

## **Archives sédimentaires : à la recherche de nouveaux sites de carottage pour reconstruire l'histoire de la contamination de la Seine**

Sophie Ayrault<sup>1,\*</sup>, Olivier Evrard<sup>1</sup>, Anthony Foucher<sup>1</sup>, Irène Lefèvre<sup>1</sup>, Elie Dhivert<sup>2</sup>,  
Laurence Lestel<sup>3</sup>, Thomas Thiébault<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Université Paris Saclay (CEA-CNRS-UVSQ), UMR 8212, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup> Laboratoire Géo-hydrosystèmes continentaux (GÉHCO), Université de Tours, EA 6293, Tours

<sup>3</sup> Sorbonne Université-CNRS-EPHE, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

\* sophie.ayrault@lsce.ipsl.fr

### **Résumé**

*Dans le cadre de l'action « Archives sédimentaires : reconstruire les trajectoires temporelles des contaminants », nous avons procédé en 2020, (1) à la recherche d'un site propice à la conservation d'archives sédimentaires en amont, et (2) en aval du bassin, à de nouveaux carottages dans la zone de Bouafles (perturbée par un labour récent, comme nous le montrons dans le présent rapport). Sur la base d'un travail cartographique (cartes historiques pour documenter les modifications de la morphologie du cours d'eau, cartes actuelles pour repérer les zones inondables, photographies permettant de matérialiser modifications et inondations, interviews des acteurs locaux...), trois campagnes de terrain ont permis d'explorer les deux lieux de collecte repérés comme propices au dépôt et à la conservation de ces archives. Le premier est situé en amont de la métropole parisienne. Il devrait permettre d'obtenir la contribution de l'amont du bassin à la contamination historique de la Seine. Le second site exploré dans la zone aval du bassin remplace le site de Bouafles où les terres ont été récemment retournées. Les archives ainsi collectées sont ensuite conditionnées pour être soumises à des analyses de spectrométrie gamma (datation au Cs-137, Pb-210 en excès) pour évaluer leur aptitude à produire des données datées et, si c'est le cas, la fenêtre temporelle qu'elles permettent d'observer. Les premières observations montrent une sédimentation laminée, continue et régulière, pouvant potentiellement avoir enregistré les contaminations d'une grande partie du XX<sup>ème</sup> siècle. Ces carottes devraient également être utilisées pour la recherche de contaminations plus récentes comme la contamination par les microplastiques et celle des polluants émergents.*

### **Points clefs**

- ✓ *Un travail cartographique a permis de repérer deux sites propices à la collecte de nouvelles archives sédimentaires.*
- ✓ *Situé en amont de la métropole parisienne, le site de Boissise-le-Roi devrait permettre d'obtenir la contribution à la contamination de l'amont du bassin.*
- ✓ *En aval, des sites explorés autour du site de Bouafles ont permis de collecter deux carottes dont la datation est en cours.*

## Abstract

In the framework of the action "Sedimentary archives: reconstructing the temporal trajectories of contaminants", we proceeded in 2020, (1) to the search of a suitable site for the conservation of sedimentary archives in upper catchment parts and, (2) in lower parts, to the identification of a new coring site in the Bouafles area (disturbed by recent ploughing, as shown in this report). On the basis of a cartographic work (historical maps to document the modifications of the morphology of the river, current maps to locate the flooding zones, photographs allowing to reconstruct modifications and floods, interviews of the local inhabitants, ...), three field campaigns allowed to explore two collection sites identified as suitable for the deposition and conservation of these archives. The first site is located upstream of the Parisian metropolis. It should make it possible to reconstruct the contribution of the upper parts of the catchment to the historical contamination of the Seine River. The second site explored in the downstream zone of the basin may provide an alternative to the Bouafles site where the land was recently ploughed. The sediment was then prepared to be analysed by gamma spectrometry (for dating with Cs-137 and excess Pb-210 activities) to check the potential to date these archives and, if so, to determine to corresponding time window. The first observations show layered sedimentation and slow sedimentary filling, potentially having recorded contamination for most of the 20th century. However, these cores should also be used to search for more recent contamination sources such as microplastics and emerging pollutants.

## Key points

- ✓ Cartographic work has identified two suitable sites for the collection of new sedimentary archives.
- ✓ Located upstream of the Parisian metropolis, the Boissise-le-Roi site should make it possible to reconstruct the contribution of the contamination from upper catchment parts.
- ✓ In lower parts, sites explored around the Bouafles site have enabled the collection of two cores, which are currently being dated.

