

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

Pierre Labadie^{1*}, Nicolas Flipo² et Hélène Budzinski¹

¹ CNRS, Université de Bordeaux, UMR EPOC 5805 CNRS, Talence

² Centre de Géosciences, Mines ParisTech, PSL, Fontainebleau

* pierre.labadie@u-bordeaux.fr

Résumé

La plaine alluviale de la Bassée, située à l'amont de la confluence entre la Seine et l'Yonne, fait l'objet de nombreux projets d'aménagement et constitue un territoire à forts enjeux socio-économiques et environnementaux, associés notamment à la présence de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, des captages de la Voulzie pour l'alimentation en eau potable de la ville de Paris et de gisements de granulats. Or, malgré des travaux récents entrepris dans le cadre du PIREN-Seine, le fonctionnement hydro-biogéochimique de ce système demeure mal connu ; l'état des connaissances sur son état de contamination par les micropolluants organiques en particulier ceux d'intérêt émergent est également très peu renseigné.

Ces travaux ont donc pour objectifs i) de déterminer les niveaux de présence d'une famille de composés d'intérêt émergent, les composés fluoroalkylés (PFAS), dans les eaux de surface et souterraines de la Bassée et ii) de déterminer dans quelle mesure les niveaux et profils moléculaires de ces composés peuvent apporter des éléments complémentaires utiles à une meilleure compréhension de la dynamique hydro-biogéochimique de ce territoire.

Points clefs

- ✓ *Présence généralisée des PFAS dans les eaux superficielles et les eaux de la nappe alluviale de la Bassée*
- ✓ *Les plus fortes teneurs, notamment pour des chaînes courtes, sont observées dans les alluvions des secteurs amont de la plaine.*
- ✓ *Nécessité de mettre en place un suivi temporel pour mieux comprendre la dynamique des PFAS dans le corridor hydro-écologique*

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 (Baratelli et al., 2017). La carte géologique de cette région montre que le substrat de la plaine alluviale est constitué par la craie du Crétacé supérieur (*Figure 1*).

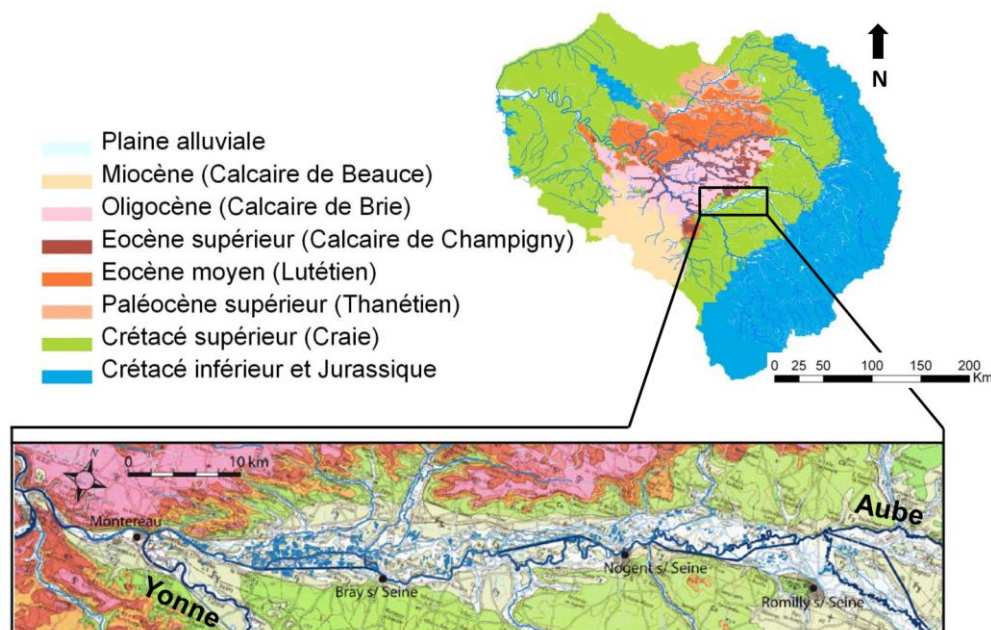


Figure 1. Localisation de la plaine alluviale de la Bassée et carte géologique (Baratelli et al., 2017)

