qui est l'échelle à laquelle les plans de gestion des ressources en eau sont souvent établis. Il est donc particulièrement important de développer des méthodes permettant de caractériser efficacement le fonctionnement des systèmes alluviaux à cette échelle. Comme l'a indiqué Covino (2017), on manque actuellement de données à l'échelle des grands cours d'eau et des bassins versants. Tockner et al. (1999) ont également souligné la nécessité de disposer

de données quantitatives sur le rôle des plaines alluviales en tant que puits, sources ou siège de transformation des nutriments et de la matière organique.

Des études effectuées sur différents systèmes alluviaux ont montré l'importance de combiner plusieurs types de mesures (hydrologiques, chimiques, isotopiques, etc.) pour déterminer l'état de connexion entre les eaux de surface et les eaux souterraines le long d'une rivière (Brooks et al., 2022; Filippini et al., 2015; Baillieux et al., 2014; Mouhri et al., 2013). Cette approche semble être particulièrement pertinente à l'échelle régionale (Banks et al., 2011). De façon cohérente, Covino (2017) a souligné la nécessité d'établir des collaborations entre différentes disciplines et la nécessité de repenser la façon d'aborder les campagnes de terrain dans les grands systèmes alluviaux.

Dans ce contexte, lors de la phase 7 du PIREN-Seine, deux campagnes multi-traceurs, incluant la mesure des variables biogéochimiques, ont été organisées en périodes de hautes et basses eaux afin d'évaluer le fonctionnement hydrobiogéochimique de la plaine alluviale de la Bassée (320 km²) (Baratelli et al., 2017; Parlanti et al., 2019). Ces travaux ont montré l'intérêt de ces campagnes multi-traceurs pour comprendre le fonctionnement hydro-biogéochimique de la Bassée mais aussi la nécessité d'acquérir plus de données en menant de nouvelles campagnes en situations contrastées de conditions hydrologiques. Trois campagnes supplémentaires ont donc été réalisées pendant la phase 8 du PIREN-Seine. Les résultats des analyses de tous les échantillons étant désormais disponibles, ce chapitre se propose de compléter le travail d'interprétation commencé par Baratelli et al. (2021). Après avoir présenté le contexte hydrologique et biogéochimique des cinq campagnes réalisées entre 2017 et 2021, le jeu de données acquis est décrit et interprété.

1 La zone d'étude : la plaine alluviale de la Bassée

La Bassée est un secteur de la plaine alluviale de la Seine en amont de Paris, située entre les confluences Seine-Aube et Seine-Yonne. Elle s'étend sur une longueur de 60 km et une largeur de 8 km environ, pour une surface de 320 km² (Bendjoudi, 2000; Labarthe and Flipo, 2016). La carte géologique de cette région montre que le substrat de la plaine alluviale est constitué par la craie du Crétacé supérieur. Le contexte géologique de la Bassée est présenté plus en détail dans le chapitre « Considérations sur le fonctionnement hydrologique de la Bassée » de ce volume.

La Bassée est un territoire caractérisé par la nécessité de concilier différents usages du sol et de l'eau. Il s'agit en effet d'une zone humide d'importance nationale pour son remarquable patrimoine de biodiversité. Une réserve naturelle de 854 ha, la plus grande en Ile-de-France, a ainsi été créée en 2002 afin de protéger ce patrimoine (Réserve naturelle de la Bassée). Cette région a aussi été classée réserve d'eau souterraine stratégique pour la future alimentation en eau potable (Bel, 2015). C'est un territoire à forts enjeux politico-économiques et environnementaux, liés notamment à la présence d'une centrale nucléaire à Nogent-sur-Seine, des captages de la Voulzie pour l'alimentation en eau potable de la ville de Paris ainsi qu'aux importants gisements et exploitations de granulats alluvionnaires. A cela s'ajoutent des projets d'aménagement tels que la mise à grand gabarit du canal de navigation entre Nogent et Bray-sur-Seine et la construction de casiers écrêteurs de crue dans le secteur aval de la Bassée. Elle représente ainsi un territoire à forts enjeux, où la nécessité de concilier des usages différents demande le développement d'un projet de territoire viable.

C'est pour toutes ces raisons que la Bassée est un site étudié depuis une trentaine d'années dans le cadre du PIREN-Seine. De nombreuses études ont été réalisées dans des disciplines variées telles que la géologie, l'hydro(géo)logie, la géographie, la géochimie ou encore la géohistoire (Tajjar, 1993; Greiner, 1997; Schanen, 1998; Schanen et al., 1998; Fustec et al., 2001; Curie et al., 2003; Weill et al., 2013; Labarthe et al., 2014; Guillon et al., 2016; Steinmann et al., 2016; Wang et al., 2016; Baratelli et al., 2017; Eschbach and Lestel, 2018; Jost et al., 2017; Guillon et al., 2018; Labadie et al., 2018; Picourlat et al., 2018; Parlanti et al., 2019; Carré et al., 2020; Réjiba et al., 2020; Baratelli et al., 2021; Carré et al., 2021; Flipo et al., 2021; Guillon et al., 2021; Léger et al., 2021; Dass et al., 2022; Passy and Puisais, 2022; Resch and Lestel, 2022).

En ce qui concerne le fonctionnement hydrologique, plusieurs approches de modélisation numérique (Labarthe and Flipo, 2016; Jost et al., 2017; Picourlat et al., 2018) ont mis en avant une dynamique complexe d'échanges hydriques entre la rivière et sa nappe alluviale d'accompagnement, mais aussi entre la nappe alluviale et l'aquifère régional de la craie (Baratelli et al., 2017, 2021). Un système de suivi de ces échanges hydriques a été mis en place depuis 2015 afin de préciser cette dynamique et de mieux cerner le fonctionnement hydrologique du système.

2 Le système de suivi en continu des variables physiques

Onze stations MOLONARI (*MONitoring LOcal des échanges NAppe-Rivière*) ont été installées en 2014 et mises en service en 2015 dans la plaine alluviale de la Bassée (Mouhri et al., 2013) avec l'objectif d'évaluer les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Ces stations sont constituées d'un ou deux piézomètres et d'un dispositif de suivi des eaux de surface. L'ensemble de ces dispositifs permet de mesurer en continu la pression et la température dans la rivière, dans sa nappe alluviale d'accompagnement et – pour certains sites – également dans la nappe de la craie sous-jacente (Baratelli et al., 2021). Seules les stations situées sur la Seine et sur ses affluents seront analysées dans ce chapitre focalisé sur le fonctionnement du corridor fluvial dans la Bassée (Figure 1) : quatre stations se trouvent sur la Seine (T3S1, T5S1, T6S3, T8S1), une sur l'Aube en amont de la confluence avec la Seine (T4A1) et une sur l'Yonne en amont de la confluence avec la Seine (T7Y4). Une station (T1S1) a été installée sur la Seine en amont de la Bassée, près de la ville de Troyes. Les autres stations, situées sur des gravières, sur la Vieille Seine et sur un bras mort de la Seine, sont analysées dans le chapitre « Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée » de ce volume.

Chaque dispositif est muni d'un capteur DIVER pour la mesure de la pression et de la température de l'eau avec un pas de temps de 15 minutes. Les mesures de pression peuvent être converties en niveaux d'eau exprimés dans le repère NGF en utilisant les valeurs de pression atmosphérique mesurées par des baromètres installés en différents secteurs de la plaine ainsi que les altitudes des têtes de puits estimées par géoréférencement (GPS). Les quatre baromètres sont situés à la Maison des Eaux à Nogent-sur-Seine, à la Maison de la Réserve Naturelle de la Bassée à Gouaix et au niveau des stations T5S1 et T6B5 (Figure 1).

3 Les campagnes d'échantillonnage

Les deux campagnes réalisées pendant la phase 7 (15-17 mars 2017, 22-24 novembre 2017) et les trois campagnes réalisées pendant la phase 8 du PIREN-Seine (5-7 octobre 2020, 23-26 mars 2021, 7-10 septembre 2021) sont synthétisées ici. Différentes variables biogéochimiques ont été mesurées au niveau des stations MOLONARI dans les eaux de surface (la Seine et ses affluents) et dans les eaux souterraines (nappe des alluvions et nappe de la craie). La description des campagnes est détaillée dans les précédents rapports PIREN-Seine (Baratelli et al., 2017, 2021).

3.1 Le contexte hydrologique et climatique des campagnes

La chronique de débit à la station de Bazoches-lès-Bray (Figure 2) pour la période 1999-2021 présente une médiane de 76 m³/s, un 90^e percentile de 176 m³/s et un débit moyen de temps sec de période de retour 5 ans (QMNA 5) de 21 m³/s, qui permettent de caractériser les conditions hydrologiques des cinq campagnes de terrain.

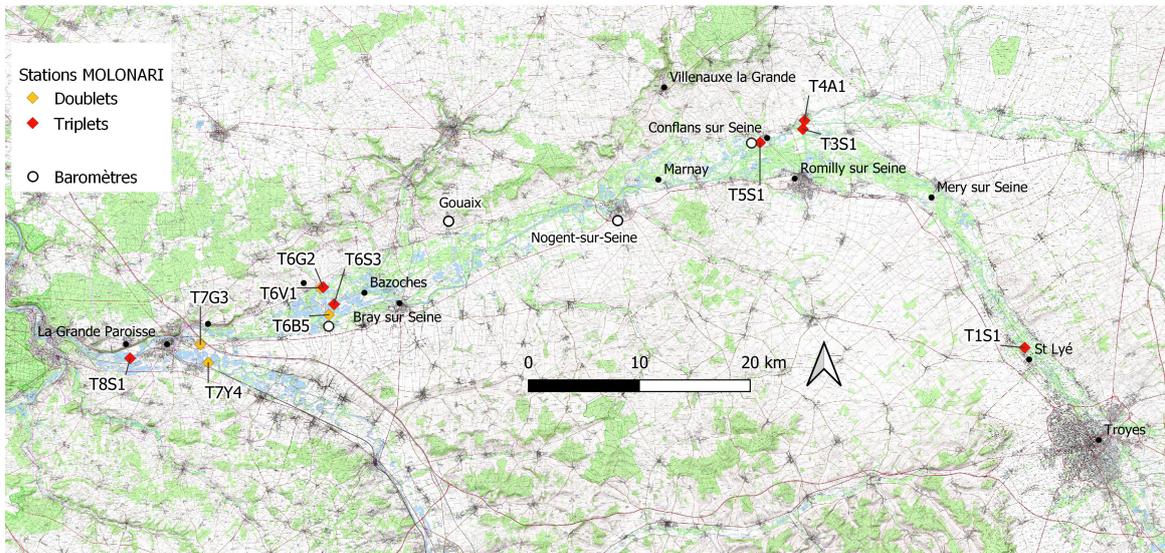


Figure 1. Plaine alluviale de la Bassée et localisation des stations MOLONARI situées le long du corridor fluvial Seine et de ses affluents. La station T4A1 est située sur l'Aube et la station T7Y4 sur l'Yonne.

3.1.1 Les campagnes en conditions de hautes eaux

Les deux campagnes de mars 2017 et 2021 se situent en période de hautes eaux, avec un débit moyen de 157 et 117 m³/s respectivement. La campagne du 15-17 mars 2017 a eu lieu seulement quelques heures avant le passage du pic de crue (18-19 mars 2017). Ce pic de 163 m³/s est proche du 90^e percentile. Cette condition hydrologique rend l'analyse des données particulièrement compliquée du fait de cet état très transitoire (Baratelli et al., 2017). La campagne du 23-26 mars 2021 correspond quant à elle au pic d'une crue mineure (117 m³/s) qui a eu lieu 40 jours environ après la crue plus importante du mois de février (288 m³/s).

En ce qui concerne les précipitations, ces deux campagnes sont caractérisées par des conditions similaires (Figure 3) : des événements pluvieux assez intenses ont eu lieu entre deux semaines et une semaine environ avant la campagne, avec une pluie cumulée de 44 mm en mars 2017 et de 35 mm en mars 2021. Ces périodes pluvieuses sont suivies par des périodes de 4-7 jours globalement secs avant le début des campagnes. Ces dernières se sont déroulées avec des précipitations absentes ou faibles.

Les conditions de température de l'air sont aussi similaires pour ces deux campagnes (Figure 4) : la température moyenne calculée sur les 30 jours précédant chaque campagne est de 7 °C, la température moyenne pendant les campagnes est de 8 °C en 2017 et de 7 °C en 2021.

3.1.2 Les campagnes en conditions de basses eaux

La campagne de novembre 2017 se situe à la fin de la période d'étiage, quand le débit commence déjà à augmenter. Le débit moyen est en effet de 48 m³/s, environ deux fois supérieur au QMNA 5. La campagne d'octobre 2020 est celle caractérisée par le plus faible débit (34 m³/s) parmi les cinq campagnes réalisées. La

Débit à Bazoches-lès-Bray

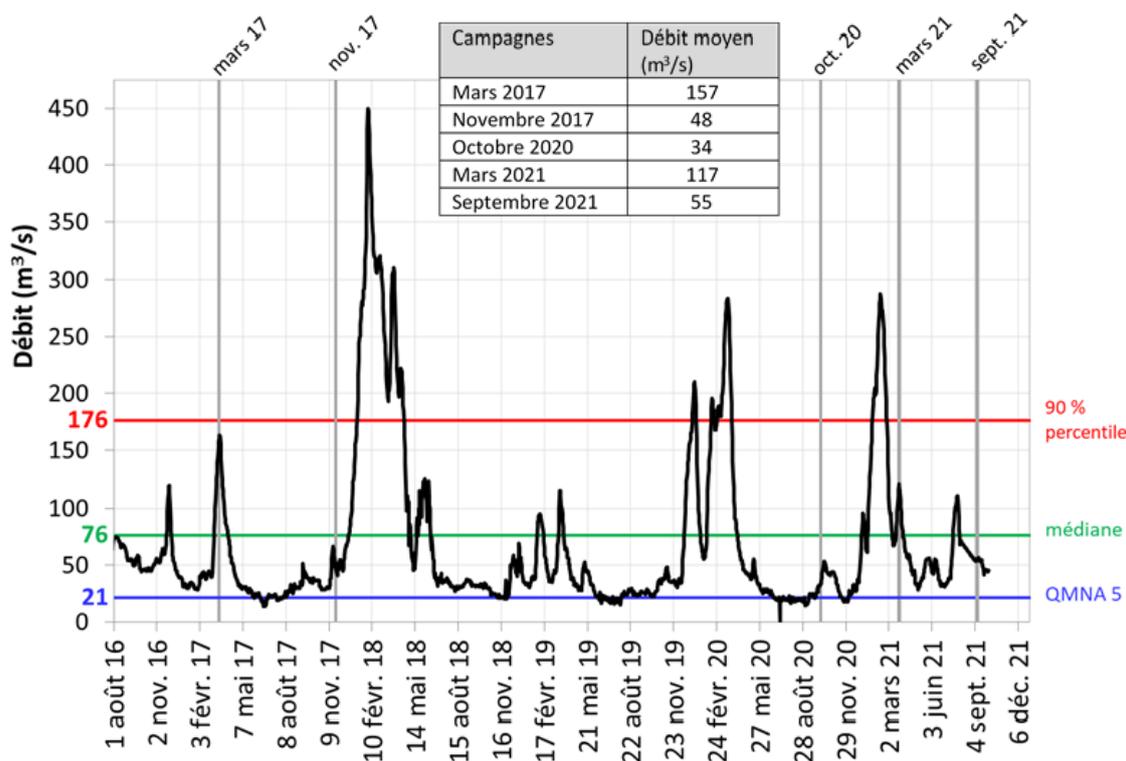


Figure 2. Débit à la station de Bazoches-lès-Bray. La médiane, le 90^e percentile et le QMNA 5 sont calculés sur la période 1999-2021 (données : HydroPortail <https://hydro.eaufrance.fr/>). Les cinq campagnes de terrain réalisées sont indiquées par les lignes grises.

Figure 2 montre cependant que même cette campagne ne se situe pas en plein étiage, mais déjà dans une phase d'augmentation du débit. Cette campagne est aussi caractérisée par des précipitations assez intenses, à la fois pendant la campagne et dans le mois précédent (Figure 3). La campagne de septembre 2021 est caractérisée par un débit particulièrement élevé pour la période (55 m³/s), valeur qui se situe sur la lente décrue d'un événement pluvieux prolongé de fin juillet. Des précipitations orageuses ont eu lieu pendant la campagne, précédée par une période plutôt sèche (Figure 3).

Ces trois campagnes de fin d'été/automne sont assez différentes en matière de température de l'air (Figure 4). La campagne de novembre 2017 s'est déroulée avec une température moyenne de 11 °C et était précédée par une période plus froide (moyenne sur les 30 jours précédents de 7 °C). En octobre 2020, la température moyenne pendant la campagne était de 13 °C mais les 30 jours précédents étaient en moyenne plus chauds (16 °C). Enfin, la campagne de septembre 2021 était caractérisée par des conditions presque estivales, avec une moyenne de 21 °C pendant la campagne et de 19 °C sur le mois précédent.

3.2 Prélèvement et analyse des échantillons d'eau

Lors de chaque campagne, des échantillons d'eau ont été prélevés dans chaque point de mesure et dans chaque compartiment (craie, alluvions, rivière) afin de mesurer différentes variables biogéochimiques.

Les prélèvements des eaux de rivière sont effectués au seau préalablement rincé avec l'eau à échantillonner

Précipitations à Romilly-sur-Seine

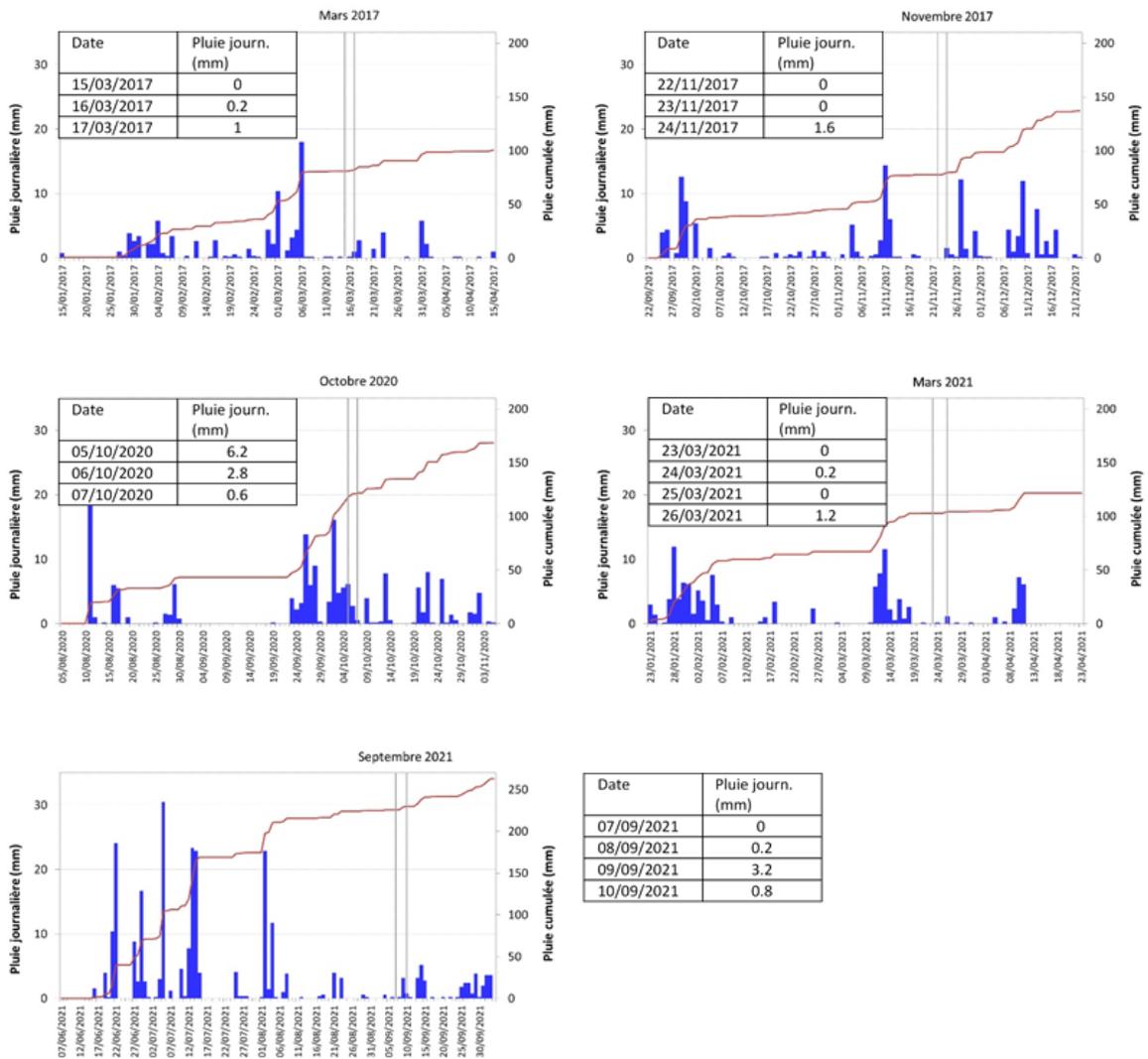


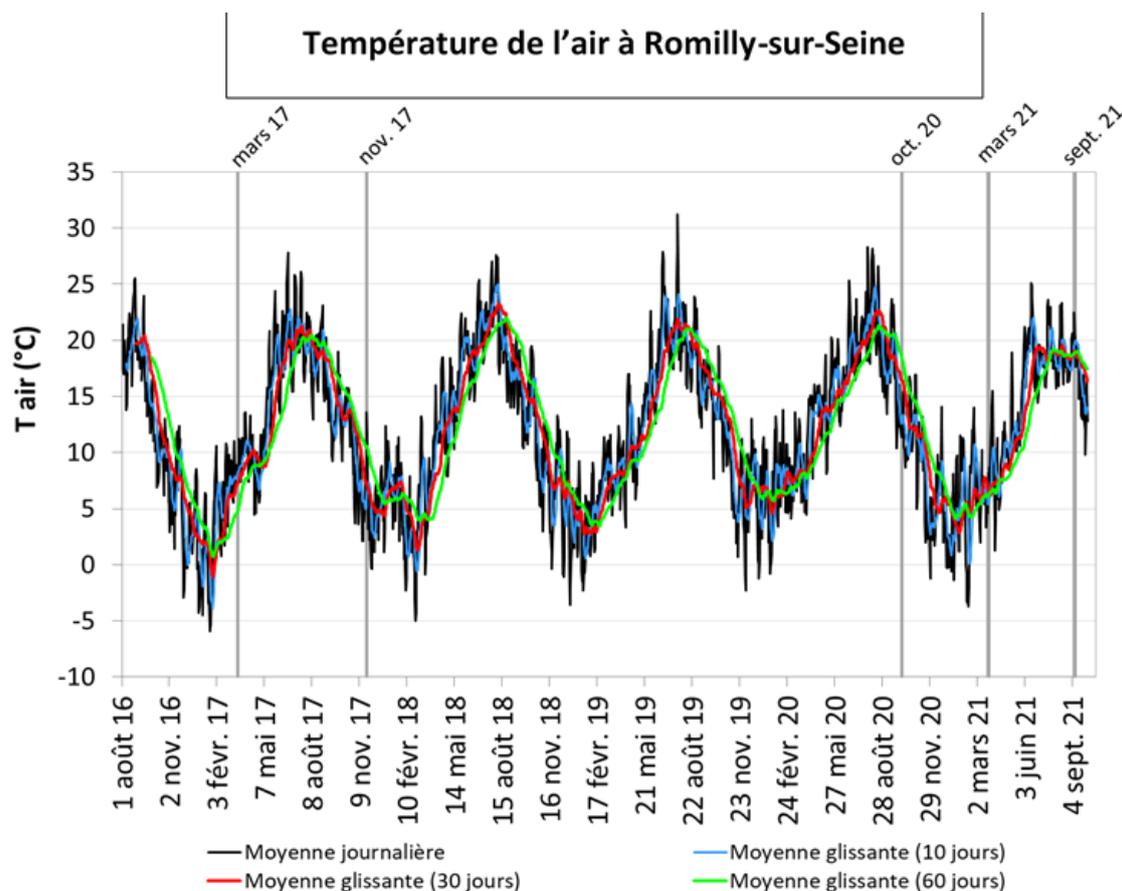
Figure 3. Précipitations à Romilly-sur-Seine (Données : Météo France). La pluie journalière et la pluie cumulée sont montrées deux mois avant et un mois après chaque campagne de terrain.

pour éviter toute pollution extérieure. Les prélèvements des eaux souterraines ont été effectués avec une canne à prélèvement d'un volume d'un litre. Après avoir mesuré la profondeur de la nappe dans le piézomètre, ce dernier est purgé d'environ 20 fois le volume d'eau que l'on rejette (30 fois pour les piézomètres crépinés dans la craie). Une fois l'eau remontée dans le piézomètre après l'opération de purge, elle est échantillonnée. Les échantillons d'eau de rivière et d'eau souterraine sont ensuite versés doucement dans divers types de flaconnage préalablement rincés avec l'eau du point, et conservés entre 4 °C et 10 °C jusqu'au traitement.

3.2.1 Variables biogéochimiques mesurées pendant les campagnes de terrain

Pour chaque point échantillonné, différentes variables biogéochimiques ont été mesurées, soit directement sur le terrain, soit au laboratoire après la campagne.

Les variables suivantes ont été mesurées lors de toutes les campagnes : température, pH, concentration en oxygène dissous, conductivité électrique, concentration en ions majeurs et en nutriments, alcalinité, rapports



Campagnes	Moyenne pendant la campagne (°C)	Moyenne 10 jours précédents la campagne (°C)	Moyenne 30 jours précédents la campagne (°C)	Moyenne 60 jours précédents la campagne (°C)
Mars 2017	8	8	7	5
Novembre 2017	11	6	7	11
Octobre 2020	13	13	16	18
Mars 2021	7	6	7	6
Septembre 2021	21	20	19	19

Figure 4. Température de l'air à Romilly-sur-Seine (données : Météo France). La moyenne journalière (noir) est comparée avec les moyennes glissantes sur 10 jours (bleu), 30 jours (rouge) et 60 jours (vert). A chaque date, la moyenne glissante est calculée sur la période de 10 jours (respectivement 30 et 60) qui précède cette date.

isotopiques de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), caractérisation de la matière organique dissoute (MOD) du point de vue quantitatif (mesure de la concentration en carbone organique dissous, COD) et qualitatif (propriétés optiques de la MOD).

A partir de novembre 2017, le rapport isotopique du carbone inorganique dissous ($\delta^{13}\text{C}$) a également été analysé. Par ailleurs, de nouvelles analyses ont été introduites dans les campagnes de la phase 8 : l'analyse de la biodégradabilité de la matière organique dissoute et particulaire, avec sa caractérisation quantitative et qualitative (cf. Garnier et al., 2021), et le suivi des gaz à effet de serre (GES : N_2O , CH_4 , CO_2).

Les méthodes de mesure sont décrites dans les paragraphes suivants seulement pour les variables qui seront analysées dans ce chapitre. Pour les autres variables, les méthodes sont présentées dans Baratelli et al. (2021).

Paramètres physico-chimiques Les mesures de conductivité, pH, oxygène dissous et température ont été réalisées avec des sondes (WTW) directement dans le piézomètre, après l'opération de purge, ou dans le seau (pour les eaux de surface).

L'analyse de l'alcalinité totale (TA) (mmol L^{-1}) est réalisée sur 20 mL d'eau filtrée (GF/F : $0,7 \mu\text{m}$) à l'aide d'un titrateur automatique (Titrand 905) utilisant du HCl (acide chlorhydrique, 0,01 M). Les ions majeurs sont analysés sur ce même filtrat en chromatographie ionique (Metrohm). Ces analyses ont été réalisées au laboratoire METIS.

Les isotopes stables de l'eau Les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ permettent d'identifier des mélanges de masses d'eau, ainsi que la présence d'évaporation. Les échantillons d'eau brute, non filtrés, ont été prélevés dans des flacons en PEHD de 50 mL. Les analyses ont été réalisées par spectrométrie de masse IRMS (Isoprime 100 avec le système d'introduction Aquaprep) à Mines Paris pour les campagnes de 2017, puis au GEOTOP-UQAM (Canada) pour les campagnes ultérieures. Les compositions sont exprimées en notation delta, en pour mille (‰) par rapport au standard international V-SMOW, avec une précision de 0,1 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de 1 ‰ pour $\delta^2\text{H}$.

Concentration en carbone organique dissous Les mesures des concentrations en COD ont été réalisées au LEESU de l'Université Paris-Est Créteil pour les campagnes de la phase 7 (Baratelli et al., 2017) et au laboratoire METIS de Sorbonne Université pour les échantillons de la phase 8. Le protocole d'analyse suivi au LEESU est décrit dans (Baratelli et al., 2017). Le protocole suivi à METIS est détaillé dans le paragraphe suivant.

Les échantillons d'eau ont été filtrés, immédiatement après le prélèvement, à travers des filtres en fibre de verre (Whatman, GF/F, $0,7 \mu\text{m}$, 25 mm de diamètre) préalablement calcinés à $450 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 5h. Chaque filtrat (30 mL) est versé dans un tube en verre (également calciné), fermé à l'aide d'un bouchon et d'un septum, auquel on a ajouté $100 \mu\text{L}$ d' H_2SO_4 à 3 M pour stopper toute réaction avant l'analyse. Le tube est conservé au réfrigérateur ($4 \text{ }^\circ\text{C}$) et à l'abri de la lumière dès le prélèvement jusqu'à l'analyse du COD. Cette dernière a été réalisée par spectroscopie IR, en utilisant un analyseur Aurore 1030 avec attaque acide par l'acide phosphorique, oxydation de la MO par le peroxydisulfate de sodium, et analyse du CO_2 produit par spectrométrie infrarouge.

Propriétés optiques de la matière organique dissoute La teneur en COD ne permet pas à elle seule de rendre compte du type de MOD présente, de son rôle environnemental et des multiples transformations qu'elle peut subir dans les milieux aquatiques. La caractérisation globale de la MOD a donc été réalisée par spectroscopie optique, absorbance UV-Visible et fluorescence 3D, techniques rapides, semi-quantitatives et non invasives largement utilisées depuis des décennies (Parlanti et al., 2000; Huguet et al., 2009; Jaffé et al., 2014; Minor et al., 2014; Derrien et al., 2019; Catalán et al., 2021). L'investigation des sources et stades d'évolution/dégradation de la MOD a ainsi été réalisée par l'étude de ses propriétés optiques à EPOC (Université de Bordeaux).

Absorbance UV-visible de la MOD

La spectroscopie d'absorption UV-visible a été utilisée pour la détermination rapide des propriétés générales de la MOD. Les spectres d'absorbance ont été enregistrés (entre les longueurs d'onde 200 et 800 nm) à l'aide des spectrophotomètres Jasco V-560 ou Aqualog (HORIBA Jobin-Yvon). Plusieurs indices peuvent être utilisés pour obtenir des informations sur les propriétés de la MOD à partir des spectres d'absorbance (Parlanti et al., 2019). Deux indices ont été analysés : le rapport des pentes spectrales (S_R) et le SUVA (*Specific UV-Absorbance*). S_R est calculé comme le rapport de la pente du spectre d'absorbance pour les courtes longueurs d'onde (S275-295 nm) sur la pente spectrale de plus grandes longueurs d'onde (S350-400 nm). Le rapport S_R est négativement corrélé avec la taille de la MOD : quand S_R augmente, le poids moléculaire diminue (Helms et al., 2008). L'indice SUVA est calculé comme l'absorbance à 254 nm normalisée par la concentration en COD. Le SUVA est corrélé avec le pourcentage d'aromaticité de la MOD en milieu aquatique. Quand sa valeur

est haute (> 4), la MOD est dite hydrophobe avec un caractère aromatique fort alors que quand elle est faible (< 3), la MOD est dite hydrophile.

Fluorescence 3D de la MOD

Les propriétés de fluorescence de la MOD permettent d'obtenir des informations sur sa structure et ses propriétés générales. La fluorescence est une technique très sensible qui permet de caractériser la MOD à partir d'un échantillon aqueux de faible volume sans nécessiter de concentration ou d'extraction. La fluorescence tridimensionnelle (ou matrices d'excitation-émission (EEM) de fluorescence) est généralement utilisée pour caractériser la MOD et étudier sa dynamique dans les environnements aquatiques (Carstea et al., 2010; Ejarque et al., 2017; Huguet et al., 2009; Jaffé et al., 2004; Tzortziou et al., 2015). Les spectres EEM mettent en évidence les différents fluorophores constituant la MOD et donnent des informations sur sa source, sa composition chimique, son état de dégradation et sa réactivité (Ejarque et al., 2017; Fellman et al., 2010; McKnight et al., 2001; Parlanti et al., 2000).

Les spectres ont été enregistrés à l'aide des spectrofluorimètres Fluorolog FL3-22 ou Aqualog de Horiba Jobin-Yvon. Les données semi-quantitatives et qualitatives à prendre en compte sont l'intensité (proportionnelle à la concentration des fluorophores) et la position des maxima de fluorescence qui varient en fonction de la nature et de l'origine des échantillons et dépendent des espèces moléculaires fluorescentes qu'ils contiennent (type de bande = type de matériel organique fluorescent). Des indices de fluorescence (HIX, BIX et FI) sont déterminés afin de caractériser les sources et le degré de maturation de la MOD fluorescente (Parlanti et al., 2019).

L'indice d'humification HIX (Zsolnay et al., 1999) permet d'estimer le degré d'aromaticité et d'humification de la MOD. De fortes valeurs de HIX ($HIX > 12$) indiquent la présence d'un matériel organique dégradé, alors que des valeurs faibles ($HIX < 4$) indiquent une MOD plus récente et moins aromatique (Huguet et al., 2009). Les valeurs de HIX diminuent pour les composés présentant un degré d'aromaticité et un caractère hydrophobe moins prononcés, ainsi que des masses moléculaires plus faibles. L'indice d'activité biologique (BIX) permet d'estimer la présence de matière organique fraîchement produite dans le milieu (Vacher, 2004; Huguet et al., 2009) : des valeurs élevées ($BIX > 0,8$) indiquent une activité biologique forte et donc une origine biologique ou bactérienne aquatique de la MOD. L'indice FI (McKnight et al., 2001) permet de distinguer la MOD terrestre ($FI < 1,3$) de la MOD aquatique/microbienne ($FI > 1,9$).

4 Résultats et discussion

4.1 Classification des campagnes

L'analyse préliminaire des résultats effectuée par Baratelli et al. (2021) a montré que le critère hydrologique, basé sur le débit en rivière, n'est pas suffisant pour classer les campagnes et interpréter leurs résultats. Un deuxième critère, basé sur la température de l'air, a donc été proposé pour représenter le potentiel d'activité biologique du système caractéristique de chaque campagne. Pour ce deuxième critère, la température moyenne de l'eau le mois précédant la campagne ainsi que la température au moment de la campagne sont considérées.

Au regard de cette nouvelle grille d'analyse, il apparaît que les campagnes peuvent être regroupées en trois classes (Tableau 1) :

- HE_froid : campagnes réalisées en conditions de hautes eaux et de faible potentiel d'activité biologique, associé à une température de l'air froide (mars 2017 et mars 2021) ;
- BE_chaud : campagnes réalisées en conditions de basses eaux et d'activité biologique potentielle élevée, associée à des températures de l'air chaudes (octobre 2020 et septembre 2021) ;
- MIX_BE_froid : campagnes réalisées en conditions « mixtes » de basses eaux et activité biologique potentielle faible, associée à une température de l'air froide (campagne de novembre 2017).

Les deux étiages de novembre 2017 et octobre 2020 interviennent dans un contexte d'activité biologique significativement différent l'un de l'autre. En effet, on peut considérer qu'en novembre 2017, du fait de basses températures, le peu qui reste de la matière organique biodégradable n'est plus que lentement dégradé avant et pendant la campagne. En octobre 2020, on peut considérer que le stock de matière organique se dégrade encore significativement avec des températures plutôt douces préalablement à la campagne (16 °C), d'autant que dans ces conditions, le stock peut être partiellement renouvelé.

	Débit	Température air	Activité biologique potentielle	Catégorie de campagne
Mars 2017	Crue	Froide, après période froide	Faible (Tglissante = 7°C)	HE_froid
Novembre 2017	Etiage tardif	Moyenne après période froide	Faible (Tglissante = 7°C)	MIX_BE_froid
Octobre 2020	Etiage tardif	Moyenne après période plus chaude	Assez importante (Tglissante = 16°C mais Tcampagne = 13°C seulement)	BE_chaud
Mars 2021	Petite crue	Froide après période froide	Faible (Tglissante = 7°C)	HE_froid
Septembre 2021	Etiage tardif, décroue	Chaude	Conséquent (Tglissante = 19°C et Tcampagne = 21°C)	BE_chaud

Tableau 1. Classification des campagnes suivant deux critères, hydrologique et de potentiel d'activité biologique du système.

4.2 Comparaison des résultats pour chaque classe de campagnes

4.2.1 Température de l'eau

Lors des deux campagnes réalisées en hautes eaux (mars 2017 et 2021), la température dans la nappe de la craie est entre 1 et 2 °C plus élevée que celle de la nappe des alluvions. Ce schéma est inversé pour les trois campagnes réalisées en basses eaux (novembre 2017, octobre 2020 et septembre 2021), au cours desquelles la nappe des alluvions est entre 1 et 2 °C plus chaude que celle de la craie (Figure 5).

Ces configurations sont typiques, respectivement, des périodes de printemps et d'automne, comme le montrent les chroniques mesurées par les capteurs depuis 2015 (Figure 6). Le déphasage et l'amplitude thermiques observés entre les compartiments (rivière, alluvions et craie) sont notamment liés aux propriétés thermiques de chaque compartiment.

Les conditions thermiques de la rivière sont principalement influencées par la température de l'air. Avant les deux périodes de hautes eaux, les températures de l'air sont similaires. Cependant, lors de la campagne de mars 2017, la température de la Seine se situe entre celles des nappes des alluvions et de la craie, tandis qu'en mars 2021, la Seine est plus froide que la nappe des alluvions. Cette disparité peut s'expliquer par les différentes conditions hydrologiques. En effet, la campagne de mars 2017 a coïncidé avec une période de crue, provoquant probablement le refroidissement de la nappe des alluvions par les infiltrations de la rivière pendant la montée des eaux, comme le suggère l'analyse d'autres variables biogéochimiques (Baratelli et al., 2017). Ces infiltrations ne semblent pas se produire aux sites en aval (T6S3 et T8S1). En revanche, la crue lors de la campagne de mars 2021 est moins importante que celle de 2017 et n'a probablement pas été assez intense pour déclencher l'infiltration de la rivière dans les alluvions, à l'exception du site T5S1.

La température de la Seine présente une grande variabilité lors des trois campagnes d'étiage, contrairement aux températures des eaux souterraines (Figure 5). Cette fluctuation de la température de la rivière est probablement

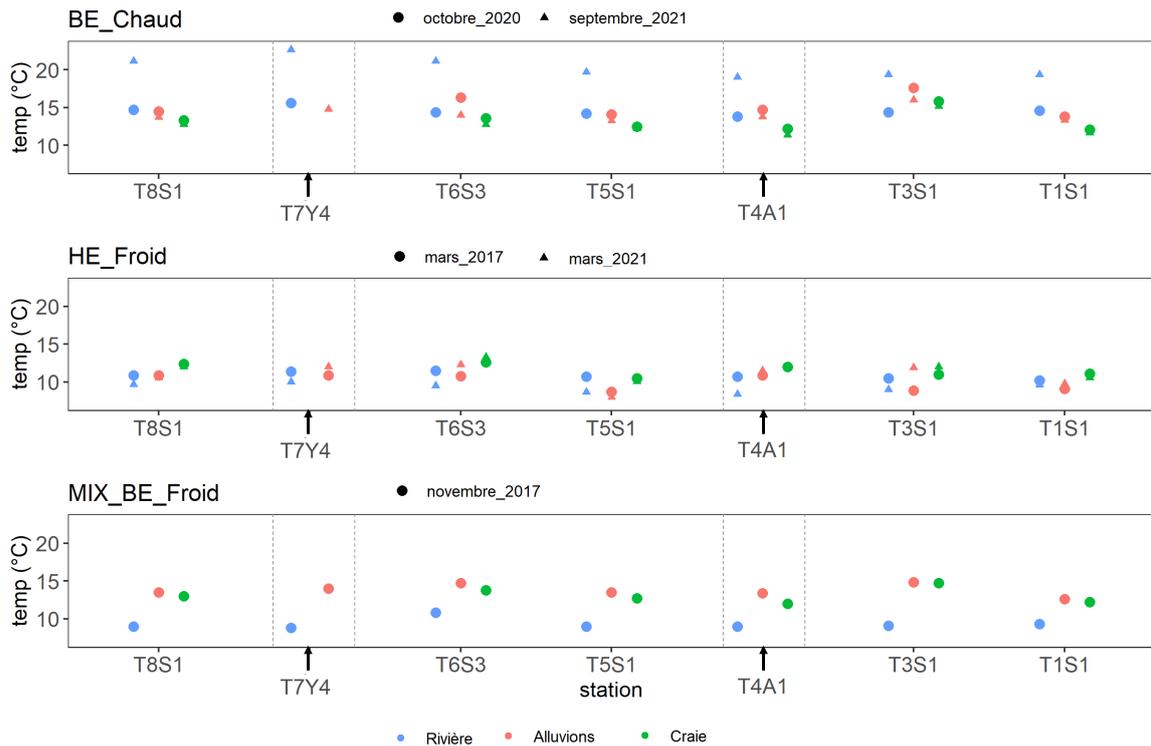


Figure 5. Température de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

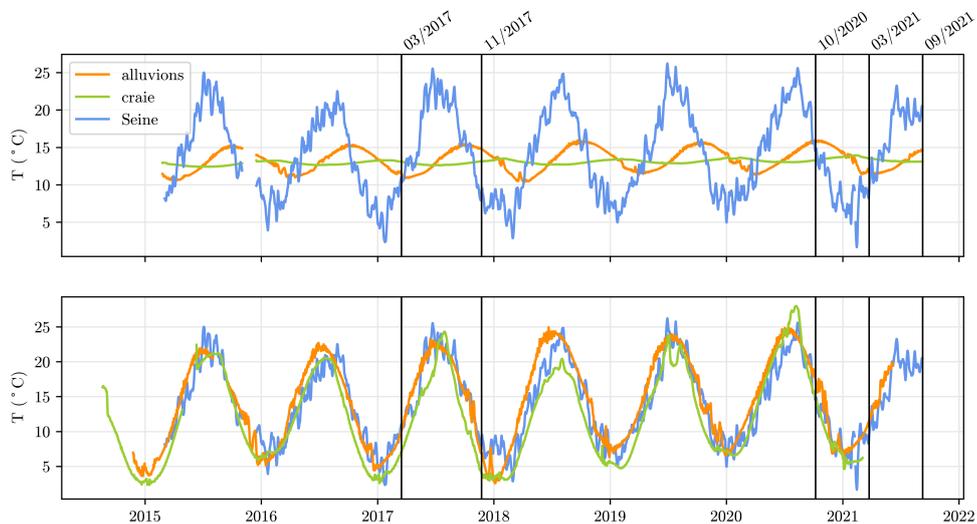


Figure 6. a) Température journalière mesurée dans la Seine (bleu) et dans les nappes des alluvions (orange) et de la craie (vert) à la station T6S3 à partir de l'installation du système de mesure en 2015. Le déphasage est de 3 mois entre la Seine et la nappe des alluvions avec une amplitude thermique divisée par 4 et de 6 mois entre Seine et nappe de la craie, avec une amplitude divisée par 25. b) Les chroniques de température des nappes des alluvions et de la craie sont respectivement avancées de 92 et 188 jours et amplifiées 4 et 25 fois pour illustrer ce déphasage.

associée à la période de réalisation de chaque campagne (fin novembre 2017, début octobre 2020, début septembre 2021) et à la variabilité correspondante de la température de l'air (Figure 4).

Il est intéressant de noter que la température des eaux souterraines diminue systématiquement après la confluence avec l'Aube lors de chaque campagne, indépendamment des conditions hydrologiques et climatiques.

4.2.2 Isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$

La valeur moyenne de $\delta^{18}\text{O}$ mesurée dans la rivière présente des variations saisonnières (Figure 7), avec des valeurs plus négatives en hiver (campagnes de mars 2017 et 2021) et des valeurs moins négatives pendant les saisons estivales/automnales (campagnes de novembre 2017, octobre 2020 et septembre 2021). Ces variations sont attribuables à l'influence des précipitations, qui se caractérisent par un $\delta^{18}\text{O}$ plus bas en fin d'hiver par rapport à celui mesuré en été.

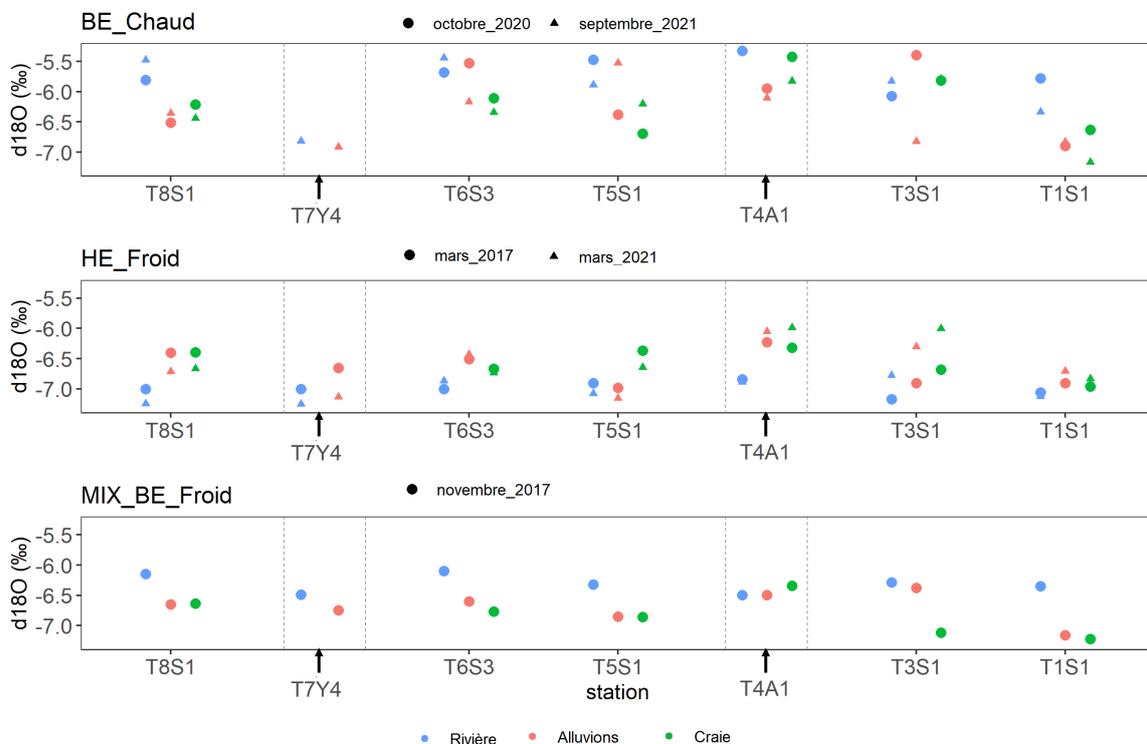


Figure 7. Rapport isotopique de l'oxygène de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux souterraines montrent une certaine variation saisonnière, avec des niveaux légèrement plus élevés observés lors des campagnes d'octobre 2020 et de septembre 2021 (Figure 7). La campagne de 2020 a eu lieu à la fin de l'été, pendant une période très pluvieuse (Figure 3), et est donc probablement caractérisée par l'infiltration d'eau de pluie enrichie en isotopes légers.

L'analyse des résultats révèle la présence d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Par exemple, en mars 2017, sur les sites T1S1 et T5S1, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans les alluvions sont proches de celles de la rivière, suggérant une possible infiltration de la rivière dans les alluvions. En novembre 2017, des échanges d'eau entre les nappes des alluvions et de la craie semblent également se produire sur les sites T1S1, T5S1 et T8S1, où les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des deux compartiments souterrains sont en équilibre, compte tenu de l'erreur de mesure.

D'amont en aval, les rapports isotopiques de $\delta^{18}\text{O}$ ne suivent pas les mêmes tendances entre les différentes campagnes. Il n'est ainsi pas possible d'observer une tendance générale amont-aval le long de la plaine alluviale.

4.2.3 Oxygène dissous

La teneur en oxygène dissous dans les eaux de surface, exprimée en pourcentage de saturation, demeure généralement constante entre les différentes campagnes. Les variations longitudinales de l'amont à l'aval de la Seine sont très limitées, oscillant entre 85 % et 110 % (Figure 8). Dans la nappe de la craie, la concentration en oxygène dissous demeure également relativement stable d'une campagne à l'autre. Les valeurs de pourcentage de saturation sont particulièrement élevées en aval (T8S1) et encore plus en amont (T1S1) de la plaine alluviale, où les valeurs sont proches de celles mesurées dans la Seine. En revanche, la nappe de la craie est presque anoxique dans tous les sites situés au sein de la plaine alluviale (T6S3, T5S1, T6S3). Tout comme pour les alluvions, les profils d'oxygène dissous varient en fonction des conditions hydrologiques des différentes campagnes. Les alluvions sont plus oxygénées lors des campagnes de hautes eaux (mars 2017 et 2021), lorsque l'infiltration de la rivière apporte de l'oxygène aux alluvions sur certains sites, notamment en T5S1 et, en mars 2017, également en T6S3. Globalement, la nappe des alluvions présente une oxygénation plus faible lors des campagnes de basses eaux, à l'exception du site en amont de la plaine alluviale (T1S1), mais demeure plus oxygénée que la nappe de la craie.

