

Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la Bassée en période de crue

Fulvia Baratelli^{1*}, Edith Parlanti², Gilles Varrault³, Mahaut Sourzac², Jean-Marie Mouchel⁴, Mohamed Saad³, Anne Jost⁴, Sophie Guillon¹, Agnès Rivière¹, Nicolas Flipo^{1*}

¹ Centre de Géosciences, Mines ParisTech, PSL, Fontainebleau

² Université de Bordeaux, UMR EPOC 5805 CNRS, Talence

³ LEESU, Université Paris-Est, UMR MA 102, Créteil

⁴ Sorbonne Universités, UPMC Université Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, Paris

* fulvia.baratelli@mines-paristech.fr, nicolas.flipo@mines-paristech.fr

Résumé

Le territoire de la plaine alluviale de la Bassée (320 km²), localisé en amont de la confluence entre la Seine et l'Yonne, est l'objet de grands projets d'aménagement qui devront cohabiter avec une réserve naturelle, l'exploitation des granulats, une centrale nucléaire, et des captages pour l'alimentation en eau potable. Il s'agit ainsi d'un territoire à enjeux dont le fonctionnement hydro-biogéochimique reste largement méconnu.

Une première approche par modélisation numérique a 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 du Crétacé supérieur (Labarthe et al., 2016). 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. Dans le but d'y associer un fonctionnement biogéochimique, une première campagne de mesure des paramètres biogéochimiques a été organisée en mars 2017. La campagne s'est déroulée sur trois jours, quelques heures seulement avant le passage du pic de crue, ce qui rend l'analyse des données particulièrement compliquée du fait de cet état très transitoire. Néanmoins, les données thermiques indiquent très clairement une infiltration de la rivière vers sa plaine alluviale lors de la montée de crue. L'analyse de la composition isotopique des eaux en oxygène-18, les valeurs de pH, les concentrations en oxygène dissous dans les eaux, les teneurs en nitrates et en carbone organique dissous (COD) ainsi que les indices sur la qualité de la matière organique permettent de proposer des hypothèses sur le fonctionnement du système. Il apparaît ainsi que la rivière est peu réactive lors de la crue alors que la plaine alluviale et la craie seraient le siège d'une activité hétérotrophe significative de dénitrification.

À cette vision fonctionnelle, se surimposent des indications de mise en connexion de l'aquifère régional de la craie avec des eaux de surface très bien oxygénées et fortement chargées en nitrates à l'amont et à l'aval du site étudié. Cette mise en connexion est flagrante lors de cette période transitoire. Il conviendra d'approfondir notre compréhension de la dynamique hydro-biogéochimique du site en menant de nouvelles campagnes en conditions plus stables de moyennes et basses eaux.

Introduction

La plaine alluviale de 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 (Labarthe et Flipo, 2016). La carte géologique de cette région montre que le substrat de la plaine alluviale est constitué par la craie du Crétacé supérieur (Figure 1).

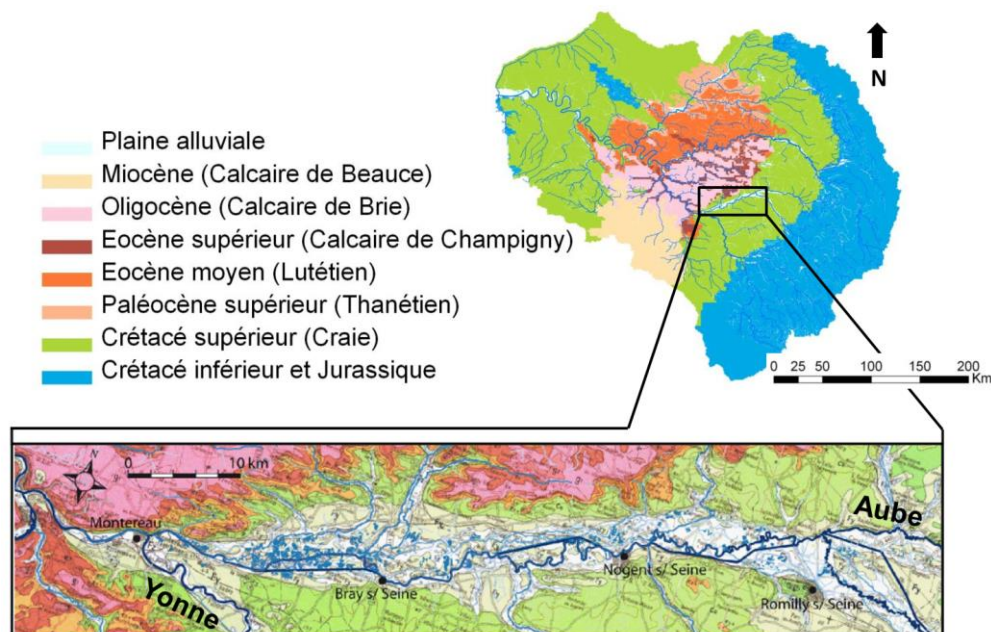


Figure 1. Localisation de la plaine alluviale de la Bassée et carte géologique (Labarthe, 2016; Labarthe et Flipo, 2016).

La Bassée est 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 été créée en 2002 afin de protéger ce patrimoine. Cette région a aussi été classée réserve d'eau souterraine stratégique pour la future alimentation en eau potable (Bel, 2015). La Bassée est aussi un territoire à forts enjeux politico-économiques et environnementaux, liés par exemple 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 que d'importants gisements de granulats. 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. D'autre part, des problématiques de décroissance de certaines communes, comme Romilly-sur-Seine, ont été mises en évidence (Lainé, 2016), ce qui pourrait conduire à un surdimensionnement des approvisionnements et des traitements des ressources en eau. La Bassée représente ainsi un territoire à enjeux, où la nécessité de concilier des usages différents demande le développement d'un projet de territoire viable.

Pour toutes ces raisons, la Bassée est un site étudié depuis longtemps dans le cadre du PIREN-Seine (Tajjar, 1993; Greiner, 1997; Schanen, 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). En ce qui concerne le fonctionnement hydrologique, une première approche par modélisation numérique (Labarthe et Flipo, 2016) a 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. En effet, des flux spirales entre la plaine alluviale et l'aquifère régional sont simulés à l'échelle régionale. Les flux infiltrés au sein de la plaine alluviale passent par l'aquifère régional avant d'alimenter l'interface nappe-rivière au droit de la rivière en aval du point d'infiltration. En période sèche, ces flux se resserrent autour de la rivière, alors qu'en période humide l'ensemble de la plaine alluviale est impliquée dans leur genèse.

En période de crue, une dynamique complexe d'échange entre la plaine alluviale et la rivière est aussi simulée. En effet, l'augmentation rapide du débit modifie localement les conditions limites de la plaine alluviale, de sorte que des réinfiltrations locales de la rivière s'établissent. Le maximum d'infiltration est

atteint alors que la phase d'augmentation du débit n'est pas terminée. Dès l'établissement de la phase de hautes eaux, l'importante infiltration en rivière observée lors de la montée de la crue cesse. L'établissement de cet équilibre s'explique par un stockage de l'eau au sein de la plaine alluviale qui bloque les écoulements latéraux (Toth, 1962). Durant la phase de récession, un drainage des eaux stockées dans la plaine alluviale a lieu, initiant le resserrement des flux spirales autour de la rivière (Labarthe et Flipo, 2016).

L'étude du fonctionnement hydrologique de la Bassée doit aussi prendre en compte la présence de plusieurs gravières, résultat d'une intense activité d'extraction de granulats. Le module Libwet (Wang et al., 2016) a été implémenté avec l'objectif d'évaluer l'impact des gravières sur les écoulements souterrains par simulation numérique.

Les études de modélisation nécessitent des données de terrain pour être validées. Pour cela, un système de suivi haute fréquence de pression et température a été mis en place en 2015 (Mouhri et al., 2014). De plus, une première campagne de mesure des paramètres biogéochimiques a été organisée en période de crue en mars 2017. L'objectif de cette étude est de fournir une première interprétation des données récoltées pendant cette campagne pour comprendre le fonctionnement hydro-biogéochimique de la Bassée en période de crue.

1 Le système de mesure

1.1 Paramètres physiques

Treize stations MOLONARI (MOnitoring Local des échanges NAppe-Rivière) ont été installées en 2015 dans la plaine alluviale de la Bassée (Mouhri et al., 2014). Parmi ces stations (Figure 2), cinq se trouvent sur la Seine (T1S1, T3S1, T5S1, T6S3, T8S1), une sur l'Aube (T4A1), une sur l'Yonne (T7Y4) et trois ont été installées sur des gravières (T6G2, T6G4, T7G3). Le point Seine T7S2 a été abandonné suite à des actes réitérés de vandalisme aux dispositifs.

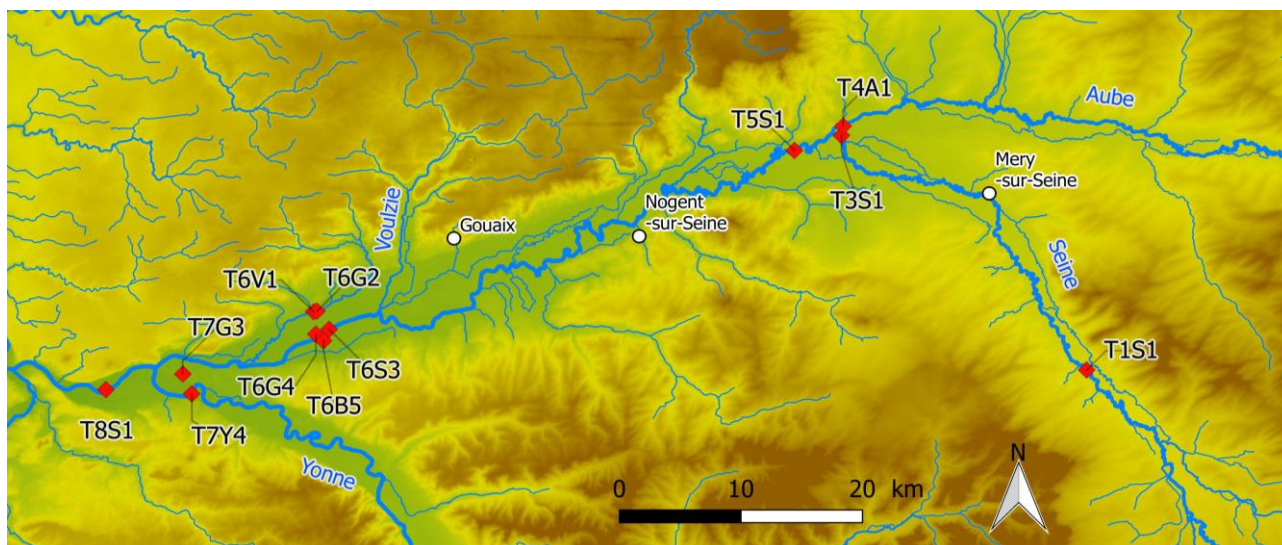


Figure 2. Localisation des stations MOLONARI dans la Bassée.