La Bassée est une zone humide d'importance nationale du fait de sa remarquable biodiversité ; afin d'assurer sa protection, une réserve naturelle de plus de 800 ha a été créée en 2002. Cette région est également considérée comme une réserve d'eau souterraine stratégique pour la future alimentation en eau potable de l'Île-de-France. Ce territoire est étudié depuis de nombreuses années dans le cadre du PIREN-Seine. Labarthe et Flipo (2016) ont proposé une première approche par modélisation numérique du fonctionnement hydrologique ce système ; ils ont ainsi 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, grâce à la simulation des flux spirales. 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. Une première campagne multi-traceurs a permis de préciser ce fonctionnement global en période de hautes eaux, juste avant l'occurrence d'un pic de crue en mars 2017 (Baratelli et al. 2017, Flipo et al. 2018a).

La présence de micropolluants dans les eaux souterraines et la compréhension des transferts entre rivière et nappe alluviale constitue un enjeu majeur pour la gestion des ressources en eau, notamment en vue de leur utilisation pour l'irrigation ou la production d'eau potable. Or, ces ressources sont, à l'échelle globale, sous l'influence de pressions anthropiques croissantes qui peuvent se traduire la dégradation de l'état chimique ou microbiologique de ces masses d'eau (Lopez et al. 2015). La pression chimique exercée sur ce type d'environnement résulte pour partie de l'émission de composés organiques de synthèse dont certains, étudiés depuis peu, sont qualifiés de composés d'intérêt émergent (Sauvé and Desrosiers 2014).

Dans ce contexte, ce travail préliminaire vise à documenter l'état de contamination des eaux superficielles et souterraines de la Bassée par les composés fluoroalkylés (PFAS), composés encore considérés comme étant « d'intérêt émergent » et dont la présence et la dynamique dans la Seine sont étudiées depuis 2010 dans le cadre du PIREN-Seine (Labadie and Chevreuil 2011b; Munoz et al. 2018). A cet effet, des échantillons ont

été prélevés pendant la nouvelle campagne multi-traceurs de novembre 2017 visant à comprendre le fonctionnement et la réactivité de la plaine alluviale de la Bassée en basses eaux (Flipo et al. 2018b). Les PFAS ont déjà fait l'objet d'une campagne nationale pilotée par l'ANSES, qui a permis de mettre en évidence leur caractère ubiquiste dans les eaux souterraines ; en outre, au niveau national, ces composés très persistants dans l'environnement ont également pu être quantifiés dans quelques échantillons d'eau embouteillée (Le Coadou et al. 2017). Signe de l'importance que les pouvoirs publics accordent à cette famille, le PFOS (acide perfluorooctane sulfonique) est inclus dans la directive cadre sur l'eau de l'Union Européenne depuis 2013 et dans la Convention de Stockholm sur les Polluants Organiques persistants depuis 2009.

1. Système de mesure

1.1. Stratégie d'échantillonnage

Treize stations MOLONARI (MONitoring Local des échanges Nappe-Rivière) ont été installées en 2015 dans la plaine alluviale de la Bassée. 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) (Baratelli et al., 2017).