Les concentrations élevées en oxygène mesurées dans les nappes des alluvions et de la craie en amont et en aval de La Bassée devraient favoriser l'activité bactérienne hétérotrophe aérobie, pour autant que de la matière organique biodégradable soit présente.

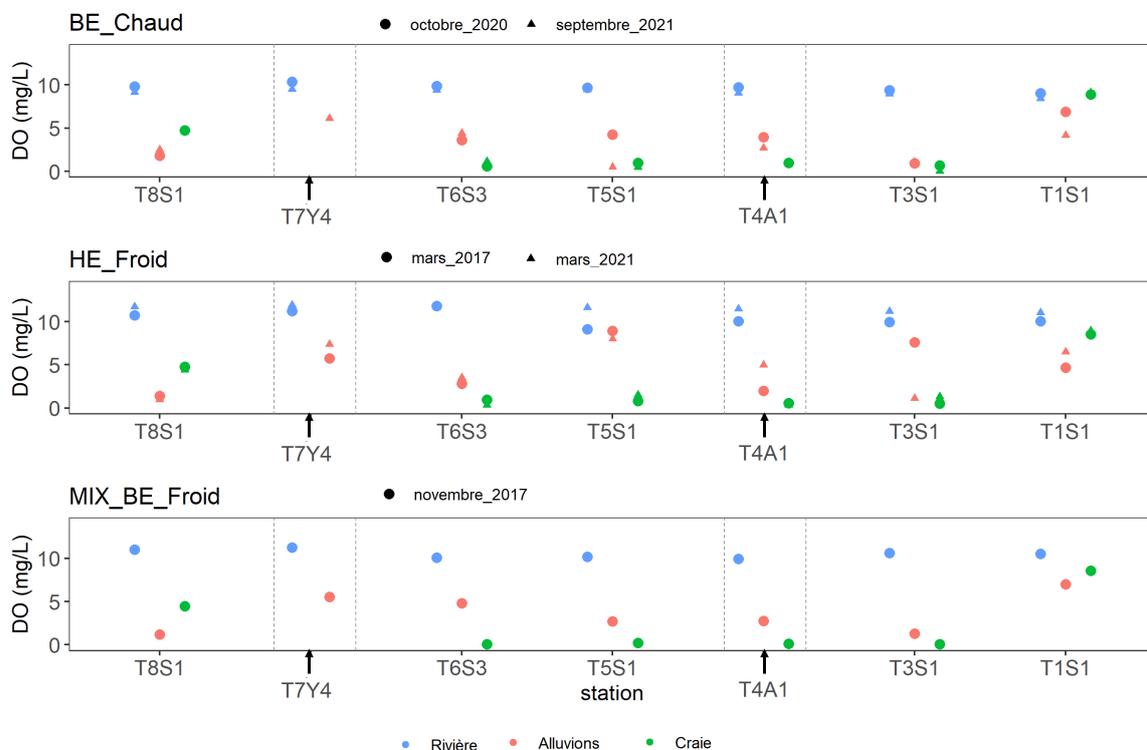


Figure 8. Concentration en oxygène dissous de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

4.2.4 Nitrate et dénitrification

Les concentrations en nitrate dans les eaux de surface présentent une certaine variabilité saisonnière, avec des valeurs plus élevées pendant les campagnes de printemps (entre 5 et 6 mg N-NO₃ L⁻¹) par rapport aux campagnes d'automne (entre 2 et 4 mg N-NO₃ L⁻¹) (Figure 9). Cette diminution est certainement le résultat de la diminution de la reprise de l'azote des sols par ruissellement de subsurface combinée à une potentielle dénitrification benthique dont l'intensité dépend de la température des eaux. Ces observations concordent avec les chroniques de nitrate observées et modélisées en rivière, notamment à une station sur un affluent de l'Yonne, l'Armançon, où les concentrations en nitrate sont plus élevées en hiver (Passy et al., 2018).

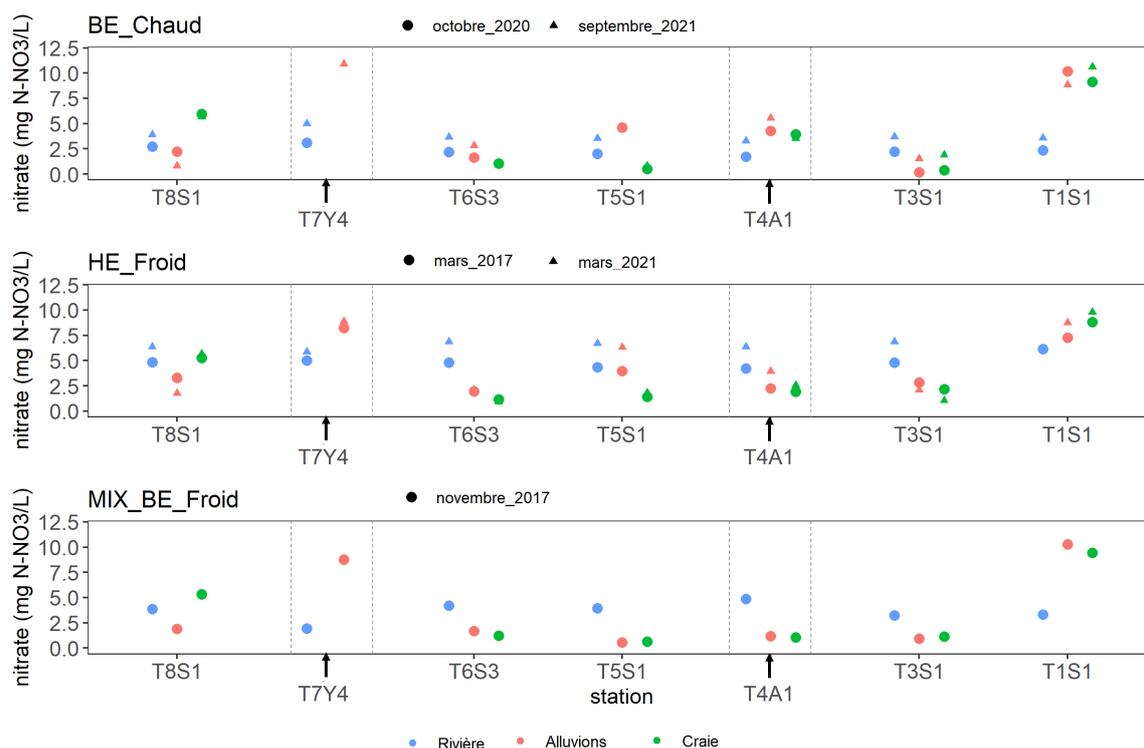


Figure 9. Concentration en nitrate de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

Les concentrations en nitrate des eaux souterraines présentent des profils amont-aval très similaires à ceux de l'oxygène dissous (Figure 8). La nappe de la craie se caractérise par des teneurs élevées en nitrate en amont (T1S1) et en aval (T8S1) de la plaine alluviale, tandis que les valeurs sont plus faibles aux points situés au sein de la plaine (T6S3, T5S1, T6S3). Cette configuration est observable lors de toutes les campagnes réalisées. Les alluvions montrent également des concentrations élevées en nitrate au niveau du site amont (T1S1), indépendamment des conditions hydrologiques. L'influence de l'agriculture est très probablement la cause des concentrations élevées en nitrate dans les eaux souterraines en amont (T1S1) et en aval (T8S1) de La Bassée. Les valeurs mesurées dans l'aquifère de la craie (9-10 mg N-NO₃ L⁻¹ en T1S1 et 6 mg N-NO₃ L⁻¹ en T8S1) concordent avec les résultats de la modélisation effectuée par STICS-MODCOU (Gallois and Viennot, 2018).

Les concentrations en nitrate relativement faibles mesurées dans les eaux souterraines aux points T6S3, T5S1 et T6S3 (entre les confluences Seine-Aube et Seine-Yonne) suggèrent que le système aquifère de la plaine alluviale est le siège d'une activité de dénitrification, en accord avec les conclusions de Passy et al. (2018). Cette dénitrification est cohérente avec les faibles teneurs en oxygène dissous mesurées dans cette zone (Figure 8).

Au site T5S1, pendant les deux campagnes de hautes eaux (mars 2017 et 2021), les concentrations en nitrate de la nappe alluviale sont similaires à celles de la rivière, probablement en raison des infiltrations de la rivière déjà identifiées par l'analyse d'autres variables telles que la température et le $\delta^{18}\text{O}$.

Pendant les campagnes de basses eaux (octobre 2020 et septembre 2021), la concentration en nitrate dans la nappe des alluvions est encore plus élevée que dans la rivière. Après une période de températures élevées favorisant la dégradation de la matière organique (production d'ammonium) et des conditions d'oxygène permettant la nitrification (production de nitrate), les précipitations (Figure 3) pourraient être responsables de la lixiviation du nitrate dans les alluvions. Une autre explication possible est l'influence du bassin de l'Aube : en effet, le site T5S1 se trouve juste en aval de la confluence avec l'Aube, dont les eaux souterraines sont particulièrement riches en nitrates lors de ces campagnes.

4.2.5 Carbone organique dissous

La concentration en COD dans la rivière reste relativement constante de l'amont vers l'aval et d'une campagne à l'autre, à l'exception d'octobre 2020, avec des valeurs autour de 2-2,5 mgC/L. Ces valeurs sont généralement plus élevées que celles observées dans les eaux souterraines (Figure 10). Cette disparité s'explique selon les saisons par les apports de matière organique à la rivière via le ruissellement et/ou la lixiviation, ainsi que par la production primaire autochtone.

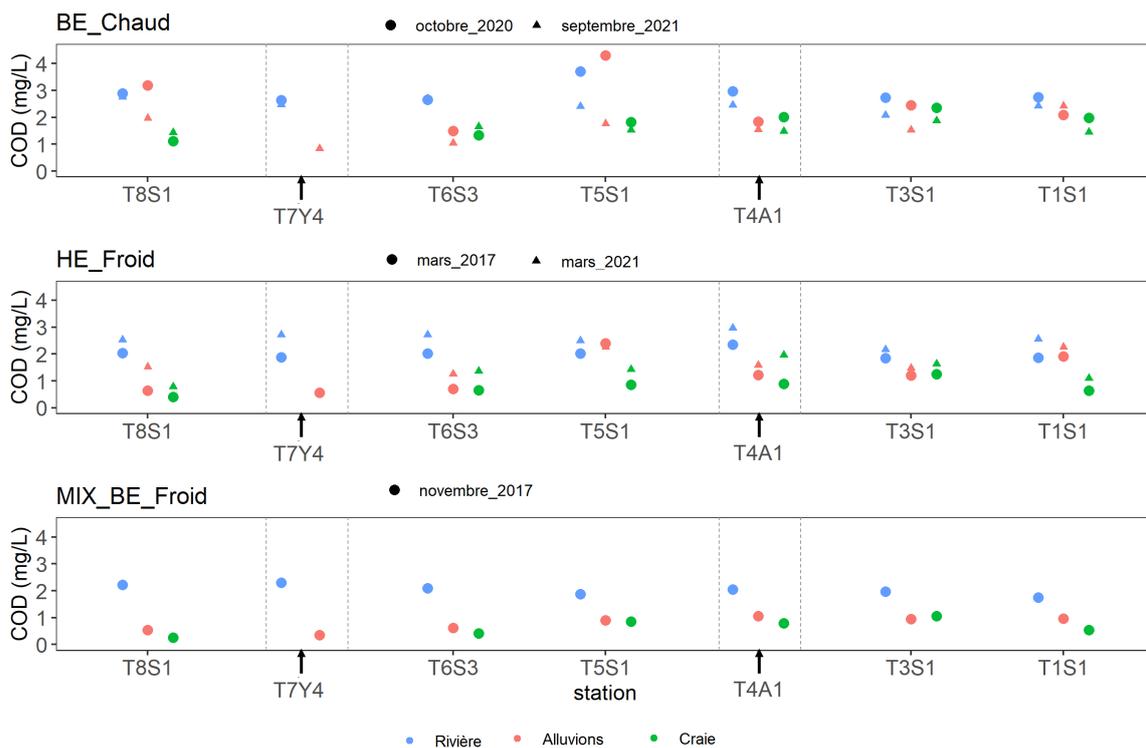


Figure 10. Concentration en carbone organique dissous de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

La concentration en COD présente des profils longitudinaux similaires lors des deux campagnes de hautes eaux. Des apports de matière organique aux alluvions semblent se produire en T5S1, grâce aux infiltrations de la rivière déjà identifiées par l'analyse d'autres variables, ainsi que par la dégradation de la MO dans les sols.

En revanche, les trois campagnes de basses eaux affichent des résultats significativement différents, en dépit de conditions hydrologiques similaires (fin de la période d'étiage, Figure 2). Les concentrations en COD sont

ainsi nettement plus élevées en octobre 2020 qu'en novembre 2017 et en septembre 2021, aussi bien dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines (Figure 10). Des valeurs particulièrement élevées sont mesurées dans les alluvions aux sites T5S1 et T8S1 (4,3 mgC/L et 3,2 mgC/L, respectivement). Cette disparité entre les trois campagnes est probablement attribuable aux conditions météorologiques différentes, notamment les précipitations et la température de l'air. En effet, la campagne d'octobre 2020 est marquée par une pluviométrie notable, à la fois pendant la campagne et le mois précédent (Figure 3), induisant des apports accrus de matière organique dans la rivière et à travers le sol. Bien que la température moyenne de l'air soit similaire lors des campagnes de 2017 et 2020 (11 °C et 13 °C, respectivement), la campagne de novembre 2017 est précédée d'un mois beaucoup plus froid que celle d'octobre 2020 (7 °C et 16 °C, respectivement, voir Figure 4). Les températures douces avant la campagne d'octobre 2020 peuvent avoir favorisé la dégradation de la matière organique dans les alluvions, expliquant ainsi les concentrations élevées en COD.

4.2.6 Qualité de la matière organique

L'indice d'humification HIX (Figure 11) est un paramètre caractérisé par des valeurs élevées (>15) lorsque la matière organique est plutôt humifiée/aromatique.

En période de crue, la matière organique présente dans la rivière est généralement plus mature/aromatique que celle présente en profondeur (Figure 11). Cela est probablement dû au ruissellement de surface pendant la montée de la crue, qui apporte à la rivière une quantité significative de matière organique provenant du sol.

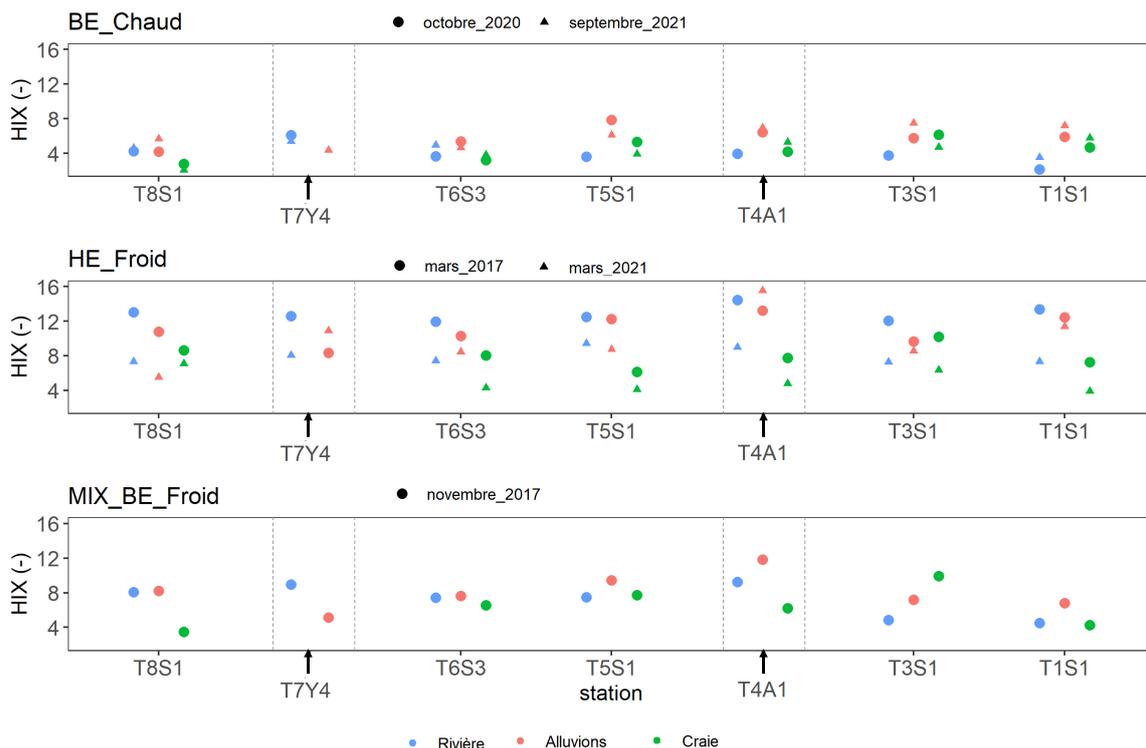


Figure 11. Indice d'humification (HIX) de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

Les valeurs de HIX dans la craie sont systématiquement inférieures à celles de la rivière aux mois de mars 2017 et 2021, suggérant une source différente de matière organique par rapport à celle présente dans la rivière lors de la crue. L'augmentation du HIX d'amont en aval entre T1S1 et T3S1 semble indiquer une transformation de la matière organique vers une forme plus aromatique et hydrophobe suivant l'écoulement de l'eau, suggérant

une transformation lente de la MO au sein de l'aquifère de la craie. Les valeurs de cet indice diminuent ensuite significativement après la confluence avec l'Aube, entre T6S3 et T5S1, indépendamment des conditions hydrologiques.

Le HIX mesuré dans la nappe des alluvions se situe à un niveau intermédiaire, ce qui est cohérent avec le mélange identifié entre les eaux de l'aquifère de la craie et les eaux de surface de la Seine, présentant un caractère terrigène plus prononcé.

Les valeurs élevées observées à T1S1 pourraient indiquer des infiltrations directes résultant du lessivage des sols et/ou une connexion avec la rivière. Pour T5S1, notamment en mars 2017, la matière organique dans les alluvions présente un caractère plus réfractaire en raison de la connexion avec la Seine, comme déjà mentionné. Entre T5S1 et T6S3, le HIX diminue dans les alluvions, indiquant une matière organique moins aromatique, ce qui pourrait être attribué aux apports de la craie et/ou à de faibles apports de la Seine aux alluvions.

Pendant la période d'étiage, les valeurs de HIX sont généralement plus faibles dans l'eau de la Seine (<8), notamment en octobre 2020, indiquant une composante autochtone de la MOD plus importante et des apports terrigènes moins marqués par rapport à la période de hautes eaux. En novembre 2017, nous observons une augmentation significative du HIX d'amont en aval entre T1S1 et T3S1 dans la nappe de la craie, surpassant même la valeur observée en période de crue, confirmant ainsi une transformation lente de la MOD au sein de l'aquifère de la craie suivant l'écoulement de l'eau. La diminution de HIX observée ensuite de T3S1 à T8S1, à l'exception de la confluence de l'Aube, semble indiquer une utilisation/transformation de la MOD. La diminution de HIX dans la nappe des alluvions entre T5S1 et T6S3 traduirait également une décomposition/consommation de la MOD dans les alluvions et/ou une connexion entre la craie et les alluvions.

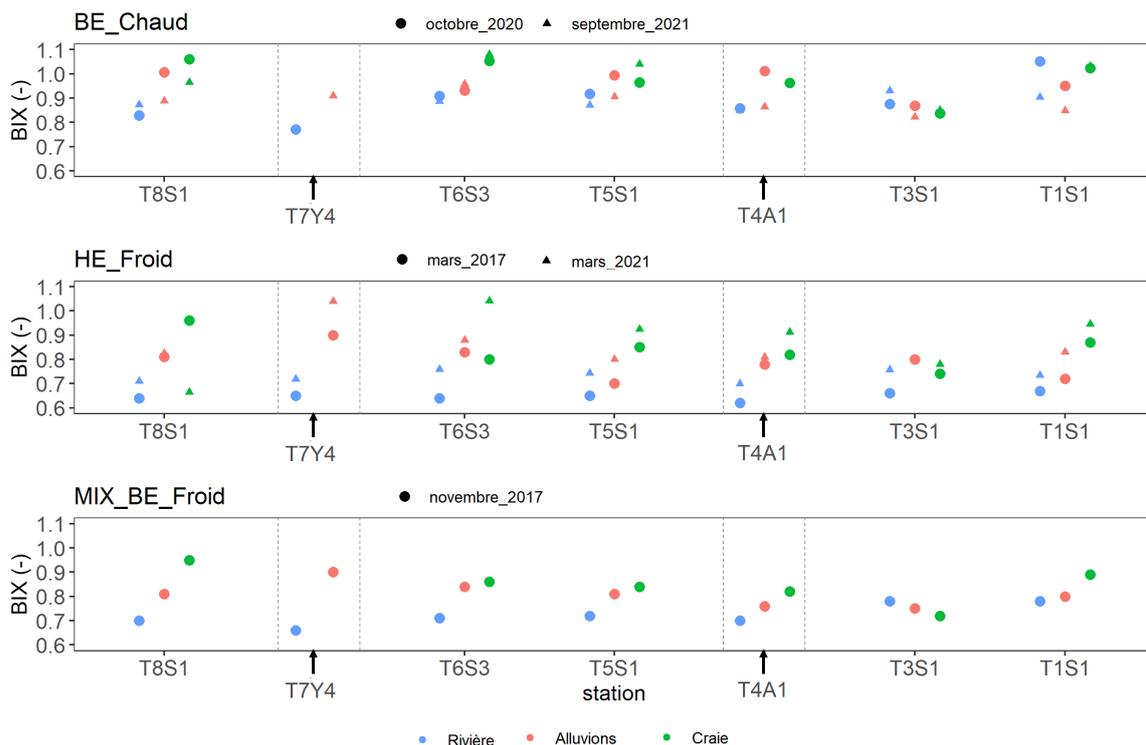


Figure 12. Indice d'activité biologique (BIX) de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) dans les stations le long de la Seine pour chaque classe de campagne. Les flèches indiquent les données mesurées dans les affluents (Yonne et Aube).

L'indice BIX (Figure 12) traduit la production de MOD en lien avec l'activité biologique dans le milieu. Il varie ici entre 0,4 et 1. Des valeurs élevées indiquent une matière organique fraîchement produite dans le milieu. Les données obtenues pour cet indice pour toutes les campagnes mettent en évidence une signature

autochtone de la MOD liée à une activité biologique globalement plus importante dans les eaux souterraines, notamment dans la nappe de la craie, par rapport à la Seine. Les valeurs de BIX pour la Seine sont plus élevées pendant l'étiage, notamment en octobre 2020, traduisant une source autochtone de MOD plus importante. Cependant, ces valeurs restent généralement plus faibles que celles des eaux souterraines, à l'exception de T3S1, ce qui pourrait indiquer la présence de flux hydriques particulièrement importants entre la rivière et les eaux souterraines en ce point, ainsi que pour T1S1 en octobre 2020.

En période de crue, entre T3S1 et T5S1, le BIX dans la nappe des alluvions diminue en mars 2017 probablement en lien avec les infiltrations de la rivière déjà observées, alors que cette diminution de BIX n'est pas observée en mars 2021. La source autochtone de MOD liée à l'activité biologique reste quand même plus importante dans les alluvions que dans la rivière. Entre T5S1 et T6S3, l'indice BIX dans les alluvions augmente conjointement à une diminution du COD (Figure 10) et de l'oxygène (Figure 8). Cela est caractéristique d'une activité hétérotrophe dans ce secteur.

En période de crue, entre T3S1 et T5S1, le BIX dans la nappe des alluvions diminue en mars 2017, probablement en relation avec les infiltrations de la rivière déjà observées, alors que cette diminution du BIX n'est pas observée en mars 2021. La source autochtone de MOD liée à l'activité biologique reste quand même plus importante dans les alluvions que dans la rivière. Entre T5S1 et T6S3, l'indice BIX dans les alluvions augmente simultanément à une diminution du COD (Figure 10) et de l'oxygène (Figure 8). Cela indique une activité hétérotrophe caractéristique de ce secteur.

Conclusions

Cinq campagnes multi-traceurs ont été effectuées dans la plaine alluviale de la Bassée entre 2017 et 2021. L'objectif de ces campagnes était avec la mesure de ces variables biogéochimiques d'intégrer les données physiques acquises par le système de suivi en continu (stations MOLONARI) afin de mieux comprendre le fonctionnement hydro-biogéochimique de la plaine alluviale. Les campagnes ont été réalisées en conditions hydrologiques contrastées : deux campagnes en période de hautes eaux (mars 2017 et 2021) et trois en basses eaux (novembre 2017, octobre 2020 et septembre 2021). Les campagnes ont été classées selon deux critères : un critère hydrologique, basé sur le débit en rivière, et un critère, basé sur la température de l'air, qui représente le potentiel d'activité biologique du système alluvial. Au regard de cette nouvelle grille d'analyse, il apparaît que les campagnes réalisées peuvent être regroupées en trois classes : hautes eaux et faible activité biologique ; basses eaux et activité biologique élevée ; basses eaux et faible activité biologique. L'activité biologique est perçue ici grâce à un panel d'indicateurs, et peut être considérée comme une activité potentielle ; en effet, l'activité biologique dépend d'autres facteurs que la température de l'air, comme les facteurs nutritionnels (*e.g.*, nutriments, matière organique), et énergétiques (*e.g.*, conditions d'ensoleillement) pour la production primaire autochtone et de la qualité de la matière organique formée et des teneurs en oxygène pour sa dégradation. Néanmoins, cette classification selon les deux critères (hydrologique et de potentiel d'activité biologique) permet déjà de mieux comprendre certains résultats, comme les concentrations contrastées en carbone organique dissous qui sont mesurées lors des campagnes de novembre 2017 et octobre 2020 en basses eaux (basses et élevées respectivement), mais à un moment différent de la trajectoire saisonnière de l'activité biologique. L'analyse préliminaire des variations spatiales et temporelles des variables a mis en évidence que les eaux souterraines en amont et en aval de la plaine alluviale sont bien oxygénées en raison d'échanges entre la nappe de la craie et les eaux de surface. En raison des pratiques agricoles intensives, ces eaux sont chargées en nitrate. Il est intéressant d'observer que les eaux souterraines dans la zone alluviale et notamment les eaux plus profondes de la craie ailleurs qu'en amont et aval du secteur étudié, sont au contraire plutôt anoxiques et pauvres en nitrate, témoignant d'une activité de dénitrification, permettant l'abattement de nitrate dans cette zone. Ce processus semble avoir lieu indépendamment des conditions hydrologiques car il est observé pour toutes les campagnes, ce qui montre que les eaux des aquifères, surtout les eaux de la craie, contiennent assez de matière organique biodégradable pour appauvrir la nappe en oxygène puis servir de substrat à la dénitrification.

Références

- Anderson, M., J. Aiken, E. Webb, and D. Mickelson (1999). Sedimentology and hydrogeology of two braided stream deposits. *Sedimentary Geology* 129, 187–199.
- Baillieux, A., D. Campisi, N. Jammet, S. Bucher, and D. Hunkeler (2014). Regional water quality patterns in an alluvial aquifer : direct and indirect influences of rivers. *Journal of Contaminant Hydrology* 169, 123–131.
- Banks, E., C. Simmons, a.J. Love, and P. Shand (2011). Assessing spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment : Implications for regional scale water quantity and quality. *Journal of Hydrology* 404(1-2), 30–49.
- Baratelli, F., M. Giudici, and G. Parravicini (2014). Single- and dual-domain models of solute transport in alluvial sediments : the effects of heterogeneity structure and spatial scale. *Transport in Porous Media* 105, 315–348.
- Baratelli, F., E. Parlanti, N. Flipo, J. Garnier, S. Guillon, A. Jost, A. Rivière, M. Sourzac, B. Mercier, A. Martinez, R. Nespoulet, D. Eschbach, J.-M. Mouchel, G. Varrault, and G. Morin (2021). Campagnes de prélèvements multi-traceurs pour la caractérisation hydro-biogéochimique de la plaine alluviale de la Bassée. Technical report, PIREN-Seine.
- Baratelli, F., E. Parlanti, G. Varrault, M. Sourzac, J.-M. Mouchel, S. Mohamed, A. Jost, S. Guillon, A. Rivière, and N. Flipo (2017). Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la Bassée en période de crue. Technical report, PIREN Seine.
- Bel, A. (2015). Projet nappstrat sn : cartographie des ressources en eau stratégiques du bassin seine-normandie. Technical report, Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Bendjoudi, H. (2000). Fonctionnement des zones humides riveraines du cours moyen des rivières : Analyse et modélisation de la genèse des hétérogénéités structurales et fonctionnelles -application à la seine moyenne paris. Technical report, METIS, SORBONNE UNIVERSITE.
- Bendjoudi, H., P. Weng, R. Guérin, and J. Pastre (2002). Riparian wetlands of the middle reach of the seine river (france) : historical development, investigation and present hydrologic functioning. a case study. *Journal of Hydrology* 263(1), 131–155.
- Brooks, A., T. Covino, and E. Hall (2022). Evaluating spatial and temporal dynamics of river-floodplain surface water connectivity using hydrometric, geochemical and microbial indicators. *Hydrological Processes* 58(5).
- Carré, C., A. Deloménie, L. Gaillard, and N. Juillet (2021). Préfiguration et démarrage du collectif chercheurs – acteurs de la bassée-voulzie. Technical report, PIREN-Seine.
- Carstea, E., A. Baker, M. Bierozza, and D. Reynolds (2010). Continuous fluorescence excitation–emission matrix monitoring of river organic matter. *Water Research* 44, 5356–5366.
- Catalán, N., A. Pastor, C. Borrego, J. Casas-Ruiz, J. Hawkes, C. Gutiérrez, D. Schiller, and R. Marcé (2021). The relevance of environment vs. composition on dissolved organic matter degradation in freshwaters. *Limnol Oceanogr* 66, 306–320.
- Covino, T. (2017). Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. *Geomorphology* 277, 133–144.
- Curie, F., A. Ducharne, H. Bendjoudi, and S. Gaillard (2003). Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates. Technical report, PIREN Seine.

- Curie, F., A. Ducharne, M. Sebilo, and H. Bendjoudi (2009). Denitrification in a hyporheic riparian zone controlled by river regulation in the Seine river basin (France). *Hydrological Processes* 23(5), 655–664.
- Dass, G., A. Jost, D. Eschbach, and A. Ducharne (2022). Impact des aménagements de la seine et lacs de gravières sur le fonctionnement hydrogéologique de la plaine alluviale de la bassée. Technical report, PIREN-Seine.
- Derrien, M., S. R. Brogi, and R. Gonçalves-Araujo (2019, October). Characterization of aquatic organic matter : Assessment, perspectives and research priorities. *Water Research* 163, 114908.
- Doussan, C., G. Poitevin, E. Ledoux, and M. Delay (1997). River bank filtration : Modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species. *Journal of Contaminant Hydrology* 25(1-2), 129–156.
- Ejarque, E., A. Freixa, E. Vazquez, A. Guarch, S. Amalfitano, S. Fazi, A. M. Romani, and A. Butturini (2017, December). Quality and reactivity of dissolved organic matter in a Mediterranean river across hydrological and spatial gradients. *Science of The Total Environment* 599-600, 1802–1812.
- Fellman, J., E. Hood, and R. Spencer (2010). Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems : A review. *Limnol. Oceanogr.* 55, 2452–2462.
- Filippini, M., C. Stumpp, I. Nijenhuis, H. Richnow, and A. Gargini (2015). Evaluation of aquifer recharge and vulnerability in an alluvial lowland using environmental tracers. *Journal of Hydrology* 529, 1657–1668.
- Fleckenstein, J. H., R. G. Niswonger, and G. E. Fogg (2006). River-Aquifer Interactions, Geologic Heterogeneity, and Low-Flow Management. *Ground Water* 44(6), 837–852.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, S. Théry, and E. Ledoux (2007). Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sciences of Total Environment* 375, 69–79.
- Flipo, N., P. Labadie, and L. Lestel (Eds.) (2021). *The Seine River Basin*, Volume 90 of *The Handbook of Environmental Chemistry*. Cham : Springer International Publishing.
- Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill (2014). Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 3121–3149.
- Fustec, E., H. Bendjoudi, S. Gaillard, P. Weng, F. Boyer, P. Boët, O. Schannen, S. Croguennec, and G. Billen (2001). Fonctionnement du territoire bassée. Technical report, Piren-Seine.
- Gallois, N. and P. Viennot (2018). Modélisation de la pollution diffuse d’origine agricole des grands aquifères du bassin seine-normandie : Actualisation des modélisations couplées stics-modcou – modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique. Technical report, ARMINES/MINES ParisTech.
- Garnier, J., L. Weidenfeld, G. Billen, A. Martinez, B. Mercier, V. Rocher, J.-P. Tabuchi, and S. Azimi (2021). La matière organique dans le continuum terrestre-aquatique du bassin de la seine. Technical report, PIREN-Seine.
- Guillon, S., D. Eschbach, A. Groleau, F. Baratelli, E. Parlanti, M. Sourzac, J. Garnier, B. Mercier, R. Nespoulet, A. Martinez, and L. Lestel (2021). Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la bassée. Technical report, PIREN-Seine.
- Guillon, S., D. Jézéquel, N. Flipo, P. Marmonier, E. Franquet, M. Thorel, A. Vienney, B. Oursel, J. Olivier, J. Bourrand, and A. Groleau (2016). Métabolisme des annexes hydrauliques des corridors hydroécologiques - des casiers Girardon du rhône aux gravières de la bassée. Technical report, PIREN Seine.

- Guillon, S., D. Jézéquel, E. Viollier, and A. Groleau (2018). Dynamique temporelle des flux de carbone dans une gravière de la bassée. Technical report, PIREN Seine.
- Heinz, J., S. Kleineidam, G. Teutsch, and T. Aigner (2003). Heterogeneity patterns of Quaternary glaciofluvial gravel bodies (SW-Germany) : application to hydrogeology. *Sedimentary Geology* 158, 1–23.
- Helms, J., A. Stubbins, J. Ritchie, E. Minor, D. Kieber, and K. Mopper (2008). Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 53, 955–969.
- Hiscock, K. and T. Grischek (2002). Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of Hydrology* 266, 139–144.
- Huguet, A., L. Vacher, S. Relexans, S. Saubusse, J.-M. Froidefond, and E. Parlanti (2009). Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org. Geochem.* 40, 706.
- Jaffé, R., J. Boyer, X. Lu, N. Maie, C. Yang, N. Scully, and S. Mock (2004). Source characterization of dissolved organic matter in a subtropical mangrove-dominated estuary by fluorescence analysis. *Mar. Chem.* 84, 195–210.
- Jaffé, R., K. Cawley, and Y. Yamashita (2014). Applications of Excitation Emission Matrix Fluorescence with Parallel Factor Analysis (EEM-PARAFAC) in Assessing Environmental Dynamics of Natural Dissolved Organic Matter (DOM) in Aquatic Environments : A Review. *Advances in the Physicochemical Characterization of Dissolved Organic Matter : Impact on Natural and Engineered Systems. Chapter 3*, 27–73.
- Jost, A., S. Wang, L. Labarthe, and N. Flipo (2017). Impacts hydrodynamiques des gravières dans la plaine alluviale de la Bassée. Technical report, PIREN Seine.
- Koltermann, C., E. and M. Gorelick, S. (1996). Heterogeneity in sedimentary deposits : A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research* 32, 2617–2658.
- Labadie, P., N. Flipo, and H. Budzinski (2018). Etude préliminaire de la présence des composés fluoroalkylés dans les eaux superficielles et souterraines de la plaine de la Bassée, en période de basses eaux. Technical report, PIREN-Seine.
- Labarthe, B. and N. Flipo (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. Technical report, PIREN Seine.
- Labarthe, B., N. Flipo, L. Abasq, B. Deleplancque, A. Mouhri, A. Jost, and C. de Fouquet (2014). Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la bassée. Technical report, PIREN Seine.
- Léger, E., F. Réjiba, A. Rivière, C. Fauchard, N. Flipo, C. Finco, C. Schamper, R. Antoine, and R. Levailant (2021). Imagerie thermique et changement d'échelle sur la bassée : développements méthodologiques. Technical report, PIREN-Seine.
- McKnight, D., E. Boyer, P. Westerhoff, P. Doran, T. Kulbe, and D. Andersen (2001). Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol. Oceanogr.* 46, 38–48.
- Minor, E. C., M. M. Swenson, B. M. Mattson, and A. R. Oyler (2014, Aout). Structural characterization of dissolved organic matter : a review of current techniques for isolation and analysis. *Environmental Science : Processes & Impacts* 16(9), 2064–2079. Publisher : The Royal Society of Chemistry.

- Mouhri, A., N. Flipo, F. Rejiba, C. de Fouquet, L. Bodet, P. Goblet, B. Kurtulus, P. Ansart, G. Tallec, V. Durand, and A. Jost (2013). Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology* 504, 194–206.
- Parlanti, E., M. Sourzac, F. Baratelli, G. Varrault, and N. Flipo (2019). Propriétés optiques de la matière organique dissoute (MOD) : traçage de ses sources et dynamique dans la plaine de la bassée dans Matière organique. Technical report, Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine.
- Parlanti, E., K. Worz, L. Geoffroy, and M. Lamotte (2000). Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. *Org. Geochem.* 31, 1765–1781.
- Passy, P. and A. Puisais (2022). Apport de la télédétection optique au suivi des crues dans la bassée. Technical report, PIREN-Seine.
- Passy, P., P. Viennot, N. Gallois, G. Billen, J. Garnier, M. Silvestre, V. Thieu, and N. Flipo (2018). Modélisation des apports diffus d’azote et de phosphore aux masses d’eau de surface du bassin Seine-Normandie. Technical report, PIREN Seine.
- Picourlat, F., A. Jost, S. Teillaud, F. Baratelli, and N. Flipo (2018). Impact des aménagements anthropiques dans la plaine de la bassée : le cas des gravières. Technical report, PIREN Seine.
- Resch, M. and L. Lestel (2022). Les impacts des aménagements sur la plaine alluviale de la bassée. une approche géohistorique. Technical report, PIREN-Seine.
- Réjiba, F., C. Fauchard, R. Antoine, C. Finco, C. Schamper, R. Levallant, A. Rivière, and N. Flipo (2020). Trajectoire thermique à l’échelle de la plaine de la Bassée. Du suivi de la température au sol au suivi thermique par drone. Technical report, PIREN-Seine.
- Schanen, O. (1998). *Analyse et modélisation de l’impact hydrodynamique biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du Val de Seine*. Ph. D. thesis, Université Pierre et Marie Curie. 273 p.
- Schanen, O., H. Bendjoudi, A. Levassor, and E. Fustec (1998). Quantification des écoulements nappe-gravières, en zone alluviale, par optimisation du bilan hydrologique. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes* 326, 107–112.
- Steinmann, R., L. Lestel, and A. Dumont (2016). Approche géohistorique de la seine dans la bassée durant les deux derniers siècles. Technical report, PIREN Seine.
- Sun, X. (2015). *Modelling of surface water and groundwater exchange and denitrification process in the alluvial plain area at the catchment scale*. Ph. D. thesis, Université Toulouse III Paul Sabatier.
- Tockner, K., S. Bunn, C. Gordon, R. Naiman, G. Quinn, and J. Stanford (2008). Flood plains : critically threatened ecosystems. In N. Polunin (Ed.), *Aquatic Ecosystems*, pp. 45–61. Cambridge University Press.
- Tockner, K., D. Pennetzdorfer, N. Reiner, F. Schiemer, and J. Ward (1999). Hydrological connectivity, and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system (danube, austria). *Freshwater Biology* 41, 521–535.
- Tockner, K., M. Pusch, D. Borchardt, and M. Lorang (2010). Multiple stressors in coupled river-floodplain ecosystems. *Freshwater Biology* 55, 135–151.
- Tockner, K. and J. Stanford (2002). Riverine flood plains : present state and future trends. *Environmental Conservation* 29(3), 308–330.

- Tockner, K., D. Tonolla, V. Bremerich, S. Jähnig, C. Robinson, and C. Zarfl (2022). Introduction to european rivers. In K. Tockner, C. Zarfl, and C. Robinson (Eds.), *Rivers of Europe*, pp. 1–26. Elsevier.
- Tzortziou, M., C. Zeri, E. Dimitriou, Y. Ding, R. Jaffé, E. Anagnostou, E. Pitta, and A. Mentzafou (2015). Colored dissolved organic matter dynamics and anthropogenic influences in a major transboundary river and its coastal wetland. *Limnol. Oceanogr.* 60, 1222–1240.
- Vacher, L. (2004). *Etude par fluorescence des propriétés de la matière organique dissoute dans les systèmes estuariens. Cas des estuaires de la Gironde et de la Seine*. Ph. D. thesis, Université Bordeaux 1. 255 p.
- Wang, S., A. Jost, B. Labarthe, and N. Flipo (2016). Création du module Libwet de simulation des interactions gravières-aquifères. Technical report, PIREN Seine.
- Wantzen, K. (Ed.) (2023). *River Culture – Life as a Dance to the Rhythm of the Waters*. UNESCO Publishing, Paris.
- Weill, P., B. Deleplancque, and C. Norgeot (2013). Etude de faisabilité sur la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la bassée par géoradar. Technical report, PIREN Seine.
- Xu, B., G. Wang, Q. Yang, and Y. Zheng (2018). Hydrological buffering during groundwater acidification in rapidly industrializing alluvial plains. *Journal of Contaminant Hydrology* 218, 19–33.
- Zsolnay, A., E. Baigar, M. Jimenez, B. Steinweg, and F. Saccomandi (1999). Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* 38, 45–50.

Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée – Mise à jour ¹

Sophie Guillon^{1,*}, David Eschbach², Fulvia Baratelli², Edith Parlanti⁴, Mahaut Sourzac⁴, Benjamin Mercier², Romane Nespoulet², Anun Martinez², Anne Jost², Alexis Groleau³, Laurence Lestel², Josette Garnier²

¹ Centre de Géosciences, Mines Paris – PSL, Fontainebleau

² Sorbonne Université, UMR METIS, Paris

³ Université Paris Cité, IPGP, Paris

⁴ Université de Bordeaux, EPOC, Bordeaux

* sophie.guillon@minesparis.psl.eu

Résumé

Les gravières représentent une superficie importante de la plaine alluviale de la Bassée, site atelier du PIREN Seine et siège de multiples enjeux, dont l'exploitation des granulats alluvionnaires. Une base de données des caractéristiques de 523 masses d'eau de la Bassée (chenaux abandonnés et gravières) a été réalisée à partir d'images aériennes actuelles et passées. Un ensemble de 10 gravières et de 3 chenaux abandonnés a été échantillonné à l'occasion de 7 campagnes entre 2017 et 2022, en conditions de hautes et basses eaux. La représentativité de cet ensemble par rapport à la totalité des plan d'eau est bonne, même si les gravières de petite surface ne sont pas représentées. Les analyses géochimiques obtenues lors de ces campagnes permettent de comprendre le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières et leurs relations avec les eaux souterraines. Le bilan hydrique des gravières est réalisé en combinant le suivi météorologique et les isotopes stables de l'eau. A l'échelle annuelle, la contribution des précipitations au volume des gravières est inférieure à celle des eaux souterraines. Surimposé à un écoulement régional qui traverse a priori les gravières, un flux net d'eaux souterraines alimente la gravière. Les gravières sont alors le lieu d'un dégazage important de CO₂, en partie lié à l'arrivée de ces eaux souterraines sursaturées. L'activité biologique dans les gravières est également importante, avec une photosynthèse entraînant la précipitation de calcite en période chaude. Plus largement, ce travail s'inscrit dans une approche générale de co-construction d'indicateurs dans une dynamique interdisciplinaire, en cherchant à renforcer le lien entre les différents compartiments de l'hydrosystème (lit mineur, lit majeur, nappe, annexes hydrauliques) pour une compréhension globale de son fonctionnement.

1. Pour citer cet article : Guillon, S., Eschbach, D., Baratelli, F., Parlanti, E., Sourzac, M., Mercier, B., Nespoulet, R., Martinez, A., Jost, A., Groleau, A., Lestel, L., Garnier, J. Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée – Mise à jour. Dans Carré, C., Lestel, L., et Flipo, N. (eds), *Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 7, 2023, pp. 55-74.

Il s'agit d'une mise à jour de Guillon, S., Eschbach, D., Baratelli, F., Parlanti, E., Sourzac, M., Mercier, B., Nespoulet, R., Martinez, A., Jost, A., Groleau, A., Lestel, L., Garnier, J. Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée, Rapport PIREN-Seine 2021, doi:10.26047/PIREN.rapp.ann.2021.vol17

Points clés

- *Variabilité du fonctionnement hydro- bio- géochimique des gravières selon l'âge, le rapport surface/volume et l'historique de réaménagement ;*
- *Alimentation des gravières par les eaux souterraines, et dégazage de CO₂ ;*
- *Forte activité biologique dans les gravières, avec précipitation de calcite en période chaude.*

Abstract

Gravel pits occupy a large proportion of the La Bassée alluvial plain, a pilot site of the PIREN Seine program, and place of multiple issues, including gravel extraction. A database characterising 523 water bodies (abandoned channels and gravel pits) of the plain was constructed based on actual and past aerial images. A total of 10 gravel pits and 3 abandoned channels was sampled with 7 field campaigns between 2017 and 2022, in low and high water level conditions. The representativity of this group, compared to the entire set of water bodies, is acceptable, even though gravel pits of small surface area are not represented. Geochemical analyses obtained during field sampling allow to better understand hydrogeological and biogeochemical functioning of the gravel pits, and their connections with groundwater. Water budget of the gravel pits was quantified using both meteorological and water stable isotope data. At the annual scale, precipitations contribute less than groundwater to the gravel pit water volume. In addition to regional flow that probably goes through the gravel pits, a net groundwater inflow is feeding them. CO₂ degassing occurs in the gravel pits, partly due to the inflow of oversaturated groundwater. Biological activity is important in the gravel pits. During warm periods, strong photosynthetic activity leads to calcite precipitation. More generally, this work takes part in a generic and interdisciplinary approach of co-construction of indicators, trying to reinforce the link between the various compartments of the hydrosystem (flood plain, river bed, aquifer, banks) for a global understanding of its functioning.

Key points

- Variability of hydro bio geochemical functioning of the gravel pits, to be explained by age, area/volume ratio and redevelopment plans ;
- Net groundwater inflow into gravel pits, along with CO₂ degassing ;
- Strong biological activity in gravel pits, with calcite precipitation during active and warm period.

Table des matières

1	Typologie des gravières de la Bassée	58
1.1	Méthodologie	58
1.2	Sites échantillonnés	59
1.3	Résultats et discussion	60
2	Caractérisation biogéochimique	63
2.1	Campagnes d'échantillonnage	63
2.2	Bilan hydrique et flux d'eau	65
2.3	Fonctionnement biogéochimique	66
2.4	Comportement du carbone	68
2.5	Evolution temporelle du fonctionnement biogéochimique des gravières	71

Introduction

La plaine alluviale de la Bassée est située entre la confluence de la Seine avec l'Aube et celle avec l'Yonne, à l'amont de Paris. Il s'agit d'une plaine étroite d'environ 6 km de large et 50 km de long, majoritairement agricole mais avec une urbanisation importante et croissante. La Bassée est une zone humide d'intérêt national et siège de nombreux enjeux économiques, dont l'exploitation des granulats alluvionnaires. La plaine de la Bassée est un site atelier du PIREN-Seine depuis la création du programme, avec un regain de travaux menés depuis les années 2010.

La plaine de la Bassée est remplie par des alluvions déposées par la Seine au cours du Quaternaire. L'épaisseur des alluvions varie entre 2 et 9 m selon la position dans la plaine. Ces alluvions, qui hébergent la nappe d'accompagnement de la Seine, reposent sur la formation de la Craie. L'exploitation des carrières de granulats alluvionnaires entraîne la mise à nu de la nappe alluviale et la formation d'étangs, de quelques mètres de profondeur (épaisseur locale des alluvions), appelés gravières. Ces gravières occupent aujourd'hui plus de 10 % de la surface de la plaine de la Bassée. L'extraction de granulats alluvionnaires dans la vallée de la Seine, et en particulier dans la plaine de la Bassée, a accompagné les besoins croissants liés à l'urbanisation et au développement de l'agglomération parisienne depuis le milieu du XX^e siècle. En 2021, 50 % des granulats utilisés en Ile de France (30 millions de tonnes par an) sont extraits localement dans des carrières, dont 70 % sont issus de la zone de la Bassée.

Les emplacements des gravières sont d'abord basés sur une reconnaissance fine des terrains par sondages (Pasquet and Thibaut, 1997). Les industriels réalisent les demandes de permis d'exploitation avec les contraintes d'occupation cadastrale et les accords qu'ils peuvent obtenir des propriétaires / usagers.

L'exploitation proprement dite commence par un décapage de la terre végétale superficielle, avant l'extraction des alluvions jusqu'au toit de la craie, qui se situe à une profondeur variable (entre 2 et 9 m selon les sites). A la fin de l'exploitation, le réaménagement, aujourd'hui très encadré par la réglementation, consiste en un comblement partiel (de 20 à 50 % maximum de la surface du plan d'eau selon les quantités de terre végétale extraites) et un reprofilage des berges en pente douce, et un maintien de zones ouvertes sur les berges, prairies ou zones humides type roselières, pour leur intérêt écologique.