Au niveau des points T1S1, T3S1, T4A1, T5S1, T6S3 et T8S1 (Figure 2), les stations MOLONARI mesurent la pression et la température dans la rivière, dans sa nappe alluviale d'accompagnement et dans l'aquifère de la craie sous-jacent afin d'évaluer les échanges d'eau entre eaux de surface et eaux souterraines. Plus précisément, chaque station est constituée par un triplet de dispositifs : un piézomètre dans les alluvions, un piézomètre dans l'aquifère sous-jacent de la craie et une conduite coudée reliant la berge à l'eau de la rivière (Figure 3). A l'échelle de la plaine, un triplet correspond ainsi à un point d'échantillonnage vertical de la pression et de la température. Dans les points T6V1, T6B5, T6G4, T7Y4 et T7G3 (Figure 2) la station est constituée par un doublet : un dispositif dans les alluvions et un dans la rivière ou gravière. Pour certaines stations (T6G2, T6V1, T6G4, T7Y4 et T7G3), le dispositif « rivière » est constitué plus simplement par un tube posé directement dans l'eau. C'est le cas des gravières et de certains cours d'eau pour lesquels l'accès direct est possible. Chaque dispositif est muni d'un capteur pour la mesure de la pression et de la température de l'eau en continu avec un pas de temps de 15 minutes.

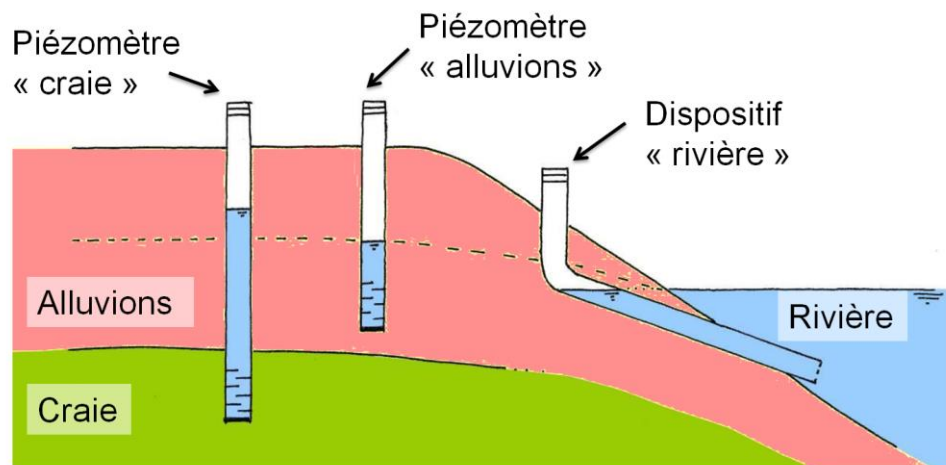


Figure 3. Schéma d'une station MOLONARI.

1.2 Paramètres biogéochimiques

Lors de la campagne de mars 2017, des échantillons d'eau ont été prélevés dans chaque point de mesure et dans chaque compartiment (craie, alluvions, rivière ou gravière) afin de mesurer différents paramètres biogéochimiques. En total, 12 échantillons ont été prélevés dans les alluvions, 7 dans la craie, 9 dans des rivières et 3 dans des gravières. Pour chaque échantillon, les paramètres suivants ont été mesurés directement sur le terrain :

- Conductivité
- Concentration en oxygène dissous
- pH

Les paramètres suivants ont été mesurés en laboratoire après la campagne :

- Rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$ (analyse réalisée au Centre de Géosciences, Mines ParisTech)
- Concentration en carbone organique dissous (analyse réalisée au laboratoire LEESU)
- Indices de qualité de la matière organique (analyse réalisée au laboratoire EPOC de l'Université de Bordeaux)
- Concentrations des ions majeurs (analyse réalisée à METIS, Université Paris 6)

La matière organique dissoute/colloïdale (MOD) a été caractérisée d'un point de vue quantitatif par la mesure des teneurs en carbone organique dissous (COD) et l'investigation de ses sources et de ses variations spatiales a été réalisée par l'étude de ses propriétés optiques (absorption, fluorescence 3D) (Coble 1996 ; Helms et al., 2008 ; Huguet et al., 2009 ; Parlanti et al., 2000 ; Stubbins et al., 2012). Pour les analyses de MOD, les échantillons ont été filtrés, immédiatement après le prélèvement, à travers des filtres en fibre de verre (Whatman, GF/F, 0.70 μm) préalablement pyrolysés à 450°C.

1.2.1 Concentration en carbone organique dissous

Les mesures des teneurs en carbone organique dissous ont été réalisées par oxydation thermique dans un four à 680°C en présence d'un catalyseur. L'appareil est étalonné à l'aide de gammes d'étalonnage réalisées à partir d'une solution standard de phtalate de potassium diluée à différentes concentrations. Pour chaque échantillon le résultat donné est la moyenne d'au moins trois mesures satisfaisantes en termes d'écart type et de coefficient de variation.

1.2.2 Absorbance de la MOD

Les spectres d'absorbance ont été enregistrés à l'aide d'un spectrophotomètre Jasco V-560. Afin d'obtenir des informations sur les propriétés de la MOD à partir de ces spectres, différents indices tels que le SUVA ou les pentes spectrales ont été développés et appliqués à l'étude de la MOD en milieu aquatique.

L'absorbance à 254nm normalisée par la concentration en COD, appelée SUVA (Specific UV Absorbance), est corrélée avec le pourcentage d'aromaticité de la MOD (Weishaar et al., 2003). Le SUVA est donc considéré comme un indicateur de l'aromaticité, de la réactivité et du caractère hydrophobe ou hydrophile 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 (Matilainen et al., 2011).

Le rapport des pentes spectrales (S_R) est calculé comme le rapport de la pente du spectre d'absorbance pour les courtes longueurs d'onde ($S_{275-295\text{nm}}$) sur la pente spectrale de plus grandes longueurs d'onde ($S_{350-400\text{nm}}$). 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).

1.2.3 Fluorescence de la MOD

La fluorescence est d'autre part une technique très sensible qui permet de caractériser la MOD à partir d'un échantillon aqueux de faible volume sans nécessité de concentration ou d'extraction. Pour caractériser la MOD, la fluorescence tridimensionnelle (ou matrices d'excitation-émission (EEM) de fluorescence) est généralement utilisée (Carstea et al., 2010 ; Huguet et al., 2009 ; Jaffé et al., 2004 ; Tzortziou et al., 2015). Les propriétés de fluorescence de la MOD permettent d'obtenir des informations sur sa structure et ses propriétés générales.

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 (Coble et al., 1990 ; Fellman et al., 2010 ; McKnight et al., 2001 ; Parlanti et al., 2000).

Les spectres ont été enregistrés à l'aide d'un spectrofluorimètre Fluorolog Horiba Jobin-Yvon FL3-22. Les données semi-quantitatives et qualitatives à prendre en compte sont l'intensité (relative à la concentration en MOD fluorescente) 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, FI...) sont également déterminés afin d'estimer les sources et le degré de maturation de la MOD fluorescente. De fortes valeurs de l'indice d'Humification HIX indiquent la présence d'un matériel organique humifié/aromatique (Huguet et al., 2009 ; Zsolnay et al., 1999). 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). L'indice FI permet d'identifier la contribution relative de MOD terrestre (1,3) ou aquatique/microbienne (1,9) (Mc Knight et al., 2001).

2 Le contexte hydrologique de la campagne de mesure

La campagne s'est déroulée sur trois jours, entre les 15 et 17 mars 2017.

La chronique de débit à la station de Bazoches-lès-Bray, en aval de la Bassée, montre que la campagne a eu lieu seulement quelques heures avant le passage du pic de crue (Figure 4). Le pic de $163 \text{ m}^3/\text{s}$ a été atteint les 18 et 19 mars 2017, ce qui est proche du 90% percentile calculé sur la période 1999-2017 ($173 \text{ m}^3/\text{s}$, <http://www.hydro.eaufrance.fr>). Cette condition hydrologique rend l'analyse des données particulièrement compliquée du fait de cet état très transitoire.

En effet, les résultats de la modélisation couplée hydrologique-hydrogéologique (Labarthe et Flipo, 2016) indiquent que l'augmentation du niveau d'eau en rivière pendant la montée de crue détermine une infiltration de la rivière dans les alluvions et que le maximum de cette infiltration se réalise avant le pic de crue. Suite à cette phase, l'infiltration diminue jusqu'à devenir nulle quand le niveau d'eau dans les alluvions dépasse la rivière. Quelques heures avant le pic de crue, les différents sites pourraient donc être caractérisés, selon leur spécificité géologique, par une infiltration de la rivière dans les alluvions ou par une situation d'équilibre.

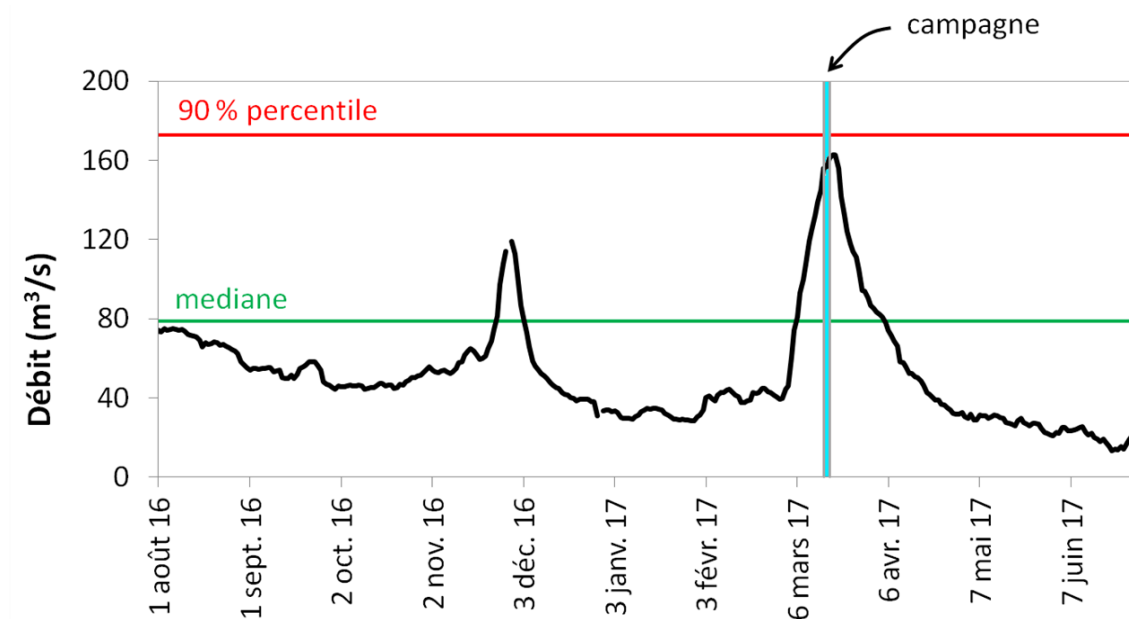


Figure 4. Débit à la station de Bazoches-lès-Bray. La médiane et le 90% percentile, calculés sur la période 1999-2017, sont montrés (<http://www.hydro.eaufrance.fr>). La période de la campagne est soulignée en bleu clair.

3 Analyse des paramètres hydro-biogéochimiques

Dans cette étude préliminaire des données de terrain, seulement les stations situées le long de la Seine sont analysées, afin d'établir un premier cadre de fonctionnement hydro-biogéochimique de la Seine dans la Bassée. Les dispositifs en triplet offrent ainsi la possibilité de décrire le fonctionnement du milieu au droit de la Seine, le long du réseau hydrographique. L'analyse des données des gravières et des affluents fera l'objet de prochains travaux. Dans la suite de ce rapport, les stations MOLONARI seront indiquées avec des noms simplifiés, comme indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1. Noms simplifiés pour les stations MOLONARI de la Seine.

