

**Synthèse des effets de la crue du bassin de la Seine de mai-juin 2016  
sur la qualité physico-chimique de l'eau**

**Comité de bassin du 6 avril 2017**

**Equipes de recherche de la Zone Atelier Seine (PIREN-Seine et GIP Seine Aval)  
Agence de l'eau Seine-Normandie**



## Synthèse

*Pour établir un bilan de la crue sur la qualité des eaux, une démarche collégiale a été initiée en juillet 2016 par l'agence de l'eau. Elle associe les organismes producteurs de données sur la qualité des secteurs les plus impactés par la crue. La première étape de ce travail est un bilan de l'impact physico-chimique sur les cours d'eau à partir des données physico-chimiques sur laisses de crue et sur échantillons d'eau. Ce bilan fait apparaître un impact modéré de la crue de 2016 pour les secteurs mesurés (les secteurs les plus impactés ne sont pas toujours bien mesurés compte tenu des difficultés inhérentes à la crue).*

*Les principaux impacts défavorables de la crue sont une baisse, qui reste modérée, de l'oxygène dissous en lien avec les apports importants de matière organique, des pics de nitrates suivant directement les épisodes pluvieux, et un niveau de pesticides rencontré habituellement à cette période de l'année, mais d'une durée plus importante. Les hydrocarbures sont également mesurés en hausse sur certains secteurs, dans les sédiments apportés à l'estuaire ainsi que en amont de Paris à proximité des secteurs où la crue a été la plus exceptionnelle. Ces hausses de concentrations sont ainsi rencontrées sur le Loing aval pour les hydrocarbures et pour le plomb.*

*Ce bilan a aussi été l'occasion de confirmer une tendance à la baisse de contamination pour certains métaux (Zn, Cu, Cd, Pb) et pour les PCB.*

*En termes de suivi, les laisses de crue apparaissent comme un outil particulièrement pertinent pour reconstituer l'impact d'une crue sur la qualité. Organiser la collecte d'échantillons dès la décrue se révèle une piste simple et efficace en cas de nouvel épisode de crue.*

*Enfin, le partage des données haute fréquence et régulières et des observations a été très riche et salué par tous les producteurs de données. Cette mise en commun doit être poursuivie et capitalisée à l'échelle du bassin. Ce bilan sera complété à la lumière des observations sur les éventuels effets hydrobiologiques et hydromorphologiques et sur les eaux souterraines qui pourront être faites durant l'année 2017.*

La Seine francilienne a connu une importante crue atteignant près de 6 mètres à Paris le 3 juin 2016. Sur le Loing, l'Yerres, l'Essonne, l'Yonne aval, et l'Orge ou encore le Grand Morin, la saturation en eau des sols et une pluviométrie très élevée ont occasionné des inondations encore plus exceptionnelles. De plus, cet événement est particulièrement remarquable si l'on considère la période à laquelle il s'est produit.

L'agence de l'eau Seine-Normandie et la direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE) ont été sollicitées par le préfet coordonnateur, mandaté par la ministre chargée de l'Environnement, pour éclairer les instances de bassin sur l'impact de la crue de mai/juin 2016 sur la qualité de l'eau et des milieux aquatiques.

Une démarche collégiale a été initiée au mois de juillet 2016 avec les partenaires du bassin concernés par la crue (lorsqu'ils sont producteurs de données de qualité des eaux) pour établir un retour d'expérience sur cette crue. Près de 25 structures, productrices de données, collectivités ou syndicats, laboratoires de recherche ou producteurs d'eau potable ou gestionnaires d'assainissement ont participé de façon très impliquée aux travaux de ce groupe.

Cette démarche s'est avérée une opportunité pour la mise en commun des données de surveillance du milieu produites pendant la crue sur les secteurs impactés (eau et laisses de crue), condition nécessaire à l'établissement d'un bilan de l'effet sur la qualité de la crue, aucun jeu de données seul n'étant suffisant pour le permettre. Il s'agit donc d'un travail collégial dans l'intérêt du bassin.

Le PIREN Seine, mobilisant plusieurs laboratoires, et le GIP-Seine-Aval, financés par l'agence de l'eau, ont pris en charge le bilan et l'exploitation des données physico-chimiques issues de l'ensemble des analyses disponibles sur eau et des analyses de sédiments issues de laisses de crue collectées dès la décrue par des chercheurs sur des sites répartis sur les zones impactées.

Cette note présente les principaux résultats marquants soit par leur généralité, soit par leur caractère exceptionnel, issus de ce travail d'analyse des données.

## **1. Une crue exceptionnelle**

Les mois de mai et juin 2016 ont été marqués sur le bassin de la Seine par une crue singulière de grande ampleur, qui se démarque des crues historiques de la Seine qui ont eu lieu en hiver.

### ***Une pluie très forte concentrée sur quelques bassins***

Les ré-analyses SAFRAN<sup>1</sup>, fournies par Météo France depuis 1970, permettent de reconstituer l'épisode de crue de mai-juin 2016. Cette crue a été provoquée par une pluviométrie exceptionnelle. L'épisode pluvieux a été marqué par deux événements successifs : le premier les 22-23 mai a touché principalement la partie centrale du bassin de la Seine. Le second, plus important, du 29 mai au 2 juin, a particulièrement touché le Loing et le Nord du bassin de l'Yonne, la Juine et l'Essonne, l'Yerres et l'Orge (figure 1).

### ***Des débits spécifiques particulièrement intenses dans le Loing et l'Yerres***

---

1 . Quintana-Segui et al. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47:92-107

D'une période de retour sensiblement vingtennale à Paris, la crue est d'une période de retour beaucoup plus élevée sur les bassins amont les plus touchés, mais difficile à évaluer précisément. Le caractère exceptionnel de cette crue tient aussi à son occurrence à la fin du printemps. Les plus grands contributeurs au débit en Seine ont été par ordre d'importance l'Yonne, le Loing, la Marne, l'Oise, et l'Yerres. Tous ces affluents ont contribué à plus de  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  chacun. Cependant les intensités de réponse de chacun de ces bassins sont très hétérogènes. Le Loing puis l'Yerres ont eu les débits spécifiques (débit divisé par la surface du bassin versant) les plus importants (figure 2).

Dans l'estuaire de la Seine, le pic de crue a été concomitant avec des fortes marées (coefficient de marée de 103 le 6 juin). Les niveaux d'eau atteints dans l'estuaire sont fonction du débit de la Seine, mais aussi de la marée et des conditions météorologiques (pression atmosphérique et vent), le poids de ces éléments variant selon le secteur géographique considéré. Au cours de la crue, les niveaux d'eau les plus importants ont été atteints entre Poses et Oissel, avec une période de retour estimée entre 5 et 10 ans (figure 3).

## **2. L'analyse des laisses de crue**

Les laisses de crue, formées de sédiments fins déposés par le retrait des eaux, fournissent un signal intégrateur de l'ensemble de l'événement. Selon leur localisation et la hauteur du dépôt au sein du lit majeur, ces laisses intègrent différents moments de la crue.

Dans son principe, la méthode des laisses de crue permet élégamment de reconstituer la qualité des particules transportées par la crue depuis le pic de crue et durant la décrue, en collectant des échantillons de haut en bas le long de berges à la configuration favorable au dépôt. Pour le suivi de la crue de juin, nous avons adopté une stratégie mixte avec des échantillonnages dès le début de la décrue (le 6 juin) en particulier en milieu urbain pour anticiper le nettoyage rapide des dépôts par les agents de voirie, et le suivi en fin de crue d'un ensemble de sites couvrant plus largement le bassin de la Seine où des laisses souvent « hautes » mais parfois « basses » ont pu être collectées. Ces échantillons fournissent une information relative aux particules transportées au maximum de la crue qui était aussi le maximum du flux de matières en suspensions (MES) et donc de contaminants associés. Parmi les bassins versants d'intérêt car fortement impactés par la crue, celui de l'Yerres et de l'Essonne n'ont pas pu être échantillonnés.

Les matériaux qui constituent les laisses de crue peuvent provenir de diverses origines telles que l'entraînement des sols par ruissellement ou la remobilisation de dépôts anciens sur le bassin ou dans les lits. L'utilisation d'un isotope de courte durée de vie (le  $^7\text{Be}$ ) uniquement originaire de l'atmosphère via la pluie, permet de marquer spécifiquement les sols, et de distinguer l'origine ancienne ou récente des particules collectées dans les laisses de crue (figure 4).

Dans les laisses de crue, nous nous sommes intéressés aux éléments et composés qui ont une affinité forte pour les particules, les autres composés devant être de préférence examinés dans l'eau. Les familles sélectionnées sont les métaux, les HAP, les PCB, les alkylphénols et les composés perfluoroalkylés. La plupart des pesticides sont majoritairement dissous dans les rivières (mais pas forcément dans les sols), cette famille de contaminants n'a donc pas été analysée sur les laisses de crue.

### ***Contaminants organiques dans les laisses de crue :***

Les niveaux de contamination par les micro-polluants organiques ne sont pas très élevés contrairement à ce qu'on aurait pu craindre étant donné l'inondation de secteurs urbanisés et les risques de contamination qui en résultent. Nous les avons comparés avec des données issues d'une base constituée récemment<sup>2</sup>. Elle porte sur la mesure des concentrations dans des matières en suspension collectées au cours des dix dernières années principalement le long de l'axe Seine depuis sa confluence avec l'Aube jusqu'à Poses et dans une moindre mesure dans les deux sous-bassins versant particulièrement étudiés par le PIREN-Seine, le Grand Morin et l'Orge.

La confrontation de ces données montre que, globalement, aucune des familles de contaminants mesurés dans les laisses de crue n'est spécialement élevée en regard de ce qu'on observe dans des circonstances hydrologiques normales, sauf pour quelques points particuliers.

La distribution des concentrations **des hydrocarbures suivis (HAP<sup>3</sup>)** est représentative de la distribution observée en Seine au cours des dix dernières années (figure 5). Dans l'axe Seine, les teneurs sont élevées dans un secteur qui va de l'agglomération parisienne à l'estuaire. On note aussi que les teneurs de BaP<sup>4</sup> mesurées dans les laisses de crue de la Seine à l'aval de Paris sont nettement plus concentrées que dans les sédiments de l'estuaire (environ 1 µg/g contre 0.1 à 0.2 µg/g, figure 6), ce qui témoigne d'un enrichissement probable en ces composés au moment de la crue en comparaison de l'apport moyen annuel que représentent les sédiments de l'estuaire. Enfin, le fait que la concentration nettement la plus élevée de la série des laisses de crue (plus de 30 µg/g de HAP totaux) ait été obtenue dans le bassin du Loing qui a subi la crue la plus exceptionnelle, mérite d'être noté.

Pour l'autre famille de contaminants historiques que sont les PCB<sup>5</sup>, la situation est très différente puisque les teneurs observées durant la crue sont très inférieures aux teneurs relevées dans les MES au cours des 10 dernières années (figure 7). Ceci corrobore une tendance à la baisse d'échelle pluri-décennale pour cette famille de contaminants dont l'usage est interdit depuis plusieurs décennies (figure 8). Comme pour les HAP on note des contaminations plus élevées dans la partie aval du cours de la Seine, contaminations qui par ailleurs présentent aussi un profil moléculaire<sup>6</sup> différent, mais qui sont comparables en niveau à ce qui est observé dans les sédiments de l'estuaire. Ces différences pourraient témoigner de la présence de sources résiduelles relativement ponctuelles de composition différente de la contamination de fond du bassin.