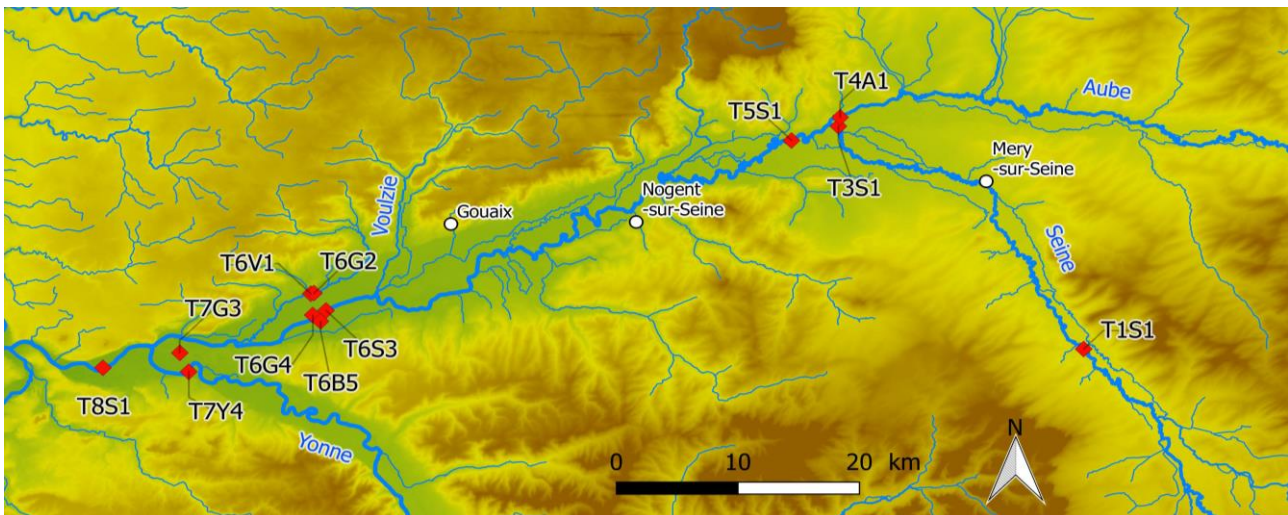


Figure 2. Localisation des stations MOLONARI dans la Bassée.

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. Aux 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 (Baratelli et al., 2017).

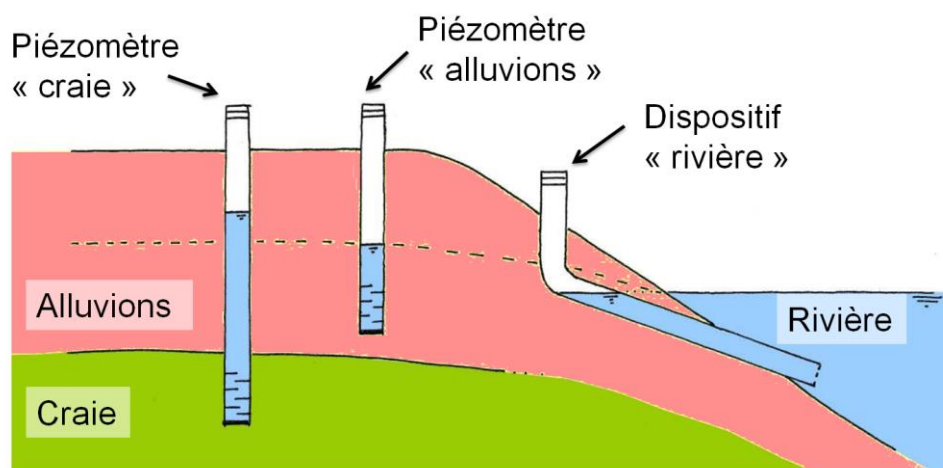


Figure 3. Schéma d'une station MOLONARI.

1.2. Concentration en PFAS dissous

Tableau 1. PFAS ciblés dans cette étude (*prise en compte des isomères ramifiés du PFOS (R-PFOS) et de l'isomère linéaire L-PFOS)