## Introduction

La caractérisation de la contamination passée via l'analyse des archives sédimentaires du bassin a prouvé son efficacité pour reconstruire les trajectoires temporelles des contaminations. L'action « Archives sédimentaires : reconstruire les trajectoires temporelles des contaminants » coordonnée par le LSCE et mettant en synergie des partenaires experts dans des disciplines variées telles que l'histoire des techniques, la sédimentologie, la chimie analytique etc., a pour objectif de comprendre les trajectoires temporelles des contaminants organiques et inorganiques en s'appuyant sur des archives sédimentaires. En effet, les activités anthropiques génèrent des flux importants de contaminants de différentes natures, dont l'ampleur a varié au cours du temps. Depuis 2004, le PIREN-Seine développe une étude au long cours visant à retracer les activités anthropiques (y compris les changements technologiques, les évolutions de la réglementation, la mise en place des traitements des eaux usées...) à partir des signaux enregistrés dans les sédiments stockés dans des réservoirs ou des plaines d'inondation.

Plusieurs indicateurs sont suivis avec des objectifs différents. Tout d'abord, l'analyse des contaminants organiques tels que les produits pharmaceutiques, les microplastiques et les marqueurs fécaux permettent de retracer les usages ainsi que l'évolution des réseaux d'assainissement au cours du temps. D'autres marqueurs, tels les chloroalcanes, les composés perfluorés et les phtalates, permettent principalement de retracer l'évolution des usages et de leur réglementation dans la sphère industrielle. L'étude des trajectoires, à l'échelle du bassin et du dernier siècle, des contaminants inorganiques, tel l'antimoine, et des contaminants organiques déjà bien documentés (HAP, PCB, alkylphénols, PBDE) nécessite de boucler le bilan des apports atmosphériques enregistrés par des carottes prélevées à l'amont du bassin. Enfin, dans l'objectif de ne pas se

restreindre à une liste limitée de contaminants, une analyse non-ciblée sera réalisée à titre exploratoire et pourra permettre i) d'identifier des familles de contaminants pertinentes mais non ciblées initialement et ii) de réaliser a posteriori une analyse rétrospective si de nouvelles problématiques/régulations apparaissaient à l'avenir.

Outre l'objectif d'élargir notre panel de traceurs, l'exploration de la dynamique temporelle et spatiale des communautés microbiennes via l'analyse du patrimoine génétique des micro-organismes est également engagée. Ces actions nécessitent l'acquisition de nouveaux échantillons sur les sites déjà explorés – car les quantités de matière conservées et les méthodes de conservation ne sont pas compatibles avec les précautions nécessaires pour les analyses des ressources génétiques. Toutefois, cela nécessite que les sites déjà explorés et validés soient encore disponibles pour le prélèvement de nouvelles archives. Par ailleurs, l'objectif d'enrichir notre vision amont-aval du transfert des contaminants nécessite l'acquisition de nouvelles carottes dans la partie amont du bassin.

Aussi, nous avons procédé en 2020, en dépit des difficultés posées par la crise sanitaire en cours, aux travaux de terrain suivants : (1) la recherche d'un site propice à la conservation d'archives sédimentaires en amont, et (2) en aval du bassin, de nouveaux carottages dans la zone de Bouafles (perturbée par un labour récent). La première étape de cette quête consiste en la recherche de sites propices à des sédimentations non perturbées sur la base d'un travail cartographique (cartes historiques pour documenter les modifications de la morphologie du cours d'eau, cartes actuelles pour repérer les zones inondables, photographies permettant de matérialiser modifications et inondations, interviews des locaux, etc.). La seconde étape consiste à explorer sur le terrain les lieux de collecte repérés comme propices au dépôt de ces archives. Ceci peut nécessiter plusieurs missions sur site, en fonction des caractéristiques du site (accès, matériel à transporter, etc.). Les archives ainsi collectées sont ensuite conditionnées pour être soumises à des analyses de spectrométrie gamma (datation au Cs-137, Pb-210 en excès) pour évaluer leur aptitude à produire des données datées et, si c'est le cas, la fenêtre temporelle qu'elles permettent d'observer.