Les impacts des gravières sur les ressources en eau, que ce soit d'un point de vue quantitatif via un excès d'éva-

poration et une modification de l'écoulement de la nappe, ou d'un point de vue qualitatif, restent aujourd'hui encore mal compris. L'objectif général des travaux menés par le PIREN-Seine est ainsi de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des annexes hydrauliques de la plaine de la Bassée, que sont les gravières, mais aussi les anciens méandres de la Seine. Plus spécifiquement, un suivi continu de la géochimie de la gravière de la Cocharde a été réalisé en 2017 et 2018 lors de la phase VII du PIREN-Seine (Guillon et al., 2019), et a permis de mettre en évidence les principaux processus qui contrôlent les flux d'eau et de carbone, ainsi que leur dynamique temporelle. Des méthodologies de quantifications des flux d'eau et de carbone (C) ont ainsi pu être proposées. Ces travaux ont soulevé la question de la représentativité du plan d'eau suivi, au regard de la multitude de plans d'eau sur la Bassée. Dans le cadre de la phase 8, il s'agit donc d'échantillonner un nombre significatif de gravières pour mieux contraindre leur diversité de fonctionnement, en lien avec leur diversité de formes, de positions, mais aussi d'histoire, d'exploitation et de réaménagement. À terme et de manière plus large, il s'agira de réfléchir à des indicateurs du fonctionnement et des trajectoires des masses d'eau, qui pourront servir d'outils de réflexion pour l'ensemble des acteurs du territoire. Cette approche interdisciplinaire s'attache autant que possible à intégrer les échelles spatiales et temporelles pour contribuer à améliorer la compréhension globale du fonctionnement de la Bassée.

Les questions concernent, dans un premier temps, la description quantitative de la diversité des caractéristiques géométriques des plans d'eau. Dans un second temps, on cherche à quantifier le bilan hydrique des gravières, en particulier les proportions d'eau de pluie et d'eaux souterraines, ainsi que le temps de résidence de l'eau. Dans un troisième temps, on cherche à quantifier les flux de carbone, d'une part pour contribuer à l'amélioration du bilan de C de la plaine alluviale dans son ensemble, et d'autre part comme élément de réflexion sur l'impact de la création d'une gravière par rapport à un champ ou une forêt initialement présente sur le flux de C (et des autres gaz à effet de serre). À terme, on s'intéressera aussi aux rôles possibles des gravières sur la composition chimique des eaux, en particulier en termes de nutriments.

1 Typologie des gravières de la Bassée

Une identification et une caractérisation géométrique des masses d'eau de la Bassée ont été réalisées, et mises sous forme de base de données géoréférencée, appelée CIME-B (Carte d'Identité des Masses d'Eau de la Bassée). L'analyse a été réalisée à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique, ArcGIS et QGIS). L'utilisation de photos aériennes anciennes et actuelles a permis de reconstruire la dynamique spatiale et temporelle des masses d'eau de la Bassée depuis le milieu du XX^e siècle. La base CIME-B a été réalisée dans le but d'analyser la distribution statistique des propriétés des masses d'eau (dimensions, distance à la Seine, âge) et pour faire émerger une typologie ou un continuum permettant de guider le choix des sites à échantillonner. Cette base est également un outil de compréhension et d'interprétation du fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique de la Bassée. Elle permet d'interroger la représentativité des plans d'eau retenus pour cette étude de manière à échantillonner toute la gamme existante (min-max) et de pondérer les différents comportements ou flux en fonction de la répartition statistique réelle.

1.1 Méthodologie

L'analyse SIG a consisté à digitaliser les contours de toutes les masses d'eau observées dans l'emprise de la plaine alluviale de la Bassée, à partir de photos aériennes pour 17 dates (1949, 1976, 1988, 1990, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2003, 2005, 2007, 2010, 2013, 2017, 2018, 2019). La couche de l'emprise des gravières et du lit mineur de 2018, provenant d'une étude réalisée en 2019 par David Eschbach, a été complétée et actualisée à l'aide du fonds WMS de ESRI 2019 et 2020. L'analyse rétrospective s'est appuyée sur la confrontation des images aériennes de 1949 de l'Institut Paris Région (<https://www.institutparisregion.fr/cartographie/lile-de-france-en-1949/>) et des résultats de l'étude temporelle menée à l'aide des images satellitaires et réalisée par Samuel Teillaud en 2018. Une analyse présence-absence par confrontation de la couche actualisée 2020

avec l'ensemble des fonds historiques a permis de construire la base de données. L'analyse est fondée sur l'observation des photos aériennes à date fixe, ce qui implique un manque de connaissance entre les dates observées et des biais importants dans les données d'âge. C'est notamment le cas entre 1949 et 1976, puis entre 1976 et 1988. Les images aériennes sont présentes à un intervalle régulier à partir de 1988, permettant un suivi temporel fin de l'évolution des gravières dans la Bassée.

La digitalisation sur l'image satellite de 2020 a concerné 523 entités, donc 30 chenaux abandonnés et 386 gravières (dont 325 de plus de 0,2 ha). Les contours de chaque entité ont été digitalisés sous forme d'un polygone. La table attributaire rassemble toutes les informations pour ces entités, sous forme de base de données, exportable au format texte ou xls. La Figure 1 montre les masses d'eau digitalisées pour 2020.

Le type de masse d'eau a été identifié : gravière en eau, gravière « hors eau » (emprise du site d'exploitation avec les zones terrassées), et chenal abandonné. La connectivité avec la Seine a également été identifiée : absence de connectivité, connectivité aval ou amont. Les propriétés géométriques des entités ont ensuite été déterminées par des algorithmes de calcul sous ArcGIS : superficie (en m²), périmètre (en m), coordonnées X et Y (en Lambert 93) du barycentre spatial, distance la plus courte à la ligne médiane de la Seine, altitude du barycentre sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT, modèle IGN à résolution 5 m), et enfin épaisseur des alluvions estimée d'après le modèle de krigeage géostatistique du BRGM réalisé à partir de plusieurs centaines de sondages de reconnaissance (Pasquet and Thibaut, 1997). Cette épaisseur d'alluvions a été calculée par différence entre l'altitude du sol donnée par le MNT et l'altitude de la base des alluvions fournie par le krigeage (utilisé pour le modèle CaWaQS de la plaine, Labarthe and Flipo (2016)). En l'absence de données de bathymétrie, et donc de profondeur des masses d'eau, et en particulier des gravières, cette épaisseur d'alluvions peut être considérée comme un proxy de la profondeur. Pour la gravière de la Cocharde, la base CIME-B donne une épaisseur d'alluvions de 7 m, alors que la profondeur moyenne mesurée sur le site lors d'une campagne de bathymétrie est de 5 à 6 m. Il est à noter que, pour les masses d'eau de moins de 0.2 ha de superficie, les propriétés du barycentre et d'épaisseur d'alluvions n'ont pas été déterminées.

Les différentes images disponibles permettent d'appréhender l'évolution temporelle de l'existence et de la superficie des gravières. Pour chaque année, le choix a été fait de noter dans la base de données / table attributaire la présence ou l'absence de chaque masse d'eau, et dans le cas de sa présence, si la superficie a évolué par rapport à l'image précédente. Ce choix permet de conserver dans la base de données l'information de l'année d'apparition du plan d'eau (ouverture), ainsi que l'année de dernière modification connue, qui peut correspondre à la fin de l'exploitation et au réaménagement. Il est toutefois à noter que, dans le détail, chaque gravière a une histoire spécifique, avec des phases d'exploitation et une augmentation de la superficie qui ont pu s'étaler sur plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années. La base de données n'a pas vocation à pouvoir suivre de manière précise les phases d'exploitations des (grandes) gravières. Néanmoins, les discussions récentes avec les exploitants montrent que 20 à 50 % de la surface des gravières en eau est remblayée avec la terre végétale qui a été décapée avant le début de l'exploitation.

1.2 Sites échantillonnés

Trois gravières (T6G4e, T6G2e et T7G3e) et un chenal abandonné (T6B5e) ont été identifiés et instrumentés avec un suivi continu P et T (dispositif LOMOS, Mouhri et al. (2013); Jost et al. (2019)) depuis la phase VII du PIREN-Seine, et avaient déjà fait l'objet de campagnes d'échantillonnage en 2017. La gravière de la Cocharde COCH a fait l'objet d'un suivi biogéochimique détaillé entre 2017 et 2018 (Guillon et al., 2019). Dans le cadre de la phase VIII du PIREN-Seine, de nouveaux sites de gravières et de chenaux abandonnés ont été identifiés et intégrés aux campagnes d'échantillonnage communes sur la Bassée, qui intègrent de nombreux points de mesure le long de la Seine. Le choix des sites est ici essentiellement basé sur les opportunités et autorisations d'accès. Au total, 10 gravières et 3 chenaux abandonnés ont été échantillonnés. Le Tableau 1 est un extrait de la base CIME-B pour ces masses d'eau.

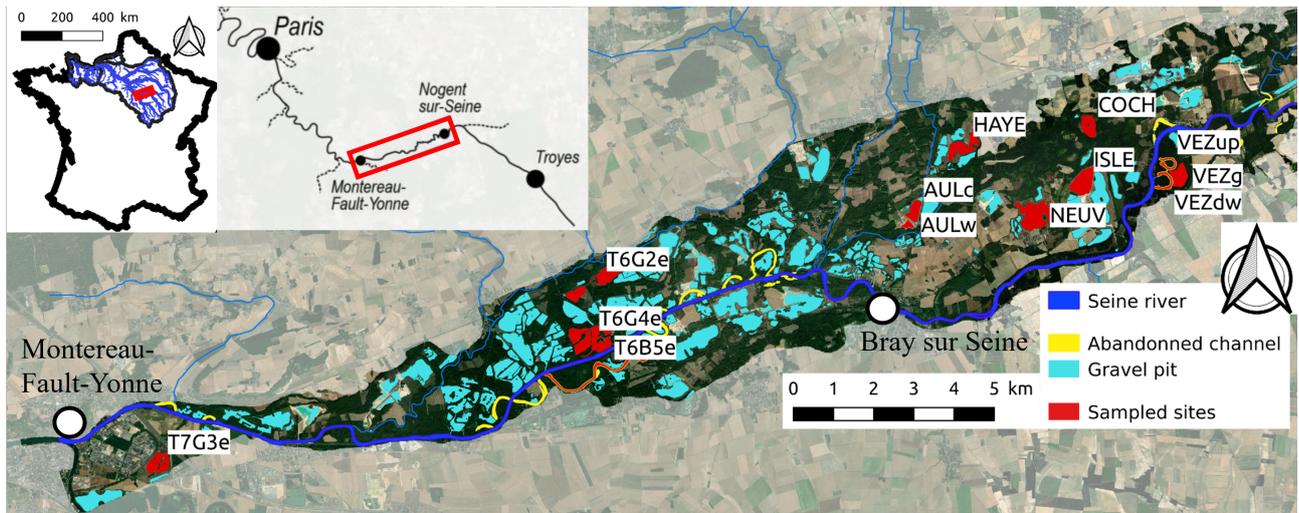


Figure 1. Localisation des plans d'eau identifiés dans la base de données CIME-B et des sites échantillonnés.

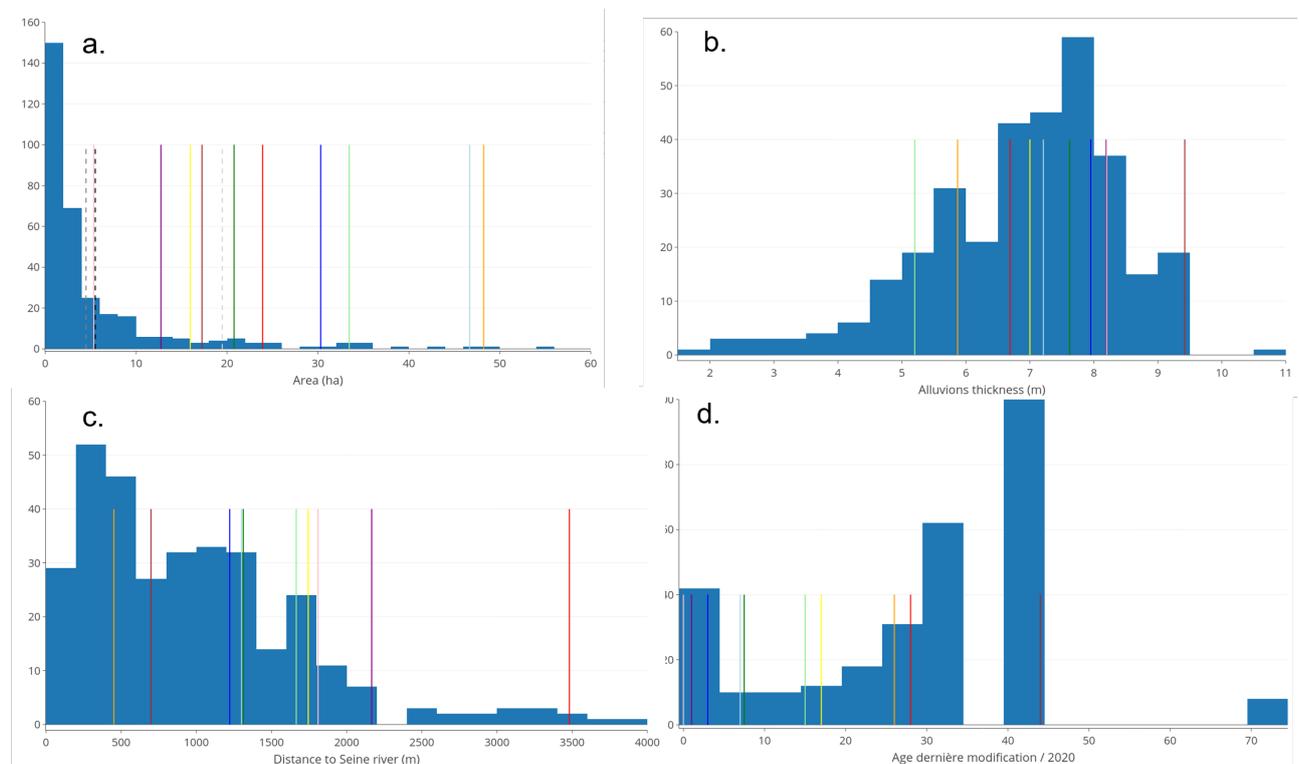


Figure 2. Histogrammes de la répartition de la superficie (a), l'épaisseur estimée des alluvions (b), la distance à la Seine (c) et le nombre d'année depuis la dernière modification observée (d) pour les gravières de la base de données CIME-B pour la Bassée. Les gravières échantillonnées sont indiquées par les traits verticaux, les chenaux abandonnés par les traits pointillés (code couleur du Tableau 1).

1.3 Résultats et discussion

Les paramètres qui pourraient jouer un rôle sur la connectivité hydraulique entre les gravières et la nappe (des alluvions ou de la craie), mais aussi sur le fonctionnement biogéochimique, les teneurs en nutriments et en carbone organique, sont les suivants :

- âge, pouvant influencer les paramètres suivants :
 - types de réaménagement (pente des berges, types de végétations. . .);
 - épaisseur du colmatage des berges et du fond;
 - perméabilité des berges et du fond;
- rapport surface / volume (déterminé par la profondeur), pouvant influencer les paramètres suivants :
 - temps de résidence;
 - stocks et flux de nutriments;
 - stocks et flux de carbone;
- distance à la Seine, pouvant influencer les paramètres suivants :
 - intensité des échanges nappe-rivière;
 - fréquence des échanges nappe-rivière.

Le Tableau 1 indique, pour les sites retenus, la présence de piézomètres dans la nappe alluviale et/ou de la craie à proximité des masses d'eau. Cette information est essentielle, car elle permet d'obtenir la composition chimique de la nappe et de discriminer sa contribution à celle des gravières. Concernant l'usage des berges, 5 sites anciens sont de type fermé (COCH, T7G3e, T6G2e, T6G4e, VEZG), et 5 sont de type ouvert (HAYE, NEUV, AULc, AULw, ISLE), dont 3 en exploitation et 2 ayant fait l'objet d'un réaménagement « écologique ».

Tableau 1. Liste des sites échantillonnés avec une sélection de leurs propriétés extraites de la base de données CIME-B. Les chenaux abandonnés sont indiqués en italique. La présence d'une ripisylve sur les berges des gravières est indiquée.

Site	Area (ha)	Dist. to Seine (m)	Alluv. Thick. (m)	Opening year	Last modification	Ripi sylve
VEZG	17.2	698	9.4	1976	1976	X
HAYE	23.9	3482	6.7	1988	1992	
T6G4e	48.2	452	5.9	1949	1994	X
COCH	15.9	1745	7.0	1949	2003	X
T6G2e	33.4	1665	5.2	1994	2005	X
T7G3e	20.8	1313	7.6	1990	2013	X
NEUV	46.7	1301	7.2	2003	2013	
ISLE	30.3	1222	8.0	1994	2017	
AULc	12.7	2167	8.2	2017	2019	
AULw	5.34	1810	8.2	2020	2021	
<i>T6B5e</i>	19.5					
<i>VEZup</i>	4.5					
<i>VEZdw</i>	5.5					

1.3.1 Superficie et épaisseur des alluvions

Les superficies des gravières varient entre 0 et 60 ha (Figure 2a), avec la majorité des gravières ayant une superficie de moins de 10 ha et en moyenne de 4.6 ha. La superficie des gravières n'est pas contrôlée par des facteurs géographiques mais « politiques » via le parcellaire cadastral. Il n'y a pas d'évolution notable de la superficie des gravières selon les âges d'ouverture. Au-delà d'une multitude de petites gravières, il existe quelques grandes gravières, illustrant certainement la difficulté d'obtention des accords des propriétaires et exploitants agricoles, malgré les compensations financières. Le morcellement des plans d'eau impacte de manière spécifique le paysage, et a nécessairement un impact sur les aspects hydro- bio- géochimiques et écologiques.

Les sites retenus ont tous des superficies supérieures à 10 ha, et les petites superficies ne sont donc pas bien représentées.

L'épaisseur des alluvions estimée pour les gravières varie entre 2 et 11 m, mais 50 % des valeurs sont entre 5.0 et 7.8 m (inter quartiles ; Figure 2b). Cette situation s'explique par la logique économique de l'exploitation des

granulats. Les exploitants de granulats se basent sur les cartes de potentialité de gisements établies par le BRGM à partir des sondages, et visent donc a priori les zones de plus fortes épaisseurs. Toutefois, les contraintes de foncier et d'autorisations guident fortement les opportunités d'ouvertures dans des endroits où les épaisseurs ne sont pas forcément les plus importantes, tout en restant suffisantes pour assurer une certaine rentabilité (Pasquet and Thibaut, 1997; Carré and Chartier, 2002). En termes de fonctionnement hydrogéologique, les gravières profondes (forte épaisseur d'alluvions) ont un rapport surface / volume plus petit, et une connexion a priori plus importante avec les eaux souterraines par les berges. En termes de fonctionnement biogéochimique, une stratification thermique et chimique doit être présente quand les profondeurs sont supérieures à 5 m, au moins par intermittence, conduisant à une anoxie potentiellement plus importante dans le fond, et donc une possibilité de dénitrification, voire de méthanisation.

Les sites retenus sont plutôt représentatifs, avec des épaisseurs d'alluvions estimées entre 5 et 8 m, même s'il faut ici bien souligner la forte incertitude autour de cette estimation, avec des profondeurs d'eau réelles qui sont clairement différentes. La gravière NEUV a une faible profondeur avec de nombreux affleurements de craie en surface du plan d'eau, mais une valeur de 7,2 m d'alluvions est déduite des modélisations. L'écart a déjà été souligné plus haut pour la Cocharde. Les gravières AULw et AULc ont de fortes puissances de gisement (> 7 m, valeurs exactes de profondeur relevées par les exploitants), mais des épaisseurs d'alluvions estimées dans CIME-B moins extrêmes.

En termes de forme, les gravières, sont généralement de petits étangs de moins de 10 ha de superficie et de 5 m de profondeur, suffisamment étendus pour avoir un zonage entre littoral et limnique, mais souvent pas assez profonds pour présenter une stratification nette et stable dans le temps, et donc globalement mélangés sur la verticale.

1.3.2 *Distance à la Seine*

La distance entre les gravières et la Seine varie entre 0 et 4 km, avec 50 % des gravières situées à moins de 636 m (valeur médiane), et 75 % situées à moins de 1269 m (3ème quantile; Figure 2c). L'échantillon de gravières retenues est plutôt représentatif, même si les faibles distances sont mal représentées, en l'absence de site situé à moins de 500 m de la Seine. Les impacts attendus de la distance à la Seine sur le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique ne sont pas évidents. Le gradient hydraulique est a priori assez homogène sur la plaine. À proximité immédiate de la Seine, il pourrait y avoir des écoulements transitoires plus intenses à travers les alluvions. Le réseau de noues, petits cours d'eau de surface connectés à la Seine et à proximité de presque toutes les gravières, redistribuerait cependant cette situation à l'intérieur de la plaine.

1.3.3 *Age*

Les biais sur l'âge sont évidemment à rappeler ici, d'une part à cause du manque de données, mais aussi en lien avec la complexité de l'exploitation d'une carrière de granulats. Les évolutions et histoires sont en effet spécifiques à chaque gravière. Pour les sites retenus pour l'échantillonnage, le Tableau 1 montre que les informations sur leur histoire sont variables. La gravière VEZG a été ouverte, exploitée en totalité entre 1949 et 1976, mais sans qu'on ne dispose pour le moment de plus de précisions. La gravière de la Cocharde COCH a une histoire qui commence dès 1949, mais il s'agissait en fait alors d'un très petit plan d'eau. La gravière a en réalité été exploitée de manière industrielle (par la société du Port Montain) entre 1995 et 2003, pour aboutir à sa forme actuelle et avec un réaménagement. L'étude révèle le caractère singulier de cette gravière en raison de son ancienneté (une des premières gravières en exploitation dans la Bassée), mais aussi par la durée de son exploitation (59 ans). La gravière ISLE est exploitée par A2C Granulats depuis 1994, et la dernière modification de superficie date de 2017, avec une durée d'exploitation qui est donc longue (renouvellement du permis d'exploitation). Cependant, cette gravière n'a pas été complètement réaménagée et est donc toujours assez directement connectée aux eaux souterraines. Il reste en effet à A2C une tranche à exploiter, mais sur

une zone qui doit faire l'objet d'une fouille archéologique. Les gravières AULc et AULw, également exploitées par A2C, ont une histoire beaucoup plus simple et courte, avec une exploitation initiée et complétée jusqu'au réaménagement en environ 2 ans.

L'impact de l'âge sur le fonctionnement des gravières est en particulier attendu pour la connectivité hydraulique au niveau des berges et du fond, qui tendent à se colmater au cours du temps par le dépôt de matière organique et d'autres matériaux fins. Les méthodes de réaménagement ont également varié au cours du temps. Ainsi, avant les années 1960-1970, les actions de réaménagement étaient quasiment absentes. Dans les années 1980-2000, les réaménagements comportaient un étalement de terre végétale sur les berges, les rendant globalement imperméables, mais avec des pentes fortes, et les milieux étaient laissés à l'abandon, entraînant une reconquête par la forêt alluviale et une fermeture des berges par une ripisylve. Depuis les années 2000, les réaménagements dits écologiques consistent à reprofiler les berges avec des pentes plus douces, et à maintenir un milieu ouvert avec des zones humides ou des roselières. L'âge des gravières depuis leur déconnexion aux eaux souterraines pourrait également impacter le fonctionnement biogéochimique via l'intensité des apports en nutriments hérités ou actuels, et des trajectoires pouvant aller vers une eutrophisation. On s'intéresse donc non pas à la date d'ouverture mais à la date de réaménagement des gravières, qui doit correspondre à la date de dernière modification observée dans CIME-B (sauf pour la gravière Ferme d'Isle).

L'échantillon des gravières est relativement représentatif de la distribution d'âges de " fermeture ", avec la plus ancienne gravière (VEZG) qui a environ 45 ans, deux gravières (T6G4 et HAYE) d'environ 30 ans, la gravière de la Cocharde réaménagée il y a une vingtaine d'années (de même que T6G2 mais cette gravière a été abandonnée), et T7G3 et les quatre gravières exploitées par A2C (ISLE, NEUV, AULc, AULw) qui ont moins de 10 ans (voire ne sont pas encore réaménagées pour ISLE et AULw).

1.3.4 Autres points (économie, histoire, géographie. . .)

Dans les années 1950, les exploitations étaient de petite taille, le plus souvent exploitées par des particuliers. Aujourd'hui, avec des dossiers administratifs lourds et longs à monter, seules quelques grandes sociétés exploitent les carrières. Les carrières sont parfois de plus grande taille avec des exploitations par tranches successives sur plusieurs années voire dizaines d'années, sans que cela ne constitue la règle générale. Les autorisations d'exploitations s'étendent généralement sur 12 ans. Une logique spatiale de l'ouverture des gravières depuis l'aval de la plaine vers l'amont au fur et à mesure de l'épuisement de la place disponible peut être identifiée, mais il existe encore des gravières en exploitation et des ouvertures à l'aval de la plaine.

2 Caractérisation biogéochimique

2.1 Campagnes d'échantillonnage

Entre 2017 et 2021, cinq campagnes d'échantillonnage ponctuel des gravières et chenaux abandonnés ont été réalisées (Figure 3). Deux campagnes ont été réalisées dans des conditions de hautes eaux (ou juste avant un pic de crue pour mars 2017), et trois en conditions de basses eaux, même si les niveaux d'eau n'étaient que juste sous la valeur médiane du débit de la Seine à Bazoches-les-Bray ($44,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Le nombre de sites échantillonnés a augmenté d'une campagne à l'autre, et les 4 gravières les plus récentes ont été échantillonnées seulement une seule fois en septembre 2021 (Figure 3).

L'échantillonnage des gravières et des chenaux abandonnés a été réalisé depuis la berge à l'aide d'un seau jeté au bout d'une corde. L'aliquotage des échantillons pour les différentes analyses a été réalisé à partir de cette eau échantillonnée, dite eau brute. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés directement dans le seau (température T, conductivité électrique, pH, concentration en oxygène dissous O_2). Lorsqu'ils étaient

disponibles, des piézomètres dans les alluvions ou dans la craie ont été échantillonnés à proximité immédiate des gravières. Les piézomètres ont été purgés à l'aide de cannes d'échantillonnages, puis les échantillons d'eau brute prélevés, et les mêmes paramètres physico-chimiques mesurés directement dans les piézomètres.

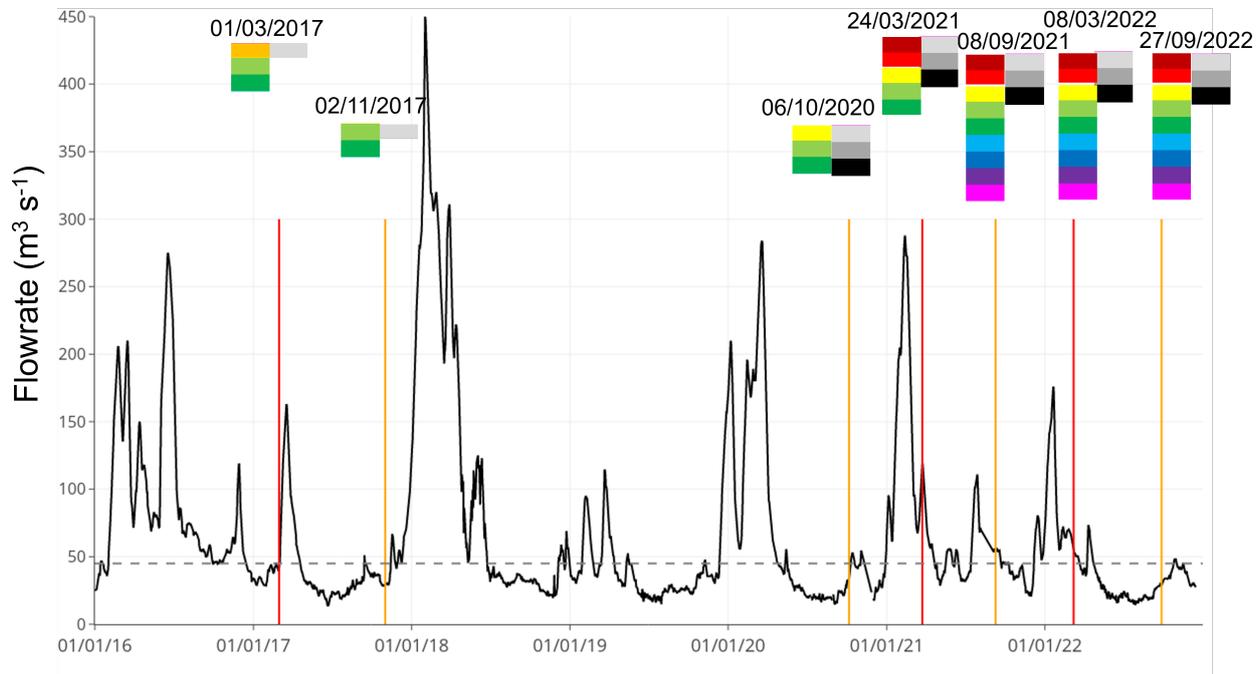


Figure 3. Chronique du débit de la Seine mesuré à Bazoches-les-Bray (source = Banque Hydro www.hydro.eaufrance.fr). Les campagnes sont indiquées par les lignes verticales (rouge pour hautes eaux, orange pour basses eaux), avec la représentation des sites échantillonnés (chenaux abandonnés et gravières, voir le code couleur dans le Tableau 1). Le débit médian est indiqué par la ligne pointillée grise.

Des échantillons pour l'analyse des concentrations en anions et cations, en nutriments et en alcalinité ont été filtrés ($0,7 \mu\text{m}$ de porosité, GF/F, filtration sous vide). Les échantillons pour le Carbone Organique Dissous (COD) et pour la caractérisation par fluorescence de la matière organique dissoute (MOD) ont été filtrés juste après le prélèvement à $0,70 \mu\text{m}$ sur des filtres Whatman GF/F pyrolysés à $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Les échantillons pour la caractérisation de la MOD ont été stockés à l'abri de la lumière et à $4 \text{ }^\circ\text{C}$ avant les analyses. Les échantillons pour les isotopes stables de l'eau n'ont pas été filtrés, et ceux pour les isotopes stables du carbone du carbone inorganique dissous (DIC) ont été filtrés à $0,7 \mu\text{m}$. Les échantillons d'eau brute pour les gaz à effet de serre (CH_4 , N_2O) ont été prélevés sans bulle dans des flacons en verre avec un septum, et conservés avec du chlorure mercurique (HgCl_2). Une filtration a été réalisée pour la mesure de la chlorophylle a (seulement à partir de septembre 2021). A partir de septembre 2020, des mesures de pression partielle en CO_2 ont été réalisées par équilibration directe en seringue et mesure par absorption infra rouge directement sur le terrain (Koschorreck et al 2021).

Les analyses ont été réalisées à l'UMR METIS de Sorbonne Université (Paris) par chromatographie ionique pour les anions, ICP-MS pour les cations, et spectroscopie optique pour les nutriments, le COD et la chlorophylle a. Les analyses des GES (CO_2 , CH_4 , N_2O) ont également été réalisées à l'UMR METIS. La titration pour l'alcalinité a été réalisée dans les 48 h suivant le prélèvement. Les analyses par spectroscopie optique (fluorescence 3D et absorbance UV-Visible) de la MOD ont été réalisées au laboratoire EPOC (Bordeaux). Les analyses d'isotopes stables $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{13}\text{C}$ -DIC sont réalisées au GEOTOP-UQAM (Montréal, Canada)

Le suivi de la variation du niveau d'eau est un paramètre clé pour comprendre les flux d'eau au sein des gravières, mais également les flux d'échange avec les alluvions. Depuis 2019, des mesures de l'altitude de

la surface des gravières ont été réalisées à chaque campagne par GPS différentiel (Leica). La correction des mesures est réalisée en post-traitement à partir de stations fixes (données RGF) et d'un plug-in dans ArcGIS. Les mesures dupliquées pour un même point diffèrent parfois de plus de 50 cm, et la méthodologie doit donc encore être précisée. Les hauteurs d'eau dans les piézomètres, les gravières T7G3e, T6G2e et le chenal abandonné T6B5e sont mesurées en continu par les sondes des systèmes LOMOS (Local Monitoring System). Lors de chaque mission, des mesures directes des niveaux d'eau des gravières T7G3 et T6G2 ont été réalisées par sondes limnimétriques. Pour le bras mort T6B5e, les mesures directes ont été faites par nivellement (théodolite) à partir de 2021. Ces mesures peuvent ensuite être corrigées en altitudes absolues grâce au nivellement des têtes de puits.

2.2 Bilan hydrique et flux d'eau

Un bilan hydrique avait été réalisé pour la gravière de la Cocharde COCH pour l'année 2017-2018 à partir des mesures météorologiques réalisées *in situ* (Guillon et al., 2019). Les précipitations annuelles mesurées par la station météo déployée sur la gravière étaient de 702 mm an⁻¹. Une évaporation de 1122 mm an⁻¹ avait été calculée par la formule de Penman pour l'eau libre. Ces valeurs seront à réinterpréter par rapport à la pluviométrie moyenne fournie par la réanalyse SAFRAN (Météo France) sur une maille de 8 km de côté. Il existe une forte incertitude sur l'intensité de l'évaporation au niveau des gravières, mais celle-ci est probablement supérieure à la pluie.

Les gravières ne présentent ni apports de surface (le ruissellement est négligeable), ni exutoire. Leur bilan hydrique se résume donc aux entrées GWin et sorties GWout d'eaux souterraines, aux précipitations P et à l'évaporation E :

$$\frac{dV}{dt} = P + GWin - E - GWout \quad (1)$$

Pour la gravière de la Cocharde, mais plus généralement pour toutes les gravières, en bilan annuel net, le volume d'eau dans les gravières est stable ($dV/dt = 0$). Il existe donc a priori un déficit d'apport en eau de 420 mm an⁻¹, qui est complété par un apport équivalent d'eau. Cet apport net d'eau souterraine est ainsi estimé pour la Cocharde en 2017-2018 à 59,7 10³ m³ an⁻¹, soit environ 10% du volume de la gravière. Cette approche ne permet cependant pas de quantifier séparément les intensités des flux entrants et sortants d'eau souterraine. Ce bilan net cache par ailleurs des flux nets mensuels qui peuvent être plus intenses, ou de sens inverses. En 2018, le marnage annuel observé est d'un mètre pour la gravière de la Cocharde et pour les deux gravières suivies en continu par les dispositifs LOMOS, valeur supérieure à la moyenne de 0.65 m observée hors crue de la Seine (A. Jost, com. pers.). Pour mieux contraindre la dynamique des flux d'eau, il est nécessaire de disposer d'un suivi de la variation de volume dans les plans d'eau. Si la bathymétrie est connue (ce qui est le cas pour la Cocharde et pour les gravières exploitées par la société A2C), un suivi de la variation de la hauteur d'eau sera suffisant. Ces informations de hauteur d'eau sont malheureusement mal renseignées lors des campagnes d'échantillonnage. En effet, des mesures au DGPS ont été réalisées, mais avec des précisions en altitude qui s'avèrent médiocres, même après correction.

Les isotopes stables de l'eau sont une autre méthode directe pour quantifier la contribution de l'eau souterraine au bilan hydrique (Arnoux et al., 2017; Gibson et al., 2016). La Figure 4 présente les compositions en isotopes stables de l'eau, pour les gravières ainsi que la nappe alluviale et la craie. Les compositions isotopiques de la craie et des alluvions sont regroupées sur la droite des eaux météoriques mondiale (GMWL), ce qui correspond aux attentes et indique une origine météorique des eaux de nappe, par infiltration depuis la surface. La composition moyenne de ces nappes doit par ailleurs correspondre à la moyenne pondérée des compositions des précipitations locales, ce qui sera à vérifier. Les points de composition isotopique de l'eau pour les gravières s'alignent sur une droite de pente 4.7, sous la droite des eaux météoriques mondiale (Figure 4), et qui correspond à une droite d'évaporation locale (LEL). L'évaporation entraîne en effet un enrichissement en isotopes lourds dans le plan d'eau, et une augmentation des valeurs de $\delta^{18}O$ et de δ^2H . La valeur de la pente de cette droite

d'évaporation locale traduit les conditions d'humidité locale (Arnoux et al., 2017; Gibson et al., 2016).

L'approche isotopique permet une quantification indépendante du rapport E/I, entre le flux d'évaporation E et le flux entrant I, égal à la somme de l'apport d'eau souterraine GWin et aux précipitations. Gibson et al. (2016) montrent que la relation suivante s'applique :

$$\frac{E}{GWin + P} = \frac{\delta I - \delta L}{\delta E - \delta L} \quad (2)$$

Où :

δL correspond à la composition isotopique (O ou H) dans la gravière ;

δE à la composition isotopique de la composante évaporée pouvant être calculée à partir des paramètres météorologiques (humidité moyenne de l'air, température moyenne de l'air) ;

δI à la composition des apports, déterminée par la composition moyenne des nappes et de la pluie, et correspond à l'intersection avec la droite météorique, soit -6.2 ‰ pour le $\delta^{18}O$.

Une valeur de -15,2 ‰ pour $\delta^{18}O$ avait été calculée pour la Cocharde (Jézéquel and Guillon, 2017), ce qui avait amené à une valeur E/I de 0,45 pour la gravière de la Cocharde. Les valeurs moyennes pour l'évaporation ($E = 1122 \text{ mm an}^{-1}$) et les précipitations ($P = 702 \text{ mm/an}$) sont supposées connues (cf ci-dessus), les apports à la gravière sont définis par $I = P + GWin$. Connaissant E/I, on détermine alors le flux entrant d'eau souterraine $GWin = 1791 \text{ mm an}^{-1}$, et ensuite le flux sortant, $GWout = GWin - 420 = 1371 \text{ mm an}^{-1}$.

Ces quantifications de flux seront à valider à partir des valeurs consolidées pour l'évaporation et les précipitations annuelles. Les estimations de flux d'eau souterraine et de temps de résidence de l'eau devront alors être déterminées pour chaque gravière échantillonnée et comparées aux caractéristiques géométriques (surface / volume) et aux âges des gravières, pour chercher une éventuelle évolution des échanges gravière – eaux souterraines au cours du vieillissement. La variabilité saisonnière du signal isotopique devra également être analysée plus finement pour tenter d'identifier les périodes d'apport net en eau souterraine des effets du remplissage par la pluie ou de l'évaporation.

Enfin, la conductivité électrique est une variable qui peut être mesurée en continu et qui permet de préciser les termes du bilan hydrique, avec une méthodologie proposée pour la Cocharde (Guillon et al., 2019). En l'absence de réactions (bio)chimiques, la conductivité doit en effet tracer le mélange entre la pluie (très peu conductrice) et les eaux souterraines (très conductrices), et l'effet de concentration des ions lié à l'évaporation. Un tel bilan pourrait également être testé sur des ions non réactifs tels que Na^+ ou Cl^- . Les réactions biochimiques peuvent altérer ce bilan. Les ions Ca, cations majoritaires dans les eaux des alluvions et des gravières, sont impliqués dans la précipitation / dissolution de la calcite. En été, la baisse de conductivité observée (dans la Cocharde en 2018, mais aussi dans les autres gravières), ne peut pas être expliquée par les apports d'eau souterraine ni par l'évaporation (qui domine sur les précipitations en été). Elle signe donc la précipitation de calcite.

Les trois méthodes utilisées de manière complémentaire pour la quantification des flux d'eau donnent des visions tout à fait cohérentes, avec une eau de gravière qui est issue d'une petite proportion de pluie, corrigée de l'évaporation, et d'une forte contribution de la nappe (de la nappe alluviale ainsi que de la craie par drainance ascendante, la proportion entre les deux étant à préciser).

2.3 Fonctionnement biogéochimique

On s'intéresse ici à la géochimie des ions majeurs et des nutriments, avec un intérêt particulier porté aux flux de C, en lien avec les processus biogéochimiques qui peuvent avoir lieu dans les gravières (dégazage, précipitation ou dissolution de calcite, respiration, dénitrification, photosynthèse). A partir des données ponctuelles dans les compartiments, gravières, chenaux abandonnés, craie et alluvions, on a tenté d'identifier les principaux processus à l'œuvre et de proposer des quantifications de flux. La dynamique temporelle et la quantification fine des flux requièrent un suivi plus régulier, comme cela a pu être effectué sur la Cocharde.

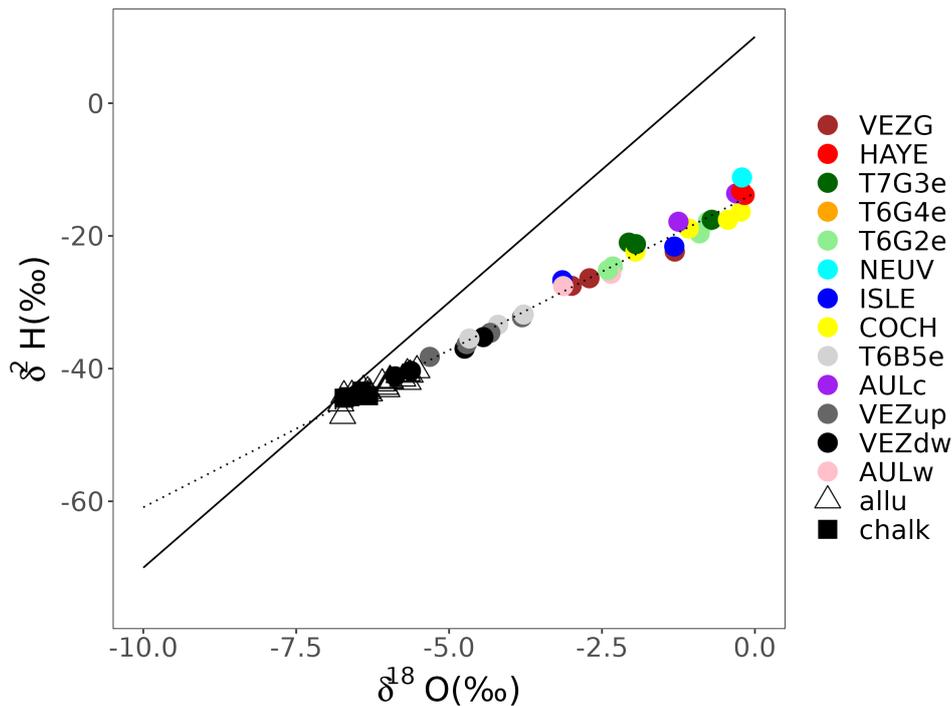


Figure 4. Composition des isotopes stables de l'eau mesurée dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale et la craie. La droite des eaux météoriques mondiales (GMWL $\delta^{18}\text{O} = 8 \delta^2\text{H} + 10$) et la droite d'évaporation locale (LEL $\delta^{18}\text{O} = 4.7 \delta^2\text{H} - 13.6$) sont indiquées.

Le Tableau 2 donne les compositions moyennes pour les 4 compartiments échantillonnés. Il est à noter que les valeurs pour la craie correspondent dans ce Tableau 2 à un unique point de mesure (T6G2c). D'autres piézomètres dans la craie ont été échantillonnés en bordure de la Seine, qui donnent des compositions très similaires.

Les ions majoritaires sont le Ca^{2+} et les bicarbonates HCO_3^- . Comme attendu, la conductivité moyenne est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface, avec une conductivité dans les gravières proche de celle dans la Seine. Ceci traduit une minéralisation plus élevée dans les eaux souterraines (où des interactions eau-roche ont lieu), et une dilution par les précipitations dans les eaux de surface.

La concentration en ions Ca^{2+} est plus élevée dans les alluvions et la craie ($3,1$ et $3,3 \text{ mmol L}^{-1}$ respectivement) que dans les gravières ($1,4 \text{ mmol L}^{-1}$) (Tableau 2 et Figure 5a). Ceci peut être dû à la dilution ou à la précipitation de calcite CaCO_3 dans les eaux de surface. Les données pour les différents compartiments mesurés s'alignent sur la droite de pente 2, ce qui traduit un contrôle des concentrations par l'équilibre de dissolution / précipitation de la calcite CaCO_3 . Les points pour la craie sont en dessous de la droite (Figure 5a).

L'alcalinité est également plus élevée dans les alluvions et la craie ($5,1$ et $4,8 \text{ mmol L}^{-1}$ respectivement) que dans les gravières ($2,3 \text{ mmol L}^{-1}$) (Tableau 2 et Figure 5a). Ceci peut là encore être relié à la dilution ou à la précipitation de calcite.

Le pH est autour de 7 dans les eaux souterraines, mais affiche des valeurs plus basiques (autour de 8,5) dans les gravières, en lien avec un possible dégazage de CO_2 et/ou une activité de photosynthèse qui consomme le CO_2 .

Les concentrations en ion Cl^- , qui peut être considéré comme un ion non réactif et traceur des processus de mélange, sont faibles et globalement homogènes entre les compartiments.

Les concentrations en nitrates sont les plus élevées dans la nappe de la craie ($0,73 \text{ mmol L}^{-1}$), probablement en lien avec les pratiques agricoles sur la plaine. Les teneurs diminuent dans les alluvions et surtout dans les eaux

Tableau 2. Compositions chimiques moyennes mesurées dans les gravières, les alluvions, la craie et les chenaux abandonnés. Le nombre d'analyses disponibles (sites x campagnes) est indiqué entre parenthèses.

		Gravel pit N=42	Alluvium N=31	Chalk N=7	Abandoned ch. N=15
σ_{25}	$\mu\text{S cm}^{-1}$	314 ± 96	742 ± 292	679 ± 111	376 ± 74
pH		8.3 ± 0.5	7.2 ± 0.3	7.0 ± 0.1	7.9 ± 0.1
Alkalinity	mmol L^{-1}	2.1 ± 0.8	5.1 ± 0.9	5.1 ± 0.9	4.3 ± 4.4
COD	mg C L^{-1}	4.8 ± 1.6	1.8 ± 0.7	1.1 ± 0.3	3.3 ± 0.6
pCO_2	ppmv	1092 ± 2350	19453 ± 8593	22574 ± 6411	2770 ± 4011
$\delta^{13}\text{C}$	‰	-6.4 ± 2.7	-14.4 ± 1.5	13.9 ± 0.5	-9.7 ± 1.6
chl a	$\mu\text{g L}^{-1}$	4.7 ± 5.7	0.3 ± 0.3	N.A	5.0 ± 3.8
Ca^{2+}	mmol L^{-1}	1.14 ± 0.48	3.06 ± 1.25	3.23 ± 0.38	1.57 ± 0.39
NO_3^-	mmol L^{-1}	0.06 ± 0.13	0.46 ± 0.44	0.81 ± 0.16	0.10 ± 0.10
Cl^-	mmol L^{-1}	0.63 ± 0.16	1.14 ± 1.48	0.77 ± 0.05	0.41 ± 0.05
SiO_2	mgSi L^{-1}	1.25 ± 1.44	5.06 ± 0.70	5.64 ± 0.49	3.02 ± 1.54

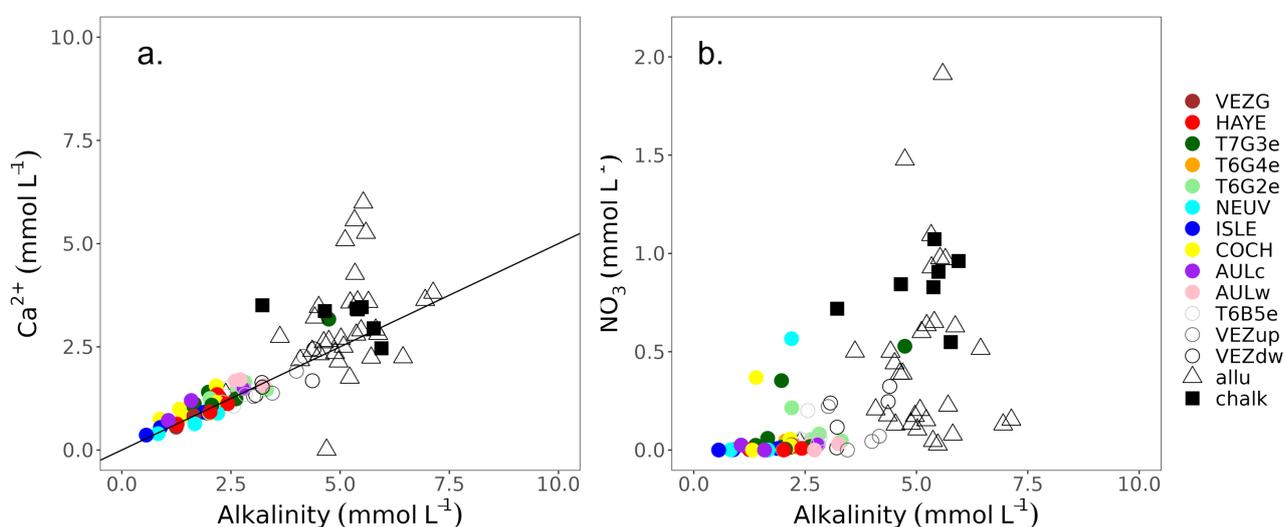


Figure 5. Relations entre l'alcalinité et la concentration en Ca^{2+} (a), ou la concentration en nitrates (b) dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale ou la nappe de la craie.

de surface (voir aussi la Figure 5b). La dilution peut là encore contribuer, mais des processus de dénitrification peuvent avoir lieu dans les zones moins oxygénées des berges et des sédiments de fond de gravière, ainsi qu'à l'interface eau de surface / eau souterraine.

