

LA CONTAMINATION CHIMIQUE DES SÉDIMENTS DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ÉTAT DES LIEUX ET ENJEUX DE GESTION





LA CONTAMINATION CHIMIQUE DES SÉDIMENTS DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ÉTAT DES LIEUX ET ENJEUX DE GESTION

AUTEUR

Fisson C.¹

RELECTURES ET CONTRIBUTIONS

Amara R.², Bacq N.¹, Berreville C.³, Brasselet S.³, Couteau J.⁴, Debret M.⁵, Jestin E.⁶, Labadie P.⁷,
Lemoine J.P.¹, Le Roux J.⁸, Menet F.⁹, Muntoni M.¹, Xuereb B.¹⁰

DÉCEMBRE 2023

- (1) GIP Seine-Aval, Rouen
- (2) UMR CNRS 8187 LOG, Université littoral côte d'Opale
- (3) HAROPA
- (4) TOXEM
- (5) UMR CNRS 6143 M2C, Université de Rouen
- (6) Agence de l'Eau Seine-Normandie
- (7) UMR CNRS 5805 EPOC, Université de Bordeaux
- (8) LEESU, Ecole nationale des ponts et chaussées – Université Paris Est Créteil
- (9) LER Normandie, Ifremer
- (10) UMR-I 02 SEBIO, Université du Havre

Le concept des limites planétaires définit un espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé actuellement sur neuf processus biophysiques qui, ensemble, régulent la stabilité de la planète. L'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère est la neuvième des neuf limites planétaires. En 2009, définie sous l'intitulé « pollution chimique », elle désignait les éléments radioactifs, les métaux lourds et de nombreux composés organiques d'origine humaine présents dans l'environnement [Rockström et al., 2009].

Depuis 2015 et l'élargissement de son périmètre, cette limite planétaire concerne toutes les substances chimiques ou biologiques (plastiques, médicaments, pesticides, nanomatériaux, OGM...) susceptibles d'affecter les écosystèmes, les organismes vivants et la santé. Elle est quantifiée sous forme de pourcentage de produits rejetés dans l'environnement sans test de sécurité adéquat. Elle est largement dépassée [Persson et al., 2022]. Aujourd'hui, 350 000 produits chimiques sont mis sur le marché mondial, une production multipliée par 50 depuis 1950. Environ 80 % des produits chimiques actuellement enregistrés dans le cadre du règlement européen sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques (REACH) sont utilisés sans avoir encore fait l'objet d'une évaluation de leur innocuité.

Commissariat général au développement durable, 2023

Sommaire

■	SOMMAIRE	5
■	INTRODUCTION	6
	Encart n°1 Les suivis de la matrice sédimentaire	
I	UNE DIVERSITE DE POLLUANTS PRESENTS DANS LES SEDIMENTS DE LA SEINE	9
A	Une contamination sédimentaire multiforme	9
	1. De nombreuses substances chimiques recherchées et détectées	9
	Encart n°2 De nouvelles techniques d'analyse qui élargissent le spectre de recherche	
	2. Un exemple de composés d'intérêt émergent : les perfluoroalkylés	11
	3. Une présence de microplastiques dans les sédiments	13
B	Une contamination qui évolue dans le temps	14
	1. À l'échelle de l'axe Seine	14
	2. À l'échelle de l'estuaire de la Seine	15
C	Une pression écotoxique sur la faune	17
II	DES NIVEAUX DE CONTAMINATION HÉTÉROGÈNES D'UN POINT DE VUE SPATIAL	19
A	Une contamination sous contrôle de la dynamique hydrosédimentaire	19
	Encart n°3 La normalisation de la contamination sédimentaire	
B	Un enrichissement progressif le long de la Seine	23
	Encart n°4 La dynamique des vasières intertidales	
C	Une empreinte chimique visible sur le littoral	26
	Encart n°5 Les valeurs seuils de contamination des sédiments	
III	DES RISQUES ÉCOLOGIQUES ET DES CONTRAINTES POUR LES USAGES	30
A	Un stress pour les organismes aquatiques	30
	Encart n°6 Des interdictions de pêche liées aux PCB	
	1. Un transfert trophique de contaminants à partir du sédiment	30
	2. Des impacts biologiques sur les organismes benthiques	33
B	Une contrainte pour l'entretien des chenaux de navigation	34
	Encart n°7 Exemple de biotraitement dans la Darse Babin (Rouen)	
C	Des questions pour les aménagements écologiques	37
	1. Cas de filandre du Trait	37
	2. Cas du barrage de Martot à la confluence Seine/Eure	38
■	CONCLUSION	39
■	ABRÉVIATIONS	40
■	GLOSSAIRE	41
■	BIBLIOGRAPHIE	42
■	TABLES DES ILLUSTRATIONS	46
	Liste des figures	46
	Liste des tableaux	46

INTRODUCTION

Les activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie, le transport et l'urbanisation sont responsables de l'émission dans l'environnement de contaminants chimiques et sont à l'origine de la pollution des milieux aquatiques. De nombreux polluants organiques et métalliques circulent ainsi dans les cours d'eau, sous forme dissoute ou associés aux matières en suspension. Ils peuvent alors rejoindre les estuaires, où des dynamiques hydro-sédimentaires complexes et spécifiques à ce milieu entraînent leur accumulation [Lemoine & Verney, 2015]. Les estuaires constituent ainsi des réservoirs des polluants issus des activités présentes sur leur bassin versant. Les contaminants stockés dans les sédiments peuvent être remis en suspension lors d'une crue, d'une tempête, de travaux, puis recirculer dans la colonne d'eau en association

avec les particules sédimentaires et rejoindre le milieu marin. Selon la toxicité et les teneurs des substances concernées, la contamination sédimentaire peut alors représenter un danger écotoxique pour les espèces qui vivent au contact du sédiment ou s'y nourrissent. Elles contribuent ainsi à l'accumulation de contaminants chimiques dans la chaîne alimentaire et à la dégradation de l'état de santé des organismes aquatiques. Elle peut également limiter certaines activités, comme la pêche, la production d'eau potable ou industrielle, et également contraindre des aménagements urbains, industrialo-portuaires ou écologiques menés sur des espaces en lien avec le cours d'eau.

L'estuaire de la Seine est particulièrement sensible à la contamination de ses sédiments, du fait de sa position à l'exutoire d'un bassin versant qui accueille de très



ENCART N° 1

Les suivis de la matrice sédimentaire

Les suivis sur les matières en suspension

Le suivi des matières en suspension présentes dans la colonne d'eau permet d'évaluer la contamination chimique qui transite dans le cours d'eau à un moment donné. Il est réalisé sur un échantillon d'eau qui est filtré ou centrifugé pour concentrer les matières particulaires. Dans ce cas, la mesure sera représentative d'une situation ponctuelle (lieu et moment de prélèvement), ce qui nécessite une régularité des prélèvements pour intégrer la variabilité des apports en matières en suspension. Un tel suivi a été opéré mensuellement en estuaire de Seine (Poses, La Bouille et Honfleur) pour le suivi des métaux jusqu'à la fin des années 2000, permettant notamment une estimation de leur flux [CAS, 2002]. L'échantillonnage des matières en suspension avec un piège à particule permet une intégration temporelle plus longue. Il est particulièrement intéressant pour suivre un événement particulier (e.g. crue, orage, accident) et documenter les apports associés, car il permet de constituer un échantillon intégré sur la durée de l'événement. Pour la première fois en estuaire de Seine, de tels pièges vont être déployés en 2023 et 2024 pour suivre la qualité chimique et écotoxique des matières en suspension qui transitent 1) entre Poses et la mer en condition de crue ; et 2) à l'échelle de la boucle de Rouen lors d'événements orageux [Menet & Geffard, en cours].

nombreuses et diverses activités. Bien que la qualité de l'eau se soit largement améliorée depuis les années 1980, les niveaux de contamination chimique des sédiments estuariens exercent encore aujourd'hui une pression toxique sur les organismes aquatiques (*e.g.* crustacés, annélides, poissons) et peuvent limiter l'expression de l'écosystème [Fisson, 2014]. Les niveaux de contamination sédimentaire et leur impact sur les organismes sont documentés à travers de nombreux suivis environnementaux menés par les acteurs de l'estuaire de la Seine (*e.g.* AESN, HAROPA, Ifremer) et étudiés dans le cadre du programme scientifique Seine-Aval depuis le milieu des années 1990 [Encart n°1 – Les suivis de la matrice sédimentaire]. Bien que les paramètres analysés par les réseaux de suivi et les questionnements investigués par les scientifiques aient évolués au cours du temps, la

compréhension de la dynamique des polluants et l'impact de la multi-contamination chimique sur le vivant sont restés des constantes dans l'effort de recherche et de suivi mené sur l'estuaire de la Seine.

Le présent fascicule propose une synthèse des suivis et des travaux scientifiques menés sur la contamination chimique des sédiments de l'estuaire et de la proche baie de Seine. Son contenu s'articule autour de trois questions adressées à l'estuaire de la Seine :

- 1) Quels sont les contaminants chimiques aujourd'hui retrouvés dans les sédiments [Partie 1] ?
- 2) Comment varie la contamination sédimentaire dans le temps et dans l'espace [Partie 2] ?
- 3) Comment la contamination sédimentaire impacte les usages et quels sont les risques écologiques associés [Partie 3] ?

Les suivis sur les sédiments superficiels

Les mesures de contaminants chimiques dans le sédiment superficiel permettent d'observer une donnée lissée de la contamination. En fonction des vitesses de sédimentation, de la stabilité et la dynamique hydro-sédimentaire du site (séquences de dépôt et d'érosion) et de l'intensité du phénomène la bioturbation (mélange des sédiments dû aux organismes vivants), les premiers centimètres de sédiment sont un mélange des quelques mois à années précédant leur dépôt. Ils sont donc représentatifs des apports en contaminants sur un temps plus ou moins long.

Pour la baie de Seine, un suivi de contaminants dans les sédiments marins superficiels est mené à une fréquence pluriannuelle par l'Ifremer. La relative stabilité de la couverture sédimentaire du secteur permet d'intégrer les apports en contaminants sur quelques années ; c'est pourquoi il est considéré qu'un prélèvement tous les six ou dix ans suffit à en suivre l'évolution. Ce réseau de suivi s'appuie sur 63 sites de prélèvements de sédiments en baie de Seine, deux sites en estuaire de Seine (Belbeuf, Le Trait) et un site sur la Risle maritime. Quatre campagnes ont été menées depuis le début des années 2000 : 2003, 2009, 2013 et 2019 [Figure A ; Ifremer, 2021 ; Menet-Nedelec *et al.* 2016].

Dans la partie estuarienne de la Seine, les courants et le trafic fluvial rendent les sédiments beaucoup moins stables. Des mesures annuelles sont par conséquent préconisées pour caractériser la contamination des sédiments de l'estuaire de la Seine. Un suivi annuel de la contamination sédimentaire est ainsi mené depuis 1980, sur une vingtaine de stations situées les banquettes latérales entre Poses et la mer [Figure A ; Fisson, 2020].

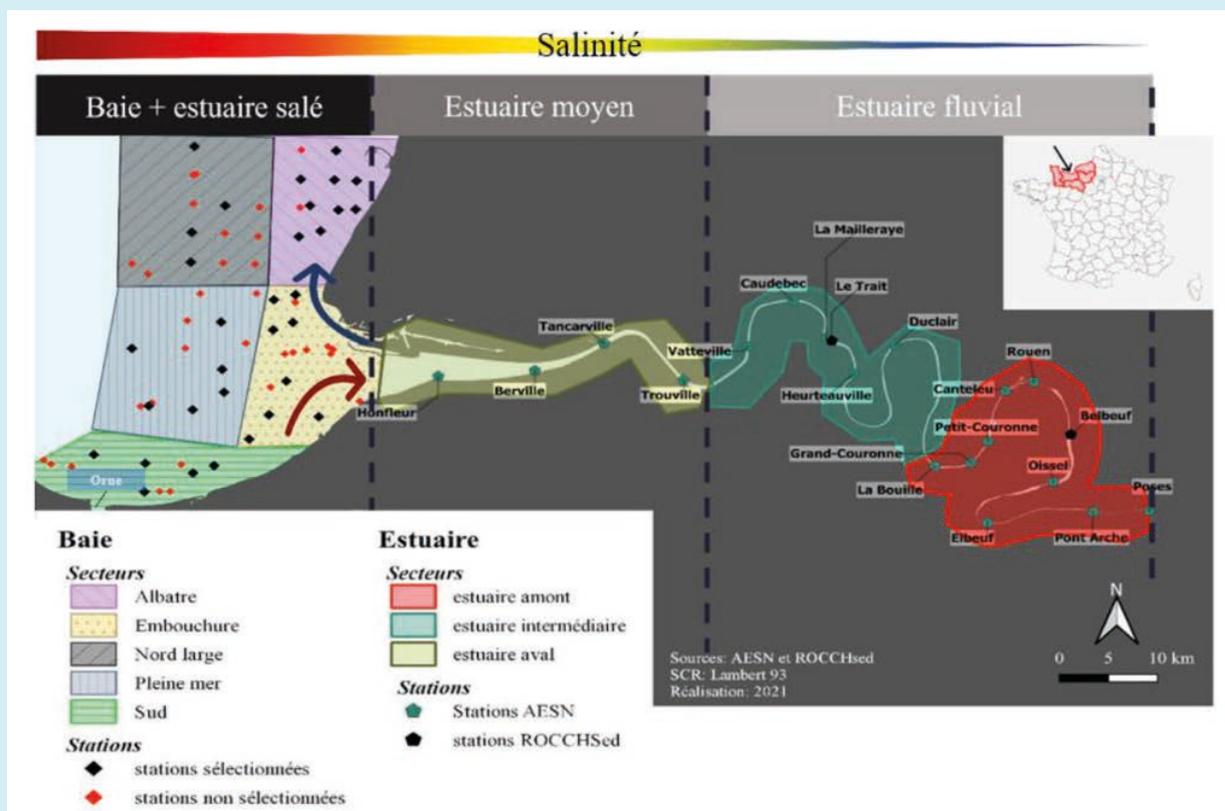


FIGURE A Stations de suivi de la contamination sédimentaire de l'estuaire de la Seine et de la proche baie de Seine.

Des campagnes ponctuelles de suivi de la qualité des sédiments superficiels sont également régulièrement menées, permettant d'explorer des aspects non traités par les réseaux de suivi pérenne. C'est par exemple le cas de mesures d'imprégnation en microplastiques [Gaspéri & Cachot, 2021], de mesures d'imprégnation en contaminants organohalogénés [Labadie, 2021], de la mise en œuvre d'analyses chimiques non ciblées [Le Roux, 2020], d'évaluation de la toxicité par des bioessais [Couteau, 2020 ; Menet & Geffard, en cours] ou encore de l'estimation de l'impact d'un rejet accidentel (incendie Lubrizol/NL-Logistique) sur la qualité des sédiments [Fisson *et al.*, 2020].

A ces suivis de la qualité du milieu, il faut ajouter les mesures de la qualité des sédiments de dragage opérés par HAROPA dans les chenaux de navigation et les accès portuaires.

Les suivis dans les carottes sédimentaires

Les sédiments peuvent conserver dans leurs couches successives toute l'histoire chimique d'une région et la réalisation de carottes sédimentaires peut permettre d'accéder à cette information et d'identifier la présence éventuelle de stocks de polluants dans les couches plus ou moins profondes. Pour les sites exempts d'apports anthropiques ou pour les niveaux antérieurs à ces derniers, ces mesures permettent également de déterminer le bruit de fond géochimique* local. En estuaire de Seine, des carottes sédimentaires ont été réalisées sur plusieurs sites d'accumulation de sédiments fins (*e.g.* étang de Martot, vasière d'Orival, Darse des Docks, Filandre du Trait), permettant de retracer les apports historiques par la Seine ou ses affluents et de quantifier les stocks de contaminants en place [Boust *et al.*, 2012 ; Gardes, 2020 ; TELLUX, 2021]. Des carottages vont également être menés sur le secteur des îles, particulièrement concerné par la problématique de la contamination historique des sédiments [Debret, en cours].

I UNE DIVERSITÉ DE POLLUANTS PRÉSENTS DANS LES SÉDIMENTS DE LA SEINE



L'estuaire de la Seine subit les rejets polluants qui rejoignent le réseau hydrographique de la Seine. La diversité des contaminants présents dans les sédiments estuariens est ainsi à l'image de la diversité des usages et des pressions qui s'exercent sur ce territoire et de leurs évolutions. Le présent chapitre propose, dans un premier temps, un inventaire des contaminants qui sont retrouvés dans les sédiments de l'estuaire. Il s'attache ensuite à montrer le lien entre l'évolution des activités et celle de la contamination sédimentaire. Enfin, il élargit l'analyse à la pression écotoxique exercée par la multi-contamination des sédiments sur les organismes aquatiques.

A. UNE CONTAMINATION SÉDIMENTAIRE MULTIFORME

1. De nombreuses substances chimiques recherchées et détectées

Depuis le début des années 1800, ce sont près de 200 millions de produits chimiques qui ont été enregistrés au niveau international. Cet ensemble est très hétérogène et englobe notamment des substances organiques, des alliages et des polymères, produits en plus ou moins grande quantité pour des usages très divers. Aujourd'hui, ce sont plus de 100 000 substances chimiques qui sont disponibles sur le marché communautaire [CAS, 2023]. Selon leurs caractéristiques intrinsèques, leur mode de production, d'utilisation et d'élimination, ces substances chimiques sont plus ou moins susceptibles de rejoindre l'environnement, notamment le réseau hydrographique. Ces quelques chiffres mettent l'accent sur l'impossible

exhaustivité de la recherche des substances chimiques dans les matrices environnementales et le besoin de priorisation pour les réseaux de suivi. Selon différents critères, dont la présence potentielle des substances dans le réseau hydrographique (en lien avec les usages) et l'évolution des capacités analytiques, les listes des substances recherchées s'enrichissent progressivement. Depuis son actualisation en 2022, la **Directive Cadre sur l'Eau considère 71 substances prioritaires à surveiller dans les sédiments** des eaux de surfaces (continentales, de transition et côtières) pour évaluer leur tendance d'évolution [Tableau I]. 87 substances pertinentes à surveiller dans les sédiments des eaux de surface continentales complètent cette liste, pour préciser leur niveau de présence et le risque associé [Légifrance, 2022]. A noter que ces listes peuvent être complétées selon les enjeux spécifiques identifiés localement.

TABEAU I Substances prioritaires à suivre dans le sédiment pour évaluer l'état chimique des eaux de surface.

HAP : Anthracène, Fluoranthène, Naphtalène, Benzo(a)pyrène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(g, h, i) pérylène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène
Métaux : Cadmium et ses composés, Mercure et ses composés, Nickel et ses composés, Plomb et ses composés,
Pesticides : DDD 44', DDE 44', DDT 24', DDT 44', Hexachlorobenzène, Hexachlorocyclohexane (alpha, bêta, delta, gamma), dicofol, Quinoxifène
Dioxines et composés de type dioxine : 1,2,3,4,6,7,8,9-Octachlorodibenzodioxine, 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzodioxine, 1,2,3,4,6,7,8-Heptachlorodibenzofurane, 1,2,3,4,7,8,9-Heptachlorodibenzofurane, 1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzo[b,e][1,4]dioxine, 1,2,3,4,7,8-hexachlorodibenzofurane, 1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzofurane, 1,2,3,6,7,8-Hexachlorodibenzo-p-dioxine, 1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzofurane, 1,2,3,7,8,9-Hexachlorodibenzo-p-dioxine, 1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzofurane, 1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzo-p-dioxine, 2,3,4,6,7,8-Hexachlorodibenzofurane, 2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofurane, 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzofurane, 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxine, Octachlorodibenzofurane, PCB 105, PCB 114, PCB 118, PCB 126, PCB 156, PCB 157, PCB 167, PCB 169, PCB 77, PCB 81, PCB123, PCB189
Diphényl ethers bromés : BDE28, BDE47, BDE99, BDE100, BDE153, BDE154, HBCDD, Alpha 1,2,5,6,9,10-HBCDD, Beta 1,2,5,6,9,10-HBCDD, Gamma 1,2,5,6,9,10-HBCDD
Phthalates : Di(2-ethylhexyle)-phthalate
Acide perfluorooctanesulfonique et ses dérivés : PFOS
Autres composés : Composés du tributylétain, Chloroalcanes C10-C13, Hexachlorobutadiène, Pentachlorobenzène

Dans les sédiments prélevés sur les banquettes latérales de l'estuaire de la Seine dans le cadre du suivi opéré par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, ce sont plus de 700 substances chimiques différentes qui sont recherchées. Réitéré annuellement sur 18 stations, ce suivi a permis de réaliser près de 80 000 analyses entre 2007 et 2019. Au côté des familles historiquement suivies comme les HAP, les PCB ou les métaux, on peut noter la recherche plus récente de retardateurs de flamme bromés, de perfluorés, de médicaments et de pesticides. Ces derniers sont d'ailleurs très nettement majoritaires en termes de substances recherchées ($n > 300$), témoin de leur diversité [AESN].

Sur les 700 substances recherchées dans les sédiments de l'estuaire de la Seine, plus de 250 ont été mesurées au moins à une reprise entre 2007 et 2019 [Figure 1]. Pour les 450 autres substances recherchées, elles sont soit indétectables, soit présentes à des teneurs inférieures aux limites de quantifi-

cation des laboratoires qui réalisent les mesures. Ces chiffres témoignent de l'**imprégnation du compartiment sédimentaire par un large spectre de substances formant un cocktail chimique aux multiples ingrédients** : des polluants historiques (e.g. métaux, HAP, PCB), mais aussi des substances d'intérêt plus émergent. Ces derniers regroupent un ensemble de familles de substances (e.g. pharmaceutiques, pesticides et métabolites, composés perfluoroalkylés, retardateurs de flamme, plastifiants, surfactants) dont l'étude de l'imprégnation environnementale est récente, du fait d'usages nouveaux ou de l'évolution des capacités analytiques des laboratoires prestataires de la surveillance environnementale. L'évaluation des risques associés à ces contaminants est souvent jugée comme insuffisamment mûre pour justifier leur intégration dans des dispositions réglementaires pour le milieu aquatique, même si leur suivi a été largement développé depuis plusieurs années.

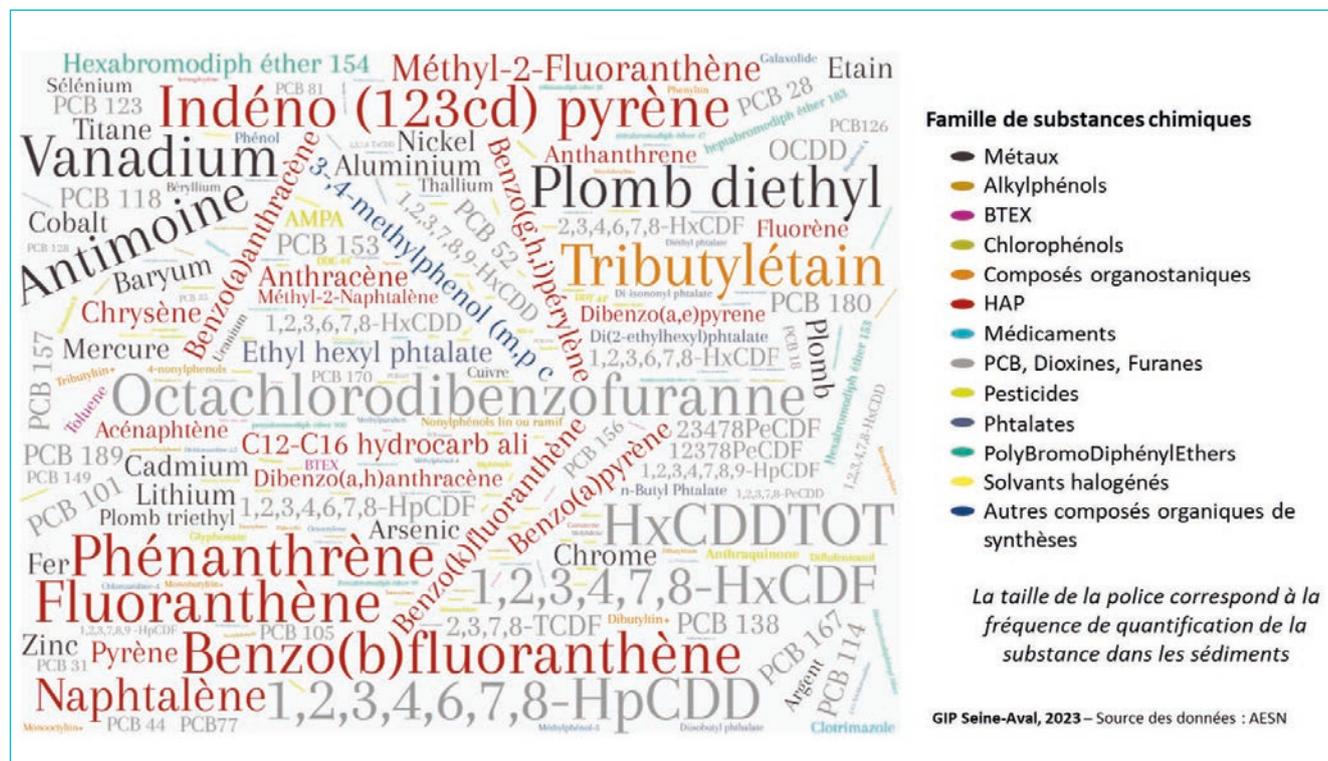


FIGURE 1 Substances chimiques quantifiées dans les sédiments de la Seine (2007-2019).