## 1. Site amont

Pour obtenir une meilleure représentativité du bassin versant que celle permise par le site de Chauny sur l'Oise amont (très marqué par la Manufacture des Verres de Saint-Gobain) ou celui de Troyes (ne permettant de remonter qu'à 1970) (Ayrault et al., 2000), nous avons recherché un nouveau site sur la Seine, en amont de la métropole parisienne.

Le site de la prairie Malécot, situé sur la commune de Boissise-le-Roi, repéré grâce au travail cartographique entrepris en 2011 au sein du PIREN-Seine (Alexandre, 2012, Lestel et al, 2019), est situé en aval de Melun. La prairie de Malécot semble déjà rattachée aux berges avant la carte d'Etat-Major de 1840 et celle réalisée avant travaux datant de la même période (Figure 1). Le site de la prairie Malécot fait face au lieu-dit Beaulieu, sur la commune de Boissise-la-Bertrand en rive droite.



Figure 1. Beaulieu vers 1840, avant travaux sur la Seine. Source : AN/CP/F/14/10078 ; carte probablement de la main de l'ingénieur Chanoine (vers 1840)

En 1992, sous la houlette du Département de Seine-et-Marne, l'espace naturel sensible de la prairie Malécot est créé puis étendu en 1993, afin de garantir le maintien d'un site préservé en bordure de Seine, à proximité du centre ancien de Boissise-le-Roi. Ce site périurbain, associé à la vallée de la Seine, fait partie de la Réserve de Biosphère de Fontainebleau et du Gâtinais, classée par l'UNESCO au patrimoine mondial des sites naturels en novembre 1998. Situé au nord-est de Boissise-le-Roi, sur le Plateau de la Brie, il s'étend en rive gauche de la Seine sur un peu plus d'un kilomètre. Les plans du XV<sup>ème</sup> et du XVIII<sup>ème</sup> siècles représentent la prairie Malécot comme une île. Ce n'est que sur le cadastre napoléonien, datant du XIX<sup>ème</sup> siècle, qu'elle apparaît sous sa forme contemporaine. Le site comprend une prairie d'environ quatre hectares située entre le fleuve et l'étang (Fig. 2). Ce dernier est alimenté par le ru de la mare aux Evées, provenant d'un bassin artificiel. De plus, une buse, probablement en hautes eaux, connecte la Seine et l'étang. Aménagée au XIX<sup>ème</sup> siècle, afin d'assécher cette vaste zone marécageuse, la prairie Malécot constitue une zone humide particulièrement intéressante en termes d'expansion des crues, d'épuration des eaux de ruissellement ou encore d'habitat naturel. Une partie de la prairie est pâturée, le reste étant géré avec parcimonie pour préserver la faune et la flore.



Figure 2. Plan de situation du site de la prairie Malécot. © Elie Dhivert

### 1.1. Campagne du 26 février 2020

La première étape de cette campagne fut une observation de l'ensemble du site qui nous a permis d'identifier une zone propice, non pâturée, situé au nord-ouest de la prairie. Le site se trouve à proximité de l'étang (Figure 3). Lorsqu'on vient de la zone aménagée par le chemin de halage, on voit que la berge (côté Seine) est attaquée, sans doute par de gros débits. Il n'est pas évident que la Seine déborde en dehors de crues exceptionnelles. En revanche, côté étang, les débordements doivent être plus fréquents. Le jour de la visite, au niveau du site, l'eau du bras affleure la prairie. Le niveau de la Seine est à environ 1 mètre sous le niveau de la prairie.

A la tarière Eijkelkamp, 5 fois 20 cm de matériel fin et homogène, veiné d'oxydes pour les premiers 20 cm, ont été extraits. Le sol au moment du prélèvement était souple, non caillouteux et couvert d'herbes rases. Les 3 premières séquences de 20 cm ont été conservées et disposées bout à bout dans une chemise en PVC (Figure 3). La compaction lors du transfert des séquences a conduit à un tronçon de ~35 cm, sur lequel ont été découpés trois tronçons de 5 cm en haut, en bas et au milieu. Le profil Cs-137 de ces trois tronçons ont montré (1) qu'on détecte bien un signal de Cs-137, et (2) que ce signal est variable entre les 3 tronçons. Ajoutées à l'homogénéité visible du matériel déposé, ces informations ont motivé un second prélèvement.