Les **alkylphénols**, ici représentés par le nonylphénol, ne montrent pas de tendance amont-aval. Le point le plus marquant est leur niveau extrêmement faible par rapport aux données antérieures (figure 9). Comme les PCB, leurs usages ont été très sévèrement restreints au cours de la dernière décennie, on peut voir dans cette forte diminution une conséquence très positive des politiques menées.

La dernière famille pour laquelle des bilans de contamination sont disponibles est celle des **composés perfluoroalkylés**. Pour cette famille peu de références sont disponibles car ces composés ne sont suivis que depuis peu de temps dans notre environnement (depuis 2010 par le PIREN-Seine par exemple). En valeur médiane, le niveau de contamination est de 50 % supérieur aux relevés du

---

2 . Briand et al. (2016). Bilans et flux de polluants organiques dans le bassin de la Seine, rapport PIREN-Seine 2016

3 . HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

4 . BaP : Benzo(a)pyrène, un des HAP les plus étudiés.

5 . PCB : Polychlorobiphényles

6 . La distribution des différentes molécules au sein d'une famille donnée

suivi national récemment porté par l'ONEMA, mais il est très comparable à ce que nous avons observé à la traversée de l'agglomération parisienne au cours des dernières années. Le composé majoritaire dans tous les échantillons analysés est le PFOS<sup>7</sup>, qui est réglementé par une des directives filles de la DCE. Il n'est pas possible de mettre en évidence de tendance spatiale dans les niveaux de contamination. Les trois valeurs les plus élevées (> 5 ng/g) semblent distribuées assez aléatoirement (Seine amont à Bray, Yvette à Lonjumeau, Eure à Léry) et sont marquées par la présence d'un autre composé (le PFNA<sup>8</sup>) habituellement minoritaire. Des sources locales en sont donc probablement l'origine.

Sur la base de nos analyses, aucun impact généralisé à tout le bassin ne peut donc être mis en évidence par l'analyse de la qualité des laisses de crue, les concentrations médianes étant comparables ou nettement inférieures aux données de référence disponibles. Du point de vue de la DCE, il n'existe pas de NQE (norme de qualité environnementale) pour les sédiments. Cependant, à partir des ordres de grandeur des concentrations mesurées en MES dans les cours d'eau au moment de la crue (typiquement 200 mg/L) et des teneurs observées dans les laisses, nous pouvons reconstituer des concentrations totales en suspension dans l'eau (tableau 1) et les comparer aux NQE existantes pour des contaminants représentatifs de ces familles. En période de crue, avec une forte charge de matières en suspension, il convient de souligner que la fraction strictement dissoute est probablement inférieure ou égale à la concentration liées aux MES pour les contaminants étudiés.

*Tableau 1 : Estimation des concentrations totales particulières dans les eaux charriées au cours de la crue, avec une hypothèse de concentration en MES de 200 mg/L. Les estimations ont été faites à partir des concentrations maximales mesurées sur les laisses de crue du bassin pour chacun des contaminants.*

	Concentration particulière dans l'eau pour 200 mg/L MES	NQE-MA (moyenne annuelle)	NQE-CMA (concentration maximale admissible)
BaP (HAP)	0,5 µg/L	0,00017 µg/L	0,27 µg/L
Fluoranthène (HAP)	1 µg/L	0,0063 µg/L	0,12 µg/L
Nonylphénol (alkylphénol)	0,06 µg/L	0,3 µg/L	2 µg/L
PFOS (composé perfluoroalkylé)	0,7 ng/L	0,65 ng/L	36000 ng/L

Les estimations de concentrations en nonylphénol ou en PFOS dans la colonne d'eau sont très éloignées de la concentration maximale admissible (CMA) à laquelle il est légitime de comparer les teneurs estimées dans une telle situation hydrologique exceptionnelle. Elles sont aussi inférieures ou comparables aux NQE à utiliser en moyenne annuelle (NQE-MA).

Pour les HAP, et en particulier les plus lourds comme le BaP, la situation est problématique vis à vis des NQE, mais c'est un problème qui n'est pas particulier à cette crue.

7 . PFOS : sulfonate de perfluoro-octone

8 . PFNA : acide perfluorononanoïque

A l'intérieur de cet ensemble de données, qu'on pourrait qualifier de relativement conforme aux teneurs usuellement rencontrées dans le bassin de la Seine, les secteurs de contamination la plus élevée sont l'axe Seine pour les HAP et les PCB, le Loing pour les HAP où se trouve le point le plus contaminé du bassin, et quelques sites disséminés pour les composés perfluoroalkylés, sites pour lesquels des sources locales sont suspectées. Dans le cas du Loing, dans la mesure où l'origine des laisses de crue révèle que les HAP mesurés sont une contamination ancienne, il est possible que la crue très exceptionnelle de juin 2016 ait lessivé des terrains qui ne l'avaient pas été depuis fort longtemps, ou purgé des sédiments anciens, ce qui pourrait expliquer une charge particulière. Parmi les familles étudiées, les HAP sont la seule pour laquelle une augmentation, certes modérée, est décelable dans les sédiments déposés par la crue, dans la vallée de la Seine à l'aval de l'agglomération et dans le bassin du Loing.

### ***Les métaux dans les laisses de crue :***

Les concentrations en 30 éléments ont été mesurées dans les laisses de crue. Les résultats sont présentés pour les métaux les plus étudiés dans le bassin de la Seine (figure 10).

Si on compare les concentrations observées pendant la crue à des prélèvements de MES effectués au cours des dernières décennies sur l'axe Seine et dans le bassin de l'Orge, les échantillons de crue présentent des concentrations dans la gamme basse pour l'axe Seine. Ainsi, les laisses collectées dans Paris et à Bouafle (aval du bassin) lors de la crue présentent des teneurs nettement inférieures à celles mesurées lors d'études datant de 1994 à 2000 (Tableau 2).

*Tableau 2. Comparaison des teneurs (mg.kg<sup>-1</sup>) en Zn, Cu, Cd et Pb mesurées dans des laisses collectées entre 1994 et 2000<sup>9</sup> (les valeurs médianes présentées ici) et lors de la crue de la Seine en Juin 2016.*

	Zn	Cu	Cd	Pb
Paris (1994-2000)	280	69	1,0	110
Paris (Juin 2016)	188	33	0,3	51
Poses (1994-2000)	350	83	1,9	110
Poses (Juin 2016)	198	41	1,2	53
Bruit de fond	60	15	0,22	20

Les facteurs d'enrichissement (FE) sont des rapports normalisés<sup>10</sup> au bruit de fond naturel de la Seine (fascicule PIREN métaux). Ils sont utilisés pour comparer entre elles les teneurs obtenues pour différents métaux (figure 11). Ces FE, notamment pour les métaux les plus caractéristiques de l'anthropisation (Zn, Cu, Cd et Pb), sont les plus élevés dans les bassins du Loing et de l'Orge (avec une valeur de 16 qui correspond à une pollution extrême sur le Loing), puis sur l'axe fluvial à l'aval de Paris, puis à la traversée de l'agglomération parisienne (niveau de pollution modéré).

9 . Grosbois et al., 2006. The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994–2000). *Science of the Total Environment*, 356:22-37

10 . On observe des différences majeures dans la texture des laisses de crue, avec en particulier des échantillons très sableux à l'aval du bassin de l'Orge. Ces différences rendent la comparaison entre échantillons plus délicate. Le tamisage très fin réalisé pour les analyses de métaux ainsi que la normalisation au carbone organique particulaire (COP) ou à l'aluminium (Al) voire à d'autres métaux, permettent de résoudre cette difficulté.

Certains affluents peuvent montrer des contaminations particulièrement élevées qui pourraient être dues à des sources particulières. Le Loing présente des teneurs élevées pour de nombreux métaux dont le plomb et l'antimoine, particulièrement enrichis, deux métaux « urbains ». L'Eure présente une contamination significative en plomb. L'Orge présente des teneurs élevées comparées aux autres laisses, pour Zn, Cu et Pb, mais qui restent dans l'ordre de grandeur des teneurs mesurées dans ce même bassin en 2009-2010<sup>11</sup>.

Les isotopes stables du plomb peuvent être d'un grand secours pour comprendre en quoi un signal métallique pourrait être spécifique d'un type de contamination<sup>12</sup>. Les résultats que nous avons obtenus, illustrés par le rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  (figure 12), montrent que les échantillons appartiennent au même ensemble, correspondant au mélange, avec une contribution plus ou moins forte, de deux sources : la source urbaine et la source naturelle. Seul l'échantillon de Lery (Eure) sort de cet ensemble du fait d'une contamination provenant probablement d'un site industriel spécifique.

### 3. La qualité au travers des mesures faites sur l'eau

Les questions posées sur l'impact de la crue sur la qualité de l'eau ont amené à une forte mobilisation des producteurs de données du bassin pour constituer une base de données commune. Il en a résulté un jeu de données d'une taille considérable (environ 20 millions de données dans plus de 200 stations de mesure de janvier à septembre 2016). Ces données comprennent :

- les variables physico-chimiques de la DCE
- les cations majeurs : sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg)
- les métaux : fer (Fe), manganèse (Mn), plomb (Pb), aluminium (Al), argent (Ag), arsenic (As), cadmium (Cd), chrome (Cr), cuivre (Cu), nickel (Ni), zinc (Zn)
- les contaminants organiques : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB), alkylphénols (AP), phtalates (PAE), Diphenyl éthers polybromés (PBDE), composés perfluoroalkylés, pesticides, quelques médicaments (paracétamol, formes de l'ibuprofène)
- la bactériologie avec E. Coli

Certaines données sont mesurées avec des pas de temps inférieurs ou égaux à la journée, en certaines stations grâce à des systèmes de mesure automatisés (conductivité, température, pH, MES, turbidité, COT, oxygène dissous, nitrate, ammonium, phosphate, cations) et ont permis de bien saisir la crue. Le nombre de stations concernées est donné dans le tableau 3. Parmi ces sources de données, citons en particulier, les mesures aux prises d'eau (Sedif, Eau de Paris, Suez), les suivis mis en place sur certaines rivières urbaines par des stations automatisées (syndicat de l'Orge, SyAGE, SIARCE), le réseau MeSeine du SIAAP, la « chemical house » d'IRSTEA. Regrouper ces données acquises à haute fréquence a permis de mettre en évidence des phénomènes de courte durée, cohérents entre les différentes stations de mesure, qui auraient autrement vraisemblablement échappé à l'analyse.

Les autres données collectées à des fréquences moindres ont permis, grâce aux regroupements qui ont pu être réalisés, de mettre en évidence une structuration généralement cohérente. Toutes les données ont systématiquement été traitées graphiquement en se fondant sur des regroupements selon trois grandes zones (amont de l'agglomération, agglomération parisienne, aval de

---

11 . Le Pape P. et al. (2012). Trace element behavior and partition versus urbanization gradient in an urban river (Orge River, France). *Journal of Hydrology*, 472:99-110.

12 . Ayrault S. et al. (2012). Lead contamination of the Seine River, France: Geochemical implications of a historical perspective. *Chemosphere*, 87:902-910

l'agglomération) en différenciant entre les principaux sous-bassins versants pour la zone amont, ce qui a permis de synthétiser l'information en une centaine de graphiques dont nous ne discuterons ici que certains des éléments choisis.

