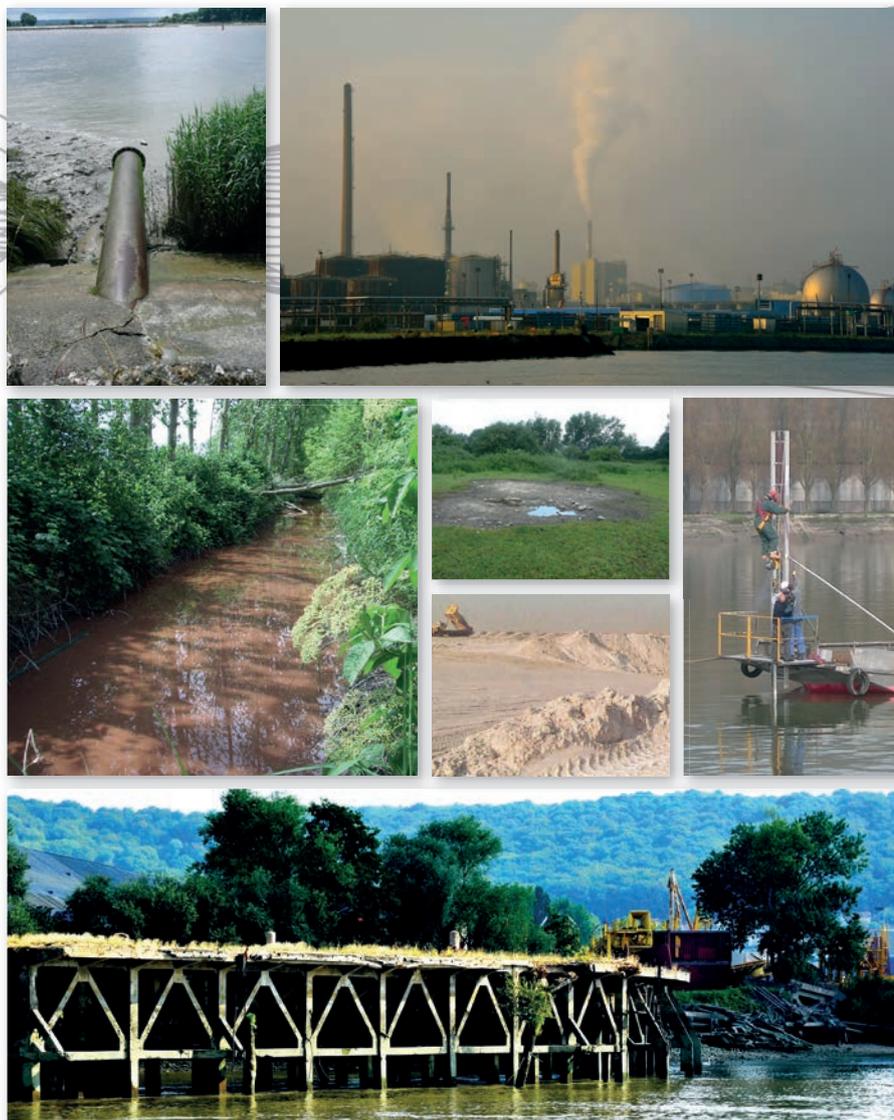


INDUSTRIALISATION DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE : QUEL HÉRITAGE POUR LA QUALITÉ DES EAUX ?





INDUSTRIALISATION DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE: QUEL HÉRITAGE POUR LA QUALITÉ DES EAUX ?

Ce fascicule restitue le travail réalisé dans le cadre du projet COMHETES (Contamination historique de l'estuaire de la Seine) soutenu par une aide financière exceptionnelle de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

AUTEURS

C. Fisson¹

CONTRIBUTIONS

M. Debret², P. Houllé¹, L. Vicquelin¹

NOVEMBRE 2017

(1) GIP Seine-Aval

(2) Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière, Normandie Université

« En l'an 368 de notre ère, l'Empereur Julien, qui séjournait souvent à Lutèce, écrivait qu'on boit volontiers l'eau de la Seine, très pure et très agréable à la vue.

Les temps ont bien changé. Ils risquent de changer encore plus vite. Il ne vient plus à l'esprit de boire l'eau de la Seine à Paris ni même de s'y baigner. Mais au train où vont les choses on ne pourrait avant 5 ans se servir à Rouen d'eau de Seine pour certains usages industriels. »

DATAR, 1970

« Avec les efforts entrepris depuis plusieurs années pour réduire les rejets industriels, une amélioration se dessine pour les polluants les plus critiques (PCB, organochlorés,...). Ces efforts doivent être poursuivis tout au long du fleuve pour confirmer une restauration de ce milieu fragile. »

SPPPI, 1996

« Aujourd'hui, la contamination par les micropolluants est l'un des principaux facteurs de déclassement de la qualité de l'estuaire de Seine. L'atteinte du bon état du fleuve et de ses écosystèmes associés passera nécessairement par une meilleure prise en compte de ces contaminations en poursuivant les efforts de réduction des émissions à la source, ainsi que ceux liés à l'acquisition de connaissances qui concourent à une meilleure caractérisation et gestion des stocks historiques aujourd'hui piégés dans les différents compartiments de l'environnement »

AESN, 2016

Sommaire

■ SOMMAIRE	5
■ INTRODUCTION	6
I INDUSTRIALISATION DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE AU COURS DU XX^e SIÈCLE	8
A La production d'énergie	8
Encart n° 1 Mise en place et évolution du SPPPI Basse-Seine	
B L'industrie du bois et du papier	11
C L'industrie textile	12
D L'industrie pétrochimique	13
E Le secteur des transports	14
F L'industrie chimique	14
G La métallurgie et le traitement de surface	16
Encart n° 2 Evolution des apports en contaminants métalliques par la Seine	
H La production d'engrais	18
I La gestion des déchets	19
J L'accidentologie	21
Encart n° 3 Accident du pétrolier Katja dans le port du Havre	
II SITES ET SOLS POLLUÉS ET FRICHES D'ACTIVITÉ DE LA PLAINE ALLUVIALE	23
A Les sites et sols pollués	23
Encart n° 4 BASOL et BASIAS : deux outils d'inventaire des sites et sols pollués	
B Les friches d'activité	28
C Zoom sur la gestion des déchets à l'embouchure de la Seine	28
III STOCKS DE CONTAMINANTS DANS LES SÉDIMENTS DE LA SEINE	30
A Contamination des sédiments circulant en Seine	30
B Identification de stocks de contaminants par carottage	32
C Localisation des stocks potentiels de contaminants	36
IV TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION APPLICABLES EN ESTUAIRE	39
A Description des procédés	39
B Choix des techniques	40
■ CONCLUSION	42
■ ABRÉVIATIONS	44
■ GLOSSAIRE	45
■ BIBLIOGRAPHIE	46
■ TABLES DES ILLUSTRATIONS	48
Liste des figures	48
Liste des tableaux	49

INTRODUCTION

La lutte contre la pollution des eaux est un enjeu majeur, que ce soit pour l'atteinte du bon état réglementaire des eaux, le fonctionnement des écosystèmes ou la maîtrise des risques sanitaires liés aux usages de baignade, de production d'eau potable ou de consommation de produits de la pêche. Cette lutte passe notamment par la maîtrise des sources de pollution, en lien avec les pressions urbaines, industrielles et agricoles. Elle passe également par la connaissance et la gestion des stocks de contaminants accumulés dans les compartiments environnementaux. Ces stocks peuvent être directement liés à des dépôts ou à des rejets de polluants (locaux ou non, passés ou actuels), mais aussi s'expliquer par le fonctionnement hydrosédimentaire du cours d'eau (zones d'accumulation de sédiments). La remobilisation potentielle de ces contaminants dans l'environnement pourrait ainsi représenter des flux non négligeables vers le réseau hydrographique et une voie de transfert dans la chaîne trophique (phénomène de bioaccumulation*). Cette remobilisation peut se faire **1)** par ruissellement sur des sites et sols pollués*, **2)** suite à une crue, une tempête ou lors de travaux d'aménagement, **3)** par diffusion dans la nappe phréatique. En cas de remobilisation (pour les sédiments) ou de consommation (pour les poissons et les mollusques), la question des risques environnementaux et sanitaires potentiels est posée.

L'estuaire de la Seine est particulièrement concerné par cette problématique de stockage de contaminants dans l'environnement, plus particulièrement dans les sols ou les vasières. La constitution de ces stocks est à relier avec les apports venant du bassin versant de la Seine et de ses affluents, qui n'ont diminué qu'à partir des années 1970 pour les principaux polluants (métaux, PCB, pesticides organochlorés, radionucléides,...), mais aussi à des pratiques peu soucieuses de l'environnement jusque dans les années 1980. Bien que les teneurs en contaminants dans l'eau, les sédiments et le biote suivent globalement une trajectoire en amélioration depuis cette période [Figure 1], elle reste à pondérer pour certains contaminants ou secteurs spécifiques. Des accidents ont en effet marqué le milieu et des rejets chroniques de polluants ont perduré au-delà de cette période. L'aménagement de l'estuaire et son fonctionnement hydro-sédimentaire ont également joué un rôle dans la constitution de stocks de contaminants, en favorisant l'accumulation de sédiments et des contaminants associés dans les années 1950 à 1980 (comblement de bras morts, fusion d'îles, endiguement,...).

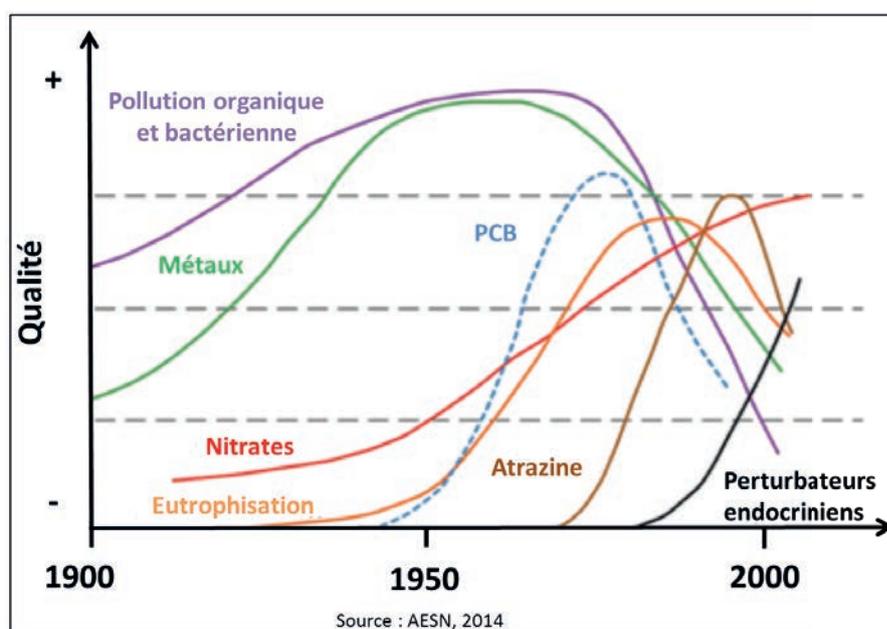


FIGURE 1 Evolution à long terme de la pollution des eaux du bassin versant de la Seine.