Cette présence simultanée de plusieurs contaminants est observée sur les 18 points d'échantillonnage répartis de Poses à la mer, sans évolution significative du nombre de substances quantifiées ou mesurées le long de ce transect. **Une large majorité des substances mesurées sont issues de trois familles : les métaux, les HAP et les PCB/Dioxines/Furanes** (respectivement 87, 79 et 72 % de quantification). Pour les autres familles suivies, le taux global est inférieur à

20 % [Figure 2]. En complément de ces analyses chimiques ciblées qui permettent de mesurer le niveau de contamination de substances spécifiques, des analyses chimiques non ciblées commencent à être mises en œuvre depuis quelques années pour rechercher une gamme de molécules toujours plus large et sans a priori [Encart n°2 - De nouvelles techniques d'analyse qui élargissent le spectre de recherche].

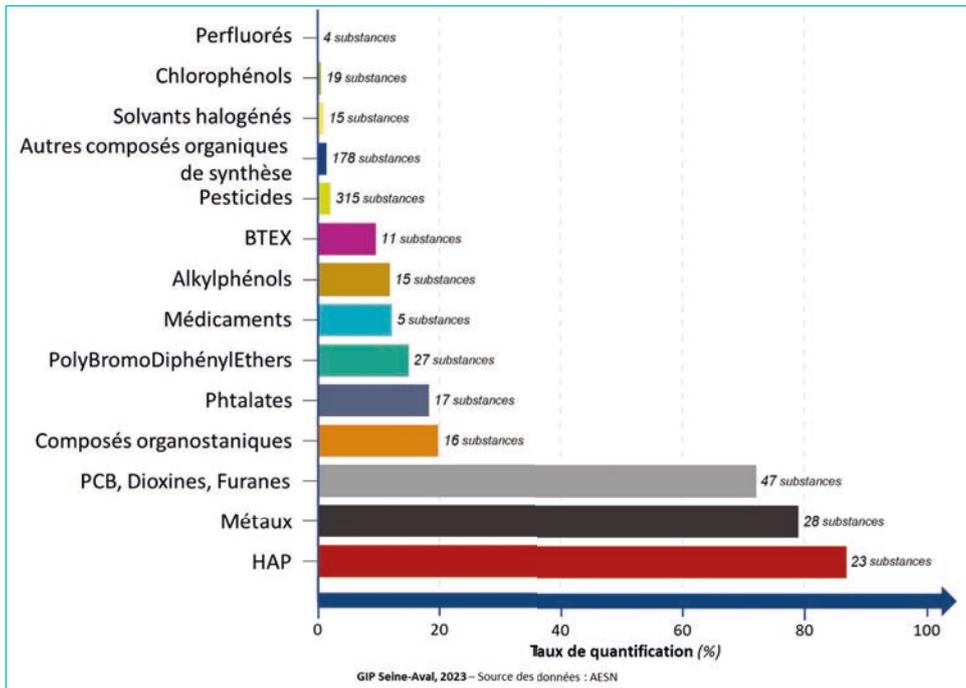


FIGURE 2 Substances chimiques quantifiées ou mesurées dans les sédiments de l'estuaire de la Seine entre 2007 et 2019.

2. Un exemple de composés d'intérêt émergent : les perfluoroalkylés

Les composés perfluoroalkylés, notamment utilisés pour les propriétés tensioactives (e.g. enduits imperméabilisants et anti-tâches pour des emballages ou des vêtements, mousse anti-incendie), ont fait l'objet de suivis spécifiques lors de campagnes menées à l'embouchure de la Seine en 2017 et 2018 et tout au long de l'estuaire en 2020. Les résultats montrent une contamination ubiquiste par les composés perfluoroalkylés à des niveaux de l'ordre de quelques µg/kg de poids sec (PS), avec notamment une présence de PFBA dans la quasi-totalité

des échantillons prélevés le long de la Seine [Carronnier, 2021]. A l'embouchure de la Seine, 31 composés perfluoroalkylés ont été recherchés, avec une imprégnation moyenne de 0,9 µg/kg PS dominée par l'isomère linéaire du PFOS [Figure 3]. A noter également la présence de retardateurs de flammes bromés (HBCDD) à une teneur moyenne de 1,1 µg/kg PS, dominés par l'isomère gamma. Cette contamination est hétérogène selon les secteurs de l'embouchure considérés et du même ordre de grandeur que celle mesurée en Gironde. Aucune évolution saisonnière n'a été identifiée, montrant une contamination diffuse en composés organohalogénés émergents à l'embouchure de la Seine [Labadie et al., 2021].

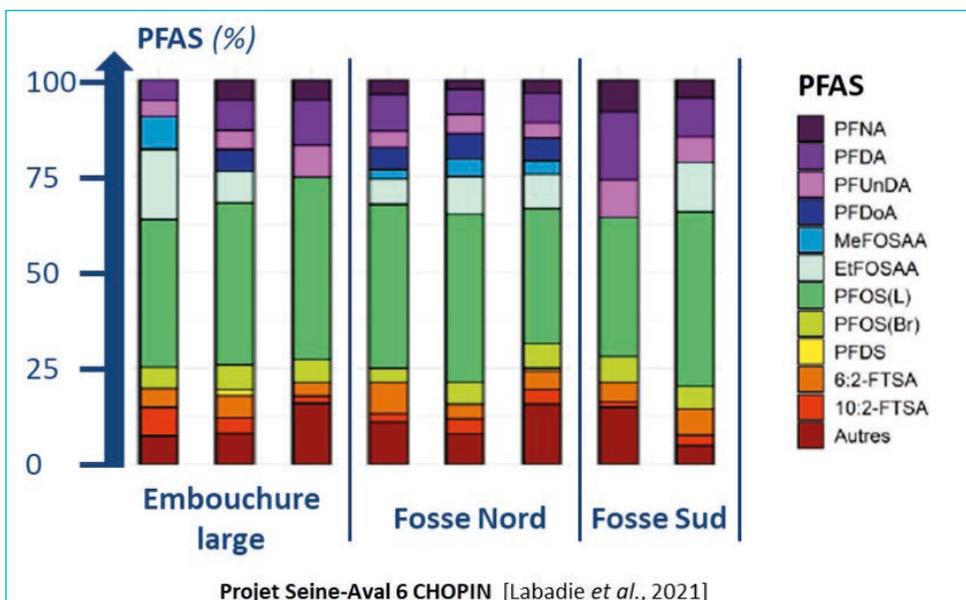


FIGURE 3 Profils de contamination en composés organohalogénés émergents dans les sédiments de l'embouchure de la Seine (campagne d'octobre 2018).

ENCART N° 2

De nouvelles techniques d'analyse qui élargissent le spectre de recherche

Les analyses chimiques non ciblées permettent de rechercher une gamme de molécules sans a priori. Elles s'appuient sur une technique de spectrométrie de masse* haute-résolution qui permet de détecter de manière non sélective des molécules d'intérêt. La grande précision des masses moléculaires mesurées pour les composés inconnus détectés permet d'avoir accès à leur composition élémentaire (formule brute) et les spectres obtenus peuvent également permettre d'identifier leur structure moléculaire [Soulier *et al.*, 2021].

Cette technique d'analyses non ciblées a été mise en œuvre sur des sédiments prélevés dans la boucle de Rouen, dans le chenal de navigation et quelques bassins portuaires en octobre 2019 dans le cadre du suivi de l'impact de l'incendie des installations Lubrizol/NL-Logistique [Le Roux, 2020 ; Fisson *et al.*, 2020]. Elle a permis d'illustrer la présence d'un très grand nombre de substances chimiques, non recherchées par les techniques de suivi conventionnel, dans les sédiments de la Seine et des bassins portuaires. De manière complémentaire, les analyses en chromatographie* liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC-MS) ne font ressortir que peu de pics spécifiques à un site de prélèvement, indiquant une contamination sensiblement homogène des sédiments de la boucle de Rouen, que ce soit directement dans la Seine ou dans les bassins portuaires. Quelques substances, notamment des composés fluorés, ont cependant été spécifiquement identifiées dans les bassins, pouvant indiquer des apports locaux. Une analyse complémentaire par chromatographie gazeuse (GC-MS) a mis en évidence un nombre de pics plus important dans les échantillons des bassins portuaires que dans l'échantillon de Seine, avec la présence de polluants spécifiques dans les bassins portuaires. Le bassin aux Bois se démarque par la présence d'une variété de molécules chimiques en plus grand nombre que dans les autres bassins échantillonnés, sans pour autant présenter les intensités absolues les plus fortes [Figure B].

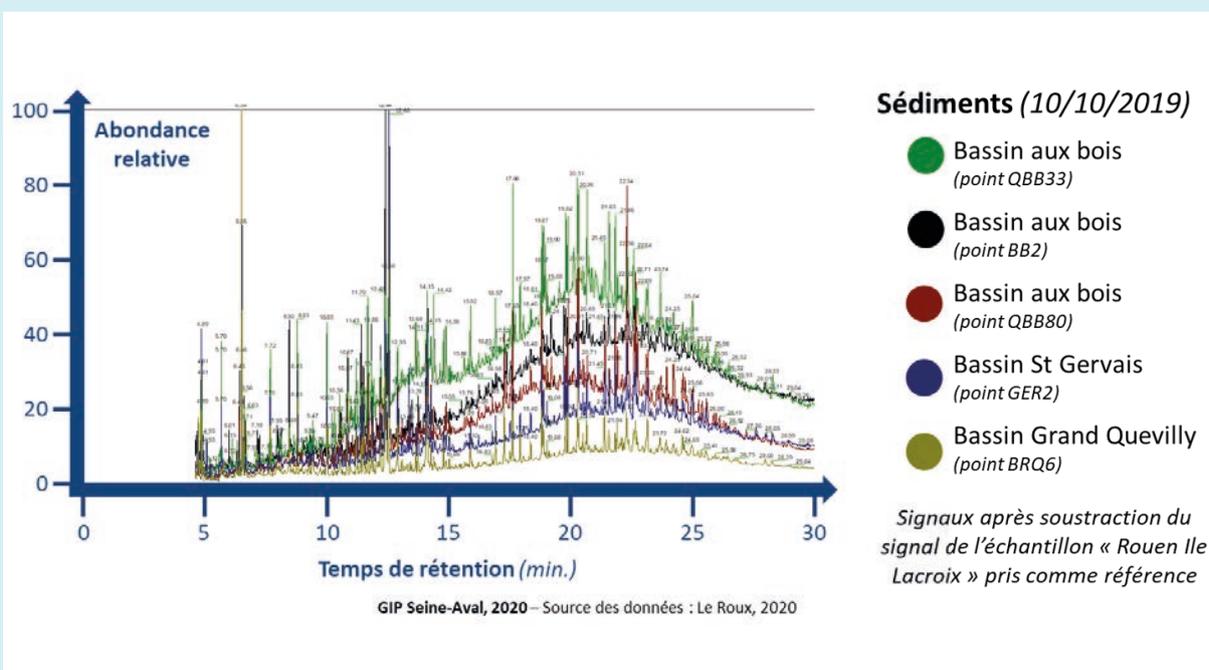


FIGURE B Chromatogrammes GC-MS de sédiments prélevés dans les bassins portuaires de la boucle de Rouen.

3. Une présence de microplastiques dans les sédiments

La pollution par les plastiques est un cas particulier de la contamination chimique des sédiments. Fabriqués à partir de pétrole brut ou de gaz naturel, les plastiques contiennent de nombreux additifs chimiques et peuvent adsorber des polluants chimiques présents dans le milieu. A ce titre, ils contribuent au cocktail de contaminants présents dans l'estuaire de la Seine. **Cette pollution plastique est omniprésente dans la Seine, avec un flux à la mer estimé entre 100 et 200 tonnes par an pour les macroplastiques** [Tramoy *et al.*, 2019]. Avant de rejoindre la mer, ils sont sous l'influence de la dynamique estuarienne qui est favorable à la constitution de zones d'accumulation de déchets. En effet, les macroplastiques connaissent des séquences d'échouage sur les berges et de remobilisation à plus ou moins brève échéance selon le niveau topographique du dépôt et la typologie de la berge. Ils sont donc en contact avec le sédiment. Au fur et à mesure de leur parcours dans le milieu, sous l'action des contraintes physico-chimiques et mécaniques, les plastiques se fragmentent progressivement en particules de plus en plus petites. Ils peuvent également s'oxyder et libérer les additifs chimiques qu'ils contiennent, mais aussi adsorber les polluants chimiques présents dans le milieu.

Par convention, les microplastiques sont définis comme les particules entre 1 µm et 5 mm. L'échantillonnage déterminant la fraction analysée, l'ensemble de cette gamme de taille n'est pas systématiquement analysé. Dans les sédiments de l'estuaire de Seine, les microplastiques supérieurs à 50 µm ont été recherchés et retrouvés à une concentration moyenne de 238 fragments, 827 microbilles et 349 fibres par kg de sédiment (poids sec). **Ce niveau de contamination en microplastiques est considéré comme modéré à fort** par rapport aux niveaux mesurés sur des sites comparables comme la Loire (38-102 fragments/kg), l'estuaire de la rivière des perles en Chine (685 fragments/kg) ou le delta de l'Ebre en Espagne (2 052 fragments/kg).

Les microplastiques de petite taille sont majoritaires, avec la fraction 50-300 µm qui peut atteindre jusqu'à 80 % des microplastiques totaux. La nature de ces microplastiques montre une prédominance du polyéthylène, du polypropylène et du polystyrène. Ce dernier polymère peut représenter jusqu'à 60 % des polymères totaux, en lien avec les fortes concentrations de microbilles observées. A noter que le site de La Roque (au voisinage du pont de Tancarville) présente des niveaux de contamination sensiblement plus élevés que les autres sites. La dynamique sédimentaire du secteur, avec la présence du bouchon vaseux, pourrait expliquer ce niveau de contamination [Figure 4 ; Gasperi & Cachot, 2021 ; Fisson *et al.*, 2021]

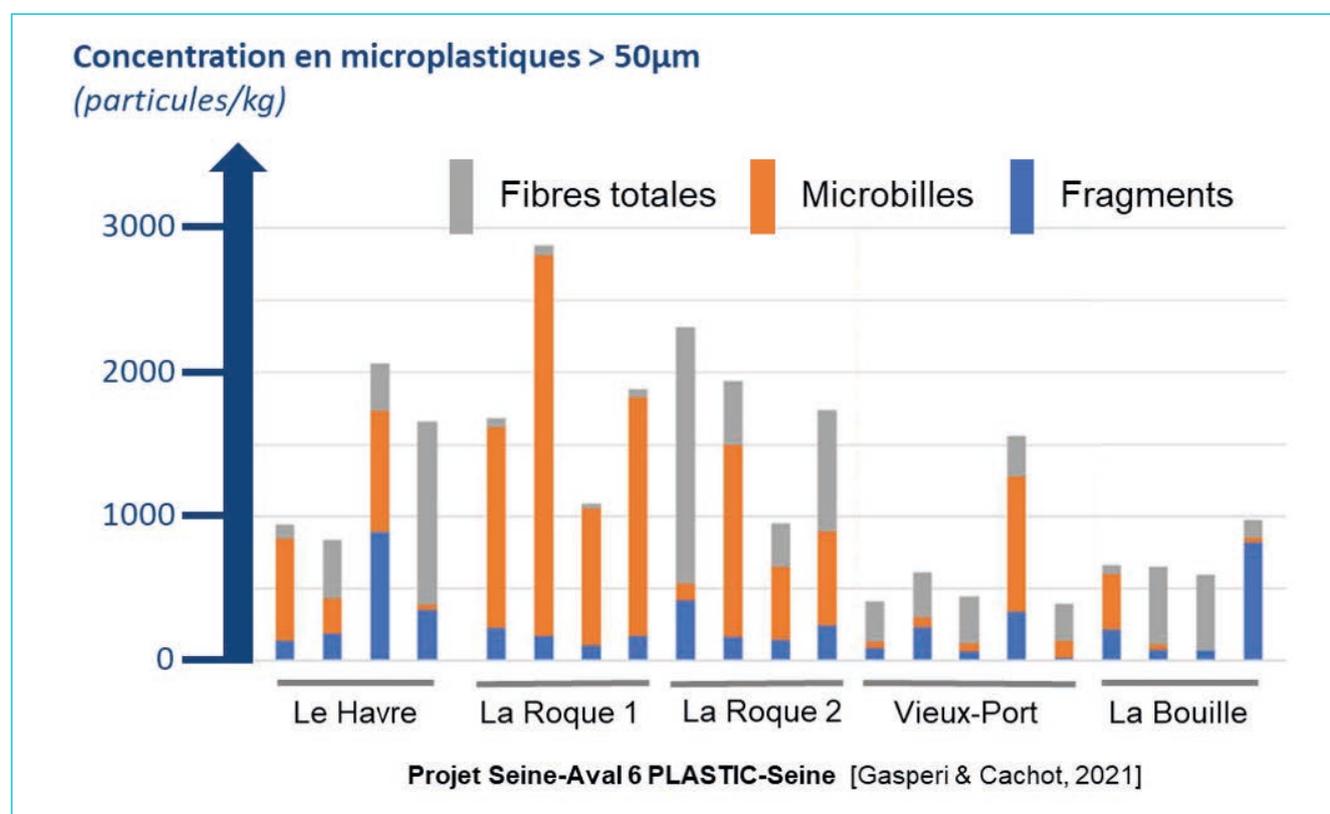


FIGURE 4 Concentration en microplastiques dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.

B. UNE CONTAMINATION QUI ÉVOLUE DANS LE TEMPS

Le bassin versant de la Seine représente une superficie de 78 600 km², soit 12 % du territoire national. 17,5 millions de personnes y vivent, particulièrement le long de l'axe Seine (Paris, Rouen, Le Havre) et des grands affluents que sont l'Aube, la Marne, l'Oise ou encore l'Yonne. Il concentre 40 % de l'activité économique du pays et 30 % de l'activité agricole. Ces activités diverses sont autant de sources de contaminants au réseau hydrographique. Au-delà de ces apports actuels, il faut considérer les rejets de contaminants peu ou pas dégradables qui peuvent remonter à plusieurs décennies et encore être présents dans les sédiments de la Seine. Les pratiques et usages anciens participent, encore aujourd'hui, à la dégradation de la qualité chimique du milieu [Fisson, 2017].

1. À l'échelle de l'axe Seine

Le lien entre imprégnation sédimentaire et usage peut être illustré par l'étude d'une famille de contaminants historiques dont les propriétés favorisent leur présence dans les sédiments, en l'occurrence les PolyChloroBiphényles (PCB). Cette famille regroupe 209 composés se différenciant par le nombre et la position d'atomes de chlore sur une molécule de biphényle. Ce sont des produits de synthèse, fabriqués en mélanges techniques plus ou moins chlorés et contenant diverses impuretés, dont les dioxines et les furanes. Etant

donné leur inertie chimique, leur résistance au feu et leur constante diélectrique élevée, ils ont été utilisés dans diverses applications industrielles (e.g. transformateurs et condensateurs électriques, fluide caloporteur, additifs aux peintures, plastiques) et ont ainsi été très largement disséminés dans l'environnement. Le niveau de contamination des PCB dans les sédiments de la Seine a connu une augmentation rapide et continue entre 1945 et 1970, avec des maximums observés au milieu des années 1970, allant jusqu'à plusieurs milliers de µg/kg. Une rapide baisse s'est ensuite opérée, du début des années 1980 jusqu'au début des années 2000. Ces niveaux de contamination sont aujourd'hui stabilisés autour de 100 µg/kg et peuvent s'expliquer par des relargages de PCB à partir de sources secondaires d'émission : sols, sédiments et aquifères contaminés par les activités urbaines et industrielles historiques [Figure 5 ; Dendievel *et al.*, 2019]. Cette dynamique est à relier à une production et une utilisation massive des PCB jusque dans les années 1980. Diverses restrictions, puis leur interdiction totale d'usage en 1987 et la mise en œuvre du Plan national PCB en 2003, ont permis de limiter et stopper les apports au réseau hydrographique, ce qui explique la baisse observée depuis une quarantaine d'années. Les apports additionnels directs dans le milieu ayant cessé, la contamination résiduelle actuelle est liée à la circulation d'un stock environnemental et à sa dilution progressive.

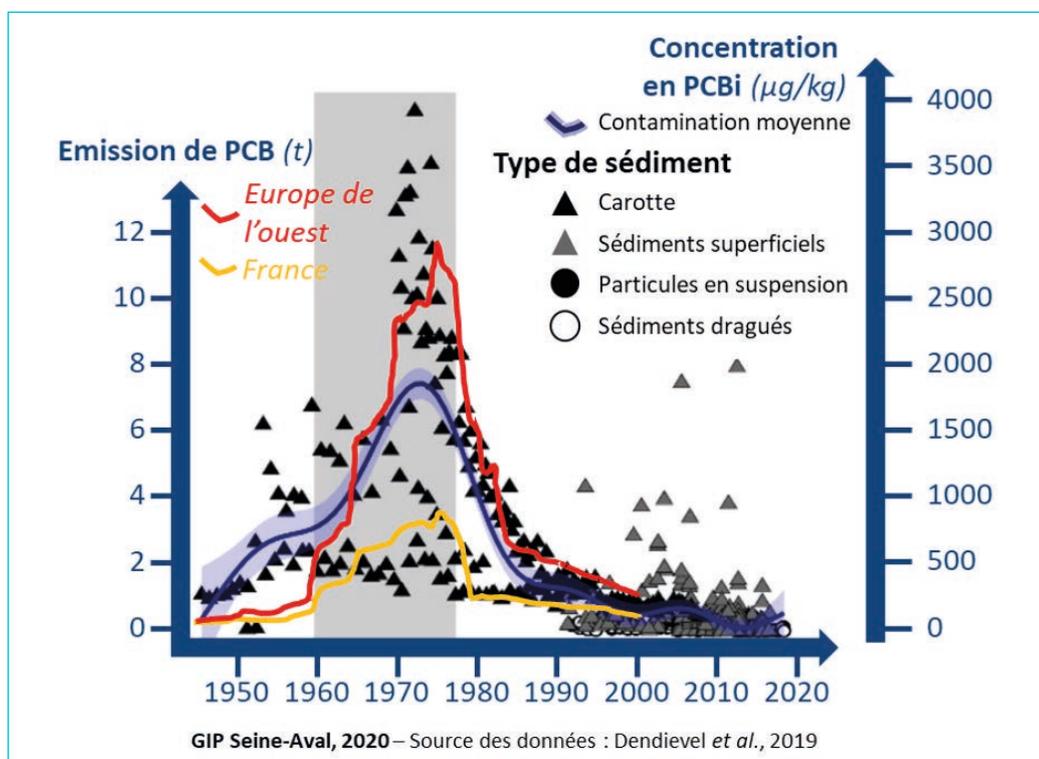


FIGURE 5 Contamination sédimentaire en PCB pour la Seine et émissions en France et Europe de l'ouest.