*Tableau 3 : Les paramètres disponibles à des fréquences supérieures à la journée. Sont présentés les nombres de stations pour chacun des paramètres*

paramètre	conductivité	température	pH	MES	turbidité	COT	oxygène	NO3	NH4	PO4	cations	HAP
n=	20	21	11	1	10	10	24	4	10	2	1	4

L'augmentation des teneurs en **MES** est notable au moment de la crue, comme attendu, mais les teneurs enregistrées n'ont pas dépassé 200 mg/L pour aucun des relevés, soit une valeur qui n'a rien d'exceptionnel et avait déjà été dépassée au cours de la même année en février, pour une crue de moindre importance (figure 13). Les valeurs les plus élevées ont été observées sur les affluents<sup>13</sup>. A l'inverse, le **carbone organique total** a atteint 10 mg/L sur l'axe Seine, soit une valeur supérieure à celle qui avait été observée en février, ce qui suggère une composition des suspensions différente au cours de cette crue très tardive. La présence de matières organiques à une époque où la température est relativement élevée (15 à 17°C) se traduit par un déficit d'oxygène dissous d'origine très probablement biologique (respiration) qui atteint 2 mg/L sur la Seine (figure 14) ainsi qu'en plusieurs stations sur les affluents (Essonne, Orge), alors que d'autres stations sur les affluents ont eu des comportements spécifiques. Le pH baisse également significativement au passage de la pointe de crue (~ 0.3 unités), ce qui peut être lié à deux phénomènes, d'une part la production de CO<sub>2</sub> par la respiration, d'autre part un apport d'eaux de ruissellement moins enrichies en carbonates.

Des fluctuations très intenses des teneurs en **nitrites** sont observées dans le petit bassin versant rural de l'Orgeval qui bénéficie d'un suivi journalier en plusieurs stations. L'évolution temporelle des concentrations est dynamique avec à la fois des teneurs y dépassent 150 mg/L pour de très courtes durées (1 à 2 jours) mais qui peuvent aussi fortement diminuer. Peu de nappes atteignent de telles concentrations dans le bassin de la Seine, et nous savons précisément que celles du bassin de l'Orgeval ne dépassent guère 50 mg/L. Ce sont donc des écoulements de subsurface qui sont à l'origine du phénomène<sup>14</sup>. Il n'est pas rare que des teneurs aussi élevées soient observées à l'échelle du bassin de l'Orgeval en période de pluie. Les données haute-fréquence disponibles dans les grands cours ne permettent pas de mettre en évidence des phénomènes similaires. Les fluctuations rapides s'estompent aux confluences, mais par ailleurs, la crue n'a pas permis l'application des protocoles de validation des stations de mesure automatiques, et ces manques dans les séries empêchent de conclure définitivement.

13 . On notera cependant que l'accès aux affluents en crue était particulièrement difficile, et que les données qui auraient été les plus sensibles n'ont probablement pas pu être collectées

14 . Au contraire, le ruissellement direct de l'eau de pluie à la surface surface sans forte interaction avec le sols provoque les concentrations les plus faibles

On comparera ce phénomène au signal observé pour certains **pesticides** également d'origine essentiellement agricole. Pour nombre d'entre eux (dimethenamide, éthofumesate, métolachlore, imidaclopride), une augmentation de concentration est observable sur une période relativement longue, typiquement du 15 mai au 30 juin sur les principales stations de suivi de la qualité de l'eau de l'axe Seine (figure 16). Les concentrations observées ne sont pas plus élevées que l'année précédente pour ces pesticides qu'on retrouve habituellement en mai dans les eaux, le point marquant est la durée d'impact qui a été de 6 semaines, contre deux semaines l'année précédente. Il est probable que la forte humidité des sols et du proche sous-sol ont contribué à cet impact prolongé avec une désorption progressive des pesticides à partir de sols ou de colluvions qui sont restées longtemps gorgées d'eau. Sur les plus petits cours d'eau pour lesquels des données de pesticides sont disponibles, des concentrations beaucoup plus élevées qu'en Seine peuvent être observées mais pour des durées plus courtes. Il demeure difficile d'y mettre clairement en évidence un effet « crue » car les fréquences de mesure pratiquées (hebdomadaire dans les meilleurs cas) ne sont pas adaptées.

Enfin, le comportement des **bactéries indicatrices fécales** (représentées par E.Coli) au moment de la crue a été particulièrement caractéristique pour toutes les stations le long de la Seine. A partir de la mi-mai, les teneurs augmentent rapidement, d'environ 1,5 unités  $\log^{15}$ , le maximum est atteint avant la fin juin, puis les teneurs décroissent lentement pour atteindre une médiane inférieure à 1000 bactéries pour 100 mL (ordre de grandeur de la norme de baignade) au mois d'août (figure 17). L'augmentation des teneurs en bactéries fécales en période de fort débit est un phénomène relativement connu qui résulte de la conjonction de plusieurs facteurs (temps de transit et donc temps pour la dégradation réduits, sédimentation limitée, pénétration moindre des UV dans l'eau...). L'effet est très nettement confirmé pour cette crue presque estivale, à une période où on aurait attendu des teneurs en E. Coli beaucoup plus faibles.

## Conclusions générales

La mobilisation des données de surveillance du milieu de tous les acteurs du bassin a permis notamment d'accéder à un ensemble de données de haute fréquence (supérieure à la journée) acquises par des stations automatiques ou dans le cadre et pour la surveillance de l'eau d'alimentation des prises d'eau. Cet ensemble de données particulièrement riche a permis de mettre en évidence les points suivants :

1. Le comportement trophique de la Seine au cours de cet événement est caractérisé par une diminution modérée du niveau d'oxygène dissous attribuable à un excédent de matières organiques apportées par la crue. Dans l'ensemble, le même comportement est observé dans les petits cours d'eau urbains équipés de stations de mesure avec des spécificités toutefois.
2. La forte humidité des sols, qui est aussi à l'origine de l'ampleur de la crue, a provoqué un épisode de ruissellement qui s'est traduit par des valeurs très élevées de nitrate dans les bassins ruraux, mais sur quelques jours seulement. Les teneurs en certains pesticides en général observés épisodiquement à la fin du printemps sont restées modérément élevées mais leur présence s'est entendue sur plus d'un mois. La capacité de fixation des sols et du proche sous-sol plus forte pour les pesticides que pour les nitrates et leur relargage progressif pourrait expliquer le phénomène.

---

15 . Etant donné leur forte variabilité, les bactéries indicatrices fécales sont usuellement exprimées en logarithmes décimaux.

3. Les niveaux de contamination en métaux et en contaminants organiques dans les laisses de crue sont restés en deçà des teneurs caractéristiques des dernières décennies, confirmant la décontamination progressive des cours d'eau du bassin. Les HAP sont les contaminants chimiques qui semblent avoir augmenté, dans certains secteurs au cours de cette crue, avec des teneurs dans l'axe aval de la Seine supérieures aux concentrations moyennes dans des sédiments de l'estuaire des dernières années. Dans le bassin du Loing, les teneurs en HAP ont été particulièrement élevées (en référence aux autres stations), ainsi que les teneurs en plomb. Ces apports de contaminants urbains sont probablement dus à la remobilisation d'anciens dépôts des zones urbaines.

4. Les laisses de crue sont un outil remarquable pour évaluer la contamination transportée et déposée par la crue. Etant donnée la teneur en contaminant qu'elles portent, leur échantillonnage ne nécessitant que quelques précautions est relativement facile, clairement beaucoup plus simple que l'échantillonnage de l'eau en vue d'analyses chimiques approfondies. Une difficulté que nous avons rencontrée dans les interprétations est l'absence d'échantillons de laisses de crue dans certains secteurs (bassins de l'Yerres et de l'Essonne notamment). Il serait sans doute intéressant que les agents de l'état ou des collectivités territoriales, formés à cet effet, puisse contribuer à l'acquisition de données post-crue, à courte échelle de temps, que seraient les relevés de niveaux et la collecte d'échantillons de laisses.

5. L'accès à cette large base de données haute fréquence de mesure sur l'eau, combinée aux jeux de données de fréquence moindre, a été un exercice riche d'enseignements qui a été mené à notre connaissance pour la première fois dans le bassin de la Seine et qui a permis d'acquérir une vision à la fois détaillée et représentative d'une bonne partie du bassin. Il reste encore des travaux à conduire pour l'analyse détaillée de toutes les données et dans le retour vers les producteurs de ces données. Il est apparu dans certains cas que l'absence de données haute fréquence du passé était une cause potentielle de sur-interprétation (ce que nous observons est-il toujours vraiment dû à la crue ou à une coïncidence ?). Pour dépasser cette difficulté, il faudrait être en mesure de poursuivre la démarche de partage de données tout en mettant en place un ensemble de descripteurs utiles à l'exploitation des données.

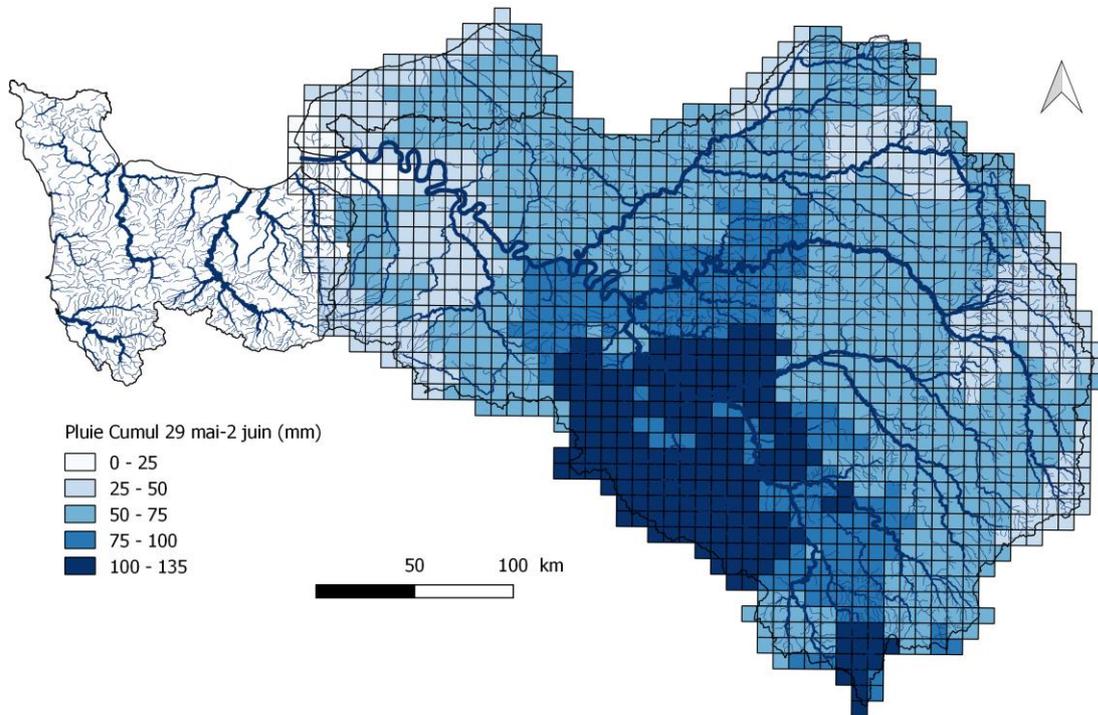
Par la suite, les effets éventuels sur la biologie et la morphologie des cours d'eau seront également analysés au fur et à mesure que les données issues de la surveillance biologique seront disponibles, c'est-à-dire dans le courant du second semestre 2017 (la surveillance biologique se déroule sur un pas de temps plus long que la surveillance physico-chimique). D'éventuels effets sur les eaux souterraines pour les secteurs les plus impactés pourront également être identifiés.