Du fait des fortes améliorations de la qualité des eaux pour les polluants historiques et de l'importante baisse des rejets au réseau hydrographique depuis les années 1980, la question de la gestion de ces stocks de contaminants semble aujourd'hui primordiale. Elle était ciblée dès 1995 par la DRIRE de Haute-Normandie qui indiquait dans ses bilans régionaux que « plusieurs décennies d'activités industrielles exercées dans des conditions de protection de l'environnement sans rapport avec les préoccupations actuelles, nous ont légué un héritage assez lourd en matière de pollution du sol et du sous-sol auquel nous devons faire face aujourd'hui. Il peut s'agir : **1)** d'anciens sites industriels abandonnés ou en activité à pollutions multiples ; **2)** d'anciennes décharges, des dépôts de déchets ou de produits abandonnés souvent provoqué par des faillites d'entreprises ou des pratiques frauduleuses d'élimination ; **3)** de retombées, d'infiltration ou de déversements liés à une installation industrielle ou à un accident de transport. » Plus récemment, cette préoccupation a été reprise dans le Plan Régional Santé Environnement (2010-2013), dont la mesure 1.3.3 précise que « lorsque des contaminations environnementales sont avérées (vasière, sites ou sols pollués,...), une gestion active de ces points noirs doit être assurée pour éviter toute remobilisation et apport à l'environnement de contaminants. » Le SDAGE 2016-2021 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands insiste également sur ce point dans sa disposition D3.23 qui incite à « développer les connaissances sur les stocks de pollution dans l'environnement, en particulier

pour les polluants ubiquistes, susceptibles de contaminer les milieux aquatiques. » L'intégration de cette problématique dans ces différents documents illustre ainsi les enjeux économiques, sanitaires et environnementaux que font peser les stocks environnementaux de contaminants.

Du fait de son histoire industrielle et de son fonctionnement hydro-sédimentaire, l'estuaire de la Seine est particulièrement concerné par cette question des stocks environnementaux de contaminants. Le présent fascicule traite de cette problématique à travers l'industrialisation de l'estuaire de la Seine et l'héritage laissé sur la qualité des eaux. Dans une première partie, le développement des activités industrielles implantées en bord de Seine depuis 1900 est décrit (production d'énergie, industrie du bois et du papier, industrie pétrochimique, production d'engrais, gestion des déchets, etc.). Leur impact passé sur la qualité des eaux et l'héritage actuel sont les fils conducteurs de ce chapitre qui mobilise de nombreuses archives documentaires sur la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. Cet héritage sur la qualité des sols de la plaine alluviale sera développé dans un deuxième chapitre qui s'appuie sur les inventaires de sites et sols pollués et de friches d'activité*. Une troisième partie traite plus spécifiquement des stocks de contaminants potentiellement présents en Seine ou en bord de Seine, constitués par les sédiments circulant en Seine sur la période 1950-1980. Enfin, les techniques de dépollution disponibles sont présentées et leur application en milieu estuarien discutée.

I INDUSTRIALISATION DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE AU COURS DU XX^e SIÈCLE



Les premières grandes zones d'activité industrielle de l'estuaire de la Seine voient le jour au début du XX^e siècle. Les activités de production d'énergie (centrales thermiques), de construction navale, de distillation d'hydrocarbures, de production chimique, d'artillerie sont les premières à s'implanter autour des centres urbains rouennais et havrais. Durant l'entre-deux-guerres, ces zones s'étendent avec le développement d'activités métallurgiques, de raffineries et de papeteries. A cette période, le site industriel de Port-Jérôme se met en place. Il sera renforcé après la seconde guerre mondiale avec l'arrivée de l'industrie pétrochimique et automobile. Dans le même temps, les complexes céréaliers et logistiques prennent de l'ampleur dans les ports de Rouen et du Havre [IPCHN, 2008]. Associée à l'implantation de ces activités industrielles, une pression polluante grandissante s'est exercée sur l'estuaire de la Seine jusqu'à la fin des années 1970 [Encart n°1 – Mise en place et évolution du SPPPI Basse-Seine].

Ce premier chapitre s'attache à décrire le développement industriel des principaux secteurs d'activités implantés le long de l'estuaire, en lien avec les pressions exercées sur les milieux aquatiques.

A. LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

A partir du XIX^e siècle, la production d'énergie en bord de Seine a connu une croissance continue, accompagnant l'essor démographique et le développement économique de la région. Pionnier à l'échelle nationale avec les travaux de Philippe Lebon, le territoire régional a d'abord connu un rapide essor de l'industrie du gaz distillé au XIX^e siècle. Employé pour l'éclairage urbain ou pour fournir du coke comme combustible aux particuliers ou aux industries comme les sidérurgies, de nombreuses usines de gaz se sont développées dans les régions rouennaise, elbeuvienne et havraise. En concurrence avec l'électricité et le gaz naturel importé de Lacq puis d'Algérie, la production de gaz manufacturé sera très largement réduite dans les années 1950, seules subsisteront quelques usines approvisionnant en coke les aciéries. C'est toutefois l'électricité, arrivée à la fin du XIX^e siècle, qui va surtout accompagner le développement industriel et urbain de la vallée de la Seine. Dans la première moitié du XX^e siècle, des centrales thermiques fonctionnant au charbon ou au fuel sont construites, comme à Rouen (1901), à Grand Quevilly (1911), à Yainville (1921), à Dieppedalle (1949) [Figure 2] ou au Havre (1968) pour la plus conséquente. A cette époque, cette activité impactait fortement la Seine, avec un réchauffement des eaux du fait de leur utilisation pour le refroidissement des centrales thermiques. A la fin des années 1960, une saturation thermique de la Seine était même crainte, avec de graves préjudices pour le milieu,

une pression accrue sur les nappes souterraines et une limitation de l'utilisation de l'eau pour les autres préleveurs. L'implantation d'unités complémentaires a ainsi été abandonnée du fait de cet argumentaire environnemental, renforcé par la crise pétrolière [DATAR, 1970]. L'héritage actuel de ce mode de production d'énergie est essentiellement lié aux dépôts de charbon, dont le lessivage par les pluies enrichit les sols en hydrocarbures et en composés adsorbés. Le stockage des cendres du foyer peut également être source de contamination de l'environnement, notamment en métaux lourds ou éléments radioactifs.

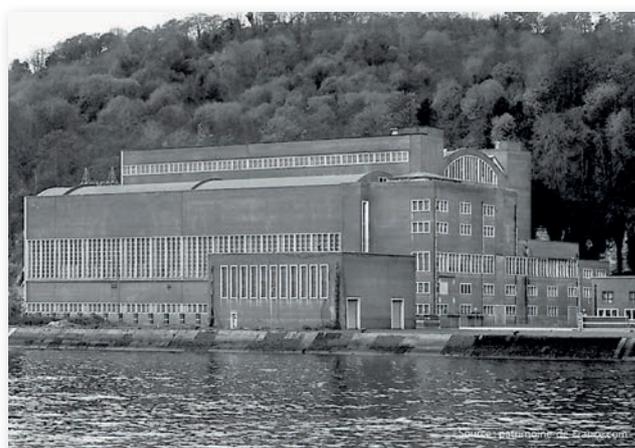


FIGURE 2 Centrale thermique de Dieppedalle.

ENCART N° 1

Mise en place et évolution du SPPPI Basse-Seine

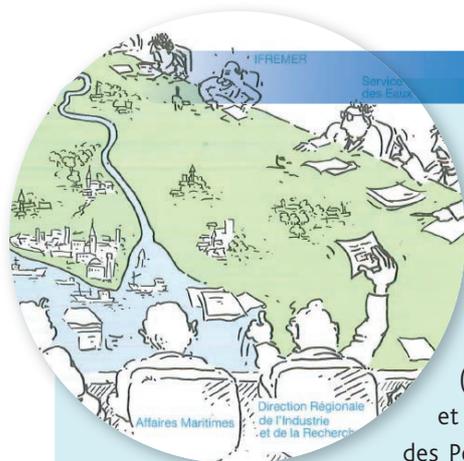


Avant la loi de 1976 sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), les textes de références étaient ceux de 1810 (relatif aux Manufactures et Ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode), 1917 (relatif aux établissements dangereux, insalubres et incommodes abrogée en 1977) et 1964 (loi sur l'eau). Avec la création du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) Basse-Seine en décembre 1977, *I)*

la sensibilité du milieu naturel de la Basse-Seine aux modifications induites par le développement urbain et économique et *II)* la nécessité de réaliser un effort important pour réduire la pollution liée à ce développement sont mises en avant. Cette organisation visait à favoriser la poursuite des actions destinées à réduire les pollutions et nuisances résultant des activités industrielles sur l'estuaire de la Seine (de Poses à la mer) et en mer. Quatre commissions ont ainsi été mises en place, avec des préoccupations qui concernaient essentiellement les rejets dans l'eau (programme de réduction des pollutions oxydables, suppression des rejets de boues jaunes et rouges, suivi de la qualité du milieu en baie de Seine) et dans l'air (programme de réduction des émissions de dioxyde de soufre). Un conseil d'orientation était coprésidé par les préfets des régions de Haute et de Basse Normandie et comportait 60 membres répartis en trois collèges (élus, responsables socio-économiques, services de l'Etat). Le secrétariat général du SPPPI était confié à la DRIRE. Une commission 'Eau' était spécifiquement chargée de contrôler l'évolution de la pollution de l'estuaire et de la baie de Seine. Elle réunissait mensuellement des experts scientifiques et des représentants des services de la lutte contre la pollution des eaux. Sur la base d'arrêtés ministériels et de circulaires, des propositions d'arrêtés préfectoraux prescrivant des limitations dans les rejets étaient discutées avec les représentants des industriels (accords de branche).