	Acides carboxyliques	Formule	$n_{\text{perfluoroC}}$
PFPeA	Acide perfluoropentanoïque	C_4F_9COOH	4
PFHxA	Acide perfluorohexanoïque	$C_5F_{11}COOH$	5
PFHpA	Acide perfluoroheptanoïque	$C_6F_{13}COOH$	6
PFOA	Acide perfluorooctanoïque	$C_7F_{15}COOH$	7
PFNA	Acide perfluorononanoïque	$C_8F_{17}COOH$	8
PFDA	Acide perfluorodécanoïque	$C_9F_{19}COOH$	9
	Sulfonates		
PFBS	Perfluorobutane sulfonique	$C_4F_9SO_3H$	4
PFHxS	Perfluorohexane sulfonique	$C_6F_{13}SO_3H$	6
PFHpS	Perfluoroheptane sulfonique	$C_7F_{15}SO_3H$	7
PFOS*	Perfluorooctane sulfonique	$C_8F_{17}SO_3H$	8
PFDS	Perfluorodécane sulfonique	$C_{10}F_{21}SO_3H$	10
4:2 FTSA	Acide 4 :2 fluorotélomère sulfonique	$C_6H_4F_9SO_3H$	4
6:2 FTSA	Acide 6 :2 fluorotélomère sulfonique	$C_8H_4F_{13}SO_3H$	6
8:2 FTSA	Acide 8:2 fluorotélomèresulfonique	$C_{10}H_4F_{17}SO_3H$	8
	Précurseurs du PFOS		
FOSA	Perfluorooctane sulfonamide	$C_8F_{17}SO_2NH_2$	8

Les concentrations en PFAS dissous ont été mesurés, après filtration sur filtre GF/F pyrolysé, par extraction sur phase solide (Oasis HLB) couplée en ligne à la chromatographie liquide et à la spectrométrie de masse en tandem (adapté de Munoz et al. 2017). Quatorze analytes ont été ciblés (Tableau 1) : 6 acides carboxyliques (C_5 – C_{10}), 4 acides sulfoniques (C_4 – C_8), 3 acides fluorotélomères sulfoniques (4:2 FTSA, 6:2 FTSA et 8:2 FTSA) et un sulfonamide (FOSA) (Tableau 1). La quantification de ces analytes a été réalisée par dilution isotopique et différents contrôle qualité ont été mis en œuvre, notamment l'analyse de répliqués de blancs méthodologiques et l'estimation de la fidélité sur eau minérale supplémentée à 1 ng L^{-1} .

Pour les composés détectés dans les blancs, la limite de quantification (LOR) a été définie de la manière suivante :

$$\text{LOR} = \sigma_b \times t_{n-1,95}$$

où σ_b est l'écart-type sur le blanc moyen et $t_{n-1,95}$ est le coefficient de Student (risque de 5 %, n réplicats). Pour les autres composés, la limite de détection est classiquement définie comme la concentration donnant un rapport signal / bruit égale à trois.

2. Le contexte hydrologique de la campagne de mesure

La campagne s'est déroulée sur trois jours, entre les 22 et 24 novembre 2017, en conditions de basses eaux.