Ce même patron temporel est observé pour les métaux, avec une décroissance engagée dans les années 1960-70, quel que soit le secteur de la Seine considéré [Figure 6 ; Dendievel *et al.*, 2022]. Cette décroissance est à relier aux politiques environnementales européennes appliquées à l'échelle locale, avec un traitement plus efficace des eaux usées et un changement des pratiques industrielles.

2. À l'échelle de l'estuaire de la Seine

L'amélioration de la qualité chimique des sédiments de l'estuaire est ainsi très nette depuis les années 1980, avec par exemple des concentrations moyennes qui ont été divisées d'un facteur 5 à 10 pour les principaux métaux, les HAP ou les PCB. Cette décroissance forte de la pression chimique a perduré pendant une vingtaine d'années et s'est largement ralentie depuis le début des années 2000. **Les niveaux en contaminants chimiques historiques mesurés dans les sédiments estuariens de surface sont désormais relativement stables pour chacun des secteurs de l'estuaire**, sans tendance à la hausse ou à la baisse pour les différentes familles de contaminants pour lesquelles ce recul est possible. Même s'ils sont encore parfois observés, notamment dans le secteur des îles de la Seine (estuaire amont) [cf II.B], les pics de contamination sont également devenus beaucoup plus rares et moins intenses [Figure 7 ; Kaaiou-Lesage, 2021].

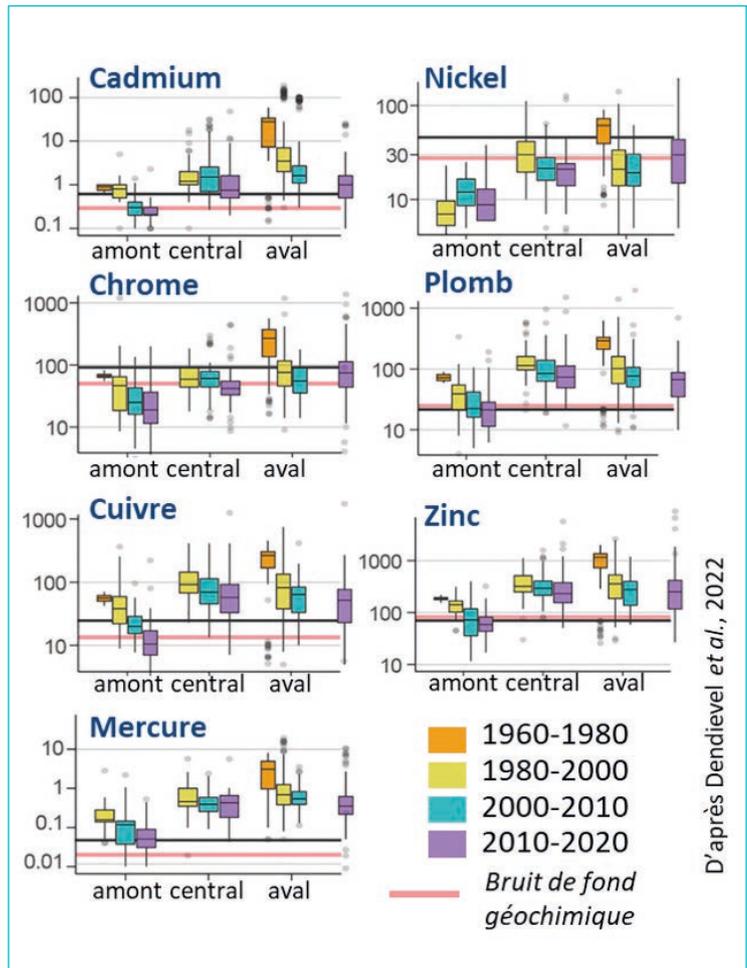


FIGURE 6 Contamination métallique (mg/kg) des sédiments de la Seine amont, central et aval.

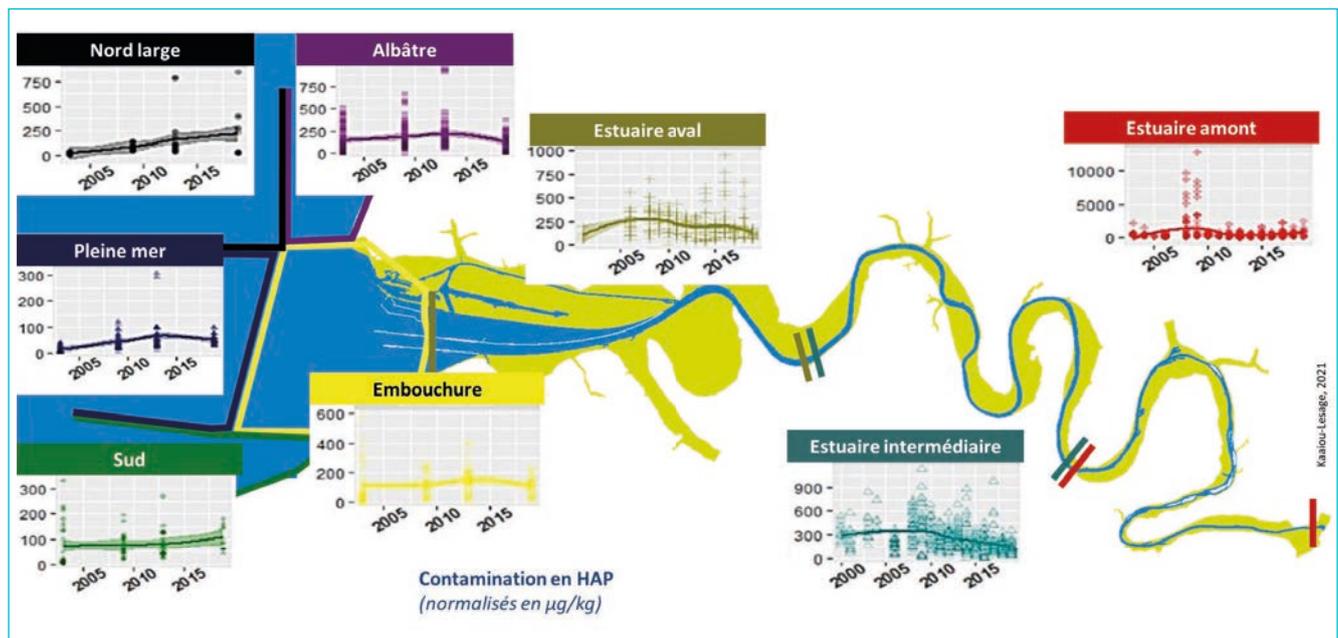


FIGURE 7 Evolution de la contamination en HAP depuis 2000, dans les sédiments de l'estuaire et de la proche baie de Seine.

D'après Dendievel *et al.*, 2022

Kaaiou-Lesage, 2021

Cette évolution favorable des teneurs en contaminants, dits historiques, est également visible via l'analyse de carottes sédimentaires qui permettent d'approcher l'évolution temporelle de la contamination chimique. De telles analyses ont été réalisées sur différentes zones d'accumulation sédimentaire en connexion directe avec la Seine (Martot, Orival, Petit-Couronne, Le Trait, Grande Vasière Nord) et mettent en évidence des teneurs élevées en contaminants chimiques (métaux, HAP, PCB, pesticides organochlorés) dans les sédiments profonds. Par exemple, pour la darse des docks (Petit-Couronne), cela concerne les sédiments présents entre 3 et 5 m de profondeur [Figure 8 ; Boust *et al.*, 2012 ; Vrel, 2012]. Cette présence de contaminants est à relier à la contamination chimique associée à la phase particulaire circulant en Seine avant les années 1980. Cette contamination historique est issue des apports du bassin versant de la Seine, du bassin versant intra-estuarien (Eure notamment) et des rejets de l'activité industrielle des boucles rouennaise et elbeuvienne sur cette même période antérieure à 1980. Ces apports internes à l'estuaire (rejets directs et apports des affluents) sont moins marqués dans les sédiments des trois premiers mètres, plus récents, qui témoignent de la baisse de la pression chimique exercée sur la Seine.

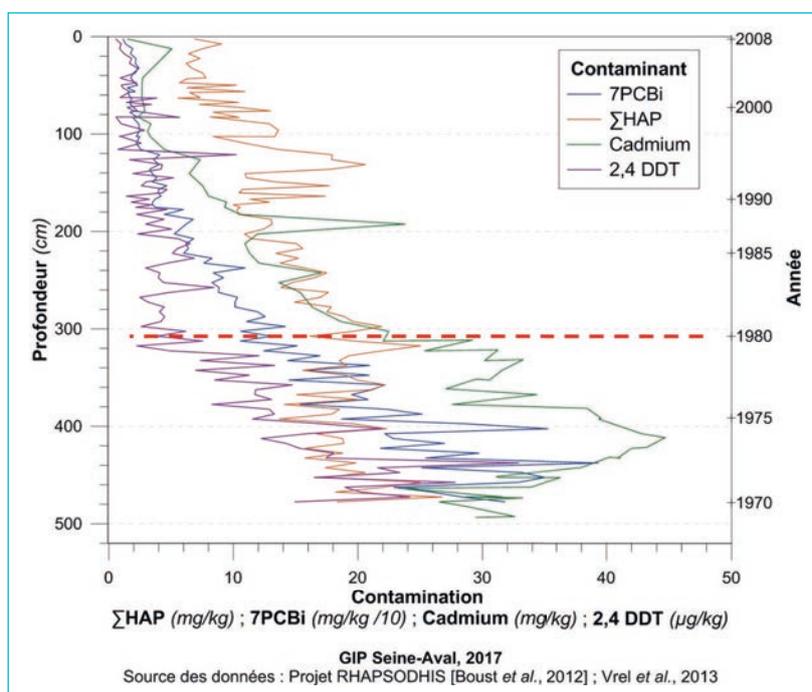


FIGURE 8 Evolution de polluants dans une carotte sédimentaire prélevée dans la Darse des Docks (Petit-Couronne).

C. UNE PRESSION ÉCOTOXIQUE SUR LA FAUNE AQUATIQUE

Au-delà de la présence individuelle des différentes substances, la problématique de la contamination sédimentaire de l'estuaire de la Seine est la présence simultanée de nombreuses substances. Ce mélange complexe exerce une pression toxique sur le milieu, qui dépend à la fois des concentrations individuelles des substances, mais aussi des phénomènes de synergie et d'antagonisme entre ces substances qui peuvent moduler le potentiel toxique de chacune d'elles. Pour évaluer au mieux la toxicité de ces matrices complexe et dépasser l'estimation d'une toxicité globale associée à la toxicité individuelle de quelques substances [Tableau II ; AESN, 2018], il est préférable de recourir à l'utilisation d'un panel de

bioessais*. Ces outils biologiques permettent de déterminer la toxicité potentielle du cocktail de contaminants présents dans des échantillons sédimentaires, en intégrant les interactions toxicologiques entre les différentes substances. Basés sur l'évaluation des activités biologiques des molécules présentes dans ces échantillons, ils peuvent mesurer différents effets biologiques délétères (e.g. génotoxicité, immunotoxicité, perturbations endocriniennes), aussi bien à court terme qu'à long terme. L'utilisation des bioessais tend à se développer dans les réseaux de suivi et permettent de compléter les suivis chimiques et écologiques.

TABLEAU II Impacts toxiques des principales familles de contaminants

Famille de contaminant	Toxicité principale
HAP	Cancérogènes, perturbateurs endocriniens
PCB	Perturbateurs endocriniens
PBDE	Troubles du développement, effets sur le foie et la thyroïde
Solvants chlorés	Intoxications, effets neurologiques
Solvants benzéniques	Cancérogènes
Chloroalcanes	Cancérogènes
Chlorophénols	Irritations, atteintes aux appareils digestifs et respiratoires
Alkylphénols	Perturbateurs endocriniens
Phtalates	Cancérogènes, perturbateurs endocriniens
Bisphénol A	Perturbateurs endocriniens
Pesticides	Cancérogènes, effets immunitaires, effet neurologiques, troubles de la reproduction
Biocides	Cancérogènes, perturbateurs endocriniens
Produits pharmaceutiques	Eventuels effets à long terme, en cas de synergie notamment

Des premières campagnes de mesures de bioessais ont été menées dès 2009 sur des sédiments prélevés tout au long de l'estuaire. Les sédiments prélevés à Poses apparaissent comme ceux qui présentent le plus fort niveau de toxicité, suivis de ceux prélevés à Oissel, La Bouille et Duclair. Les sédiments prélevés à l'embouchure de la Seine (Quillebeuf, vasière

nord) présentent un risque écotoxique beaucoup plus réduit [Figure 9 ; Cachot *et al.*, 2012]. Bien que la toxicité des sédiments varie selon les saisons et les tests utilisés, ces résultats sont en accord avec les niveaux de contamination observés en estuaire de Seine, indiquant une diminution de la pression toxique de l'amont vers l'aval [cf II.B].

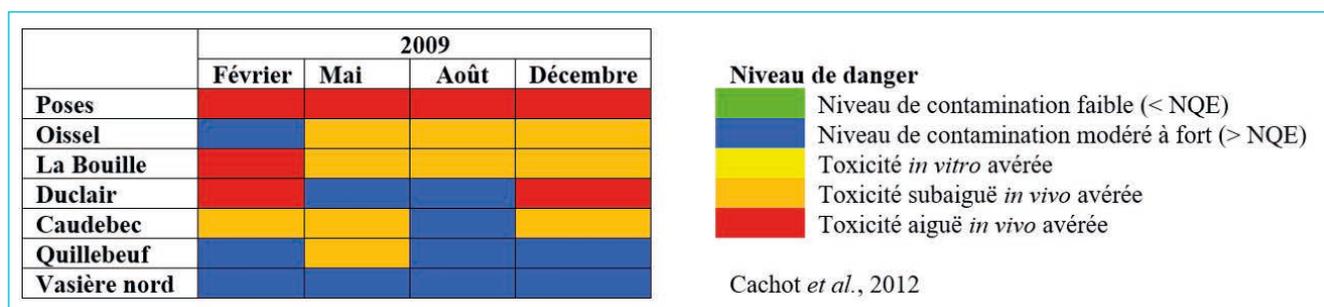


FIGURE 9 Pression écotoxique associée aux sédiments prélevés en Seine en 2009.

La vaseuse nord à l'embouchure de la Seine a fait l'objet d'un suivi particulier qui a visé à cartographier le potentiel génotoxique des sédiments de surface, en associant des tests de génotoxicité (SOS Chromotest) et une détermination des faciès sédimentaires par photo-interprétation [Figure 10 ; Couteau *et al.*, 2012]. Les résultats montrent que la génotoxicité au niveau de la vaseuse nord de l'estuaire de la Seine est associée à des faciès sédimentaires vaseux ou à dominante vaseuse. En effet, la majorité des échantillons qui présentent

une génotoxicité sont des sédiments avec au moins 90 % de particules inférieures à 63 µm, montrant que cette toxicité est principalement liée à l'adsorption des molécules organiques et des métaux à la surface des particules solides de plus petite taille et donc de plus grande surface spécifique. Cette génotoxicité observée sur les sédiments de la vaseuse nord peut être reliée à des apports en matériel particulaire par le bouchon vaseux, pour lequel une génotoxicité a également été observée.

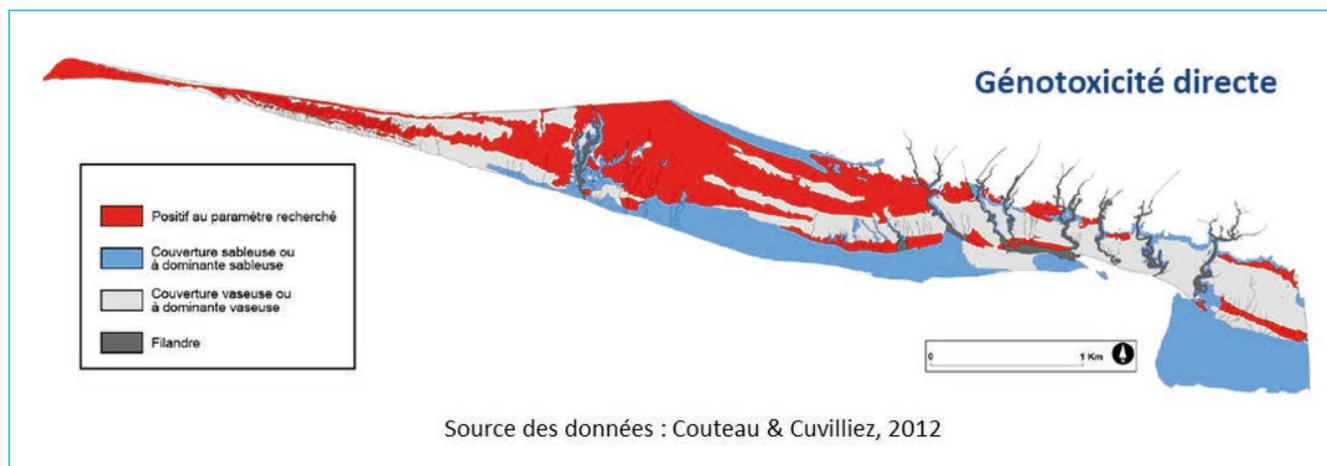


FIGURE 10 Génotoxicité directe (sans activation métabolique) dans les sédiments de surface prélevés dans la vaseuse nord en 2010.

Plus récemment, des campagnes mensuelles ont été menées entre novembre 2019 et mai 2020 sur des sédiments superficiels prélevés entre Pont-de-l'Arche et Tancarville. Les potentiels écotoxiques de ces échantillons ont été analysés par un panel de bioessais permettant d'en évaluer la toxicité globale, la génotoxicité et l'activité hormonale [Figure 11 ; Couteau, 2020b]. Les résultats indiquent la **présence d'une**

problématique écotoxologique tout au long de l'estuaire, bien qu'avec relativement peu de réponses positives élevées. La variabilité spatiale et temporelle observée ne permet pas de discriminer d'un point de vue toxicologique, ni un point de prélèvement particulier ni une période spécifique, même si les effets mesurés semblent un peu plus marqués en aval de l'agglomération rouennaise.

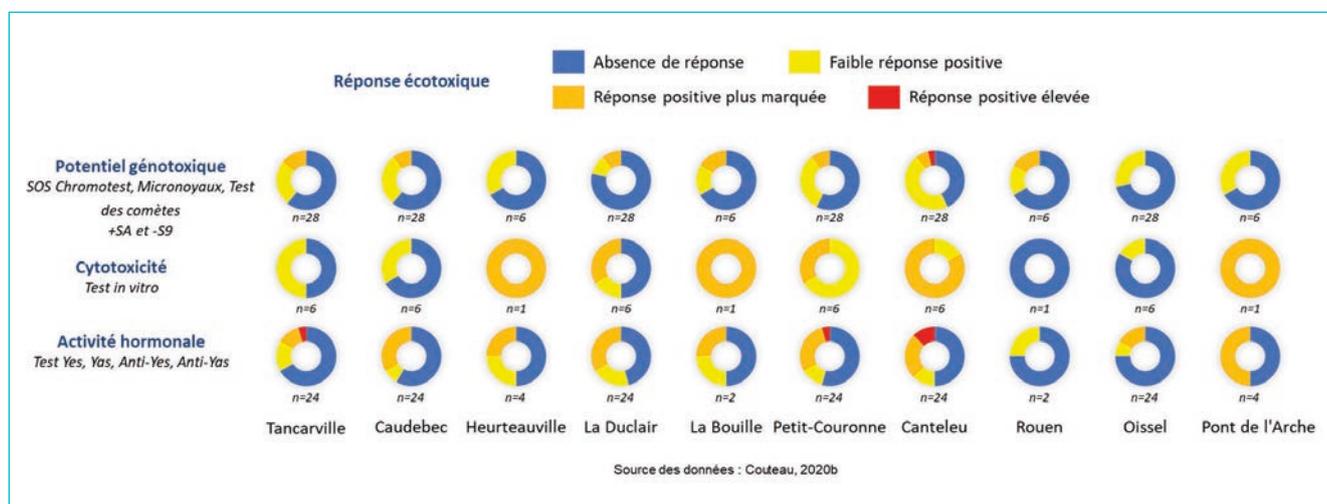


FIGURE 11 Bilan des réponses écotoxiques mesurées sur les sédiments prélevés dans l'estuaire de la Seine, entre novembre 2019 et mai 2020.

II DES NIVEAUX DE CONTAMINATION HÉTÉROGÈNES D'UN POINT DE VUE SPATIAL



Du fait de son caractère intégrateur, le sédiment est une matrice pertinente pour rechercher de nombreuses substances chimiques. La récurrence de son suivi dans le temps et sur une large emprise géographique permet d'accéder à une image spatialisée et évolutive de cette contamination. Appliquée à l'estuaire de la Seine et à la proche baie de Seine, cette approche apporte une vision des gradients de contamination actuels et cible les priorités pour la reconquête de la qualité des eaux de la Seine. En s'appuyant essentiellement sur les données acquises depuis le début des années 2000, le chapitre II s'attache à proposer une image actualisée de la contamination des sédiments de l'estuaire de Seine, en apportant les clefs d'interprétation des variations observées.

A. UNE CONTAMINATION SOUS CONTRÔLE DE LA DYNAMIQUE HYDROSÉDIMENTAIRE

La pollution des cours d'eau par les contaminants chimique provient de nombreuses sources, avec des dynamiques très diverses : rejet continu industriel ou de station d'épuration, rejet ponctuel accidentel, apport diffus par ruissellement ou dépôt atmosphérique, diffusion depuis des stocks environnementaux historiques. Une fois que ces contaminants ont rejoint le réseau hydrographique, leur dynamique est sous le contrôle du cours d'eau. Selon les propriétés physico-chimiques des substances considérées, la dynamique de ce transport est cependant différente. Les contaminants solubles ou hydrophiles circulent sous forme dissoute dans la colonne

d'eau, en lien avec l'hydrodynamisme. Les contaminants organiques hydrophobes et les métaux, pouvant s'adsorber sur les fractions fines ou organiques, sont également transportés par la fraction particulaire la plus fine. En estuaire de Seine, le transport des métaux est ainsi majoritairement assuré par la phase particulaire, avec une moyenne de 92 %, 79 % et 76 %, respectivement à Honfleur, La Bouille et Poses [Tableau III ; CAS, 2002]. C'est également le cas pour des composés organiques hydrophobes comme les HAP, les PCB ou des pesticides organochlorés.

TABLEAU III Proportion (%) de métaux transportés par les matières en suspension.

	Honfleur (%)	La Bouille (%)	Poses (%)
Cadmium	79.8	65.4	63.5
Cobalt	92.3	65.0	65.8
Chrome	97.5	75.8	80.7
Mercure	96.1	90.7	88.0
Nickel	71	34.2	28.9
Plomb	97.9	92.8	90.8
Cuivre	89.5	75.3	70.0
Zinc	85.9	73.4	61.6
Titane	99.7	97.7	96.4
Vanadium	94.4	72.8	59.0
Fer	99.8	98.8	98.9
Manganèse	97.7	91.4	89.8
Aluminium	99.8	99.1	98.9

Les contaminants sont donc présents dans le milieu dans différentes phases (dissous / particulaire), dont l'équilibre dépend des conditions physico-chimiques du milieu (pH, potentiel d'oxydo-réduction, salinité). **En milieu estuarien, ces paramètres fluctuent et contrôlent une partie de la variabilité spatio-temporelle de la contamination particulaire.** Pour les métaux, s'ajoutent les phénomènes liés à l'augmentation de la compétition ionique exercée par les ions chlorures et l'augmentation du potentiel redox lié à la remise en suspension des particules qui vont favoriser la désorption des ions métalliques et leur dilution dans le compartiment marin. Par exemple, le cadmium particulaire passe sous forme dissoute quand la salinité augmente ; ce phénomène pouvant participer à la baisse des teneurs observées dans les sédiments d'embouchure par rapport aux sédiments fluviaux. A l'inverse, la solubilité de micropolluants organiques, notamment les HAP, peut diminuer quand la salinité augmente, avec un relargage vers les matières en suspension [Tremblay *et al.*, 2005].