En 1988, une commission 'Risques technologiques majeurs' est créée, l'aire de compétence du SPPPI est étendue à l'ensemble de la Haute-Normandie et le conseil d'orientation est agrandi à 80 membres. En 1993, un quatrième collège regroupant des personnalités qualifiées est créé (représentants d'associations de défense de l'environnement, syndicats de salariés, universitaires). En 1994, la commission 'Déchets' est créée. A partir de 1995, les modalités de fonctionnement du SPPPI Basse-Seine évoluent. Après une période consacrée à la mise en œuvre de programmes de réduction massive des pollutions industrielles, le développement des textes normatifs sur les rejets et une meilleure prise en compte des impératifs du milieu ont conduit le SPPPI à favoriser une vision intégrée des pollutions. Dès-lors, le principe de réunions décisionnelles du conseil plus espacées dans le temps (tous les trois ans) a été retenu avec toutefois des points d'étapes intermédiaires permettant de suivre l'évolution des pollutions et de traiter des thèmes transversaux comme l'information du public sur l'environnement industriel. Dans les années 2000, les compétences des commissions (eau, air, déchets, risques, sols pollués et communication) ont été revues pour adapter leurs travaux à l'évolution des préoccupations. En 2017, il a été décidé d'élargir l'aire de compétence du SPPPI Basse-Seine à l'ensemble de la région Normandie [DREAL, 2017].

Depuis 40 ans, les actions suivies par le SPPPI ont permis de réduire sensiblement les pressions industrielles sur l'estuaire et la baie de Seine, de prévenir les risques industriels et de partager l'information disponible. Les objectifs fixés par le SPPPI l'ont toujours été en concertation avec les parties prenantes, permettant de concilier les capacités économiques des entreprises, les technologies disponibles et les enjeux environnementaux. C'est cette volonté qui guide aujourd'hui encore les actions menées pour répondre aux ambitions portées par le SPPPI.



Cette industrie de production d'énergie a laissé un héritage de sites et sols pollués relativement conséquent, avec 17 sites aujourd'hui identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine [Figure 16]. Les diagnostics montrent une pollution des sols et des nappes phréatiques, avec la présence à des teneurs parfois élevées de HAP et d'hydrocarbures, de cyanures, de BTEX, etc [Figure 20]. Des dépôts d'hydrocarbures, des cuves de décantation ou de stockage sont également parfois mis à jour lors de travaux de réhabilitation. Des travaux de dépollution ont été menés sur la majorité de ces sites et une surveillance des eaux souterraines est parfois toujours effective pour déceler une pollution associée au passé des sites considérés [MEDDE].

En association avec le transport de l'énergie électrique, des transformateurs permettent de convertir les hautes tensions

circulant sur des grandes distances en courant utilisable. Jusque dans les années 1980, les fluides utilisés comme isolant dans les transformateurs, condensateurs ou sectionneurs de puissance étaient composés de mélanges de polychlorobiphényles (PCB) et de polychloroterphényles (PCT), adjoint ou non de solvants organiques. Ces appareils ont été une source importante de pollution du milieu par les PCB, que ce soit lors de leur fabrication, de leur utilisation, de leur élimination ou suite à des actes de vandalisme. De nombreux sites sont ainsi référencés comme ayant connu une contamination avérée aux PCB, notamment le long de l'axe Seine [Figure 3]. Les sédiments de la Seine et les organismes aquatiques (poissons, mammifères marins) sont encore aujourd'hui largement imprégnés par cette pollution [Darnat & Fisson, 2010 ; Fisson, 2016].

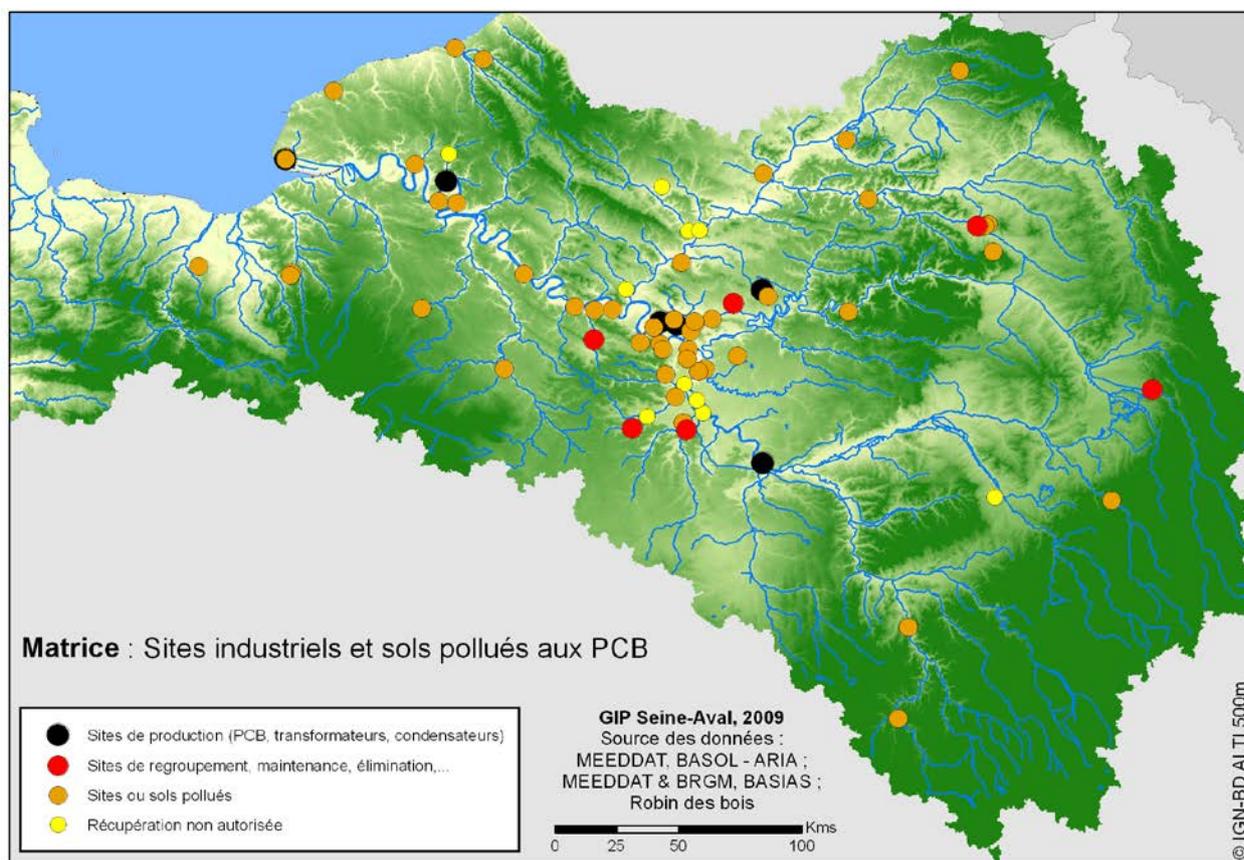
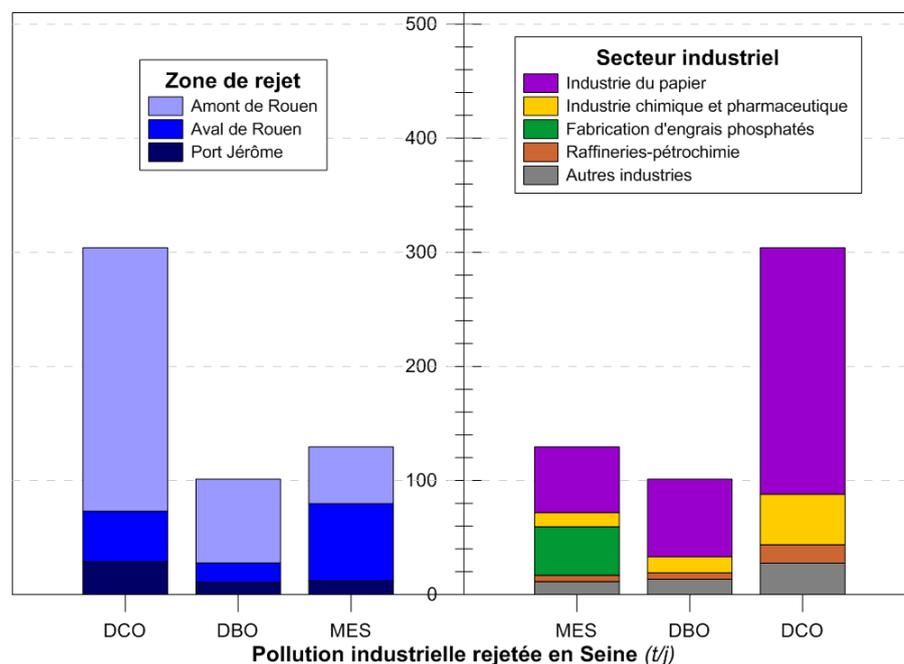


FIGURE 3 Localisation des sites et sols pollués aux PCB.

B. L'INDUSTRIE DU BOIS ET DU PAPIER

La production de pâte à papier et sa transformation en papier sont des activités historiquement présentes en bord de Seine et le long de ses principaux affluents. Les premières papeteries se sont implantées dès le XVIII^e siècle dans la basse vallée de la Risle (Papeteries de Pont-Audemer), à l'aube du XX^e siècle dans la boucle de Rouen (Grand-Quevilly en 1906, Canteleu en 1907, Grand-Couronne en 1929, Saint-Etienne-du-Rouvray en 1930), puis en 1951 plus en amont (Alizay). Ce secteur a connu un important développement dans l'entre-deux-guerres et une croissance jusque dans les années 1970. A cette époque, ce secteur d'activité se plaçait au 2^e rang des industries les plus polluantes de la basse Seine, en étant responsable de 30 % de la pollution industrielle émise en basse Seine [DATAR, 1970]¹. Cette industrie a connu de graves difficultés après le choc pétrolier de 1973, en parallèle d'une concurrence étrangère de plus en plus importante. La production était alors en baisse, plusieurs entreprises cessant leur activité ou se réorientant vers d'autres productions que la pâte à papier [IPCHN, 2008]. La production de pâte à papier mécanique à partir du broyage du bois ou de copeaux de papier était une industrie grande consommatrice d'eau et source de sulfites (utilisés comme agents blanchissant jusque dans les années 1970). Cette activité a également longtemps généré d'importants rejets de matière organique et de matières en suspension, augmentant de façon significative la turbidité, la DCO* et la DBO5* de la Seine au passage de l'agglomération rouennaise. Dans les années 1970, cette industrie était responsable de près de la moitié des rejets industriels en MES et de 70 % des rejets industriels en matières oxydables [Figure 4].