Enfin, les témoignages apportés lors de la première réunion du groupe de travail ont confirmé également la nécessité de partager les observations permettant de tirer des enseignements pour la gestion de la qualité de l'eau du bassin et mieux se préparer aux futurs épisodes d'inondation. C'est pourquoi une enquête auprès des gestionnaires riverains est également envisagée dans les mois qui viennent.

## Liste des organismes partenaires de cette étude

- AQUI'Brie
- Conseil départemental de l'Yonne
- Conseil départemental du Val de marne
- Eau de Paris
- Mairie de Paris
- SEDIF- Syndicat des eaux d'Île de France
- SIAAP Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne
- Suez – Agences d'Île de France –
- Syndicat de l'Orge Aval
- Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Réseaux et de Cours d'Eau
- Syndicat Intercommunal pour l'Aménagement Hydraulique de la Vallée de l'Yvette
- Syndicat mixte du bassin supérieur de l'Orge Arceau
- Syndicat mixte pour l'Assainissement et la Gestion des eaux du bassin versant de l'Yerres
- Union des fédérations de pêche du bassin Seine-Normandie
- Le Cedre
- GIP Seine Aval
- PIREN Seine (METIS, Armines, LSCE, LEESU, EPOC-LPTE, IRSTEA)
- Cellule de transfert du PIREN-Seine (Association Arceau)
- Agence française pour la biodiversité (ONEMA)
- DRIEE Ile de France
- Agence de l'eau Seine-Normandie

## Illustrations



*Figure 1 : Champ de pluie cumulée du 29 mai au 2 juin 2016. D'après le système SAFRAN de Météo-France.*

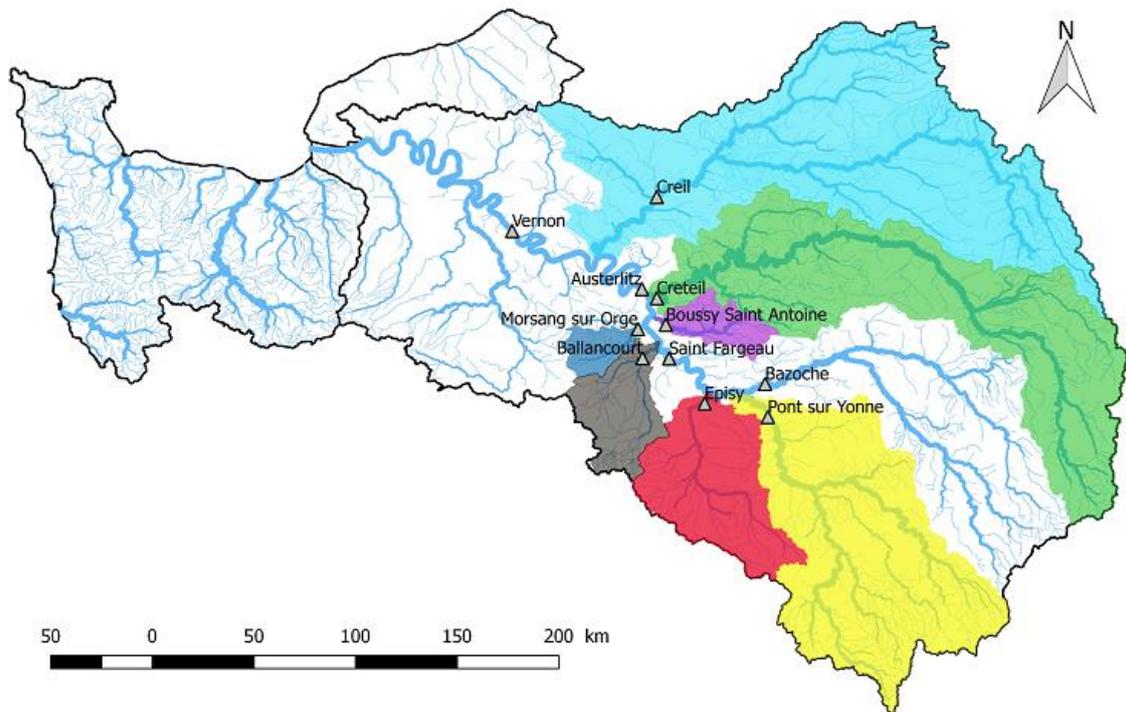


Figure 2a : Les bassins versants ayant fait l'objet d'une analyse hydrologique

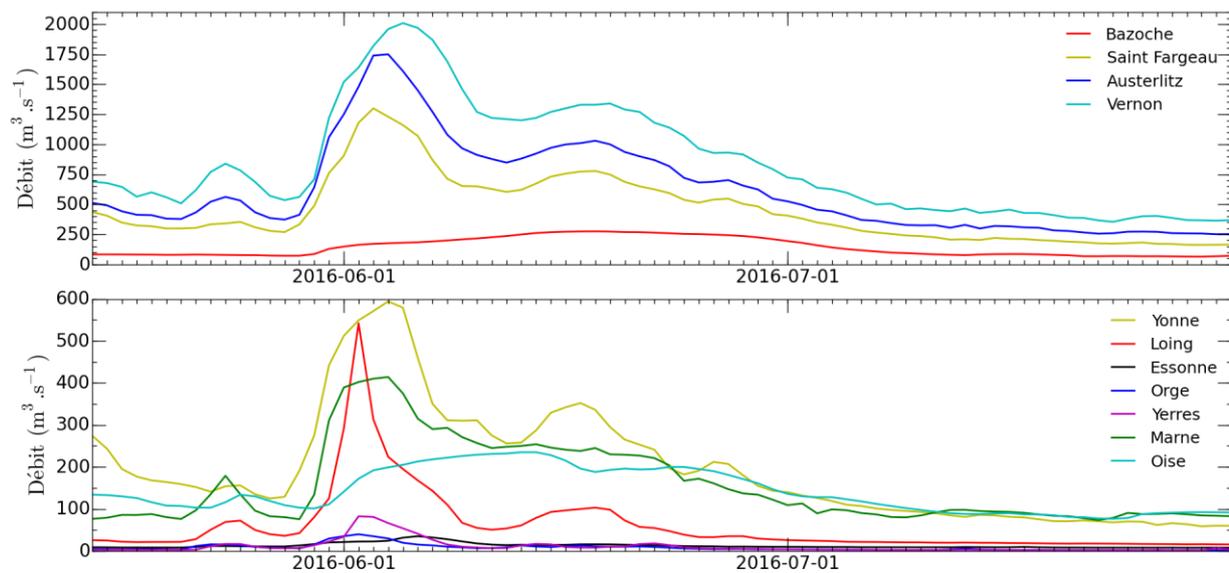


Figure 2b : Hydrogrammes de crue de la Seine (haut) et de ses principaux affluents (bas) du 15 mai au 31 juillet 2016.

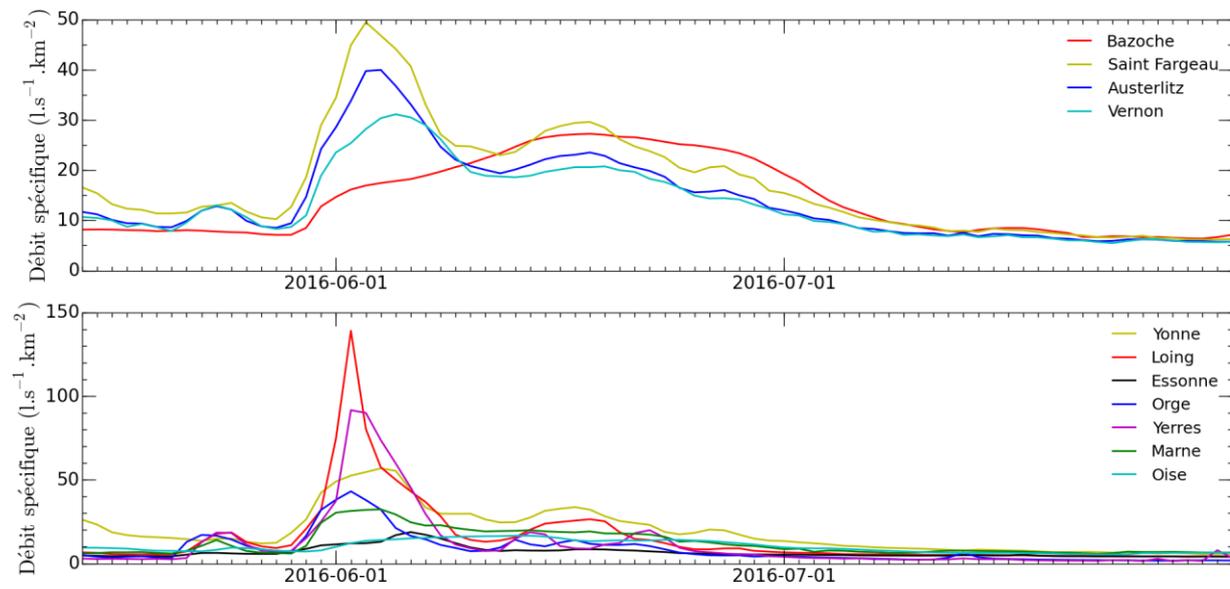


Figure 2c: Débits spécifiques de la Seine (haut) et de ses affluents (bas) du 15 mai au 31 juillet 2016.