Figure 3. Site de carottage à Boissise-le-Roi et carotte 77-BOI-01 (26 février 2020).  
© Sophie Ayrault

## 1.2. Campagne du 4 mars 2020

### 1.2.1. Carottage

Le 4 mars 2020, le site était sous 10 cm d'eau. Des passants nous ont informés que ce site est inondé à chaque montée de la Seine, au moins une fois par hiver, déposant « 10 cm de vase » à chaque fois. L'eau vient de l'amont « du terrain de boule ». Ils nous ont indiqué de « faire attention à la vase qui est épaisse, au moins 1 mètre, à l'endroit où nous sommes ».

La carotte 77-BOI-02, mesurant 50 cm, est prélevée avec un tube en polycarbonate de diamètre 9 cm à l'endroit du premier carottage 77-BOI-01 repéré grâce aux arbres (Figure 4 à gauche). Une seconde carotte est prélevée en s'avançant d'un mètre en s'éloignant de la berge. La carotte 77-BOI-03 mesure 80 cm (Figure 4 à droite). Le tube en polycarbonate est enfoncé manuellement. Des difficultés à ressortir le tube du sol souple et gorgé d'eau sont observées.



Figure 4. Prélèvements de carottes (le 4 mars 2020 à Boissise-le-Roi). A gauche : 77-BOI-0 ; à droite : 77-BOI-03. © Sophie Ayrault

### 1.2.2. Datations

Les deux carottes 77-BOI-02 et 77-BOI-03 ont été découpées en tranches de 2 cm d'épaisseur. Le matériel a été conditionné pour être analysé en spectrométrie gamma afin d'établir un profil de datation (Le Cloarec et al. 2011).

Sur les deux carottes, un pic de césium-137 est observé vers 25 cm de profondeur (Figure 5). La présence d'Am-241 confirmée au niveau du pic de Cs-137 (et ce, pour les deux carottes), révèle qu'il s'agit bien du pic des essais nucléaires de 1963. L'absence du pic dû aux retombées de l'accident de Tchernobyl est due à l'absence de pluies dans la zone amont du bassin de la Seine au moment de l'évènement (Meusburger et al. 2020). Cette observation avait déjà été faite pour le site de Pannecières à l'amont du bassin. Le Pb-210 en

excès ne semble pas présenter de décroissance continue tout au long du profil, ce qui est fréquent dans ce type d'environnement sédimentaire. On peut aussi faire l'hypothèse de la contribution d'une proportion significative de matière de subsurface (berges) au sein du matériel accumulé dans les carottes, hypothèse qui reste à valider.

Le pic de 1963 serait identifié à ~25 cm pour les deux carottes, ce qui indiquerait un faible taux de sédimentation, également à confirmer. Il est à noter que la forme du pic de Cs-137 attribué à 1963 est différente pour les deux carottes prélevées le 4 mars.

Les mesures de spectrométrie gamma donnent accès aux teneurs en potassium (K) et en thorium (Th) qui sont des indices de la texture du dépôt. Si les concentrations en K et Th plus élevées indiquent que les sédiments du bas de la carotte BOI03 semblent plus fins/argileux que le reste de la carotte, les teneurs en K et Th dans la carotte BOI02 sont très homogènes, indiquant un dépôt de texture constante, favorable aux études de reconstruction temporelle.

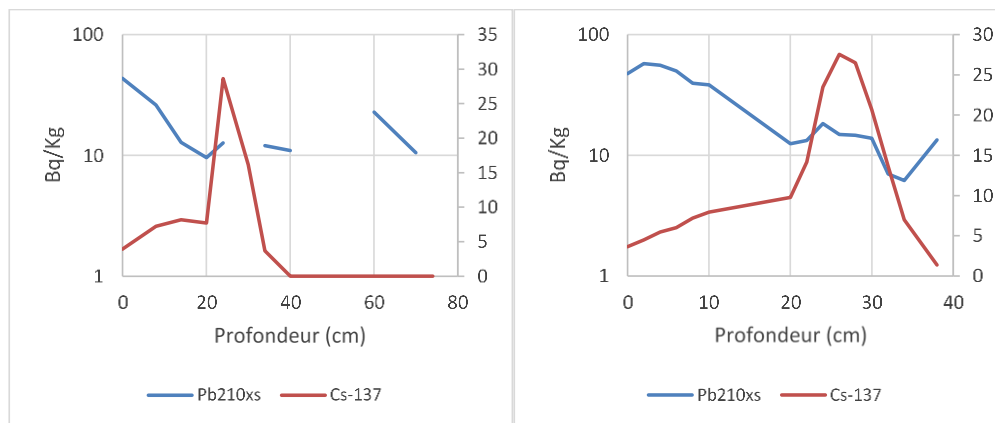


Figure 5. Profil de datation des carottes 77-BOI-02 (à gauche) et 77-BOI-03 (à droite). Profil de la concentration en Cs-137 (en rouge, axe vertical de gauche) et en Pb-210 en excès (en bleu, axe vertical de droite).