La réduction de ces rejets de matières oxydables est apparue prioritaire pour restaurer une bonne oxygénation des eaux de la Seine et initier un retour de la vie piscicole dans l'estuaire [ECOPOL, 1976]. La mise en place de nombreux aménagements épuratoires, de nouvelles unités et l'optimisation des procédés de fabrication ont ainsi permis d'améliorer net-



GIP Seine-Aval, 2017 - Source des données : ECOPOL, 1976

FIGURE 4 Rejets industriels dans l'estuaire de la Seine en 1975.

tement ces paramètres pour l'industrie (division par plus de quatre des rejets industriels en DCO entre 1978 et 1994, par cinq pour les MES) et tout particulièrement pour l'industrie papetière (réduction de 87 % de rejets de DCO entre 1978 et 1987) qui ne représentait plus que 40 % des rejets industriels en DCO en 1994 [DRAE, 1989 ; DRIRE, 1995]. L'oxygénation des eaux de la Seine est redevenue acceptable pour la vie piscicole à partir de la fin des années 1980, même si des anoxies* étaient toujours observées jusqu'à la fin des années 1990, en période d'étiage entre Rouen et Caudebec-en-Caux [Figure 5 ; SPPPI, 1990 ; Fisson, 2014].

Associé à cette activité, le stockage du bois nécessitait l'utilisation de substances antifongiques et insecticides pour le traiter et le conserver. Ces produits contenaient également des métaux, des molécules organiques plus ou moins persistantes, ainsi que des dérivés de goudrons de houille. Ces molécules ont pu contaminer le sol des aires de stockage, mais aussi le réseau hydrographique par entraînement par les eaux de pluie. Les études de sol menées lors de la cessation d'activité de papeteries ont permis de mettre à jour des contaminations par différents métaux lourds et des hydrocarbures. Cette contamination est décrite comme résultant de l'activité normale des entreprises, c'est-à-dire qu'elle n'est pas liée à une situation accidentelle [MEDDE].

1. Les sucreries et les distilleries (48 établissements) étaient les industries les plus polluantes à la fin des années 1960, avec un rejet de 125 000 tonnes/an de pollution à l'échelle du bassin de la Seine.

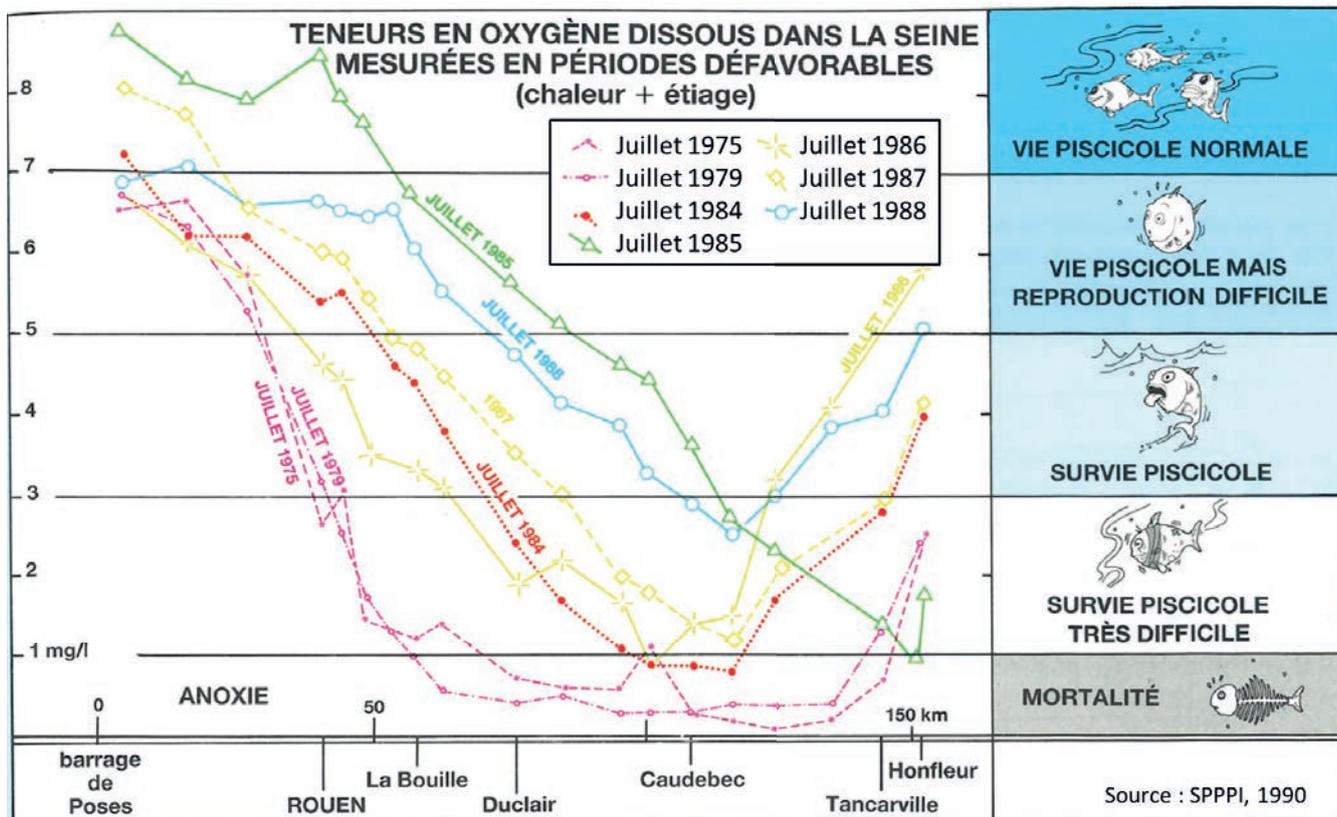


FIGURE 5 Teneurs en oxygène dissous mesurées dans la Seine en périodes défavorables, entre 1975 et 1988.

C. L'INDUSTRIE TEXTILE

Bien que présente dès le moyen-âge, c'est au XVIII^e siècle que l'industrie textile (filature, teinturerie, tanneries,...) s'est développée le long des vallées artisanales des affluents de l'estuaire (Cailly, Commerce [Figure 6], Robec/Aubette) et dans les villes à tradition drapière (Elbeuf). Cet essor de l'industrie textile dans la vallée de la Seine était en lien direct avec la présence des cours d'eau : accès au fleuve en tant que voie de transport, mais aussi comme puissance hydraulique et comme moyen de dilution nécessaire aux teintureries et tanneries. La pression chimique sur l'environnement de cette industrie était forte, avec de nombreux rejets de métaux liés aux colorants et au tannage (particulièrement le chrome) et de solvants parfois halogénés. Les études de sol menées sur d'anciens sites de l'industrie textile démontrent clairement cette empreinte métallique et la présence de solvants, parfois associée à des contaminations aux hydrocarbures et aux PCB [MEDDE].

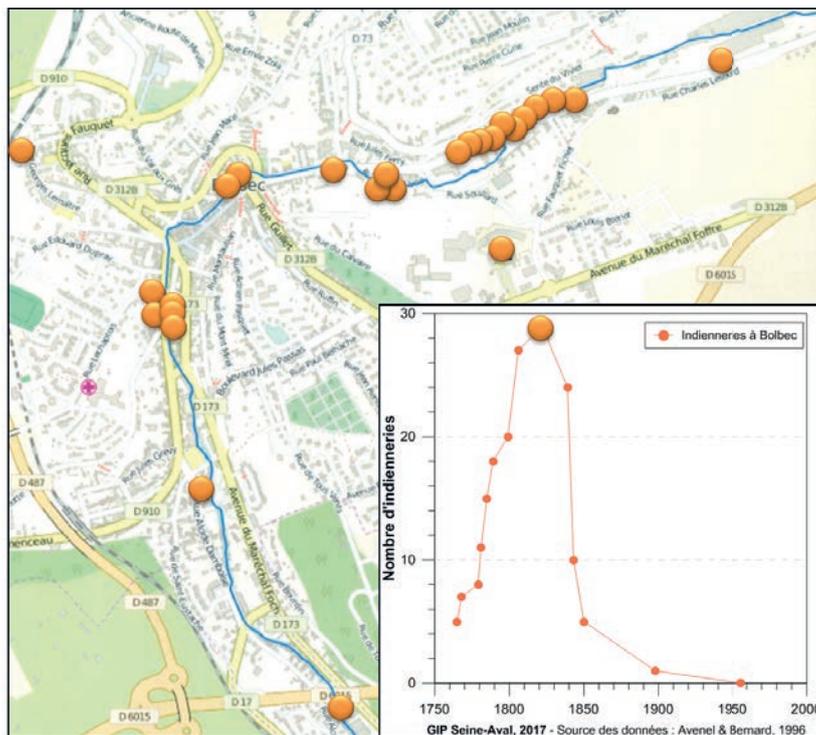


FIGURE 6 Evolution du nombre d'établissements liés à l'industrie textile à Bolbec et implantations vers 1830.