Station MOLONARI	Nom simplifié
T1S1	S1
T3S1	S3
T5S1	S5
T6S3	S6
T8S1	S8

3.1 Température

La température est mesurée en continu avec un pas de temps de 15 minutes. L'analyse de ses évolutions temporelles permet d'évaluer la réponse de différents compartiments (rivière, alluvions, aquifère régional) aux variations journalières et saisonnières des conditions hydrologiques. L'analyse conjointe de cette quantité et des données de température de l'air et du débit en rivière permet d'établir des hypothèses de connexion entre eaux de surface et eaux souterraines, hypothèses qui peuvent ensuite être confirmées ou modifiées suite à l'analyse des autres paramètres géochimiques.

Les données mesurées à la station S5 (Figure 5), située sur la Seine juste en aval de la confluence avec l'Aube (Tableau 1, Figure 2), montrent que la température des alluvions répond aux fluctuations de la température en rivière avec un certain temps de retard. En effet, la température en rivière est maximale fin août 2016 alors que, dans les alluvions, le maximum est atteint en octobre 2016. Lors de crues, on peut observer une diminution nette de la température dans les alluvions (fin novembre 2016 et début mars 2017).

Cette diminution s'explique par une infiltration des eaux froides de la rivière dans les alluvions pendant la montée de crue.

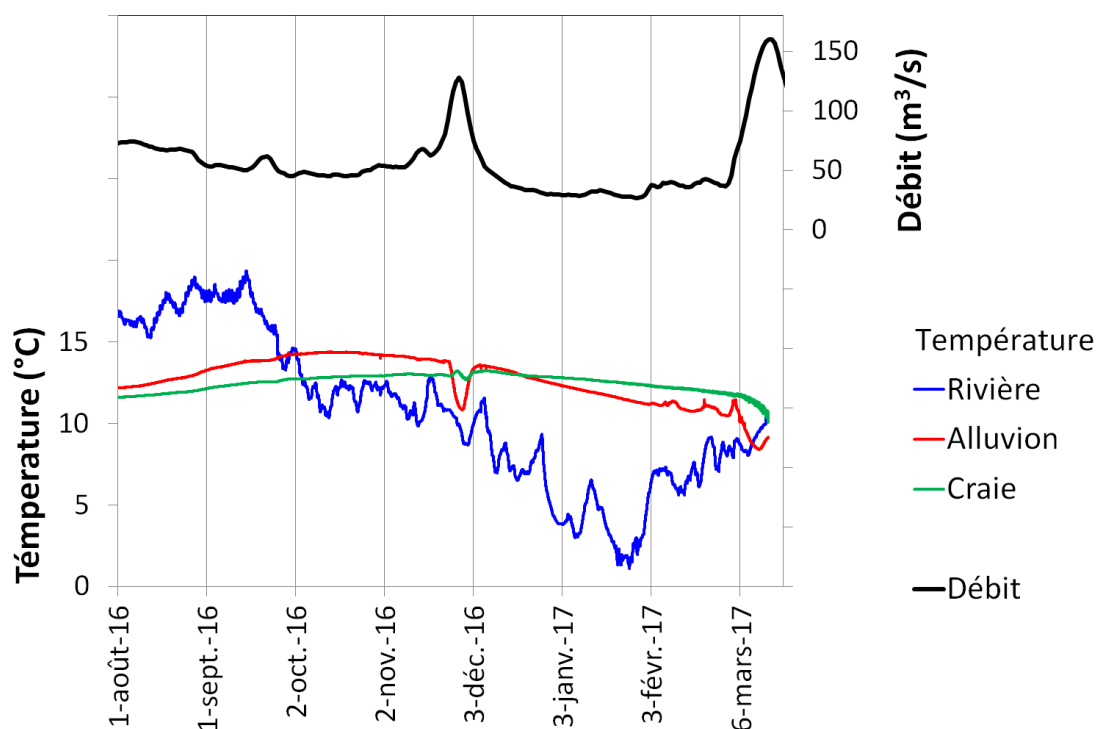


Figure 5. Température mesurée à la station S5 (rivière, alluvions et craie). La courbe noire montre le débit en rivière mesuré à la station voisine de Pont-sur-Seine.

Dans le cas de la crue de mars 2017, le débit en rivière commence à augmenter le 2 mars. En ce moment là, la rivière est plus froide que les alluvions (Figure 5). La diminution rapide de la température dans les alluvions peut donc être expliquée par des infiltrations de l'eau froide de la rivière qui commencent à avoir lieu pendant la montée de crue. Ce comportement est cohérent avec les résultats de modélisation montrés par Labarthe et Flipo (2016). Au moment de la campagne, le 17 mars, la température de la rivière est supérieure à celle des alluvions (Figure 5). En effet, sa réponse à la température atmosphérique est beaucoup plus rapide que pour les alluvions, pour lesquelles la température au moment de la campagne est en train d'augmenter lentement. La température des alluvions est le résultat d'un historique d'échanges surface-souterrain. Cela doit être pris en compte dans l'interprétation des données instantanées de température mesurées au moment de la campagne (Figure 6).

Ces données instantanées montrent que la température dans les alluvions est inférieure à la température dans la Seine pour toutes les stations. En se basant sur l'interprétation des chroniques de température dans S5, on peut donc expliquer cette configuration thermique par des infiltrations des eaux froides de la Seine pendant la montée de crue. Dans certains cas (S3) l'épaisseur de la zone non saturée est assez faible et le refroidissement des alluvions est lié aussi à l'infiltration de la pluie à travers le sol.

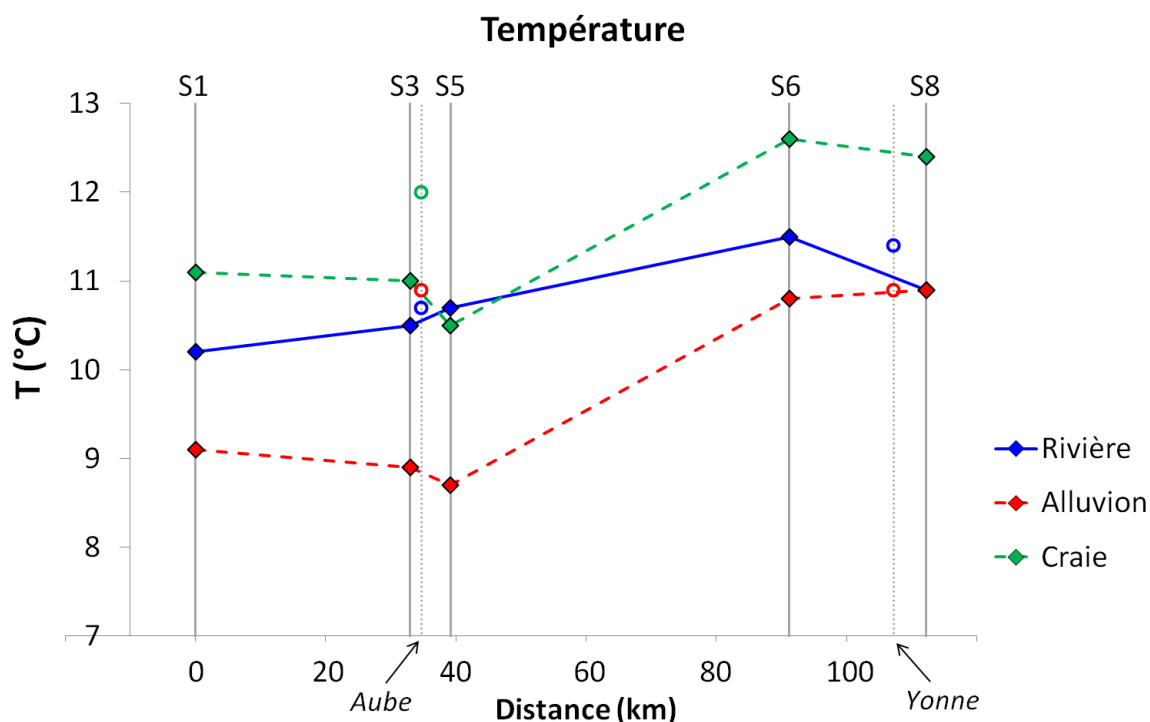


Figure 6. Température de la rivière, des alluvions et de la craie dans les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

3.2 Rapport isotopique de l'oxygène

L'oxygène a trois isotopes stables : l'oxygène-18 (^{18}O), l'oxygène-17 (^{17}O) et l'oxygène 16 (^{16}O). Le paramètre $\delta^{18}\text{O}$ est un indicateur du rapport entre la quantité d'oxygène-18 et celle d'oxygène-16 dans un échantillon :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{standard}}} - 1,$$

où $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et le standard est une eau océanique de référence (SMOW = Standard Mean Oceanic Water). Ce paramètre peut être utilisé comme indice de connexion entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet, le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations est caractérisé par une variabilité annuelle de forme sinusoïdale. Ses valeurs sont corrélées avec la température de l'air, avec des valeurs plus élevées en été et plus faibles en hiver (Figure 7).

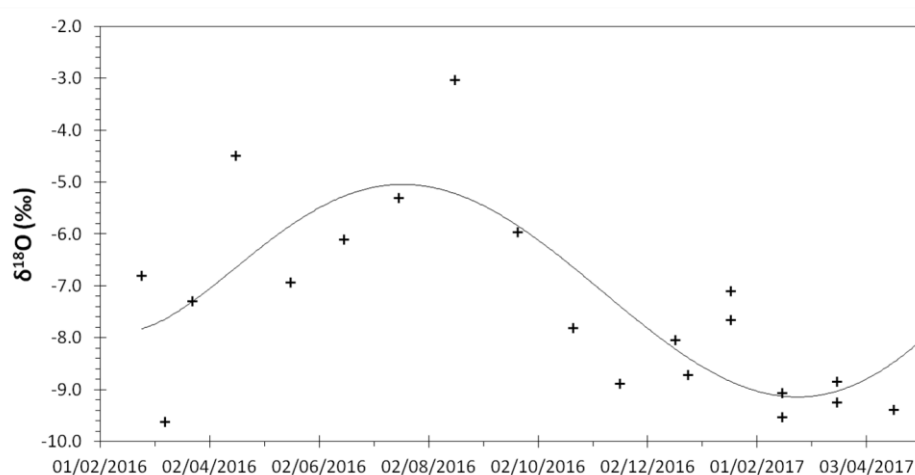


Figure 7. $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations à Fontainebleau entre février 2016 et avril 2017. Les croix représentent les données expérimentales. La courbe est un fit polynomial.

Dans la rivière, le signal de $\delta^{18}\text{O}$ est généralement très corrélé avec celui de la pluie mais un peu atténué, parce que l'eau de la rivière ne contient pas seulement l'eau de la pluie actuelle mais aussi des eaux plus anciennes ainsi que des eaux souterraines.