## 2. Site aval

Le site de Bouafles, dans la partie aval du bassin, a été intensément étudié et a fourni 12 carottes entre 2003 et 2010, qui ont été utilisées dans de multiples études de reconstruction des trajectoires des contaminants (Ayrault et al. 2020 ; Ayrault et al. 2012; Ayrault et al. 2010 ; Lorgeoux et al. 2016 ; Le Cloarec et al. 2011 ; Tamtam et al. 2011). Malheureusement, en 2016, lors d'une visite du site pour collecter des laisses de la crue exceptionnelle de 2016, nous avons constaté le labour de la parcelle située au bout de la Grande Ile. Des arbres ont été arrachés, et il est probable que des travaux d'aplanissement aient été menés. En première intention, quatre carottes ont été réalisées en 4 lieux du site qui paraissaient les plus préservés, en 2018. Trois de ces carottes présentant des discontinuités sédimentaires évidentes ont été écartées. Une quatrième carotte a été analysée pour tenter de reconstituer une archive utilisable dans nos travaux (Figure 6). L'analyse par spectrométrie gamma montre qu'on retrouve bien le pic caractéristique de Cs-137 dû aux essais nucléaires atmosphériques de 1963, mais le pic de l'accident de Tchernobyl en 1986 semble avoir disparu dans l'épaisseur labourée. Pour ajuster le modèle d'âge tracé avec le Cs-137, nous nous sommes appuyés sur le profil temporel des signatures en isotopes radiogéniques du plomb dont la variation temporelle est bien connue pour ce site (Ayrault et al. 2012). Nous avons donc mesuré les concentrations en métaux, dont le plomb, et les rapports isotopiques du plomb. Une fois ce dernier ajustement fait, on constate que les années postérieures à 1990 ont été mélangées, ce qui rend cette archive inutilisable pour étudier la dynamique des polluants, notamment les polluants « émergents ».



Figure 6. Photo de Bouafles 2018-3, choisie pour la datation et les mesures géochimiques (zone labourée : 16 cm, rectangle jaune). © Sophie Ayrault

### 2.1. Nouveaux sites autour de Bouafles

Dans le cadre du projet Sedi-Plast, coordonné par Johnny Gaspéri (IFSTTAR, Université Gustave Eiffel), une mission rassemblant 6 personnes de 4 laboratoires (IFSTTAR, LSCE, GÉHCO, LEESU) conduite par Elie Dhivert (GÉHCO) a exploré 4 zones susceptibles de constituer des sites de dépôts sédimentaires préservés depuis plusieurs décennies.

Deux zones ont été écartées lors de cette mission (9-10 juillet 2020). En effet, les sites repérés sur une île de la Seine se sont révélés difficiles d'accès. Les berges sont très abruptes, rendant difficile le transport du matériel de carottage et des échantillons. En ce qui concerne la station la plus en aval, le talweg principal permettant l'expansion des crues de la Seine est en grande partie comblé par une importante placette de compostage. D'autre part, les carottages-test qui ont été réalisés au niveau des sites que nous avons identifiés ont mis en évidence une pédogénèse assez avancée sur plusieurs dizaines de centimètres de profondeur.

Deux stations se sont révélées plus prometteuses (A et B, Fig. 7). La station A correspond à une zone d'accumulation de sédiments à l'entrée du chenal secondaire en rive gauche, alors que le site B est un ancien chenal en rive droite dont les parties amont et aval ont été obstruées au cours d'une période comprise entre les années 1950 et la fin des années 1970. Des carottages-test ont également été réalisés au niveau de ces stations. Les colonnes sédimentaires ont pu être échantillonnées sur, respectivement, 183 et 306 cm de profondeur au niveau des stations A et B. Les enregistrements sédimentaires sont continus, laminés et présentent une alternance de séquences limono-sableuses à sablo-limoneuses (Fig. 8). Des essais de datation sont en cours.