D. L'INDUSTRIE PÉTROCHIMIQUE

Le début du XX^e siècle est marqué par l'essor d'une nouvelle source d'énergie qui révolutionne le mode de consommation de la société mondiale : le pétrole. La France en produisant insuffisamment, il était nécessaire de l'importer et de le raffiner afin de répondre à la demande croissante en produits dérivés (essences, graisses...). L'estuaire de la Seine fut choisi pour abriter des usines de raffinage, du fait **1)** de la proximité des ports importateurs de pétroles bruts américains (60 % des importations en 1930) ; **2)** du lien à la région parisienne (par la Seine et par une voie ferrée) et ; **3)** car considéré comme mieux protégé que Dunkerque après l'expérience de la guerre de 1914-1918 (proximité du front). Bien que les premières raffineries se soient installées dans la vallée de la Seine dans les années 1860 pour distiller le pétrole importé (création d'un bassin au pétrole en 1891 à Rouen, en 1895 au Havre), c'est dans les années 1920-1930 que cette industrie a réellement pris son essor avec la construction de quatre raffineries le long de l'estuaire de la Seine : une à Petit-Couronne (mise en service en 1929 et reliée par pipeline au port pétrolier du Havre en 1952), une à Gonfreville-l'Orcher (mise en service en 1933) et deux à Notre-Dame-de-Gravenchon (mises en service en 1933) [Figure 7]. Ces nouvelles installations ont alors positionné la basse-Seine comme le premier centre français de raffinage.

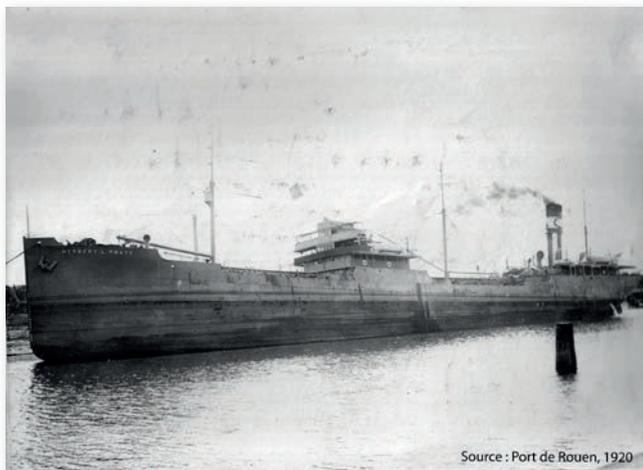


FIGURE 7 Accostage d'un pétrolier à Rouen au début du XX^e siècle.

Au milieu des années 1950, l'installation d'unités de distillation complémentaires et la mise en œuvre de nouveaux procédés de conversion ont permis d'augmenter les capacités de raffinage et d'offrir de nouveaux sous-produits pétro-

liers pour l'industrie pétrochimique. Ces derniers sont venus alimenter des établissements pétrochimiques qui se sont fortement développés entre 1950 et 1970, que ce soit sur la rive gauche de Rouen ou dans les zones industrielles de Port-Jérôme et du Havre. Il faut également noter l'importance des sites de stockage des produits pétroliers, comme les réservoirs construits dans l'avant-port du Havre à partir des années 1920, ceux exploités dans le port utilisés entre 1937 et 1996, ou ceux construits dans l'enceinte des raffineries qui représentaient 2/3 de la surface des usines. Dans les années 1950, un important réseau de pipe-lines a été mis en place pour relier les raffineries normandes à l'Île-de-France pour son alimentation en produits raffinés [IPCHN, 2008 ; Le Dez, 2009]. Enfin, de nombreux établissements liés à cette industrie se sont implantés dans la vallée de la Seine au cours du XX^e siècle : fabrication d'additifs pour lubrifiants ou peinture, d'huiles, de caoutchouc, etc.

A la fin des années 1970, les rejets en hydrocarbures totaux (440 t/an) provenant des raffineries situées à l'aval de Rouen représentaient 40 % du flux d'hydrocarbures à la baie apportés par la Seine, la présence d'un film d'hydrocarbure en surface de la Seine étant fréquente. La réduction de ces rejets était l'une des priorités pour réduire la pollution de la Seine à la fin des années 1970 [MEBS *et al.*, 1980], mais ils restaient encore très importants à la fin des années 1980 (près de 100 t/an pour les quatre même raffineries). [MEDDE].

Cette industrie a laissé un héritage de sites et sols pollués relativement conséquent dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, avec 44 sites aujourd'hui identifiés [Figure 16]. Les études de sol menées sur divers sites pétrochimiques montrent clairement une empreinte en hydrocarbures et la présence d'HAP dans les sols et les eaux souterraines en connexion avec ces sites. Des teneurs anormales* en métaux, solvants, BTEX ou PCB peuvent aussi être retrouvées dans ces compartiments [Figure 20 ; MEDDE]. Ces pollutions sont liées au fonctionnement normal de l'installation, au stockage des produits pétroliers ou à des situations accidentelles ou de destruction. Ces dernières concernent essentiellement les bombardements des stockages de pétroles pendant la seconde guerre mondiale, qui ont induit d'importants rejets d'hydrocarbures dans la Seine et ont laissé une empreinte chimique dans les sols et les eaux souterraines proches des sites bombardés.

E. LE SECTEUR DES TRANSPORTS

Le développement des transports a accompagné l'essor industriel de la région à partir de la fin du XIX^e siècle. La dynamique de ce secteur s'est enclenchée par le développement des chemins de fer, avec l'émergence de producteurs de locomotives et des moyens de maintenance associés. C'est ensuite la place centrale des ports qui a entraîné le développement de la construction navale, maritime comme fluviale, civile et militaire (Chantiers de Gravelle fondés à la fin du XIX^e siècle et devenus Ateliers Chantiers du Havre en 1966, chantiers de Normandie à Grand-Quevilly fondés en 1893, chantiers Worms au Trait fondés en 1916). Fragilisée par la destruction d'une part importante du tissu industriel à la fin de la seconde guerre mondiale et par la concurrence internationale, l'industrie navale s'est alors réorientée vers la production d'unités fluviales, la réparation des bateaux et la production d'équipements pour les usines pétrochimiques. Cette activité de construction navale a perduré jusqu'à la fermeture du dernier chantier naval à la fin des années 1990. A noter également l'implantation de l'industrie aéronautique dans la première moitié du XX^e siècle (à Caudebec-en-Caux en 1916, puis au Havre en 1931), avec la fabrication d'hydravions pour la Marine Nationale [Figure 8]. Après la seconde guerre mondiale, l'usine de Caudebec-en-Caux s'est orientée vers la révision et l'entretien du matériel aéronautique et celles du Havre vers la production de moteurs pour l'aviation civile.

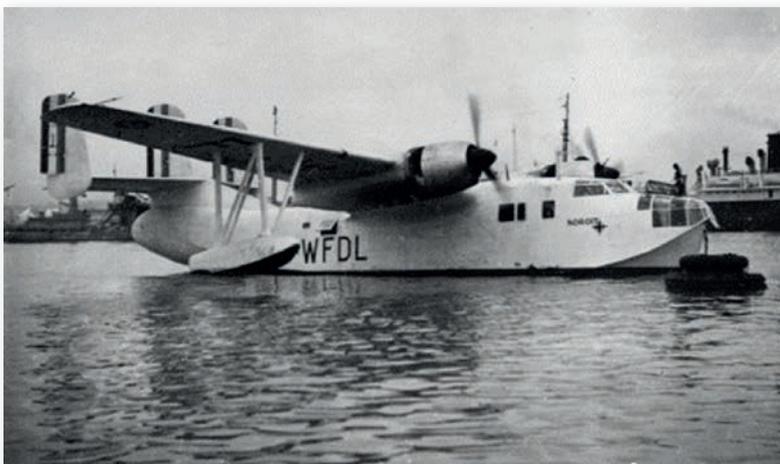


FIGURE 8 Prototype d'hydravion dans le Port du Havre (1949).

L'automobile est un autre acteur majeur du secteur des transports, avec l'implantation de l'entreprise Renault dans la vallée de la Seine à la fin des années 1950 : ouverture d'une usine de production de pièces mécaniques (moteurs, boîtes de vitesses) à Cléon (1959), puis d'une usine de montage à Sandouville (1964) et d'un centre logistique à Grand-Couronne (1975). Est associé à ce groupe, tout un tissu d'entreprises, de moindre taille, sous-traitants dans le domaine de la construction automobile [IPCHN, 2008].

Le secteur des transports a engendré deux types de pollutions majeures : des pollutions métalliques et des pollutions aux hydrocarbures, ayant pu être accompagnées de pollutions aux solvants lors de certains processus de traitement de surface.

F. L'INDUSTRIE CHIMIQUE

L'industrie chimique était déjà bien structurée dans la vallée de la Seine au début du XX^e siècle. La demande liée à la première guerre mondiale (explosifs, gaz,...) a entraîné un développement croissant de cette activité. Elle s'est encore développée et s'est diversifiée au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, en lien avec l'augmentation des capacités de raffinage du pétrole et une offre accrue en sous-produits pétroliers : fabrication de colorants et de pigments, d'engrais, de caoutchouc et de plastiques, de produits pharmaceutiques, de produits phytosanitaires, de savons, de détergents,... Ces activités étaient surtout présentes dans la boucle d'Elbeuf, dans la zone industrielle de Port-Jérôme, et dans une moindre mesure dans les zones industrielles du Havre et de Rouen. A la fin des années 1960, le secteur de l'industrie chimique se plaçait au 3^e rang des industries les plus polluantes de la basse Seine, en étant à l'origine de 10 %

de la pollution industrielle émise en basse Seine. [DATAR, 1970 ; Figure 9].