D'autre part, les eaux souterraines sont le résultat d'un mélange d'eaux d'origine et d'âges différents, en raison des temps de transfert longs dans les aquifères. Par conséquent, les variations isotopiques de la pluie sont fortement filtrées. Dans l'absence de connexions fortes avec la surface, la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux souterraines est donc une valeur uniforme et constante, correspondant à la moyenne annuelle du signal isotopique de la pluie (-7.1 ‰). Néanmoins, la présence de connexions entre les eaux de surface et les eaux souterraines détermine des variations par rapport à ce cadre général. En particulier, l'infiltration des eaux de surface dans le sous-sol modifie la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ dans l'aquifère, qui se rapproche de la valeur de la rivière. L'analyse du $\delta^{18}\text{O}$ permet donc de mettre en place un cadre de connexion entre eaux de surface et eaux souterraines.

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ mesurées dans les échantillons prélevés dans les stations le long de la Seine sont montrées en Figure 8. Les erreurs associées à ces valeurs sont de 0.1 ‰.

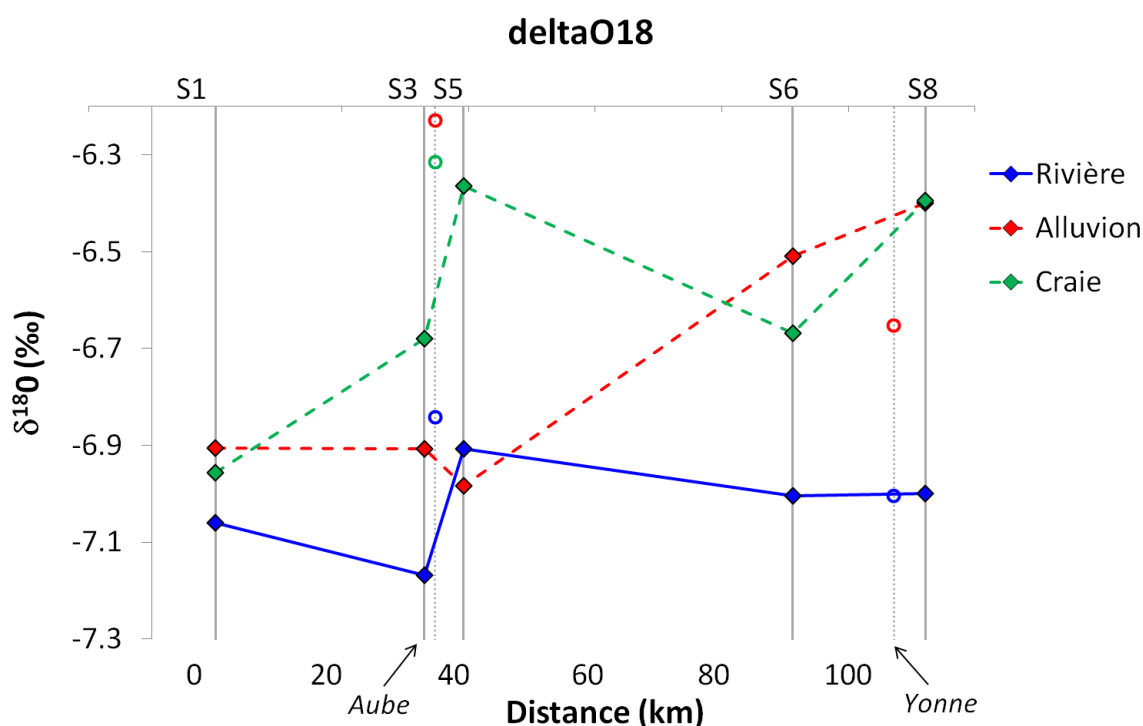


Figure 8. Rapport isotopique de l'oxygène de la rivière, des alluvions et de la craie dans les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

Le $\delta^{18}\text{O}$ de la Seine est globalement inférieur à celui des eaux souterraines. Cela est l'effet des précipitations, qui, en fin d'hiver, sont caractérisées par un $\delta^{18}\text{O}$ inférieur à celui mesuré en été (Figure 7). Durant la campagne, le rapport isotopique de la pluie à Fontainebleau est d'environ -9 ‰. L'eau de la rivière a un rapport isotopique variant entre -7.2 ‰ et -6.9 ‰, qui sont des valeurs inférieures à celles observées dans l'aquifère de la craie. Cela indique que l'eau de la rivière contient une grosse contribution de ruissellement de surface. L'augmentation de $\delta^{18}\text{O}$ entre S3 et S5 est liée à la confluence avec l'Aube, pour laquelle le rapport isotopique est significativement supérieur à celui de la Seine. Cette situation pourrait être expliquée par une contribution des eaux de surface au débit de l'Aube inférieure par rapport à la Seine, ou par des précipitations caractérisées par une valeur de $\delta^{18}\text{O}$ plus important sur le bassin de l'Aube.

Dans S1 on observe des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ très proches pour la rivière, les alluvions et la craie. Cela indiquerait une connexion hydrologique entre rivière et alluvions et entre alluvions et craie. Entre S1 et S3 $\delta^{18}\text{O}$ reste constant dans les alluvions, ce qui indiquerait l'absence de connexion avec la rivière. Entre S3 et S5 $\delta^{18}\text{O}$ diminue dans les alluvions. Cela ne peut pas être l'effet de l'Aube, pour laquelle les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont

supérieures à ceux de la Seine pour tous les compartiments. Par conséquent, la diminution de $\delta^{18}\text{O}$ entre S3 et S5 est probablement due à une connexion entre la rivière et les alluvions. Les alluvions au niveau des stations en aval (S6 et S8) semblent moins bien connectées à la rivière, car les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans les alluvions sont plus proches de celles de la craie.

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ dans la craie ne sont pas uniformes, mais présentent une variabilité importante à cause des interactions avec la surface. En particulier, la faible valeur de $\delta^{18}\text{O}$ dans S1 et sa diminution entre S5 et S6 indiqueraient une connexion directe entre la craie et les eaux de surface, qui pourrait être expliquée par des conduits karstiques. En S8 craie et alluvions sont caractérisés par des valeurs similaires de $\delta^{18}\text{O}$, ce qui indiquerait des apports de la craie vers les alluvions.

La tendance à l'augmentation de $\delta^{18}\text{O}$ d'amont en aval (Figure 8) pourrait être expliquée par la tendance régionale à l'augmentation du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations en s'éloignant de la côte. Une influence des reliefs est aussi possible ($\delta^{18}\text{O}$ diminue avec l'altitude d'environ -0.5‰ tous les 100 m).

On peut remarquer que, en moyenne, le $\delta^{18}\text{O}$ dans la craie est supérieur au $\delta^{18}\text{O}$ moyen annuel de la pluie (-7.1‰). Cela pourrait être expliqué par les incertitudes de la mesure, mais aussi à la présence d'évaporation dans le sol, qui rend le $\delta^{18}\text{O}$ de la recharge supérieur à celui de la pluie.

3.3 Oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous est influencée à la fois par les écoulements (échanges eaux de surface – eaux souterraines) et par la réactivité.

Les alluvions sont en général assez bien oxygénées (Figure 9). Cela est cohérent avec les infiltrations indiquées par l'analyse de la température et du rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$. La présence significative d'oxygène dans les alluvions, devrait favoriser une action bactérienne hétérotrophe. Entre S1 et S5, l'oxygène dans les alluvions augmente à cause d'apports soutenus des eaux de surface, notamment en S5. En revanche, entre S5 et S8, on observe une diminution qui pourrait être expliquée par des apports de surface faibles et par une activité hétérotrophe intense qui consomme l'oxygène présent. En S5, les concentrations d'oxygène dans la rivière et dans les alluvions sont à l'équilibre, ce qui confirme la forte connexion entre rivière et alluvions déjà observée après l'analyse de $\delta^{18}\text{O}$.

La craie est caractérisée par une forte concentration d'oxygène dans S1. Cela confirme l'analyse de $\delta^{18}\text{O}$, qui montrait une connexion directe entre craie et surface. En revanche, la craie est très pauvre en oxygène dans les stations S3, S5 et S6, ce qui indiquerait l'absence de connexion avec la surface. Néanmoins, l'analyse de $\delta^{18}\text{O}$ a montré, qu'entre S5 et S6, il y aurait une connexion directe entre craie et surface. La faible quantité d'oxygène peut donc être expliquée par des réactions hétérotrophes.

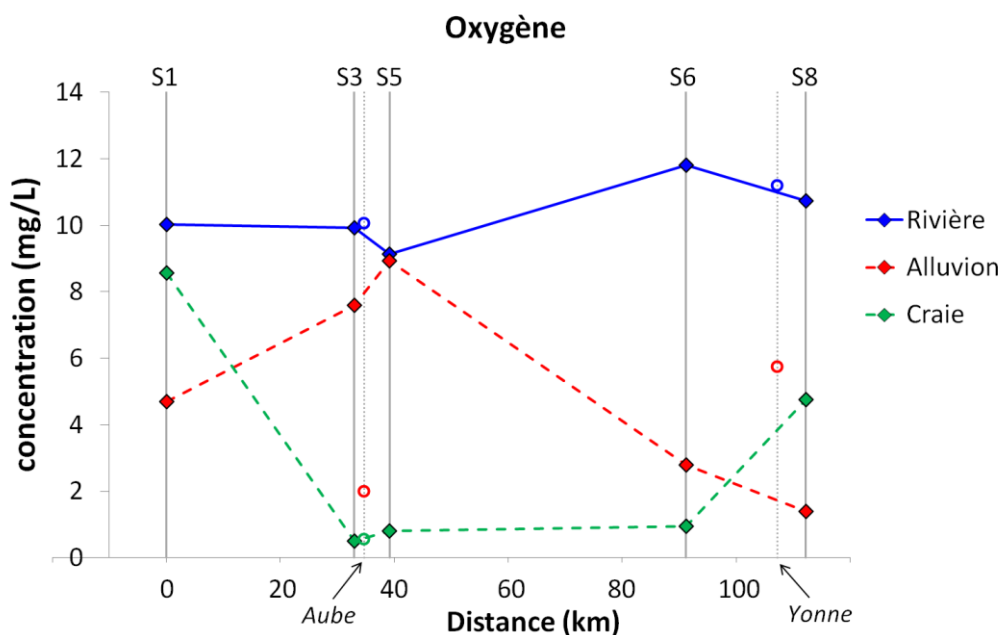


Figure 9. Concentration d'oxygène dissous dans la rivière, dans les alluvions et dans la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans la Yonne.

3.4 Conductivité électrique

Entre S1 et S3, la conductivité dans les alluvions et dans la craie est inférieure à celle dans la Seine (Figure 10). Cela est probablement dû aux infiltrations de la Seine. La conductivité dans la Seine décroît de l'amont vers l'aval. Cela indique que les apports de surface sont prédominants. Entre S3 et S5 on peut remarquer l'influence de l'Aube sur les valeurs de conductivité des alluvions et de la craie. La conductivité de la craie en S5 revient ensuite à la même valeur qu'en S3. En revanche, la conductivité des alluvions augmente entre S5 et S6. Cela pourrait marquer la contribution de sources d'eau différentes tel que les rejets urbains ou industriels. Des analyses supplémentaires seront nécessaires pour mieux comprendre ces variations de conductivité.

3.5 pH

Le pH dans la Seine indique une légère augmentation de l'amont vers l'aval (Figure 11). Cela pourrait être expliqué par une légère activité photosynthétique. En effet, le CO₂ dans l'eau forme de l'acide carbonique qui fait diminuer le pH. La photosynthèse consomme le CO₂ et fait donc augmenter le pH de l'eau. Cette hypothèse reste cependant à confirmer du fait de la faiblesse de la variation longitudinale de pH. Les équilibres carbonatés devront être pris en compte lors de la prochaine campagne d'échantillonnage.