A cette variation des conditions du milieu, il faut également considérer **les caractéristiques granulométrique et minéralogique du sédiment qui conditionnent son aptitude à adsorber les contaminants chimiques** présents

dans le milieu. Selon la nature et la composition du sédiment (granulométrie, part de fraction organique et argileuse), les teneurs en contaminants associés varient, de manière indépendante aux apports en contaminants [Tableau IV]. En effet, la fraction fine des sédiments riche en argiles et en matière organique, a la faculté de retenir les métaux et des composés organiques, comme les HAP, les PCB, les dioxines/furanes, les PBDE ou encore les perfluorés. Ainsi, les métaux ont une affinité particulière pour les sédiments fins, car à masse égale, la surface disponible pour adsorber des métaux est plus importante pour des particules fines que pour des particules plus grossières. La minéralogie du sédiment joue également sur cette répartition, soit du fait d'une présence naturelle plus importante pour tel ou tel minéraux, soit de par sa composition chimique qui peut lui conférer des capacités de fixation particulière pour un métal donné. Les contaminants organiques sont eux principalement influencés par la présence de matière organique pour laquelle ils ont une forte affinité. Ces paramètres géochimiques doivent ainsi être mesurés et pris en compte dans l'interprétation des résultats, via leur normalisation [Encart n°3 – La normalisation de la contamination sédimentaire].

TABLEAU IV Paramètres généraux mesurés pour caractériser la nature du sédiment.

Caractéristique du sédiment	Paramètre mesuré
Granulométrie (dont part de la fraction de particules de diamètre inférieur à 63 µm)	Pourcentage (en poids) de chaque classe granulométrique
Nature calcaire du sédiment	Teneur en carbonates (en % CaCO ₃)
Part de la fraction organique	Teneur en carbone organique (en g/kg PS)
Part de la fraction argileuse	Concentration en aluminium, manganèse, lithium, fer (en g/kg PS)
Humidité du sédiment	Pourcentage de matière sèche (en %)

La fraction particulaire, composée de matières en suspension auxquelles s'adsorbent certains contaminants, se déplace dans la masse d'eau en mouvement. Selon l'intensité des courants, cette fraction particulaire peut être en suspension dans la colonne d'eau ou bien reposer sur le fond du cours d'eau ou en berge, mais elle est fréquemment remobilisée. Dans tous les cas, elle est disponible pour le biote et participe à l'exposition

des organismes aquatiques aux contaminants qu'elle contient. Selon la taille des particules et l'intensité du courant, cette fraction particulaire peut se déposer de manière plus durable au fond du cours d'eau ou sur les zones latérales, formant une masse sédimentaire moins mobile que la phase circulante [Figure 12 ; Lemoine & Verney, 2015].

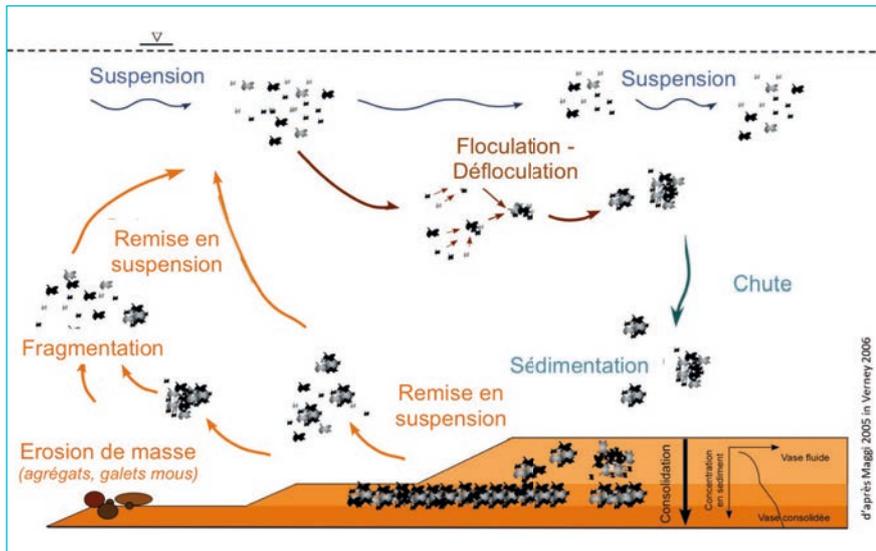


FIGURE 12 Dynamique des matières en suspension en estuaire.

Les sédiments immobilisés dans des structures sédimentaires stables assurent un stockage des contaminants qu'ils contiennent. Plusieurs formations sédimentaires répondent à cette définition : 1) les couches moyennes à profondes des vasières subtidales et intertidales formées par une accumulation de sédiments fins dans des zones de ralentissement des courants (*e.g.* bras morts, annexes hydrauliques, bassins portuaires) ; et 2) les zones d'accumulation sédimentaire naturelles ou remblayées avec des sédiments de la Seine, aujourd'hui isolées du lit mineur par un endiguement. Du point de vue de la contamination, un intérêt particulier concerne les sites d'accumulation de sédiments fins constitués dans les années 1950 à 1980. En effet, les sédiments circulant dans la Seine durant cette période étaient marqués par la pollution intense du cours d'eau dans ces années. Les sédiments qui se sont déposés dans la Seine à cette époque présentaient de fortes contaminations (*e.g.* métaux, HAP, PCB) et cette dernière peut encore être présente aujourd'hui dans le cas où les sédiments concernés sont restés immobilisés depuis [cf I.B.2]. **Une vingtaine de sites potentiels de stocks de contaminants ont été identifiés en estuaire de Seine,**

correspondant à des zones comblées entre les années 1950 et 1980. Ces stocks de contaminants peuvent être présents dans le lit mineur de la Seine (*e.g.* ancien bras morts comblés, zones d'accumulation sédimentaires) ou bien en arrière de berges (*e.g.* zones remblayées avec des sédiments contaminés, sites et sols pollués). Ils sont surtout présents entre Poses et Rouen (*e.g.* bras de Freneuse, bras d'Orival, darse de Oissel, darse des Docks), mais aussi en aval de Duclair. [Figure 13 ; Fisson, 2017 ; Houlemare, 2017]. Bien que considérés comme immobilisés, ces sédiments peuvent être remis en circulation lors d'un événement hydro-météorologique majeur (*e.g.* crue, tempête) ou lors d'une intervention anthropique (*e.g.* aménagement, opération de dragage/clapage) qui remet en suspension le matériel sédimentaire et les contaminants associés. **Cette remobilisation potentielle se trouve renforcée dans le contexte de changement climatique,** avec des modifications du fonctionnement hydrologique de la Seine (intensité des crues, durée et intensité des étiages) et des conditions marines (fréquence et intensité des tempêtes) qui pourraient conduire à une augmentation de la sensibilité à l'érosion de ces stocks.



FIGURE 13 Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine.



ENCART N° 3

La normalisation de la contamination sédimentaire

La composition du sédiment peut être extrêmement différente d'un site à un autre et peut entraîner une variabilité importante des teneurs en micropolluants, de manière indépendante aux apports en contaminants. Il est donc nécessaire de tenir compte de ce facteur, lorsque cela est possible, afin de pouvoir comparer dans le temps et l'espace les mesures en contaminants.

Dans un premier temps, il est nécessaire de mesurer les teneurs en contaminants uniquement sur la fraction fine des sédiments (particules inférieures à 2 mm). En cas d'absence ou de faible représentation de cette fraction fine (moins de 20 % de particules fines inférieures à 63 µm), l'intérêt de l'analyse peut être remis en cause et le diagnostic de l'état chimique ne peut être mené [Grouhel *et al.*, 2022 ; Chiffolleau *et al.*, 2003]. Dans un second temps, la teneur en contaminant est rapportée à celle d'un élément adsorbé sur la fraction fine et non soumis aux pressions anthropiques (c'est-à-dire rejeté de façon négligeable par les activités humaines) : pourcentage de fraction fine (< 63 µm) ou concentration en aluminium pour les métaux ; carbone organique pour les contaminants organiques et le mercure. Les échantillons dont les valeurs sont supérieures à une valeur de référence sont alors considérés comme anormalement enrichis. Une autre technique consiste à tracer les concentrations mesurées pour un contaminant donné, en fonction du paramètre normalisateur. Les échantillons qui sortent significativement de la régression sont alors considérés comme anormalement enrichis. Ces deux techniques permettent de comparer plusieurs échantillons en s'affranchissant de ses caractéristiques intrinsèques et d'identifier ceux dont la teneur en contaminant ne s'explique pas uniquement par les caractéristiques intrinsèques du sédiment [Figure C]. Ce processus de normalisation des données de contamination chimique est classiquement mené pour aider à l'interprétation des données acquises en estuaire et baie de Seine, notamment pour appréhender leur dynamique spatiale et temporelle.

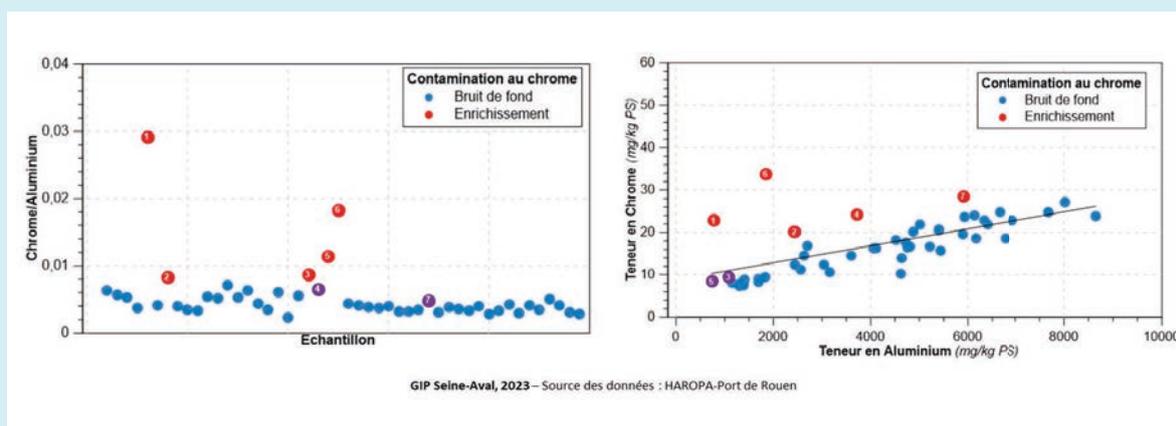


FIGURE C Normalisation de la contamination en chrome pour des sédiments prélevés dans le chenal, à l'embouchure de la Seine (2018-2020).

B. UN ENRICHISSEMENT PROGRESSIF LE LONG DE LA SEINE

Afin d'avoir une image spatialisée de la contamination chimique à l'échelle du bassin de la Seine, les données issues des divers suivis de la qualité des sédiments ont été mobilisées. Cette méta-analyse s'appuie sur les données de contamination, essentiellement en métaux et en PCB, issues de mesures sur des carottes sédimentaires, des sédiments de surface, des matières en suspension et des sédiments dragués. L'analyse de ces données montre une augmentation des concentrations à l'aval des principales aires urbaines et industrielles (notamment troyenne, parisienne et rouennaise), quelle que soit la période considérée. **Le développement industriel et urbain le long de la vallée de la Seine au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle a ainsi largement détérioré la qualité chimique des sédiments du fleuve, avec un enrichissement marqué pour de nombreuses substances.** Un gradient croissant est ainsi

observé de l'amont vers l'aval de la Seine, à l'image des PCB pour lesquels les concentrations sont plutôt faibles en amont de Paris, puis augmentent progressivement de Paris à Rouen, secteur où des points chauds présentent des concentrations parfois extrêmes. Ces concentrations diminuent alors en allant vers l'embouchure [Figure 14 ; Dendievel *et al.*, 2019]. Quelle que soit la période considérée, ce même gradient est observé pour la contamination métallique des sédiments de la Seine, avec 1) des concentrations croissantes de l'amont de Paris jusqu'à la partie amont de l'estuaire ; puis 2) des concentrations qui baissent de Rouen à l'embouchure de la Seine [Figure 6 ; Dendievel *et al.*, 2022]. Ceci s'explique par le **cumul des apports de polluants issus de tout le bassin versant**, qui s'accumulent au fur et à mesure de leur transit d'amont en aval, avant leur **dilution dans la partie aval de l'estuaire** et leur **export vers la baie de Seine**.

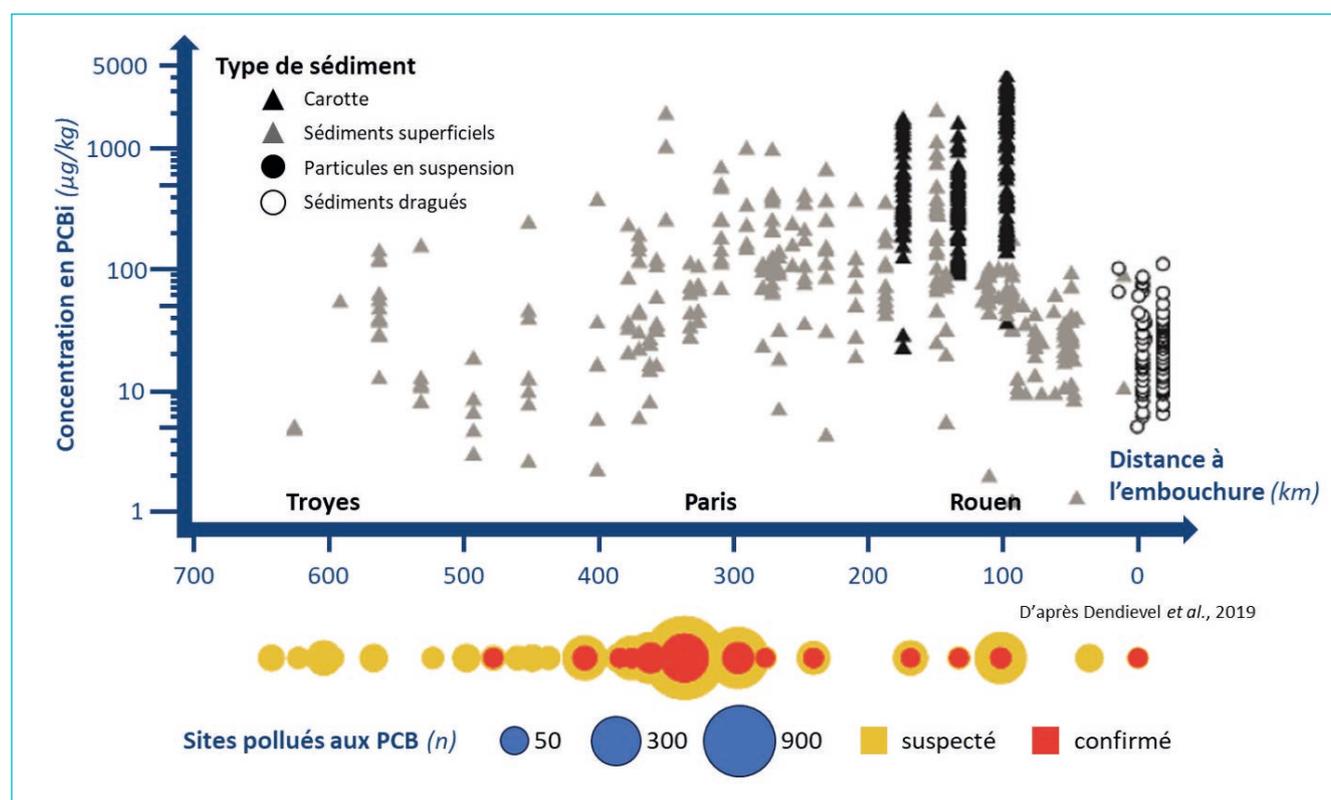


FIGURE 14 Contamination en PCB dans les sédiments de la Seine et sites pollués par les PCB.

La boucle de Rouen et la zone située en amont (*i.e.* secteur des îles) apparaissent ainsi comme les zones avec les plus fortes teneurs observées le long de la Seine. Les plus fortes teneurs sont observées sur les stations de Poses, Belbeuf et de Oissel pour les métaux, les HAP et les PCB. Cette contamination peut, par exemple, dépasser les 10 mg/kg PS pour le cadmium et les 100 µg/kg PS pour le PCB 153. Une dilution progressive vers l'aval puis la baie de Seine est ensuite observée, avec des niveaux de contamination bien moindres. En comparant les niveaux de contamination selon le contexte de prélèvement des sédiments (*i.e.* chenal de navigation, souille portuaire ou banquette latérale), on observe que la variabilité de la contamination est essentiellement portée par le secteur de

prélèvement. En effet, pour un secteur donné, les niveaux de contamination moyens sont sensiblement identiques [Figure 15]. Il est important de noter que ces données n'ont pas été normalisées, du fait 1) d'une absence de mesure du paramètre normalisateur (*e.g.* aluminium, carbone organique) sur certaines données ; et 2) d'une très forte disparité des valeurs mesurées pour les paramètres normalisateurs (*i.e.* aluminium). Cette disparité semble s'expliquer par des méthodologies d'analyse différentes entre les jeux de données et par une relation non continue entre le contaminant et le paramètre normalisateur, notamment pour les échantillons présentant une fraction fine réduite.

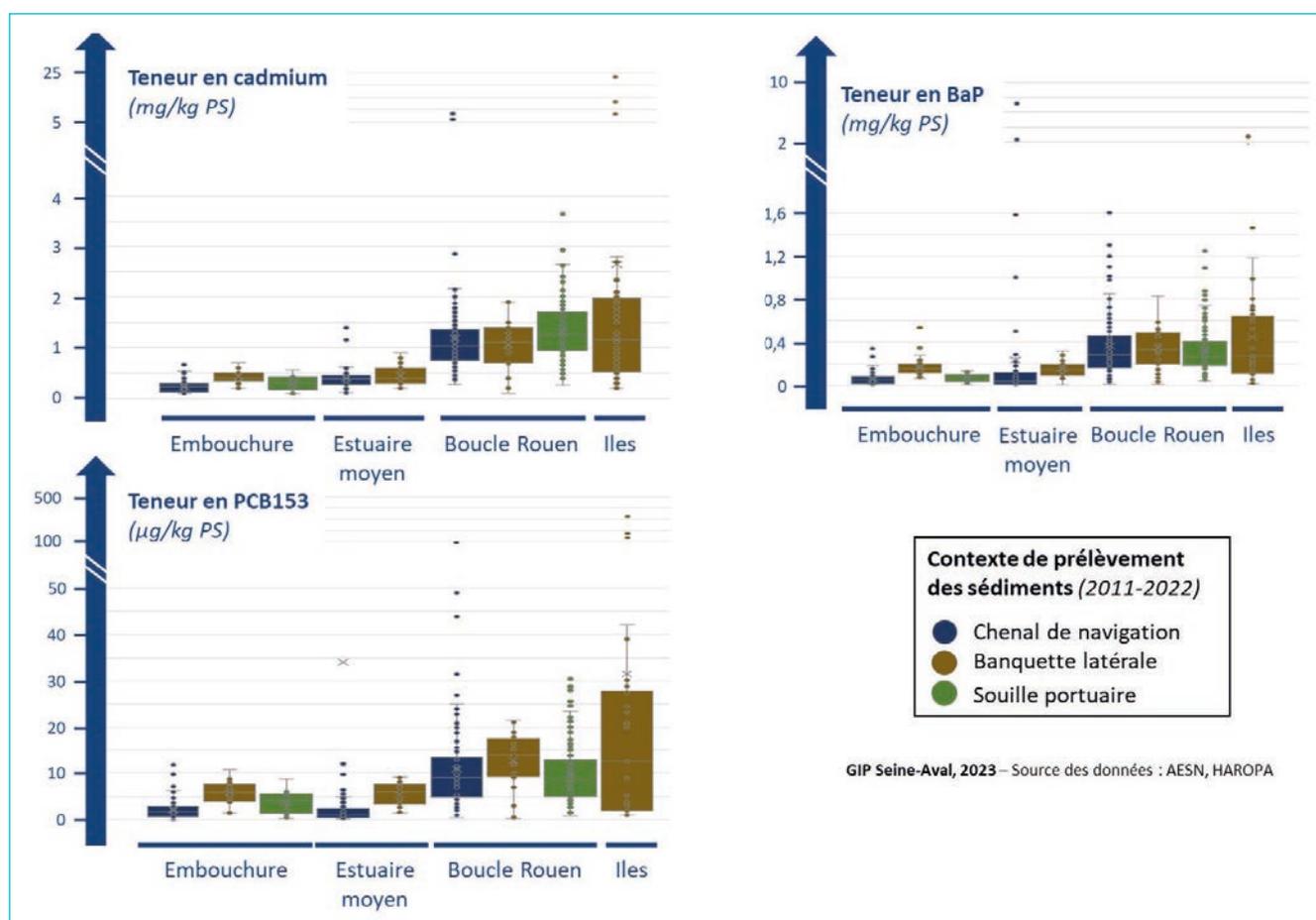


FIGURE 15 Contamination chimique des sédiments le long de l'estuaire de la Seine.

Les fortes teneurs et variations observées dans le secteur à l'amont de Rouen (*i.e.* secteur des îles) semblent pouvoir s'expliquer par la combinaison de divers facteurs : 1) des apports qui viennent du bassin versant amont et la présence d'un tissu urbain dense et de nombreuses activités industrielles pouvant être autant de sources actuelles et historiques de contaminants ; 2) une dynamique hydro-sédimentaire moins intense que plus en aval, favorable au stockage des sédiments

et aux contaminants associés qui ne sont plus disponibles pour l'aval ; 3) des sédiments remis en suspension en période d'étiage lorsque les vasières intertidales sont en érosion ; et 4) une moindre dilution par les apports sédimentaires marins que dans les secteurs plus à l'aval de l'estuaire, où ces apports marins (plus faiblement contaminés) représentent jusqu'à 90% des sédiments [Encart n°4 – La dynamique des vasières intertidales].



ENCART N° 4

La dynamique des vasières intertidales

La dynamique des vasières intertidales de l'estuaire de Seine dépend directement des forçages hydrodynamiques et des quantités de sédiments pouvant sédimenter lorsque les conditions le permettent. Les évolutions présentent donc des temporalités différentes selon le secteur de l'estuaire considéré [Figure D ; Lemoine & Verney, 2015]. La morphologie des vasières du secteur amont est ainsi principalement contrôlée par le débit de la Seine. Les dépôts sédimentaires s'y font principalement durant la période hivernale, lorsque les forts débits de la Seine transportent une importante quantité de matières en suspension et que les vasières sont quasiment continuellement submergées. Les vasières amont piègent ainsi entre 10 et 30 % des sédiments (et des contaminants associés) transitant par Poses. Lorsque les niveaux d'eau redescendent et que ces vasières sont de nouveau exondées à basse mer, les dépôts hivernaux sont progressivement remaniés et remis en suspension par les courants de marées ou par le batillage, remettant en circulation les contaminants associés. A l'aval de l'estuaire, les vasières intertidales sont sous l'influence maritime caractérisée par les tempêtes et les marées. Leur morphologie est principalement gouvernée par les conditions d'agitation liées aux vagues et leur sédimentation est dépendante de la position du bouchon vaseux. Lors de la période hivernale, les forts débits vont déplacer le bouchon vaseux vers l'aval, voire l'expulser en baie de Seine, limitant ainsi le stock sédimentaire potentiellement disponible pour alimenter les vasières. De plus, cette saison est concomitante aux périodes des tempêtes en baie de Seine, générant des vagues significatives, qui ont tendance à éroder les vasières se situant à l'aval du pont de Normandie. Dans ces conditions, jusqu'à 200 000 tonnes de sédiments peuvent être érodés de la vasière nord. En fin d'hiver, une quantité équivalente de sédiments peut se redéposer sur ce secteur en raison de l'absence d'agitation et du retour du bouchon vaseux. Durant l'été, les faibles débits vont permettre au bouchon vaseux de remonter en amont du pont de Normandie, limitant de nouveau la sédimentation à l'aval de ce dernier. Malgré cette forte dynamique saisonnière, les vasières d'embouchure présentent une relative stabilité à l'échelle annuelle.