Un important programme de réduction basé sur la toxicité des rejets industriels pour l'écosystème aquatique a été lancé en 1991. Il a permis d'identifier de très nombreux rejets toxiques qui ont été progressivement réduits (réduction de 62 % de l'indice global de toxicité entre 1993 et 1995), du fait d'une mise en place ou d'une amélioration des traitements épuratoires, de changement de matières premières ou de procédés et, dans de rares cas, de la fermeture d'ateliers pour des raisons environnementales ou économiques [DRIRE, 1995]. La pression environnementale exercée par le secteur de la chimie était essentiellement liée aux produits fabriqués ou utilisés dans les procédés industriels, ainsi qu'aux sous-produits pouvant apparaître au cours des synthèses. Ces substances peuvent présenter une activité toxique intrinsèque et,

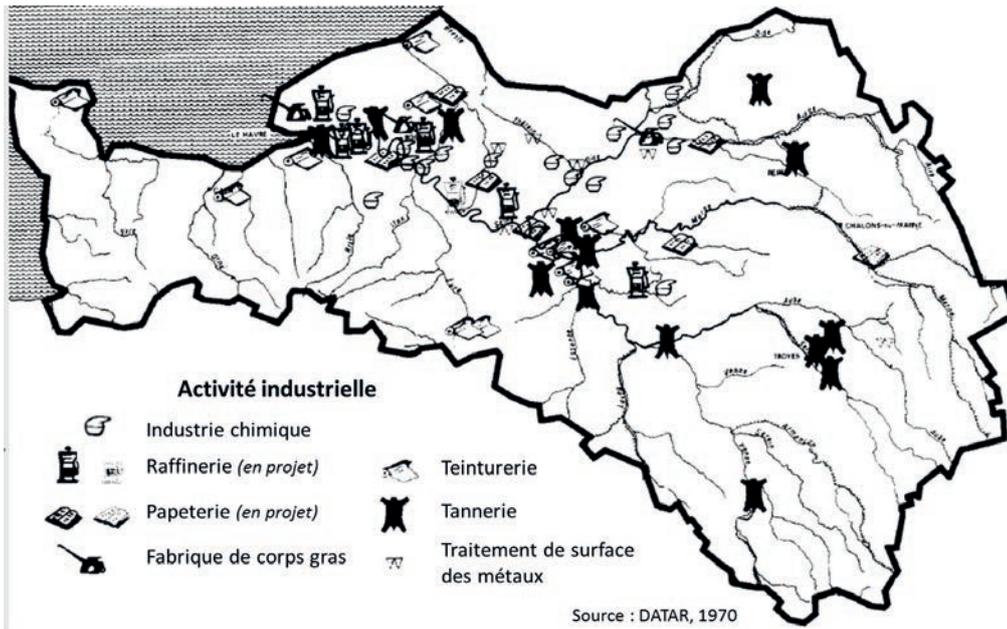


FIGURE 9 Principales industries polluantes sur le bassin versant de la Seine à la fin des années 1960.

en cas de rejet dans l'environnement, avoir un impact toxique sur le milieu. Les pollutions rapportées sont spécifiques à chaque activité, même si certains polluants sont régulièrement retrouvés (hydrocarbures, solvants, métaux et particulièrement l'arsenic,...) [Figure 20]. Cette industrie a laissé un héritage de sites et sols pollués relativement conséquent dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, avec 49 sites aujourd'hui identifiés et des impacts essentiellement constatés sur les eaux souterraines [Figure 16 ; MEDDE].

A noter également, la présence d'une activité de production d'armement au Havre entre la fin du XIX^e siècle et 1950 et d'une poudrière à Oissel (création en 1916). Des champs de tir (polygone de tir du Hoc [Figure 10], champ de tir à longue portée de Harfleur) étaient associés à cette industrie, avec des apports possibles en contaminants, du fait de la manipulation de poudres et d'explosifs sur ces terrains.



FIGURE 10 Zone industrielle du Havre en 1937.

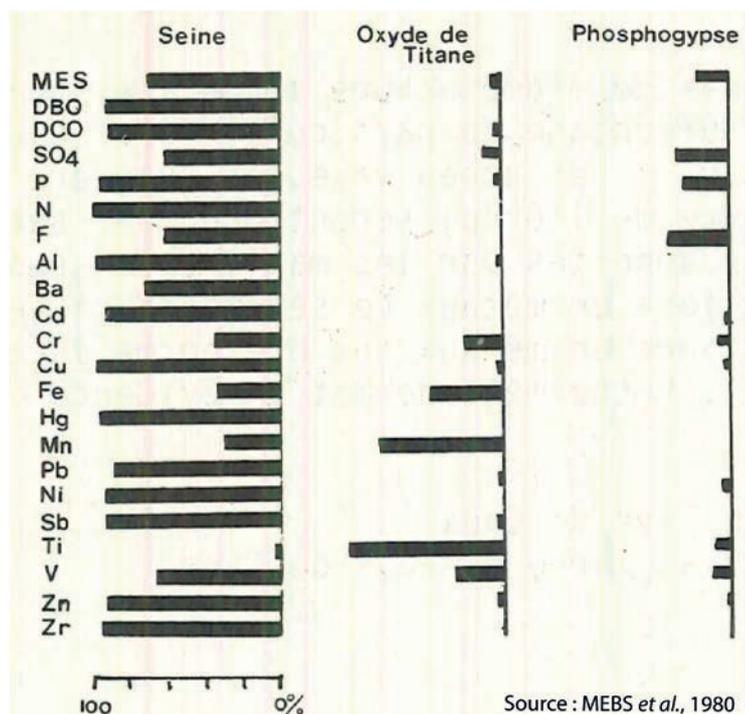


FIGURE 11 Part de l'industrie de l'oxyde de titane et de phosphogypses dans les apports polluants en baie de Seine (1980).

Dans la région havraise, la production de dioxyde titane (utilisé comme agent blanchissant et pigment blanc) est également emblématique de l'industrie chimique développée en

Seine. Débutée en 1957, cette activité engendrait un effluent très acide (pH de 1), chargé en sulfate de fer et en métaux dissous (titane, manganèse, fer, vanadium, chrome). Il était rejeté à l'embouchure de la Seine [Figure 13] et constituait une source métallique très importante – voire majoritaire pour le titane et le manganèse – vers la baie de Seine [Figure 11 ; ECOPOL, 1976 ; MEBS *et al.*, 1980]. Ce rejet (14 000 m³/j à la fin des années 1980) a fait peser de fortes contraintes sur l'environnement : impact nocif de l'acidité sur la faune et la flore, colmatage des branchies et hypersécrétion de mucus chez les animaux filtreurs du fait de l'hydroxyde ferrique, toxicité des autres métaux [SPPPI, 1990]. Suite à une mobilisation menée par les marins-pêcheurs, ce rejet a fait l'objet de nombreux suivis et des mesures ont été prises pour améliorer la diffusion du rejet en mer : mise en place d'un diffuseur en 1981 et stockage temporaire de l'effluent acide pour le rejeter dans des conditions de marées compatibles avec sa dilution. Les titanogypses produits étaient stockés sur un site proche de l'usine de production, puis sur une parcelle dédiée à partir de 1992 où une usine de neutralisation des effluents rejetés en Seine a été mise en place. Cette activité a été stoppée en 2007.

G. LA MÉTALLURGIE ET LE TRAITEMENT DE SURFACE

Après la première guerre mondiale et la perte des régions contribuant de manière importante à la production sidérurgique et à la capacité de fonte française, la vallée de la Seine a été choisie pour accueillir un grand complexe métallurgique. Sur la base des projets qui émergeaient à la veille du conflit, différentes installations se sont implantées dans la région rouennaise (hauts fourneaux à Grand-Quevilly, fonderie à Saint-Etienne-du-Rouvray, aciérie à Grand-Couronne). A ces grands complexes, il faut ajouter l'implantation de nombreuses usines de travail mécanique des métaux ou de traitement de surface le long des affluents de la Seine (Eure, Risle, Iton, Andelle,...). Ces activités ont longtemps été une forte source de pollution métallique au réseau hydrographique, avec des apports significatifs provenant des affluents, par rapport aux apports de l'amont de la Seine qui ont diminué dès les années 1950-60 [Encart n°2 - Evolution des apports en contaminants métalliques par la Seine].

Jusque dans les années 1980, la pollution métallique de la Seine et de certains affluents (Eure et Risle notamment) restait problématique, du fait de l'insuffisance de traitement des rejets industriels [Figure 12 ; DRAE, 1989]. Les sédiments sont particulièrement concernés par ces contaminations, avec une présence aujourd'hui encore marquée dans les couches profondes.

Cette industrie a laissé un héritage de sites et sols pollués important dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, avec 26 sites aujourd'hui identifiés [Figure 16] et des impacts constatés sur les sols et les eaux souterraines. L'origine de ces pollutions est essentiellement due au fonctionnement normal des installations ou à des situations accidentelles. Les métaux (plomb, zinc, cuivre, chrome) et les hydrocarbures constituent l'essentiel de l'empreinte chimique de cette industrie [MEDDE].

ENCART N° 2

Evolution des apports en contaminants métalliques par la Seine

L'évolution à long terme de la contamination d'un réseau hydrographique peut être approchée par l'étude de carottes sédimentaires prélevées dans les cours d'eau ou leur plaine inondable. L'étude de carottes sédimentaires prélevées dans la plaine inondable de la Seine, en amont de Poses (à Muids, pk 182 et à Bouafles, pk 170), a ainsi permis d'estimer l'évolution de la contamination métallique apportée par la Seine à l'estuaire sur la période 1930-2000 [Meybeck *et al.*, 2007].

L'étude des facteurs d'enrichissement* (FE) montre des niveaux et une évolution contrastés pour les différents métaux étudiés. L'arsenic et le cobalt sont les métaux les moins influencés par les activités humaines (FE<4) et présentent une décontamination régulière depuis 1930. L'enrichissement en zinc et en plomb est maximal et constant entre 1930 et 1965 (FE=20), puis décline jusqu'en 2000 (FE<5). Le chrome et le cadmium présentent un maximum en 1965, puis un déclin très net pour le cadmium (FE de 140 à 10) et plus modéré pour le chrome (FE de 7 à 2). La contamination métallique globale a ainsi largement diminué sur la période étudiée, témoignant d'une pression en baisse sur le bassin de la Seine [Figure A].

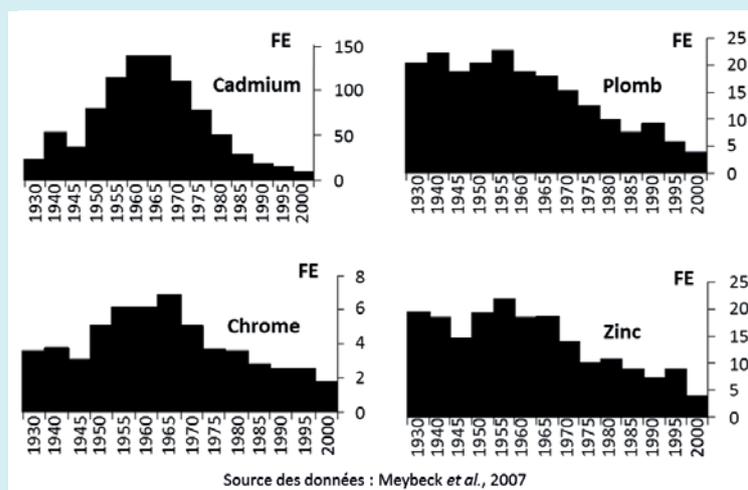


FIGURE A Facteurs d'enrichissement (FE) métallique dans les sédiments prélevés dans la plaine alluviale de la Seine, en amont de Poses.