Le pH dans les alluvions et dans la craie est significativement inférieur au pH dans la rivière (Figure 11), même dans S5 où les autres paramètres ont indiqué une forte connexion entre alluvions et rivières. Cela peut être expliqué par la présence d'activité hétérotrophe comme suggéré par les valeurs d'oxygène.

3.6 Carbone organique dissous

Le Carbone Organique Dissous (COD) dans la Seine est assez stable de l'amont à l'aval (Figure 12), avec une légère augmentation entre S3 et S5 due à la contribution de l'Aube. La concentration de COD dans la Seine est globalement supérieure à celle mesurée dans les eaux souterraines. Cela s'explique par les apports de matière organique à la rivière à travers le ruissellement de surface.

Dans les alluvions, le COD augmente significativement entre S3 et S5, ce qui est cohérent avec les apports de surface indiqués par l'analyse de la température, du $\delta^{18}\text{O}$ et de l'oxygène dissous. A partir de S5, les alluvions sont donc riches en COD et constituent un bon substrat pour une activité bactérienne hétérotrophe. En effet, entre S5 et S6 une diminution de COD est observée, ce qui peut être expliqué par la consommation bactérienne. Dans le même secteur, une diminution de COD est observée dans la craie (Figure 12).

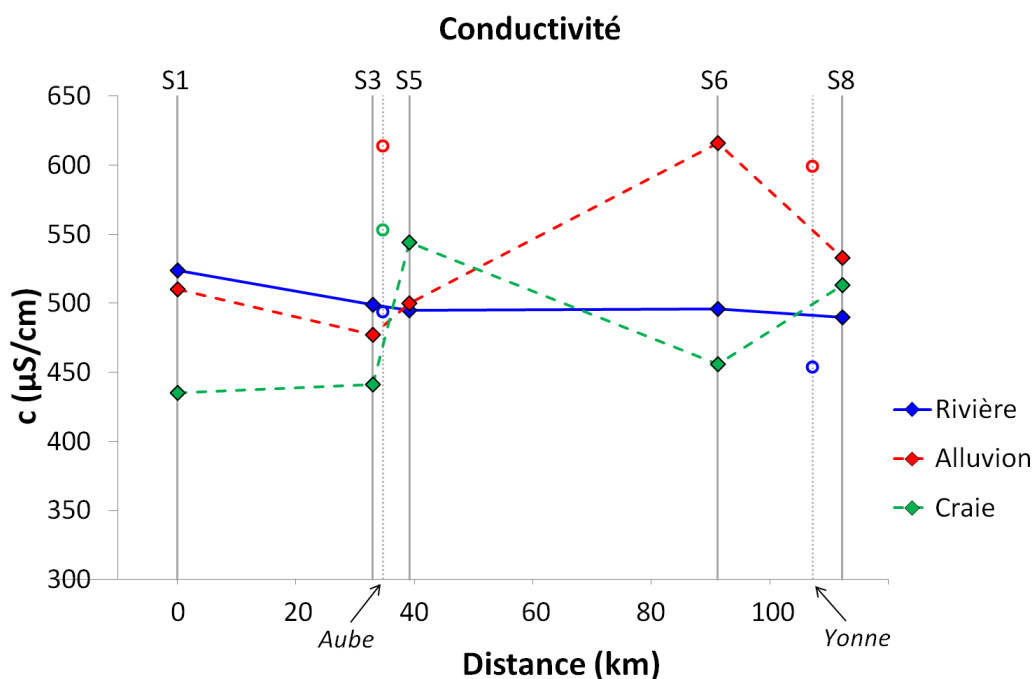


Figure 10. Conductivité de l'eau de la rivière, des alluvions et de la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

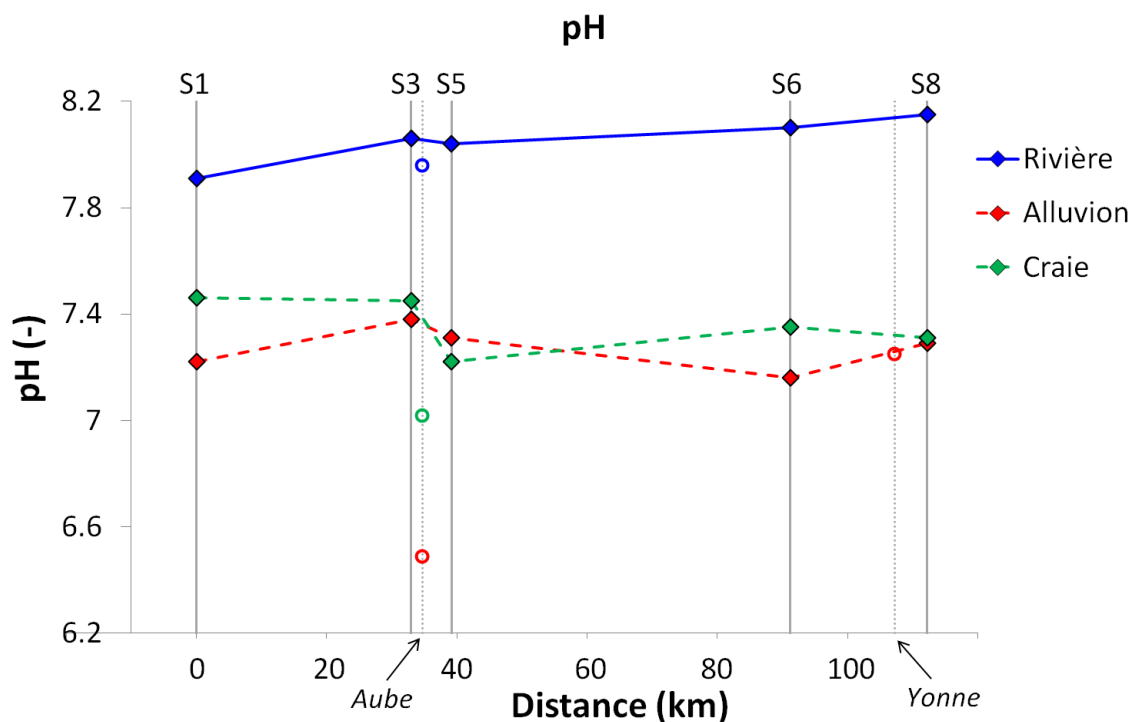


Figure 11. pH de l'eau de la rivière, des alluvions et de la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

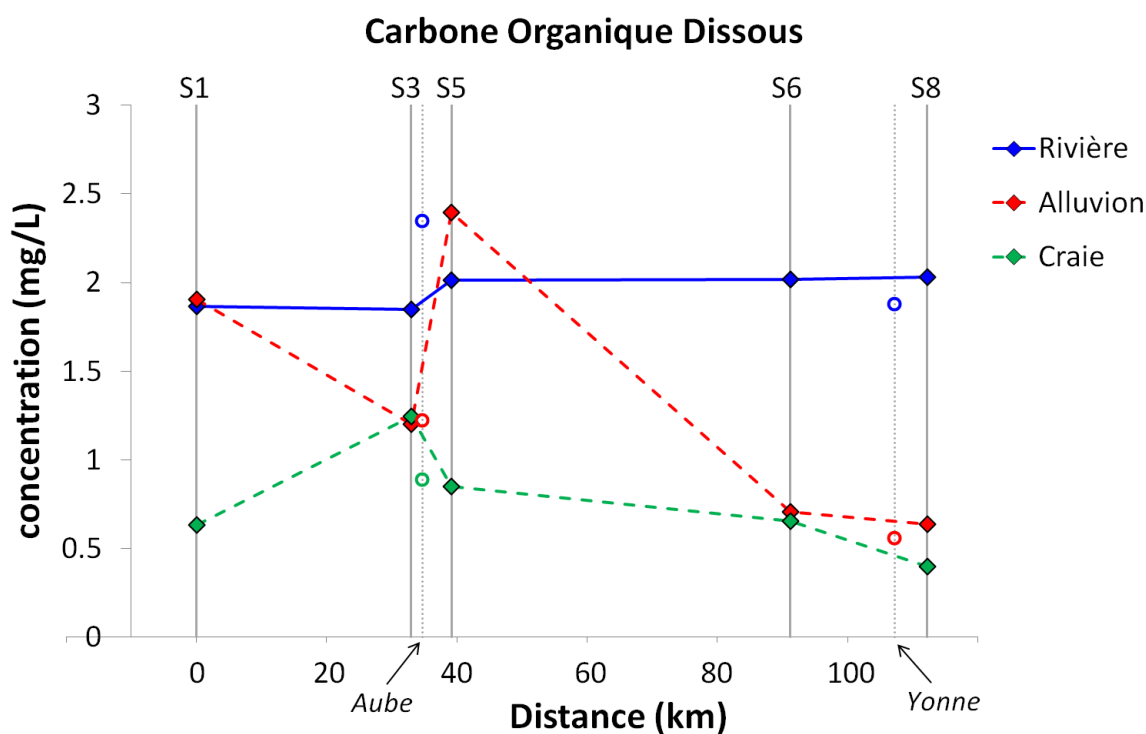


Figure 12. Concentration de carbone organique dissous dans l'eau de la rivière, des alluvions et de la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

3.7 Qualité de la matière organique

Afin de préciser le devenir du COD, des analyses de spectroscopie optique ont été réalisées pour caractériser la matière organique au niveau des différentes stations. En particulier, l'indice d'humification (HIX, Figure 13) est un paramètre caractérisé par des valeurs élevées (>20) quand la matière organique est plutôt humique. La matière organique est plus humique/aromatique dans la rivière qu'en profondeur (Figure 13). Cela est probablement l'effet du ruissellement de surface pendant la montée de crue, qui apporte à la rivière une quantité importante de matière organique du sol, plus humifiée/mature.

Globalement la valeur de HIX dans la craie est deux fois moins élevée que dans la rivière, indiquant une autre origine de la matière organique que celle de la rivière au moment de la crue. Ceci dit, mise à part la confluence avec l'Aube, l'augmentation du HIX d'amont en aval entre S1 et S3 semblerait indiquer un vieillissement de la matière organique qui deviendrait de plus en plus humique suivant l'écoulement de l'eau, indiquant une transformation lente de la MO au sein de l'aquifère de la Craie. Le HIX quantifié dans les alluvions est cohérent avec le mélange identifié des eaux de l'aquifère de craie, présentes avant la montée de crue, avec celles de la Seine, plus humiques.

Dans S5 la matière organique dans les alluvions présente un caractère plus réfractaire en raison de la connexion très forte avec la Seine déjà identifiée. Entre S5 et S6, HIX dans les alluvions diminue, la matière organique devient moins humique à cause des apports de la craie, et des faibles apports de la Seine aux alluvions, eux aussi déjà mis en évidence par les autres variables étudiées.