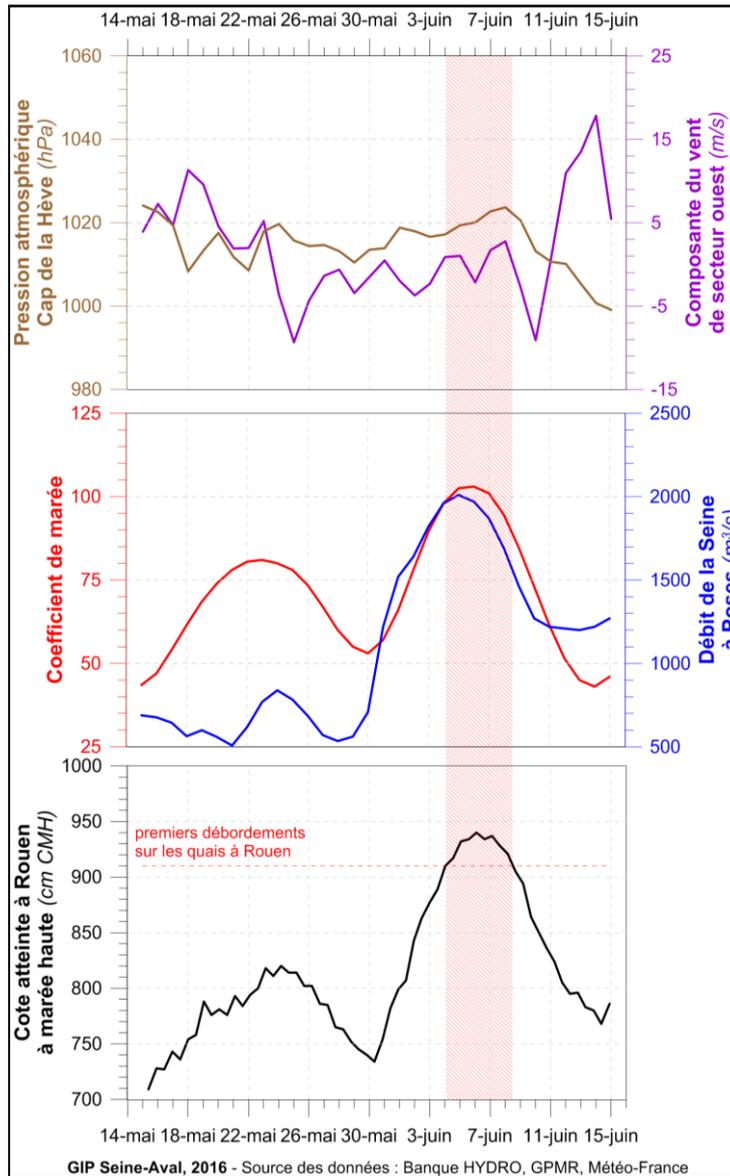


Figure 3 : Chronique de la crue de juin 2016 dans l'estuaire de la Seine

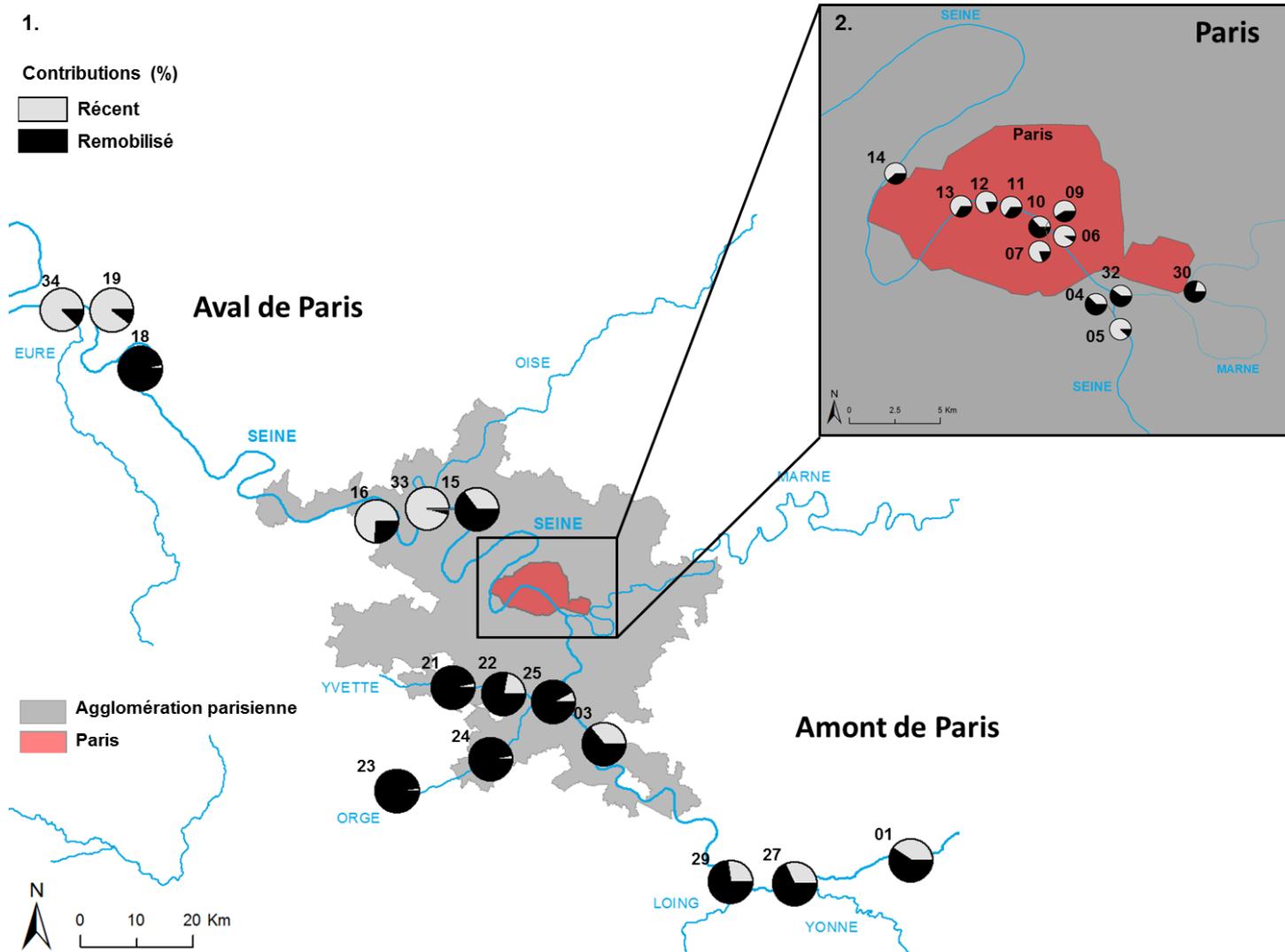
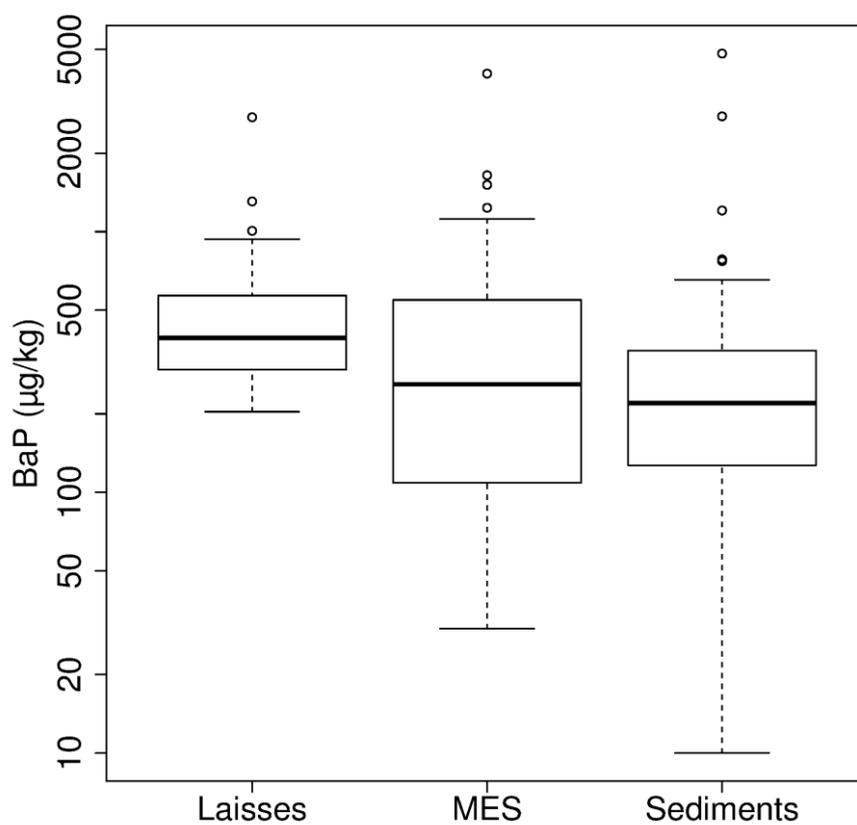


Figure 4 : Variations spatiales de la contribution de particules récemment érodées (marquées en  $^7\text{Be}$ ) et de particules plus anciennes, remobilisées par la crue (appauvries en  $^7\text{Be}$ ) aux laisses collectées le long de la Seine et de ses affluents. Le  $^7\text{Be}$  est un radionucléide de demi-vie courte (53,3 jours). Produit dans l'atmosphère, il retombe au sol par les précipitations pour se fixer aux particules fines de sol. Il est donc particulièrement utilisé pour étudier le transport de sédiments sur de courtes périodes caractérisées par des pluies plus ou moins intenses. Cette approche permet, entre autres, de distinguer les particules récemment apportées au fleuve (marquées en  $^7\text{Be}$ ) et les particules remobilisées à partir de dépôts anciens (appauvries en  $^7\text{Be}$ ). L'analyse des laisses de la crue met en évidence une différence spatiale des sources de MES. En amont de Paris, les particules proviennent majoritairement de particules anciennes, préalablement déposées dans le lit de la rivière et remobilisées lors de la crue. Au niveau de Paris, on voit apparaître des particules récemment érodées, potentiellement par le lessivage des surfaces urbaines. En aval de Paris, deux schémas se distinguent avec (1) soit une contribution majoritaire de particules récemment érodées en provenance des zones agricoles, comme observé pour les laisses de l'Oise et de l'Eure, (2) soit des contributions importantes de particules remobilisées par la crue sur l'axe Seine.



*Figure 5 : distribution des teneurs en BaP dans les laisses de la crue de juin 2016 et dans les suspensions de l'axe Seine au cours des 10 dernières années et dans les sédiments du bassin en 2015(en µg/g de matière sèche). Le Benzo(a)Pyrène (BaP) est choisi comme HAP emblématique. C'est aussi ce composé qui est choisi dans le cadre de la DCE pour définir les NQE pour les HAP les plus lourds.*