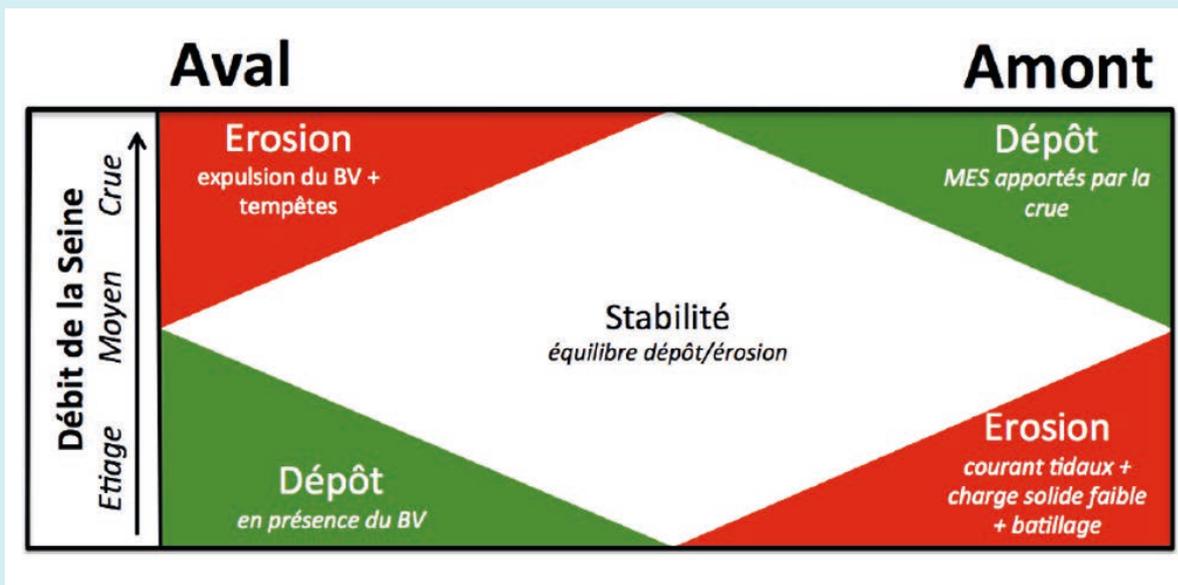


FIGURE D Fonctionnement des vasières intertidales en estuaire de Seine.

C. UNE EMPREINTE CHIMIQUE VISIBLE SUR LE LITTORAL

Lorsque les sédiments qui transitent dans l'estuaire de la Seine rejoignent la baie de Seine, ils exportent vers le milieu marin les contaminants qui y sont associés. Pour évaluer l'empreinte chimique apportée par la Seine sur le littoral normando-picard, les données de suivi de la qualité chimique des sédiments marins ont été mobilisées, à savoir la campagne du ROCCH-Sed 2019 opérée par l'Ifremer [Grouhel-Pellouin *et al.*, 2022]. L'importance des apports de la Seine sur le profil géographique de la contamination de ce littoral a ainsi pu être dressée [Figure 16].

Un gradient de concentration métallique décroissant est observé de l'embouchure de la Seine, à sa proximité immédiate, puis vers le nord (littoral de Seine-Maritime), l'ouest (littoral du Calvados) et dans le Cotentin. Si ce profil général se répète pour les principaux métaux recherchés (argent, cadmium,

cobalt, cuivre, plomb, zinc) et confirme l'influence des apports de la Seine sur l'imprégnation métallique de la baie de Seine, des pics sont observés au large du pays de Caux pour plusieurs métaux (notamment en cobalt, chrome, cuivre, plomb). Quelques apports locaux sont également mis en évidence, comme l'argent entre Octeville et Antifer, le chrome en baie des Veys, le cobalt à l'embouchure de l'Orne et au large du pays de Caux, ou encore le nickel à Fécamp et à l'embouchure de l'Orne. A noter que les mesures sont inférieures aux valeurs guides environnementales proposées dans le cadre de la Convention OSPAR [Encart n°5 – Les valeurs seuils de contamination des sédiments], à l'exception notable du mercure pour lequel la valeur de 0,15 mg/kg PS est dépassée sur deux points au large de l'embouchure de la Seine et sur un point dans le Cotentin, au nord de Chausey.

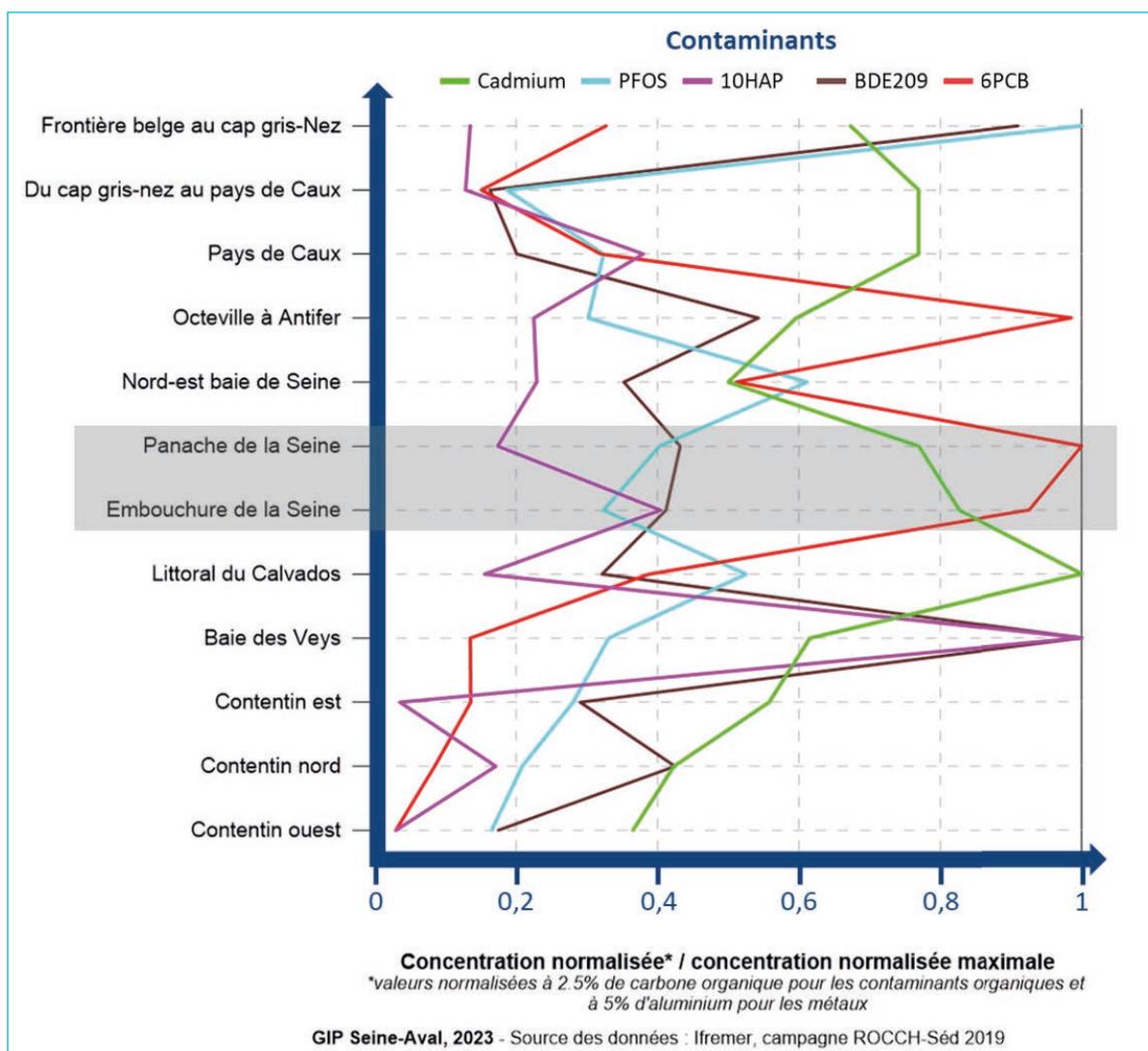


FIGURE 16 Gradient géographique des principaux contaminants dans le sédiment marin, de la frontière belge au Cotentin.

La contamination organique des sédiments prélevés sur le littoral normando-picard suit globalement le même profil que la contamination métallique, avec un niveau de contamination plus élevé à l'embouchure de la Seine et le long du pays de Caux [Figure 17]. Ce profil général n'est cependant pas homogène selon les familles de substances, avec des apports locaux pouvant parfois être importants. Concernant les HAP, un pic de contamination est observé à l'embouchure de la Seine. D'autres points chauds sont identifiés, à l'image de la baie des Veys (banc de la Rouelle) par exemple. Ces résultats montrent des **apports multiples en HAP sur le littoral, parfois très localisés, avec un poids de la Seine moins important que par le passé**. A noter que toutes les mesures sont inférieures à la norme de qualité environnementale correspondante [Encart n°5 – Les valeurs seuils de contamination des sédiments]. Concernant les PCB, le profil de la somme des 6PCB non dioxin-like (CB28, 52, 101, 138, 153, 180), des dioxines et furanes indique un gradient de concentration très net autour de l'embouchure de la Seine

et de son panache, avec des valeurs brutes pouvant dépasser les valeurs de référence écotoxiques pour certains congénères (CB28, 101, 52). Ce résultat montre que la Seine est encore une source importante en PCB, dioxines et furanes pour la baie de Seine. Ce même type de profil géographique est observé pour d'autres contaminants « historiques » comme le HBCDD et les organoétains. Pour ces derniers, une prédominance du stade le plus avancé de la dégradation du TBT (*i.e.* MBT) est observée, ce qui témoigne de l'ancienneté des apports (usages antialissures pour les peintures des coques de bateau interdits en France en 1982). Les valeurs mesurées dépassent cependant la valeur seuil environnementale pour le TBT [Encart n°5 – Les valeurs seuils de contamination des sédiments]. Pour des contaminants d'intérêt plus émergents comme les perfluorés (PFOS) et les retardateurs de flamme bromés (PBDE), il n'est pas observé de pics au niveau de l'embouchure de la Seine, ces derniers étant répartis sur tout le littoral.

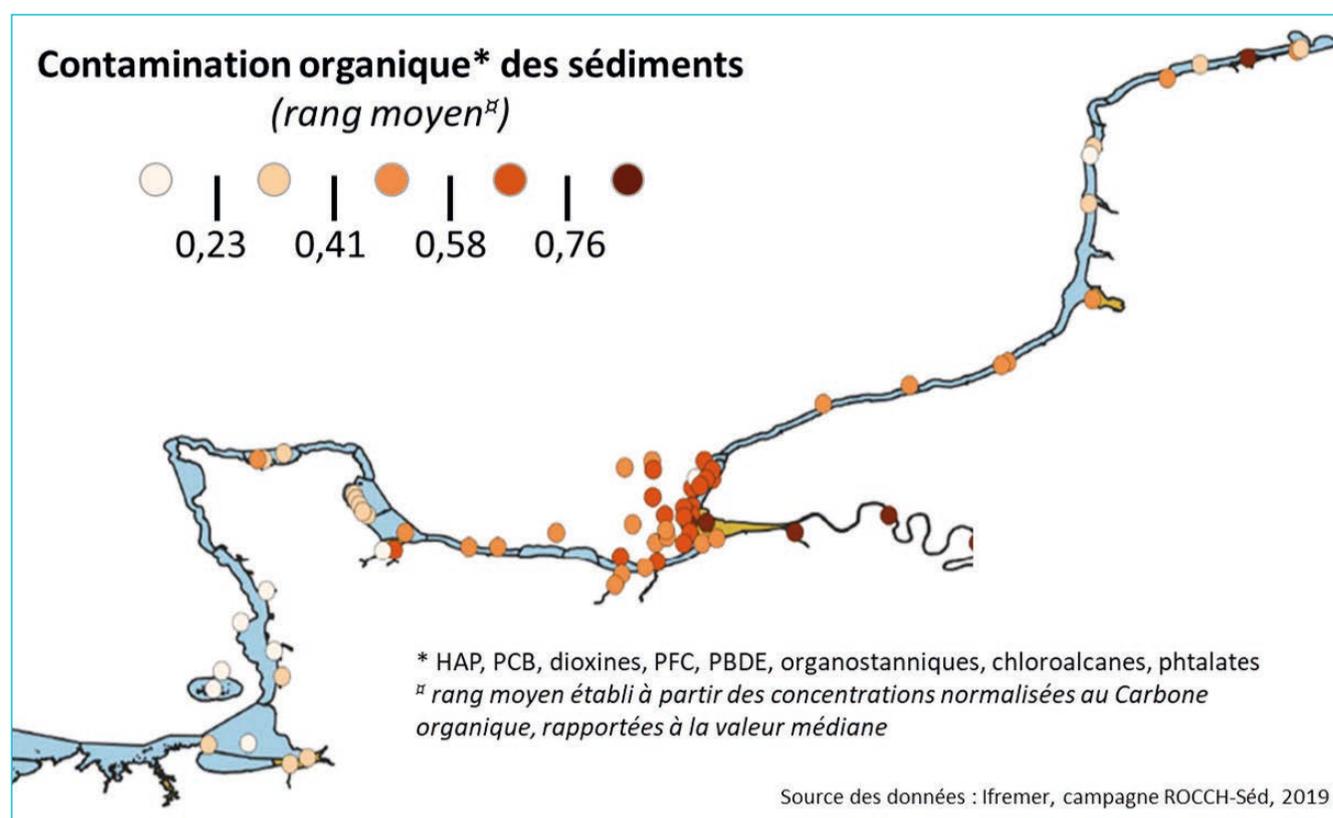


FIGURE 17 Gradient géographique des principaux contaminants dans le sédiment marin, de la frontière belge au Cotentin.

À l'échelle du littoral normando-picard, les apports de la Seine sont responsables d'une contamination chimique observée sur les sédiments marins, particulièrement pour les contaminants historiques comme les métaux, les HAP et les PCB. **L'industrialisation de la vallée de la Seine et les rejets inhérents à ces activités, a ainsi durablement marqué le littoral** avec les teneurs les plus élevées observées à l'embouchure de la Seine et le long du pays de Caux, sous l'influence des apports de la Seine. Cette contamination du littoral est amplifiée comparativement à un estuaire non anthropisé, qui aurait connu les mêmes niveaux de rejets. En effet, l'activité portuaire et les aménagements ont modifié la morphologie de l'estuaire et son fonctionnement sédimentaire [Figure 18 ; Lemoine & Verney, 2015]. Ils ont ainsi notamment favorisé l'export de sédiments potentiellement contaminés vers la baie 1) en réduisant les zones intertidales propices à la sédimentation et au piégeage des contaminants ; 2) en construisant les digues submersibles qui favorisent l'exportation des sédiments vers la baie ; et 3) en effectuant des dragages d'entretien des chenaux qui contribuent à

l'augmentation des flux sédimentaires vers le milieu marin. Les opérations de dragage d'entretien et les immersions en mer associées, entraînent à elles seules une augmentation de l'ordre de 35% des flux sédimentaires vers le milieu marin [Lemoine, 2021].

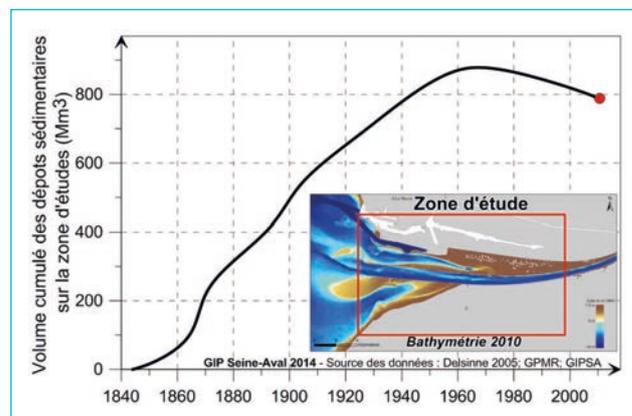


FIGURE 18 Evolution des dépôts sédimentaires à l'embouchure de la Seine



ENCART N° 5

Les valeurs seuils de contamination des sédiments

L'interprétation des niveaux de contamination des sédiments peut être faite en **comparaison de seuils environnementaux** qui relient des concentrations à des effets environnementaux, en s'appuyant sur des tests d'écotoxicité. Ces outils d'évaluation ont été développés pour prédire les effets biologiques causés par la contamination des sédiments et sont aujourd'hui mobilisés dans diverses réglementations pour évaluer l'impact toxique et le risque que la présence des substances chimiques peut faire peser sur l'écosystème. C'est par exemple le cas pour la Directive Cadre sur l'Eau qui détermine des

Normes de Qualité Environnementales (NQE) définies comme la « concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluants dans l'eau, les sédiments ou le biote qui ne doit pas être dépassée, afin de protéger la santé humaine et l'environnement ». Cette même philosophie est appliquée dans les conventions de mers régionales avec les EAC (Ecological Assessment Criteria) d'OSPAR ou aux Etats-Unis avec les ERL (Effects Range Low) qui correspondent à une probabilité de toxicité de 10% [Tableau B ; Tableau C ; INERIS, 2020].

TABLEAU B Valeurs de références environnementales pour les principaux métaux dans le sédiment.

Substance	ERL sédiment eau douce / marine (mg/kg ps)	NQE sédiment eau douce / marine (mg/kg ps)	ERL-EAC OSPAR (mg/kg ps)
Argent	- / 1		
Cadmium	- / 1.2	2.3 / -	1.2
Chrome	- / 81		
Cuivre	- / 34		34
Mercure	- / 0.15	0.67 / 0.67	0.15
Nickel	- / 20.9		
Plomb	- / 46.7	134 / 123	47
Zinc	- / 150		150

TABLEAU C Valeurs de références environnementales pour les principaux HAP et PCB dans le sédiment

Substance	ERL sédiment eau douce / marine (µg/kg ps)	NQE sédiment eau douce / marine (µg/kg ps)	ERL-EAC OSPAR (µg/kg ps) normalisée à 2,5% de Corg
Acénaphthène	- / 16		
Anthracène	- / 85,3	24 / 4.8	85
Benzo(a)anthracène	- / 261		261
Benzo(a)pyrène	- / 430	91.5 / 91.5	430
Fluoranthène	- / 600	4100 / 820	600
Naphtalène	- / 160	138 / 138	160
Phénanthrène	- / 240		240
Pyrène	- / 665		665
PCB28			1.7
PCB52			2.7
PCB101			3
PCB118			0.6
PCB138			7.9
PCB153			4 ^o
PCB180			12
TBT			0,01

Dans le cadre de la **gestion des sédiments de dragage**, les valeurs de référence en contaminants chimiques sont fixées par l'Arrêté du 30 juin 2020 modifiant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux [Légifrance, 2020]. Cette réglementation vise une gestion optimisée des accès maritimes, en intégrant les enjeux environnementaux, techniques et économiques. Ces valeurs (N1 et N2 pour les sédiments marins et estuariens ; S1 pour les sédiments continentaux) constituent des points de repère permettant à la fois de statuer sur le régime administratif de l'opération (déclaration ou autorisation) et d'apprécier l'incidence environnementale que peut avoir l'opération projetée, et donc d'orienter une opération soit vers l'immersion de sédiments, soit vers leur gestion à terre [Tableau D]. Au-dessous du niveau N1 ou S1, l'impact potentiel est en principe jugé d'emblée neutre ou négligeable sur le plan chimique, les teneurs étant « normales » ou comparables au bruit de fond environnemental. Entre le niveau N1 et le niveau N2, une investigation complémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction du projet considéré et du degré de dépassement du niveau N1. Au-delà du niveau N2, une investigation complémentaire est généralement nécessaire car des indices notables laissent présager un impact potentiel négatif de l'opération [Circulaire n°2000-62 du 14 juin 2000].

TABLEAU D Normes de gestion pour le dragage des sédiments (Arrêté du 09 août 2006 complété et modifié par l'arrêté du 30 juin 2020).

Paramètre (mg/kg PS)	N1	N2	S1
PCB 28	0.005	0.01	
PCB 52	0.005	0.01	
PCB 101	0.01	0.02	
PCB 118	0.01	0.02	
PCB 138	0.02	0.04	
PCB 153	0.02	0.04	
PCB 180	0.01	0.02	
Somme 7PCB			0.68
Arsenic	25	50	30
Cadmium	1.2	2.4	2
Cuivre	45	90	100
Chrome	90	180	150
Mercure	0.4	0.8	1
Nickel	37	74	50
Plomb	100	200	100
Zinc	276	552	300
TBT	0.1	0.4	

Paramètre (mg/kg PS)	N1	N2	S1
Fluoranthène	0.6	2.85	
Fluorène	0.02	0.28	
Benzo(a)anthracène	0.26	0.93	
Benzo(ah)anthracène	0.06	0.16	
Benzo(b)fluoranthène	0.4	0.9	
Benzo(k)fluoranthène	0.2	0.4	
Benzo(a)pyrène	0.43	1.015	
Benzo(ghi)pérylène	1.7	5.65	
Indéno(123-cd)pyrène	1.7	5.65	
Acénaphthylène	0.04	0.34	
Acénaphthène	0.015	0.26	
Anthracène	0.085	0.59	
Chrysène	0.38	1.59	
Naphtalène	0.16	1.13	
Phénanthrène	0.24	0.87	
Pyrène	0.5	1.5	
Somme 16HAP			22.8

III DES RISQUES ÉCOLOGIQUES ET DES CONTRAINTES POUR LES USAGES



La contamination des sédiments de l'estuaire de la Seine couvre un large spectre de substances (e.g. métaux, HAP, PCB) dont les teneurs font parfois peser un risque toxique pour les organismes qui vivent au contact du sédiment, et contraignent certains usages. Le présent chapitre propose un bilan de ce risque lié aux contaminants chimiques présents dans les sédiments, à travers leur bioaccumulation dans la chaîne trophique et les impacts biologiques observés sur les espèces en contact avec cette matrice sédimentaire. Il reprend également les contraintes que cette contamination exerce sur l'entretien des chenaux de navigation (i.e. dragage) et les aménagements du lit mineur ou des zones en connexion avec la Seine.

A. UN STRESS POUR LES ORGANISMES AQUATIQUES

Les organismes aquatiques sont exposés aux contaminants présents dans leur environnement lors de leurs échanges avec celui-ci, notamment par la respiration et l'alimentation. Certains de ces contaminants ont la capacité d'être bioaccumulés* dans les tissus des organismes, voire d'être bioamplifiés* dans la chaîne alimentaire, entraînant des niveaux de contamination potentiellement préoccupants pour la santé humaine en cas de consommation de ces organismes [Encart n°6 - Des interdictions de pêche liées aux PCB]. Les organismes benthiques, qui vivent en contact avec la couche superficielle des sédiments de fond, sont particulièrement concernés par cette contamination sédimentaire. Ils y sont exposés par la voie respiratoire et digestive (désorption dans le tube digestif de contaminants présents dans les sédiments et les proies ingérés). Les poissons plats, comme le flet (*Platichthys flesus*) ou la sole (*Solea solea*), sont ainsi particulièrement intéressants pour suivre les effets de la contamination sédimentaire de l'estuaire, du fait de leur comportement benthique. Ils ont fait l'objet de travaux récents repris dans le présent chapitre, qui viennent compléter les connaissances antérieures [Poisson *et al.*, 2011 ; Amiard-Triquet & Rainbow, 2009].