Cette trajectoire est à comparer avec la demande en métaux pour l'industrie qui a crû entre 1950 et 1995 pour le cadmium (×8), le cuivre (×4), le zinc et le plomb (×3). Le rapport entre ces deux paramètres permet d'estimer un indicateur de fuite des métaux de l'anthroposphère vers l'hydrosphère : il était par exemple supérieur à 10 % pour le cadmium dans les années 1950, alors qu'il est inférieur à 1 % aujourd'hui. Cet éclairage rend compte d'une diminution de la pression métallique relativement plus importante qu'en ne prenant en compte que les niveaux de contamination. Le développement du recyclage et la baisse des rejets, du fait de changements de process industriels, sont les principaux leviers ayant permis ces améliorations.

Enfin, les flux métalliques à l'estuaire de Seine ont été calculés sur la période 1935-2000. Ils montrent un apport en excès de 50000 t pour le zinc, 18000 t pour le plomb, 12500 t pour le cuivre, 8900 t pour le chrome, 1000 t pour l'arsenic et 875 t pour le cadmium. En considérant la période antérieure à 1935 et en ajoutant les apports internes à l'estuaire de la Seine (apports de l'Eure et de la Risle ; rejets dans la région de Rouen et du Havre), ces estimations pourraient être doublées [Meybeck *et al.*, 2007].

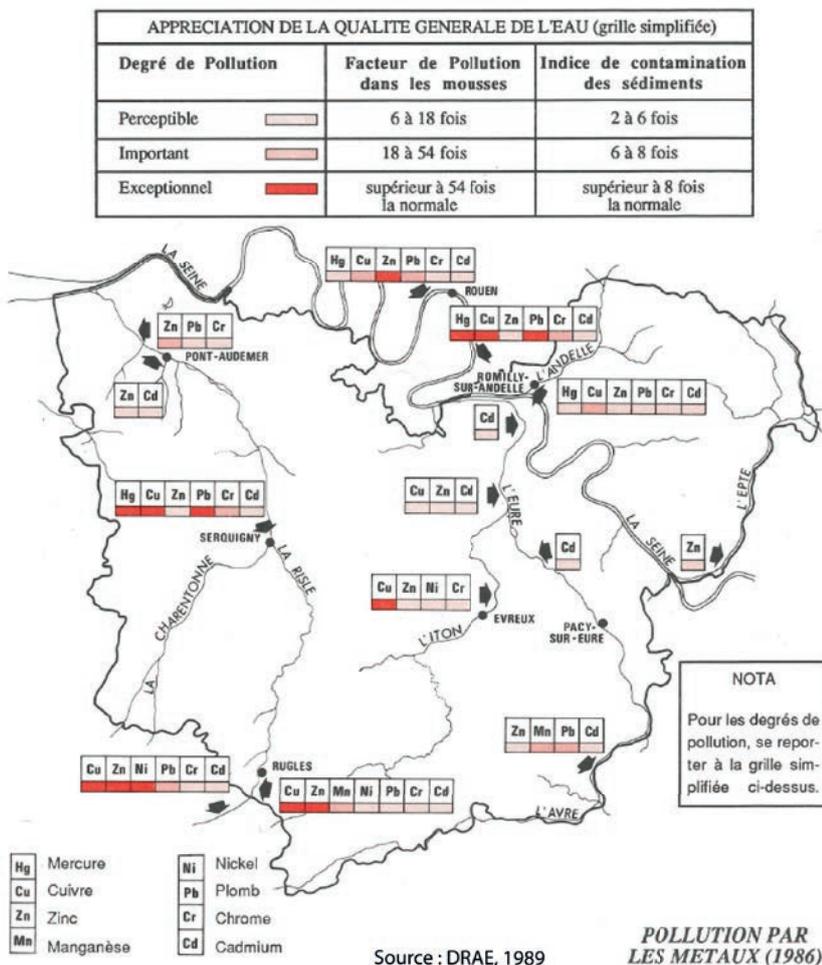


FIGURE 12 Pollution par les métaux des cours d'eau de l'Eure en 1986.

H. LA PRODUCTION D'ENGRAIS

L'intensification de l'agriculture au début du XX^e siècle s'est accompagnée d'un développement de l'industrie des engrais chimiques dans la région rouennaise (Petit-Quevilly, Grand-Quevilly), avec l'implantation d'usines de fabrication de superphosphates entre 1907 et 1911. La présence d'usines de fabrication d'acide sulfurique – installées depuis le XVIII^e siècle pour les besoins de l'industrie textile – a notamment été déterminante pour cette implantation. En effet, l'acide sulfurique était le produit de base – avec le minerai naturel phosphaté majoritairement importé du Maroc – pour la production de superphosphates. En 1930, une nouvelle usine destinée à produire des engrais à haute teneur en potasse, phosphate et azote a été construite à Grand-Couronne.

Ces usines ont sensiblement renforcé et diversifié leurs activités au cours du XX^e siècle, avec la construction d'unités de fabrication d'acide sulfurique, d'acide nitrique et d'ammoniac. Elles étaient reliées par pipeline aux raffineries du bord de Seine pour importer les gaz résiduaux contenant l'hydrogène nécessaire à la synthèse. Résidus de la production des engrais, les phosphogypses produits dans la boucle rouennaise (environ 2 millions de tonnes par an) étaient directement rejetés dans le fleuve, au droit des usines. Le rejet de ces effluents marquait fortement la qualité des eaux de la Seine (effluents acides fortement chargés en sulfate), allant jusqu'à empêcher son pompage pour une utilisation industrielle lorsque la production d'engrais – et le volume des rejets – s'est accrue dans les années 1970. Cette industrie des engrais contribuait également fortement aux apports en azote oxydable à la Seine (la moitié des apports en azote NTK à la Seine en 1985). En 1974, la décision a été prise de limiter les rejets de phosphogypses en Seine. Des barges étaient alors chargées de phosphogypses au droit des usines afin de les claper en mer, sur un site à une dizaine de kilomètres au large de l'embouchure [Figure 13].

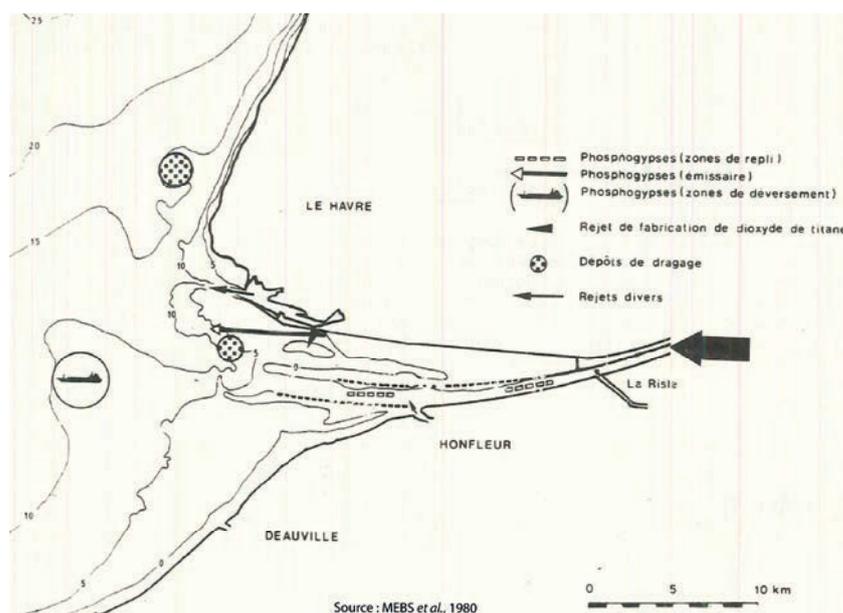


FIGURE 13 Principaux rejets industriels à l'embouchure de la Seine en 1980.

Ce mode de gestion a progressivement remplacé le rejet direct en Seine et il a perduré pendant 13 ans (de 1974 à 1979, 20 % des phosphogypses produits dans les usines rouennaises étaient toujours directement déversés en Seine). Une mobilisation des pêcheurs qui craignaient un impact sur l'état sanitaire des poissons et *in fine* sur le maintien de la pêche à la crevette s'est alors mise en place, contribuant à une nouvelle évolution de pratique. Le clapage en mer a alors été remplacé par une gestion à terre des phosphogypses sur des sites dédiés à Anneville-Ambourville (98 ha) et à Saint-Etienne-du-Rouvray (66 ha). Les sites étaient reliés par des canalisations aux usines de production. Cette activité a perduré jusqu'en 2004.

A partir de 1975, une usine de production d'acide phosphorique similaire à celles de Rouen s'est installée à Rogerville. Pendant les dix premières années de production, environ un million de tonnes de phosphogypses (lait de sulfate de calcium contenant du sulfate de plomb et des fluorures) étaient directement rejetés en mer, via un émissaire débouchant à

la sortie du port du Havre [Figure 13]. Entre 1985 et 1992, date d'arrêt de la production d'acide phosphorique, une part croissante de la production de phosphogypses était déposée à terre (terrain de 30 hectares contigus à l'usine), passant de 25 à 65 %, le reste étant toujours rejeté en mer.

L'héritage de ces industries est fort, avec une empreinte métallique marquée et un renforcement de la radioactivité naturelle sur les sites de production et de stockage. Les fonds marins à proximité de l'émissaire de l'usine du Havre et des zones de déversement des barges montraient des teneurs en sulfates importantes (10 à 300 g/kg), compromettant la vie marine sur une dizaine d'hectares avec un effondrement de la faune benthique [SPPPI, 1990]. De fortes contraintes de dépollution des sols pèsent également sur les vastes terrains utilisés par cette activité. Cette même empreinte a marqué les sédiments de la Seine et de son embouchure, avec un enrichissement métallique et radioactif des particules déposées à l'époque des déversements [Boust *et al.*, 2012 ; Vrel, 2012].