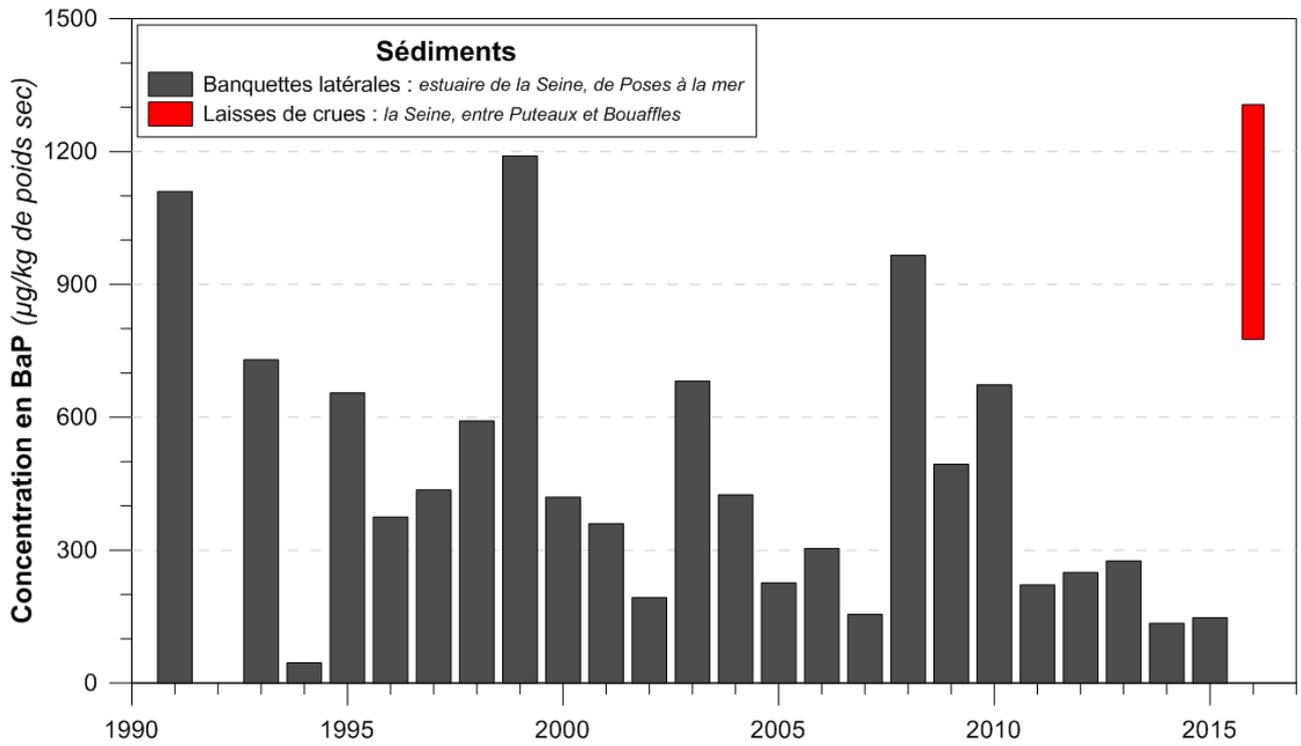


Figure 6 : Contamination par le BaP dans les sédiments de l'estuaire fluvial

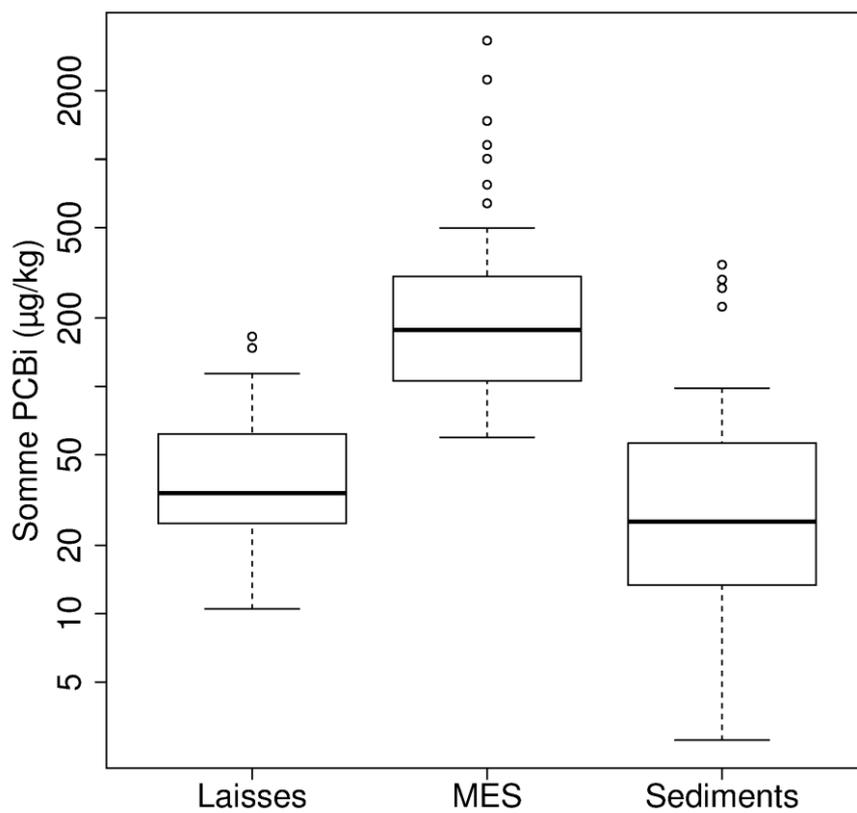


Figure 7 : distribution des teneurs en PCB dans les laisses de la crue et dans les suspensions de la Seine (en µg/g de matière sèche).

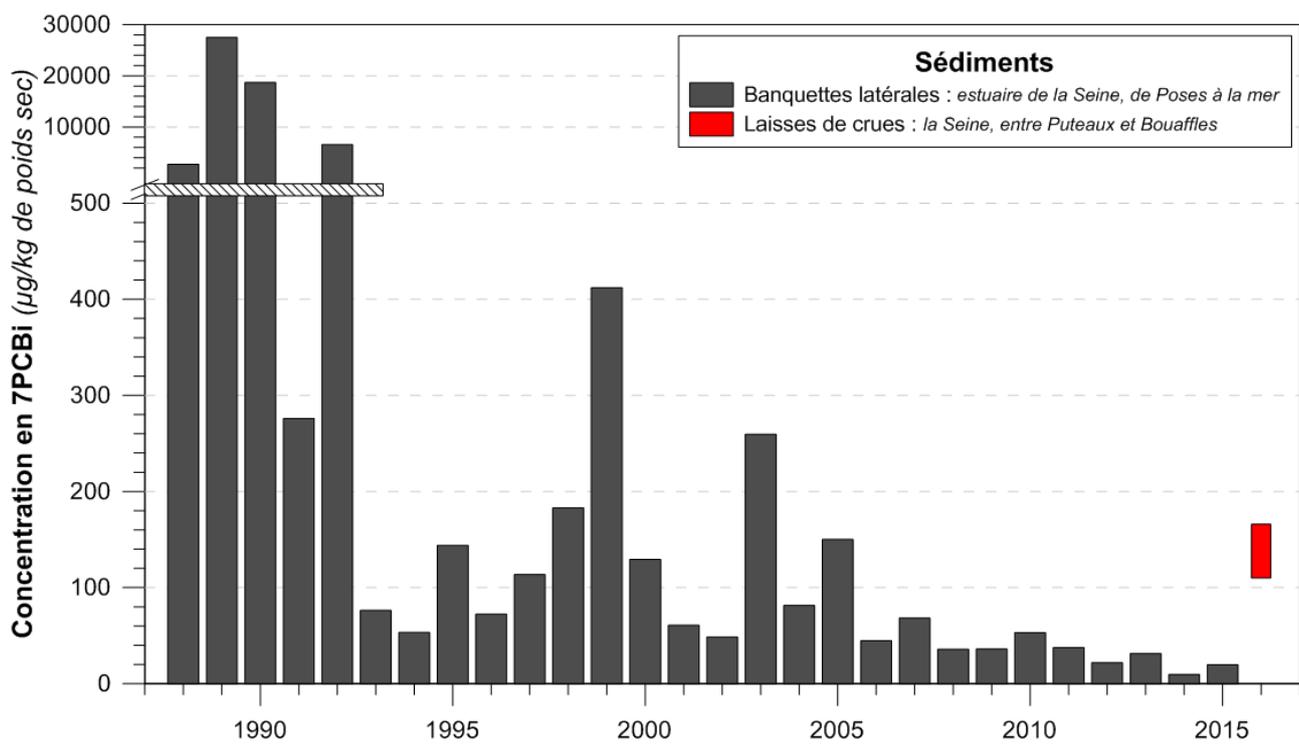


Figure 8 : Evolution des PCB indicateurs dans l'estuaire de la Seine.

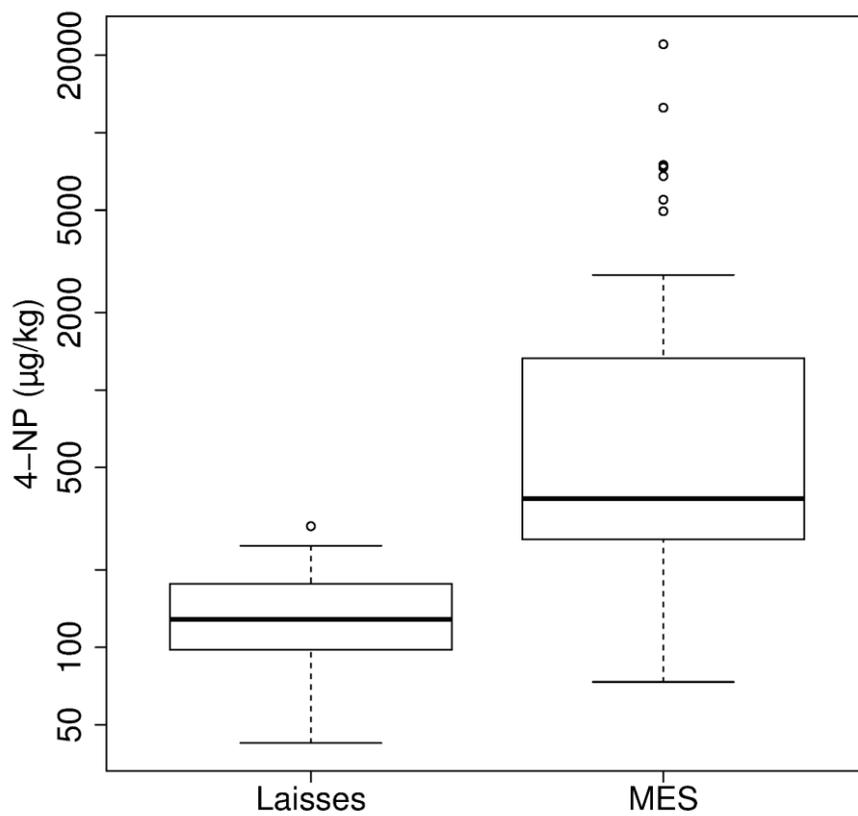


Figure 9 : Distribution du nonylphénol dans les laisses de crue et les MES de la Seine des dix dernières années