2.4 Comportement du carbone

2.4.1 Flux de carbone

Les pressions partielles en CO_2 peuvent être calculées à partir du pH et de l'alcalinité. Les teneurs moyennes sont de 2 ‰ dans les eaux souterraines, alluvions et craie, et de 2000 ppm (0,02 ‰) dans les gravières, mais avec une variabilité spatiale et temporelle importante, surtout dans les gravières (Figure 6a). Les teneurs élevées en CO_2 dans les eaux souterraines sont issues de la minéralisation de la matière organique du sol, avec un pH proche de 7 associé au tampon carbonate. Lorsque les eaux souterraines alimentent les eaux de

surface, le CO₂ en excès dégaze, entraînant une augmentation de pH, ce qui est bien identifiable sur la Figure 6a. Ce flux de dégazage de CO₂ est à combiner à celui causé par la respiration (production de CO₂) et la photosynthèse (consommation de CO₂), pour déterminer le flux net de CO₂ des gravières. Les valeurs de pCO₂ mesurées dans les gravières VEZG, HAYE, T7G3e sont entre 300 et 500 ppm, soit autour de l'équilibre avec l'atmosphère : ces gravières pompent ou émettent le CO₂* selon les périodes, et la quantification précise demandera une étude plus détaillée dans le temps. Les teneurs en CO₂ mesurées dans la gravière T6G2e sont toujours supérieures à 1000 ppm, indiquant une gravière où la respiration est supérieure à la photosynthèse et qui libère toujours du CO₂. Les mesures pour COCH montrent une sursaturation avec des teneurs entre 500 et 600 ppm, mais le suivi en continu avait mis en évidence des sous saturations transitoires au printemps, probablement associées à des blooms phytoplanctoniques. Les récentes mesures dans les gravières les plus récentes et en cours d'exploitation, réalisées en septembre 2021 et non présentées dans ce rapport, donnent des teneurs très faibles en CO₂ (en lien avec des pH supérieurs à 9, de fortes sur-saturations en oxygène (> 140 %), traduisant une activité photosynthétique importante.

2.4.2 *Composition isotopique du carbone*

Les isotopes stables du carbone (Figure 6b) permettent de tracer les sources et les processus. Dans les eaux souterraines, la composition isotopique $\delta^{13}\text{C-DIC}$ est comprise entre -12 et -16 ‰. La composition isotopique pour la matière organique des plantes en C3 est $\delta^{13}\text{C} = -25$ ‰ et est identique pour le CO₂ qui en est issu (Deines et al., 1974). Il existe en revanche un fractionnement isotopique à l'équilibre de 10 ‰ entre CO₂ et HCO₃⁻, l'espèce majoritaire à pH 7 dans les aquifères (Mook et al., 1974). La composition isotopique $\delta^{13}\text{C-DIC}$ observée dans les eaux souterraines est donc tout à fait en accord avec une origine par minéralisation de la matière organique du sol.

Dans les eaux de surface (gravières et chenaux abandonnés), le dégazage du CO₂ est associé à un fractionnement isotopique cinétique, avec un dégazage plus rapide des isotopes légers ¹²C, et un enrichissement en isotopes lourds dans le CO₂ résiduel, soit une augmentation du $\delta^{13}\text{C}$. C'est ce qui est observé dans les gravières (Figure 6b), où un dégazage de CO₂ a lieu, probablement depuis les eaux souterraines riches en CO₂. L'équilibre isotopique entre le CO₂ des gravières et le CO₂ atmosphérique ($\delta^{13}\text{C} = -8$ ‰) donnerait une valeur de $\delta^{13}\text{C-DIC}$ autour de 0 ‰ dans les gravières, ce qui est différent des mesures. L'équilibre isotopique n'est pas atteint malgré une pression partielle proche de la saturation, et d'autres processus biologiques viennent altérer la composition isotopique.

Les valeurs des indices de saturation vis-à-vis de la calcite sont variables selon les gravières et dans l'espace. Pour la campagne d'avril 2021, toutes les gravières étaient sur-saturées vis-à-vis de la calcite, qui y précipitait donc. En 2017, les résultats indiquaient à l'inverse une sous-saturation pour des gravières relativement riches en CO₂.

2.4.3 *Dynamique de la matière organique*

Les teneurs en COD moyennes sont de 1.1, 1.8 et 4.0 mg/L dans la craie, les alluvions et les gravières, respectivement (Tableau 2 et Figure 7a), avec des teneurs significativement plus élevées dans les eaux de surface par rapport aux eaux souterraines. Les eaux de surface peuvent en effet être alimentées en matière organique allochtone (par exemple les feuilles des arbres de la ripisylve) mais aussi autochtone, avec une activité biologique importante (respiration et photosynthèse). On observe que la teneur en COD augmente quand l'alcalinité diminue, depuis la craie et les alluvions vers les gravières (Figure 7a). Comme expliqué plus haut, les faibles valeurs d'alcalinité (et concentrations en Ca²⁺) dans les gravières sont expliquées par la précipitation de calcite en lien avec une photosynthèse intense, ce qui est cohérent avec les teneurs élevées mesurées en COD.

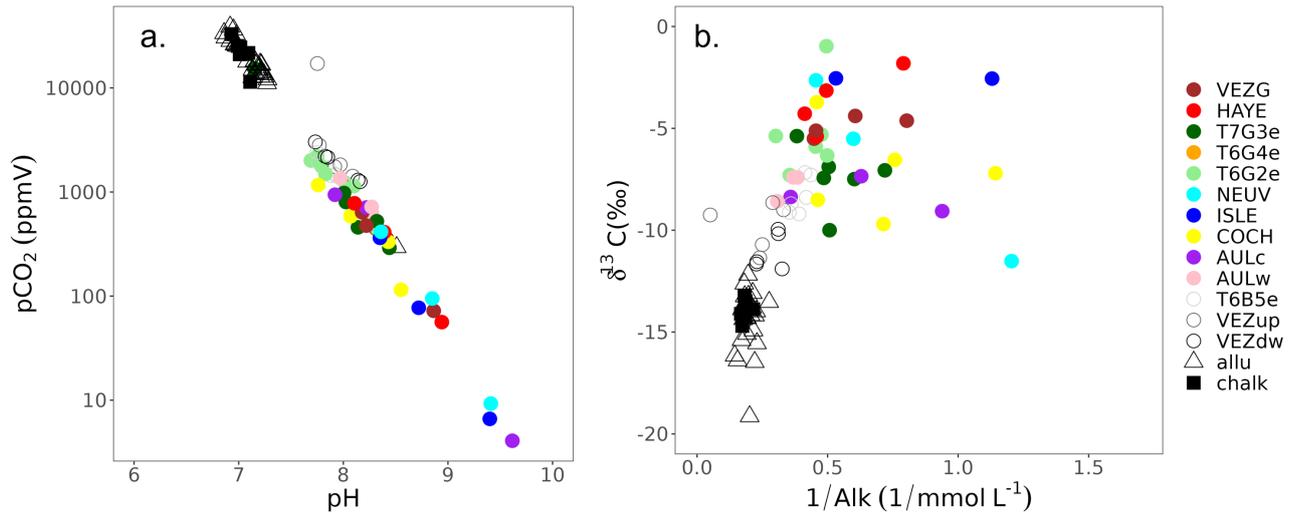


Figure 6. Relations entre la pression partielle en CO₂ et le pH (a), entre la composition isotopique du carbone du DIC et la teneur en DIC (b) dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale et la nappe de la craie.

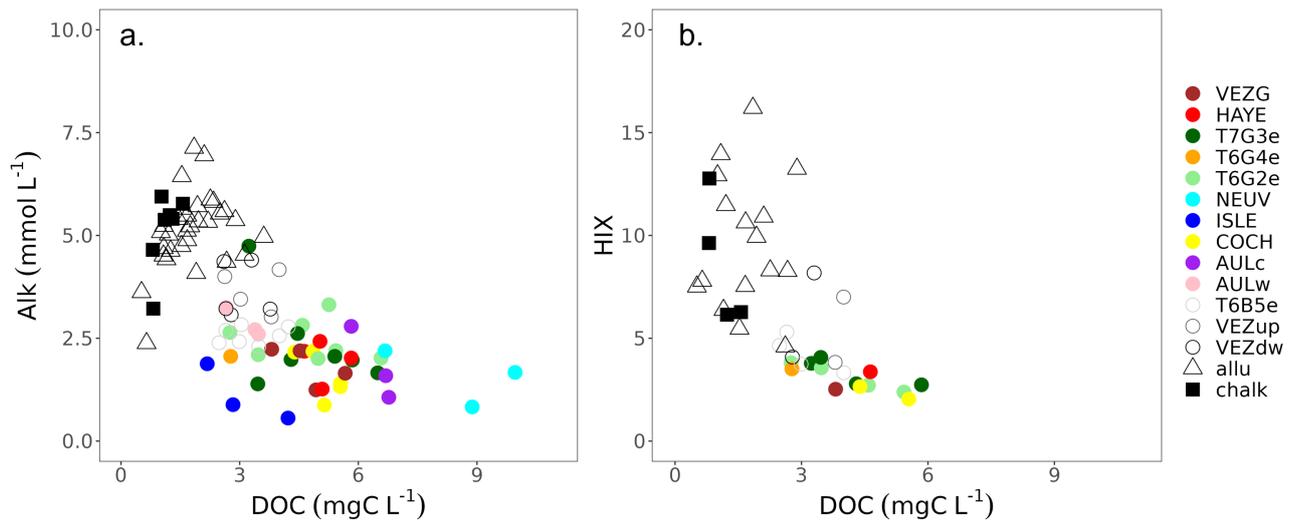


Figure 7. Relations entre la teneur en carbone organique dissous et l'alcalinité (a), ou l'indice HIX (indice d'humification, voir le texte pour plus de détails) (b) dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale et la nappe de la craie.

Les indices d'humification HIX (lié à l'aromaticité/maturité de la MOD) et de production autochtone récente BIX (lié à l'activité biologique dans le milieu) renseignent sur les sources et les propriétés du carbone organique dissous, et en particulier sa biodisponibilité (?). Les valeurs moyennes de HIX (7.3, 9.8, 2.6 dans la craie, les alluvions et les gravières, respectivement) restent modérées (inférieures à 10), ce qui caractérise une MOD constituée de molécules peu aromatiques et relativement biodisponibles. La signature des gravières se démarque avec une MOD de plus petite taille (valeurs les plus élevées de l'indice SR, non présenté ici) et d'origine biologique autochtone majoritaire, renforçant l'interprétation issue des teneurs élevées en COD, d'une activité métabolique soutenue et un réservoir de carbone organique labile et rapidement renouvelé. L'abondance de COD récent et biodisponible dans les gravières doit aussi soutenir une activité de respiration, qui tendrait quant à elle à s'opposer à l'augmentation de pH et à la précipitation de calcite, ce qui participerait à la variabilité

saisonnaire. Les valeurs moyennes de l'indice BIX sont entre 0,85 et 0,95 dans tous les compartiments (données non montrées). Ces valeurs supérieures à 0,8 traduisent la présence de matière organique récente et d'origine autochtone, et indiquent donc une forte activité biologique présente à la fois dans les nappes souterraines et les eaux de surface des gravières et chenaux abandonnés.

2.5 Evolution temporelle du fonctionnement biogéochimique des gravières

Le suivi sur la gravière de la Cocharde COCH réalisé en 2017-2018 avait montré une augmentation de la conductivité en hiver / hautes eaux, traduisant un apport net d'eaux souterraines, supérieur à la dilution par la pluie (Guillon et al., 2019). En période chaude / basses eaux, la baisse de conductivité allait dans le sens opposé à la concentration attendue pour une évaporation nette, traduisant la précipitation de calcite (Guillon et al., 2019). La conductivité (et le calcium) sont des traceurs réactifs, qui intègrent les effets de mélanges / flux d'eau, mais aussi des processus biogéochimiques, et permettent d'identifier les variations saisonnières du fonctionnement biogéochimique.

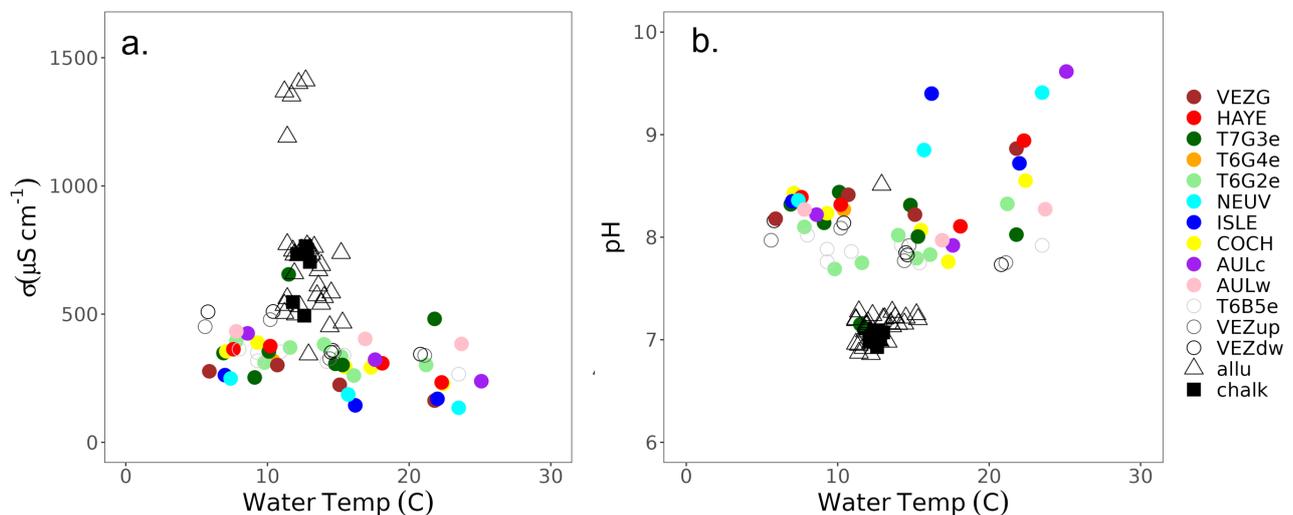


Figure 8. Evolution de la conductivité spécifique (a) et du pH (b) mesurés dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale et la nappe de la craie, en fonction de la température de l'eau au moment de la mesure.

Les différentes campagnes de prélèvements avaient été organisées pour couvrir les conditions de hautes et basses eaux. Ces conditions contrôlent en effet les écoulements d'eau entre la Seine, la nappe alluviale et les gravières, et pouvait être un facteur de contrôle des flux et de la dynamique du carbone. Cependant, il n'a pas été trouvé de tendance significative pour les différentes variables mesurées en fonction de cet état hydrologique. En revanche, la température de l'eau, qui peut être interprétée comme un proxy de saisonnalité mais aussi d'activité biologique, a été retenu comme variable contrôlant le fonctionnement biogéochimique des masses d'eau, et en particulier des gravières, pour lesquelles l'amplitude thermique annuelle est significative.

La Figure 8 présente l'évolution de la conductivité spécifique et du pH mesurés dans les différentes masses d'eau, en fonction de la température de l'eau au moment de la mesure. La conductivité électrique tend à diminuer pour les températures élevées, ce qui confirme que le processus de précipitation de calcite observé en période chaude dans la gravière de la Cocharde est général. En période chaude, les valeurs de pH montrent une dispersion plus importante, avec en particulier des valeurs élevées (> 8,5) dans certaines gravières, qui signent là encore l'augmentation de l'activité photosynthétique en période chaude.

La Figure 9 met également en évidence la variabilité temporelle des indices de fluorescence de caractérisation

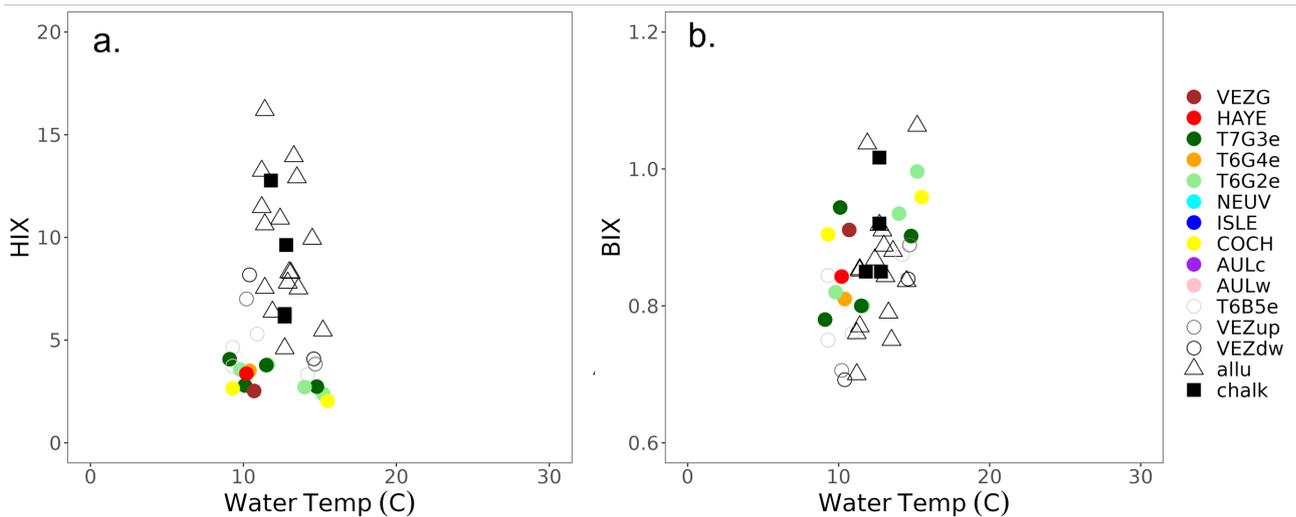


Figure 9. Evolution des indices de caractérisation de la MOD mesurés dans les gravières, les chenaux abandonnés, la nappe alluviale et la nappe de la craie, en fonction de la température de l'eau au moment de la mesure. (a) HIX, humification/aromaticité et (b) BIX, production autochtone récente/activité biologique.

de la MOD, HIX et BIX, calculés pour les eaux de surface des gravières et chenaux abandonnés échantillonnées de mars 2017 à mars 2021. Les propriétés de la MOD restent cependant similaires pour toutes les dates, avec une très forte signature liée à l'activité biologique quelle que soit la date. Par comparaison aux résultats obtenus pour les eaux de rivière échantillonnées en mars et novembre 2017, nous avons montré que les caractéristiques de la MOD des eaux des gravières étaient peu impactées par les conditions hydrologiques (?). Nous n'avons cependant jamais pu échantillonner en réelles conditions de crue ni d'étiage, ce qui permettrait de mieux appréhender la variabilité spatio-temporelle des propriétés de la MOD.

L'évolution temporelle des paramètres biogéochimiques mesurés dans les gravières entre 2017 et 2022 met en évidence une variabilité saisonnière (mais également interannuelle) importante. Cette variabilité pourrait permettre, pour chaque gravière, de quantifier des processus et des flux, comme cela avait été proposé pour la gravière de la Cocharde (?). Par exemple, pour chaque gravière, l'intensité de la variation saisonnière de la conductivité électrique permet de quantifier la précipitation estivale de calcite, voire de quantifier l'intensité de l'apport d'eau souterraines.

Conclusions et perspectives

Une base de données des caractéristiques de géométrie et d'histoire d'exploitation a été réalisée à partir d'images aériennes actuelles et passées. Elle concerne 523 masses d'eau, chenaux abandonnés et gravières dans la plaine de la Bassée. Cette base de données évolue chaque année avec la poursuite de l'exploitation et l'ouverture de nouvelles gravières. La diversité des caractéristiques des plans d'eau a été décrite. Neuf gravières ont été échantillonnées à l'occasion de 5 campagnes entre 2017 et 2021, en conditions de hautes et basses eaux. La représentativité de cet ensemble par rapport à la totalité des plans d'eau est bonne, même si les gravières de petite surface ne sont pas représentées. Le bilan hydrique des gravières peut être réalisé par plusieurs méthodes, un simple bilan entre les précipitations et l'évaporation, le suivi de la composition isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de l'eau, ainsi que le suivi de la conductivité électrique. Le bilan hydrique a été réalisé pour la gravière de la Cocharde lors de son suivi continu en 2017-2018. A l'échelle annuelle, la contribution des précipitations est inférieure à celle des eaux souterraines. Surimposé à un écoulement régional qui traverse a priori la gravière, il existe ainsi un flux net d'eaux souterraines qui alimente la gravière et comble le déficit entre les précipitation

et l'évaporation. De premières interprétations ont été déduites des analyses de composition chimiques dans les gravières. Les gravières sont ainsi le lieu d'un dégazage important de CO₂, en partie lié à l'arrivée d'eaux souterraines très riches en CO₂. L'activité biologique dans les gravières est importante, avec en particulier une photosynthèse active en période chaude, qui entraîne la précipitation de calcite. Une activité de dénitrification apparaît également liée aux gravières. Ces résultats qualitatifs et quantitatifs seront complétés avec les données de la campagne de septembre 2021, qui a concerné le plus grand nombre de gravières, dont 3 très récentes. Des données complémentaires de chlorophylle, de cinétique de dégradation de la matière organique et de gaz à effet de serre viendront compléter la vision du cycle du C. Une dernière campagne d'échantillonnage en hautes eaux en 2022 doit encore compléter le jeu de données.

Ce travail s'inscrit dans une approche générale de co-construction d'indicateurs dans une dynamique interdisciplinaire, en cherchant à renforcer le lien entre les différents compartiments de l'hydrosystème (lit mineur, lit majeur, nappe, annexes hydrauliques) pour une compréhension globale de son fonctionnement. Ce rapport fournit ainsi de premiers éléments de réflexion qui seront à renforcer pour améliorer la compréhension du fonctionnement biogéochimique des gravières en fonction de la variabilité spatiale (distance à la Seine, répartition longitudinale) et temporelle (âge, date d'ouverture, d'abandon ou types de réaménagement) des masses d'eau de la Bassée. Des indicateurs de trajectoires de fonctionnement des gravières ont pu être identifiés dans ce rapport, qui concernent la variation saisonnière de conductivité électrique, mais aussi, de façon plus intégrée, le flux moyen d'apport d'eaux souterraines, le flux de CO₂ dégazé ou encore le flux de calcite précipitée. Ces indicateurs pourront être analysés au regard de la diversité des caractéristiques des masses d'eau. D'autres indicateurs seraient probablement complémentaires et pertinents pour les acteurs opérationnels du territoire, tels que le phytoplancton (abondance, diversité), les poissons, ou encore la biodiversité des berges. Ils demanderont d'élargir encore le champ d'interdisciplinarité actuel.

Au-delà de l'analyse du fonctionnement des gravières, il pourra enfin s'agir de réfléchir à leurs impacts sur le bilan hydrique et le fonctionnement hydro et biogéochimique de la plaine, en comparaison par rapport à une situation de référence avant la perturbation anthropique.

Remerciements *Les auteurs remercient toutes les personnes et institutions qui ont permis l'acquisition des données sur le terrain. Merci à Didier Jézéquel pour avoir initié les travaux sur la Cocharde. Jean François Hélie et Nelly Assayag sont remerciés pour les analyses des isotopes stables du carbone. Les auteurs remercient particulièrement la Réserve Naturelle de la Bassée pour avoir soutenu les travaux et facilité l'accès aux plans d'eau et piézomètres. L'Agence des Espaces Verts d'Île de France (AEV) et la société A2C Granulats sont également remerciés pour les accès aux différents sites.*

Références

- Arnoux, M., F. Barbecot, E. Gibert-Brunet, J. Gibson, E. Rosa, A. Noret, and G. Monvoisin (2017). Geochemical and isotopic mass balances of kettle lakes in southern quebec (canada) as tools to document variations in groundwater quantity and quality. *Environmental Earth Sciences* 76(3).
- Carré, C. and M. Chartier (2002). La gestion d'une ressource non renouvelable : entre gestion durable et aménagement des nuisances, le cas des granulats alluvionnaires en Île-de-france. *Annales de géographie* 626, 406–418. gravel pit. bassée carrieres alluvionnaires granulats reglementation. history. reamenagement conflits d'usage.
- Deines, P., D. Langmuir, and R. S. Harmon (1974). Stable carbon isotope ratios and existence of a gas-phase in evolution of carbonate ground waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38(7), 1147–1164. OPEN vs CLOSED system CO₂ H₂O CaCO₃ interaction isotopic evolution spring d13C (CO₂) -13 well water -13 per mil PDB soil CO₂ -25 per mil.

- Gibson, J. J., S. J. Birks, and Y. Yi (2016). Stable isotope mass balance of lakes : A contemporary perspective. *Quaternary Science Reviews* 131, 316–328. type of lakes, water budget. dessicating pond, terminal lake (no output), throughflow lake water and isotope budget. fractionation factor, with feedback on atmospheric vapour or not, and equilibrium or not with water vapour local evaporation line (LEL).
- Guillon, S., D. Jézéquel, and A. Groleau (2019). Dynamiques spatiales et temporelles des flux de carbone et du métabolisme des gravières de la bassée, dans sources et dynamique de la matière organique dans le bassin de la seine. Report.
- Jost, A., S. Wang, F. Picourlat, F. Colleoni, T. Verbeke, B. Labarthe, N. Flipo, N. Gallois, F. Baratelli, and A. Rivière (2019). *Les gravières, fenêtres ouvertes sur la plaine de la Bassée dans Fonctionnements hydrogéophysiques et biogéochimiques des interfaces nappe-rivière : conséquences sur la ressource en eau.*, Chapter Volume 4. Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine.
- Jézéquel, D. and S. Guillon (2017). Projet degase : Variabilité temporelle et spatiale des flux de co2 et ch4 et du métabolisme dans deux gravières de la bassée. Report.
- Labarthe, B. and N. Flipo (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. Report.
- Mook, W. G., Bommerso.Jc, and Staverma.Wh (1974). Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon-dioxide. *Earth and Planetary Science Letters* 22(2), 169–176. lab experiments carbon insotope fractionation temperature dependance (high T) à 5°C, deltaCO2 - delta HCO3- = -10 permil.
- Mouhri, A., N. Flipo, F. Rejiba, L. Bodet, A. Jost, V. Durand, and P. Goblet (2013). Caractérisation et quantification spatio-temporelle des échanges hydriques dans la vallée incisée des avenelles. Report.
- Pasquet, J. and J. Thibaut (1997). Estimation des ressources en granulats alluvionnaires du département de la seine-et-marne. Technical Report R39896, BRGM.

Du suivi de la température au sol au suivi thermique par drone, dans la Bassée¹

Cyril Schamper^{1*}, Cyrille Fauchard², Raphaël Antoine², Emmanuel Léger³, Cécile Finco², Romain Levaillant⁴, Agnès Rivière⁵, Nicolas Flipo⁵, Fayçal Rejiba¹

¹ Sorbonne Université, UMR 7619 METIS

² Cerema, Equipe recherche ENDSUM

³ Université Paris Saclay, UMR 8148 GEOPS

⁴ Université de Rouen Normandie, UMR 6143 M2C

⁵ MINES ParisTech, PSL - Research University, Centre de Géosciences, 77 305

* cyril.schamper@sorbonne-universite.fr

Résumé

Le territoire de la plaine alluviale de la Bassée est sujet à de multiples intérêts et à des usages différents : réserve d'eau souterraine, gisement de matériaux alluvionnaires, zone naturelle de grand intérêt écologique, zone récréative, voie navigable, production d'énergie, et implantation d'un casier pilote pour la protection de la Métropole du Grand Paris vis-à-vis des inondations. Préalablement à l'aménagement et réaménagement des plaines alluviales, il s'agit de mieux caractériser les formations superficielles, zones d'interfaces où se déroulent l'ensemble des échanges sur le continuum sous-sol, sol-atmosphère. À ce titre, les flux thermiques à l'échelle de la plaine alluviale constituent des paramètres physiques essentiels permettant d'inférer le fonctionnement hydrogéologique de la plaine alluviale. Dans le cadre de cette étude, un protocole de mesure multiphysique permettant de spatialiser la diffusivité thermique des sols à la mésoéchelle est illustré. Pour cela, l'on propose de spatialiser la diffusivité thermique inférée localement à partir de mesures de températures à plusieurs profondeurs (jusqu'à 50 cm) qui servent de données de calibration, en utilisant comme contraintes auxiliaires 1) des mesures radiométriques acquises par drone et 2) des cartographies géophysiques à plusieurs profondeurs de conductivité électrique. Les premiers résultats indiquent qu'il est possible de spatialiser à la mésoéchelle la diffusivité des sols et du proche sous-sol sous réserve 1) de bien dimensionner les campagnes des mesures infrarouges par drone pour représenter suffisamment de cycles diurnes, 2) de beaucoup mieux estimer l'effet de la végétation sur les mesures IR drone et 3) d'estimer avec suffisamment de précision la variabilité spatiale à l'échelle de la zone d'étude des premiers horizons de sols.

Points clefs

- ✓ Mesures infrarouges thermiques par drone
- ✓ Calibration/validation de données thermiques hors sol
- ✓ Estimation des propriétés physiques thermiques spatialisées

¹ Pour citer cet article : Schamper, C., Fauchard, C., Antoine, R., Léger, E., Finco, C., Levaillant, R., Rivière, A., Flipo, N., Rejiba, F. Trajectoire thermique à l'échelle de la plaine de la Bassée. Du suivi de la température au sol au suivi thermique par drone. Dans Carré, C., Lestel, L., Flipo, N. (eds), *Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 7, 2023, pp. 75 - 106

Abstract

The Bassée alluvial plain is subject to multiple interests and different uses: groundwater reserve, alluvial material deposit, natural area of great ecological interest, recreational area, waterway, energy production, and implementation of a water storage basin for the protection of the Greater Paris Metropolis against floods. Prior to the development and redevelopment of alluvial plains, it is necessary to better characterize surface formations which are the interfaces where all exchanges take place on the subsoil-soil-atmosphere continuum. In this respect, heat flows on the scale of the alluvial plain are essential physical parameters for inferring the hydrogeological functioning of the alluvial plain. In this study, a multi-physics measurement protocol is illustrated for spatializing soil thermal diffusivity at the mesoscale. To this end, we propose to spatialize locally inferred thermal diffusivity from temperature measurements at several depths (down to 50 cm) that serve as calibration data, using as auxiliary constraints 1) radiometric measurements acquired by drone and 2) geophysical mapping at several depths of electrical conductivity. Initial results indicate that it is possible to spatialize soil and near-surface diffusivity at the mesoscale, provided that 1) drone infrared measurement campaigns are properly sized to cover a sufficient number of diurnal cycles, 2) the effect of vegetation on drone IR measurements is much better estimated, and 3) the spatial variability of the first soil horizons at the scale of the study area is estimated with sufficient accuracy.

Key points

- ✓ Thermal infrared measurements by drone
- ✓ Calibration/validation of above ground thermal data
- ✓ Estimation of spatialized thermal physical properties

Sommaire

Introduction	77
1. Présentation de la zone d'étude	78
2. Protocole de traitement des données.....	79
2.1 Sondes de température.....	79
2.2 Thermo-mosaïques infra-rouge (IR) par drone.....	85
2.3 Données géophysiques au sol	88
3. Croisement des résultats des sondes, IR et EM.....	93
3.1 Co-krigeage des résultats des sondes à 5 cm avec la mesure IR comme variable auxiliaire.....	93
3.2 Corrélation des données géophysique EM/électrique avec les données IR et de sondes de température	99
Conclusions & perspectives	104
Bibliographie	105

Introduction

Les plaines alluviales concentrent de forts enjeux de développement urbain, puisque les densités de population les plus fortes se trouvent localisées dans ces secteurs des bassins versants, et que des enjeux socio-écologiques (biodiversité, services écosystémiques, risques) sont particulièrement patents au niveau de cette interface. De plus, un certain nombre d'études pointe l'importance de ces zones dans le fonctionnement écologique des bassins versants, mais il subsiste un important déficit de connaissances à leur sujet, ne serait-ce que pour la quantification des échanges nappe-rivière dans ces secteurs (Flipo et al. 2014).

Une meilleure compréhension de la relation entre les zones urbaines et industrialisées et les fleuves ou rivières autour desquels elles se développent depuis le XIX^e siècle apparaît nécessaire. Cela implique de mieux appréhender le fonctionnement biogéochimique de ces zones et leur métabolisme complexe et très transitoire (notamment en termes de production de gaz à effet de serre), afin d'évaluer leur influence sur les communautés vivantes (micro-organismes, poissons, végétation) et la manière dont les polluants sont transférés en leur sein. L'acquisition de ces connaissances est un défi à relever afin d'améliorer la mise en place des trames vertes et bleues (<http://www.trameverteetbleue.fr/>). Cet enjeu est au cœur des questionnements de la phase 8 du PIREN-Seine qui mobilise ses compétences historiques sur la plaine alluviale de la Bassée. (320 km²).

La plaine alluviale de la Bassée (320 km²), située à 120 km au sud-est de Paris entre la confluence Seine-Aube et la confluence Seine-Yonne, a également fait l'objet de travaux dans le cadre de la mission SWOT (Jost et al. 2017). Elle a mutualisé les efforts au sein du PIREN-Seine lors de la phase 8 (2020-2023) du programme, dans le cadre de l'axe 3 portant sur la « Construction de la qualité des milieux aquatiques conciliant risques hydrologiques et biodiversité ».

La compréhension du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des plaines alluviales requiert une caractérisation des propriétés structurales et hydriques des terrains superficiels incluant l'interface air/sol. Cette caractérisation physique constitue l'élément de contrainte de base vis-à-vis de l'évaluation des flux hydriques à toutes les échelles.

Dans le bassin de la Seine, les hétérogénéités superficielles en contexte de sol nu ou végétalisé sont essentiellement dues au remaniement du remplissage grossier de la période froide (rivière en tresses) par une Seine méandrique au cours de l'Holocène. Les fluctuations climatiques de plus haute fréquence au cours de cette dernière période (quelques milliers d'années) induisent une variabilité hydrologique qui se traduit par des tailles de chenaux variables : certains paléochenaux présentent ainsi des largeurs de plus de 200 m, d'autres de 25-30 m, par rapport à une Seine actuelle de 50 m de large environ. La dynamique de migration du fleuve engendre l'abandon de boucles de méandres (ou de tronçons) comblées au fil des crues par des matériaux fins (argile, limon, matière organique).

Dans le cas spécifique de la Bassée, l'étude exhaustive des fonctionnements passé et actuel repose, entre autres, sur le développement à grande échelle, donc à haut rendement, de l'imagerie des propriétés thermiques (convection mais aussi conduction) de sols nus ou végétalisés. En effet, les échanges thermiques sans couverture végétale sont intrinsèquement liés à la minéralogie et aux conditions hydriques de l'état de surface, alors qu'en présence d'un couvert végétal, la réponse radiométrique infrarouge (IR) intègre une réponse intimement liée à l'évapotranspiration.

Parallèlement à l'imagerie radiométrique concernant l'état de surface, il est important de mettre en œuvre, dans un objectif de calibration, des méthodes d'imagerie géophysique permettant de quantifier l'impact sur le signal thermique de la variabilité structurelle du sous-sol sur une profondeur d'ordre métrique (Rejiba et al. 2018). En effet, la mesure spatialisée et le suivi de la température à plusieurs profondeurs et à différentes échelles de temps, couplés à l'imagerie géophysique au sol de type électromagnétique et électrique, ont déjà permis de caractériser les contributions distinctes provenant des mécanismes de convection et de conduction (Cucchi et al. 2018). Ceux-ci peuvent très fortement varier au gré des contextes sédimentaires (Rivière et al. 2020) et de la recharge moyenne des aquifères (Tabbagh et al. 2017), les flux d'eau ayant une influence non négligeable sur la température du sol traversé. En présence d'un écoulement, la diffusivité apparente peut être déduite de l'amortissement de l'amplitude et/ou du déphasage de la température entre deux profondeurs différentes.

Cette étude de faisabilité illustre, dans le cas d'une parcelle de taille significative, comment l'analyse de données thermiques obtenues par drone et de résultats de mesures géophysiques au sol peuvent servir de support à la spatialisation des propriétés thermiques (*i.e.* diffusivité thermique) inférées à partir de mesures ponctuelles à plusieurs profondeurs.

1. Présentation de la zone d'étude

Dans cette étude, la parcelle est située à quelques mètres de l'écluse du Vezoult, à Noyen-sur-Seine (77), située au cœur de la plaine alluviale de la Bassée. Elle repose sur un socle de craie blanche du Campanien âgé de 54 millions d'années, altéré par la Seine et ses affluents au début de l'ère quaternaire et recouvert par deux couches alluvionnaires (anciennes et récentes). L'analyse pédologique des sondages décrite dans le rapport PIREN-Seine de 2019 (Rejiba et al., 2019) montre des sols en général hydromorphes de type rédoxique (cf. la description pédologique du sondage S5 en Figure 4).

Deux campagnes de mesures thermiques ont été effectuées par drone en avril et juin 2019. Sur cette période, les mesures de températures au sol réparties sur l'ensemble de la parcelle ont été faites à un pas de temps de 15 min. La température locale observée dépend des conditions climatiques et sa variation en profondeur est essentiellement dépendante de la variabilité structurale du sous-sol et de son état hydrique.

L'inférence des propriétés thermiques du sous-sol s'appuie sur la conception d'un modèle thermique qui puisse être concordant avec les températures mesurées à différentes profondeurs. À partir de ce modèle, la force du lien linéaire entre les températures obtenues par drone et au sol peut être évaluée.

Dans ce contexte, la prise en compte de la végétation sur la température « drone » constitue un défi que seules des données complémentaires s'appuyant sur des modèles conceptuels, stochastiques ou pseudo-déterministes, pourront aider à relever.

Des mesures de température à plusieurs profondeurs ont été effectuées ponctuellement sur la parcelle (Figure 1). Chaque sonde de température contient quatre capteurs, situés à 5, 20, 35 et 50 cm de profondeur. La valeur de température enregistrée à 5 cm de la surface est celle utilisée pour une première approche comparative avec les mesures thermiques par drone.

Pour les phases 1 et 2 des 14 avril et 25-26 juin 2019, respectivement 11 et 14 vols thermiques ont été réalisés au-dessus de la zone. Chaque vol permet d'obtenir des orthophotographies ayant une résolution de 4,3 et 5,7 cm, respectivement dans le visible et dans le spectre infrarouge thermique. Un exemple d'orthophotos thermiques est représenté en Figure 2. Ces relevés proviennent du vol thermique de la phase 1 à 10h22 et du vol thermique de la phase 2 à 10h00. Sur ces clichés, la zone rouge (située à l'extrémité ouest de la Figure 2a) et la zone jaune (à l'extrémité ouest de la Figure 2 b) correspondent à l'eau de la Seine. La température relevée (pointée dans la zone rouge ou jaune sur plus de dix points) par drone est de 8,5 à 10,2 °C en phase 1 et de 24 à 27,6 °C en phase 2, alors que la sonde de température correspondante immergée dans la Seine (sonde PTSEINE de la Figure 1) indique 10,1 °C et 23,8 °C, respectivement.



Figure 1. Plan de position des dispositifs de calibration multi-profondeurs de température et des sondages électriques (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S12), des forages à la tarière (S1, S2, S5, MARE OUEST) et de la mesure de la température de la Seine (PTSEINE) ; E1 et E2 indiquent respectivement le début et la fin de la tomographie résistivité électrique de référence. À droite, photo du drone durant l'acquisition.

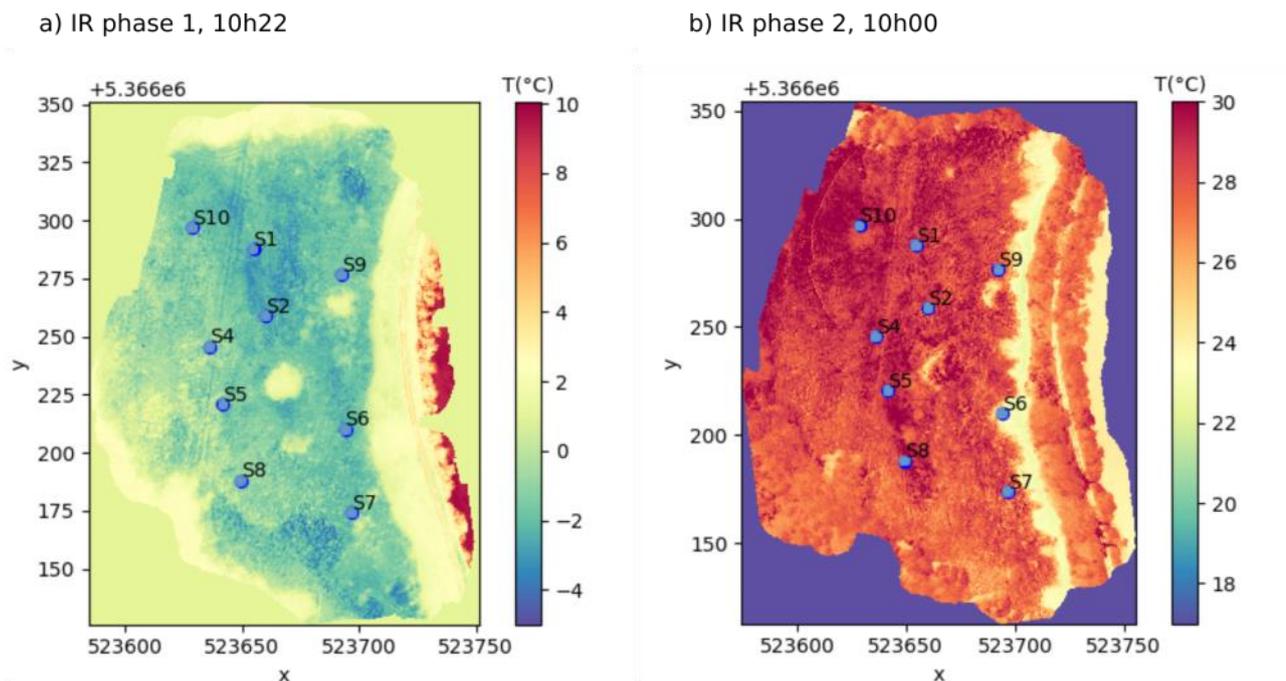


Figure 2. Orthophotographies infrarouges thermiques a) de la phase 1 à 10h22 et b) de la phase 2 à 10h00. Pour plus de lisibilité, les échelles de température sont différentes.

2. Protocole de traitement des données

2.1 Sondes de température

2.1.1 Dispositif et analyses des données brutes

Dix systèmes de mesure de profils de températures ont été implantés sur la zone d'étude. Leur localisation est indiquée sur la Figure 1. Ils consistent en une tige epoxy sur laquelle sont fixés quatre capteurs de température (thermistance) de type PT100 régulièrement espacés (5, 20, 35 et 50 cm) (Rejiba et al., 2019). Chaque dispositif est associé à un boîtier d'acquisition de type HOBO (ONSET *datalogger*) pour l'enregistrement en continu des températures analogiques. Les mesures des températures pour l'ensemble des sondes ont été effectuées entre avril et juillet 2019, avec un pas temporel de 15 minutes. Ces outils constituent l'un des deux éléments des systèmes MOLONARI mini (Cucchi et al., 2018, 2019, 2021).

Le capteur de température le plus proche de la surface (5 cm de profondeur) est choisi comme une référence pour la comparaison avec la donnée issue des mesures par drone. Néanmoins, la condition aux limites de surface pour l'ensemble de la parcelle est celle de la température atmosphérique (sonde S3_{air}). La Figure 3 présente les températures de la sonde S2, sur une période d'un mois.

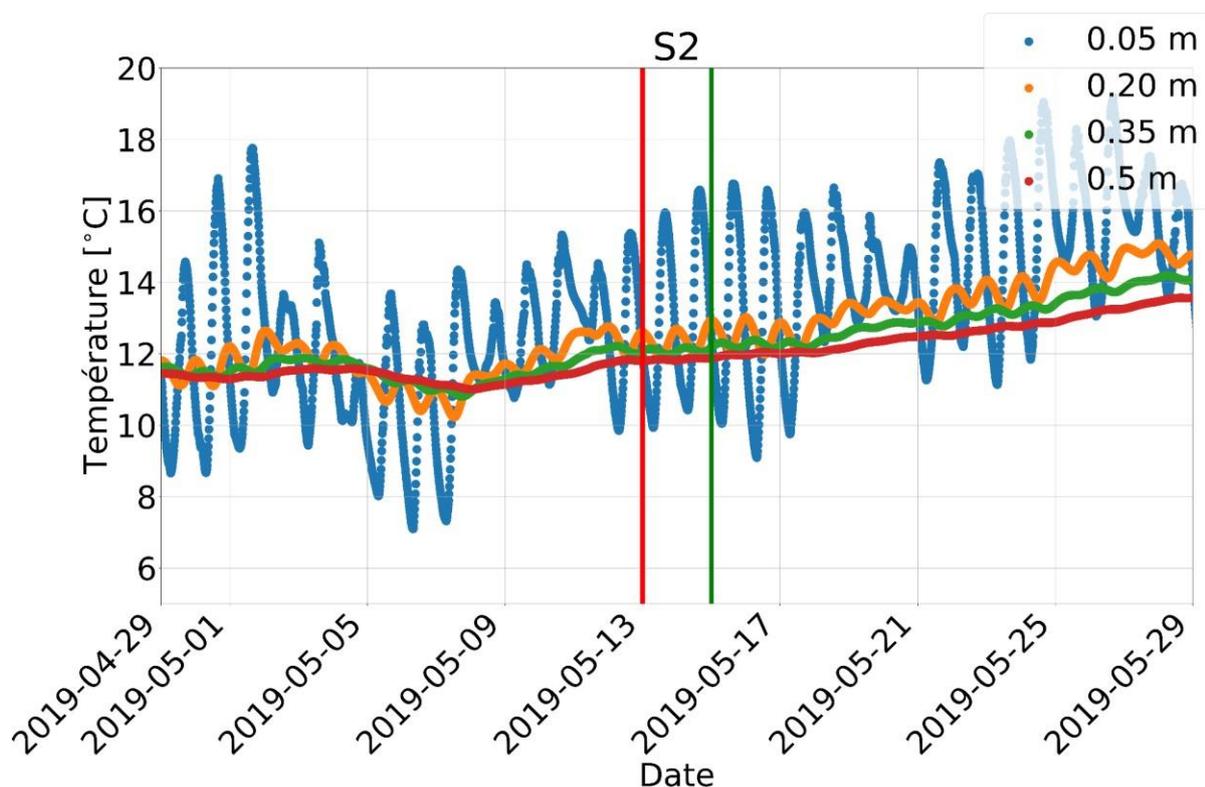


Figure 3. Chroniques de température de la sonde S2, pour quatre profondeurs, durant un mois. Les droites verticales rouge et verte délimitent la fenêtre de temps sans évènement extrême pour l'inférence des propriétés thermiques.

Le capteur le moins profond est naturellement le plus sensible aux variations atmosphériques et est donc celui le plus à même d'être relié à la température par drone. Une analyse spectrale fait ressortir les pics à 24 h et ses multiples (12 h/6 h) à des amplitudes décroissantes en fonction de la profondeur. On remarque aussi le déphasage entre les signaux des différentes profondeurs, qui permet de remonter à la diffusivité apparente du milieu (Tabbagh et al., 1999).

À l'endroit des dispositifs de mesure de température, des sondages de résistivité électrique ont été effectués afin d'estimer plus précisément les variations verticales de résistivité électrique, et donc de la lithologie au plus proche de chaque dispositif. Il en ressort qu'un modèle de terrain tri-couches, avec deux interfaces à 20 cm et 1,50 m notamment pour le capteur positionné en S2, est le plus probable.

La Figure 3 présente aussi deux traits verticaux identifiant une période où aucun extrême climatique n'est enregistré. Durant cet intervalle, les cycles enregistrés sont réguliers, donc essentiellement corrélés aux propriétés du sol. Le capteur à 5 cm permet de s'assurer qu'aucun évènement pluvieux important n'a eu lieu durant cet intermède, alors que le capteur le plus profond (50 cm) permet quant à lui de s'assurer qu'aucune remontée significative de la nappe ou de la frange capillaire n'est enregistrée. Il est important de noter que la teneur en eau massique sur le premier mètre est du même ordre de grandeur sur les sondages analysés.

2.1.2 Estimation de la diffusivité thermique

Une première étude des séries temporelles de température consiste à analyser les déphasages respectifs mesurés entre les différentes profondeurs de capteur. Ce déphasage permet de quantifier la diffusivité thermique du milieu. Celle-ci peut être approximée selon la relation suivante (Turcotte et Schubert, 2002) :

$$\kappa = \frac{D^2}{4t} \quad (1)$$

avec :

κ (m²/s) la diffusivité thermique de la subsurface,

D (m) la distance entre les deux capteurs,

t (s) le temps que met l'onde de chaleur à parcourir la distance entre les deux capteurs.

Au niveau du sondage S5, caractérisé par une très forte proportion d'argile (Figure 4), le calcul du retard entre les capteurs de température à 5 et 20 cm pour la fréquence journalière (Figure 5C) est de l'ordre de 25 000 s (la phase à la fréquence « journalière » $X=1.08e^{-5}$ Hz, sur le graphique Figure 5D est égale à 1.69 rad, soit un retard de $1.69/(X*2*\pi) = 24\ 900$ s).

L'estimation de ce déphasage entre les deux signaux à 5 cm et 20 cm est effectuée dans le domaine spectral (Figure 5A) après avoir retiré une tendance d'ordre quadratique correspondant aux variations « saisonnières » (Figure 5B). Ce retard entre les signaux à 5 cm et 20 cm, pour la fréquence journalière, permet d'estimer une diffusivité thermique de l'ordre de 2.10^{-7} m²/s grâce à l'équation (1). Pour toutes les autres sondes, la diffusivité thermique entre 5 et 20 cm oscille entre 2 et $2,4.10^{-7}$ m²/s. Une légère augmentation avec la profondeur pour les intervalles 20-35 cm et 35-50 cm est observée, avec des valeurs atteignant $\sim 3,1.10^{-7}$ m²/s.

La diffusivité thermique de la subsurface est liée à la conductivité thermique effective du sol k_s par la formule suivante (Turcotte and Shubert, 2002) :

$$\kappa = \frac{k_s}{\rho c_p} \quad (2)$$

avec :

ρ (kg.m⁻³) la masse volumique du milieu poreux,
 c_p (J.kg⁻¹.K⁻¹) la capacité calorifique massique du milieu poreux.