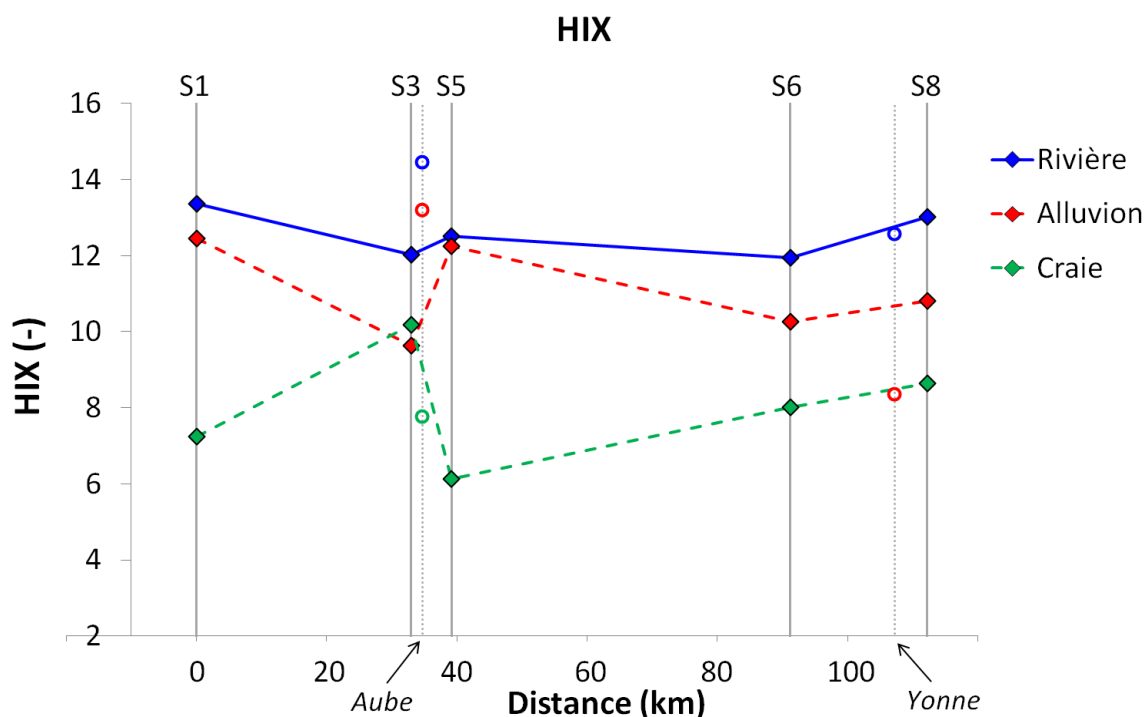


Figure 13. Indice d'humification (HIX) de l'eau de la rivière, des alluvions et de la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

L'indice BIX (Figure 14) traduit l'activité biologique dans le milieu. Il varie entre 0.4 et 1. De fortes valeurs de BIX indiquent une matière organique plus labile fraîchement produite dans le milieu, pour laquelle une activité bactérienne de dégradation est possible. Les données montrent qu'au moment du pic de crue, l'activité biologique semble plus conséquente dans les eaux souterraines que dans la Seine.

Entre S3 et S5 le BIX dans les alluvions diminue parce que la matière organique apportée par le ruissellement est plus humique donc moins facilement transformable. Il y a quand même plus d'activité biologique dans les alluvions que dans la rivière. Entre S5 et S6, l'indice BIX dans les alluvions augmente conjointement à une diminution du COD (Figure 12) et de l'oxygène (Figure 9). Cela est caractéristique d'une activité hétérotrophe dans ce secteur.

La Figure 15 montre des caractéristiques de MOD contrastées entre les trois compartiments : sources terrigènes majoritaires pour les eaux de rivière ; forte activité biologique et faibles apports terrestres dans la craie ; mélange des sources dans les alluvions.

Les valeurs de HIX mesurées pour les eaux de surface, moyennement élevées (<15), traduisent la présence de matériel organique mature et aromatique d'origine terrestre et sont cohérentes avec les valeurs de cet indice mesurées pour les échantillons de la campagne de février 2013 en période de crue (PIREN-Seine phase VI) dans la même zone géographique. L'ensemble des échantillons de rivière sont globalement caractérisés par une activité biologique en moyenne relativement élevée ($BIX > 0.6$) également du même ordre de grandeur que pour les eaux de surface étudiées lors de la crue de février 2013.

L'indice BIX représenté en fonction de l'indice de fluorescence FI (Figure 16) montre la prédominance des sources microbiennes prépondérantes de la MOD (FI élevé) dans les eaux souterraines et notamment dans la craie. Les eaux de rivières sont caractérisées pour une source terrestre ($FI < 1.3$).

La MOD des alluvions présentent à nouveau des caractéristiques intermédiaires de même que l'échantillon S3 prélevé dans la craie qui montre une signature de MOD plus mature. Ceci pourrait s'expliquer comme décrit précédemment par des phénomènes de transformation lente de la MOD au sein de l'aquifère de la Craie ou par des apports terrigènes dans l'aquifère.

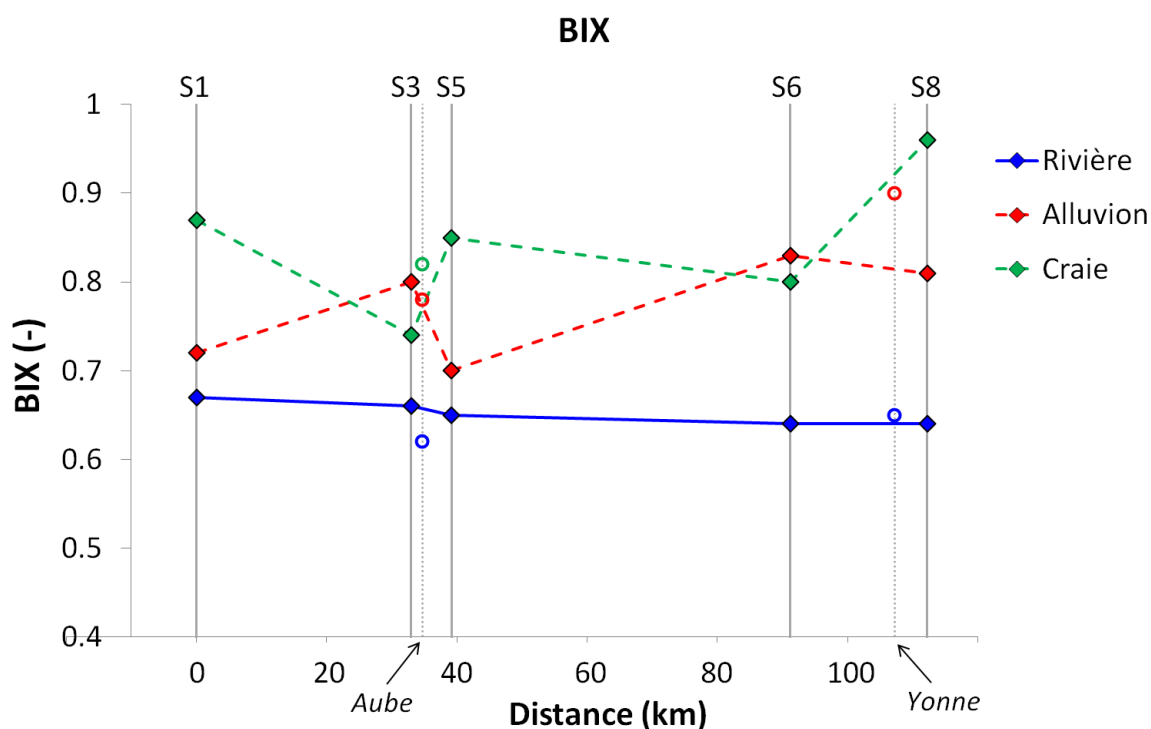


Figure 14. Indice d'activité biologique (BIX) de l'eau de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

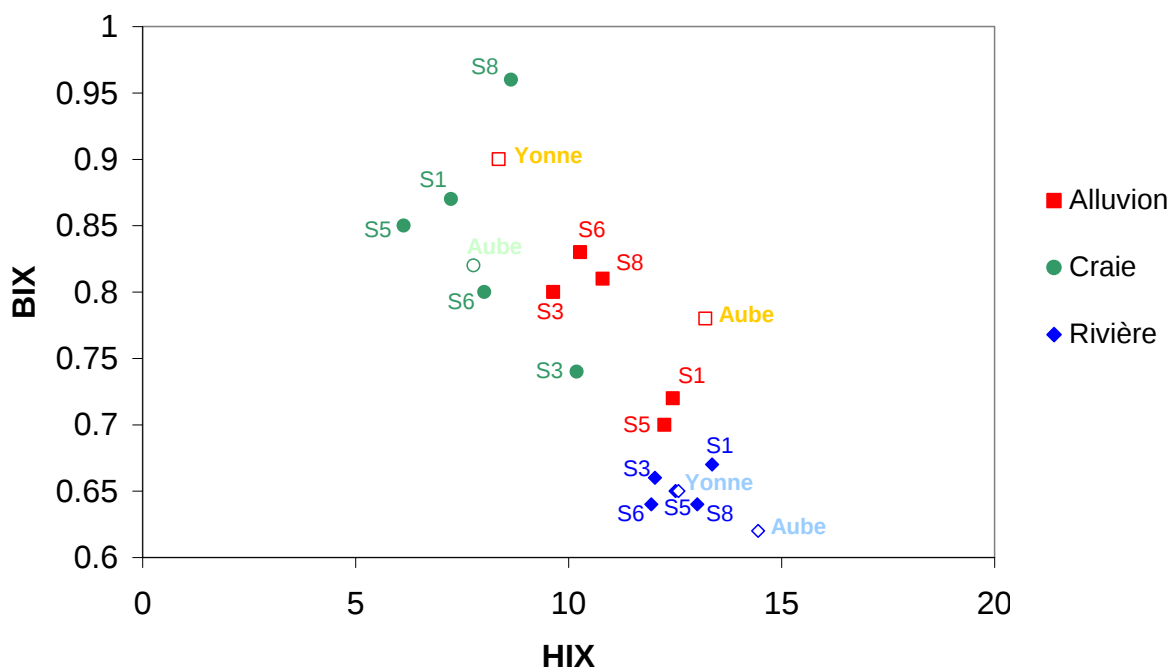


Figure 15. Indice d'activité biologique (BIX) en fonction de l'indice d'humification (HIX) pour les stations le long de la Seine (symboles pleins) ainsi que dans l'Aube et l'Yonne (symboles vides).

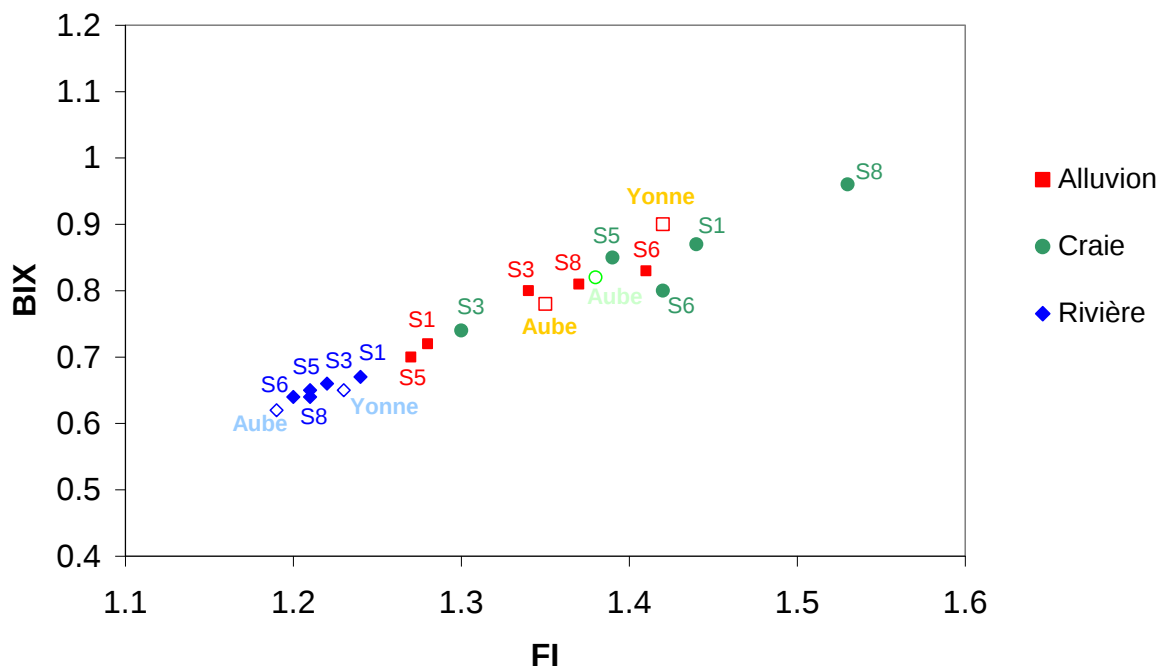


Figure 16. Indice d'activité biologique (BIX) en fonction de l'indice FI pour les stations le long de la Seine (symboles pleins) ainsi que dans l'Aube et l'Yonne (symboles vides).