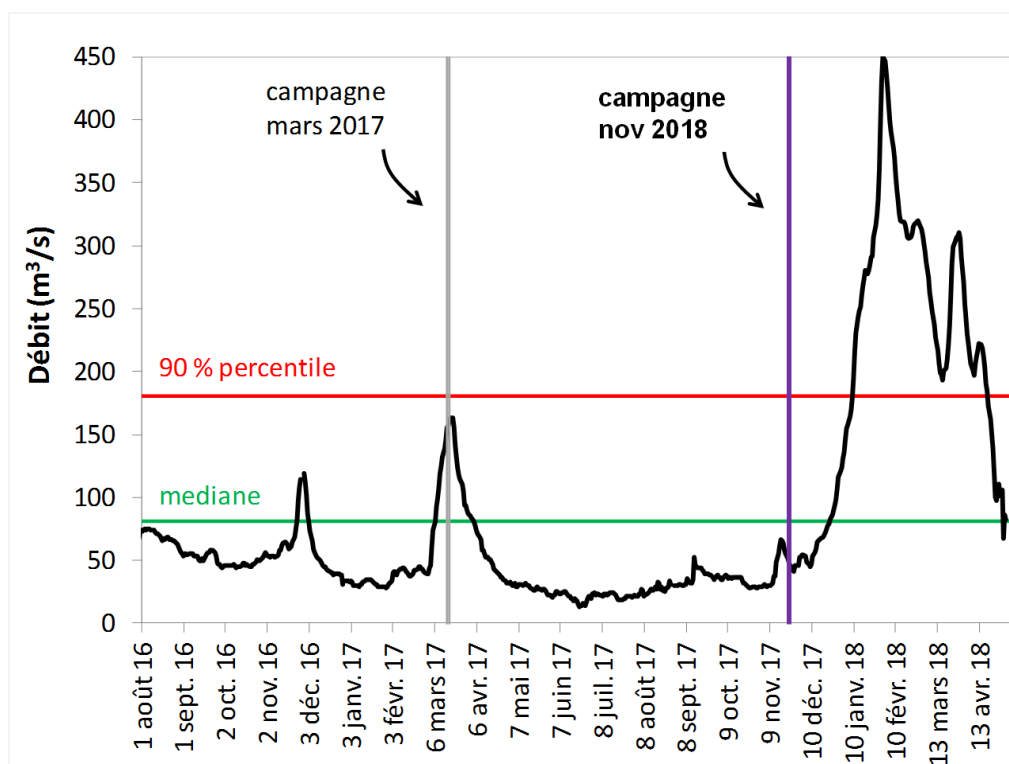


Figure 4. Débit à la station de Bazoches-lès-Bray. La médiane et le 90% percentile, calculés sur la période 1999-2017, sont montrés (<http://www.hydro.eaufrance.fr>). La période de la campagne est soulignée en bleu clair.

3. Niveaux et profils moléculaire des PFAS

Les résultats des analyses de PFAS dissous (Tableau 2) mettent en évidence le caractère ubiquiste de ces composés dans la Bassée. En effet, à l'exception de quatre PFAS jamais détectés, la fréquence de détection des autres analytes est comprise entre 3 et 97 %.

Les niveaux totaux de PFAS dissous (Σ PFAS) observés dans les eaux de surface sont compris entre 0,7 et 18 ng L⁻¹ (médiane : 4,7) et, bien que variables, sont cohérents avec ceux observés précédemment sur ce secteur de l'axe fluvial en 2011–2012 (Munoz et al., 2018). Les niveaux des carboxylates à chaîne courte (ex : PFPeA ou PFHxA) sont cependant plus élevés que ceux mesurés lors des campagnes précédentes, ce qui pourrait s'expliquer par l'évolution des usages industriels vers des composés de ce type, moins bioaccumulables (Wang et al. 2013).

Les niveaux totaux observés dans la nappe alluviale sont compris entre 5,2 et 81 ng L⁻¹ (médiane : 13,0) tandis que ceux observés dans la nappe de la craie varient entre 0,8 et 17 ng L⁻¹ (médiane : 5,3). Ces niveaux sont du même ordre de grandeur que ceux observés au niveau national par Boiteux et al. (2012). Les niveaux individuels de certains composés à chaîne courte tels le PFPeA ou le PFHxA semblent cependant plus élevés que ceux observés dans cette dernière étude, notamment dans le secteur amont de la Bassée. Pour ces deux composés, les concentrations dissoutes dans les eaux souterraines sont aussi nettement plus élevées que celles déterminées précédemment dans la Seine sur le secteur de Marnay-sur-Seine (Munoz et al., 2018). On notera toutefois que, pour l'ensemble des analytes, les concentrations déterminées dans ces échantillons se sont avérées être systématiquement inférieures aux valeurs sanitaires maximales (0,075 – 960 µg L⁻¹) récemment définies pour les PFAS dans les eaux destinées à la consommation humaine (ANSES, 2017).

Tableau 2. Concentrations dissoutes des PFAS dans les échantillons d'eau superficielles (e) et souterraine (a : nappe alluviale, c : craie) de la Bassée.