En considérant une masse volumique d'un limon argileux autour de 2000 kg.m⁻³ et une capacité calorifique massique typique d'un sol de 900 J.kg⁻¹.K⁻¹, l'équation (2) permet d'estimer une conductivité thermique de 0,36 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la tranche de terrain comprise entre 5 cm et 20 cm, ce qui semble être dans la fourchette basse pour un terrain très argileux (Abu-Hamdeh and Reeder, 2000) et reste cohérent avec la description pédologique du sondage S5 (Figure 4). Cette valeur relativement basse (qui serait synonyme d'une teneur en eau et/ou en argile faible) requerrait une vérification avec mesures sur échantillon pour confirmer.

À titre de comparaison, en exploitant la formule de milieu équivalent proposée par Rivière et al. (2020), ces valeurs, en faisant l'hypothèse d'un milieu insaturé, indiquent une conductivité thermique des grains de 0,8 W.m⁻¹.K⁻¹, validant la présence d'argile dans le sol en proportion non négligeable, tout en illustrant la variabilité des estimations entre différents modèles d'homogénéisation.

Enfin, la porosité de sol ϕ peut être approximée suivant la relation suivante (Kurita et al., 2007) :

$$\phi = \frac{\ln(k_e) - \ln(k_s)}{\ln(k_a) - \ln(k_s)} \quad (3)$$

avec :

k_e la conductivité de l'eau à 20 °C (0.6 W.m⁻¹.K⁻¹),
 k_s la conductivité thermique du milieu poreux (1,5 W.m⁻¹.K⁻¹),
 k_a la conductivité thermique de l'air (0,02 W.m⁻¹.K⁻¹).

L'équation (3) permet d'estimer **une porosité du sol d'environ 0,3**, valeur cohérente pour un sol argilo-limoneux, la conductivité thermique étant par ailleurs également dépendante de la teneur en eau.

S5	Profil	Profondeur	Horizon	Descriptif
		0 - 18 cm	A	Horizon organo-minéral limoneux enrichi en matière organique, à forte porosité. Couleur brunâtre. Absence d'éléments grossiers.
		18 - 27 cm	Aca	Horizon de transition limoneux argileux avec la présence de divers éléments grossiers (anciennes trace de crue). Couleur marron-brunâtre.
		27 - 60 cm	Sca	Horizon argileux limoneux avec présence d'éléments fins (coquillés ?). Couleur Marron clair.
		60 - 72 cm	Sca / C	Horizon argileux sableux avec présence d'éléments grossiers.
		72 - 82 cm	C	Horizon sableux avec présence d'éléments grossiers, mélangés avec de fins morceaux de calcaire (roche mère ?)

Figure 4. Description pédologique du sondage S5.

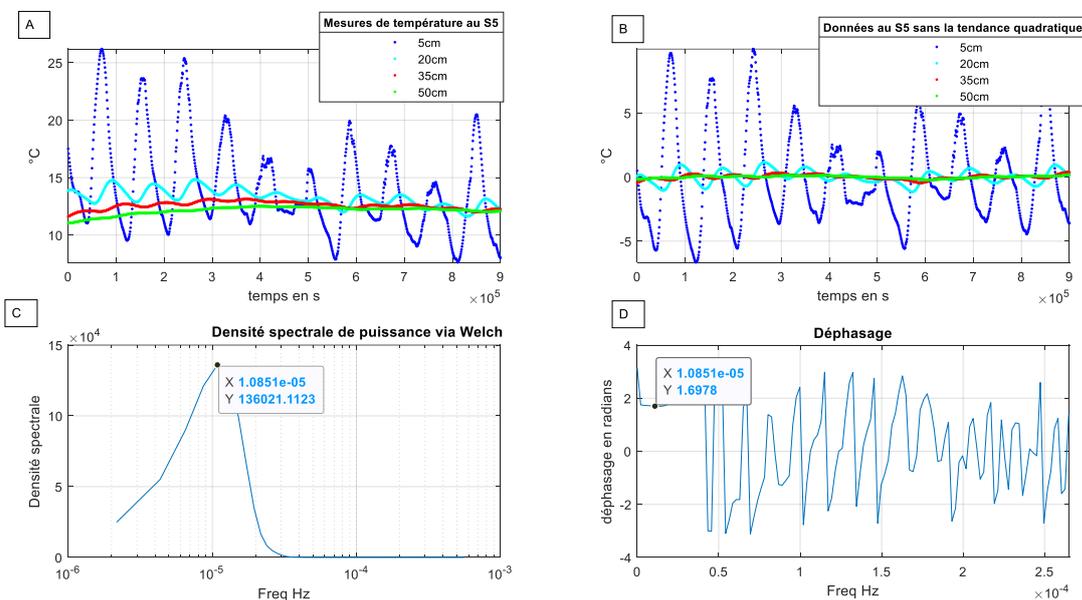


Figure 5. Déphasage entre le capteur localisé à 5 cm et celui à 20 cm pour la sonde S5.

A) Séries temporelles au niveau du S5 pendant une dizaine de jours. B) Données correspondant à A) dont une tendance quadratique a été retirée. C) Densité spectrale de puissance (méthode de Welch) illustrant la position de la fréquence (période) journalière contenue entre les signaux à 5 cm et 20 cm de profondeur. D) Déphasage correspondant au graphe présenté en C).

2.1.3 Estimation de la vitesse de Darcy dans le sol suite à un évènement pluvieux

Nous nous sommes ici intéressés à l'identification des évènements pluvieux et à la vitesse d'infiltration. Pour vérifier le comportement thermique vis-à-vis d'un extrême pluviométrique, nous avons obtenu les séries pluviométriques de stations météorologiques se situant à 40-50 km autour du site d'étude (<https://www.infoclimat.fr>) (Figure 6). Nous avons sélectionné la période du 4 au 14 juin 2019 comme étant un évènement pluvieux commun à l'échelle de cette région, et par conséquent, au site d'étude de la Bassée.

La Figure 7 présente l'évolution de la température enregistrée par les quatre capteurs de la sonde S6 durant le mois de juin 2019. L'amplitude de la température en période de pluie est inférieure de plusieurs degrés à la température observée sans pluie. De plus, le graphique montre l'apparition d'un signal journalier à différentes profondeurs.

Malgré une faible amplitude (moins de 0,5 °C), ce signal apparaît à toutes les profondeurs et pour plusieurs sondes sur le site à cette date (sondes S2, S5, S6, S9 et S10). Ce signal ne peut clairement pas être lié à un problème instrumental, toutes les sondes étant indépendantes les unes des autres. Par ailleurs, ce type de fluctuation n'apparaît pas sans intervention d'un fluide sur les capteurs profonds (notamment à 50 cm), qui sont peu sensibles aux fluctuations journalières de température.

L'interprétation de ce signal (Figure 8), apparaissant simultanément sur l'ensemble des capteurs, permet d'estimer une vitesse d'infiltration. Sachant que le pas de mesure est de 15 min, et en considérant le capteur à 5 cm de profondeur et celui à 50 cm de profondeur, cela correspond à **une vitesse d'infiltration (vitesse de Darcy) de l'ordre de $5.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, soit une conductivité hydraulique de l'ordre de $1.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$** pour l'horizon superficiel où ce signal a été observé.

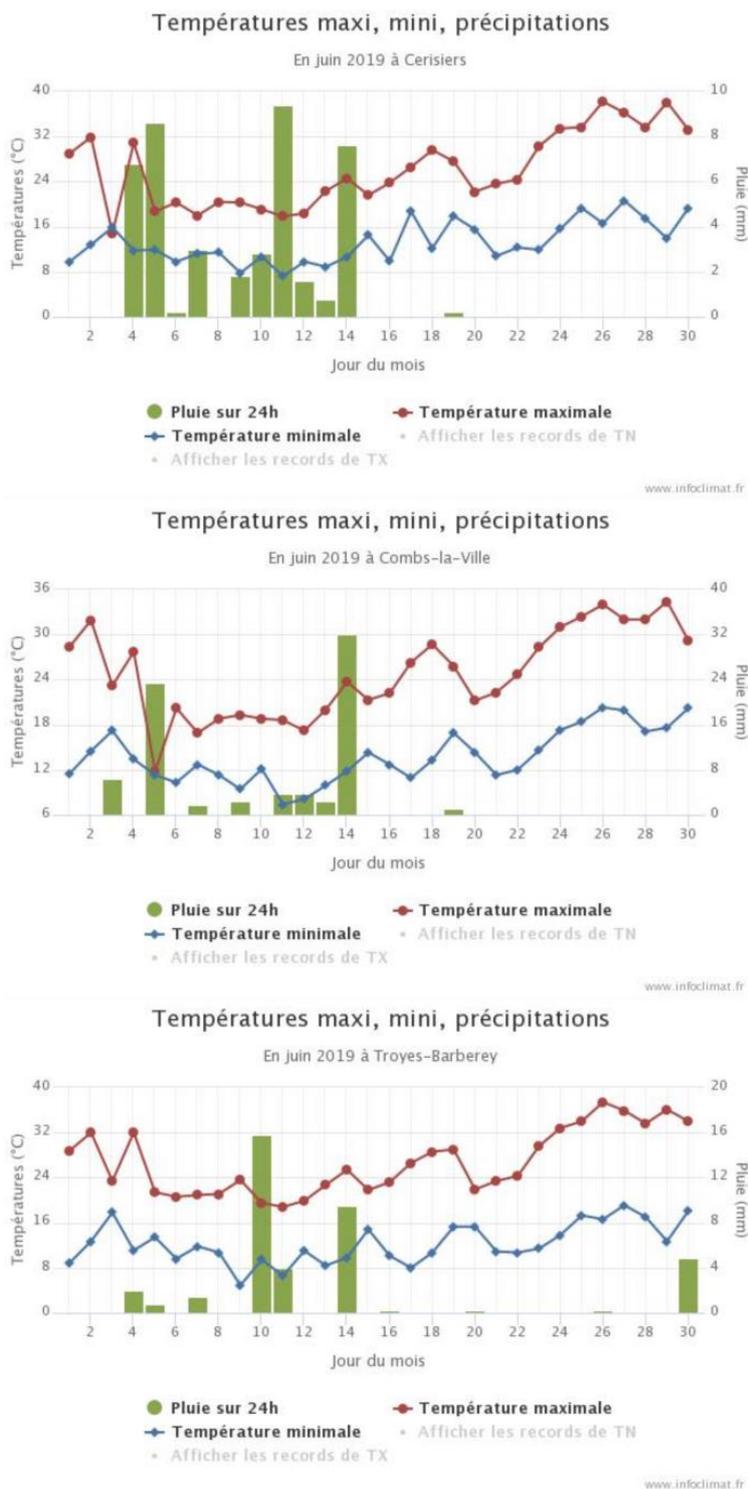


Figure 6. Pluviométrie sur les stations météorologiques de Cerisiers, Combs-La-Ville et Troyes-Barbercy pendant le mois de juin. Noter l'évènement pluvieux commun pendant la 1^{ère} quinzaine du mois de juin (www.infoclimat.fr).

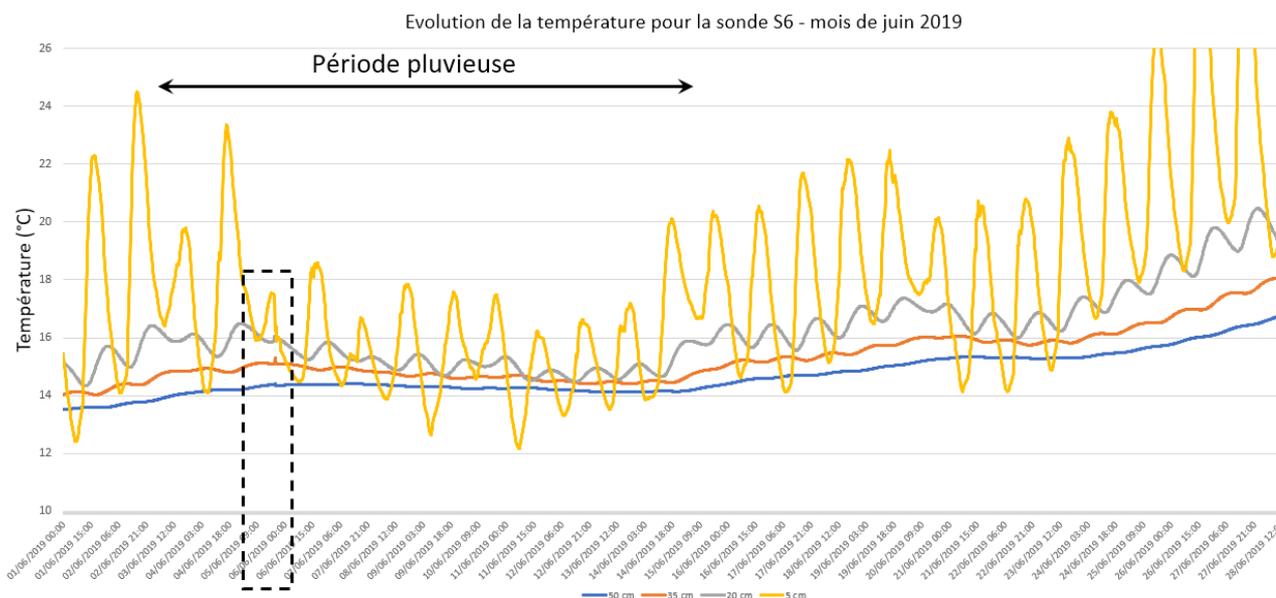


Figure 7. Températures des capteurs de la sonde S6 durant le mois de juin 2019.

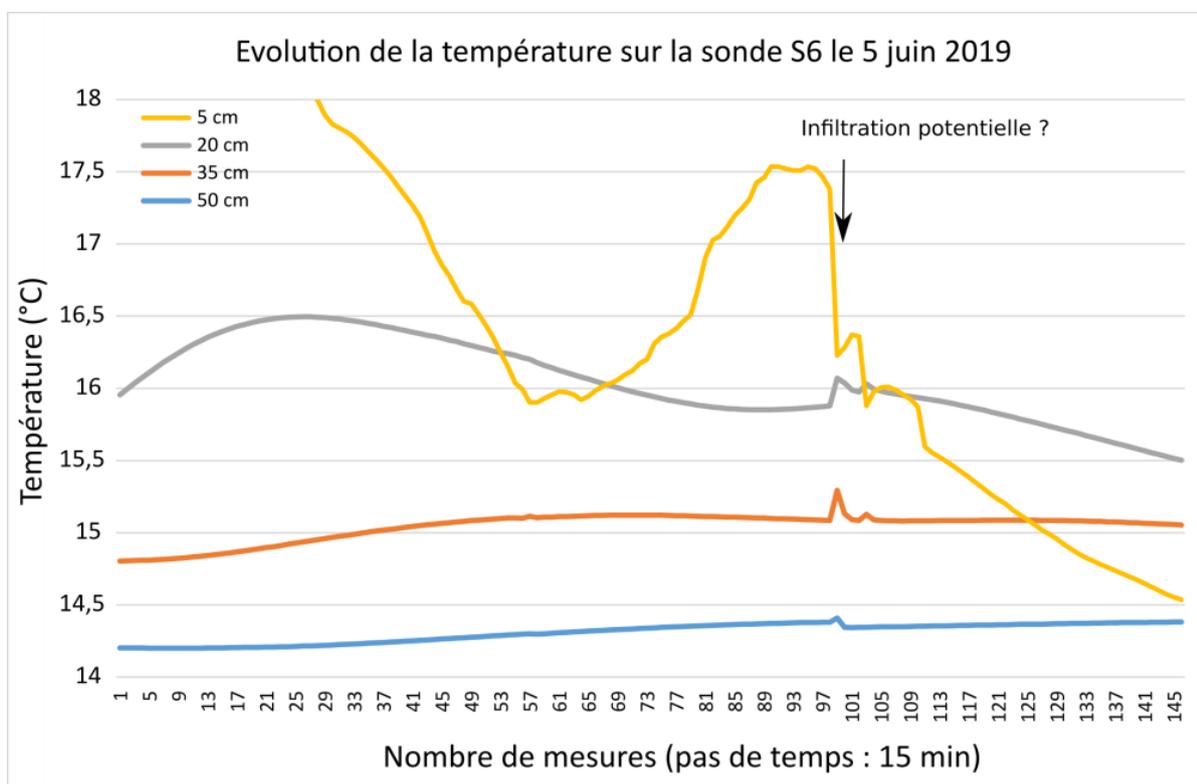


Figure 8. Effet d'une infiltration potentielle sur les capteurs de la sonde S6 lors d'un évènement pluvieux (zoom de la Figure 7, autour du 5 juin).

2.2 Thermo-mosaïques infrarouges (IR) par drone

2.2.1 Matériels et méthodes

Deux campagnes de mesures par drone équipé d'une caméra infrarouge ont été effectuées en avril et juin 2019. Dans ce rapport, les résultats concernent l'analyse de la campagne effectuée le 13 avril 2019 ; l'acquisition a été effectuée à dix reprises à intervalles réguliers, correspondant à 11 thermo-mosaïques IR réparties sur l'ensemble de la journée (6h55-18h42). Le drone mis en œuvre est un Matrice 600 (DJI). La caméra visible est composée d'un capteur 4000 × 3000 pixels (12 millions). La caméra thermique (VarioCAM HD) est fabriquée par la société Infratech avec une taille de capteur de 1 024 x 768 pixels pour une sensibilité thermique de 0,05 °C (Rejiba et al., 2019). Il est important de noter que des points de contrôle géoréférencés par RTK-GPS ont été utilisés pour contraindre la reconstruction d'orthomosaïque. Ces points de contrôle sont des plaques carrées métalliques.

2.2.2 Récupération des données drone IR aux positions des sondes de température

Si l'on souhaite relier les températures relevées par drone aux températures relevées par sondes ponctuelles, une première approche consiste à prélever sur les orthophotos thermiques, autour de chaque sonde, les températures de surface les plus proches des sondes ponctuelles. Pour localiser ces sondes ponctuelles, nous disposons des coordonnées GPS de cibles au sol (*Ground Control Points*) posées exactement au pied des sondes de température. Nous pouvons par ailleurs identifier facilement ces sondes sur les orthophotos thermiques : elles sont composées soit de polyéthylène blanc, soit d'aluminium. Les réponses thermiques de ces cibles sont extrêmes du fait des émissivités très différentes de ces matériaux, en particulier pour les cibles en aluminium dont les valeurs atteignent sur certains clichés moins de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (émissivité proche de 0 pour l'aluminium).

Il convient donc de choisir des zones autour de ces cibles suffisamment éloignées. Pour cela, nous avons choisi de définir des polygones autour de chaque cible, de forme carrée et de côté variable, ici fixé à 60 cm. Ainsi, neuf polygones sont définis autour de chaque cible, et ce pour chacune des neuf cibles/sondes ponctuelles. Un exemple explicitant la démarche est donné en Figure 9.

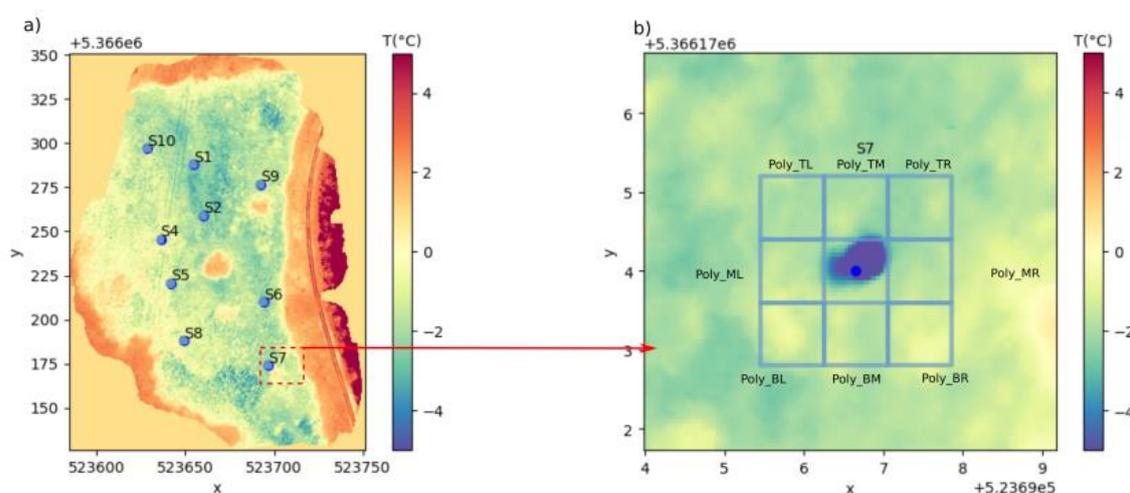


Figure 9. a) Exemple d'orthophoto thermique, phase 1, vol de 7h29. b) Zoom autour de la sonde/cible S7 et construction des huit polygones autour de la cible. C'est au sein de chacun de ces polygones que les températures moyennes sont calculées puis pourront être comparées dans une première approche aux températures des sondes ponctuelles. On notera que la cible, ici en aluminium, a une température négative inférieure à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Au sein de chaque polygone, la température est moyennée (typiquement $16*16$ températures pour un polygone de 60 cm de côté), comme illustré sur la Figure 10.

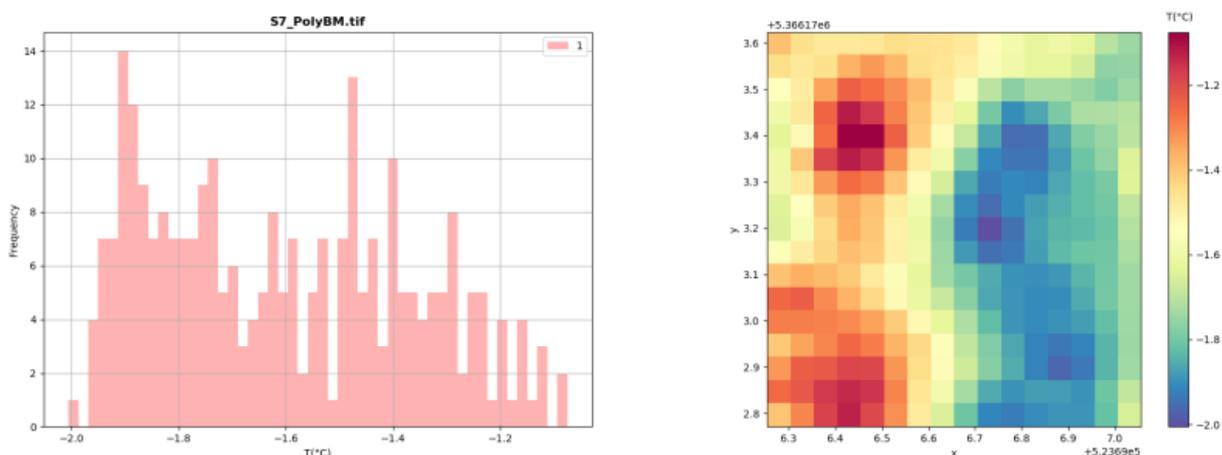


Figure 10. Statistique de la température sur le polygone PolyBM (voir Figure 9 b) autour de la sonde S7. L'échelle des températures a été modifiée pour plus de lisibilité.

Ces températures sont ensuite comparées à celles relevées par les sondes ponctuelles avec le capteur situé à 5 cm de profondeur. Les résultats pour un polygone choisi au hasard proche de chaque cible sont montrés sur la Figure 11.

La Figure 11 montre que les variations des températures relevées par drone ou ponctuellement sont en phase. Aucun phénomène d'inertie thermique n'est relevé par les deux types de mesures aux échelles de temps considérées (mesure ponctuelle environ toutes les heures pour le drone, mesures toutes les 15 min pour les dispositifs enterrés). En revanche, l'amplitude des variations au cours du cycle diurne est beaucoup plus forte dans les résultats obtenus par drone. En effet, le capteur embarqué est essentiellement sensible aux températures de surface, végétalisée ou non, alors que le capteur à 5 cm de profondeur est protégé par cette même végétation et par une mince couche de sol qui atténue globalement les températures. Si on fait l'hypothèse que cette mince couche de surface est négligeable (puisque'il n'y a pas de phénomène d'inertie observée aux échelles de temps considérées, avec notamment le pas temporel des mesures IR), on peut tracer la différence entre les températures de drone et les températures locales (Figure 11c). On observe que ces différences sont importantes (jusqu'à 10 °C au lever du soleil).

Ce phénomène se stabilise au cours de la matinée, puis s'inverse en milieu de journée du fait des effets thermiques associés au processus d'évapotranspiration. Finalement, la différence entre température enregistrée par drone et au sol tend vers une valeur négligeable aux alentours de 18h. Bien que basée sur les températures d'un seul polygone autour des cibles, comparées aux températures locales à 5 cm, cette observation illustre la nécessité de prendre en compte non seulement la structuration du proche sous-sol, mais également la végétation et sa physiologie.

Une stratégie envisagée pour la suite de ces travaux consisterait à classifier, de manière supervisée ou non, les réflectances issues des clichés « visibles » et des mesures thermiques, et à les associer à une typologie de végétation, et ce à chaque instant de mesure.

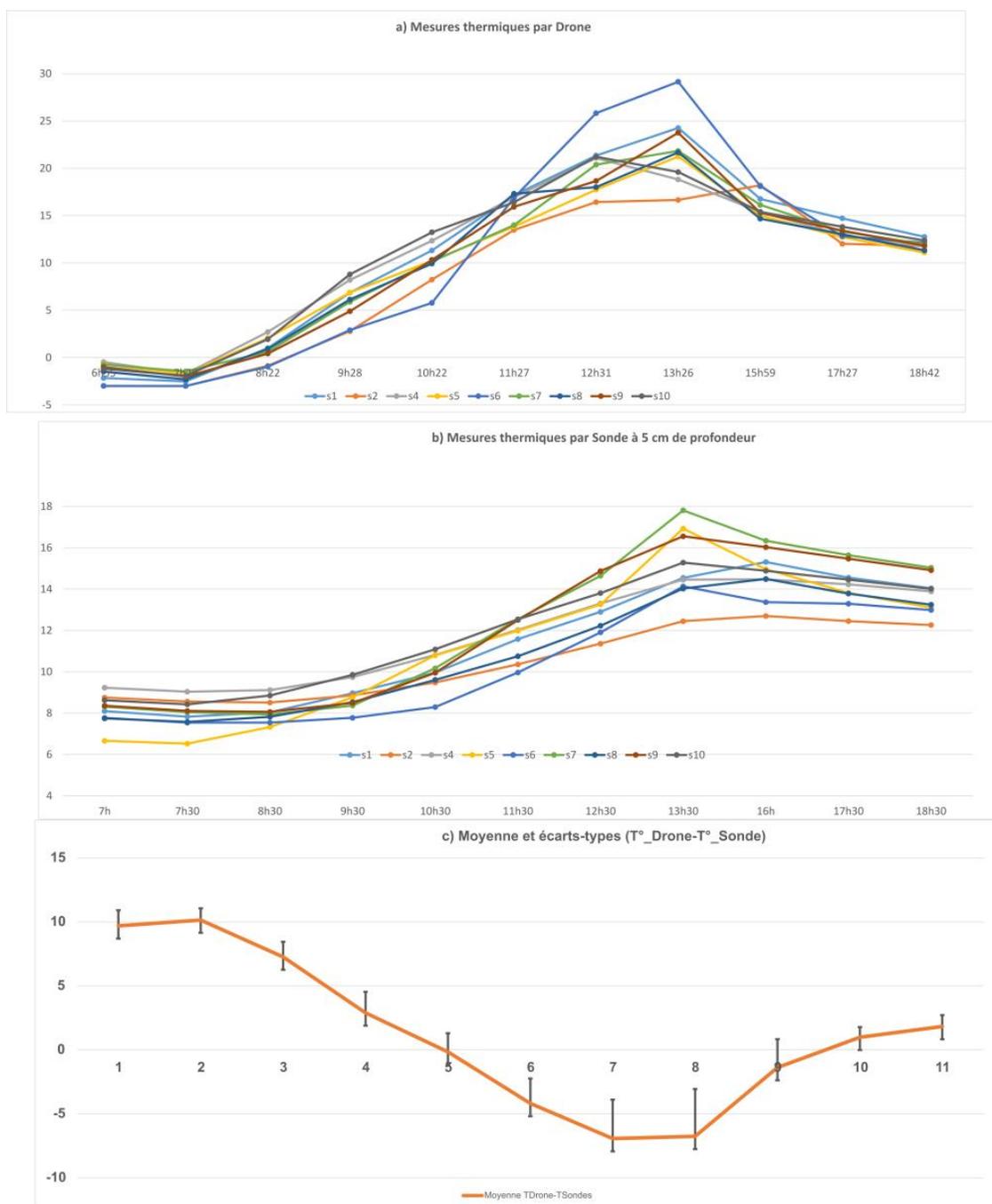


Figure 11. a) Températures moyennes recueillies à +/- 30 cm des sondes au sein d'un polygone de 60 cm de côté contenant 16*16 pixels. b) Température des sondes ponctuelles recueillies au premier capteur à 5 cm de profondeur. c) Moyenne et écarts-types des différences entre la température de surface relevée par drone et la température à 5 cm de profondeur relevée par sonde ponctuelle, présentées dans les figures a) et b) pour chacune des 11 heures de vol en drone.

2.3 Données géophysiques au sol

2.3.1 Sondages électriques

À chaque position de sonde ont été effectués deux sondages électriques (configuration Wenner-alpha) de directions perpendiculaires (afin de repérer d'éventuelles anisotropies). Les résultats d'inversion des deux sondages à chaque position de sonde se sont montrés assez similaires. Les moyennes (géométriques sur l'inverse des résistivités) des deux modèles obtenus sont récapitulées dans le Tableau 1. L'espace inter-électrode, commencé à 0,1 m, augmente géométriquement jusqu'à 3 m.

Tableau 1. Résultats d'inversion des sondages électriques effectués à la position des sondes. Les erreurs RMS obtenues sont inférieures à 5%.

Sonde	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	ρ_3 (Ωm)	Ep. 1 (m)	Ep. 2 (m)
S1	86	22	150	0,14	1,28
S2	55	20	150	0,20	1,30
S4	61	26	150	0,21	0,66
S5	58	19	150	0,17	0,17
S6	190	24	150	0,11	1,32
S7	129	19	87	0,13	0,16
S8	92	20	191	0,13	0,25
S9	93	22	103	0,20	0,80
S10	56	22	150	0,22	1,29

Un modèle à trois couches ressort de ces inversions (exemple en Figure 12) : (1) une première couche d'environ 20 cm dont la résistivité (toutefois relativement incertaine étant donné le premier écartement de 0,1 m) varie et qui correspondrait à l'horizon organo-minéral limoneux (décrit en Figure 4) ; la résistivité et l'épaisseur de cette couche ont été laissées libres durant l'inversion ; (2) une deuxième couche d'un peu plus de 20 Ωm (résistivité contrainte durant l'inversion en exploitant les sondages où cette couche est relativement épaisse et donc bien déterminée) dont l'épaisseur peut aller de quelques dm à presque 1,5 m et qui correspondrait à l'horizon argileux observé en Figure 4 ; (3) une troisième couche résistante d'environ 150 Ωm , qui correspondrait à l'horizon sableux avec des éléments calcaires identifiés dans la description pédologique (cf. Figure 4). Sa résistivité a également été contrainte lors de l'inversion en exploitant les sondages où cette couche est très proche de la surface (*i.e.* où les couches 1 et 2 sont très peu épaisses voire quasi inexistantes). L'objectif étant de garder une valeur stable et spatialement cohérente là où la couche est profonde (et donc mal définie) par rapport à la profondeur d'investigation. En fixant ainsi ρ_2 et ρ_3 , le nombre de paramètres à estimer lors de l'inversion d'un modèle à trois couches passe de 5 à 3, ce qui limite les équivalences, et donc les incertitudes.

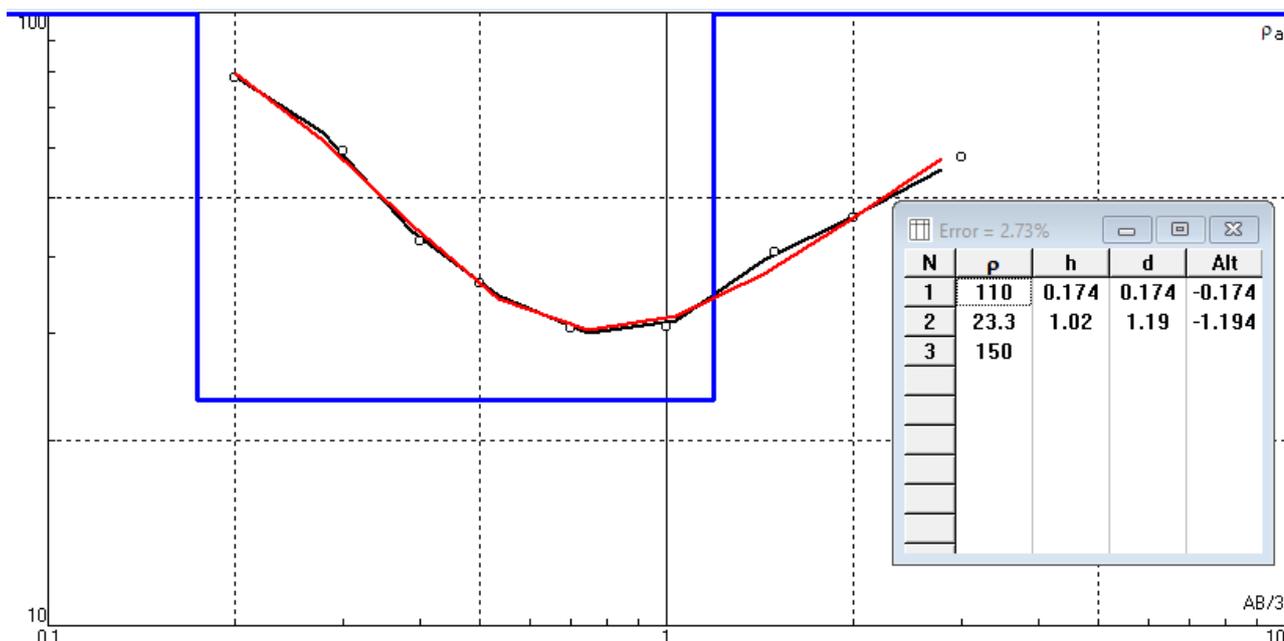


Figure 12. Exemple d'inversion de sondage électrique (logiciel Ipi2win) à la sonde S9-direction nord-sud. La courbe noire correspond aux résistivités apparentes mesurées (Ωm) et la rouge à la réponse du modèle obtenu après inversion/optimisation. AB/3 (m) correspond à l'espace inter-électrodes (ici configuration Wenner-alpha).

2.3.2 Tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique utilise le même principe physique que le sondage électrique. Au lieu de quatre électrodes écartées de plus en plus en sondage, la tomographie utilise une série de plusieurs dizaines d'électrodes régulièrement espacées le long d'une ligne, ce qui permet de construire un modèle de résistivité 2D. Ainsi, les variations latérales de résistivité peuvent être observées, contrairement au sondage électrique. Lorsqu'une transition entre zones conductrice et résistante est connue (par exemple grâce à une cartographie électromagnétique préalable à haut rendement), l'orientation de la ligne d'électrodes est choisie de sorte à être la plus perpendiculaire possible à la transition. Le début et la fin du profil de tomographie sont visibles en Figure 1 entre les points E1 et E2. Le Syscal Pro d'Iris Instruments (48 électrodes) a été utilisé en configuration Wenner-Schlumberger avec un espacement inter-électrodes d'1 m. Afin de couvrir un profil suffisamment long et d'observer plusieurs zones avec des organisations différentes, trois acquisitions distinctes ont été combinées avec des électrodes communes (« *roll-along* » dans le vocabulaire géophysicien) afin de ne pas perdre d'informations en profondeur entre les différentes acquisitions. Le résultat de l'acquisition ainsi que celui de l'inversion sont présentés en Figure 13. Entre les parties NE et SO, on observe une différence claire sur les 2 premiers mètres avec une couche bien conductrice ($\sim 20 \Omega\text{m}$, cf. ρ_2 des sondages électriques en Tableau 1) qui est quasi inexistante (d'épaisseur très faible) dans la moitié SO. À noter que les 20 premiers cm ne peuvent pas être caractérisés avec la présente tomographie, l'espacement minimal étant d'1 m contre 0,1 m pour les sondages électriques. La couche ρ_1 très superficielle identifiée dans les sondages électriques (Tableau 1) ne peut donc être observée. La couche observable la plus profonde et peu résistante ($\sim 90 \Omega\text{m}$) située sous l'horizon résistant ($\sim 150\text{-}300 \Omega\text{m}$, correspondant à ρ_3 dans les sondages électriques, cf. Tableau 1) n'est pas visible dans les sondages électriques du fait de l'espacement maximum de 3 m. Cette quatrième couche, du fait de sa relative « grande » profondeur, ne sera pas considérée dans les modélisations futures. Le modèle de résistivité 2D obtenu servira de référence pour la calibration des données électromagnétiques.

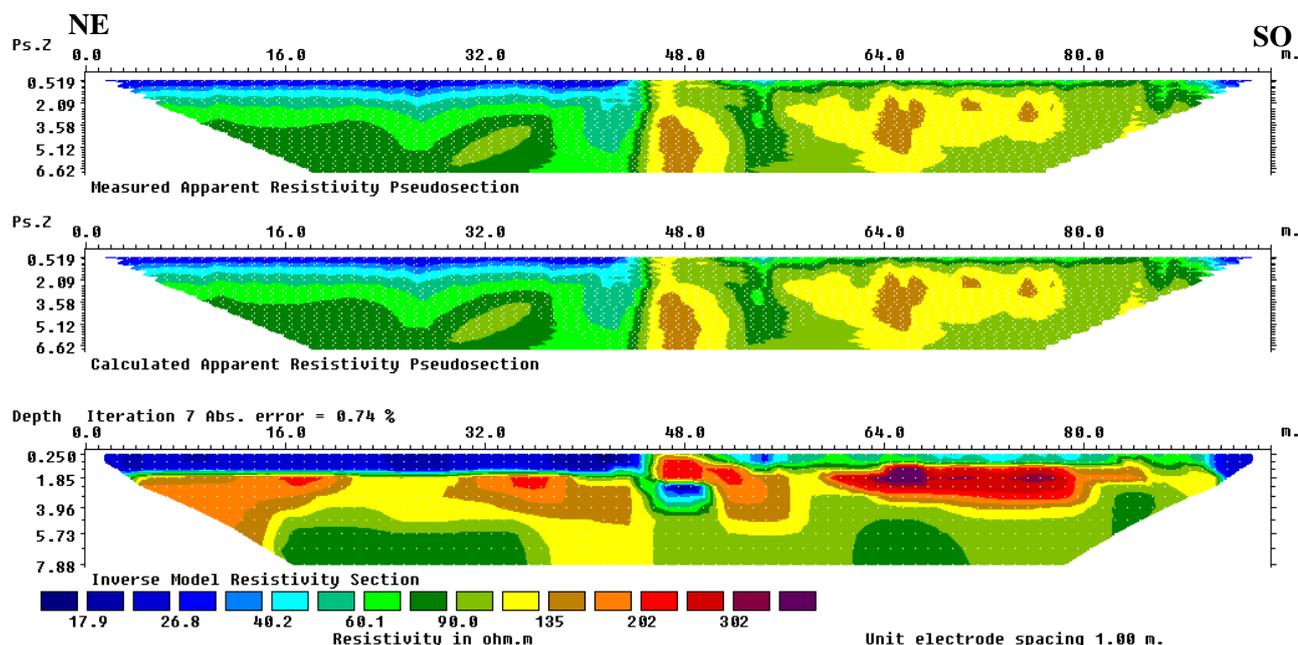


Figure 13 : Résultat de tomographie électrique. La première électrode au nord-est est située au niveau du point E1, et la dernière au sud-ouest au point E2 (Figure 1). La section est le résultat de trois acquisitions (Syscal Pro) avec 48 électrodes en « *roll-along* » (i.e. sections se chevauchant avec des électrodes communes) espacées d'1 m (configuration Wenner-Schlumberger). L'inversion en norme L1 favorisant les limites franches entre lithologies a été faite sous Res2dinv. La section du haut correspond à la résistivité apparente mesurée, la section du milieu à la réponse du modèle obtenu à la fin de l'inversion, et la section du bas au modèle de résistivité estimé.

2.3.3 Cartographie électromagnétique (EM)

Le site a été cartographié avec un appareil électromagnétique (EM) à petit nombre d'induction permettant la mesure à l'avancement de la conductivité électrique apparente. L'appareil utilisé (CMD Mini Explorer de GF Instruments) permet de mesurer trois conductivités apparentes grâce à trois voies de mesure correspondant à trois bobines de réception situées à des distances de 0,32, 0,71 et 1,12 m de la bobine d'émission. Utilisé en configuration VCP (Vertical CoPlanaire), les profondeurs d'investigation résultantes sont de l'ordre de l'écartement émission-réception. Contrairement aux dispositifs utilisés en panneau électrique qui peuvent s'autocalibrer, les appareils EM nécessitent une calibration par rapport à une référence. Dans le cadre de ces travaux, nous avons utilisé l'approche utilisée par Lavoué et al. (2010) et Rejiba et al. (2018), qui consiste à considérer le modèle 2D obtenu par la tomographie électrique comme le modèle de référence à partir duquel des données EM théoriques (considérant les spécifications techniques de l'appareil EM utilisé) peuvent être calculées. Les données EM acquises sont alors corrigées (avec un coefficient et un *shift* estimés pour chaque écartement) de telle sorte qu'elles se superposent le mieux possible aux données EM théoriques. Le résultat de cette calibration est illustré en Figure 14. Les différences notables observées après calibration illustrent l'importance de cette opération. En effet, si elle ne change pas fondamentalement les variations relatives de conductivité électrique d'une zone à une autre, dans l'absolu l'impact est majeur lorsqu'il s'agit d'exploiter ces mesures pour effectuer une inversion, qui a pour but de quantifier les propriétés intrinsèques (conductivité et épaisseur) des couches sous-jacentes.

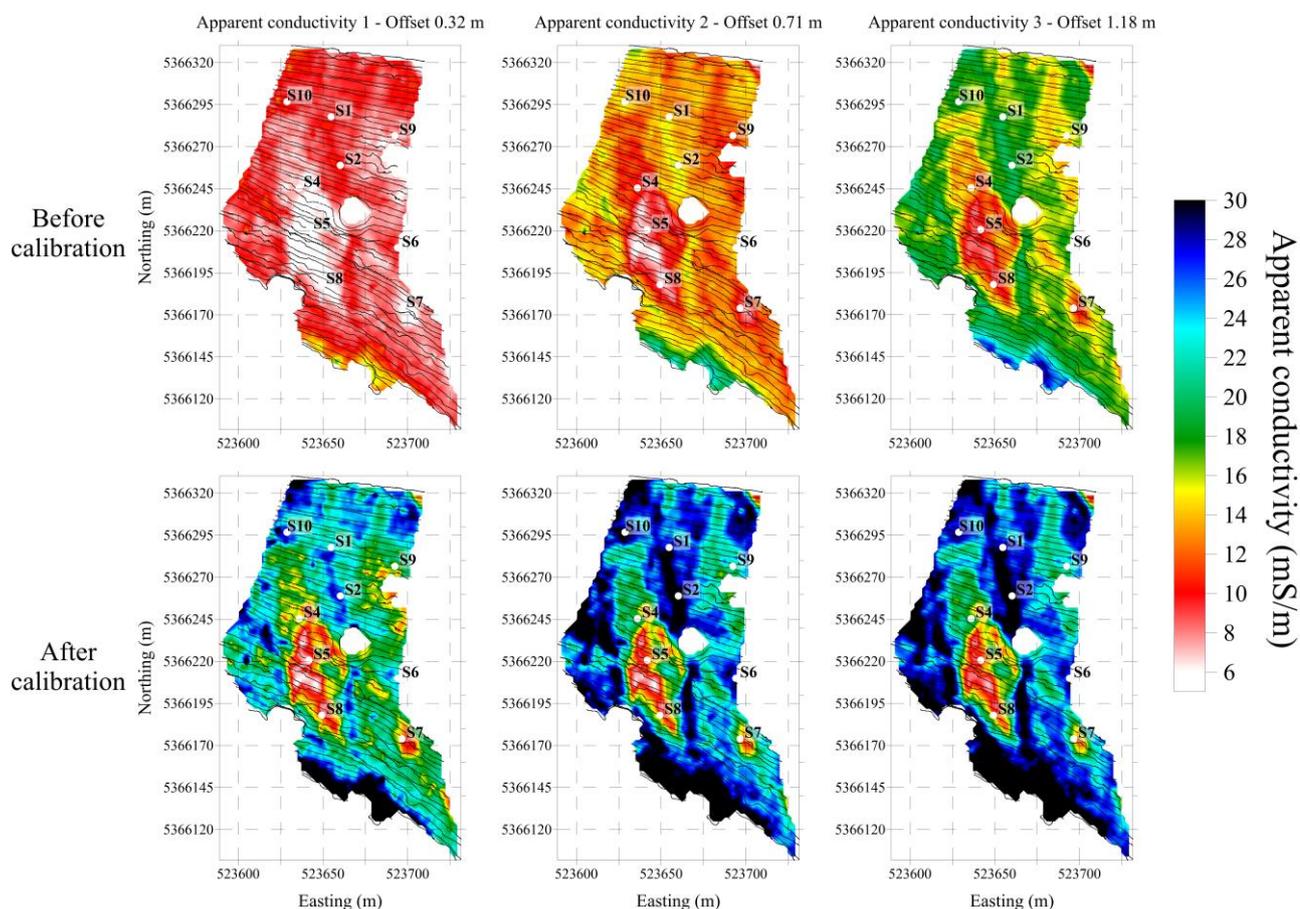


Figure 14. Cartographie électromagnétique avec le CMD MiniExplorer en configuration VCP. Conductivités apparentes mesurées aux trois écartements de l'appareil, avant et après calibration par rapport à la tomographie électrique (cf. Figure 13). Les lignes noires correspondent aux positions des mesures.

Une fois la calibration effectuée, en cohérence avec l'inversion des sondages électriques (Tableau 1), un modèle à trois couches a été considéré en fixant la résistivité ρ_2 à 21,5 Ωm (46,5 mS/m) et la résistivité ρ_3 à 150 Ωm (6,7 mS/m). Ainsi seuls ρ_1 , e_1 et e_2 sont estimés lors de l'inversion (Figure 15). Des contraintes latérales ont été appliquées pour contenir les variations de résistivité de proche en proche et garder une cohérence spatiale. Le résidu est normalisé par la barre d'erreur (ici 1 mS/m avec un minimum d'erreur relative de 1%). Un résidu inférieur à 1 indique que les données sont bien expliquées dans la barre d'erreur des mesures.

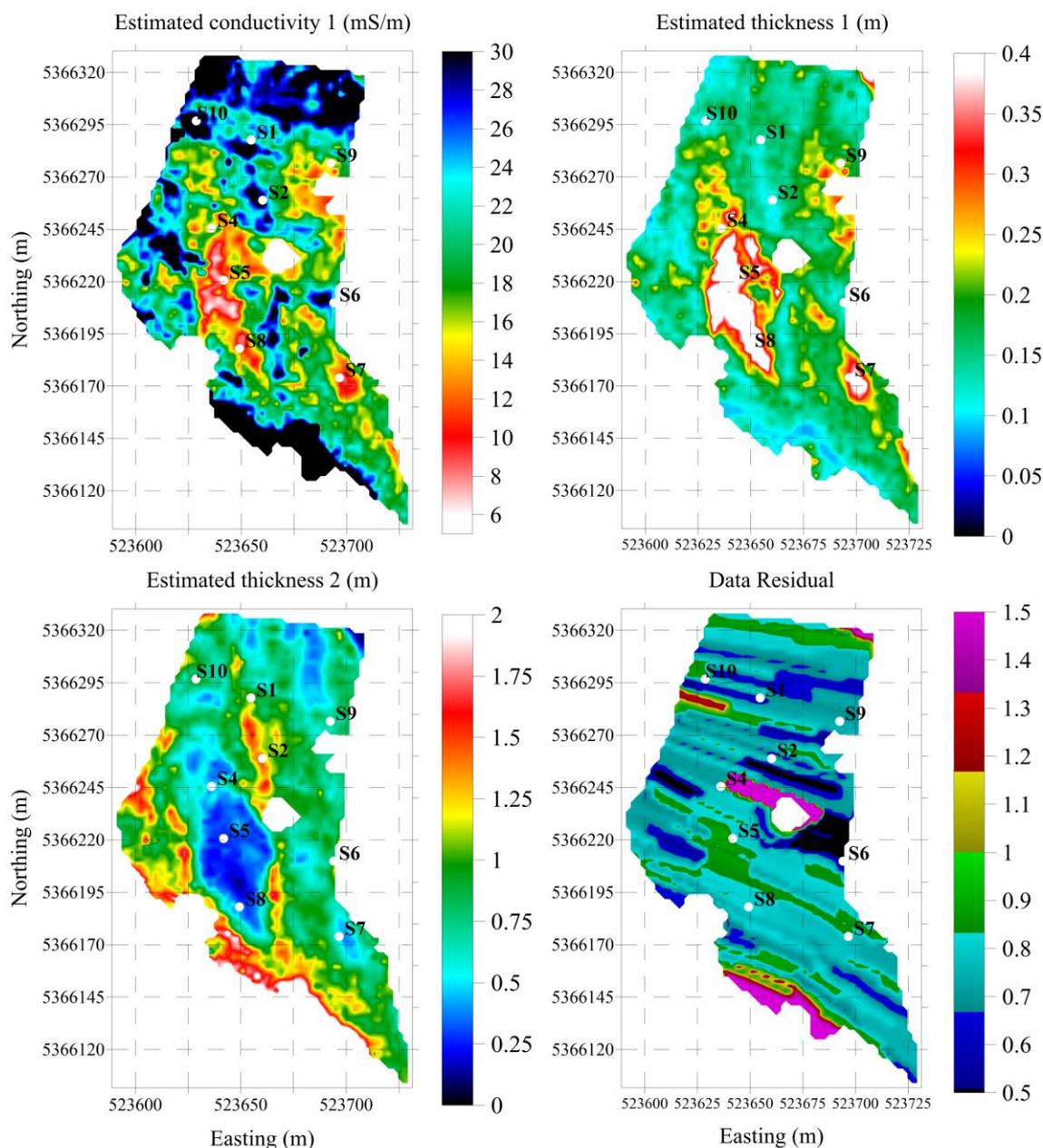


Figure 15. Résultats d'inversion des données électromagnétiques acquises avec le CMD MiniExplorer (GF Instruments) en configuration VCP. Un modèle à trois couches a été considéré en fixant la résistivité ρ_2 à $21,5 \Omega m$ ($46,5 \text{ mS/m}$) et la résistivité ρ_3 à $150 \Omega m$ ($6,7 \text{ mS/m}$). Ainsi seuls ρ_1 , e_1 et e_2 sont estimés lors de l'inversion.