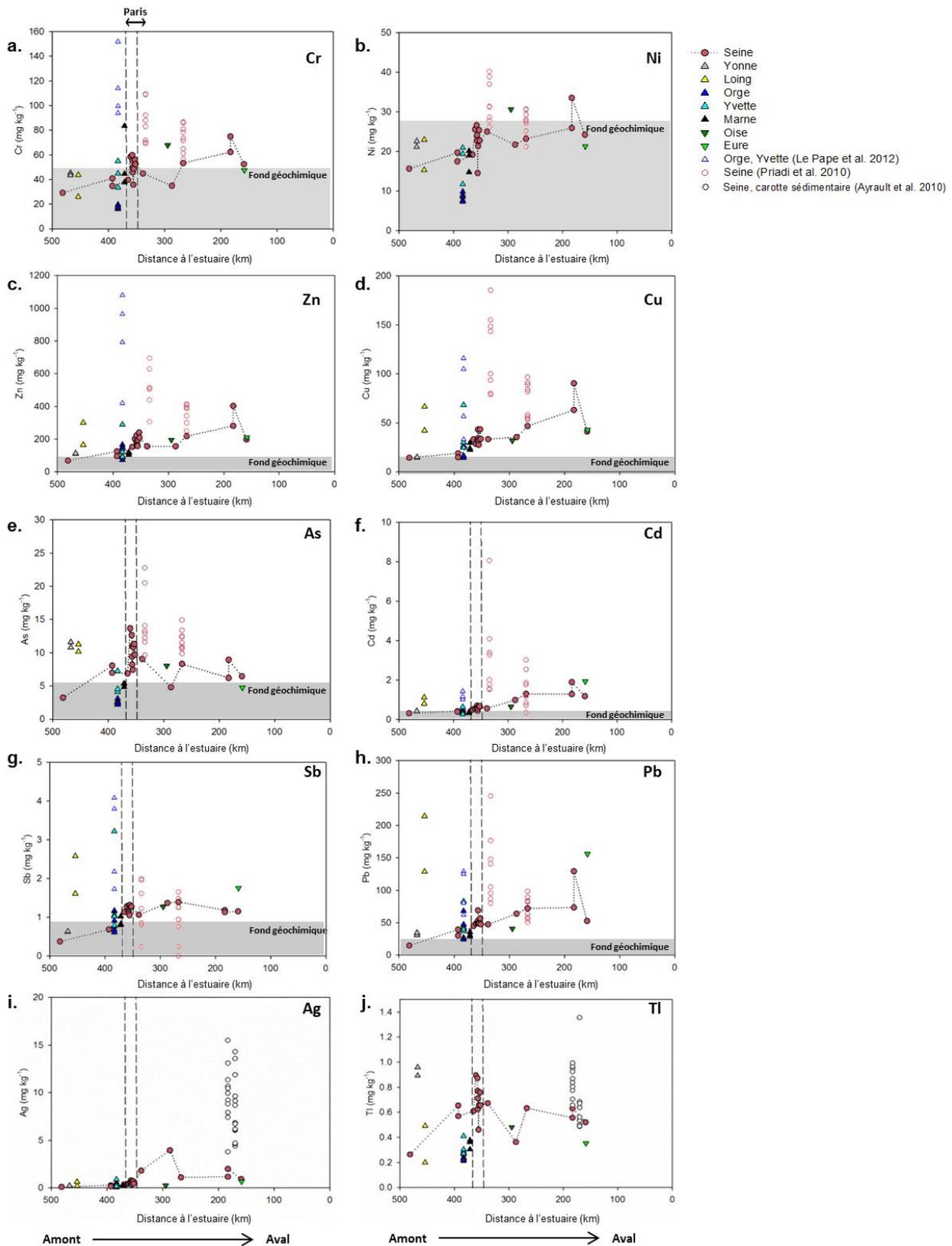


Figure 10 : Evolution spatiale des concentrations en ETM selon une direction amont-aval le long de la Seine. Les cercles pleins reliés correspondent aux laisses de la Seine et les triangles aux laisses des différents affluents.

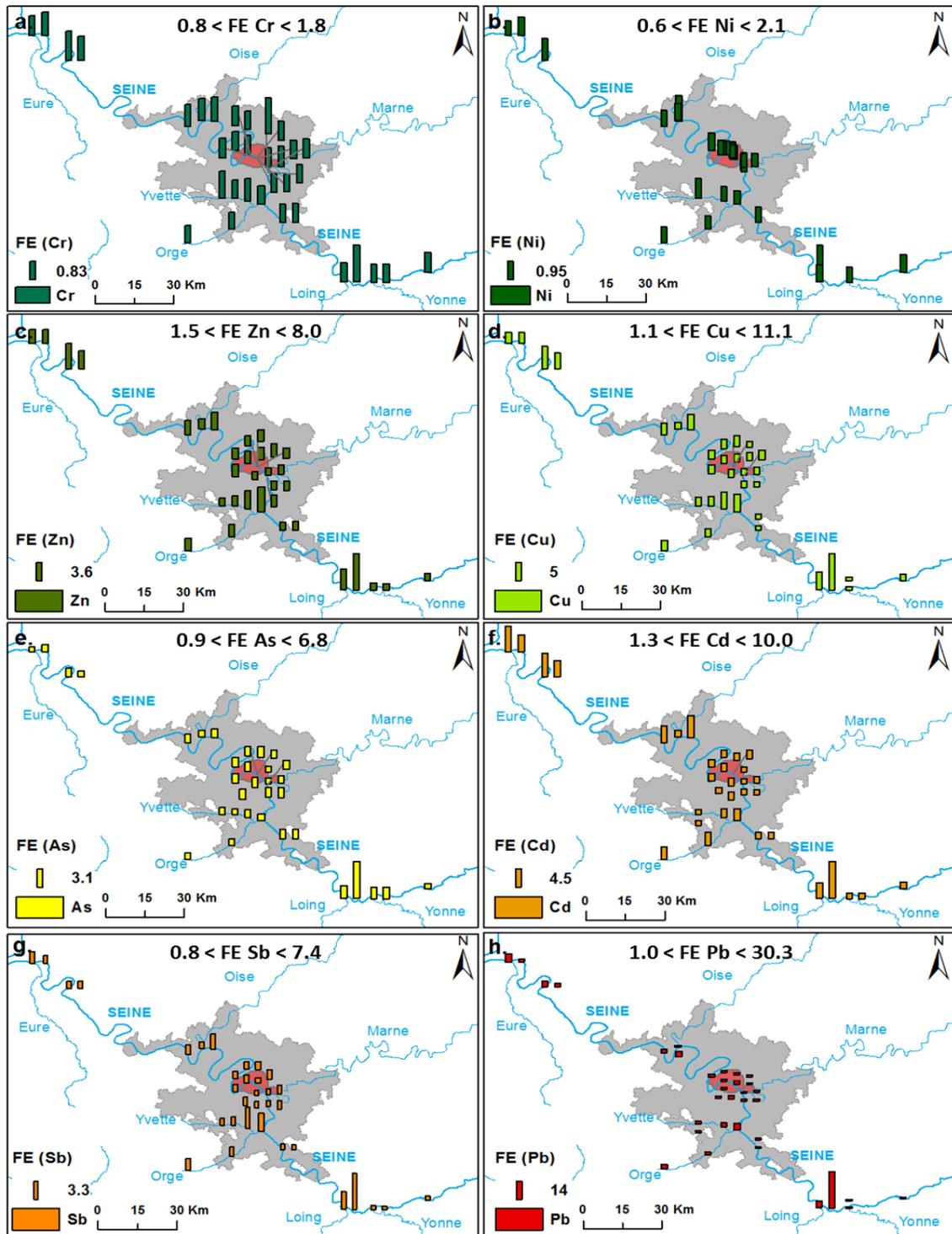


Figure 11. FE pour Cr, Ni, Zn, Cu, As, Cd, Sb et Pb estimés pour les laisses de la Seine et de ses affluents. Les FE sont calculés à partir d'une normalisation au Th. Lorsque deux laisses ont été collectées pour une même localisation les FE des deux laisses sont présentés côte à côte.  $FE < 1$  se traduit par un enrichissement ou une pollution minimal(e),  $2 < FE < 5$  se traduit par un(e) enrichissement/pollution modéré(e),  $5 < FE < 20$  se traduit par un(e) enrichissement/pollution significatif(ve),  $20 < FE < 40$  se traduit par un(e) fort(e) enrichissement/pollution,  $FE > 40$  se traduit par un très fort enrichissement ou une pollution extrême.

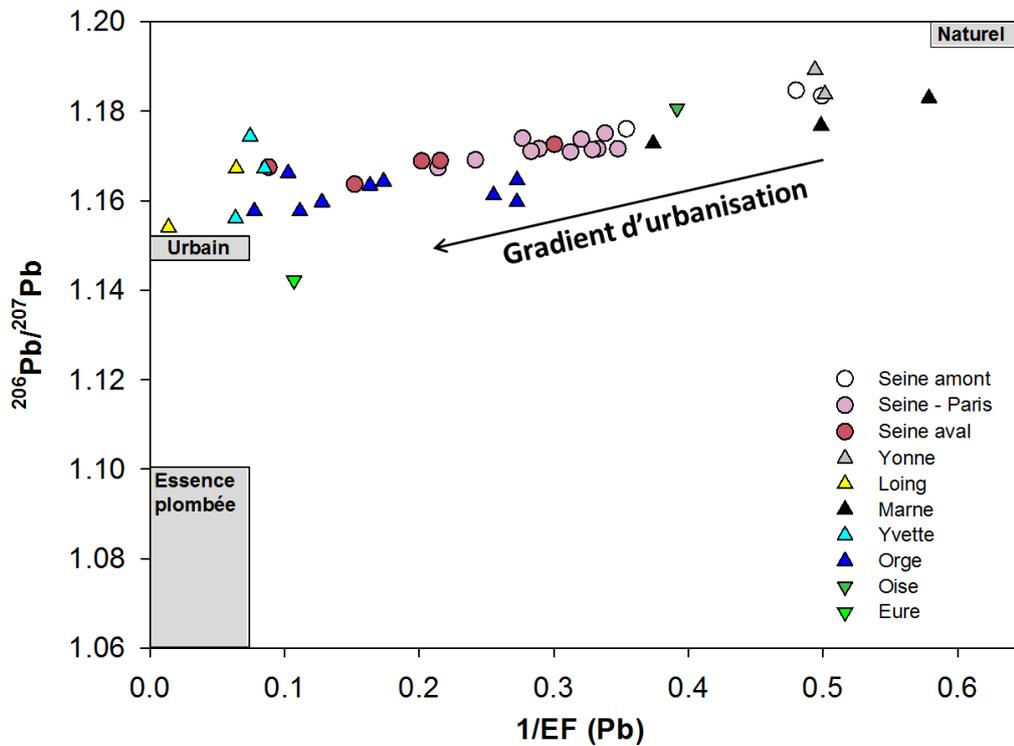


Figure 12. Variations du rapport  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  selon le rapport  $1/\text{EF}$  (Pb normalisé à Th) pour les laisses de la Seine et de ses affluents. Les trois sources de Pb sur le bassin de la Seine sont représentées : le Pb naturel (d'après Elbaz-Poulichet et al. 1986), le Pb urbain (d'après Ayrault et al., 2012) et le Pb essence (d'après Véron et al., 1999). Les rapports  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  sont utilisés pour distinguer les différentes sources de plomb (Ayrault et al., 2012). La représentation des variations du rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  des laisses en fonction de l'inverse du facteur d'enrichissement en plomb ( $1/\text{EF}_{(\text{Pb})}$ ) permet de s'affranchir de l'effet granulométrique et de pouvoir comparer directement les rapports mesurés dans les différentes laisses. A l'exception de la laisse de l'Eure, l'ensemble des signatures des laisses sont réparties le long d'une droite entre les pôles naturel et urbain, selon un gradient amont-aval. L'analyse de l'isotopie du plomb montre une signature typique de plomb urbain pour les sites les plus contaminés, en particulier le Loing. Sur l'Eure, la signature isotopique montre l'existence d'une contribution spécifique qu'on peut corrélérer à l'existence d'une ancienne usine de verre au plomb sur ce sous-bassin, usine dont l'impact spécifique a déjà été montré.