Figure 7. Plan de situation des zones explorées autour de Bouafles, aval Seine.  
© Elie Dhivert

Les carottages ont été réalisés à l'aide d'un carottier russe en inox. Cette méthode offre l'avantage de très peu perturber les séquences sédimentaires, en particulier en évitant le phénomène de compaction lié à l'introduction des *liners* dans les sédiments. Les différents niveaux sédimentaires sont ainsi prélevés selon leurs profondeurs réelles au sein de l'environnement de dépôt. D'autre part, le carottier russe donne accès aux enregistrements sédimentaires directement après sa remontée. Cela permet de contrôler la qualité du carottage en temps réel et de multiplier les prises afin de disposer des quantités de matière nécessaires à l'ensemble des analyses. Enfin, l'inox du carottier évite les contaminations en matériaux plastiques qui peuvent avoir lieu en utilisant des *liners* en PVC-U adaptés au carottier UWITEC et à percussion. L'inconvénient majeur de cette technique de carottage est de ne pas conserver les enregistrements qui sont directement échantillonnés sur site.



Figure 8. Photo d'une partie de la carotte prélevée dans la zone B (Fig. 7) autour de Bouafles, vers Les Andelys (10 juillet 2020). © Sophie Ayrault



## Conclusion

L'analyse de cartes anciennes et la connaissance du terrain ont permis d'identifier de nouveaux sites en bord de Seine pour le prélèvement et l'analyse de carottes sédimentaires. Le premier est situé en amont de la métropole parisienne. Il devrait permettre d'obtenir la contribution de l'amont du bassin à la contamination historique de la Seine. Le second site exploré dans la zone aval du bassin devrait permettre de remplacer le site de Bouafles où les terres ont été récemment retournées. Les premières observations montrent une sédimentation laminée, continue et régulière, pouvant potentiellement avoir enregistré les contaminations d'une grande partie du XX<sup>ème</sup> siècle. Par ailleurs, ces carottes devraient permettre la recherche de contaminations plus récentes comme la contamination par les microplastiques et celle des polluants émergents.

## Bibliographie

Alexandre, P. (2010). Iles et bras de Seine à l'ère de l'industrie : chronique de paysages oubliés. De l'évolution paysagère des îles et bras de Seine aux XIXe et XXe siècles, entre Marolles-sur-Seine et Poses. *Mémoire M2 ENSP*, 81 pages.

Ayrault S, Meybeck M, Mouchel J-M, Gaspéri J, Lestel L, Lorgeoux C, Boust D (2020) Sedimentary Archives Reveal the Concealed History of Micropollutant Contamination in the Seine River Basin. In. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1-32. doi:10.1007/698\_2019\_386

Ayrault S, Priadi CR, Evrard O, Lefevre I, Bonté P (2010) Silver and thallium historical trends in the Seine River basin. *J Environ Monit* 12 (11):2177-2185

Ayrault S, Roy-Barman M, Le Cloarec M-F, Priadi CR, Bonté P, Göpel C (2012) Lead contamination of the Seine River, France: Geochemical implications of a historical perspective. *Chemosphere* 87 (8):902-902-910.

Le Cloarec M-F, Bonté P, Lestel L, Lefèvre I, Ayrault S (2011) Sedimentary record of metal contamination in the Seine River during the last century. *Physics Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36 (12):515-529

Lestel L., Eschbach D, Steinmann R, Gastaldi N (2019). *ArchiSEINE : une approche géohistorique du bassin de la Seine*, Fascicule #18 du PIREN-Seine, ISBN : 978-2-490463-06-0, ARCEAU-IdF, 64p.

Lorgeoux C, Moilleron R, Gasperi J, Ayrault S, Bonté P, Lefèvre I, Tassin B (2016) Temporal trends of persistent organic pollutants in dated sediment cores: chemical fingerprinting of the anthropogenic impacts in the Seine River basin, Paris. *Sci Total Environ* 541:1355-1363

Meusburger K, Evrard O, Alewell C, Borrelli P, Cinelli G, Ketterer M, Mabit L, Panagos P, Van Oost K, Ballabio C (2020) Plutonium aided reconstruction of caesium atmospheric fallout in European topsoils. *Scientific reports* 10 (1):1-16

Tamtam F, Le Bot B, Dinh T, Mompelat S, Eurin J, Chevreuil M, Bonté P, Mouchel J-M, Ayrault S (2011) A 50-year record of quinolone and sulphonamide antimicrobial agents in Seine River sediments. *J Soils Sed* 11 (5):852-859