L'épaisseur de la première couche étant faible (moins de 40 cm, majoritairement ~ 20 cm), la détermination de cette couche très superficielle reste peu précise par la prospection EM, même avec un appareil évoluant à 5-10 cm au-dessus de la surface. L'estimation de l'épaisseur de la deuxième couche (horizon argileux), qui est par ailleurs une couche conductrice pour laquelle la prospection EM a une bonne sensibilité, sera donc le paramètre estimé clé qui sera exploité vis-à-vis des autres jeux de données. La Figure 16 illustre la bonne corrélation entre d'une part, l'estimation de l'épaisseur de cet horizon conducteur entre les sondages électriques (effectués aux positions des sondes de température) et d'autre part, la cartographie EM, ce qui permet d'envisager l'utilisation de l'estimation par l'EM de l'épaisseur de cet horizon conducteur sur l'ensemble de la zone prospectée.

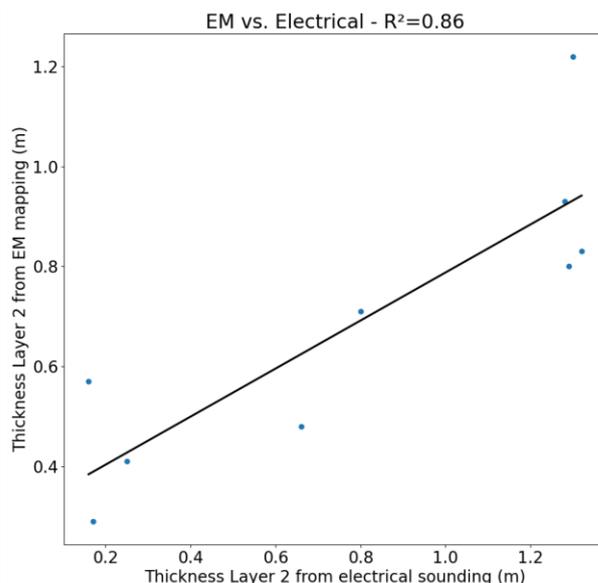


Figure 16. Corrélation entre l'estimation de l'épaisseur de la couche 2 à partir des sondages électriques (faits aux positions des sondes de températures S_x), et celle obtenue à partir de la cartographie EM (cf. Figure 15).

3. Croisement des résultats des sondes, IR et EM

3.1 Co-krigeage des résultats des sondes à 5 cm avec la mesure IR comme variable auxiliaire

Depuis quelques années, l'imagerie dans le visible, les longueurs d'onde thermiques voire Lidar par drone, s'est démocratisée (Antoine et al., 2020 ; Beland et al., 2019). Historiquement, les premières applications furent (et sont toujours) orientées sur le « *tracking* » des eaux de différentes températures synonymes de différentes provenances, notamment avec les premières études de Briggs et al. (2013) liant les origines des eaux (nappes phréatiques, aquifères plus profonds, ou rivières adjacentes) aux anomalies thermiques.

Plus récemment, Caldwell et al. (2019) se sont penchés sur des acquisitions thermographique infrarouge (TIR) sur des pas de temps plus courts afin de mettre en lumière et de potentiellement quantifier l'apport d'eau de fortes précipitations sur la rivière.

Dans le cas de la température du sol, la fonction de transfert thermique permettant de relier la température par drone et celle du sol est plus complexe à modéliser à cause de la variabilité du couvert végétal. Il est donc nécessaire de développer un traitement spécifique des données TIR pour pouvoir remonter à un signal thermique réel de l'interface air-sol.

De nombreux travaux abordant cette problématique sont disponibles dans la littérature, notamment les études méthodologiques pour une acquisition et/ou une calibration des données adéquates. On peut notamment citer les travaux de Casas-Mulet et al. (2020), Maes et al. (2017) et de Kelly et al. (2019). Ces travaux montrent que les méthodes de calibration en sont encore à leurs débuts et sont souvent basées sur la même technique, à savoir la calibration à partir de capteurs se trouvant au sol. L'utilisation de la géostatistique destinée à la spatialisation de données thermiques sous contraintes commence également à émerger (Jurado-Exposito et al., 2019). L'idée est donc d'utiliser ces approches dans le contexte de la Bassée à l'aide du quadrillage d'une parcelle test située le long de la route de Vezoult, où sont installées dix sondes de mesure de températures multi-profondeurs (5, 20, 35, et 50 cm) avec un pas de temps de mesure de 15 min. Les thermo-mosaïques IR mesurées le 13 avril 2019 donnent la pseudo-température de la surface sur toute la zone d'étude, mais uniquement à dix instants bien précis (correspondant à dix vols).

La Figure 17 représente 10 des 11 thermo-mosaïques IR acquises sur la journée du 13 avril 2019,

représentées avec la même échelle de couleurs. Le signal IR varie approximativement de -5 °C à +3 °C pour la matinée avant de dépasser 24 °C pour les acquisitions de l'après-midi. Les deux thermo-mosaïques les plus chaudes correspondent bien à l'ensoleillement le plus vertical (Nadir entre 12h31 et 13h26), et la Seine, sur la partie extrême est, est aussi bien visible du fait de sa faible variation de température.

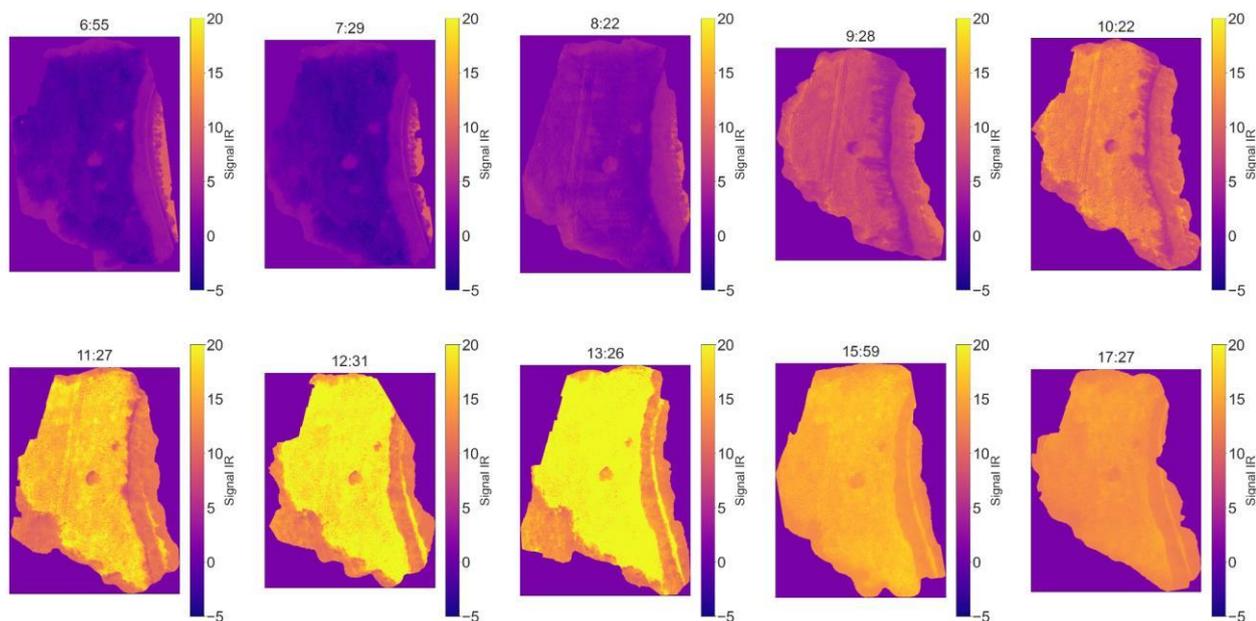


Figure 17. Thermo-mosaïques IR sur la zone d'étude. Les heures de mesures sont indiquées au-dessus de chaque TIR, les échelles de couleurs pour les pseudo-températures sont les mêmes pour chaque TIR.

La reconstruction des ortho- et thermo- mosaïques a nécessité l'utilisation de neuf points de contrôle afin de gagner en précision pour le calcul de l'orthophoto (typiquement 2-3 cm en x et y, et 4-5 cm en z) ; points de contrôle matérialisés physiquement par des plaques métalliques. Ces plaques métalliques ont été disposées trop près des sondes de températures et ont donc nécessité un traitement spécifique consistant à soustraire l'effet de la plaque sur la réponse thermique du sol (cf. Figure 9).

La Figure 18 permet d'illustrer les variations de températures moyennes de toutes les sondes à chaque profondeur, parallèlement à celles des pseudo-températures identifiées au droit de chacune des sondes. Le coefficient de Pearson de 0,88 valide une corrélation significative. Ce comportement est également visible sur les données d'une seule position de sonde (Figure 19), où la corrélation est la plus forte entre les données de drone et les données de sonde pour le capteur le plus proche de la surface.

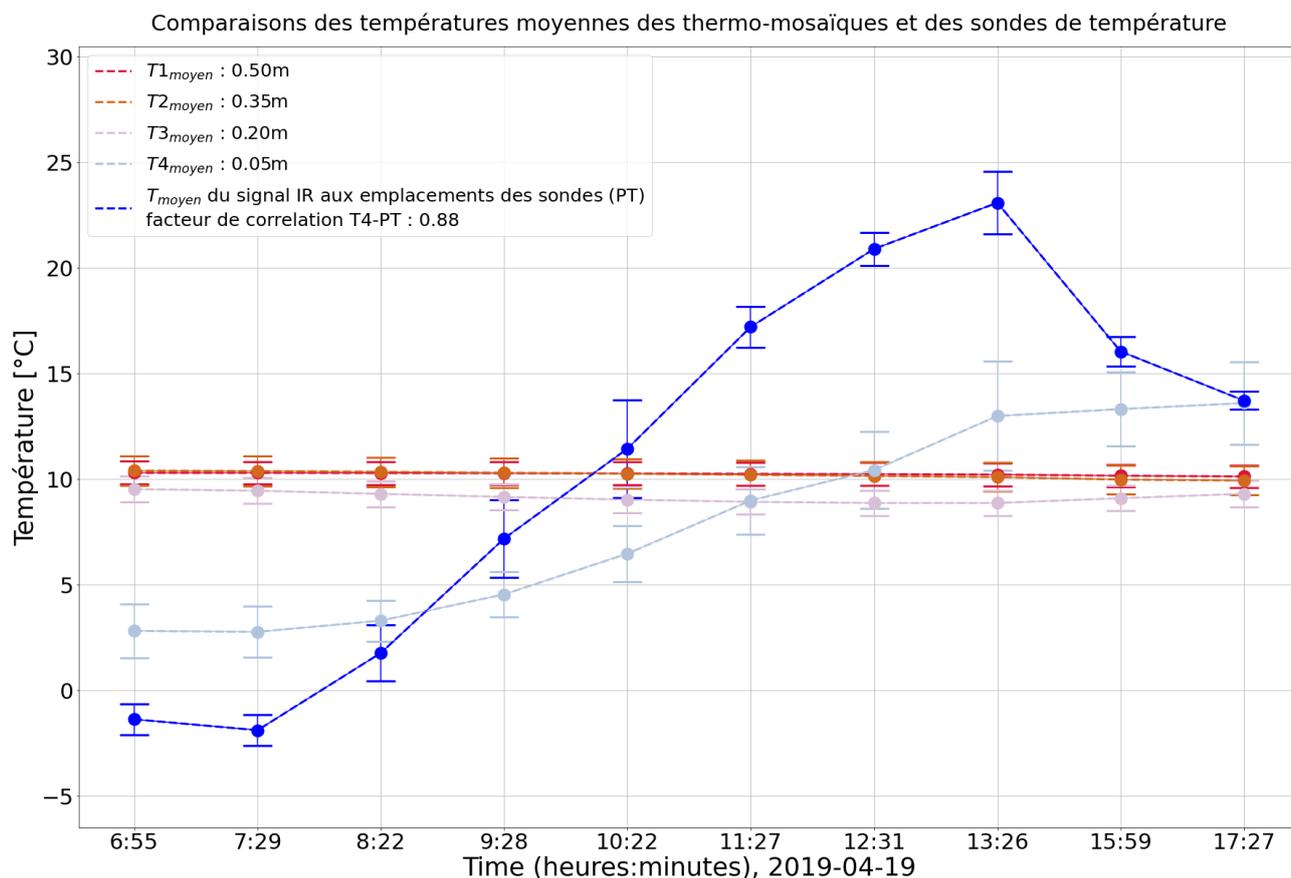


Figure 18. Températures moyennes de toutes les sondes en fonction de la profondeur et pseudo-température en fonction du temps.

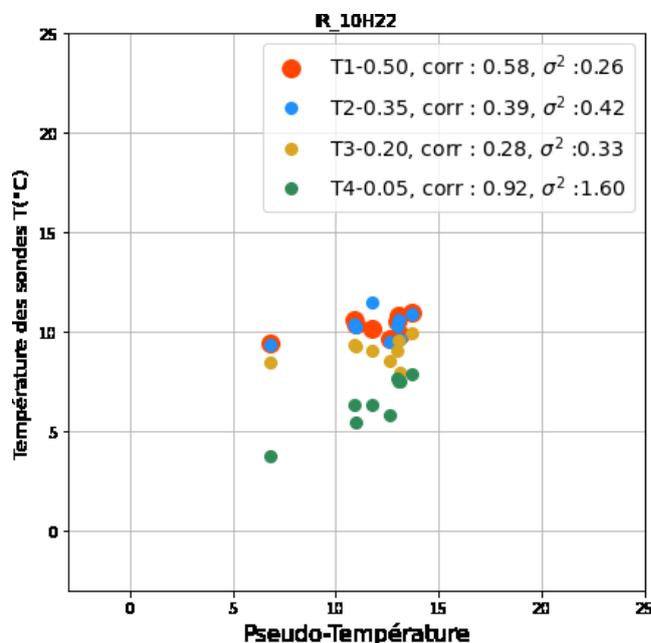


Figure 19. Scatterplot des données de températures de sondes en fonction des données de pseudo-températures IR. Les différentes couleurs sont associées aux différentes profondeurs. « Corr » correspond aux corrélations de Pearson.

L’affichage de la corrélation entre les données IR et celles des capteurs situés à 5 cm de la surface (Figure 20) illustre que la corrélation est maximale entre 8h22 et 10h22. Sur les autres périodes, en particulier en fin de journée, les données IR montrent des variations spatiales de température très réduites en comparaison des mesures de températures à 5 cm de profondeur, ce qui peut s’expliquer par l’atténuation/homogénéisation

induite par le couvert végétal, même si celui-ci ne fait que quelques cm d'épaisseur. L'exploitation combinée des données IR et de celles des capteurs sol à 5 cm est donc possible sur la première moitié de la matinée.

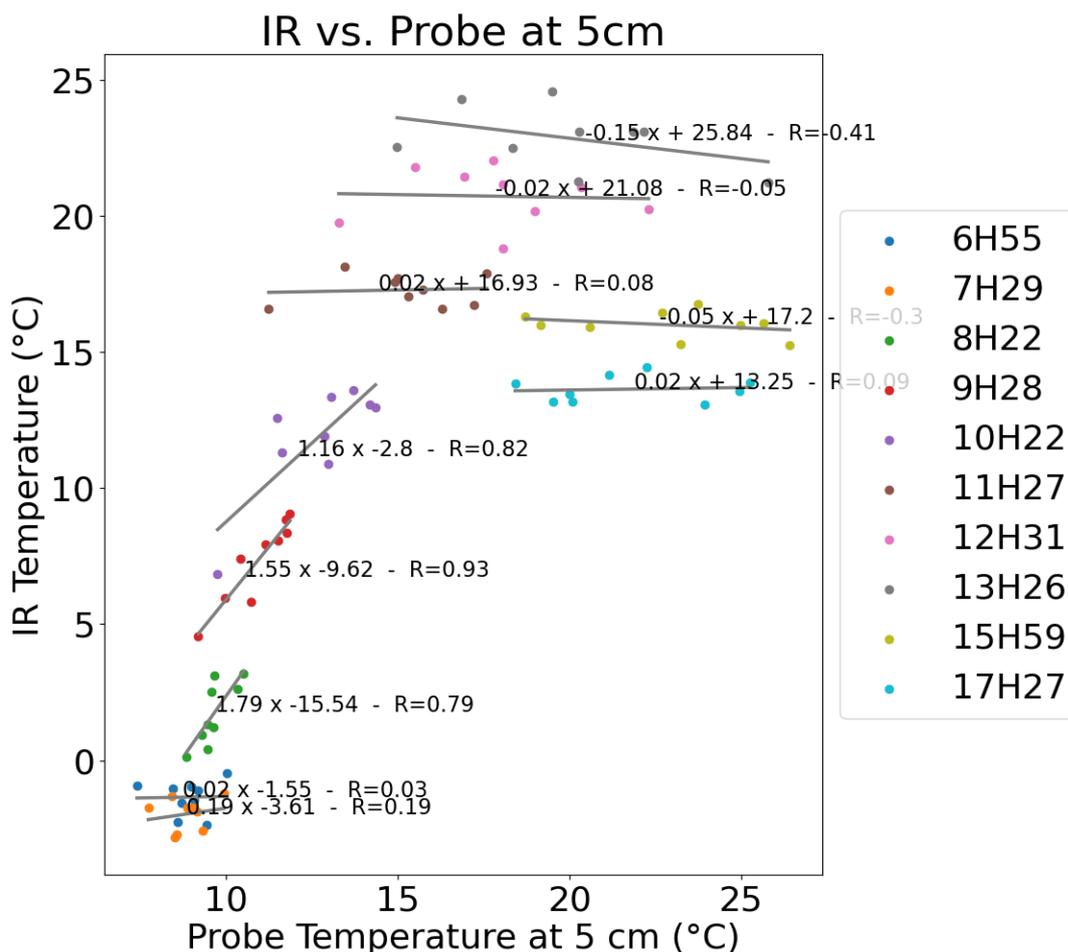


Figure 20 : Corrélation entre les mesures de température IR et celles des sondes à 5 cm de profondeur aux dix temps de mesure par drone.

Une fois ces premiers liens mis en lumière, une interpolation par co-krigeage intrinsèque colocalisé (ICCK) (Babak et Deutsch, 2009) a été effectuée avec des variables primaires, à savoir les températures des sondes à 5 cm de profondeur, mal échantillonnées spatialement (dix sondes sur toute la zone d'étude), mais finement sur le temps (15 min), et en prenant comme variables secondaires les pseudo-températures IR fournies par le drone.

Le modèle de co-krigeage ICCK est représenté sur la Figure 21, pour 8h22 ; en parallèle sont affichées les valeurs moyennes des sondes et du ICCK sur la Figure 22.

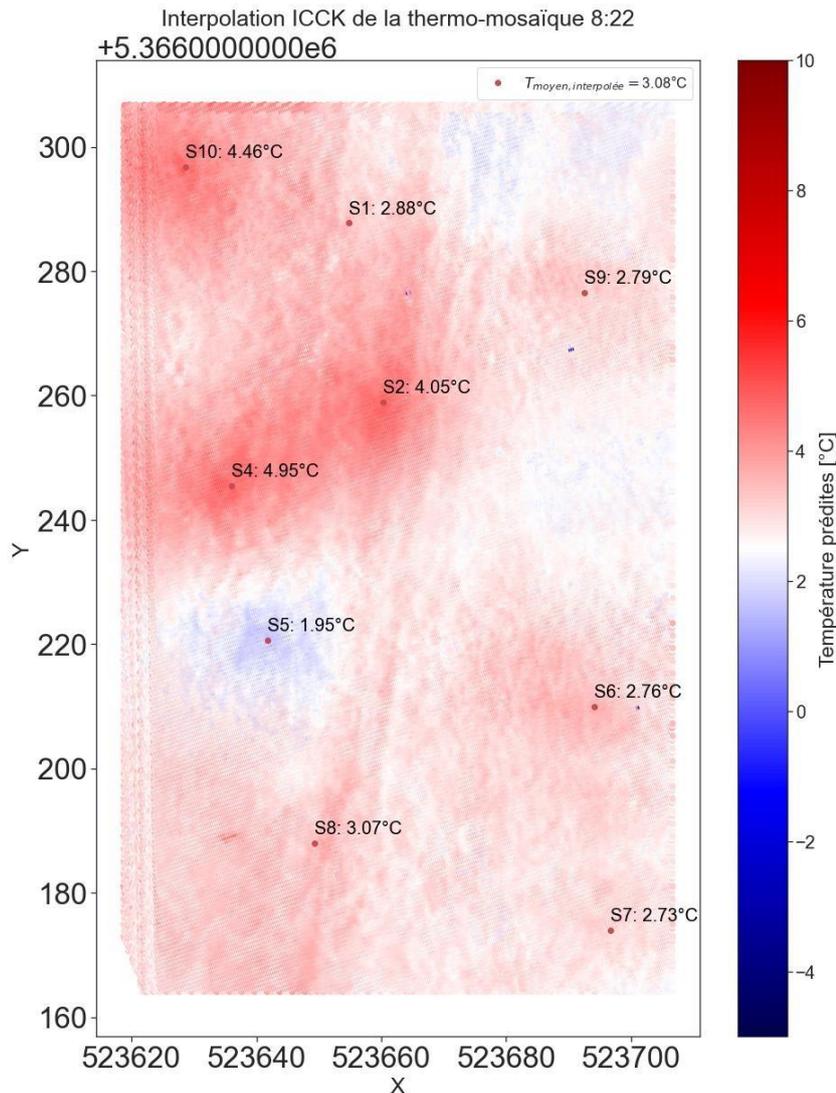


Figure 21. Co-krigeage des données de TIR et des températures de sonde à 5 cm pour les données de 8h22.

On remarque dans un premier temps les effets « d'interpolation sphérique » (« *bull-eyes* » en anglais) sur certains capteurs, dus à un poids trop fort des variables primaires. Ce phénomène se cumule très probablement avec un décalage dû à un déficit de calibration résiduel, et ce malgré les résultats satisfaisants de la Figure 22 montrant un bon accord entre les moyennes spatiales de température sur l'ensemble de la parcelle.

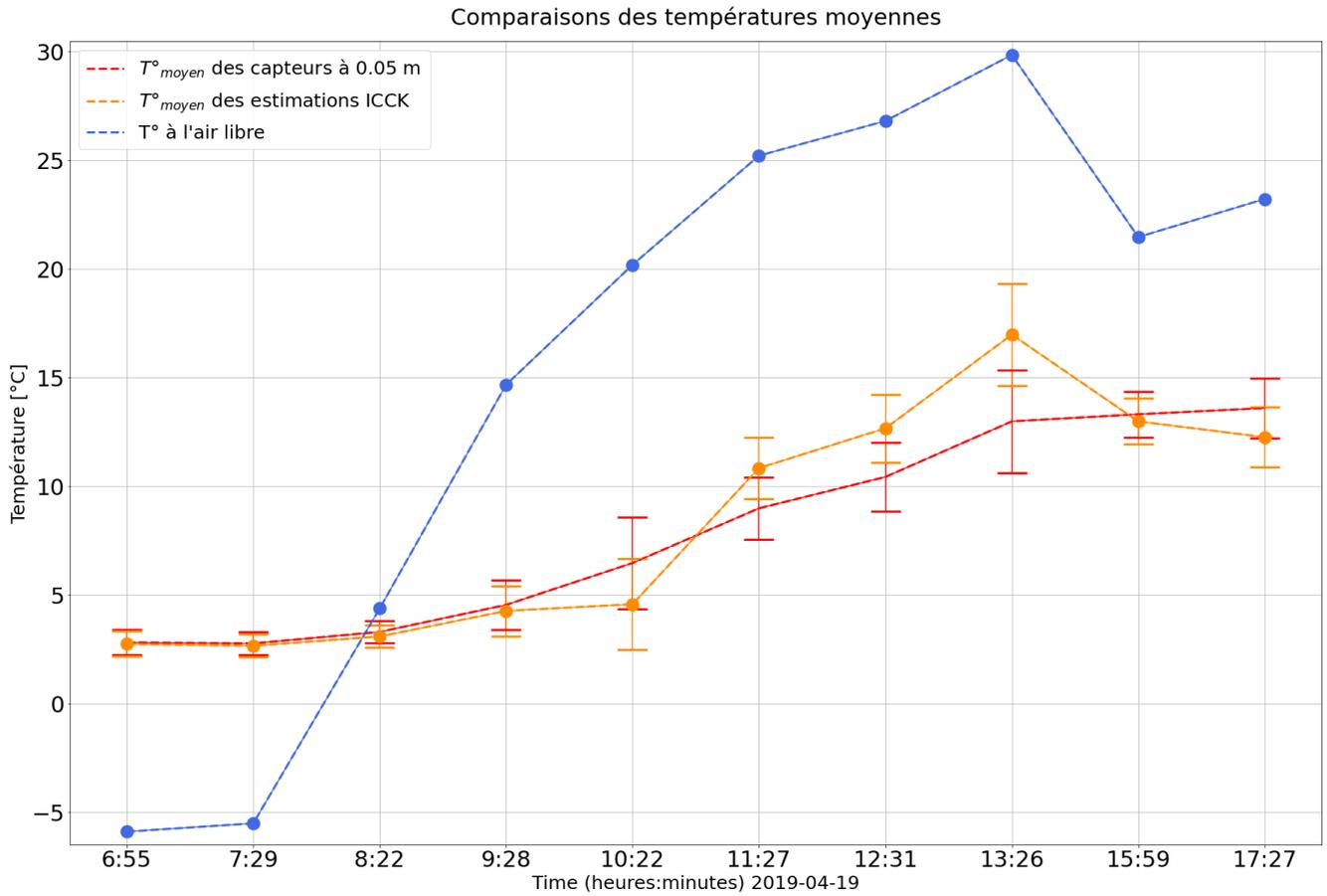


Figure 22. Comparaison des températures de sondes, de co-krigeage et de température de l'air en fonction du temps.

3.2 Corrélation des données géophysique EM/électrique avec les données IR et de sondes de température

Les mesures EM à haut rendement permettant de caractériser les résistivités électriques et épaisseurs des couches superficielles, il s'agit d'évaluer l'apport de ces mesures sur l'interpolation des dynamiques thermiques et/ou propriétés thermiques du sous-sol au-delà des premiers cm du sol. En effet, les données IR (acquises sur une journée) ne montrent une corrélation forte qu'avec les capteurs à 5 cm.

3.2.1 EM vs. IR aux positions des sondes de température

Aux positions des sondes de température, on observe une bonne corrélation ou anti-corrélation entre d'une part, les épaisseurs estimées des deux premières couches par la méthode EM et d'autre part, les données de température IR au début et à la fin la journée (Figure 23). À noter qu'entre 8h22 et 10h22, le coefficient de corrélation reste faible entre les données IR et les résultats EM, contrairement à l'analyse croisée des données IR et des sondes (cf. Figure 20).

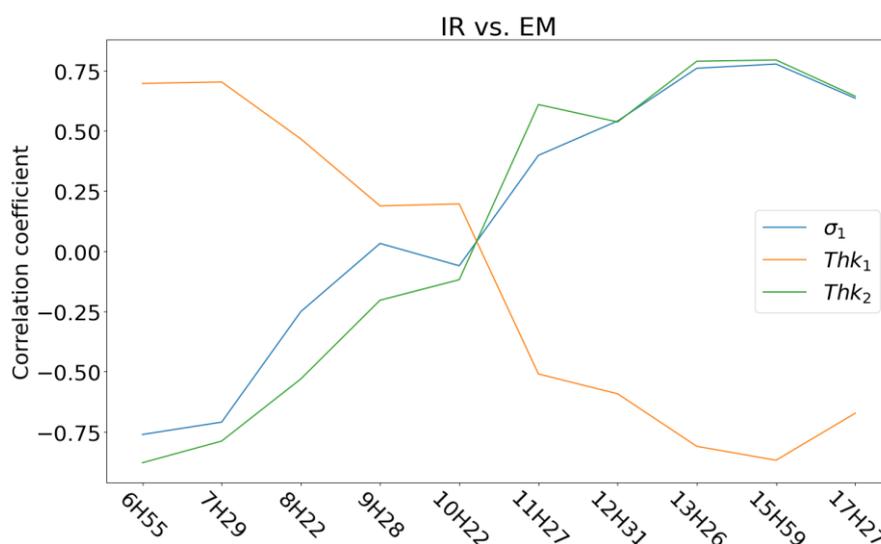
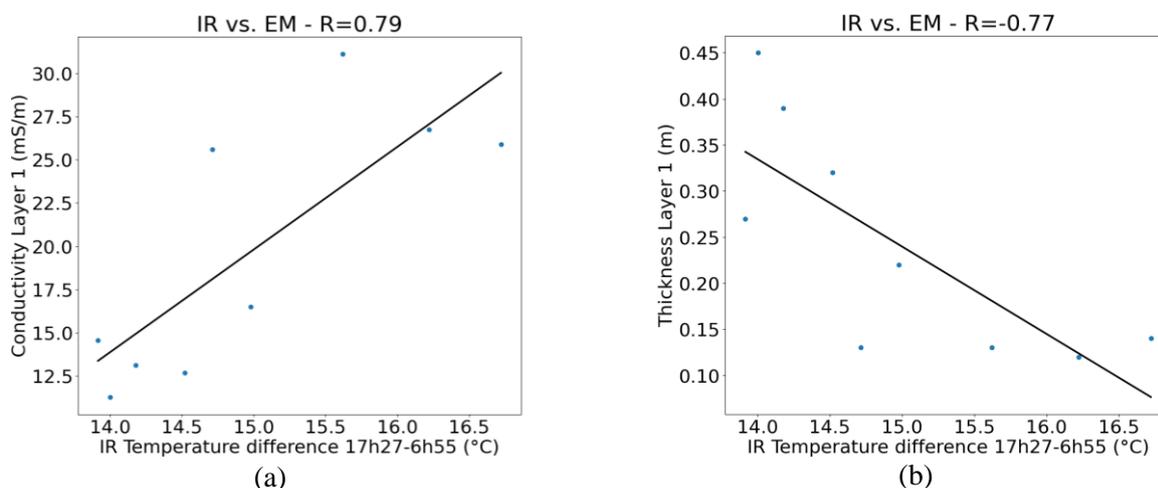
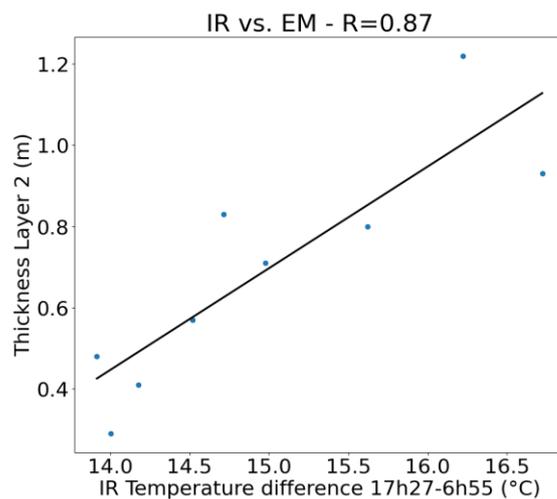


Figure 23. Corrélation aux positions des sondes de température entre les paramètres estimés lors de l'inversion des données EM (cf. Figure 15) et les mesures de température IR par drone à différentes heures de la journée.

En calculant la différence entre la dernière mesure IR (17h27) et la première de la journée (6h55), on obtient respectivement une anti-corrélation et une corrélation vis-à-vis des épaisseurs des couches 1 et 2 (Figure 24 b,c). La conductivité de la couche 1 estimée pendant l'inversion montre quant à elle une corrélation avec la différence de température IR (Figure 24a).





(c)

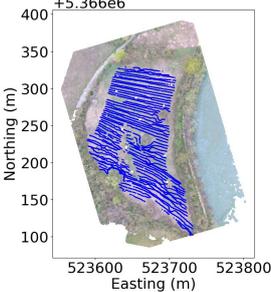
Figure 24. Corrélations aux positions des neuf sondes de température entre l'estimation de la conductivité électrique de la couche 1 (a), de l'épaisseur de la couche 1 (b), ou de l'épaisseur de la couche 2 (c), obtenues à partir de la cartographie EM (Figure 15), et la différence de température IR mesurée par drone (17h27 vs. 6h55).

3.2.2 EM vs. IR à l'échelle de la zone prospectée

La corrélation constatée en Figure 24 aux neuf positions des sondes de température est significative. Si la même corrélation est étudiée à l'échelle de l'ensemble de la parcelle, les valeurs de corrélation ne sont en revanche pas aussi élevées (Tableau 2). Pour ces derniers calculs de corrélation, tous les sondages EM dont le résidu normalisé est supérieur à 1, et où les valeurs des trois paramètres estimés ρ_1 , $Ep_{.1}$, et $Ep_{.2}$ dépassent les limites définies par les vibrisses des boîtes à moustaches, ont été retirés (Figure 25).

La moins bonne corrélation à l'échelle de la parcelle peut s'expliquer par plusieurs facteurs : changement de type et de densité de végétation ; sols aux propriétés pétrophysiques (porosité, teneur en eau, teneur en limon/argile) différentes qui ont des propriétés électriques similaires, mais des propriétés thermiques différentes ; empreintes différentes des modes de prospection.

Tableau 2. Coefficients de corrélation R entre les résultats EM et la différence de température IR entre 17h27 et 6h55.

	ρ_1	$Ep_{.1}$	$Ep_{.2}$
Au niveau des neuf sondes de température	0,89	-0,88	0,93
Toutes les zones considérées 	0,56	-0,36	-0,50
Zone « sèche » après classification K-means avec trois classes	0,55	-0,35	-0,54

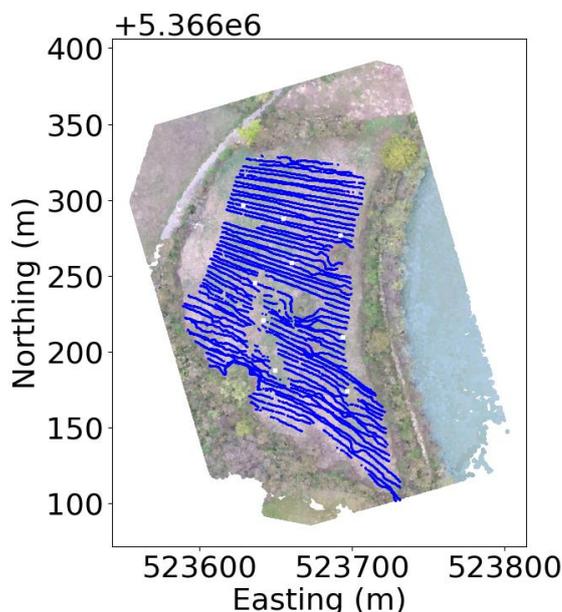
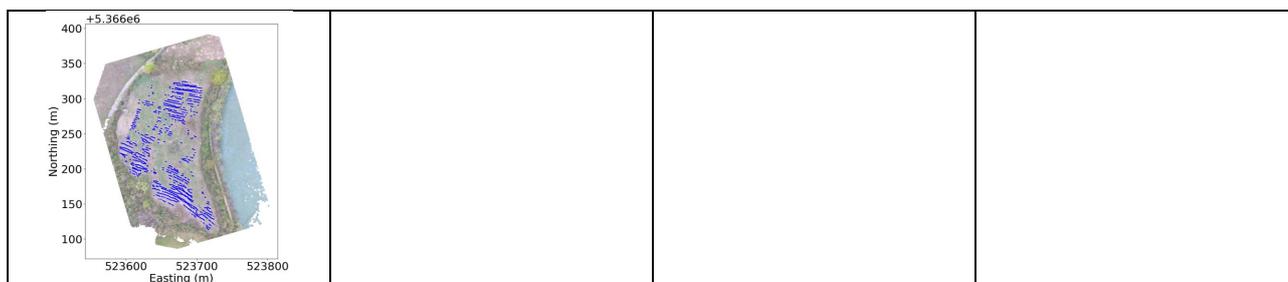


Figure 25. Résultats EM conservés pour l'analyse de corrélation avec les données IR après élimination des sondages avec un résidu normalisé > 1 et des modèles avec des valeurs extrêmes de ρ_1 , $Ep.1$, et $Ep.2$.

Afin de s'affranchir au maximum de l'effet de la végétation, une classification K-means (bibliothèque Python Scikit-learn) a été appliquée sur le visible (valeurs RGB – rouge vert bleu) afin d'isoler les zones « sèches », où la végétation est moins active (Figure 26). Le nombre de classes qui semble optimal (décroissance moins marquée du WCSS ; Figure 26c) est de trois, ce qui donne la carte en Figure 26 b : la classe 0 semble correspondre aux zones « sèches » (la Seine et la route au nord-ouest où aucune mesure n'a été effectuée se retrouvent dans cette classe), la classe 1 aux buissons et arbustes, et la classe 2 aux zones herbacées. Les corrélations entre les données IR et les résultats EM localisés dans ces zones « sèches » (Figure 26 d) sont résumées dans le *Tableau 2*. Les coefficients de corrélation restent quasi-identiques à ceux estimés en considérant toutes les zones. Une classification plus fine identifiant les types de végétation dont les amplitudes d'évapotranspiration seraient différentes pourrait permettre de mieux isoler la part de la réponse thermique liée aux propriétés thermiques du sol.

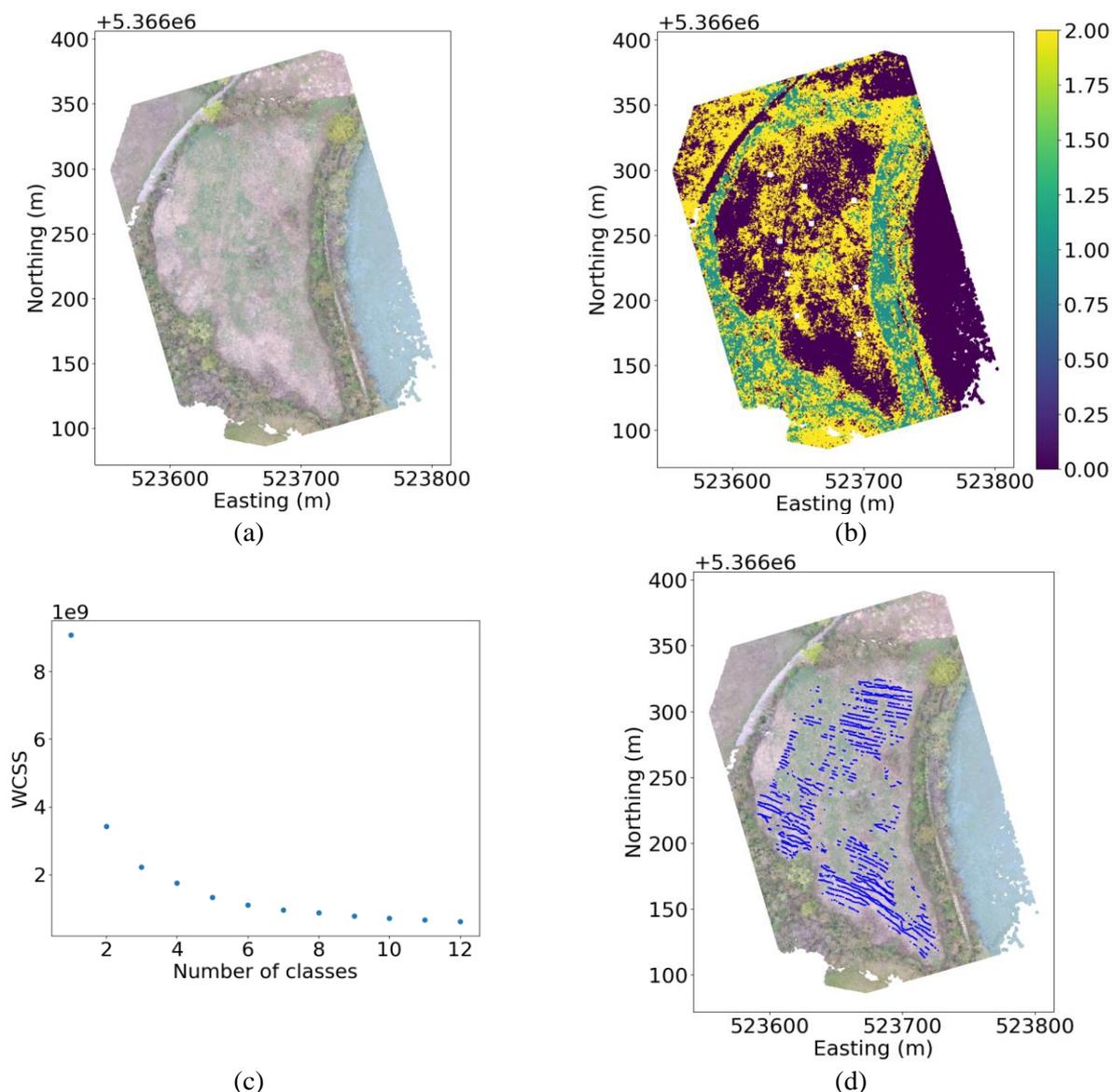


Figure 26. (a) Carte du visible (RGB) obtenue en drone ; (b) résultat de la classification *K-means* (bibliothèque Python *Scikit-learn*) à l'aide de trois classes ; (c) courbe du « *Within Cluster Sum of Squares* » (WCSS) permettant d'apprécier le nombre optimal de classes ; (d) Points de mesure EM appartenant à la classe 0 qualifiable de « zone sèche ».

3.2.3 Sondages électriques & EM vs. sondes de température

Entre les résultats des sondages électriques (cf. Tableau 1) et les données des sondes à 5 cm de profondeur, on remarque une forte corrélation entre la conductivité électrique (ou l'épaisseur de la couche) et les températures mesurées à 8h22 (Figure 27). À cette heure, une bonne corrélation a également été observée entre les données IR et celles des sondes à 5 cm (Figure 20). La conductivité et l'épaisseur de cette première couche très superficielle (de l'ordre de 20 cm d'épaisseur) ne sont pas déterminées avec autant de précision avec l'appareil utilisé pour la prospection EM, contrairement à l'épaisseur de la deuxième couche conductrice. Cela explique que l'évolution de la corrélation observée au cours de la journée soit similaire pour l'épaisseur de cette deuxième couche, mais pas pour les paramètres de la première couche (Figure 28). Afin de caractériser cette première couche superficielle à l'échelle d'une parcelle, il faudrait utiliser un appareil de prospection EM avec des écartements émission-réception plus resserrés que le conductivimètre CMD Mini explorer (GF instruments) ; ceci afin de concentrer la sensibilité sur les premières dizaines de centimètres. Une mesure EM aussi fine des premières dizaines de centimètres à l'avancement reste un enjeu technique, car les mesures à d'aussi petits écartements sont très sensibles aux petites variations de la hauteur d'acquisition. Une telle précision requiert également une calibration des mesures EM la plus fine possible.

Les corrélations avec les capteurs à 20, 35 et 50 cm ne sont pas illustrées car peu marquées à l'échelle de la journée (période de mesure du drone). Les mesures de température à ces profondeurs doivent être analysées sur des périodes plus longues.

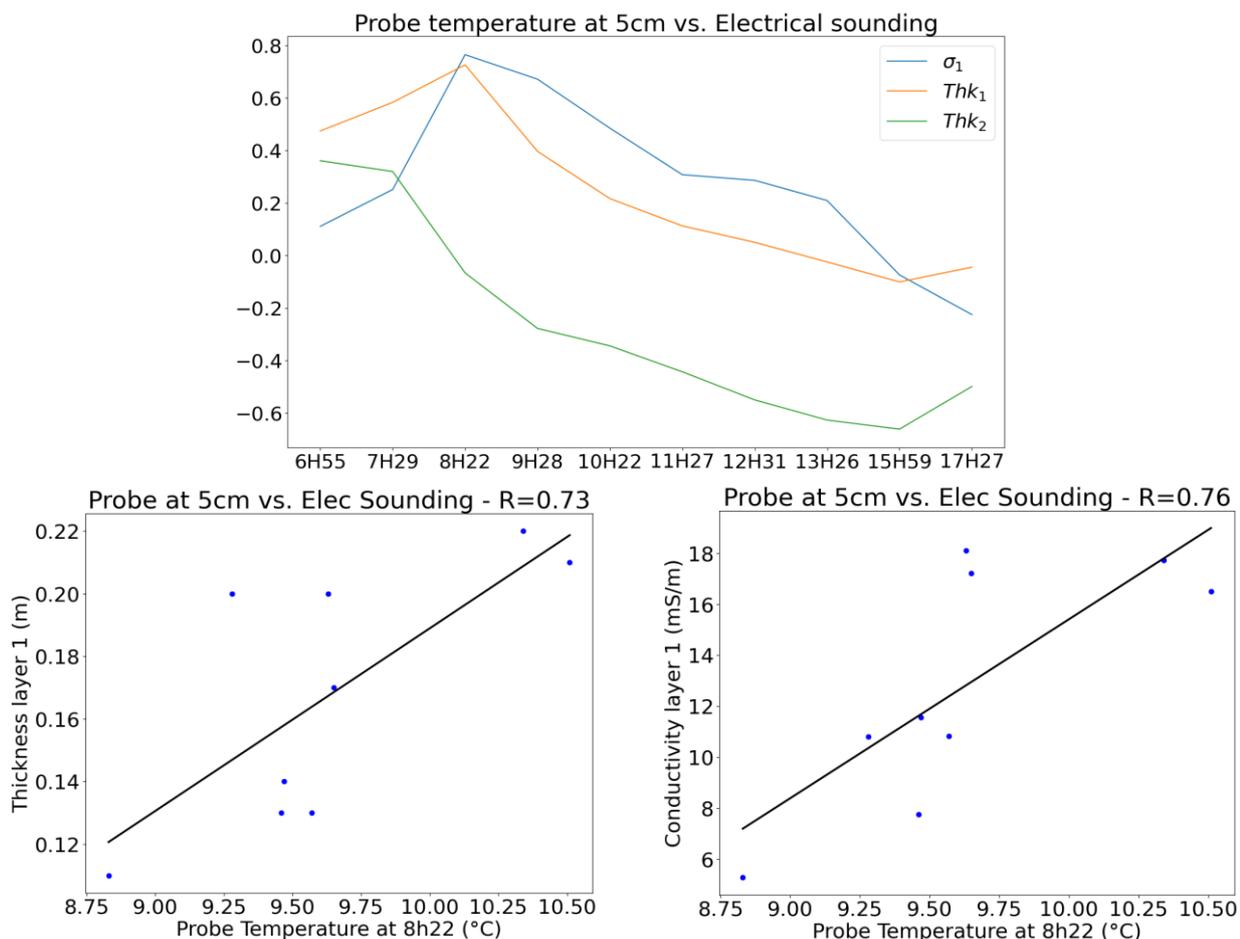


Figure 27 : Corrélation entre les résultats d'inversion des sondages électriques et les mesures de température pour les capteurs à 5 cm de profondeur.

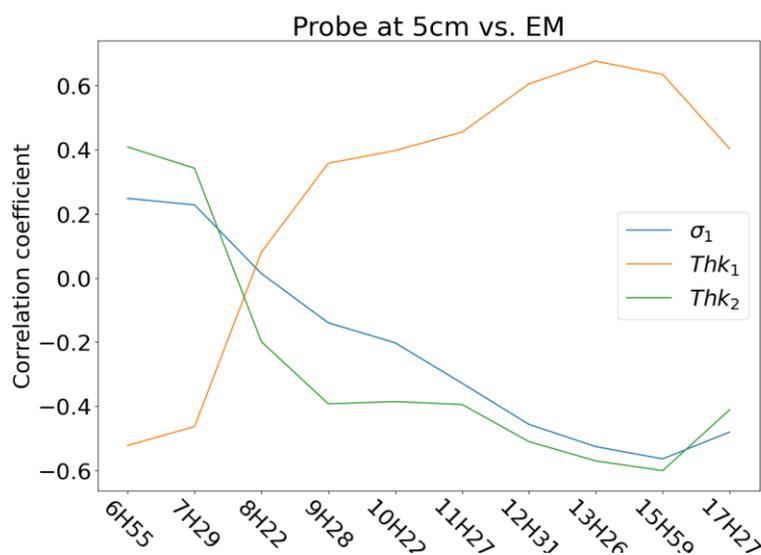


Figure 28 : Corrélation entre les résultats d'inversion des mesures EM et les mesures de température pour les capteurs à 5 cm de profondeur.

3.2.4 Diffusivités thermiques estimées entre les capteurs vs. conductance

En utilisant la même méthodologie qu'illustrée en Figure 5, la diffusivité thermique a été estimée à trois intervalles de profondeur pour les neuf sondes (Tableau 3). Si une tendance à l'augmentation de la diffusivité avec la profondeur est observée, la variabilité spatiale pour chaque intervalle de profondeur est relativement faible.