Comme observé pour l'indice HIX (Figure 13) l'indice d'absorbance UV spécifique (SUVA) montre une aromaticité plus forte dans les eaux de surface (Figure 17), sans pour autant être très élevée (SUVA >4 pour du matériel à fort caractère humique). Ces observations sont en bon accord avec les résultats obtenus pour l'indice HIX.

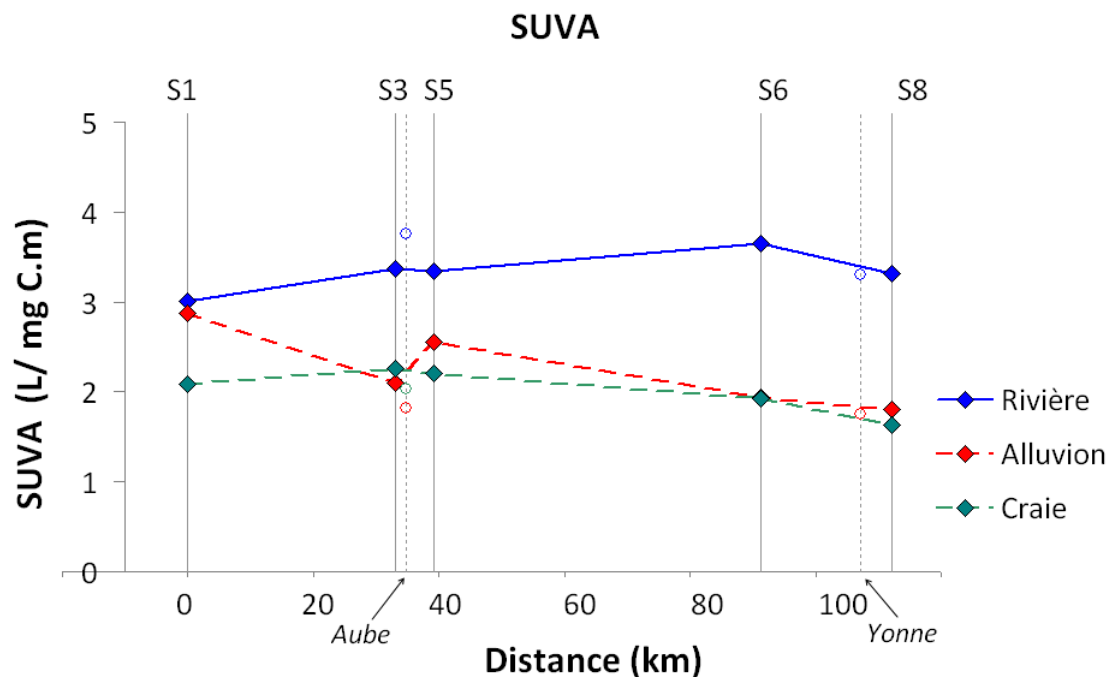


Figure 17. Indice d'absorbance UV spécifique (SUVA) de l'eau de la rivière (bleu), des alluvions (rouge) et de la craie (vert) pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

Il est d'autre part intéressant de souligner que, contrairement aux idées reçues, les plus fortes tailles moléculaires ne sont pas observées pour le matériel plus humique/mature/aromatique des eaux de surface mais pour les eaux souterraines comme montré sur la Figure 18. Les plus fortes valeurs de l'indice S_R (et donc les plus faibles masses moléculaires) sont en effet observées pour les eaux de rivière alors que les plus faibles valeurs de S_R sont obtenues pour les échantillons caractérisés par une plus forte activité biologique/microbienne.

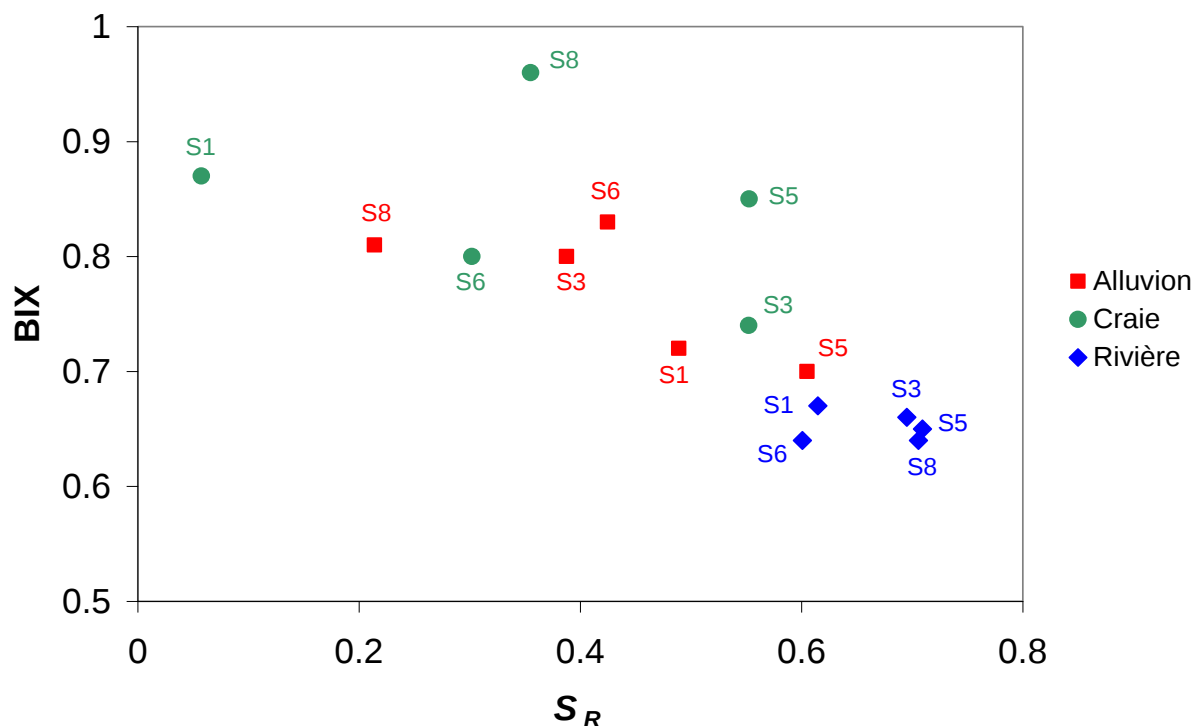


Figure 18. Indice d'activité biologique (BIX) en fonction du rapport de pentes spectrales S_R pour les stations le long de la Seine.

3.8 Concentration de nitrates

La Seine apparaît modérément chargée en nitrates (Figure 19) et, globalement, elle contient plus de nitrates que les eaux souterraines. L'aquifère de la craie est caractérisé par une forte concentration de nitrates dans les deux stations en amont (S1) et en aval (S8) de la Bassée, à cause des apports de surface déjà mis en lumière. En revanche, entre S3 et S6 on remarque des concentrations très faibles dans les alluvions et dans la craie. Cela est cohérent avec l'hypothèse d'activité biologique hétérotrophe suggérée par les faibles valeurs de COD et d'oxygène dissous, par les valeurs élevées de BIX et par la baisse de pH. Une activité de dénitrification semble donc avoir lieu dans les eaux souterraines de la Bassée, notamment dans la craie où des eaux anoxiques ont été identifiées.

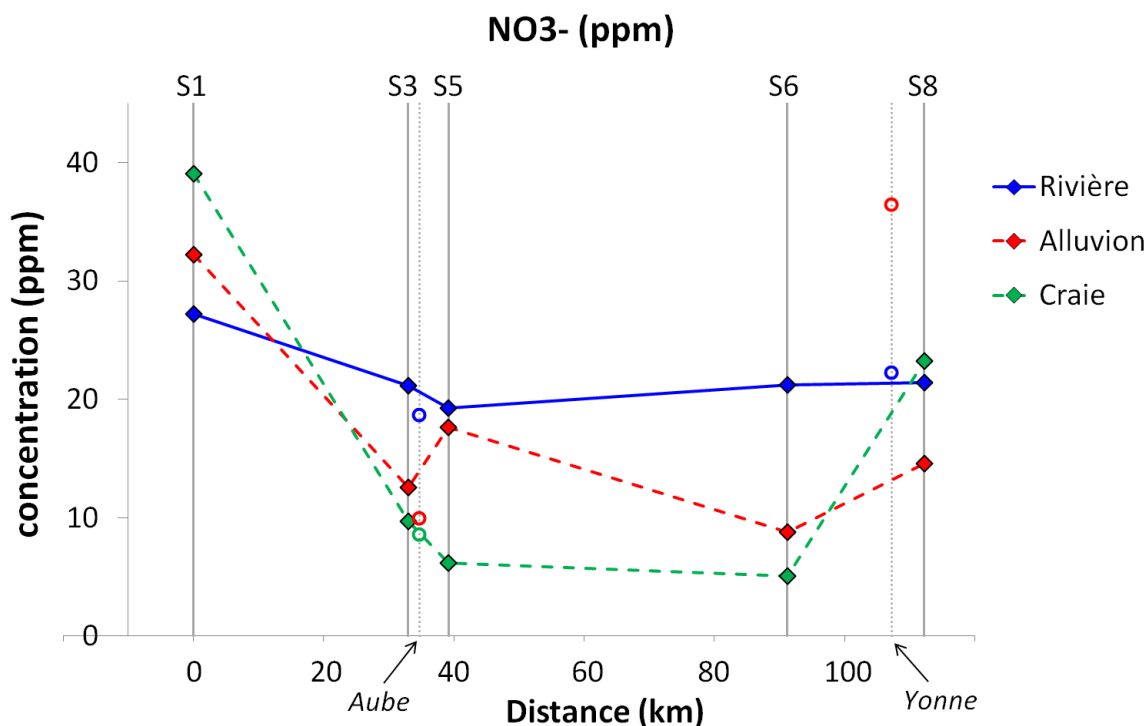


Figure 19. Concentration de nitrates dans l'eau de la rivière, des alluvions et de la craie pour les stations le long de la Seine. Les cercles représentent les données mesurées dans l'Aube et dans l'Yonne.