1. Un transfert trophique de contaminants à partir du sédiment

Le transfert de contaminants du sédiment vers les organismes aquatiques a été étudié par la mesure de contaminants sur les sédiments et dans le tissu musculaire de flets juvéniles encagés à l'aval de Rouen et à l'embouchure de la Seine [Figure 19 ; Amara & Laroche, 2020]. Les mesures montrent une bioaccumulation après un mois d'exposition, notamment pour les métaux (d'un facteur 3) et les PCB (d'un facteur 8). La comparaison des profils de contamination des

sédiments et des poissons montre une similarité pour les PCB, avec une bioaccumulation plus forte sur le site le plus contaminé (i.e. aval de Rouen). Ce n'est pas le cas pour les métaux, qui sont davantage bioaccumulés à l'embouchure de la Seine qu'à l'aval de Rouen, malgré de plus faibles teneurs mesurées dans les sédiments. Ces résultats peuvent s'expliquer par la biodisponibilité* des métaux qui est influencée par de nombreux facteurs (salinité, taux de matière organique, granulométrie) variant tout au long de l'estuaire. Cette biodisponibilité métallique a été mesurée lors d'une étude antérieure, via la détermination d'un indice qui traduit la capacité des sédiments à piéger les métaux traces au travers des phases sulfures, et donc à limiter leur mobilité et la bioaccumulation par les organismes aquatiques. Cet indice a été suivi sur des sédiments prélevés tout au long de l'estuaire de la Seine en 2009 et montre une forte variabilité spatiale et temporelle. Les mesures réalisées dans l'estuaire amont (Poses, Oissel, La Bouille) se démarquent néanmoins par un indice plus élevé, témoin d'une augmentation de la biodisponibilité des métaux. À l'inverse, une plus forte quantité de sulfures volatils dans les sédiments prélevés en février favorise le piégeage des métaux, que ce soit temporaire ou définitif par précipitation sous forme de sulfures métalliques et/ou par coprécipitation avec les sulfures de fer [Cachot *et al.*, 2012].

Pour les flets adultes pêchés à l'embouchure de la Seine, la signature chimique mesurée dans le foie montre une importante contamination en polluants organiques persistants, notamment pour les PCB (moyenne de 4,8 mg/kg PS dans le foie de flets adultes pêchés en hiver 2018 à l'embouchure de la Seine). Ces résultats témoignent du **transfert trophique important pour des substances rémanentes encore présentes dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.**

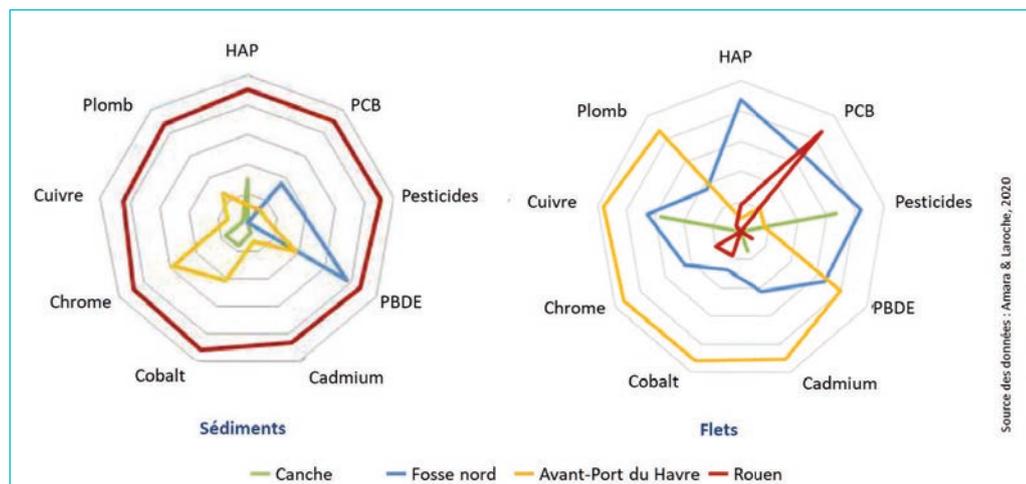


FIGURE 19 Profil de contamination dans les sédiments et les flets après un mois d'exposition par encagement.

Une signature d'une contamination en HAP est également observée, avec la présence d'un métabolite de dégradation du pyrène (*i.e.* l'hydroxypyrene) dans la bile des flets à une concentration moyenne de 3 mg/kg PS, parmi les plus fortes des estuaires européens [Kamman *et al.*, 2017]. Enfin, la signature métallique est moindre, en accord avec la baisse de la contamination observée dans les sédiments de la Seine depuis quelques dizaines d'années [Amara & Laroche, 2020]. Cette même typologie d'imprégnation est observée pour les poissons plats (flet, sole, limande) pêchés en baie de Seine, avec notamment des teneurs en mercure et en PCB pouvant dépasser les valeurs guides environnementales [Mauffret *et al.*, 2021]. A noter que les poissons présentant les plus fortes imprégnations chimiques sont systématiques pêchés dans les stations proches de l'embouchure de la Seine.

Une autre étude de transfert trophique a été menée spécifiquement pour les composés organohalogénés dans le réseau trophique de la sole, poisson plat benthique présent à l'embouchure de la Seine, en mesurant l'imprégnation chimique chez des bivalves, des crustacés, des vers et des soles [Labadie *et al.*, 2021]. Dans la partie aval de l'estuaire de la Seine, tous les congénères de PCB et de HBCDD ont été retrouvés dans les espèces suivies. Plusieurs PFAS, notamment le PFBA, le PFPeA et le PFHxS, n'ont jamais été détectés, en cohérence avec leur

faible caractère bioaccumulable. Le niveau de contamination des différentes espèces benthiques étudiées (9 bivalves, 2 crustacés et 5 vers polychètes) est cependant extrêmement variable et semble différer selon le groupe taxonomique et le mode d'alimentation propre à chaque espèce (suspensivore/dépositivore). Les bivalves apparaissent les plus contaminés en PCB et HBCDD, alors qu'ils ont le niveau trophique le moins élevé. Pour la plupart des PFAS, l'inverse est observé avec les polychètes qui présentent les plus fortes contaminations. Concernant les soles, la contamination en composés organohalogénés est également ubiquiste. Leur régime alimentaire joue un rôle clef dans les apports en contaminants par les proies et le niveau de bioaccumulation observé, notamment pour les PCB et les PFAS. L'âge est également déterminant dans les niveaux d'imprégnation mesurés chez ce poisson, avec des concentrations qui augmentent selon le groupe d'âge* pour les PCB et l'HBCDD ; alors qu'elles diminuent pour les PFAS du fait de leur dilution dans les tissus pendant la croissance et de leur excrétion plus rapide que celle des contaminants lipophiles (PCB et HBCDD). Enfin, aucun secteur ne se distingue de manière significative, indiquant une **imprégnation des juvéniles de soles globalement homogène à l'échelle de l'embouchure de la Seine** [Figure 20].

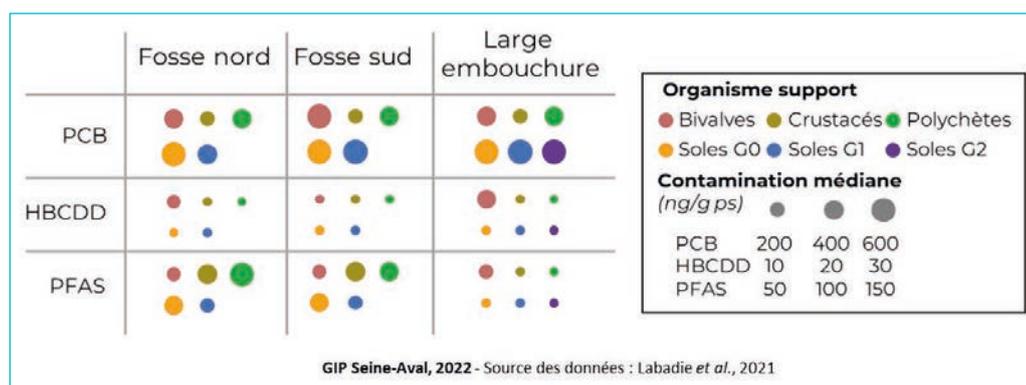


FIGURE 20 Imprégnation chimique du benthos et des poissons (individus entiers) à l'embouchure de la Seine en organohalogénés.

ENCART N° 6

Des interdictions de pêche liées aux PCB



Le phénomène de bioaccumulation est important pour certains métaux (notamment le mercure) et les polluants organiques persistants (POP), comme les dioxines/furanes, les pesticides organochlorés (e.g. DDT, hexachlorobenzène, aldrine, heptachlore) ou encore les PCB. La présence de certains de ces contaminants dans les organismes aquatiques est réglementée, avec la définition de teneurs maximales admissibles pour la consommation humaine. C'est notamment le cas pour les PCB qui ont fait l'objet d'un suivi particulier dans les poissons présents dans l'estuaire de la Seine et dans les bassins portuaires [Fisson, 2016]. L'anguille, poisson gras et très sensible aux contaminations du sédiment dans lequel elle s'enfouit, est bien connue

pour accumuler de nombreuses substances chimiques présentes dans cette matrice. Cette espèce présente les teneurs les plus élevées en PCBi (plusieurs milliers de $\mu\text{g}/\text{kg}$ PS), quelle que soit la taille des individus pêchés (petits, moyens, gros). La brème, également connue pour sa capacité à bioaccumuler les PCB du fait de son comportement et alimentation benthique, présente des teneurs en PCBi de quelques milliers de $\mu\text{g}/\text{kg}$ PS, les lots constitués de petits individus étant les moins contaminés (les petits individus sont plus jeunes et ont donc été exposés moins longtemps à la contamination, d'où les teneurs plus faibles retrouvées dans le muscle). Plus globalement, les résultats montrent une imprégnation généralisée en PCB sur l'axe Seine. Le secteur à l'amont de Rouen concentre les individus qui présentent les niveaux d'imprégnation les plus importants, confirmant le gradient de contamination amont-aval [Tableau E].

Les teneurs mesurées dans les poissons prélevés en Seine dépassent la teneur maximale admissible en 6PCBi pour la consommation humaine, systématiquement pour les anguilles et les brèmes et de manière récurrente pour les autres espèces. Ce non-respect de la réglementation sanitaire implique une interdiction de pêche pour la consommation et la commercialisation des poissons de la Seine normande et de certains affluents [Préfecture 76, 2008 ; Préfecture 76, 2013 ; Préfecture 27, 2013]. Il n'a pas été noté de dépassement des teneurs maximales admissibles pour les métaux et les HAP sur les poissons prélevés en estuaire de Seine dans le cadre de ces campagnes.

TABLEAU E Respect de la Teneur Maximale Admissible pour les poissons pêchés en estuaire de Seine.

Cours d'eau		Bioaccumulation forte		Bioaccumulation faible			Bioaccumulation non définie					
		Anguille	Brème	Gardon	Perche	Rotengle	Sandre	Bar	Eperlan	Ide melanote	Saumon	Sole
Seine	Amont Poses	0% (n=11)	0% (n=5)	67% (n=9)	0% (n=1)		83% (n=12)					
	Poses - Rouen	0% (n=16)	17% (n=12)	24% (n=17)	83% (n=6)		33% (n=6)					
	Rouen - La Bouille	0% (n=15)	31% (n=16)	55% (n=20)	90% (n=10)		77% (n=13)			0% (n=4)	100% (n=1)	
	La Bouille - Tancarville	6% (n=16)	0% (n=6)	60% (n=5)		80% (n=5)	100% (n=3)			100% (n=1)	100% (n=1)	
	Tancarville - embouchure	0% (n=15)						17% (n=6)	0% (n=9)			50% (n=6)
Bassins et canaux	Port de Rouen	20% (n=5)	0% (n=4)	80% (n=5)	100% (n=3)		67% (n=9)					
	Port du Havre	0% (n=14)						11% (n=9)				40% (n=15)
	Canal de Tancarville	40% (n=5)					83% (n=6)					
	Grand Canal Maritime du Havre	100% (n=4)						100% (n=4)				
	Port 2000	0% (n=9)						0% (n=3)				64% (n=11)

2. Des impacts biologiques sur les organismes benthiques

L'exposition des organismes aquatiques benthiques à la multi-contamination des sédiments de la Seine peut conduire à des effets qui peuvent être génériques et toucher l'état de santé global des individus ou impacter des fonctions biologiques spécifiques, comme la reproduction, le système immunitaire ou le système nerveux. La mesure de biomarqueurs* sur un panel d'espèces permet de mesurer cet impact de la contamination sur l'état de santé des individus, en recherchant un ensemble d'effets potentiels (e.g. génotoxicité, neurotoxicité, immunotoxicité) à différents niveaux d'organisation biologique (e.g. moléculaire, cellulaire, individuel).

Chez les flets juvéniles (âgés de moins de 6 mois) prélevés à l'embouchure de la Seine, les indicateurs de fitness (indice de condition, état des réserves, taux de croissance) et les biomarqueurs (génotoxicité, dommages liés au stress oxydant) présentent des niveaux comparables à ceux mesurés sur des juvéniles de flets capturés dans un estuaire moins impacté par la contamination chimique : la Canche. Des résultats globalement similaires sont observés chez des juvéniles de flet encagés durant un mois à l'embouchure de la Seine (fosse nord et avant-port du Havre) par rapport à la Canche. Ces résultats montrent que **le niveau de contamination chimique actuel des sédiments à l'embouchure de la Seine n'impacte pas significativement les flets juvéniles qui y vivent depuis quelques mois** (ou qui y sont exposés pendant une courte période : 1 mois), par rapport à ceux qui vivent dans un petit estuaire plus préservé comme celui de la Canche [Amara & Laroche, 2020]. Par contre, les résultats acquis à l'aval de Rouen montrent des dommages à l'ADN plus importants

et une surexpression de protéines qui interviennent dans la détoxification des contaminants, signes d'une pression chimique plus forte dans ce secteur. A noter qu'une suractivation des métallothionéines* n'a pas été mesurée à Rouen, ce qui va dans le sens d'une faible biodisponibilité de la contamination métallique dans ce secteur [cf III.A.1; Amara & Laroche, 2020].

Chez les flets adultes et les juvéniles de soles prélevés à l'embouchure de la Seine, des effets principalement génotoxiques et neurotoxiques sont observés, avec des dommages cellulaires, tissulaires et des effets sur le génome [Figure 21; Amara & Laroche, 2020; Couteau, 2020; Labadie et al., 2021; Mauffret et al., 2021].

Ces résultats témoignent d'une **exposition à divers contaminants chimiques véhiculés par le fleuve qui induisent des effets délétères lors d'une exposition chronique**. Les niveaux de réponse observés sont inférieurs à ceux obtenus il y a 10 à 15 ans, indiquant une baisse de cette pression. Une baisse de cette pression est également observée en allant vers la baie de Seine, où des niveaux moindres d'impacts sont observés sur les poissons plats (flet, sole, limande) pêchés dans divers secteurs de la baie [Mauffret et al., 2021]. Il a été montré une **adaptation locale à ce stress chimique pour la population de flets de la Seine**. Elle se traduit par un coût physiologique permettant d'assurer la survie des individus dans un milieu contaminé. A ce stade, des questionnements émergent sur la capacité de la population de Seine à faire face à des stress supplémentaires, comme le réchauffement des eaux. Le cumul de plusieurs stress sur les populations de poissons qui dépendent de l'estuaire vont dans le sens d'un risque écologique pour ces dernières [Laurent et al., 2022].

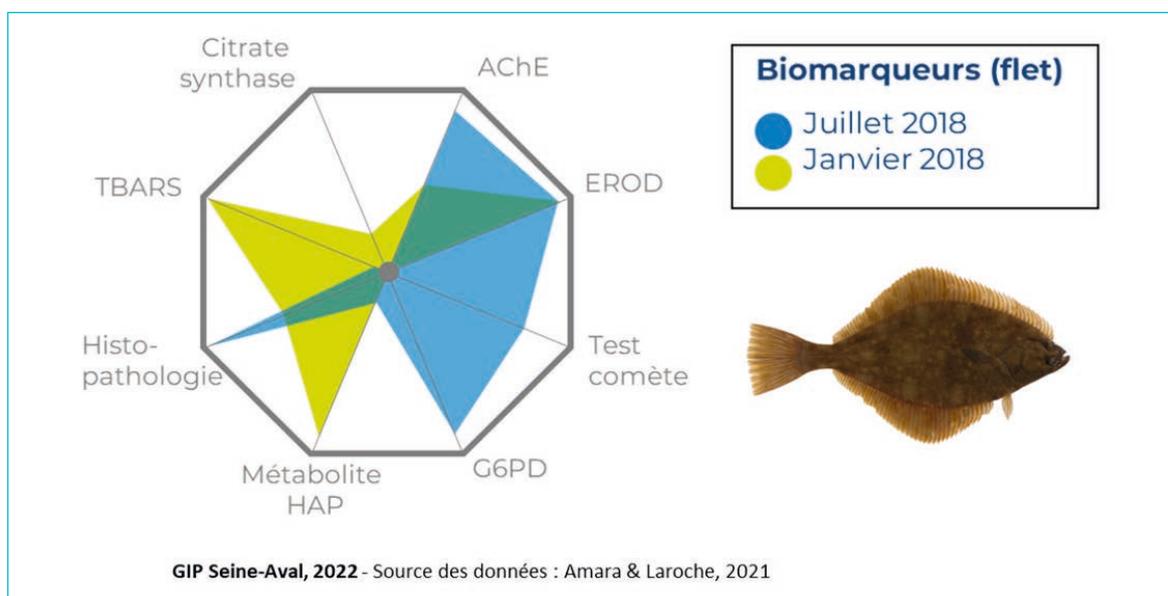


FIGURE 21 Effets écotoxiques observés chez les flets adultes prélevés en estuaire de Seine en 2018.

Ce constat général peut être détaillé pour le suivi du système endocrinien, dont les perturbations sont liées à une exposition à divers agents chimiques (*i.e.* perturbateurs endocriniens). Les perturbations touchent le système hormonal et peuvent impacter le développement des organes ou la reproduction de l'individu exposé ou bien encore à sa descendance. La mesure de la concentration plasmatique en Vitellogénine* chez les flets mâles est un marqueur précoce de ces perturbations, et indique des perturbations endocriniennes très significatives pour les mesures faites entre 1998 et 2003 [Minier & Amara, 2008]. Depuis 2015, les concentrations moyennes mesurées sont beaucoup plus faibles, témoignant d'une baisse de ces perturbations [Figure 22]. Dans les cas les plus sévères, cette exposition à des perturbateurs endocriniens peut aller jusqu'au développement de tissus ovocytaires dans les tissus

gonadiques des individus mâles. De tels individus intersexués ont été observés en estuaire de Seine lors de suivis réalisés en 1997/1998 (8 % des flets analysés) et en 2008/2009 (5,5 % des flets analysés) [Minier *et al.*, 2000]. Entre 2015 et 2019, seule l'année 2016 a permis d'observer des individus présentant des signes d'intersexualité, avec près d'un quart des mâles échantillonnés à l'embouchure de la Seine concernés [Couteau, 2020]. En baie de Seine, il n'a pas été identifié d'altération du système reproducteur chez les mâles pêchés en 2018 [Mauffret *et al.*, 2021]. Ces différents résultats indiquent la **présence de perturbateurs endocriniens en Seine**, à des concentrations pouvant impacter la santé des organismes aquatiques. Les impacts observés sont cependant bien moindres aujourd'hui qu'au début des années 2000.

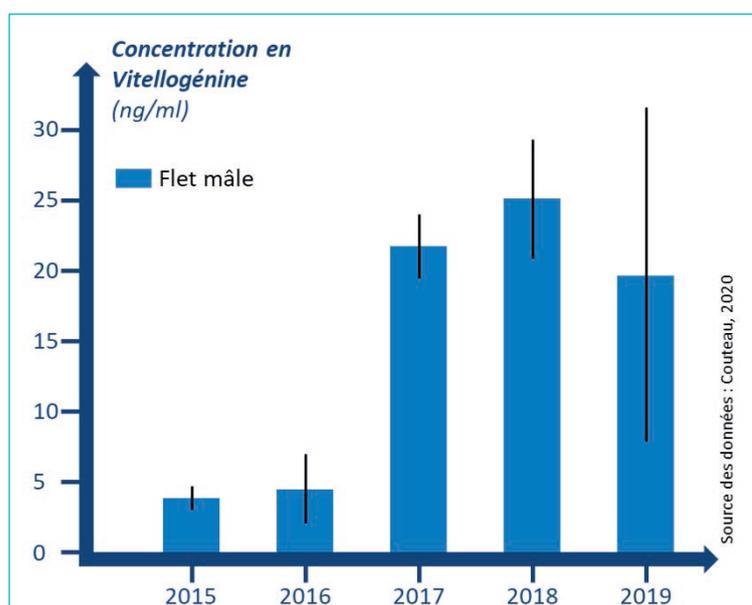


FIGURE 22 : Concentration plasmatique de Vitellogénine mesurée chez les flets mâles de l'estuaire de la Seine.

B. UNE CONTRAINTÉ POUR L'ENTRETIEN DES CHENAUx DE NAVIGATION

Pour conserver des profondeurs suffisantes pour la navigation en estuaire de Seine et accéder aux terminaux portuaires en toute sécurité, HAROPA-Port mène des dragages d'entretien réguliers. Ces opérations consistent à retirer des sédiments présents au fond des chenaux de navigation et dans les bassins portuaires. Les quantités de sédiments à extraire varient selon le régime hydrologique du fleuve (crue, étiage), les conditions météorologiques (tempêtes, marées), la sensibilité des différents secteurs à l'accumulation des sédiments et la taille des navires à accueillir. **Chaque année, ce sont environ 6 à 7 millions de m³ de sédiments qui sont dragués à l'échelle de l'estuaire de la Seine.** Selon leur niveau de contamination chimique, leurs propriétés géotechniques et les besoins du secteur du bâtiment et des travaux publics, différentes filières sont mises en place. Les sédiments peuvent être isolés, directement

réutilisés (réfection de digues par exemple), déposés à terre sur des sites dédiés en bord de Seine pour une utilisation ultérieure possible, ou alors immergés en mer. Cette dernière destination est celle qui concerne la majorité des sédiments dragués en estuaire de Seine, avec le site d'immersion dit du Machu pour les sédiments dragués à l'embouchure de la Seine et celui dit d'Octeville pour ceux dragués dans le port du Havre et les canaux adjacents [Figure 23]. Les valeurs de référence en contaminants chimiques pour l'immersion des sédiments de dragage sont fixées par l'Arrêté du 30 juin 2020 modifiant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux, qui fixe [Légifrance, 2020 ; Encart n°5 – Les valeurs seuils de contamination des sédiments]

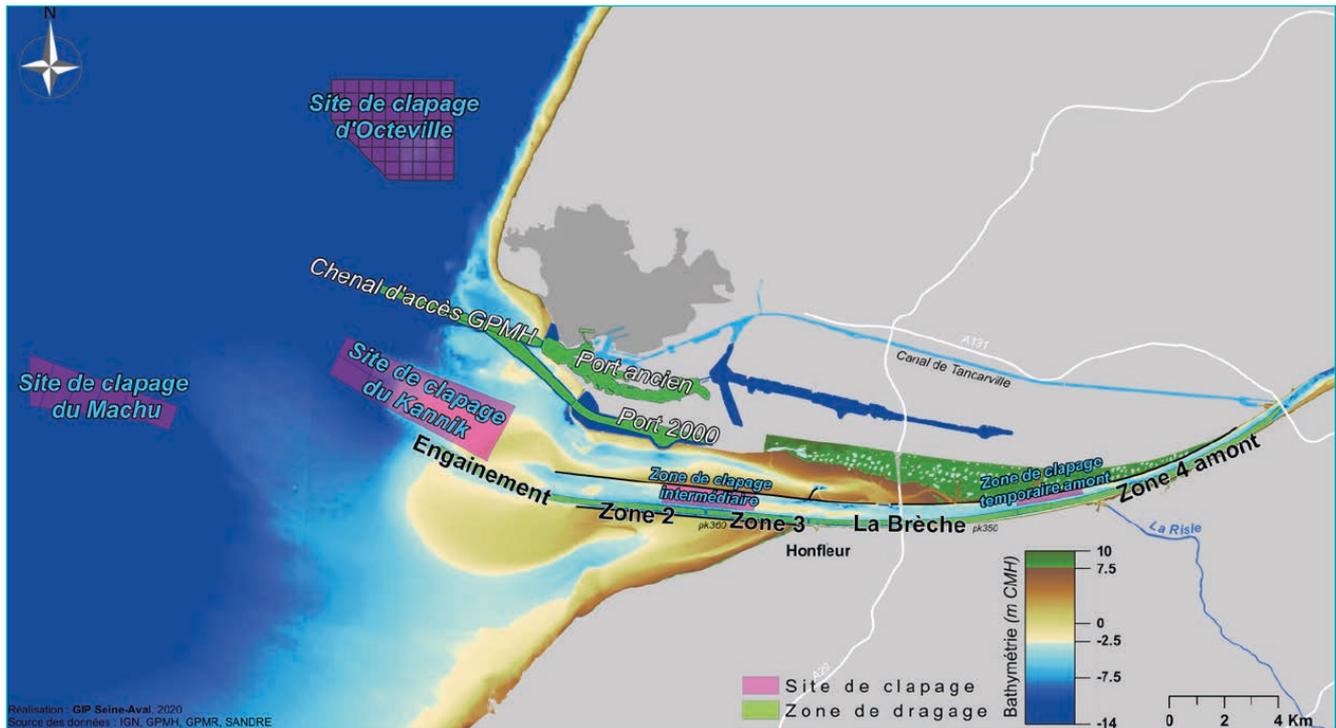


FIGURE 23 Principaux sites de dragage et zones de clapage à l'embouchure de la Seine.