Le calcul de la corrélation avec la conductance (produit conductivité x épaisseur), estimée aux mêmes intervalles à partir des résultats d'inversion des sondages électriques, a donné des facteurs de corrélation inférieurs à 0,4. Le lien conductivité électrique/propriété thermique devrait être complété par des mesures de teneur en eau et de teneur en argile, qui impactent simultanément la valeur de conductivité apparente. Avec certains dispositifs de prospection électromagnétique multi-fréquentielle, il serait envisageable de déterminer la permittivité électrique sensible à la teneur en eau ou en argiles suivant la fréquence, et ainsi de disposer d'un critère de discrimination complémentaire à la conductivité électrique (Tabbagh et al., 2021).

	5-20 cm	20-35 cm	35-50 cm
S1	2,36E-07	2,70E-07	3,09E-07
S2	2,10E-07	2,70E-07	2,93E-07
S4	2,21E-07	3,03E-07	3,44E-07
S5	2,37E-07	2,46E-07	3,11E-07
S6	2,28E-07	2,38E-07	3,21E-07
S7	2,15E-07	3,04E-07	2,86E-07
S8	2,04E-07	3,01E-07	8,59E-07
S9	2,45E-07	2,69E-07	3,10E-07
S10	2,16E-07	2,64E-07	2,85E-07

Tableau 3 : Diffusivités thermiques (m^2/s) estimées (même méthodologie qu'en Figure 5) entre les quatre capteurs thermiques en considérant une période d'observation d'une dizaine de jours.

Conclusions & perspectives

La pertinence de l'utilisation des températures comme traceur des transferts hydriques n'est plus à démontrer. Néanmoins à l'échelle de la très proche surface, c'est surtout la conductivité thermique qui prédomine au détriment de la chaleur spécifique. Par conséquent, l'inférence de la diffusivité thermique évaluée dans le cadre de ce travail constitue d'abord une mesure des conductivités thermiques du terrain superficiel jusqu'à une profondeur de 50 cm, ce qui correspond à la profondeur maximale des sondes de températures enterrées. Dans ce contexte, la spatialisation de la diffusivité thermique à partir de mesures IR par drone et par cartographie de la conductivité électrique constitue une démarche méthodologique particulièrement innovante, en offrant une perspective de changement d'échelle considérable.

Dans le cas présent, l'objectif a été d'aborder directement le problème à la mésoéchelle (parcelle de quelques hectares). L'interprétation des températures a été effectuée sur une parcelle de quelques hectares avec des relevés 1) effectués par drone (avec une résolution pluri-centimétrique en caméra infrarouge thermique), durant deux vols sur un cycle diurne réalisés en avril et juin 2019 ; et 2) effectués au sol à 5, 20, 35 et 50 cm de profondeur grâce à neuf sondes réparties sur l'aire d'étude. Ce protocole de mesure, associé à une prospection géophysique permettant de contraindre spatialement la variabilité structurale (au sens de la conductivité électrique), est potentiellement généralisable à n'importe quelle formation superficielle. Le principal résultat de ces travaux montre que les mesures IR drones, en particulier en matinée, peuvent être utilisées comme contraintes de spatialisation de mesures de température du très proche sous-sol (premiers cm). Pour l'instant, l'inférence des propriétés thermiques impliquant la chaleur spécifique du sous-sol n'est pas accessible. La présente démarche, bien que soulevant encore de nombreuses questions, ouvre clairement la perspective d'un traitement similaire à plus grande échelle spatiale dans le cas où les données IR proviendraient de mesures à plus haute altitude. Il est donc naturel d'envisager des démarches similaires pour le passage entre les données à l'échelle du drone et celles à l'échelle de l'aéroporté, voire à celles satellitaires. Un autre résultat essentiel concerne l'intérêt de la cartographie de conductivité électrique du sous-sol comme contraintes auxiliaires pour définir le modèle de terrain superficiel. L'intérêt du modèle géophysique réside principalement en la capacité

d'analyser dans quelles proportions les différents horizons superficiels participent, significativement ou non, aux échanges thermiques à l'interface air-sol, et ce en fonction de la densité de végétation.

Néanmoins, de nombreux verrous restent à lever afin de fiabiliser le lien entre mesures IR drone et les mesures associées au sous-sol, que ce soit les mesures de température ou de conductivité électrique. L'estimation des fonctions de transfert entre les différents protocoles de mesures thermiques requiert l'évaluation précise de la contribution du couvert végétal au signal thermique, quel que soit le type de mise en œuvre pour ces mesures, ce qui reste actuellement un domaine de recherche actif. Les mesures géophysiques au sol, en particulier les mesures EM, mériteraient également d'être complétées afin de quantifier des paramètres autres que la conductivité électrique, comme la permittivité diélectrique, qui est sensible suivant la fréquence d'émission à la teneur en eau ou à la teneur en argiles. La présente étude montre qu'exploiter seulement la conductivité électrique (associée aux épaisseurs des horizons) n'est pas suffisant pour dissocier les contributions de la teneur en argiles et de la teneur en eau sur la conductivité électrique, afin d'en extraire une information sur les propriétés thermiques.

Il s'agira, dans la suite des travaux en cours, de poursuivre la validation des modèles de comportement physiques permettant d'améliorer notre compréhension phénoménologique des liens entre d'un part, les mesures de température par drone et du sous-sol et d'autre part, les paramètres géophysiques des formations superficielles. En parallèle, étant donné le volume considérable de données associées aux investigations radiométriques et de géophysique de proche surface, il sera également nécessaire d'aborder beaucoup plus précisément les techniques de classification, de fusion de données et d'apprentissage, destinées à compléter les approches physiques déterministes pour la caractérisation spatialisée des propriétés thermiques du sous-sol. Ce point concentrera l'essentiel des efforts de recherche et constituera l'un des défis à relever pour les travaux de reconstitution des trajectoires thermiques de la Bassée. D'un point de vue expérimental, deux points clefs devront être abordés : d'abord la possibilité d'effectuer des mesures drones IR sur des durées beaucoup plus longues et à intervalles réguliers pour rendre compte de cycles plus réguliers. En effet, la mesure sur une ou deux journées, même toutes les deux heures, ne permet pas de couvrir suffisamment de cycles thermiques. Ensuite, il s'agit d'accompagner l'ensemble des mesures physiques par une analyse fine de l'état de surface au regard du couvert végétal, permettant de corriger plus efficacement l'effet de ce couvert sur les mesures IR hors sol.

Bibliographie

Abu-Hamdeh, N.H. and Reeder, R.C., 2000. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil science society of America Journal*, 64(4), 1285-1290.

Antoine, R., Lopez, T., Tanguy, M., Lissak, C., Gailler, L., Labazuy, P. and Fauchard, C., 2020. Geoscientists in the sky: unmanned aerial vehicles responding to geohazards. *Surveys in Geophysics*, 41, 1285–1321.

Babak, O. and Deutsch, C.V., 2009. Collocated cokriging based on merged secondary attributes. *Mathematical Geosciences*, 41(8), 921-926.

Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A. and Strahler, A., 2019. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management*, 450, 117484.

Briggs, M. A., E. B. Voytek, F. D. Day-Lewis, D. O. Rosenberry and J. W. Lane, 2013. Understanding water column and streambed thermal refugia for endangered mussels in the Delaware River, *Environment Science & Technology*, 47(20), 11,423–11,431.

Caldwell, S., Kelleher, C., Baker, E. and Lautz, L., 2019. Relative information from thermal infrared imagery via unoccupied aerial vehicle informs simulations and spatially-distributed assessments of stream temperature. *Science of the Total Environment*, 661, 364–374.

Casas-Mulet, R., Pander, J., Ryu, D., Stewardson, M.J. and Geist, J., 2020. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Thermal Infra-Red (TIR) and Optical Imagery Reveals Multi-Spatial Scale Controls of Cold-Water

Areas Over a Groundwater-Dominated Riverscape. *Frontiers in Environment Science*, 8, 1–16.

Cucchi, K., Flipo, N., Rivière, A. and Rubin, Y., 2021. Estimating hydrothermal properties and high-frequency fluxes from multiphysics measurements in the hyporheic zone. *Frontiers in Water*, 3(102), 700274.

Cucchi, K., Rivière, A., Rubin, Y. and Flipo, N., 2019. Estimation des échanges nappe-rivière locaux et de leur variation le long d'un réseau hydrographique : Développement d'un capteur innovant et application au bassin agricole des Avenelles in *Fonctionnement hydrogéophysique des interfaces nappe-rivière et conséquences sur la ressource en eau*, Rapport PIREN SEINE.

Cucchi, K., Rivière, A., Baudin, A., Berrhouma, A., Durand, V., Rejiba, F., Rubin, Y. and Flipo, N., 2018. LOMOS-mini : A coupled system quantifying transient water and heat exchanges in streambeds. *Journal of Hydrology*, 561, 1037-1047.

Flipo, N., Mouhri, A., Labarthe, B., Biancamaria, S., Rivière, A. and Weill, P., 2014. Continental hydrosystem modelling: the concept of nested stream–aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3121-3149.

Jost, A., Schneider, A.C., Oudin, L. and Ducharme, A., 2017. On the use of a physically-based baseflow timescale in land surface models. AGUFM, 2017, H13G-1469.

Jurado-Exposito, M., De Castro, A.I., Torres-Sanchez, J., Jiménez-Brenes, F.M. and Lopez-Granados, F., 2019. Papaver rhoeas L. mapping with cokriging using UAV imagery. *Precision Agriculture*, 20, 1045–1067.

Kelly, J., Kljun, N., Olsson, P.-O., Mihai, L., Liljeblad, B., Weslien, P., Klemetsson, L., and Eklundh, L., 2019. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. *Remote Sensing*, 11(5), 567.

Kurita, K., Baratoux, D., Sato, H., Suzuki, A., Vaucher, J., Kodama, S., Ichihara, M., Saiki, K., Kaneko, T., Kimura, J. and Takahashi, S., 2007. Thermal imaging of volcanic areas and implications for the interpretation of surface temperatures on mars. LPICo, 1353, 3113.

Lavoué, F., Van Der Kruk, J., Rings, J., André, F., Moghadas, D., Huisman, J. A., Lambot, S., Weiermüller, L., Vanderborght, J. and Vereecken, H., 2010. Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, 8(6), 553–561.

Maes, W., Huete, A., and Steppe, K., 2017. Optimizing the Processing of UAV-Based Thermal Imagery. *Remote Sensing*, 9(5), 476.

Rejiba, F., Schamper, C., Chevalier, A., Deleplancque, B., Hovhannissian, G., Julien, T. and 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.

Rejiba, F., Fauchard C., Antoine, R., Finco, C., Schamper, C., Levaillant, R. and Rivière, A., 2019. Imagerie Infrarouge Thermique par un drone par la caractérisation des hétérogénéités des températures de surface d'un hydrosystème (rivière, surface du sol, gravière). Rapport PIREN Seine.

Rivière, A., Flipo, N., Goblet, P., and Berrhouma, A., 2020. Thermal reactivity at the stream-aquifer interface. *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1735–1753.

Tabbagh, A., Rejiba, F., Finco, C., Schamper, C., Souffaché, B., Camerlynck, C., Thiesson, J., Jougnot, D., and Maineult, A., 2021. The case for considering polarization in the interpretation of electrical and electromagnetic measurements in the 3 kHz to 3 MHz frequency range. *Surveys in Geophysics*, 42, 377-397.

Tabbagh, A., Cheviron, B., Henine, H., Guérin, R. and Bechkit, M.A., 2017. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles. *Advances in Water Resources*, 105, 217-226.

Tabbagh, A., Bendjoudi, H. and Benderitter, Y., 1999. Determination of recharge in unsaturated soils using temperature monitoring. *Water Resources Research*, 35(8), 2439–2446.

Turcotte, D.L. and Schubert, G., 2002. *Geodynamics*. Cambridge university press.

Trajectoires de la plaine alluviale de la Bassée ¹

Jean-Louis Grimaud¹, Mathilde Resch², Laurence Lestel^{2*}, Julie Gobert³, José-Frédéric Deroubaix³

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

² Sorbonne Université/CNRS/EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

³ Ecole des Ponts, LEESU, Champs-sur-Marne, France

* Laurence.lestel@sorbonne-universite.fr

Résumé

Ce rapport fait le point sur les avancées des études historiques sur le territoire de la Bassée. Durant la phase VIII du PIREN Seine, de nouveaux outils ont été mobilisés pour investiguer la plaine alluviale et la relation des habitants de la plaine avec leurs cours d'eau. Cette géohistoire de la Bassée s'est appuyée sur des archives de terrain pour décrire les trajectoires d'abandon d'anciens chenaux de la Seine sur le temps long, sur des archives historiques pour décrire l'impact de la chenalisation de la Seine depuis le XIXe siècle sur le fonctionnement hydraulique de la plaine alluviale et sur une enquête basée sur des entretiens semi-directifs pour identifier les enjeux contemporains que connaît cette plaine, lesquels participent à la re-structuration de l'identité de ce territoire

Points clés

- *Les anciens tracés fluviaux de la Seine montrent un système anabranché au Moyen Âge ;*
- *Les aménagements hydrauliques en Bassée ont conduit à des conflits résultants d'impacts sur la plaine alluviale ;*
- *L'identité de la plaine se construit aujourd'hui à l'ombre des grands projets portés par des acteurs extérieurs au territoire.*

Abstract

This document reviews the latest advances of historical studies in the Bassée area. During this phase 8 of the PIREN Seine program, new tools were mobilized to investigate the alluvial plain and the relationship between the plain's inhabitants and their watercourses. This geohistory of the Bassée is based on the use of field archives to describe the trajectories of abandonment of former Seine channels over time, on historical archives to describe the impact of the channelling of the Seine since the 19th century on the hydraulic functioning of the alluvial plain, and on interviews to identify the current issues of this plain, which participate to the redesign of the territorial identity.

¹. Pour citer cet article : Grimaud J.L., Resch, M., Lestel, L., Gobert, J., Trajectoires de la plaine alluviale de la Bassée. Dans Carré, C., Lestel, L., Flipo, N. (eds), *Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie*, PIREN-Seine, Rapport de synthèse phase VIII, Volume 7, 2023, pp. 107-129

Key points

- *The ancient river channels of the Seine show an anabranched system in the Middle Ages;*
- *Hydraulic engineering in the Bassée has led to conflicts resulting from impacts on the alluvial plain;*
- *Today, the plain's identity is being built in the shadow of the major projects that are led by external stakeholders.*

Sommaire

Introduction	109
1 Chenaux abandonnés de la Bassée	109
2 Trajectoires de la plaine alluviale de la Bassée depuis le XIXe siècle	113
3 Interdépendances et nouvelles solidarités : (a)ménager les territoires de la Seine amont.....	118
Conclusion.....	126
Bibliographie.....	126

Introduction

Ce rapport fait le point sur les avancées des études historiques sur le territoire de la Bassée. Si cette plaine alluviale a déjà été investiguée dans le passé par le PIREN Seine, les études précédentes avaient plutôt traité au lit mineur et à son évolution (Lestel et al., 2019). Durant cette phase, nous avons mobilisé de nouveaux outils pour investiguer la plaine alluviale et la relation des habitants de la plaine avec leurs cours d'eau. Une géohistoire générale de la Bassée avait déjà été proposée dans des phases antérieures du PIREN Seine (Fustec et al., 1998, 2001), mais ne s'appuyait pas sur des archives de terrain pour décrire les trajectoires d'abandon d'anciens chenaux de la Seine sur le temps long (partie 1), sur des archives historiques pour décrire l'impact de la chenalisation de la Seine depuis le XIXe siècle sur le fonctionnement hydraulique de la plaine alluviale (partie 2) et sur des enquêtes pour identifier les enjeux contemporains que connaît cette plaine, lesquels participent à la conclusion de nouveaux arrangements et à la re-structuration de l'identité de ce territoire (partie 3).

1 Chenaux abandonnés de la Bassée

Le but de cette action était de reconstruire des trajectoires sur le temps long d'anciens chenaux abandonnés de la Seine. La dynamique de leur remplissage a été étudiée à différentes échelles de temps, *i.e.* du très long (10^{3-4} années) jusqu'au plus récent (en lien avec les aménagements du lit majeur depuis le début du XIXe siècle). Cette partie a constitué le cœur des travaux de cet axe. Les résultats permettent d'appréhender de manière nouvelle l'évolution passée de la Seine : (i) reconsidération du style fluvial au Moyen Âge (en faveur de l'anabranchement et non d'une Seine unique), (ii) mesure des vitesses du déplacement latéral de la Seine avant 1850 (jusqu'à 2,5 m/an localement) et (ii) réévaluation des paléopaysages alluviaux et des implantations humaines au Néolithique. Dû à l'important effort consacré à la partie trajectoire, le volet modélisation des hétérogénéités en lien avec le fonctionnement hydro-géochimique global de la Bassée, n'a pas été achevé. Des premiers résultats ont néanmoins pu montrer l'hétérogénéité des tailles des chenaux holocènes. Ces résultats ouvrent de nombreuses perspectives pour le futur.

Des informations complémentaires sur les paléoenvironnements des derniers 1800 ans ont été obtenues sur une séquence alluviale par reconstitution des paléotempératures à partir de la géochimie organique (alkyl tétraéthers de glycérol) et par reconstitution des environnements végétaux à partir du contenu en pollen. Ces informations seront complétées par des données de géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et Δ_{47}), qui n'ont pas pu être réalisées en raison de problèmes de maintenance des spectromètres de masse à Mines Paris et au LSCE.

Ces travaux se sont appuyés sur la thèse de Léo Szewczyk (2020), le M2 de Pierre Charrondière-Lewis (2020), un stage de L3 à Metis sous la direction d'Arnaud Huguet ainsi que les stages de Jean Catry, Amélie Imperor et Ibtissem Quaisse (Catry, 2021 ; Imperor et Quaisse, 2022). Ils ont mené à la publication de deux rapports PIREN (Grimaud et al., 2020 ; 2021) et de deux articles scientifiques, dont un dans la revue *Nature Scientific Reports* (Petit et al., 2021 ; Grimaud et al., 2023). Enfin, ces travaux ont pu être valorisés auprès d'un large public : à travers la participation à une fiche 4 pages PIREN, à travers la participation à l'exposition

« l'Eau, ça turbine » et sous forme d'un podcast PSL (TANGRAM : <https://podcast.ausha.co/tangram/13-le-paysage-au-premier-plan>).

1.1 Restitution des tracés fluviaux

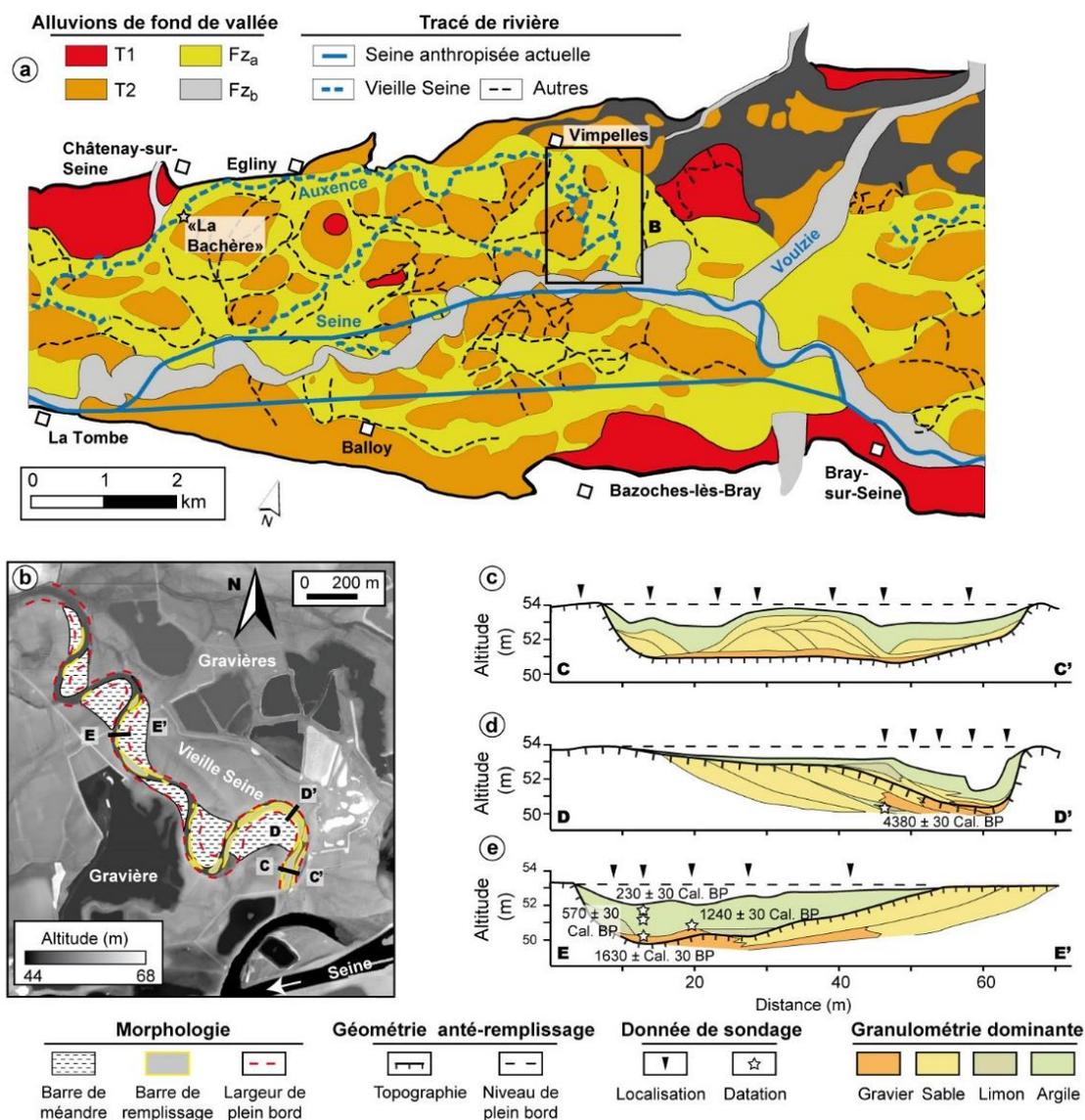


Figure 1. Travaux effectués à Vimpelles. (a) Carte régionale montrant les différents (d'après Mégnien et al., 1965 et Deleplancque et al., 2018). (b) Zoom sur la Vieille Seine de Vimpelles et localisation des transects d'échantillonnage de sédiment à la tarière ou au carottier. (c-e) Coupes interprétées de la disposition des sédiments dans le fond du chenal. Les âges radiocarbone obtenus sont reportés (Petit et al., 2021)

À Vimpelles, une analyse morpho-sédimentaire a été menée sur le tracé de la « Vieille Seine » à partir d'une trentaine de sondages carottés (Figure 1). Les hétérogénéités sédimentaires montrent l'existence de dépôts grossiers perméables, associés au dépôt d'un bouchon sableux à l'amont de ce chenal qui devient plus argileux vers l'aval. Les restitutions géomorphologiques et datations suggèrent que ce chenal appartenait à un système anabranché et montrent plusieurs périodes d'activité : la première période est identifiée durant le Néolithique et la seconde se termine durant l'Antiquité. L'analyse de documents d'archives témoigne de l'usage de ce chenal

comme voie de communication, qui s'arrête avec le comblement sédimentaire (Petit et al., 2021).

À **Noyen-sur-Seine**, la synthèse de données géomorphologiques, historiques et radiochronologiques a permis de réévaluer le contexte de l'implantation humaine néolithique à proximité d'un site archéologique dont de nombreux artefacts (notamment deux pirogues : carolingienne et mésolithique) sont conservés au musée de la Préhistoire de Nemours. La restitution de la migration du cours de la Seine (par l'analyse de cartes historiques) et la datation de chenaux abandonnés ont démontré que l'enceinte néolithique de ce site n'est aujourd'hui que partiellement préservée : la partie manquante est due à l'érosion latérale du fleuve Seine depuis plus de 5000 ans (Figure 2). Ces résultats impliquent que les enceintes du Néolithique étaient circulaires, plus vastes et construites à une distance raisonnable des fleuves, afin de limiter les risques d'inondation lors des crues. Les travaux futurs en 2024, en lien avec le collectif chercheurs-acteurs en Bassée, porteront sur l'évolution long-terme des paysages basséens sous forme de fascicule.

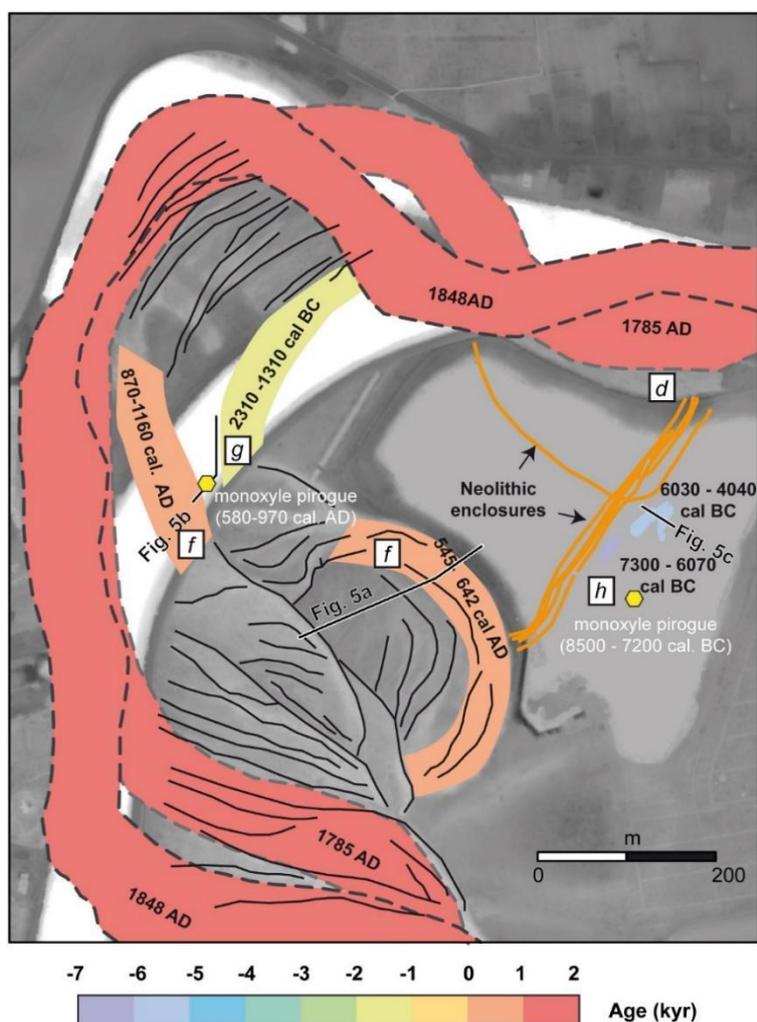


Figure 2. Synthèse des données géomorphologiques, historiques et radiochronologiques de la Seine à Noyen (Grimaud et al., 2023).

1.2 Reconstitution de contextes paléoenvironnementaux

À **Vimpelles**, 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 (Figure 3). Les résultats corroborent les principaux

événements climatiques répertoriés dans la littérature, qui ont pu être identifiés, démontrant l'intérêt des tétraéthères bactériens en tant que marqueurs de température. Ces résultats seront comparés notamment aux clumped isotopes des carbonates (Δ^{47}) ainsi qu'à l'enregistrement pollinique (Huguet in Grimaud et al., 2021).

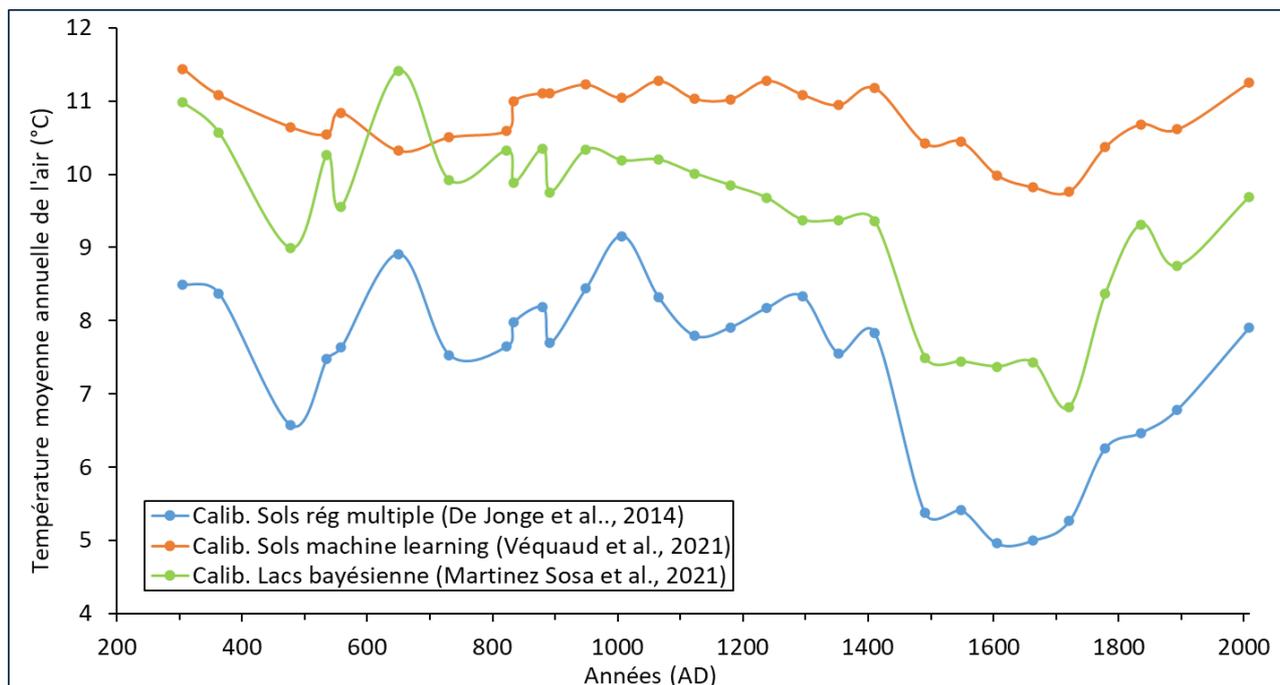


Figure 3. Reconstitution de 1800 ans de températures de l'air dans la Bassée en utilisant les tétraéthères bactériens comme marqueurs et utilisant différentes calibrations (De Jonge et al., 2014 ; Véquaud et al., 2021 ; Martinez Sosa et al., 2021).

1.3 Hétérogénéité des tailles de chenaux

Sur l'ensemble de la Bassée, on note une grande disparité des tailles de chenaux. La largeur de la Seine actuelle domestiquée est d'environ 80 m. Celle des chenaux du Moyen Âge (à Vimnelles et Noyen-sur-Seine) était d'environ 50 m. L'existence d'un réseau anabranché est suggérée pour cette époque. Au tout début de l'âge du Bronze, un réseau anabranché peut également être suggéré, avec des chenaux dont la largeur pouvait localement dépasser 100 m (comme à Balloy). Des largeurs supérieures sont observées pour des chenaux plus anciens, mais encore mal datés : plus de 300 m à Neuvry (chenal supposé néolithique) et plus de 500 m de large à La Motte Tilly (chenal supposé préboréal).

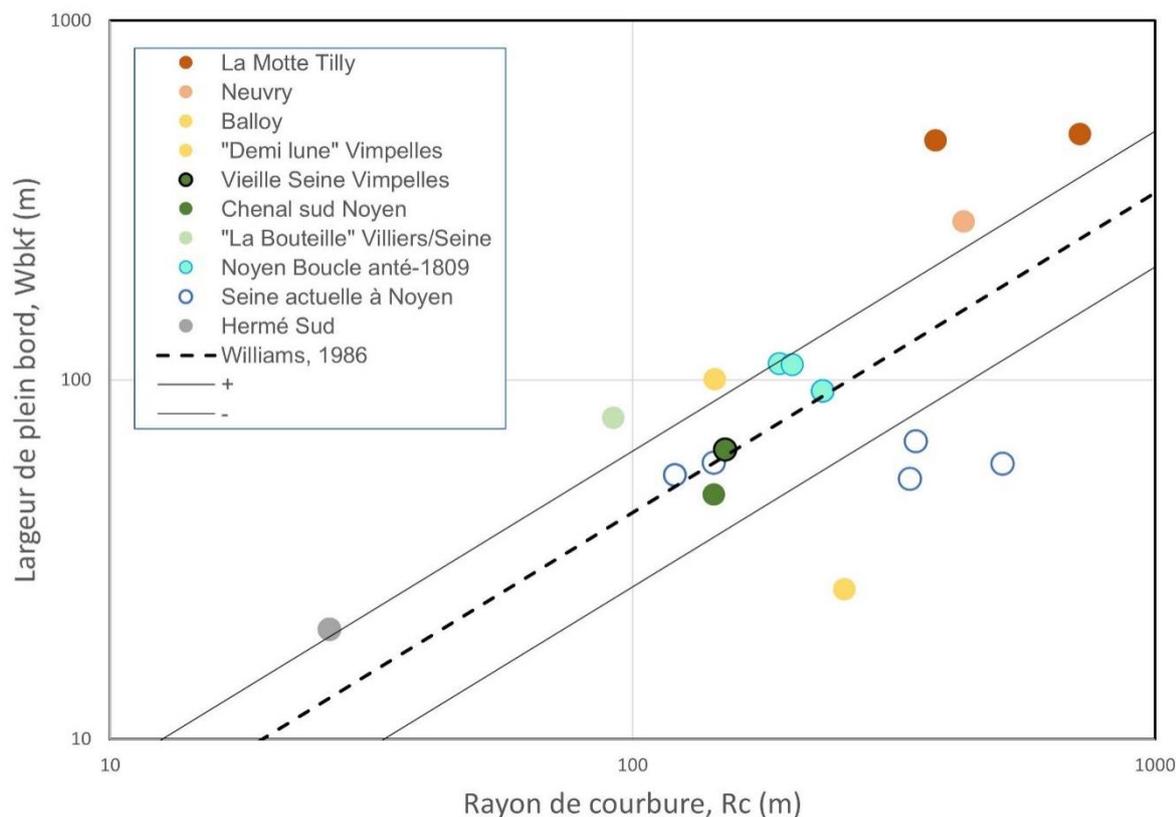


Figure 4. Hétérogénéités des largeurs de chenaux dans la Bassée en fonction du rayon de courbure du chenal (Imperator et Quaisse, 2021). Ces valeurs sont comparées à la régression de Williams (1986).

2 Trajectoires de la plaine alluviale de la Bassée depuis le XIXe siècle

Cette partie s'appuie sur un rapport PIREN (Resch et al., 2022) et sur un article en cours de rédaction (Resch et al.). Il est important de souligner qu'écrire une histoire de la plaine de la Bassée pose des problèmes méthodologiques liés au fait que c'est un territoire qui fait sens d'un point de vue géographique, mais peu d'un point de vue historique, car sa faible population ne forme pas une unité par rapport au puissant centre urbain voisin de Provins. Ainsi, la plupart des archives concernant la région ont trait à Provins. Pour aborder l'histoire de la Bassée, il faut donc multiplier les approches et les sources. D'autre part, le but de cette recherche était de comprendre l'impact des aménagements de la Seine depuis le XIXe siècle sur les fonctionnalités de la plaine alluviale. Or c'est un angle mort de la recherche académique. De très nombreux auteurs ont décrit l'évolution à long terme de fleuves. Ces études ont pris de l'ampleur depuis l'adoption de la directive-cadre sur l'eau (DCE) en 2000, car de nombreux projets de restauration de rivières s'appuient sur des données historiques pour reconstituer un état « naturel » antérieur vers lequel tendre. Or ces approches se concentrent souvent sur le lit mineur au détriment de la plaine d'inondation. L'évaluation de l'état des cours d'eau revient à quantifier les changements morphologiques tels que la diminution de l'indice de sinuosité, la disparition des îles et des bras secondaires, ou l'incision du lit. Quelques études s'intéressent également à l'état de la ripisylve. Cependant, la régulation et/ou la canalisation des cours d'eau ont également eu des effets importants au-delà des berges qui délimitent le lit mineur. C'est cet aspect qui sera étudié ici.

2.1 Les sources et méthodes mobilisées pour retracer un historique de la Bassée

Au cours des trois dernières décennies, la caractérisation des changements de forme des cours d'eau et/ou

d'occupation des sols a été facilitée par les systèmes d'information géographique (SIG), qui constituent désormais un outil essentiel dans les études géohistoriques. La numérisation et le géoréférencement des cartes anciennes permettent leur comparaison et la quantification précise des différences entre deux dates. Bien que de nouvelles approches innovantes soient développées dans le domaine des SIG et de la télédétection appliquées à la géohistoire, certains aspects des changements environnementaux ne peuvent pas être détectés par ces méthodes. Premièrement, les résultats des analyses purement cartographiques dépendent de la disponibilité et de la qualité des cartes anciennes. Ensuite, des changements à court terme peuvent passer inaperçus si la période de temps entre deux cartes est trop longue. Enfin, les cartes utilisées pour l'étude de l'évolution des cours d'eau sont souvent dessinées à des échelles relativement grandes, sans détails sur les contextes locaux, sans parler de l'absence d'indications sur les conflits liés aux changements environnementaux. Les documents historiques écrits restent donc un complément indispensable aux documents cartographiques. Pour ce travail sur la Bassée, ont été consultés des archives des Ponts et Chaussées pour identifier les aménagements ayant conduit à la construction de digues (archives nationales et départementales) et les plaintes en résultant, des monographies communales rédigées dans toutes les communes de France vers 1900, ainsi que des matrices cadastrales qui ont permis de mettre en évidence des différences de gestion des communs dans différentes communes de la Bassée, des états des lieux de perte de récolte établis après des catastrophes « naturelles » (inondations) et le traitement de ces événements par la presse locale (La feuille de Provins). Nous avons également utilisé le Mode d'Occupation des Sols (MOS) 1949 (qui a été numérisé et traité par l'Institut Paris Région pour le PIREN Seine).

2.2 Les impacts des aménagements sur la plaine alluviale de la Bassée

2.2.1 Le drainage des marais de Balloy, Bazoches et Mousseaux (1842-1851)

Le premier événement majeur retrouvé dans les archives concerne l'assèchement des marais de la rive gauche de la Seine. Il s'agit de la première application, dans le département de Seine-et-Marne, d'une loi promulguée en 1807 pour encourager ces travaux hydrauliques. Le conflit qu'il a suscité a laissé de nombreuses traces écrites.

En 1833, Davy de Balloy (1786-1861), propriétaire local, demande à l'État l'autorisation d'assécher les marais de Balloy et de Bazoche. Les terres en question (1 077 acres) appartenaient aux municipalités et, selon les contemporains, pouvaient être divisées en trois catégories : (i) des terres basses marécageuses, régulièrement inondées, couvertes d'herbes et de plantes aquatiques récoltées pour divers usages ; (ii) des terres légèrement plus élevées utilisées pour la production de foin et le pâturage du bétail et (iii) des terres plus hautes et plus sèches, dont on pensait qu'elles pourraient produire du chanvre et du seigle si elles étaient remises en état. Depuis la Révolution française, les prairies de fauche étaient partagées entre plusieurs habitants, dont les conseillers municipaux, tandis que les pâturages étaient ouverts à tous les propriétaires de bétail. Les habitants des Mousseaux, qui cultivaient des légumes sur leur territoire, avaient un droit d'usage sur une partie des pâturages.

Malgré l'opposition des maires, le projet de drainage est approuvé et achevé en 1842. Il s'agissait d'ouvrir un réseau de canaux et de fossés pour évacuer les excédents d'eau vers un exutoire situé plus en aval (Figure 5). Les canaux 1 et 5 recevaient les eaux de tous les marais, qui se jetaient dans la rivière près du château où vivait Davy de Balloy. Le concessionnaire élève également le chemin de halage le long du fleuve et construit une digue « pour forcer la Seine à suivre son cours sans désoler cette partie de ses rives ».

Un différend oppose les élites locales au concessionnaire : les premières veulent conserver leurs privilèges fonciers hérités de la Révolution, tandis que le second réclame plus que ce qui lui est dû, tout en assurant qu'il n'a pas d'intentions spéculatives. La situation ne s'apaise qu'en 1851, lorsque Davy de Balloy finit par recevoir son dû après avoir failli être assassiné. Le projet de mise en valeur entraîne des changements dans la propriété des terres, certaines parcelles communales étant reprises par le concessionnaire à titre de compensation, d'autres étant vendues aux habitants.

Les travaux ont été considérés comme un succès agronomique, bien que les terres n'aient été mises en culture que lorsque le conflit s'est apaisé. Cependant, les ajustements ultérieurs reflètent des effets imprévus. Dans la

seconde moitié du siècle, certains fossés de drainage jugés inutiles sont comblés. Au contraire, les maires et certains propriétaires (dont Davy de Balloy lui-même) construisent de petits barrages sur les principaux ouvrages de drainage, afin de maintenir un niveau d'eau suffisant en période sèche. De plus, dans les années 1850, de nombreuses amendes sont infligées aux habitants qui utilisent les canaux de drainage pour le rouissage du chanvre. Selon les habitants de Bazoches, le chanvre était la seule culture possible sur les terres drainées. Néanmoins, en 1888, la culture du chanvre avait déjà disparu.

Dans les années 1860, d'autres personnalités locales souhaitent reproduire l'expérience ailleurs dans la Bassée. Cependant, les ingénieurs furent réticents à appliquer à nouveau la loi de 1807. En 1860, une autre loi est votée pour favoriser l'assèchement des propriétés communales. Des études sont entreprises pour assécher les marais de la rive droite de la Seine et se poursuivent jusqu'à la fin du siècle, sans jamais aboutir.

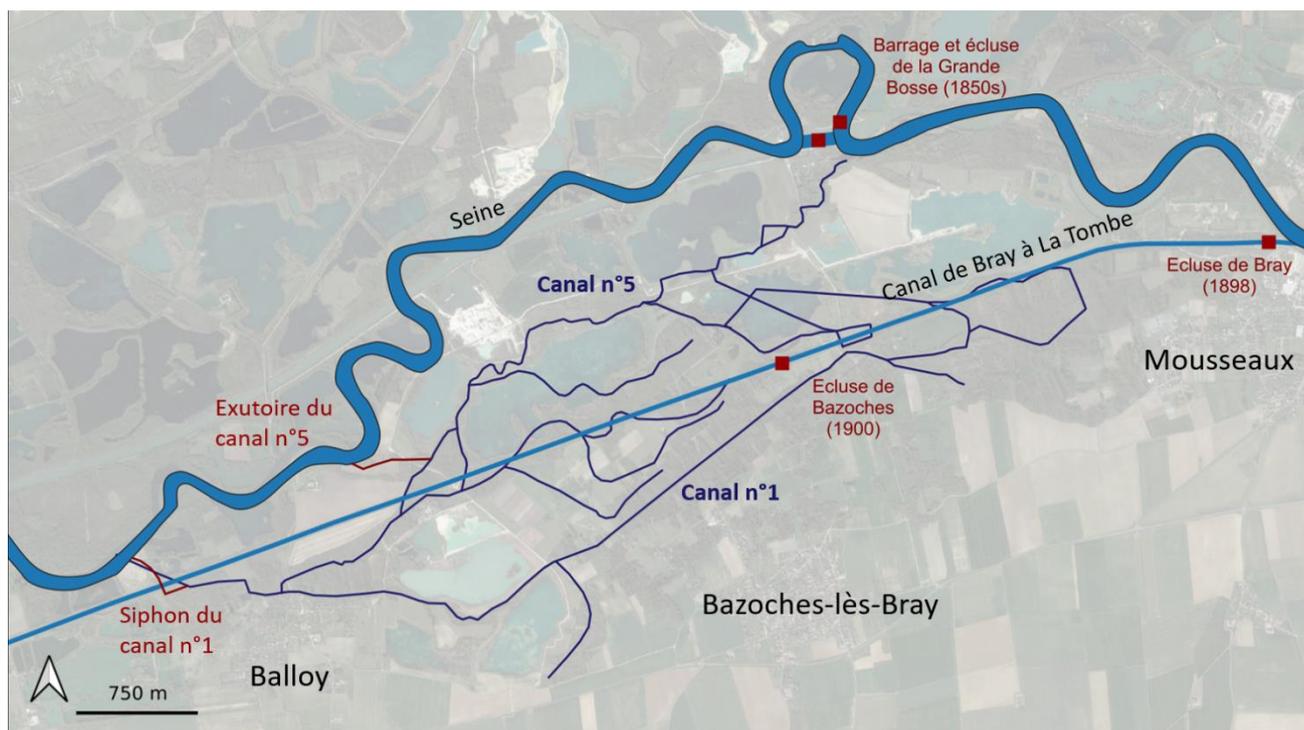


Figure 5. Canaux de drainage de Balloy, Bazoches et Mousseaux et canal de navigation (© M. Resch)

2.2.2 Le canal de navigation de Bray à La Tombe (1898-1910)

Quelques décennies plus tard, un autre grand projet hydraulique est réalisé dans la Bassée, cette fois à l'initiative de l'État.

En 1879, une loi est votée pour améliorer la navigation entre Marcilly-sur-Seine et Montereau-Fault-Yonne, ce qui donne lieu à un certain nombre d'aménagements, dont le canal de dérivation de Bray-sur-Seine à La Tombe (Figure 5). En aval de Bray-sur-Seine, le cours sinueux du fleuve rendait la navigation longue et dangereuse. Construit sur la rive gauche de la Seine d'avril 1896 à janvier 1899, d'une longueur de 10,7 km, le canal de dérivation était adapté aux gabarits Freycinet, avec une largeur de fond de 11 m et une profondeur de 1,70 m. S'il fut généralement bien accueilli par les communes traversées, qui y voyaient une opportunité d'exporter leurs produits agricoles, l'infrastructure fut également contestée pour ses effets perturbateurs sur l'écoulement des eaux dans la plaine alluviale.

L'endiguement a eu deux effets opposés. Entre Balloy et La Tombe, les terres basses adjacentes sont submergées par l'eau qui s'infiltré à travers le remblai sableux. Les ingénieurs ont ouvert des fossés de drainage permanents pour évacuer l'eau. A l'inverse, à Bazoches et à Mousseaux, les riverains se plaignent de l'assèchement des terres. Le canal de dérivation traverse les fossés de drainage construits par Davy de Balloy

en 1842. Bien que plusieurs fossés aient été détournés et que des siphons aient été construits sous l'ouvrage de navigation, l'eau s'écoule directement dans le canal sans passer par les siphons. Les plaintes les plus virulentes émanent de la municipalité et des habitants de Mousseaux. Comme nous l'avons vu précédemment, l'économie du village était dominée par les cultures maraîchères qui bénéficiaient de la proximité de la nappe phréatique. En novembre 1898, la commune affirme que la destruction de la butte de terre et la baisse du niveau d'eau dans la section (a) du canal qui en a résulté ont asséché du jour au lendemain toutes les sources, fontaines et puits de la région.

Les ingénieurs proposent une solution commune : la construction d'une écluse supplémentaire pour élever le niveau d'eau du canal à la même altitude que celui de la Seine. Elle est achevée en 1900, à la satisfaction des habitants de Bazoches. Cependant, les maraîchers portent l'affaire devant le conseil de préfecture. Les ingénieurs, qui ne croyaient pas que la construction du canal avait drainé la nappe phréatique, cherchèrent à le démontrer en abaissant (- 0,75 m) puis en remontant le niveau de l'eau. Les sondages ont montré que l'effet drainant du canal ne se faisait sentir qu'à ses abords immédiats, alors que les jardins les plus proches se trouvaient à 250 m de distance. En 1912, le conseil de préfecture rejette la plainte des jardiniers ; ils s'adressent au Conseil d'Etat qui, à son tour, rejette leur requête en 1927.

Avant et après la construction du canal de dérivation, certains résidents locaux étaient également préoccupés par l'impact de ses digues de 2 mètres de haut sur l'écoulement des eaux dans la plaine inondable. En effet, lors de la grande crue de 1910 (les plus hautes eaux connues dans la vallée de la Seine), les eaux de débordement ont été complètement bloquées sur la rive droite du canal, laissant la rive gauche à sec (Figure 6). L'ouvrage de navigation a donc limité latéralement la zone inondable de 400 m à 1 km. Or, dans l'avant-projet, les ingénieurs avaient indiqué que « la dérivation établie en bordure de la zone inondable [ne] la réduirait pas de façon significative ».