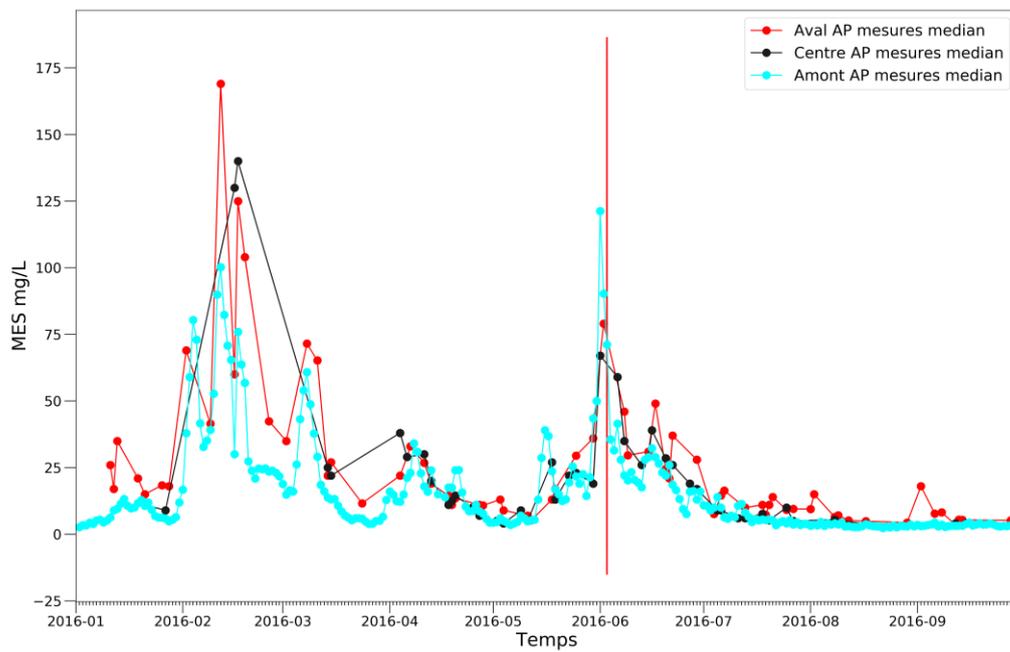


Figure 13: Teneurs en MES le long de l'axe Seine au cours de la première partie de l'année 2016. Sont présentées ici les valeurs médianes dans la partie amont de l'agglomération parisienne, sa partie centrale et sa partie aval

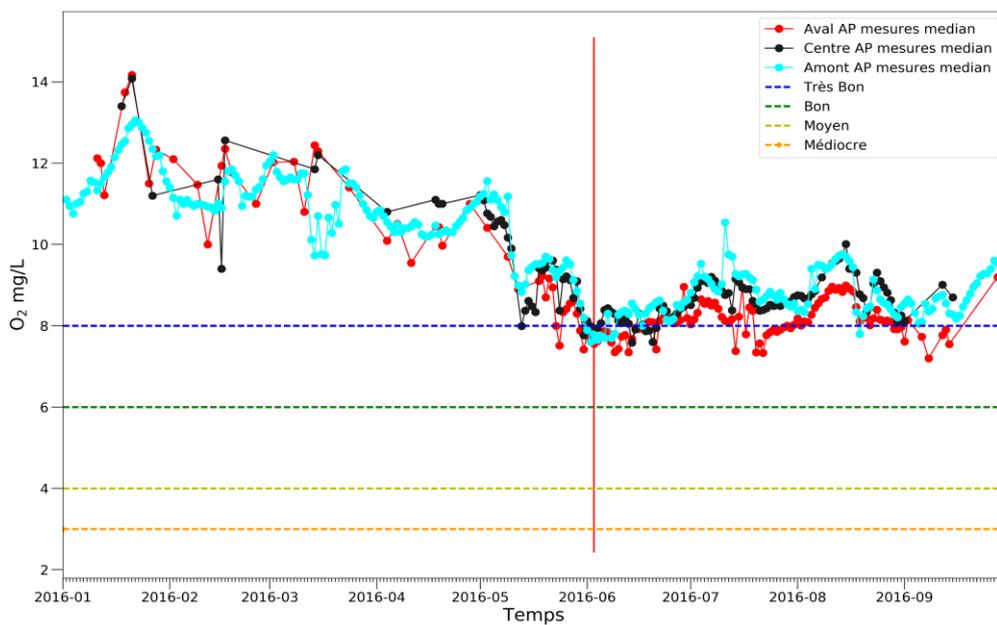


Figure 14 : Teneurs en oxygène dissous le long de l'axe Seine au cours de la première partie de 2016. Sont représentées ici les valeurs médianes observées dans les trois secteurs ; amont de l'agglomération parisienne, agglomération parisienne et aval de l'agglomération parisienne

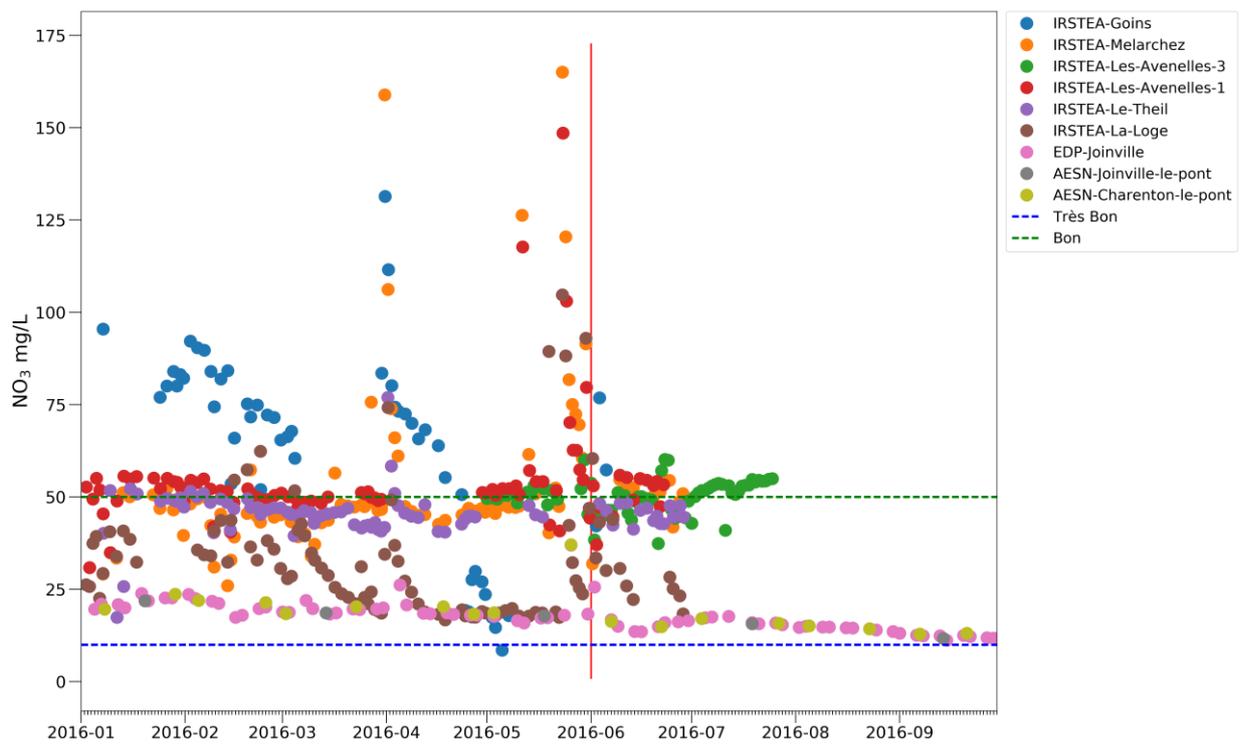


Figure 15 : Les nitrates sur la bassin de la Marne durant la première partie de l'année 2016

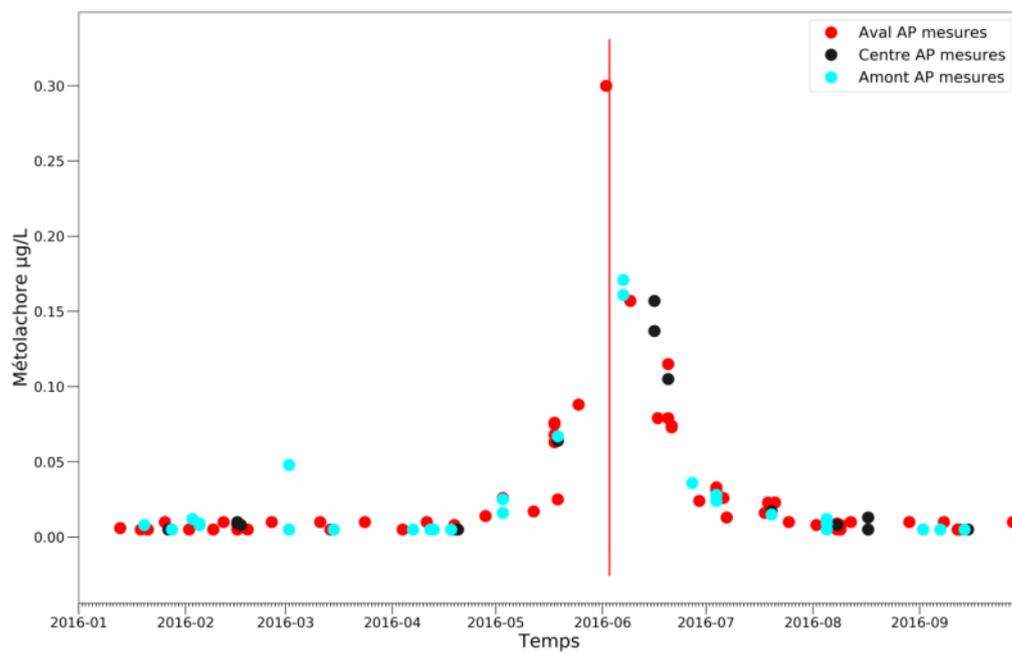


Figure 16 : Le métolachlore le long de l'axe Seine durant la première partie de l'année 2016

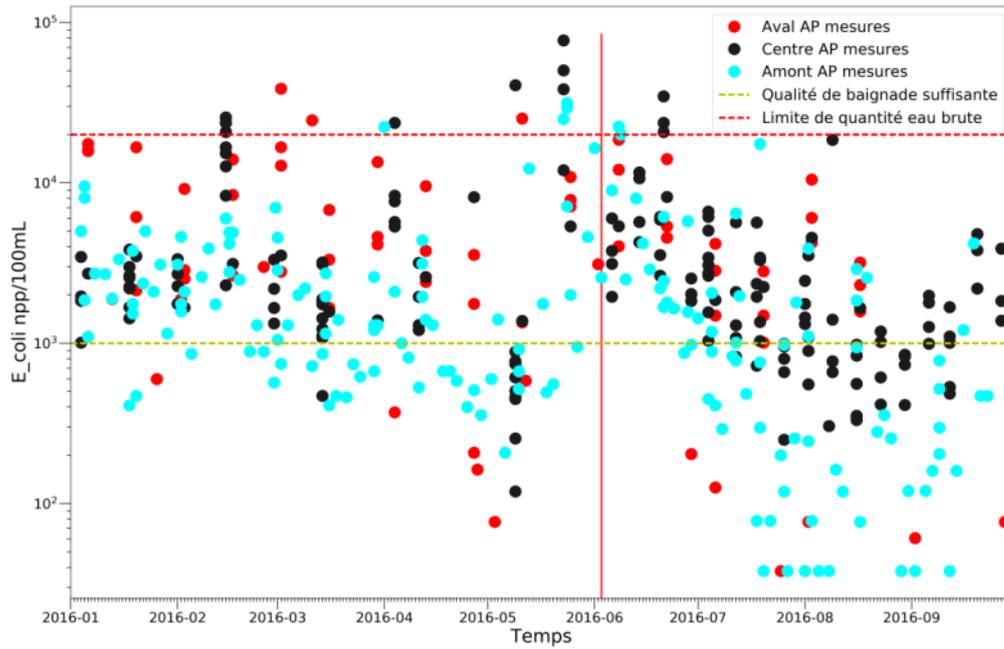


Figure 17 : Teneur en E.Coli (pour 100 ml) des les eaux de la Seine d'amont en aval pour la première partie de 2016