Concernant les sédiments dragués dans la boucle de Rouen (zone portuaire amont), ils représentent un volume moyen annuel de l'ordre de 250 000 m³, principalement constitués de vases déposées dans le chenal de navigation, les bassins portuaires et les souilles à quai. Les dragages dans le secteur compris entre La Bouille et Vieux-Port représentent un volume plus faible (100 000 m³/an). Les dragages se concentrent sur les bancs de Bardouville, de la Fontaine et du Malaquis et sur trois souilles à quai. Sur les 10 dernières années (2010-2020), **l'ensemble des sédiments dragués dans le chenal de navigation entre Rouen et Vieux-Port respecte la norme de gestion S1**, à l'exception d'un point en aval de Duclair où la norme en HAP a été dépassée en 2014. Concernant les souilles, des dépassements ont été observés sur les quais de l'Ouest en 2019 pour les métaux (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) [HAROPA-Port de Rouen, 2021].

A l'embouchure de la Seine, les dragages d'entretien se concentrent entre les digues submersibles (sites dits de l'engainement et de la brèche [Figure 23]) pour un volume moyen annuel entre 3 et 5 millions de m³. Sur les 10 dernières années (2010-2019), le suivi de leur qualité chimique indique des **teneurs inférieures aux normes N1**, à l'exception de dépassements de la norme N1 pour 1) le mercure sur une station du secteur de l'engainement en 2019 ; et 2) 7 HAP sur une station du secteur de la Brèche en 2018. Pour les souilles à quai draguées dans le secteur (Honfleur, Radicatel, Port-Jérôme), quelques dépassements très ponctuels du seuil N1 sont également observés, notamment au niveau des quais de

Honfleur (mercure en 2019, un HAP en 2012) [HAROPA-Port de Rouen, 2019].

Pour les sédiments dragués **dans le port ancien du Havre, des dépassements du seuil N1 sont observés tous les ans**, particulièrement pour le mercure et différents congénères de HAP. Ces mêmes paramètres déclassent régulièrement les sédiments dragués dans le chenal d'accès à Port 2000 et son bassin. Les sédiments dragués dans les canaux et dans les bassins Bellot et de l'Eure présentent également des dépassements récurrents du seuil N1. A noter que les secteurs ayant fait l'objet de dépassement des seuils N2 (Grand canal du Havre, bassins Bellot et de l'Eure en 2017) n'ont pas fait l'objet de dragage d'entretien [Tableau V ; HAROPA-Port du Havre, 2020].

La contamination chimique des sédiments de l'estuaire de la Seine et de ceux présents dans le port du Havre font ainsi peser une contrainte sur la navigation, à travers leur qualité chimique pouvant limiter les opérations de dragage d'entretien des accès nautiques. Pour les secteurs à faibles enjeux commerciaux où des dépassements des normes sont observés de manière récurrente, la question de l'opportunité des opérations de dragage peut se poser. En effet, le coût de leur évacuation vers des filières dédiées adaptées au niveau de pollution mesuré peut remettre en cause la pertinence d'une opération dragage et orienter vers un *statu quo* ou une opération de dépollution *in situ* [Encart n°7 – Exemple de biotraitement dans la darse Babin (Rouen)].

TABLEAU V Occurrences de dépassement du seuil N1 (N2) pour les sédiments dragués dans le port du Havre et les canaux adjacents (les secteurs avec de moindres volumes dragués sont échantillonnés tous les 3 ans).

Secteur		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
"Port ancien (22 stations)"	Métaux	3	5	2	4	2	1	1
	HAP	2	22	31	28 (1)	35	16	26
	PCB	0	3	2	7	0	3	0
	TBT	0	0	0	1	0	1	0
"Port 2000 (8 stations)"	Métaux	1	0	0	1	0	0	0
	HAP	3	4	12	7	5	0	8
	PCB	0	0	0	1	0	0	0
	TBT	0	0	0	0	0	0	0
"Grand Canal du Havre (4 stations)"	Métaux	ND	ND	3	7	ND	2 (1)	ND
	HAP	ND	ND	11 (1)	9	ND	15 (1)	ND
	PCB	ND	ND	0	0	ND	1	ND
	TBT	ND	ND	1	1	ND	0	ND
"Ecluses de Tancarville (4 stations)"	Métaux	1	2	3	3	0	1	0
	HAP	0	5	12	4	1	6	6
	PCB	2	2	1	1	0	0	0
	TBT	0	0	0	0	0	0	0
Canal de Tancarville (3 stations)	Métaux	ND	ND	0	ND	ND	0	ND
	HAP	ND	ND	1	ND	ND	4	ND
	PCB	ND	ND	0	ND	ND	1	ND
	TBT	ND	ND	0	ND	ND	0	ND
"Bassin Bellot (3 stations)"	Métaux	ND	ND	2	ND	ND	0	ND
	HAP	ND	ND	15	ND	ND	7	ND
	PCB	ND	ND	0	ND	ND	0	ND
	TBT	ND	ND	(1)	ND	ND	1	ND
"Bassin de l'Eure (3 stations)"	Métaux	ND	ND	3 (1)	ND	ND	3	ND
	HAP	ND	ND	26 (2)	ND	ND	9	ND
		ND	ND	0	ND	ND	1	ND
	TBT	ND	ND	1 (2)	ND	ND	1 (1)	ND

**ENCART N° 7****Exemple de biotraitement dans la darse Babin (Rouen)**

Située dans la boucle de Rouen, la darse Babin accueille le dock flottant de HAROPA, utilisé pour l'entretien et la réparation de navires. Dans le cadre du remplacement de ce dernier par un nouvel équipement, il est nécessaire d'approfondir la souille par dragage. Cette opération concerne un volume important de sédiments (20 000 m³), dont l'analyse a montré des dépassements des seuils réglementaires de gestion pour les hydrocarbures totaux, le carbone organique, certains HAP et des congénères de PCB [Légifrance, 2020]. Avant de draguer ces sédiments, HAROPA a mis en œuvre un biotraitement de ces derniers. Le procédé, mis en œuvre par l'entreprise Néo-Eco, a consisté à épandre huit tonnes de substrat minéraux enrichis en bactéries sur une zone de 12 000 m², jusqu'à 1,5 m de profondeur. Les micro-organismes ont été préalablement sélectionnés pour accélérer la dégradation biologique de divers composés organiques et réduire ainsi le niveau de contamination des sédiments en place. Engagé en février 2022, ce procédé a permis de réduire en quelques mois la contamination des sédiments en deçà des normes réglementaires pour la mise en ballastière de ces derniers. Cet exemple de biotraitement illustre une possibilité de bioremédiation des sédiments présents en estuaire, afin de réduire leur niveau de contamination et faciliter leur gestion.

C. DES QUESTIONS POUR LES AMÉNAGEMENTS ÉCOLOGIQUES

La présence de stocks de contaminants historiques en lien avec la Seine pose la question de leur remobilisation en lien avec les aménagements menés dans l'estuaire, notamment dans un contexte de restauration écologique [Muntoni, 2020]. En effet, les projets d'amélioration du fonctionnement écologique de l'estuaire peuvent conduire à une remise en suspension directe de contaminants stockés dans des sédiments immobilisés, ou à une modification des zones érodables post-travaux, engendrant là aussi leur remise en suspension.

1. Cas de la filandre du Trait

Pour alimenter la réflexion sur la restauration écologique à mener sur le secteur du Trait, le site de la filandre éponyme a fait l'objet d'un diagnostic de pollution, notamment en lien avec la présence d'un ancien site industriel à proximité. Ce diagnostic a consisté en une campagne de carottage sur 7 sites menée en 2020, permettant des prélèvements sédimentaires homogènes et continus sur une profondeur de 3 mètres sur chacun d'eux, puis des analyses en laboratoire [Figure 24 ; TELLUX, 2021].

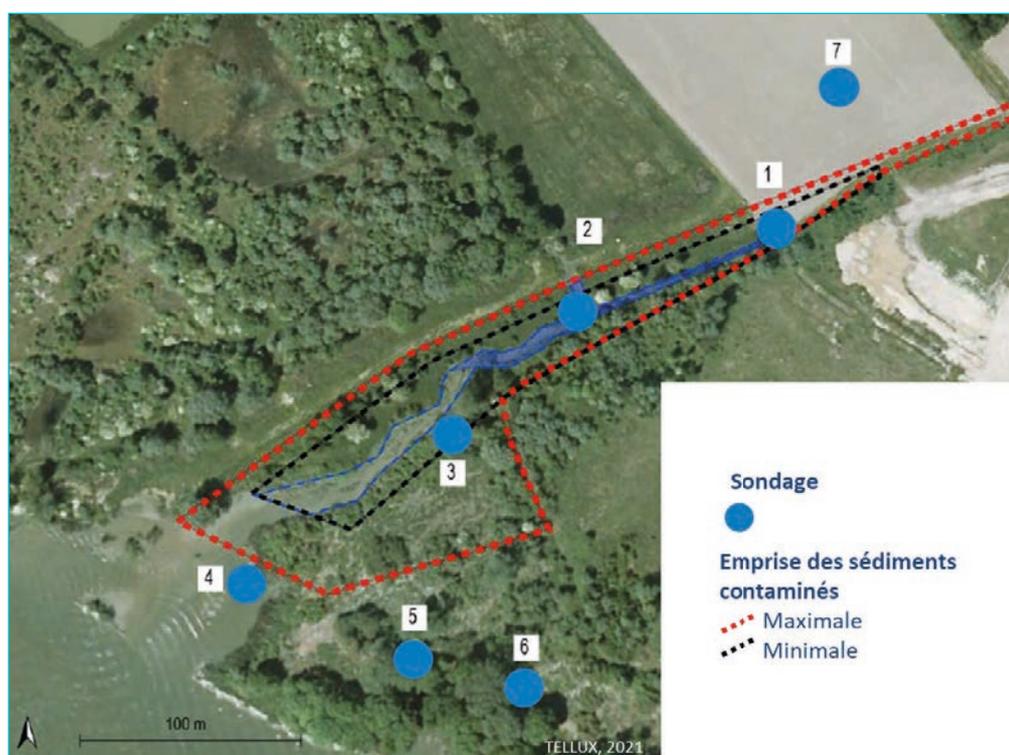


FIGURE 24 Localisation des sites de forage et zones de pollution identifiées au niveau de la filandre du Trait.

Les analyses chimiques réalisées à différents niveaux des carottes couplées à l'image hyperspectrale obtenue en continu ont permis d'identifier différentes pollutions sur le secteur d'étude. Une pollution ancienne au mercure datant du comblement d'un ancien trou de Seine (avant 1885) apparaît sur l'ensemble du secteur. A noter également une pollution au cadmium à l'embouchure de la filandre, mais aucune pollution significative aux hydrocarbures pour cette période ancienne. Un premier épisode de pollution aux hydrocarbures lourds et aux métaux lourds (cadmium, chrome, cuivre, plomb, zinc, mercure) apparaît sur 10 cm d'épaisseur, à 30 cm de profondeur sur le site 1 et 50 cm de profondeur sur le site 3. Cette pollution est recouverte par une lamine blanche caractéristique sur les sites où elle est observée. Enfin, des hydrocarbures lourds sont observés sur le site 2, à 1,70 m de profondeur sur un intervalle

de 60 cm d'épaisseur et une pollution aux métaux (cadmium et mercure) est également observée sur le site 4. La dynamique du secteur et la connexion avec le fossé en provenance du site industriel adjacent vont dans le sens d'une provenance de la pollution par ce dernier.

Le couplage de ces mesures de contamination chimique avec les données de remplissage sédimentaire acquises en parallèle a permis d'estimer le **volume de sédiments pollués présents sur le secteur entre 3612 et 7547 m³**. L'identification de cette pollution présente en profondeur fait peser des contraintes fortes sur le projet de restauration écologique qui devra intégrer dans le projet une gestion des sédiments identifiés comme pollués, avec les coûts additionnels induits.

2. Cas du barrage de Martot à la confluence Seine/Eure

En 2017, le barrage de Martot localisé à la confluence Eure/Seine a été arasé pour restaurer la continuité écologique et sédimentaire sur la portion aval de l'Eure et la reconnecter avec la Seine. La question du transfert vers l'aval de sédiments potentiellement contaminés présents dans le bief amont de l'Eure et dans les annexes hydrauliques adjacentes s'est alors posée. Ces dernières se sont formées à la fin des années 1890 lors du déplacement de la confluence de l'Eure jusqu'au barrage de Martot, favorisant l'accumulation de sédiments qui venaient de l'Eure. Dans le cadre de ce projet de restauration, un diagnostic de pollution des sédiments a ainsi été mené. Le carottage des annexes hydrauliques a montré la présence d'une

forte contamination en métaux traces (arsenic, chrome, cobalt, nickel, cuivre, zinc, argent et cadmium), en HAP [Figure 25], en PCB et en pesticides organochlorés (DDT, lindane). Ce stock de contaminants s'est constitué au cours du temps et la présence de certains contaminants spécifiques a pu être reliée à des usages sur le bassin versant de l'Eure, essentiellement industriels. A noter, la présence d'une empreinte récente de contamination au plomb issue d'une source industrielle identifiée sur le bassin versant de l'Eure [Gardès, 2020]. Cette même multi-contamination a été observée dans des carottes et des sédiments de surface prélevés dans le chenal de la partie aval de l'Eure, tout au long du bief de Martot, avec des teneurs qui peuvent dépasser les seuils de gestion (S_i) pour les métaux et les HAP [EGIS, 2018].

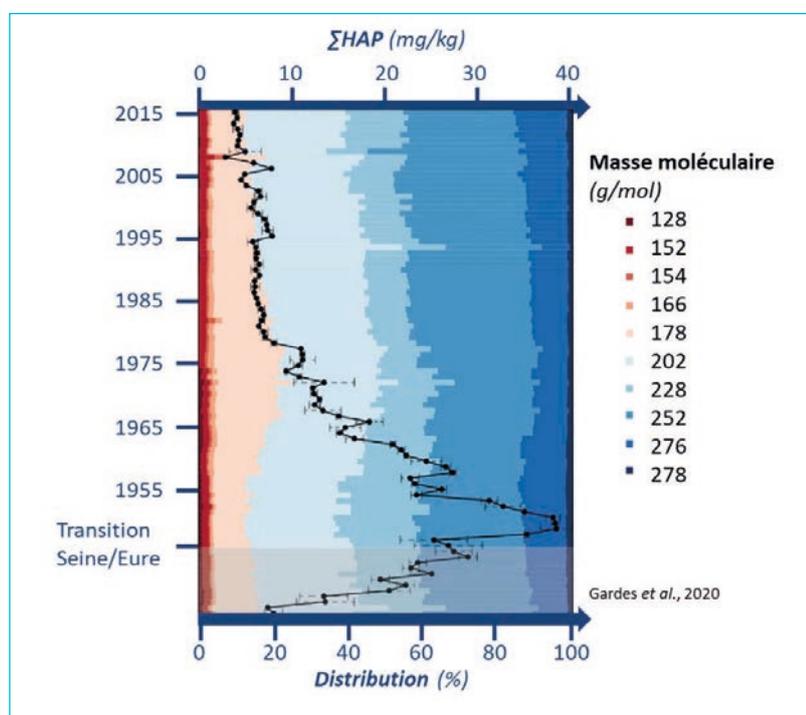


FIGURE 25 : Evolution de la contamination en HAP dans une carotte sédimentaire prélevée dans l'étang de Martot.

L'arasement du barrage de Martot a eu pour conséquence l'érosion et le transfert vers l'aval de sédiments contaminés, qui étaient stockés dans les annexes hydrauliques et dans l'Eure. Une estimation maximisante de la quantité de contaminants exportés vers la Seine suite à l'érosion du chenal de l'Eure et de l'étang de Martot aboutit à plusieurs tonnes pour les principaux métaux. Ceci représente l'équivalent de 11 % à 38 % des flux

particulaires issus du bassin versant de l'Eure pendant une période de 8 mois [Tableau VI ; Gardès, 2020]. Même si cette estimation présente des incertitudes, elle illustre l'impact non négligeable de la remise en suspension d'un stock historique de contaminants, dans un contexte de restauration de continuité écologique pour le présent exemple.

TABLEAU VI Estimation du stock métallique maximal concerné par l'érosion sédimentaire du chenal de l'Eure et de l'étang de Martot, suite à l'arasement du barrage de Martot.

	Chrome	Nickel	Cuivre	Zinc	Arsenic	Cadmium	Plomb
Stock concerné (chenal + étang)	3,2 T	1,3 T	4,2 T	22,4 T	0,34 T	0,30 T	9,0 T
Rapport au flux particulaire amont (octobre 2017 – mai 2018)	13 %	11 %	15 %	20 %	11 %	38 %	17 %

CONCLUSION

La qualité chimique des sédiments présents dans la Seine est sous le double contrôle 1) de la fréquence et de l'intensité des apports urbains, industriels et agricoles ; et 2) de la dynamique hydro-sédimentaire du fleuve et de son estuaire. L'empreinte chimique observée dans les sédiments de l'estuaire de la Seine est ainsi à relier avec l'activité actuelle sur le bassin versant, mais aussi à des rejets qui peuvent remonter à plusieurs décennies. A cette époque, la législation en matière environnementale présentait un caractère régulateur moins sévère et les effluents industriels et urbains rejoignaient les cours d'eau puis la Seine, souvent avec des traitements rudimentaires, voire parfois sans traitements préalables pour les périodes les plus anciennes. Les substances, peu ou pas dégradables, ont ainsi durablement marqué la qualité de la Seine, en s'accumulant dans les sédiments, puis en se diluant très progressivement. **La qualité chimique des sédiments est également à relier à la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire.** En effet, elle influence largement la répartition des contaminants chimiques qui transitent en estuaire, et notamment leur capacité à s'accumuler, à se stocker et à se remettre en suspension. Elle détermine ainsi la mobilité des contaminants associés à la phase particulaire (principalement métaux et composés organiques hydrophobes) et guide l'exposition des organismes aquatiques. La multi-contamination des sédiments de la Seine n'est de fait pas homogène : alors que l'estuaire est le secteur le plus contaminé de l'axe Seine, **c'est la zone amont de Rouen (i.e. secteur des îles) qui connaît les plus fortes teneurs observées pour les principales familles de contaminants.** En lien avec l'intensification des conditions hydrodynamiques et la moindre importance des flux sédimentaires en provenance de l'amont, cette contamination décroît ensuite de Rouen vers l'embouchure, puis se dilue progressivement en baie de Seine. Elle marque plus particulièrement et plus durablement les sédiments sur le littoral du pays de Caux, en raison de l'orientation générale du panache de la Seine qui se dirige préférentiellement vers le nord-est.

Nombre d'organismes aquatiques vivent en relation avec le sédiment et la qualité de ce dernier joue sur leur exposition à la contamination chimique et à l'impact toxique qu'elle engendre. Ces organismes benthiques accumulent ainsi un certain nombre de contaminants métalliques et organiques présents dans le sédiment, ces derniers pouvant se transférer et s'accumuler le long de la chaîne trophique. Ceci participe à l'exposition de tous les réseaux trophiques estuariens, voire plus largement de la baie de Seine. **L'état de santé de ces organismes aquatiques est sous l'influence de cette contamination chimique** et l'intensité des effets observés suit les trajectoires identifiées pour l'impregnation des sédiments, que ce soit d'un point de vue temporel

(amélioration de l'état de santé des organismes, en lien avec la baisse de la pression chimique depuis plusieurs décennies) ou spatial (organismes présents à l'embouchure moins impactés que ceux présents plus en amont dans l'estuaire, en lien avec la dilution des contaminants de l'amont vers l'aval). **Cette contamination sédimentaire contraint également des usages de la Seine**, notamment pour l'entretien des accès portuaires aux navires. En effet, des dépassements des normes de gestion pour l'activité de dragage sont régulièrement observés dans les sédiments prélevés en Seine et dans le port du Havre, nécessitant des études complémentaires et une gestion alternative à l'immersion pour limiter les risques environnementaux pouvant découler de cette pratique. **L'activité de pêche** en estuaire est également indirectement contrainte par la contamination sédimentaire, cette dernière pouvant se transférer dans le réseau trophique et entraîner des dépassements des normes sanitaires pour la consommation des poissons. Enfin, la présence de stocks de contaminants dans les sédiments plus ou moins profonds et connectés avec le lit mineur de la Seine est à considérer lors de **projets d'aménagement** ou de **restauration écologique**, qui peuvent remettre en suspension ces derniers et engendrer un apport additionnel de contaminants au milieu.

Au-delà d'un bilan de la contamination sédimentaire de l'estuaire et de la compréhension de sa dynamique, il ressort de cette synthèse **plusieurs points d'attention et enjeux de connaissance pour les années à venir :**

- Intégrer la dynamique hydro-sédimentaire estuarienne et la temporalité des apports en contaminants dans la définition des stratégies de suivi et dans l'interprétation de la variabilité de la contamination sédimentaire ;
- Poursuivre les travaux sur l'estimation du caractère biodisponible de la contamination chimique, en lien avec ses déterminants environnementaux ;
- Favoriser le développement de méthodes innovantes pour la caractérisation de la contamination des sédiments et le suivi des contaminants d'intérêt émergents pour anticiper le contexte réglementaire en évolution ;
- Assurer un suivi de la qualité écotoxique des sédiments pour s'affranchir de la multiplicité des contaminants apportés à l'estuaire ;
- Considérer les stocks de contaminants dans les travaux d'aménagement et de restauration écologique pour limiter leur remise en suspension, avec une étape préalable de caractérisation de ces stocks ;
- Anticiper les effets du changement climatique (élévation du niveau marin) et les événements extrêmes (crue, tempête) dans la remobilisation des stocks de contaminants ;
- Assurer un suivi de l'état de santé des organismes benthiques pour évaluer l'efficacité des mesures de gestion.

ABRÉVIATIONS

ACHÉ	: Acetyl-Cholinesterase Enzyme
ADN	: Acide DésoxyriboNucléique
AESN	: Agence de l'Eau Seine-Normandie
BTEX	: Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes (m-p-xylènes et o-xylène)
CAP	: Cellule Anti-Pollution de la Seine
CAS	: Chemical American Society
DDT	: DichloroDiphénylTrichloroéthane
EAC	: Ecological Assessment Criteria
ERL	: Effects Range Low
EROD	: EthoxyRésorufine-O-Dééthylase
GC-MS	: Gaz-Chromatography - Mass Spectrometry
GIP	: Groupement d'Intérêt Public
HAP	: Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
HBCDD	: HexaBromoDycloDoDécane
DREAL	: Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
LC-MS	: Liquid-Chromatography - Mass Spectrometry
NQE	: Norme de Qualité Environnementale
PBDE	: PolyBromoDiphénylEthers
PCB	: polychlorobiphényles
PFAS	: Per- and PolyFluoroAlkyl Substances
PFBA	: Acide heptafluorobutyrique
PFOA	: Acide PerFluoroOctanoïque
PFOS	: Acide PerFluoroOctaneSulfonique
POP	: Polluant Organique Persistant
PS	: Poids Sec
ROCCH	: Réseau d'Observation de la Contamination CHimique du milieu marin
TBARS	: ThioBarbituric Acid Reactive Substances
TBT	: TriButylEtain
VTG	: Vitellogénine
YAS	: Yeast Androgen Screen
YES	: Yeast Estrogen Screen

GLOSSAIRE

Activation métabolique : grâce à l'ajout d'un mélange S9 préparé à partir de foies de rats traités à l'aide d'un inducteur enzymatique, les substances présentes dans l'échantillon testé sont métabolisées. Cette métabolisation modifie la toxicité du mélange.