Station	PFFA	4:2 FTS	PFHxA	PFBS	PFHpA	6:2 FTS	PFOA	PFHxS	PFNA	PFHpS	PFDA	Br- PFOS	L- PFOS	FOSA	Somme
T1S1a	63,84	< 0,20	12,16	0,32	2,64	< 0,10	0,92	0,23	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,38	0,18	< 0,10	80,7
T1S1c	9,08	< 0,20	2,42	< 0,30	0,82	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	12,3
T1S1e	10,65	< 0,20	3,26	< 0,30	1,38	< 0,10	0,86	0,69	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,12	0,73	< 0,10	18,7
T3S1a	14,61	< 0,20	8,87	0,56	3,56	< 0,10	3,28	1,00	0,92	< 0,10	< 0,42	1,77	11,09	< 0,10	45,6
T3S1c	4,14	< 0,20	1,30	< 0,30	< 0,13	< 0,10	0,42	0,66	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,97	1,54	< 0,10	9,0
T3S1e	1,63	< 0,20	1,12	< 0,30	0,46	< 0,10	0,49	0,74	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,66	0,59	< 0,10	5,7
T4A1a	36,49	< 0,20	9,91	0,43	4,72	< 0,10	2,64	1,18	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,08	< 0,10	< 0,10	56,5
T4A1c	1,31	< 0,20	< 0,52	0,48	< 0,13	< 0,10	0,62	0,98	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,89	< 0,10	< 0,10	5,3
T4A1e	1,65	< 0,20	0,52	0,58	0,45	< 0,10	0,35	0,35	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	0,25	< 0,10	4,2
T5S1a	6,35	< 0,20	1,83	0,50	1,05	< 0,10	< 0,30	1,32	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,37	< 0,10	< 0,10	12,4
T5S1c	0,56	< 0,20	< 0,52	0,33	< 0,13	< 0,10	< 0,30	1,00	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,14	0,16	< 0,10	3,2
T5S1e	0,97	< 0,20	0,53	< 0,30	< 0,13	< 0,10	< 0,30	0,35	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,58	0,27	< 0,10	2,7
T6V1a	5,67	< 0,20	1,23	< 0,30	0,31	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	7,2
T6V1e	1,95	< 0,20	0,60	< 0,30	< 0,13	< 0,10	< 0,30	0,58	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,30	0,14	< 0,10	3,6
T6B5a	9,65	< 0,20	1,68	< 0,30	0,56	< 0,10	< 0,30	0,32	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,23	< 0,10	< 0,10	12,4
T6B5e	1,29	< 0,20	< 0,52	< 0,30	0,24	< 0,10	< 0,30	0,27	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,53	0,13	< 0,10	2,5
T6S3a	8,59	< 0,20	1,53	0,50	0,42	< 0,10	< 0,30	0,55	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,86	0,50	< 0,10	13,0
T6S3c	15,88	< 0,20	< 0,52	< 0,30	< 0,13	< 0,10	< 0,30	0,14	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,73	< 0,10	< 0,10	16,8
T6S3e	1,23	< 0,20	0,75	< 0,30	0,63	< 0,10	< 0,30	0,80	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,87	0,40	< 0,10	4,70
T6G2a	6,29	< 0,20	2,26	< 0,30	1,25	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	9,8
TG62c	0,80	< 0,20	< 0,52	< 0,30	< 0,13	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	0,8
T6G2e	< 0,51	< 0,20	< 0,52	< 0,30	0,47	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,13	0,12	< 0,10	0,7
T7G3a	6,15	< 0,20	2,18	0,80	0,57	< 0,10	< 0,30	1,94	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,56	0,15	< 0,10	13,3
T7G3e	2,04	< 0,20	1,13	0,40	1,62	< 0,10	< 0,30	0,67	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,63	0,33	< 0,10	6,8
T7Y4a	3,55	< 0,20	0,86	< 0,30	< 0,13	< 0,10	< 0,30	0,74	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	5,2
T7Y4e	2,07	< 0,20	1,02	< 0,30	0,68	0,32	< 0,30	0,81	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,18	1,31	< 0,10	7,5
T8S1a	17,30	< 0,20	3,31	< 0,30	1,30	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	0,25	0,15	< 0,10	22,3
T8S1c	1,01	< 0,20	< 0,52	< 0,30	0,14	< 0,10	< 0,30	< 0,13	< 0,70	< 0,10	< 0,42	< 0,10	< 0,10	< 0,10	1,2
T8S1e	3,07	< 0,20	1,10	< 0,30	0,33	0,22	0,81	0,93	< 0,70	< 0,10	< 0,42	1,25	0,70	< 0,10	8,4