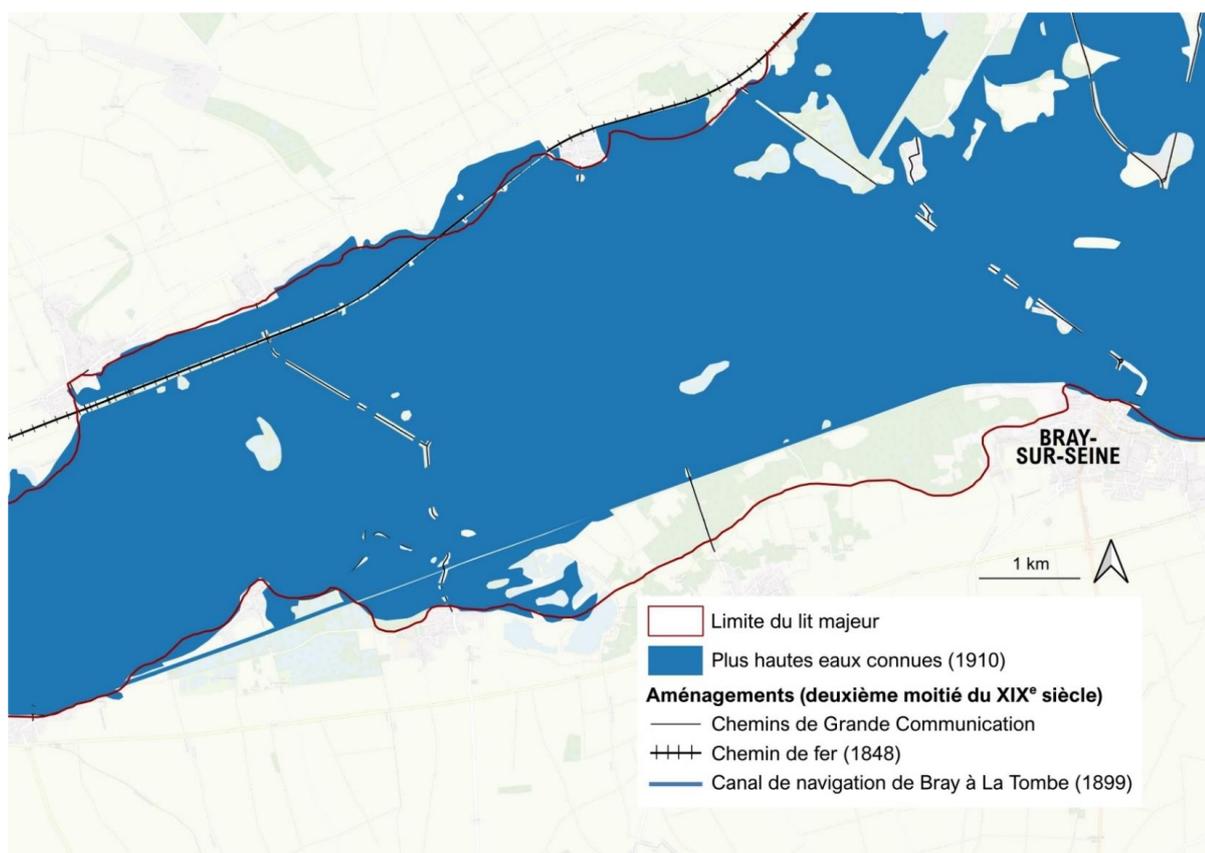


Figure 6. Crue de 1910 limitée au sud par le canal de navigation de Bray à la Tombe (© Resch)

2.2.3 Le problème des digues (1881-1945)

Parallèlement à la construction du canal de Bray-sur-Seine à La Tombe, un conflit majeur survient au sujet des digues élevées dans la vallée de la Seine.

Traditionnellement, les habitants construisaient de petites levées de terre pour protéger leurs terres agricoles des crues annuelles de la Seine. Après les inondations de 1856 qui ont touché plusieurs villes françaises, la loi du 28 mai 1858 a interdit la construction de digues dans les parties submersibles de la vallée de la Seine et des autres grands fleuves. En 1893, les autorités sont informées d'un différend entre les habitants de la rive droite de la Seine et ceux de la rive gauche. Les premiers avaient construit de hautes digues qui détournaient l'eau vers la seconde. Invités à les détruire, ils arguent que les barrages et les infrastructures construites dans la plaine inondable (routes et voies ferrées) aggravent les crues. Ils considèrent que « la vallée était autrefois plus habitable et habitée, plus cultivée aussi » et finissent par former un syndicat agricole pour défendre leurs intérêts. Face à eux, les habitants de la rive gauche forment une association contre l'endiguement de la Seine.

En 1897, le département de Seine-et-Marne demande une grande enquête sur les inondations dans la vallée. Par décret spécial, la zone inondable de la Seine est officiellement délimitée en 1899 pour faciliter l'application de la loi de 1858. Les ingénieurs répondent à une série de demandes des riverains, mais se montrent intransigeants sur la question des digues. Ils préconisent plutôt le curage des fossés qui sillonnent la plaine inondable pour faciliter l'écoulement des eaux. Cela impliquait une organisation collective des habitants de la vallée, ce qui n'avait jamais été fait auparavant. D'autre part, les autorités reconnaissent que les parties de la Seine abandonnées par la navigation (depuis la construction du canal de dérivation) doivent être entretenues par l'État. Aucune de ces solutions n'est réellement mise en œuvre : les riverains refusent de prendre en charge le curage des fossés, tandis que le service de la navigation manque de moyens financiers. En conséquence, les habitants de la rive droite ont continué à construire des digues.

Lassés par les plaintes répétées, les ingénieurs finirent par rappeler que « les terrains en question ont toujours été soumis à une servitude temporaire d'inondation dont les inconvénients sont en partie compensés par des avantages appréciables, tels que la fertilité des cultures fourragères ». De même, en 1939, lorsque des agriculteurs se plaignent de l'inondation de leurs terres causée par le barrage de Marolles (construit en 1895), les autorités répondent que « les intérêts de l'agriculture doivent être subordonnés aux intérêts souvent contradictoires de la navigation ». En 1945, la situation dénoncée par le conseil municipal de Marolles est exactement la même qu'à la fin du XIXe siècle. Un syndicat intercommunal est créé cette année-là : son objectif est « d'étudier les travaux à entreprendre [pour améliorer l'écoulement des crues] et de réclamer l'indispensable coordination des efforts actuellement morcelés des différents services intéressés ». Néanmoins, ce n'est que dans la seconde moitié du XXe siècle que le problème des inondations annuelles a été, au moins partiellement, résolu.

2.2.4 Les grands travaux de la deuxième moitié du XXe siècle (1966-1990)

Le résumé suivant des travaux hydrauliques réalisés dans la basse Bassée entre les années 1960 et 1990 est basé sur des sources secondaires.

Après la grande crue de 1910, qui a touché la vallée de la Seine et la région parisienne, une commission spéciale a étudié la possibilité de construire de grands réservoirs en amont du bassin pour réduire les inondations. L'idée, émise dès le XIXe siècle, est reprise par l'ingénieur Henri Chabal dans les années 1920, notamment pour maintenir les niveaux d'eau en été (Villion, 1997 ; Langlois, 2005). Une première génération de barrages a été construite, mais avec une capacité insuffisante. La deuxième génération a été lancée après la Seconde Guerre mondiale. Sur les quatre réservoirs qui assurent encore aujourd'hui la protection contre les étiages et les inondations, deux ont été construits en amont de la plaine inondable de la Bassée : l'un sur la Seine (1966) d'une capacité normale de 208 Mm³ (max. 220 Mm³), et l'autre sur l'Aube (1990) d'une capacité normale de 170 Mm³ (max. 183 Mm³). Ces réservoirs ont été conçus pour stocker les eaux dérivées de la Seine et de l'Aube en hiver et au printemps (avec des prélèvements supplémentaires en cas de crue) et les restituer en été et en automne.

Cependant, la mise en service des barrages n'a pas éliminé toutes les inondations. En cas de crue printanière, lorsque les cultures sont particulièrement vulnérables, les réservoirs déjà remplis par les débits hivernaux sont incapables d'absorber le surplus d'eau. En aval des barrages, et dans la Bassée en particulier, le drainage des terres pouvait être encore retardé par la libération de l'eau stockée après la crue. Des négociations ont permis de limiter cette pratique. Dans le département de l'Aube, en compensation de la construction du barrage, des mesures ont été prises pour faciliter l'écoulement des eaux, augmentant ainsi les risques en aval. En contrepartie, les agriculteurs de la basse Bassée ont demandé des travaux d'évacuation des eaux, y compris l'entretien du lit de la Seine par l'enlèvement des obstacles (GREBAR, 1994).

Cependant, entre 1971 et 1979, d'importants travaux avaient déjà été réalisés dans le lit mineur. Après la Seconde Guerre mondiale, l'essor de l'exploitation des matériaux alluvionnaires avait fait naître de nouveaux besoins en matière de navigation, afin de faciliter l'accès aux sites d'exploitation (Dzana, 1997). Dans le cadre du plan de mise à grand gabarit de la Seine, le lit du fleuve a été profondément transformé : coupure des méandres, élargissement et approfondissement du chenal pour augmenter la section d'écoulement, remodelage des berges (Dzana, 1997 ; Lestel et al., 2021). Le canal de Bray-sur-Seine à La Tombe est abandonné après 1979.

3 Interdépendances et nouvelles solidarités : (a)ménager les territoires de la Seine amont

L'objectif de notre recherche était d'explorer les logiques de solidarité, de négociations des acteurs et la place de la biodiversité (via différents objets : eau, préservation des espèces, constitution d'une nouvelle réserve) que jouent ces interactions en Seine amont et plus spécifiquement sur le territoire de la plaine alluviale de la Bassée, située à cheval sur deux départements (Aube et Seine-et-Marne²), plusieurs intercommunalités et communes. Souvent vécu comme un « territoire servant » par les habitants et les élus, cette recherche visait à comprendre comment le territoire, au-delà d'être un espace d'exploitation et d'extraction de ressources, est un lieu où se discutent des projets d'aménagements, se dessinent des visions plus locales que proposent les grands projets (mise à grand gabarit de Bray-sur-Seine à Nogent-sur-Seine³ et casier pilote de surstockage).

L'une des hypothèses principales sur laquelle a reposé notre démarche d'enquête était que les ressorts de la solidarité intra- et interterritoriale se lisent moins de l'amont à l'aval que dans la capacité à concrétiser des visions territoriales face à des logiques d'aménageurs (l'EPTB Seine Grands Lacs et la Métropole du Grand Paris qui portent le projet de casier pilote de surstockage ; VNF qui pilote le projet de mise à grand gabarit) se portant sur d'autres échelles (la prévention des inondations sur l'amont du bassin de la Seine, la navigation de la Seine amont jusqu'à l'estuaire...). Les capacités à négocier des retombées positives ou des mesures de compensation sont donc à la fois la résultante de rapports de pouvoir à différentes échelles, mais aussi de la capacité de certains acteurs (coalisés ou non) à penser le développement du territoire en dehors du prisme des grands aménageurs⁴.

² Ce qui amène d'ailleurs à distinguer la « Bassée auboise » ou Bassée Nogentaise de la Bassée-Montois (située en Seine-et-Marne). De fait, la continuité naturelle et écologique de la plaine alluviale n'est pas perçue en tant que telle dans les discours des collectivités territoriales. Elle l'est en revanche dans le discours des aménageurs qui cependant segmentent leurs discours et leurs actions en fonction des territoires et des attentes qu'ils ont pu identifier.

³ D'une dizaine de km de long et de 4,30 mètres de profondeur, le nouveau canal permettant le passage de grandes péniches raccordera 6 des 7 casiers creusés dans les années 80 pour le chantier de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine.

⁴ Lors des débats publics réalisés en même temps pour les deux ouvrages, les attentes en termes de compensations environnementales concernaient notamment l'aménagement des anciens bras de la Seine en vue de leur restauration. Des études ont été menées pour les recenser et étudier le potentiel de restauration (cf. Etudes préliminaires – Etudes des anciens méandres de la Seine, oct. 2013, Rapport pour VNF et EPTB Seine Grands Lacs). Aujourd'hui, dans les discours, cette volonté de restauration apparaît de manière très parcellaire et se cristallise sur certains espaces.

3.1. Pouvoir se faire entendre pour négocier des compensations

Certains acteurs parviennent aujourd’hui et sont parvenus tout au long du XXe siècle à trouver un écho auprès des grands aménageurs (Resch, Lestel, 2022), parce qu’ils ont la capacité *via* leurs organisations représentatives, *via* leur capacité à déplacer leur problématique dans d’autres arènes (Guillard, Bars, et Oiry-Varacca, 2019), à se faire entendre et à négocier. C’est le cas des agriculteurs *via* notamment les chambres d’agriculteurs qui ont fait de l’inondation (sous ses différentes formes) un objet de négociation pour faire valoir leurs activités, leurs pertes économiques et obtenir des indemnités. Pourtant, la manière d’appréhender a évolué dans le temps, de la mise en place des bassins réservoirs et de la régulation qu’ils ont permise du débit de la Seine (soutenir les étiages et limiter les crues sur la région parisienne) : comme phénomène naturel régulier avec lequel les occupations du sol s’accommodent (puisque la Bassée est une zone naturelle d’expansion de crues), comme moyen technique de réguler l’inondation en aval, l’inondation comme fatalité à éviter et à se faire compenser. De fait, cette régulation a entraîné dans l’Aube⁵ et en Seine et Marne un certain nombre de changements des affectations du sol, a permis le développement de nouveaux choix culturels⁶, qui aujourd’hui se confrontent aux évolutions climatiques⁷ et à une « régulation » qui se ferait au détriment des agriculteurs de la Seine amont. Cette transformation épistémologique d’un aléa comme un problème dont le coût ne peut être supporté par les seuls agriculteurs a entraîné une prise en compte par différents acteurs et, l’écho trouvé auprès de certaines institutions et d’élus a permis d’obtenir le déploiement d’aides spécifiques et d’outils juridiques et financiers, censés restaurer une justice économique et environnementale (Fournier, Bonnefond, et Debray, 2021 ; Gobert et Deroubaix, 2022). Se dessine également la perspective d’utiliser un nouvel instrument de plus en plus déployé : les paiements pour services environnementaux (PSE), expérimentés depuis 2020 par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et les agences de l’eau dans le cadre spécifique des parties d’exploitation principalement, contrepartie octroyée aux agriculteurs pour favoriser l’adoption de pratiques favorables à la préservation de l’environnement (Etrillard 2016). Cet outil pourrait aussi être utilisé pour les agriculteurs dont une partie des parcelles servent de zones d’expansion de crue et permettre la préservation de certains milieux spécifiques (par exemple les prairies).

D’autres enjeux illustrent cette capacité à faire valoir une représentation spécifique des réalités environnementales et socio-économiques. Ainsi dans le cadre de la constitution d’une réserve naturelle dans l’Aube (Figure 7), le maintien et l’entretien des prairies font l’objet d’un débat autour de la valorisation de l’herbe, car les fauches tardives qui sont préconisées « dévalorisent » économiquement et alimentaires le produit récolté⁸.

« Bref, on en est bien sur l’herbe et la valorisation de l’herbe comme un enjeu crucial. Ben voyez, arriver au bout de 5 ans, le programme est fini, on retourne à la case départ. Mais c’est peut-être parce que justement, c’est une zone particulière qui convient d’être soutenue de façon particulière. Nous on sait, moi je ne suis pas adepte du soutien... quand j’étais jeune agriculteur, je défendais des prix rémunérateurs. Mais difficile aujourd’hui de faire autrement au regard des différentes contraintes qui pèsent sur nous. » (Agriculteur dans la région nogentaise, avril 2022)

En outre, les mesures agri-environnementales (MAEC) qui peuvent être négociées avec les agriculteurs pour le maintien des prairies alluviales et leur gestion adaptée suscitent de véritables questionnements, parce qu’elles

⁵ Il s’agit à la fois de la modification des parcelles *via* des remembrements issus du barrage Seine et de celui de l’Aube (Olivry 1986 ; Deroubaix, Hubert, et Bruzzone 2016 ; Hubert et al. 2015), mais aussi aujourd’hui au travers d’Aménagements Foncier Agricole Forestier et Environnemental, et des pratiques culturelles (d’une agriculture extensive à des pratiques plus intensives).

⁶ Le paysage agricole était composé jusqu’en 1960 de peupleraies et de prairies.

⁷ Le changement climatique va induire un certain nombre de changements dans les phénomènes d’inondations à la fois en fréquence et en intensité sur le bassin hydrographique de la Seine (Flipo et al. 2018). Ces changements dans la forme et la fréquence des aléas va induire de repenser la vulnérabilité des territoires et les manières de la réduire (que le programme 9 du PIREN Seine étudiera).

⁸ Certaines espèces comme le râle des genêts vont être des « sujets/objets frontières » qui, parce qu’elles font l’objet de protection, exigent de trouver des compromis entre les acteurs, pour faire évoluer les pratiques agriculteurs tout en prenant en compte la réalité économique des exploitations.

ne sont pas pérennes dans le temps et ne permettent qu'une projection limitée dans l'avenir.

Forts des expériences accumulées, les agriculteurs de l'Aube qui voit la constitution de la réserve comme une compensation aux grands projets portant atteinte à la vallée de la Seine y voient « un îlot de biodiversité » (agriculteur de l'Aube) qui doit prendre en compte les usages actuels, sans déstructurer le travail agricole.

« Mais il y a un vrai défaut de connexion entre le souhait de faire de la biodiversité et de faire de la préservation de la ressource en eau et ce que vivent finalement, aujourd'hui, au quotidien, les exploitants agricoles, les exploitants forestiers, et cetera. » (Agriculteur dans la région nogentaise, avril 2022)

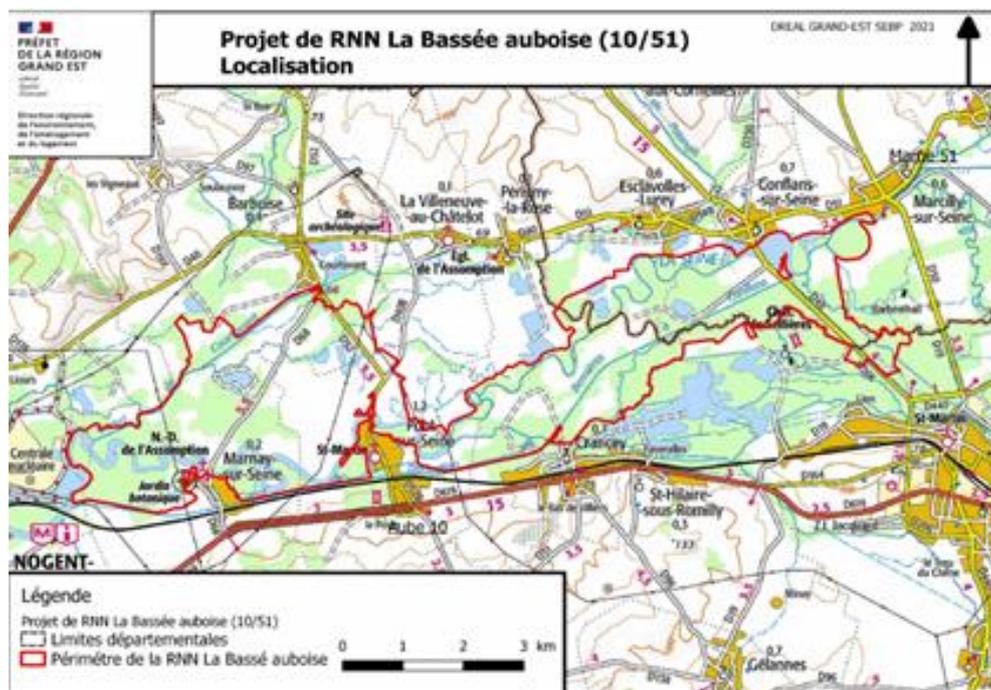


Figure 7. Périmètre du projet de Réserve naturelle nationale de la Seine Champenoise. (DREAL Grand Est, 2021)

La capacité à être des interlocuteurs écoutés, intégrés à la table des négociations, se structure grâce à une expertise propre, fruit du temps long et d'un suivi actif des projets, qui se fonde sur des études diligentées et financées par la chambre d'agriculture et sur l'expérience des agriculteurs souvent mise en avant. Mais elle est aussi le fruit d'un travail de coalition avec des acteurs influents (élu avec une influence nationale, représentation syndicale aux niveaux fédéral, régional et national). Dans la mesure où les collectivités locales s'efforcent de défendre leurs propres projets de territoire, aux franges de ce que les grands aménageurs permettent (voir partie suivante), des actions concrétisant l'alliance entre les agriculteurs et les élus peuvent être négociées, comme cela apparaît dans l'étude préalable agricole du projet d'endiguement pilote de la Bassée (EPTB Seine Grands Lacs, 2020) avec :

- la création d'un marché de producteurs dans le cadre du projet de réhabilitation de l'ancienne gare de Bray-sur-Seine. La communauté de communes Bassée-Montois souhaite réhabiliter l'ancienne gare de Bray-sur-Seine dans le cadre d'un projet de développement du territoire. Ce bâtiment deviendrait la Maison des Promenades Bassée-Montois. Ce projet est inscrit au contrat de ruralité du Bassée-Montois ;
- la création d'un abattoir collectif de volailles bio. En Bassée, les producteurs de volailles sont contraints de faire abattre leur production à Beaune la Rolande dans le Loiret ou bien à Troyes dans l'Aube. L'objectif est de pouvoir réaliser cette tâche en Seine-et-Marne.

L'entretien de liens forts, d'approches partagées du territoire est déterminant et se renforce avec des objectifs partagés, là où les associations environnementales (surtout quand elles s'inscrivent moins dans la gestion de milieux, mais plutôt dans la critique active des projets qui ont des incidences sur les projets) ne peuvent se prévaloir du même potentiel à partager des valeurs communes et à créer avec les élus locaux et les autres acteurs des objectifs communs⁹.

Ponctuellement les usagers (fédérations ou associations de pêche, de chasse par exemple) peuvent obtenir des aménagements, des mesures visant à pérenniser leurs pratiques et donc un certain nombre d'espèces¹⁰. Mais ce qui se fait jour dans chaque « mesure d'accompagnement¹¹ » ou mesure de compensation (qui découle de logiques réglementaires parfois très différentes¹² ou parfois sont octroyées par l'aménageur hors de ce prisme), c'est une inégalité dans « l'audibilité » accordée à ce que les usagers défendent. Les maîtres d'ouvrage n'ont pas la même capacité à entendre les acteurs du territoire, dès lors que leurs demandes dépassent ce qui relève de la réglementation. Comme un certain nombre de chercheurs l'ont montré (Gobert 2020 ; ter Mors, Terwel, et Daamen 2012), « La négociation a tendance à favoriser les groupes structurés et les intérêts prédominants. » (Olivry 1986). Les collectivités locales trouvent leur marge de manœuvre avec les maîtres d'ouvrage en s'appuyant sur leurs compétences propres en aménagement et planification, en capacité d'appui au développement économique et touristique ; elles se ménagent une capacité de projeter sur leur territoire des projets qui s'accordent avec les grandes infrastructures qui vont voir le jour.

3.2. Aménager le territoire à l'ombre des grands projets : des collectivités locales qui s'activent

3.2.1. Trouver et construire des marges d'action face à deux maîtres d'ouvrage

⁹ Elles parviennent à tisser avec certains habitants, certains exploitants des alliances de circonstance, mais qui ne permettent pas dans ce cadre précis à renverser les rapports de pouvoir et de connaissance. Même en structurant des contre-expertises voire des contre-projets (au casier pilote par exemple) et en utilisant l'arène juridique, elles ne bénéficient pas d'un réel écho et de réels succès dans leurs démarches. Ainsi par décision du 23 mai 2023, le tribunal administratif de Melun a rejeté les requêtes de plusieurs associations environnementales et propriétaires fonciers à l'encontre de la déclaration d'utilité publique et de l'autorisation environnementale du projet Seine-Bassée.

¹⁰ Ces associations ne font pas que prélever du gibier ou des ressources halieutiques, elles cherchent à préserver les milieux pour favoriser la pérennité de leurs pratiques. Le projet de grand gabarit comme celui du casier pilote a des incidences sur la biodiversité aquatique, sur l'accès aux berges, sur l'évolution hydro-spatiale de certains lieux (disparition de casiers, de carrières abandonnées, etc.). En ce sens, ces acteurs cherchent avec plus ou moins de succès à avoir voie au débat.

¹¹ Mesure qui ne s'inscrit pas dans un cadre réglementaire ou législatif obligatoire. Elle peut être proposée en complément des mesures compensatoires (ou de mesures d'évitement et de réduction) pour renforcer leur pertinence et leur efficacité, mais n'est pas en elle-même suffisante pour assurer une compensation. « Guide d'aide à la définition des mesures ERC », CGDD, Théma, janvier 2018.

¹² Dans la conception et la mise en œuvre de leurs plans, programmes ou projets, il est de la responsabilité des maîtres d'ouvrage de définir les mesures adaptées pour éviter, réduire et, lorsque c'est nécessaire et possible, compenser leurs impacts négatifs significatifs sur l'environnement. Il s'agit de la séquence ERC (évitement-réduction-compensation). De manière plus spécifique, « Les mesures compensatoires ont pour objet d'apporter une contrepartie aux effets négatifs notables, directs ou indirects du projet qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits. Elles sont mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou à proximité de celui-ci afin de garantir sa fonctionnalité de manière pérenne. Elles doivent permettre de conserver globalement, et si possible, d'améliorer la qualité environnementale des milieux ». (art. R.122-14 II du Code de l'environnement). Les mesures compensatoires des impacts sur le milieu naturel en particulier, doivent permettre de maintenir voire d'améliorer l'état de conservation des habitats, des espèces, les services écosystémiques rendus, et la fonctionnalité des continuités écologiques concernés par un impact négatif résiduel significatif. Pour le casier pilote l'enquête publique présentait à la fois des compensations « zones humides » (restauration de la Noue d'Auvergne, restauration de zones humides par conversion de peupleraies et jeunes boisements) et forestière (création d'une chênaie-ormaie, restauration sylvicole hors site).

Il existe également des mesures de compensation collective qui ressortent d'une autre logique que celle de protéger l'environnement. L'article D 112-1-19 du Code Rural ouvre ainsi la possibilité de mesures de compensation collective envisagées pour consolider l'économie agricole du territoire concerné et précise les conditions d'évaluation de leur coût et les modalités de leur mise en œuvre.

Les collectivités locales obtiennent plus ou moins de succès, en fonction de leur habilité à définir des projets articulés. Les aménageurs des grands projets peuvent se jouer d'une faible capacité des collectivités (due à un manque d'ingénierie, à une difficulté à construire des compromis entre acteurs...) à présenter une stratégie et des projets, et proposer à leur place. Surtout que les négociations séparent les acteurs seine-et-marnais des acteurs aubois.

Les deux projets structurants qui impactent le territoire de la Bassée ont connu une réception différente, même s'ils ont fait l'objet d'un débat public concomitant au début des années 2010 : la mise en grand gabarit du tronçon de la Seine joignant Bray à Nogent et le projet de construire dix casiers de surstockage (pour la Seine-et-Marne). Leur pertinence territoriale est questionnée différemment selon les acteurs, mais ils apparaissent tous les deux comme des projets servants d'autres territoires (ville de Paris, Métropole du Grand Paris, les territoires de la Seine Aval) et des acteurs pas toujours présents dans les espaces de la Bassée (les habitants et collectivités de l'aval pour le premier les industriels, les exploitants de carrière et les céréaliers pour le second), dont il faut pouvoir tirer profit, afin de ne pas subir que les désavantages.

La mise à grand gabarit, aménagement prévu depuis plus de deux décennies, apparaît aujourd'hui comme acceptable et favorable aux territoires concernés du point de vue des collectivités, tandis que pour les acteurs associatifs ou les représentants de l'environnement (que sont les autorités environnementales dans la mesure où elles émettent des avis sur la qualité des études d'impact des projets et sur le réel effort des aménageurs d'éviter, de réduire et de compenser les impacts) le grand gabarit reste problématique (Gobert et Deroubaix, 2022).

« Evidemment l'aménagement de la Seine et son aménagement autour du passage à grand gabarit. (...) comme un vecteur de valeur ajoutée pour ce territoire. Une valeur ajoutée locale, en termes d'activité et de retours pour le territoire. C'est un vieux projet qui a plus de 40 ans. » (élu de la ville de Provins, mai 2022)

« les collectivités sont favorables, mais il suscite des réticences des acteurs de l'environnement, car territoire préservé d'un point de vue zone humide et lien avec la Seine. L'Autorité environnementale n'était pas favorable au projet. Avec l'AGRENABA, discussions constructives. La fédération de pêche est peu favorable. » (Entretien avec un représentant du projet de mise en grand gabarit, VNF, juin 2023)

Les collectivités locales adhèrent moins au projet de casier de surstockage et à sa justification, même s'ils ne s'y opposent plus à l'heure actuelle.

« [Le] projet de casiers, qui, Dieu soit loué, dans sa configuration spatiale a été considérablement réduit puisqu'on est passé d'une dizaine de casiers à un projet d'un seul casier expérimental dont la superficie, bon c'est déjà beaucoup... » (élu de la ville de Provins, mai 2022)

L'enjeu mis en avant systématiquement dans les entretiens n'est pas de contester les infrastructures à venir (grand gabarit) ou en train d'être construite (casier pilote), mais de faire avec et de pouvoir bénéficier de retombées positives, voire de les obtenir comme « compensation ». Ce qui signifie de pouvoir proposer des projets, des aménagements propres au territoire et ayant des conséquences positives et de négocier. Dans cette démarche, les deux maîtres d'ouvrage ne sont pas considérés de la même manière. L'EPTB Seine Grands Lacs est perçu comme un acteur qui a fait des efforts dans sa communication et son travail avec les collectivités depuis les années 2010, à l'écoute des attentes. Le président actuel et sa présence ponctuelle sur le territoire sont considérés comme des marques de respect et de dialogue. A l'inverse, VNF apparaît dans les entretiens comme un acteur plus éloigné, moins saisissable, avec des représentants qui changent et qui ne connaissent le territoire qu'au travers du projet.

3.2.2 Promouvoir l'éco-tourisme en renforçant les infrastructures : hébergement et cyclotourisme

Les collectivités locales (intercommunalités, communes, syndicats...) cherchent à rester maître d'une partie de leur devenir, même si le choix des projets et le niveau des impacts sont totalement indépendants d'elles. Elles essayent de trouver des interstices pour créer un récit territorial spécifique, alliant dynamique économique,

valorisation du patrimoine vert, et développement éco- et cyclo-tourisme.

Ce récit se forge dès les années 90, puisque le GREBAR (Groupe de réflexion sur la gestion des barrages-réservoirs) écrit déjà un rapport (GREBAR, 1994) qui met en exergue le potentiel touristique du territoire à développer (pour répondre à l'impact que les barrages-réservoirs ont eu sur la Bassée) :

« Le GREBAR suggère que ce secteur de 10 000 ha, situé à 100 km de Paris, soit dédié au loisir et au tourisme écologique : un promeneur pourra par exemple prendre le train gare de l'Est jusqu'à Nogent, louer un bateau et se promener 2 jours en Bassée en faisant escale dans un gîte, suivant un itinéraire aménagé entre la Seine et les gravières mises en communication. »

Ce récit est conforté et entretenu au travers d'un certain nombre de démarches et de documents de planification, comme le schéma de développement et d'aménagement écotouristique du Bassée-Montois formalisé en 2011 qui considère la Bassée, comme un poumon bleu de l'Ile-de-France, l'Atelier de la ruralité mené dans la collectivité de la Bassée Montois ou le SCOT du Grand Provinois, dont le périmètre est plus large que celui de la plaine alluviale.

Ce récit se cristallise sur des sujets et des objets particuliers dont nous explorerons certains, car ils mettent en exergue des contradictions entre acteurs et des compromis à trouver.

L'Euro vélo voie et la promotion de l'éco-tourisme

Les deux territoires de la Bassée aubois et seine et marnais n'entretiennent pas le même rapport à la vallée de la Seine, parce que le fleuve ne structure pas de la même manière l'activité du territoire et que l'influence de la ville centre (Nogent-sur-Seine pour l'Aube) ou pôle majeur d'attractivité et de décision (Provins)¹³ n'ont pas la même relation et proximité au territoire.

Ainsi du côté aubois :

« [Ce qui caractérise notre territoire] c'est l'axe Seine. Au niveau touristique, c'est quand même un axe vert, structuré par la qualité des paysages dont une partie va être intégrée dans une réserve (...) elle a été conservée dans un excellent état de préservation. Donc ça, c'est vraiment le point phare de notre attractivité touristique économique aussi, puisqu'il y a quand même un axe routier, la nationale 19 qui passe par la vallée de Seine et donc les entreprises qui veulent s'installer, elles veulent la vallée de Seine. C'est vraiment le point fort au niveau de l'attractivité du territoire, ça reste la vallée de Seine au niveau du tourisme, donc nous, on espère aussi beaucoup par rapport à la mise à grand gabarit et la mise en place du dernier tronçon de la Seine à vélo. » (maire d'une ville de la Bassée auboise et faisant partie de l'exécutif de la communauté de communes du Nogentais)

Aujourd'hui les villes de la communauté de communes du Nogentais souhaitent pouvoir structurer, autour d'un cheminement cycliste répertorié comme Euro vélo voie, une démarche touristique qui mette en valeur les commerces et l'histoire du territoire. Ce projet est aussi un moyen de se distinguer de la seule ville de Nogent, qui elle bénéficiera automatiquement de la mise à grand gabarit puisqu'un certain nombre d'entreprises auront un accès facilité au transport fluvial et que la ville compte faire émerger un port fluvial « structurant ».

Du côté seine-et-marnais, le pôle touristique régional du Provinois, de la Bassée et du Montois, incluant la plaine alluviale de la Bassée, a été créé à la fin de l'année 2007. Il couvre une superficie de 122 582 hectares et est constitué de 94 communes. Son action s'incarne autour de trois axes : le vélotourisme, la création

¹³ Provins n'appartient pas à la communauté de communes de la Bassée-Montois. Mais la ville reste en raison de sa centralité dans l'est seine et marnais très influente dans les choix qui sont réalisés. Au regard des liens entre les collectivités et la continuité territoriale (qui se différencie tout de même par les types des paysages), les deux intercommunalités travaillent sur un périmètre commun pour réfléchir aux orientations du territoire via le schéma de cohérence territoriale : « Le Grand Provinois est un territoire qui regroupe les deux communautés de communes, le Provinois et la Bassée Montois, ce sont les 81 communes qui correspondent au canton de Provins et c'est un territoire qui a une grande cohérence. » (élu de la ville de Provins, mai 2022)

d'hébergements insolites tout en augmentant globalement la capacité d'accueil, le tourisme visant la promotion des espaces verts.

Le SCOT du Grand Provinois intègre la vallée de la Seine comme un espace de dynamisme économique, dont on peut continuer d'exploiter les ressources naturelles dans la mesure où elles créent de l'activité économique : le document engage donc les acteurs non seulement à pérenniser l'activité d'extraction des alluvions (préférentiellement au travers de l'extension des carrières en fonctionnement et en renforçant la capacité de transport fluvial), mais également à « affirmer le positionnement écotouristique du territoire Bassée-Montois » en s'appuyant sur l'environnement et notamment la réserve naturelle. Ce dynamisme touristique est recherché au travers du développement du tourisme vert, du développement du logement touristique, écologique insolite et également des pistes cyclables (qui sont aussi intégrées comme mesure d'accompagnement dans le projet de casier pilote¹⁴).

Le Canal Bray-La Tombe

Le canal de la Tombe (voir partie 2.2.2.) est aujourd'hui un canal abandonné depuis la rectification du lit de la Seine dans les années 70 entre l'écluse de la grande Bosse et de la Tombe. Il n'était plus entretenu. La collectivité de la Bassée-Montois cherche à y structurer un projet : y remettre de l'eau, le faire revivre, non pas à destination de la navigation commerciale, mais pour y développer des activités récréatives et y implanter un vélo-route. Ce projet est supporté par l'EPTB dans le cadre de son site pilote.

L'école d'architecture de la ville et des Territoires a ainsi été mandatée pour identifier les souhaits d'usages des différents acteurs (fédérations de pêche, de chasse, d'office du tourisme) et faire émerger des scénarios possibles d'évolution pour ce canal¹⁵.

VNF, à qui appartient le canal et le foncier attaché, ne sait pas ce qu'il souhaite faire de cette infrastructure en désuétude : le rétrocéder ou le garder. Une réflexion est en cours autour de la possibilité d'utiliser ce site pour faire de la compensation. Dans la déclaration d'utilité publique, suite à l'enquête publique, il n'avait pas été fléché pour héberger de la compensation¹⁶.

« Quand on a été contacté, on immédiatement mis en avant qu'on avait un enjeu à bien articuler entre les projets de compensation et la manière dont la collectivité veut s'emparer de ce sujet. Il y a un enjeu de maîtriser du foncier, sachant que le canal appartient à VNF. On sait que les dossiers de compensation sont de plus en plus compliqués en termes d'autorisation. » (Entretien avec un représentant du projet de mise en grand gabarit, VNF, juin 2023)

¹⁴ Le maître d'ouvrage prévoit dans son dossier : la « création d'environ 50 km de pistes cyclables au-dessus des digues, avec une vue plongeante sur la Seine et les étangs. »

¹⁵ Eav&t, 2023, Aménagement du canal de Bray à La Tombe Les futurs possibles en Bassée-Montois, Rapport commandité par l'EPTB Seine Grands Lacs, <https://www.calameo.com/books/003968688cda64c3c1c6b>

¹⁶ Le dossier du projet Grand gabarit Bray et Nogent mettait en exergue des compensations écologiques concernant la restauration de milieux humides, la création de frayères, la gestion conservatoire du marais de la Grande Noue.



Figure 8. Bazoches-les-Bray - Canal de Bray a La Tombe – Ecluse (source : Cartotum)

La plateforme fluviale multi-modale seine-et-marnaise

Le projet de mise en grand gabarit du tronçon Bray-Nogent a souvent été critiqué du point de vue seine et marnais comme un projet n’ayant pas de retombée pour la Seine-et-Marne, si ce n’est pour quelques acteurs économiques (carriers, céréaliers qui peuvent livrer une partie de leurs produits sur le site de Soufflet à Nogent).

Aussi paraissait-il important que les communes seine-et-marnaises puissent se saisir de cette infrastructure. L’Atelier des Territoires mené dans le cadre des Assises de la ruralité en 2018, démarche prospective, menée avec des habitants, a mis en exergue le principe « de positionner Bray-sur-Seine comme un pôle éco-portuaire structurant et complémentaire (avec Montereau et Nogent-sur-Seine notamment, mais aussi d’autres pôles franciliens sous “pression”) de la Seine Amont ».

L’édile de Provins promeut également la création d’une plateforme multimodale permettant de faire le lien entre transport fluvial et transport ferroviaire :

« Pour nous c’est un enjeu majeur avec le développement d’une plateforme portuaire digne de ce nom à Bray-Jaulnes. (...) il y a pour la partie orientale du grand bassin parisien, il y a un manque, à l’est de Paris d’une grande plateforme multimodale, fer et eau. Entre Bray et Nogent qui demain bénéficiera du grand gabarit et de l’électrification. (...) Je me dis que si on n’a pas une réflexion globale et sur la route et les camions et la manière dont on veut gérer les flux sur les routes à l’horizon 2050, on ne peut pas exclure l’utilisation de la Seine et de la voie ferrée. »

Au demeurant cette intention semble peu soutenue et appropriée par d’autres acteurs à d’autres échelles aujourd’hui. Ces défenseurs doivent donc mettre en œuvre une stratégie transcalaire visant à convaincre des alliés potentiels de les soutenir et de faire avancer leur objectif. Mais comme pour les deux autres « projets » présentés ci-devant, il se situe à l’ombre des grands aménagements hydrauliques qui concernent la Bassée et attend que des négociations (avec VNF, la SNCF fret, les collectivités, etc.) puissent se structurer (et/ou aboutir) et trouver des financements suffisants. Il nécessite par ailleurs des collectivités capables de se doter d’une ingénierie qui puisse négocier face à de grands aménageurs et opérateurs (Lapostolle, 2021), d’élus ayant le potentiel de se saisir des problématiques de leur territoire, de trouver des alliés à différentes échelles pour les faire aboutir. Ce qui peut être compliqué dans les collectivités aux franges des métropoles.

Conclusion

L'usage de nouveaux outils a permis l'écriture d'une histoire élargie de la Bassée sur le temps long.

Les archives de terrain sur des chenaux abandonnés ont permis de reconstituer des paléopaysages différents dans le passé. Ainsi, la Seine existait probablement comme un réseau anabranché jusqu'au Moyen-Âge. La migration latérale de la Seine était en outre de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres par an avant les aménagements du milieu du XVIII^e siècle. Ces résultats préliminaires des analyses du remplissage des chenaux vont conduire au dépôt d'un projet de reconstitution de l'évolution des débits et des températures du système fluvial à l'Holocène.

Les archives historiques ont révélé un certain nombre de conflits au XIX^e-XX^e siècles, liés aux aménagements de la Seine et du système hydrique de la plaine dans sa partie seine et marnaise, qui permettent de reconstituer une évolution des usages de la plaine. Les cartons d'archives sont nombreux, même s'ils ne contiennent que des informations parcellaires. Le travail sera poursuivi sur d'autres zones de la plaine : impact des digues du chemin de fer, zone de la grande noue de Neuvry au cœur de la Réserve naturelle de la Bassée, partie auboise de la Bassée, dont les évolutions ont eu lieu dans d'autres contextes législatifs.

Enfin, une analyse fine des discours portés par les acteurs locaux sur les projets contemporains d'aménagements de la Seine et de la plaine alluviale de la Bassée met en évidence leur positionnement et leur capacité d'action par rapport aux grands projets qui continuent de façonner ce territoire. Elle remet en perspective la notion de « territoire servant » au profit de Paris qui est souvent mis en avant et d'interroger les solidarités à l'œuvre, qui ne vont cesser de se renouveler avec le changement climatique et l'intensification probable de certains aléas. Les micro-arrangements risquent *in fine* de ne pas constituer une armature suffisante pour diminuer les vulnérabilités de ces territoires.

Au regard des résultats obtenus et des questions restants en suspens, ces différentes approches et les travaux sur l'évolution long-terme des paysages basséens vont être prolongés dans le futur au travers du collectif chercheurs-acteurs en Bassée qui s'est constitué entre les chercheurs du PIREN Seine et les acteurs de la CLE Bassée-Voulzie.

Remerciements *Les auteurs remercient l'ensemble de leurs co-auteurs des rapports PIREN Seine intermédiaires et des publications issues de ces travaux, ainsi que toutes les personnes ayant accepté de réaliser un entretien.*

Bibliographie

- Catry, J. (2021). *Relation between abandoned channels morphology and clay fill thickness: insight from the Bassée, upper Seine River France*. DENATURA research semester.
- Charrondière-Lewis, P. (2019). *Analyse géoarchéologique de la vallée de la Seine dans le secteur de la Bassée : l'avulsion de la Vieille Seine et ses répercussions socio-environnementales*, Pantheon Sorbonne Master Defense.
- 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.
- 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* 318, 148–161.
- Deroubaix, J.-F., G. Hubert, et S. Bruzzone (2016). Peut-on faire de l'inondation un enjeu métropolitain ?

- Analyse du processus de territorialisation du risque dans le bassin amont de la Seine. In *Concilier la gestion de l'eau et des territoires*, éd. Goeldner-Gianella Lydie et al. Éd. Johanet. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01693471> (13 avril 2022).
- Dzana, J.G. (1997). Le lit de la Seine de Bar à Montereau : étude morphodynamique, rôle des aménagements. Thèse de doctorat, Paris 1.
- Etrillard, C. (2016). Paiements pour services environnementaux : nouveaux instruments de politique publique environnementale. Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie (Vol. 7, n°1). <https://journals.openedition.org/developpementdurable/11274> (25 décembre 2023).
- Flipo, N. et al. (2018). Les effets de la crue de juin 2016 sur la qualité de l'eau du bassin de la Seine. éd. Nicolas Flipo, Jean-Marie Mouchel, et Cédric Fisson. Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine (PIREN Seine). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01897066>.
- Fournier, M., M. Bonnefond, et A. Debray (2021). La servitude de sur-inondation : un mécanisme capable de penser les solidarités entre espaces ruraux de fonds de vallées et espaces urbains inondables ? Le cas du bassin-versant de l'Oudon. *Géographie, économie, société* 23(4), 489-506.
- Fustec E, Greiner I, Schannen O et al (1998) Les zones humides riveraines : des milieux divers aux multiples fonctions. In: Meybeck M, de Marsily G, Fustec E (eds) La Seine en son bassin. Elsevier, Paris, pp 211-262.
- Fustec, E., Bendjoudi H., Gaillard S., Weng P., Boyer F., Boët Ph., Shannen O., Cronnegec 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
- Gobert, J. (2020). Discussion, négociation et usage des compensations socio-environnementales par les acteurs locaux. Le cas des infrastructures. In *Quand l'incertitude s'invite dans les projets d'aménagement. Nouveaux contextes, nouvelles pratiques*, éd. Geneviève Mary-Zembri., 117-49. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-03084807> (13 avril 2022).
- Gobert, J. et J.-F. Deroubaix (2022). Interdépendances et nouvelles solidarités : (a)ménager les territoires de la Seine amont. Rapport PIREN-Seine de phase VIII, PIREN-Seine. https://www.piren-seine.fr/rapports/rapports_annuels/rapports_dactivite_2022/interdependances_et_nouvelles_solidarites.
- GREBAR, (Groupe de réflexion sur la gestion des lacs réservoirs) (1994). Quel avenir pour la Bassée ? Un enjeu pour l'Île de France. *Journées de l'hydraulique* 23(2), 471-74.
- Grimaud, J. L., Hugué, A., Gouge, P., Huyghe, D., Petit, C., and Lestel, L. (2021). Évolution des paysages dans la plaine alluviale de la Petite-Seine depuis le Néolithique, restitution des tracés fluviaux et contexte paléoenvironnemental. Rapport PIREN-Seine de phase VIII, PIREN-Seine.
- Grimaud, J. L., Szewczyk, L., Gouge, P., Cojan, I., Lestel, L., Eschbach, D., ... and Hugué, A. (2020). Dynamique d'abandon de chenaux dans le territoire de la Petite-Seine. Rapport PIREN-Seine de phase VIII, PIREN-Seine.
- Grimaud, J. L., Gouge, P., Huyghe, D., Petit, C., Lestel, L., Eschbach, D., ... and Mordant, D. (2023). Lateral river erosion impacts the preservation of Neolithic enclosures in alluvial plains. *Scientific Reports*, 13(1), 16566.
- Guillard, S., J. Le Bars, et M. Oiry-Varacca (2019). Scène locale, scène sociale, arène : Contourner le « territoire » pour pouvoir faire de la géographie sociale? In Caen. <https://shs.hal.science/halshs-03576146/document>.
- Hubert, G., J.-F. Deroubaix, S. Bruzzone, et E. Rioust (2015). Projet TERIME. Les territoires de l'eau et la gestion métropolitaine du risque d'inondation. Du bassin amont de la Seine au Grand Paris. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. <http://isidoredd.documentation.developpement->

- durable.gouv.fr/document.xsp?id=Temis-0086465 (13 avril 2022).
- Imperator, A. and Quaisse, I. (2022). *Evolution of the Seine River before the industrial revolution: a geo-archaeological and geomorphological approach*. DENATURA research semester.
- Langlois, G.A. (2005). Henri Chabal et l'aménagement du bassin de la Seine, *Revue des centraliens*, 562,3 p.
- Lapostolle, D. (2021). *L'ingénierie territoriale comme opérateur de capacitation territoriale*. Thèse. Université Grenoble Alpes. <https://hal.science/tel-03344444> (26 décembre 2023).
- Lestel L, Eschbach D, Meybeck M et Gob F. (2021) The evolution of the Seine basin water bodies through historical maps. In: Flipo N, Labadie P, Lestel L (eds) *The Seine River Basin*, Hdb Env Chem, Springer, Cham, Switzerland, DOI 10.1007/698_2019_396, 29-58
- Lestel L., Eschbach D., Meybeck, M., Gastaldi, N. (2019). Dynamiques passées des rivières du bassin de la Seine. Rapport de synthèse PIREN-Seine de phase VII, Vol. 7, Chap. 1, PIREN-Seine.
- Martínez-Sosa P., Tierney J., et al. (2021). A global Bayesian temperature calibration for lacustrine brGDGTs. *Geochim. Cosmochim. Acta* 305, 87-105.
- Mégnién, C. et al. (1965). Possibilité aquifère des alluvions du val de seine entre Nogent-sur-Seine et Montereau, *Ministère Ind. BRGM Paris, DSGR 65, A76*.
- ter Mors, E., Bart W. Terwel, et Dancker D.L. Daamen (2012). The Potential of Host Community Compensation in Facility Siting. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 11, S130-38.
- Olivry, D. (1986). Gestion des ressources en eau et participation des riverains. *Les Annales de la Recherche Urbaine* 30(1), 107-13.
- Petit C., Charrondièrre-Lewis P., Cojan I., Cruz F., Deborde G., Deleplancque B., Durost R., Fechner K., Fontana L., Frouin M., Gouge P., Granai S., GrimaudJ.-L, Peltier V., Riquier V., Szewczyk, L., Tegel W., Vanmorkerke J. (2021). 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*.
- Resch, M., Lestel, L. (2022). Les impacts des aménagements sur la plaine alluviale de la Bassée. Une approche géohistorique. Rapport PIREN-Seine de phase VIII, PIREN-Seine.
- Szewczyk, L. (2020). Bedload fill of abandoned channels. (Doctoral dissertation, Paris Sciences et Lettres).
- Véquaud, P., Thibault, A., Derenne, S., Anquetil, C., Collin, S., Contreras, S., ... and Huguet, A. (2022). FROG: A global machine-learning temperature calibration for branched GDGTs in soils and peats. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 318, 468-494.
- Villion, G. (1997). Rôle des lacs-réservoirs amont : les grands lacs de Seine. *La Houille Blanche*, 8, 51-56.
- Williams, G. P. (1986). River meanders and channel size. *Journal of hydrology*, 88(1-2), 147-164.



La phase 8 du PIREN-Seine

Lancée en 2020, la phase 8 du PIREN-Seine s'achève fin 2023.

Structurée par cinq axes de recherche thématiques et un axe de transfert des connaissances et données, elle s'inscrit dans le prolongement des travaux menés par le programme depuis 1989 tout en renouvelant les approches pour répondre aux grands enjeux contemporains.

Les rapports de synthèse, réunis en dix volumes, proposent un bilan des recherches conduites pendant quatre ans grâce au soutien des partenaires institutionnels et scientifiques.

- Volume 1 Scénarios agri-alimentaires et urbains
- Volume 2 Impacts des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau
- Volume 3 Trajectoires hydrologiques passée, présente et futures du bassin de la Seine
- Volume 4 Transferts de chaleur et températures des eaux du bassin de la Seine
- Volume 5 Métabolisme des eaux du bassin de la Seine au regard de la matière organique
- Volume 6 Petites rivières urbaines
- Volume 7 Interdisciplinarité en Bassée-Voulzie**
- Volume 8 Baignade en Seine et en Marne
- Volume 9 Dynamique des contaminants à l'échelle du bassin versant de la Seine
- Volume 10 Processus biophysicochimiques et interactions biote-contaminants à l'échelle locale

Retrouvez tous les
rapports sur
www.piren-seine.fr