Bioaccumulation : désigne l'absorption et le stockage dans les organismes vivants de substances chimiques en concentration supérieure à celle de leur environnement.

Bioamplification : correspond à une augmentation des concentrations de certains contaminants le long de la chaîne trophique.

Biodisponibilité : aptitude d'un composé chimique à être absorbé par un organisme.

Bioessai : méthode expérimentale pour évaluer l'activité biologique d'échantillons environnementaux (eau, sédiment).

Biomarqueur : changement observable et/ou mesurable au niveau moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique, qui révèle l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant.

Bouchon vaseux : zone d'accumulation de sédiments fins, particulière aux estuaires et induisant une forte turbidité. Son emplacement varie selon le coefficient de marée, le moment de la marée et le débit.

Bruit de fond géochimique : concentration d'un élément chimique dans un compartiment environnemental (eau, sédiment, biote), en dehors de tout apport d'origine humaine.

Chromatographie : technique analytique qui permet de séparer les substances chimiques présentes dans un mélange. Elle s'appuie sur les caractéristiques de chaque substance qui guident son comportement entre une phase mobile (gazeuse ou liquide) et une phase stationnaire. Cette séparation est souvent suivie d'une étape d'identification et de quantification par spectrométrie de masse*.

Désorber : phénomène chimique où une substance se détache de son substrat, le matériel particulaire dans le contexte étudié.

Groupe d'âge : correspond au nombre d'hivers vécus par le poisson. Par exemple, un poisson qui a vécu 1 hiver fait partie du groupe 1 (G1).

Réseau trophique : regroupe un ensemble d'organismes qui se nourrissent les uns des autres, à travers des relations entre les proies et les prédateurs.

Spectrométrie de masse : technique analytique permettant la détection et l'identification des substances chimiques en fonction de leur rapport masse sur charge.

Vitellogénine : protéine impliquée dans la reproduction, dont l'induction chez les mâles témoigne de l'exposition à des œstrogènes.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), 2018. **Guide pratique des micropolluants dans les eaux du bassin Seine-Normandie**. 383p.
- Amara R. & Laroche J. (Coord.), Cachot J., Couteau J., Devaux A., Devin S., Le Floch S., Minier C., Ouddane B., 2020. **Projet HQ-Fish : Impact de la qualité des habitats estuariens de la Seine sur le fonctionnement d'une population de poisson (flet)**. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 64 p.
- Amara R., Laroche J., Couteau J., Xuereb B., Pichereau V., Diop M., 2020. **Biomonitoring actif (engagement de flets et de crevettes) pour le suivi de l'impact de l'incendie du 26 septembre 2019 des installations « Lubrizol / NL Logistique »**. Rapport de recherche réalisé pour le GIP Seine-Aval, 34p.
- Amiard-Triquet C. & Rainbow P. S. (Ed.), 2009. **Environmental Assessment of Estuarine Ecosystems: A Case Study**. CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton, 368p.
- Boust D. (coord.), Berthe T., Lesueur P., 2012. **Projet RHAPSODIS : Reconstitution de l'Historique des Apports Particulaires à la Seine par l'Observation De leur Intégration Sédimentaire**. Projet Seine-Aval 4, 163 p.
- Cachot J. (coord.), Vicquelin L., Landi L., Clérandeau C., Pichon A., Barjhoux I., Lebihanic F., Le Menach K., Dévier M.H., Giraudel J.L., Gardia Parege C., Budzinski H., Forget-Leray J., Boulangé-Lecomte C., Petruccianni N., Barka S., Lesueur T., Minier C., Marie S., Ouddane B., Hamzeh M., Deloffre J., 2012. **Projet TOXSEINE : Analyse de la toxicité globale et identification des composés toxiques à risque dans l'estuaire de la Seine**. Projet Seine-Aval 4, 78p.
- Carronnier, H., 2021. **Etude de distribution et d'impact des composés per fluorés dans les différents compartiments représentatifs de la Seine, faisant suite à un accident industriel**. Thèse de pharmacie – faculté de Pharmacie de Paris, 118p.
- Chemical American Society, 2023. **CAS Registry**. [en ligne] <https://www.cas.org/fr/cas-data/cas-registry>
- Cellule Antipollution de la Seine (CAS), 2002. **Suivi de la qualité de l'eau de la Seine à l'aval de Poses – Bilan de l'année 2002**. 156p.
- Chiffolleau J.F., Auger D., Boutier B., Rozuel E., Truquet I., 2003. **Dosage de certains métaux dans les sédiments et la matière en suspension par absorption atomique**. Quae Ed. 45p.
- Commissariat général au développement durable, 2023. **Limites planétaires**. [en ligne] <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/societe/article/limites-planetaires>
- Couteau J. (coord.), Forget-Leray J., Budzinski H., Cachot J., Cuvilliez A., 2012. **Projet BCG : Cartographie de la génotoxicité en estuaire de Seine et étude du transfert des contaminants génotoxiques du milieu vers les organismes**. Projet Seine-Aval 4, 61p.
- Couteau J., 2020a. **Mesure de biomarqueurs sur *Platichthys flesus* prélevés en estuaire de Seine en septembre 2019**. Rapport réalisé par TOXEM pour le GIP Seine-Aval, 22p.
- Couteau J., 2020b. **Analyses d'échantillons sédimentaires prélevés mensuellement en bordure de Seine entre novembre 2019 et mai 2020 - Bilan**. Rapport réalisé par TOXEM pour Lubrizol, 7p.
- Dabrin A., Yari A., Masson M., Le Coz J., Coquery M., 2021. **Surveillance de la contamination chimique des sédiments dans les cours d'eau : pertinence de l'échantillonnage intégratif des matières en suspension**. Revue Science Eaux & Territoires n°37, p. 106-109
- Dargnat C. & Fisson C., 2010. **Les PCB dans le bassin de la Seine et son estuaire**. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval, 134p.
- Debret M. (coord), Koltato F., Mourrier B., Winiarski T., Jacq K., Couteau J., en cours. **Projet DESTOX : Impact de l'environnement de dépôt sur le stockage de contaminants et leur toxicité dans le secteur des îles**. Projet de recherche du programme Seine-Aval 7.
- Dendievel A.M., Grosbois C., Ayrault S., Evrard O., Coynel A., Debret M., Gardes T., Euzen C., Schmitt L., Chabaux F., Winiarski T., Van Der Perk M., Mourier B., 2022. **Key factors influencing metal concentrations in sediments along Western European Rivers: A long-term monitoring study (1945–2020)**. Science of the Total Environment 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149778>
- Dendievel A.M., Mourier B., Coynel A., Evrard O., Labadie P., Ayrault S., Debret M., Koltato F., Copard Y., Faivre Q., Gardes T., Vauclin S., Budzinski H., Grosbois C., Winiarski T., Desmet M., 2019. **Spatio-temporal assessment of the PCB sediment contamination in the four main French River Basins (1945-2018)**. Earth System Science Data. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-167>

- DREAL Rhône-Alpes, 2013. **Recommandations relatives aux travaux impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés**. Rapport réalisé dans le cadre du plan d'action Rhône-Méditerranée pour la pollution par les PCB, 184 p.
- EGIS, 2018. **Restauration écologique de l'Eure aval sur le domaine public fluvial**. Dossier de demande d'autorisation environnementale, 87p.
- Fisson C., 2012a. **Imprégnation des cours d'eau haut-normands par les PCB – exploitation des résultats du plan local PCB Haute-Normandie 2008-2011**. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval, 29p.
- Fisson, 2012b. **Imprégnation du compartiment aquatique de Haute-Normandie par les contaminants chimiques – données 2007/2010**. Rapport GIP Seine-Aval, 30p. et annexes
- Fisson C. (coord.), 2014. **Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine**. Fascicule Seine-Aval 3.2, 52p.
- Fisson C., 2016. **Imprégnation des cours d'eau haut-normands par les PCB et autres micropolluants**. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval pour le compte de la Cellule de Suivi du Littoral Normand, 35p.
- Fisson C., 2017. **Industrialisation de l'estuaire de la Seine : quel héritage pour la qualité des eaux ?** Fascicule Seine-Aval 3.6, 52p.
- Fisson C., 2020. **Réseau de suivi de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine – Historique et pistes d'évolutions**. Rapport d'étude du GIP Seine-Aval, 27p.
- Fisson C., Aït-Aïssa S., Amara R., Couteau J., Laroche J., Le Roux J., Pichereau V., Xuereb B., 2020. **Incendie du 26 septembre 2019 des installations « Lubrizol / NLLogistique » : Quel impact sur la Seine ?** Rapport d'étude réalisé par le GIP SeineAval, 62p.
- Fisson C., Cachot J., Gasperi J., Halm-Lemeille M.P., Tassin B., Tramoy R., 2021. **La pollution plastique en estuaire de Seine : Dynamique, imprégnation et impact sur le vivant**. Fascicule Seine-Aval 3.7, 59p.
- Foussard V. (coord.), Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O., 2010. **Évolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours**. Fascicule Seine-Aval n°2.3, 43p.
- Gasperi J. & Cachot J. (coord.), 2021. **Projet Plastic-Seine : Flux et impacts des microplastiques dans l'estuaire de la Seine**. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 118 p.
- Gardes T., 2021. **Reconstruction temporelle des contaminations métalliques et organiques particulières dans le bassin versant de l'Eure et devenir des sédiments suite à l'arasement d'un barrage**. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, 362 p.
- Gonzalez J.L., Amouroux I., Lesbats S., 2020. **Tutoriels pour la mise en œuvre opérationnelle des échantillonneurs passifs pour la mesure des contaminants métalliques et organiques en milieu marin**.
- Grouhel-Pellouin A., Menet-Nedelec F., Bruzac S., Cordier R., Crochet S., Duquesne V., Godfrin Y., Mary C., Mauffret A., M'Zaril L., Sireau T., Thomas B., 2022. **Contamination chimique des sédiments superficiels côtiers en Manche Est et Mer du Nord - Bilan de la campagne ROCCHSD19**. Rapport de l'Ifremer pour les Agences de l'Eau Seine-Normandie et Artois-Picardie RST/RBE-CCEM-ROCCH 22-001, 72p. <https://doi.org/10.13155/86854>
- Grouhel-Pellouin A., Menet-Nedelec F., Bruzac S., Cordier R., Crochet S., Duquesne V., Godfrin Y., Mary C., Mauffret A., M'Zaril L., Sireau T., Thomas B., 2019. **ROCCHSED19 sediment dataset: chemical contaminants in surface sediment for environmental assessment in french coasts (East Channel and North Sea)**. SEANOE. <https://doi.org/10.17882/85611>
- HAROPA-Port de Rouen, 2021. **Dragage d'entretien de l'estuaire amont de la Seine entre Rouen et Vieux-Port**. Rapport de suivi, 104p.
- HAROPA-Port du Havre, 2020. **Dragage d'entretien du Grand Port Maritime du Havre – synthèse des suivis 2016-2017-2018**. Rapport de suivi, 200p.
- HAROPA-Port de Rouen, 2019. **Dragages d'entretien et immersion des sédiments de dragage sur les sites de Machu, zone intermédiaire et zone temporaire amont**. Rapport de suivi, 159p.

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Rapport ou autre publication

Site web

BIBLIOGRAPHIE

- Ifremer, 2021. **ROCCH : Réseau d'observation de la contamination chimique du littoral**. [en ligne] <https://littoral.ifremer.fr/Reseaux-de-surveillance/Environnement/ROCCH-Reseau-d-Observation-de-la-Contamination-CHimique-du-littoral>
- INERIS, 2020. **Portail des substances chimiques – Normes de qualité environnementales et valeurs guides environnementales**. [en ligne] <https://substances.ineris.fr/fr/page/9#sediments>
- Kamman U., Akcha F., Budzinski H., Burgeot T., Gubbins M.J., Lang T., Le Menach K., Vethaak A.D., Hylland K., 2017. **PAH metabolites in fish bile: from the Seine estuary to Iceland**. *Marine Environmental Research*. 124, 41-45
- Labadie P. (Coord.), 2021. **Projet CHOPIN : Contaminants organoHalogénés histOriques et d'intérêt émergent : Présence et transfert vers la sole commune – Impact de la contamination sur la Nourricerie et conséquences sur la population**. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 110 p.
- Laurent J., Lavergne E., Couteau J., Le Floch S., Oudane B., Cachot J., Davail B., Clérandeau C., Devin S., Fisson C., Devaux A., Amara R., Diop M., Pichereau V., Laroche J., 2022. **Impacts of chemical stress, season, and climate change on the flounder population of the highly anthropised Seine estuary (France)**. *Environmental Science and Pollution Research*, 19p. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20000-y>
- Légifrance, 2022. **Arrêté du 26 avril 2022 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement**. JORF n°0109 du 11 mai 2022.
- Légifrance, 2020. **Arrêté du 30 juin 2020 modifiant l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux relevant respectivement des rubriques 2.2.3.0, 3.2.1.0 et 4.1.3.0 de la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 du code de l'environnement**. JORF n°0162 du 2 juillet 2020
- Lemoine J.P. & Verney R., 2015. **Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine**. Fascicule Seine-Aval 3,3, 64 p.
- Le Roux J., 2020. **Analyses non-ciblées sur échantillons d'eau, de sédiments et de sols suite à l'incendie du 26 septembre 2019 des usines Lubrizol et NL-Logistique**. Rapport d'analyse du LEESU, 23p. et annexes
- Mauffret A., Wessel N., Roubeix V., Akcha F., Chouvelon T., Aminot Y., Munsch C., Couteau J., Briaudeau T., Izagirre U., Mahe K., Godfrin Y., Pollono C., Moisan K., Olivier N., Bely N., Bruzac S., Crochet S., Thomas B., Sireau T., Burgeot T., 2021. **Campagne dédiée à l'évaluation des effets biologiques induits par la contamination chimique en baie de Seine**. **SELISEINE 2018**. Rapport final. 98p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00688/80024/>
- Menet-Nedelec, F., Chiffolleau, J. F., & Grouhel-Pellouin, A., 2016. **Rapport de synthèse de la campagne d'évaluation de la qualité chimique des sédiments (ROCCHSED) 2013 du littoral du bassin Seine-Normandie**. RST.ODE/UL/LERN/16-09. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00458/56928/>
- Menet-Nedelec F. & Geffard A. (coord), en cours. **Projet TARANIS : Impact des crues et orAges suR la quAlité de l'eau daNs l'estuaire de la Seine**. Projet de recherche du programme Seine-Aval 7.
- Minier C., Caltot G., Leboulenger F. & Hill E. M., 2000. **An investigation of the incidence of intersex fish in Seine-Maritime and Sussex regions**. *Analysis*, 28: 801-806.
- Minier, C., Amara R. 2008. **From pollution to altered fish physiological performance; the case of flatfish in the Seine estuary**. In Amiard-Triquet Environmental assessment of estuarine ecosystems. Taylor and francis. Boca Raton. 227-240.
- Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durable, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Ministère de la Santé de la Jeunesse et des Sports, 2008. **Plan national d'action sur les polychlorobiphenyles (PCB)**. 11p.
- Muntoni M., 2020. **Projet REPERE : Référentiel partagé sur les priorités de restauration des fonctionnalités des milieux estuariens de la vallée de Seine-Aval**. Rapport d'étude du GIP Seine-Aval, 94p.

- Persson L., Carney Almroth B., Collins C., Cornell S., de Wit C.A., Diamond M.L., Fantke P., Hassellöv M., MacLeod M., Ryberg M.W., Søgaaard Jørgensen P., Villarrubia-Gómez P., Wang Z., Zwicky Hauschild M., 2022. **Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities.** *Environmental Science & Technology* 2022 56 (3), 1510-1521 <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Poisson E., Fisson C., Amiard-Triquet C., Burgeot T., Couteau J., Dur G., Durand F., Forget-Leray J., Letendre J., Souissi S., Xuereb B., 2011. **Effets de la contamination chimique. Des organismes en danger ?** Fascicule Seine-Aval 2.7, 68p.
- Préfecture de l'Eure, 2013. **Arrêté DDPP-13-057 interdisant en vue de la consommation humaine ou animale, la détention, le débarquement, le transport, la cession à titre onéreux ou gratuit de certaines espèces de poissons pêchés provenant de la partie fluviale de la Seine dans le département de l'Eure.**
- Préfecture de Seine-Maritime, 2008. Arrêté 08-0785 **portant interdiction de la consommation humaine ou animale, de la détention, du transport, de la vente ou de la cessions des poissons provenant des eaux fluviales de la Seine.**
- Préfecture de Seine-Maritime, 2013. **Arrêté DDPP 76-2013-050 portant interdiction de la consommation humaine ou animale, la détention, le transport et la commercialisation des anguilles (*Anguilla anguilla*) pêchées dans les cours d'eau ainsi que dans les bassins, canaux en liaison avec les cours d'eau du département 76.**
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. *et al.*, 2009. **A safe operating space for humanity.** *Nature* 461, 472-475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Soulier, C., Boiteux, V., Candido, P., Caupos, E., Chachignon, M., Couturier, G., Dauchy, X., Devier, M.-H., Esperanza, M., Fildier, A., Gardia-Parege, C., Guibal, R., Le Roux, J., Leroy, G., Lestremay, F., Lissalde, S., Noyon, N., Piram, A., Vulliet, E., Margoum, C., 2021. **La spectrométrie de masse haute résolution pour la recherche de micropolluants organiques dans l'environnement: Screening of organic micropollutants in environment by high resolution mass spectrometry.** *TSM* 6, 43-54. <https://doi.org/10.36904/tsm/202106043>
- TELLUX, 2021. **Etude des sédiments et recherche des polluants sur la filandre du Trait - Rapport final de synthèse : phase 3.** Étude réalisée pour la Métropole Rouen Normandie, 36p.
- Tramoy R., Gasperi J., Tassin B., Rognard F., 2019. **Projet MACROPLAST : Estimation des flux de macrodéchets sur le bassin de la Seine.** Projet financé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 96p.
- Tremblay L., Kohl S.D., Rice J.A. & Gagné J.P., 2005. **Effects of temperature, salinity, and dissolved humic substances on the sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to estuarine particles.** *Marine Chemistry* 96(1-2), 21-34.
- Verney R., 2006. **Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs, mesures in-situ, mesures expérimentales et modélisation, application à l'estuaire de Seine.** Thèse de doctorat, Université de Rouen, 330p.
- Vrel A., 2012. **Reconstitution de l'historique des apports en radionucléides et contaminants métalliques à l'estuaire fluvial de la Seine par l'analyse de leur enregistrement sédimentaire.** Thèse de doctorat de l'Université de Caen, 304p. et annexes
- Xuereb B. (coord.), Barjhoux I., Bustamante P., 2019. **Projet ECOTONES : Effets de la contamination sur les organismes de l'estuaire de la Seine.** Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 42 p.

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Rapport ou autre publication

Site web

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Substances chimiques quantifiées dans les sédiments de la Seine (2007-2019)	10
Figure 2 : Substances chimiques quantifiées ou mesurées dans les sédiments de l'estuaire de la Seine entre 2007 et 2019.	11
Figure 3 : Profils de contamination en composés organohalogénés émergents dans les sédiments de l'embouchure de la Seine (campagne d'octobre 2018).	11
Figure 4 : Concentration en microplastiques dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.	13
Figure 5 : Contamination sédimentaire en PCB pour la Seine et émissions en France et Europe de l'ouest.	14
Figure 6 : Contamination métallique (mg/kg) des sédiments de la Seine amont, central et aval.	15
Figure 7 : Evolution de la contamination en HAP depuis 2000, dans les sédiments de l'estuaire et de la proche baie de Seine.	15
Figure 8 : Evolution de polluants dans une carotte sédimentaire prélevée dans la Darse des Docks (Petit-Couronne).	16
Figure 9 : Pression écotoxique associée aux sédiments prélevés en Seine en 2009.	17
Figure 10 : Génotoxicité directe (sans activation métabolique) dans les sédiments de surface prélevés dans la vasière nord en 2010.	18
Figure 11 : Bilan des réponses écotoxiques mesurées sur les sédiments prélevés dans l'estuaire de la Seine, entre novembre 2019 et mai 2020.	18
Figure 12 : Dynamique des matières en suspension en estuaire.	21
Figure 13 : Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine.	21
Figure 14 : Contamination en PCB dans les sédiments de la Seine et sites pollués par les PCB.	23
Figure 15 : Contamination chimique des sédiments le long de l'estuaire de la Seine.	24
Figure 16 : Gradient géographique des principaux contaminants dans le sédiment marin, de la frontière belge au Cotentin.	26
Figure 17 : Contamination organique du littoral normando-picard.	27
Figure 18 : Evolution des dépôts sédimentaires à l'embouchure de la Seine.	28
Figure 19 : Profil de contamination dans les sédiments et les flets après un mois d'exposition par encagement.	31
Figure 20 : Imprégnation chimique du benthos et des poissons (individus entiers) à l'embouchure de la Seine en organohalogénés.	31
Figure 21 : Effets écotoxiques observés chez les flets adultes prélevés en estuaire de Seine en 2018.	33
Figure 22 : Concentration plasmatique de Vitellogénine mesurée chez les flets mâles de l'estuaire de la Seine.	34
Figure 23 : Principaux sites de dragage et zones de clapage à l'embouchure de la Seine.	35
Figure 24 : Localisation des sites de forage et zones de pollution identifiées au niveau de la Flandre du Trait.	37
Figure 25 : Evolution de la contamination en HAP dans une carotte sédimentaire prélevée dans l'étang de Martot.	39
Figure A : Stations de suivi de la contamination sédimentaire de l'estuaire de la Seine et de la proche baie de Seine.	8
Figure B : <i>Chromatogrammes GC-MS</i> de sédiments prélevés dans les bassins portuaires de la boucle de Rouen.	12
Figure C : Normalisation de la contamination en chrome pour des sédiments prélevés dans le chenal, à l'embouchure de la Seine (2018-2020).	22
Figure D : Fonctionnement des vasières intertidales en estuaire de Seine.	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Substances prioritaires à suivre dans le sédiment pour évaluer l'état chimique des eaux de surface.	9
Tableau II : Impacts toxiques des principales familles de contaminants.	17
Tableau III : Proportion (%) de métaux transportés par les matières en suspension.	19
Tableau IV : Paramètres généraux mesurés pour caractériser la nature du sédiment.	20
Tableau V : Occurrences de dépassement du seuil N ₁ (N ₂) pour les sédiments dragués dans le port du Havre et les canaux adjacents.	36
Tableau VI : Estimation du stock métallique maximal concerné par l'érosion sédimentaire du chenal de l'Eure et de l'étang de Martot, suite à l'arasement du barrage de Martot.	39

Crédit photo :
sauf mention contraire : GIP Seine-Aval

Conception/réalisation :
www.partenairesdavenir.com

FASCICULES SEINE-AVAL

FASCICULES SERIE 3

- 3.1 L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution
- 3.2 Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine
- 3.3 Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine
- 3.4 Usages et perceptions de l'estuaire de la Seine par le citoyen : aménager, valoriser, restaurer
- 3.5 Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique
- 3.6 Industrialisation de l'estuaire de la Seine : quel héritage pour la qualité des eaux ?
- 3.7 La pollution plastique en estuaire de Seine : imprégnation environnementale, dynamique et impact sur le vivant
- 3.8 La contamination chimique des sédiments de l'estuaire de la Seine : Etat des lieux et enjeux de gestion

FASCICULES À TÉLÉCHARGER SUR : <http://fascicules.seine-aval.fr>

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante :
Fisson C., 2023.

La contamination chimique des sédiments de l'estuaire de la Seine : Etat des lieux et enjeux de gestion.

Fascicule Seine-Aval 3.8, 48 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval : gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par :