Le profil moléculaire est dominé par les acides carboxyliques à courte chaîne fluoroalkylée ($< C_8$) et les isomères du PFOS ; ce profil est globalement cohérent avec celui observé précédemment dans les eaux de surface sur ce secteur (Munoz et al., 2018) et avec les observations de Boiteux et al. (2012) pour les eaux souterraines au niveau national, même si l'abondance relative du PFPeA et du PFHxA est particulièrement élevée dans la majorité des échantillons. Par ailleurs, l'abondance relative du PFPeA est significativement plus importante dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface, ce qui serait cohérent avec le fait que le coefficient de partage dissous/particulaire (K_D) diminue avec la longueur de chaîne fluoroalkylée (Labadie and Chevreuil 2011a) ; aucune différence n'est cependant observée pour les autres composés.

Les concentrations dans les eaux alluviales sont quasi-systématiquement plus élevées que celles observées sur les mêmes sites dans les eaux de surface et dans la nappe de la craie ; lorsque l'ensemble des sites est considéré, une différence significative est mise en évidence entre nappe alluviale et eaux de surface ou nappe de la craie (test de Student apparié, seuil de significativité fixé à 0,05). En outre, si l'on se focalise sur les sites « Seine », trois cas de figure peuvent être distingués :

- \sum PFAS nappe alluviale $>$ surface \geq craie (T1, 3, 4 et 5 : secteur amont)
- \sum PFAS proche entre eau de surface et nappe alluviale (T6, pas de données pour la nappe de la craie)
- \sum PFAS nappe alluviale \geq surface \gg craie (T6, 7 et 8 : secteur aval)

Ces résultats peuvent sans doute être partiellement expliqués par les différences spatiales de connectivité hydrologique entre les compartiments eaux de surface–nappe alluviale–nappe de la craie. Néanmoins, le fait que les concentrations les plus élevées soient observées dans la nappe alluviale, en particulier dans le secteur amont, pose la question de la constitution d'un stock de PFAS dans ce compartiment ; ce stock pourrait inclure des composés non identifiés précurseurs des PFAS ciblés dans cette étude préliminaire, dont les temps de demi-vie varient de quelques jours à plusieurs mois ou années, et dont la biotransformation est susceptible de générer des acides carboxyliques et sulfoniques perfluoroalkylés (Liu and Mejia Avendaño, 2013).

Conclusions

Ces travaux très préliminaires ont mis en évidence la présence généralisée des PFAS dans les eaux superficielles et souterraines de la Bassée, à des niveaux inférieurs aux valeurs sanitaires maximales définies par l'ANSES. Les concentrations (et abondance relative) élevées des acides carboxyliques à chaîne courte, en particulier sur le secteur amont, traduisent potentiellement l'existence d'un stock de PFAS dans ce compartiment qui devra être caractérisé. L'absence apparente de fractionnement moléculaire entre les compartiments pourrait être liée à la connectivité hydrologique de la zone et ce point mérite d'être approfondi en croisant les données acquises sur les PFAS avec d'autres données (physiques ou biogéochimiques) acquises sur cette zone d'étude (Flipo et al. 2018b).