4 Synthèse des analyses

4.1 Bilan de connectivité hydrologique

L'analyse des données de température, $\delta^{18}\text{O}$, oxygène dissous et de conductivité permet d'établir un cadre de connectivité hydrologique entre les compartiments rivière, alluvions et craie d'amont en aval de la Bassée (Figure 20).

En amont de la Bassée (station S1), de fortes infiltrations des eaux de surface dans la craie, possiblement dues à la présence de conduits karstiques, sont indiquées par l'analyse de la température (les alluvions sont plus froides que la rivière), du rapport isotopique $\delta^{18}\text{O}$ (valeurs proches entre les trois compartiments), de l'oxygène (forte concentration dans la craie) et de la conductivité (faible dans la craie).

Entre S1 et S3, les différents paramètres n'indiquent pas de connectivité significative entre eaux de surface et eaux souterraines.

Dans S5, en aval de la confluence avec l'Aube, la Seine est caractérisée par de fortes infiltrations de la rivière dans les alluvions, indiquées par les valeurs similaires de $\delta^{18}\text{O}$, d'oxygène dissous et de conductivité.

Entre S5 et S6, les données de $\delta^{18}\text{O}$ montrent des apports directs des eaux de surface dans la craie, de façon similaire à S1. L'infiltration de la rivière dans les alluvions serait montrée par les concentrations en oxygène dissous.

Entre S6 et S8, les valeurs similaires de $\delta^{18}\text{O}$ dans craie et alluvions indiqueraient des apports de la craie dans les alluvions. En revanche les apports de surface ne semblent pas significatifs.

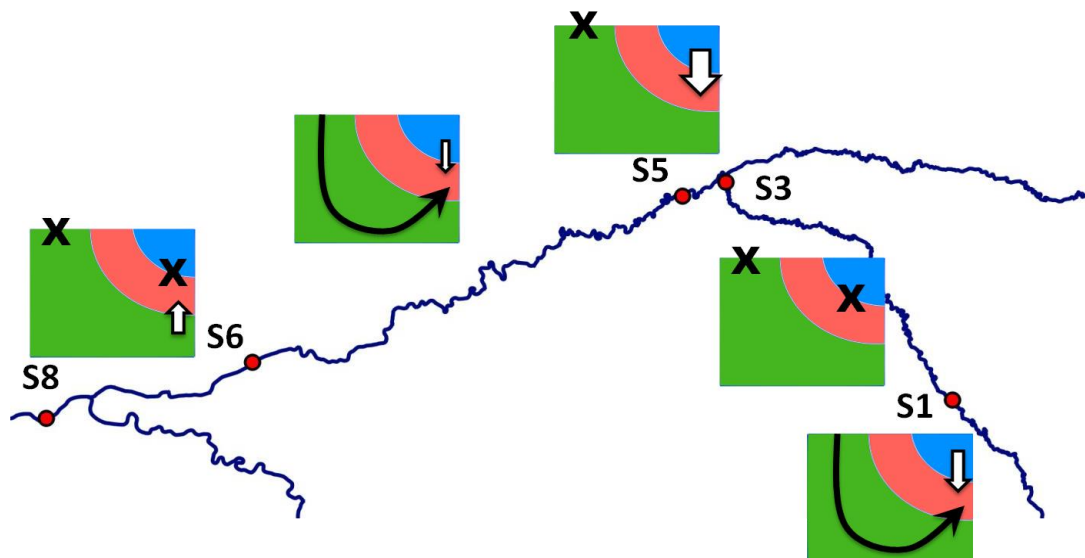


Figure 20. Synthèse du cadre de connectivité hydrologique dans la Bassée.

4.2 Bilan de réactivité

L'analyse des différents paramètres biogéochimiques montre des apports de carbone organique dissous de la surface vers les alluvions en amont de la Bassée (S1). Entre S3 et S5, de forts apports de matière organique de la Seine aux alluvions sont aussi indiqués par les valeurs de COD. Cette matière organique serait plutôt humique, comme indiqué par les valeurs de HIX. En aval de S5, les eaux souterraines semblent caractérisées par une activité hétérotrophe importante de dénitrification. Des apports de matière organique moins humique de la craie vers les alluvions sembleraient aussi avoir lieu.

5 Conclusions

Les données hydro-biogéochimiques collectées pendant la campagne de mars 2017, ainsi que les mesures du système de suivi en continu, permettent d'établir un premier cadre de fonctionnement de la plaine alluviale de la Bassée en période de crue.

En particulier, les données thermiques montrent clairement des infiltrations de la rivière aux alluvions pendant la montée de crue, ce qui confirme les résultats de modélisation de Labarthe et Flipo (2016).

La Seine semble peu réactive lors de la crue, avec notamment une matière organique assez réfractaire. En revanche, la plaine alluviale et la craie seraient le siège d'une activité hétérotrophe significative de dénitrification, favorisant l'abattement des nitrates. Cela est rendu possible par la présence de carbone organique dissous, y compris dans l'aquifère régional de la craie où cette matière organique est plutôt labile. A l'amont et à l'aval du site étudié, les paramètres géochimiques indiqueraient une connexion entre l'aquifère régional de la craie et des eaux de surface très oxygénées et chargées en nitrates.

La caractérisation de la matière organique indique des caractéristiques contrastées entre les compartiments : sources terrigènes majoritaires pour les eaux de rivière, forte activité biologique et faibles apports terrestres dans la craie, mélange des sources dans les alluvions.

La campagne de mesure a eu lieu seulement quelques heures avant le pic de crue. Il s'agit donc d'un état hydrologique très transitoire qui rend l'interprétation des données particulièrement complexe et incertaine. Par conséquent, c'est fondamentale d'acquérir plus de données dans différentes conditions hydrologiques, notamment en période de basses et moyennes eaux.

Bibliographie

- Bel, A., 2015. Projet NappStrat SN : cartographie des ressources en eau stratégiques du bassin Seine-Normandie. Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Carstea, E.M., Baker, A., Bieroza, M., Reynolds, D., 2010. Continuous fluorescence excitation–emission matrix monitoring of river organic matter. *Water Res.* 44, 5356–5366.
- Coble, P.G., Green, S.A., Blough, N.V., Gagosian, R.B., 1990. Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy. *Nature* 348, 432–435.
- Coble, P.G., 1996. Characterization of marine et terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Mar. Chem.* 51, 325–346.
- Curie, F., Ducharne, A., Bendjoudi, H., Gaillard, S., 2003. Classification et typologie fonctionnelle des zones humides riveraines à l'échelle du bassin de la Seine : élimination et rétention des nitrates. PIREN Seine.
- Fellman, J.B., Hood, E., Spencer, R.G.M., 2010. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnol. Oceanogr.* 55, 2452–2462.
- Fustec, E., Bendjoudi, H., Gaillard, S., Weng, P., Boyer, F., Boët, P., Schannen, O., Croguennec, S., Billen, G., 2001. Fonctionnement du territoire Bassée. Piren-Seine.
- Greiner, I., 1997. Analyse de la variabilité fonctionnelle de la plaine alluviale de la Seine et modélisation des transferts de nitrates.
- Guillon, S., Jézéquel, D., Flipo, N., Marmonier, P., Franquet, E., Thorel, M., Vienney, A., Oursel, B., Olivier, J.M., Bourrand, J.J., Groleau, A., 2016. Métabolisme des annexes hydrauliques des corridors hydro-écologiques - des casiers Girardon du Rhône aux gravières de la Bassée. PIREN Seine.
- Helms, J.R., Stubbins, A., Ritchie, J.D., Minor, E.C., Kieber, D.J., Mopper, K., 2008. Absorption spectral slopes et slope ratios as indicators of molecular weight, source, et photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 53, 955–969.
- Huguet, A., Vacher, L., Relexans, S., Saubusse, S., Froidefond, J.-M.J.M., Parlanti, E., 2009. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org. Geochem.* 40, 706.
- Jaffé, R., Boyer, J.N., Lu, X., Maie, N., Yang, C., Scully, N.M., Mock, S., 2004. Source characterization of dissolved organic matter in a subtropical mangrove-dominated estuary by fluorescence analysis. *Mar. Chem.* 84, 195–210.
- Labarthe, B., 2016. Quantification des échanges nappe-rivière au sein de l'hydrosystème Seine par modélisation multi-échelle.
- Labarthe, B., Flipo, N., 2016. Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. PIREN Seine.
- Labarthe, B., Flipo, N., Abasq, L., Deleplancque, B., Mouhri, A., Jost, A., Fouquet, C. de, 2014. Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée. PIREN Seine.
- Lainé, L., 2016. Petites villes en décroissance et leurs services d'eau : quelles reconfigurations ? Une appréhension dans le territoires de l'amont du bassin de la Seine. PIREN Seine.
- McKnight, D.M., Boyer, E.W., Westerhoff, P.K., Doran, P.T., Kulbe, T., Andersen, D.T., 2001. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material et aromaticity. *Limnol. Oceanogr.* 46,
- Matilainen, A., Gjessing, E.T., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A., Sillanpää, M., 2011. An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. *Chemosphere* 83, 1431–1442.
- Mouhri, A., Abasq, L., Berrhouma, A., Cuisinier, E., Gueho, Y., Jost, A., Labarthe, B., Rivière, A., Flipo, N., 2014. Mise en place du dispositif de mesure des échanges eaux de surface - eaux souterraines dans la plaine alluviale de la Bassée. PIREN Seine.
- Parlanti, E., Worz, K., Geoffroy, L., Lamotte, M., 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.
- Schanen, O., 1998. Analyse et modélisation de l'impact hydrodynamique biogéochimique des lacs de gravières sur la nappe alluviale du Val de Seine.
- Steinmann, R., Lestel, L., Dumont, A., 2016. Approche géohistorique de la Seine dans la Bassée durant les deux derniers siècles. PIREN Seine.
- Stubbins, A., Hood, E., Raymond, P. a., Aiken, G.R., Sleighter, R.L., Hernes, P.J., Butman, D., Hatcher, P.G., Striegl, R.G., Schuster, P., Abdulla, H. a. N., Vermilyea, A.W., Scott, D.T., Spencer, R.G.M.,

2012. Anthropogenic aerosols as a source of ancient dissolved organic matter in glaciers. *Nat. Geosci.* 5, 198–201.
- Tajjar, M.H., 1993. Modélisation de l'hydrodynamique des échanges nappe-rivière. Simulation d'une lachûre expérimentale en Seine en période d'étéage.
- Toth, J., 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. Geophys. Res.* 67, 4375–4387.
- Tzortziou M., Zeri C., Dimitriou E., Ding Y., Jaffé R., Anagnostou E., Pitta E., Mentzafou A., 2015. Colored dissolved organic matter dynamics et anthropogenic influences in a major transboundary river et 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. Thèse de l'Université Bordeaux 1, 255 pages.
- Wang, S., Jost, A., Labarthe, B., Flipo, N., 2016. Création du module Libwet de simulation des interactions gravières-aquifères. PIREN Seine.
- Weill, P., Deleplancque, B., Norgéot, C., 2013. Etude de faisabilité sur la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée par géoradar. PIREN Seine.
- Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B. a, Fram, M.S., Fujii, R., Mopper, K., 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition et reactivity of dissolved organic carbon. *Environ. Sci. Technol.* 37, 4702–8.
- Zsolnay, A., Baigar, E., Jimenez, M., Steinweg, B., Saccomandi, F., 1999. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* 38, 45–50.