Au vu de ces premiers résultats, il semble pertinent de poursuivre les campagnes d'analyses portant sur les PFAS dans cette zone pour mieux comprendre leur dynamique de transfert; outre des campagnes intensives telle que celle qui fait l'objet du présent rapport, un suivi temporel basse fréquence (bimestrielle) permettrait de poursuivre l'acquisition de données dans une logique d'observation. On peut également envisager d'étendre le spectre des analyses à d'autres familles de micropolluants dont la présence sur l'axe fluvial à l'amont de Paris a déjà été mise en évidence (ex : pesticides ou composés pharmaceutiques) et dont l'étude apporterait des éléments de connaissance complémentaires, tant sur la qualité chimique que sur la dynamique hydro-biogéochimique de la Bassée. Ce suivi temporel permettrait également de mieux comprendre les stocks de PFAS qui semblent se créer dans les plaines alluviales amont.

Bibliographie

ANSES (2017). Avis relatif à l'évaluation des risques sanitaires d'alkyls per- et polyfluorés dans les eaux destinées à la consommation humaine

Baratelli, F., E. Parlanti, G., Varrault, M., Sourzac, J.-M., Mouchel, S., Mohamed, A., Jost, A., S. Rivière Guillon, and N. Flipo (2017). Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la Bassée en période de crue. . PIREN Seine.

Boiteux, V., Dauchy, X., Rosin, C., Boiteux, J.F.V. (2012). National screening study on 10 perfluorinated compounds in raw and treated tap water in France. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 63:1–12

Flipo, N., F. Baratelli, E. Parlanti, S. Guillon, G. Varrault, A. Jost, M. Sourzac, A. Rivière, and J.-M. Mouchel (2018a). Caractérisation hydro-géochimique d'une plaine alluviale en période de crue : cas de la Bassée – Hydro-geochemical characterization of an alluvial plain during flood: case study of la Bassée. Pages 1–4.

Flipo, N., F. Baratelli, E. Parlanti, G. Varrault, S. Guillon, M. Sourzac, and J.-M. Mouchel (2018b). Caractérisation hydro-géochimique de la plaine de la Bassée en période d'été. . PIREN Seine.

Labadie, P., Chevreuil, M. (2011a). Partitioning behaviour of perfluorinated alkyl contaminants between water, sediment and fish in the Orge River (nearby Paris, France). *Environmental Pollution* 159:391–397.

Labadie, P., Chevreuil, M. (2011b). Biogeochemical dynamics of perfluorinated alkyl acids and sulfonates in the River Seine (Paris, France) under contrasting hydrological conditions. *Environ Pollut* 159:3634–3639

Labarthe, B., Flipo, N. (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. PIREN Seine.

Le Coadou, L., Le Ménach, K., Labadie, P., Dévier, M-H, Pardon, P., Augagneur, S., Budzinski, H. (2017). Quality survey of natural mineral water and spring water sold in France: Monitoring of hormones, pharmaceuticals, pesticides, perfluoroalkyl substances, phthalates, and alkylphenols at the ultra-trace level. *Science of The Total Environment* 603–604:651–662.

Liu, J., Mejia Avendaño, S. (2013). Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environment International* 61:98–114.

Lopez, B., Ollivier, P., Togola, A., Baran, N., Ghestem, J-P. (2015). Screening of French groundwater for regulated and emerging contaminants. *Sci Total Environ* 518–519:562–573.

Munoz, G., Fechner, L.C., Geneste, E., Pardon, P., Budzinski, H., Labadie, P. (2018). Spatio-temporal dynamics of per and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and transfer to periphytic biofilm in an urban river: case-study on the River Seine. *Environmental Science and Pollution Research* 25:23574–23582

Munoz, G., Labadie, P., Geneste, E., Pardon, P., Tartu, S., Chastel, O., Budzinski, H. (2017). Biomonitoring of fluoroalkylated substances in Antarctica seabird plasma: Development and validation of a fast and rugged method using on-line concentration liquid chromatography tandem mass spectrometry. *J Chromatogr A* 1:107–117

Sauvé, S., Desrosiers, M. (2014). A review of what is an emerging contaminant. *Chemistry Central Journal* 8:15

Wang, Z., Cousins, I.T., Scheringer, M., Hungerbühler, K. (2013). Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs), perfluoroalkane sulfonic acids (PFASs) and their potential precursors. *Environment International* 60:242–248.