I. LA GESTION DES DÉCHETS

L'essor industriel et le développement urbain le long de la vallée de la Seine durant le XX^e siècle ont engendré une production croissante de déchets solides ou liquides. Jusqu'au milieu des années 1970, leur devenir n'était pas encadré réglementairement et les précautions pour limiter leur impact sur l'environnement quasi-inexistantes. Ces déchets pouvaient être déversés dans les cours d'eau ou dans des lagunes dédiées (rejets liquides ou boues), entreposés à terre, enfouis ou utilisés comme remblais ou pour combler d'anciennes gravières ou sablières. De nombreux sites tout au long de l'estuaire sont ainsi encore aujourd'hui marqués par ces pratiques, notamment dans la boucle de Poses, la boucle d'Elbeuf, la zone industrielle de Rouen et en rive droite à l'embouchure de la Seine [Chapitre II.C]. La nature des matériaux enfouis est très diverse et l'emprise exacte des zones concernées parfois inconnue [DRIRE, 1995]. Certains sites ont fait l'objet d'analyses de sol qui montrent la présence récurrente de déchets ménagers et industriels, avec des pollutions aux hydrocarbures, aux métaux, aux solvants,... Ces sites n'étant pas étanchéifiés, les polluants présents ont pu rejoindre les nappes d'eau sous-jacentes

par diffusion ou les cours d'eau par écoulement, devenant ainsi une source de pollution pour le milieu. A partir de 1975, l'élimination des déchets a été fortement réglementée et les pratiques ont largement évoluées avec une gestion collective des déchets qui a pris de l'ampleur [Figure 14].

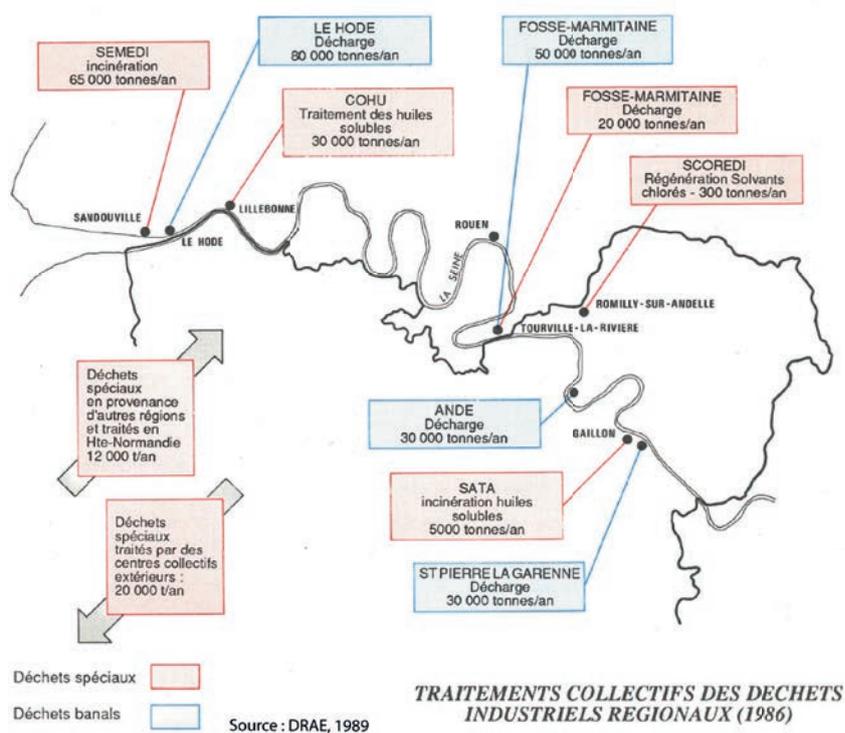


FIGURE 14 Traitements collectifs des déchets industriels en 1986.



FIGURE 15 Incinérateur du pré aux loups (Rouen) en 1913.

L'incinération est un autre mode de gestion des déchets, avec des premiers incinérateurs mis en service au Havre et à Rouen dès le début du XX^e siècle [Figure 15]. Les études de sol menées sur ces sites ont montré des pollutions aux métaux et, plus ponctuellement, aux hydrocarbures [MEDDE]. La voie principale de diffusion des pollutions liées aux incinérateurs reste cependant la voie atmosphérique. Suivant les vents, les particules présentes dans les fumées peuvent se déposer sur une zone plus ou moins vaste. Ces usines ont été progressivement remplacées (1970, puis 2000 pour l'agglomération rouennaise ; 1968, puis 2004 pour l'agglomération havraise ; fermeture de l'incinérateur de Lillebonne en 2003), car elles ne satisfaisaient pas aux normes environnementales. A noter également, la mise en place de filières de recyclage dans la

seconde moitié du XX^e siècle pour la régénération d'huiles (Saint-Aubin-lès-Elbeuf, Lillebonne), et le traitement ou la valorisation des déchets industriels (Zone industrielle du Havre).

Cette industrie a laissé un héritage de sites et sols pollués important dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, avec 22 sites aujourd'hui identifiés [Figure 16]. Les pollutions constatées sont dues au fonctionnement normal des installations, mais aussi à des dépôts sauvages de déchets. Les métaux (plomb, cuivre, chrome) et les hydrocarbures constituent l'essentiel de l'empreinte chimique de cette industrie [MEDDE].

J. L'ACCIDENTOLOGIE

Au-delà de la pression chimique liée au fonctionnement normal des industries, les situations accidentelles sont également importantes à considérer, car potentiellement à l'origine de pollutions pouvant marquer l'environnement. A l'inverse des pollutions chroniques qui se caractérisent par des modifications progressives de la qualité du milieu et provenant de sources permanentes ou périodiques, une pollution accidentelle est caractérisée par son caractère imprévu, sa soudaineté d'apparition et la nécessité de mesures de gestion de crise. L'estuaire de la Seine est ainsi exposé à plusieurs sources de risques pouvant présenter des situations accidentelles impactantes pour le milieu : **1)** présence de nombreuses installations classées pour la protection de l'environnement ; **2)** densité des voies de transport fluvial, maritime, ferré, routier et de canalisations ; **3)** présence d'installations de collecte et de traitement des effluents urbains ou industriels.

Un inventaire des pollutions accidentelles a pu être réalisé en mobilisant la base de données ARIA. Elle recense les accidents et incidents qui ont, ou auraient pu, porter atteinte à la santé ou à la sécurité publique, l'agriculture, la nature et l'environnement. Cette base de données n'est cependant bien documentée qu'à partir de la seconde moitié des années 1990, ce qui limite l'analyse historique apportée par la compilation des événements documentés [BARPI]. En se focalisant sur les accidents ayant eu un impact environnemental sur l'estuaire de la Seine et ses affluents, 83 événements ont été recensés, essentiellement depuis le milieu des années 1990 [Jeanne, 2010]. L'origine géographique et les secteurs d'activité concernés par les accidents sont cohérents avec

la densité et la diversité des industries présentes en bord de Seine et de ses affluents. Les zones d'activité de la boucle d'Elbeuf, les industries lourdes de la boucle de Rouen, la zone industrielle de Port Jérôme, la zone industrielle du Havre et le pôle industriel chimique d'Honfleur sont ainsi les secteurs où est recensé le plus d'accidents. Les rejets consécutifs aux accidents documentés concernent majoritairement des hydrocarbures (61 % des cas), mais aussi des détergents, des produits phytosanitaires ou pharmaceutiques, des métaux,....

Les conséquences environnementales de ces accidents sont très majoritairement décrites comme faibles, avec des pollutions peu ou pas visibles. Quelques accidents ont eu des conséquences environnementales plus importantes, avec un impact local pouvant être fort : mortalité de poissons ou d'oiseaux, destruction de la flore,... [Encart n°3 – Accident du pétrolier Katja dans le port du Havre]. Pour minimiser les conséquences de ces accidents, les spécificités estuariennes doivent être considérées et prises en compte. En effet, au-delà des caractéristiques intrinsèques du rejet (propriétés physico-chimiques et toxicologiques des substances, volume mis en jeu,...), la dynamique estuarienne sera déterminante pour le devenir du rejet et son impact sur le milieu : l'évacuation des polluants peut être limitée par des conditions hydrodynamiques défavorables (marée, débit, conditions météorologiques,...) et des milieux fragiles peuvent être exposés à la pollution. Pour les accidents mettant en jeu d'importants volumes de composés toxiques peu dégradables, un impact à plus long terme peut se faire sentir (contamination de nappes phréatiques, constitution de stocks de contaminants, transfert le long de la chaîne trophique,...).





ENCART N° 3

Accident du pétrolier Katja dans le port du Havre

Dans la nuit du 6 au 7 août 1997, le Katja – un pétrolier de 232 m – a heurté un ponton lors des manœuvres d'accostage au terminal de la CIM, à l'entrée du port du Havre. L'incident a provoqué une petite déchirure de la coque à l'arrière du navire, laissant échapper du fuel lourd d'alimentation de ses moteurs. Sur les 187 m³ de fuel qui se sont échappés de la soute, 150 ont été récupérés grâce à la mise en place d'un barrage flottant autour du navire. Les 37 m³ restant sont sortis du port du Havre, se dispersant dans l'estuaire et la baie de Seine et se déposant sur les plages bordant l'embouchure de la

Seine [CEDRE].

Un important dispositif de nettoyage a été mis en place. 300 personnes (pompiers, militaires, agents communaux) ont été mobilisées pour ramasser les boulettes de goudron sur les plages de Deauville et Bénerville et utiliser des produits dispersants pour fragmenter les nappes de pétrole et faciliter sa dégradation. Les bénévoles du CHENE ont nettoyé des centaines d'oiseaux mazoutés (surtout des mouettes et des goélands), avec taux de survie de 50 %. Des arrêtés préfectoraux interdisant provisoirement la pratique des activités nautiques, de la baignade et de la pêche à pied ont également été pris pour éviter l'exposition de la population à la contamination [Figure B ; DDASS, 1997]. Cette pollution, bien que modeste, a nécessité la mise en œuvre de moyens de lutte importants et induit un impact non négligeable sur certaines activités économiques de la région. Dans les leçons à tirer de l'évènement, le CEDRE met l'accent sur les éléments suivants : « Accident nocturne, en période de vacances, par un brouillard épais qui a perduré plusieurs jours, vide médiatique, ... Tous les ingrédients sont réunis pour créer une "belle" crise aux conséquences somme toute limitées. » [CEDRE].

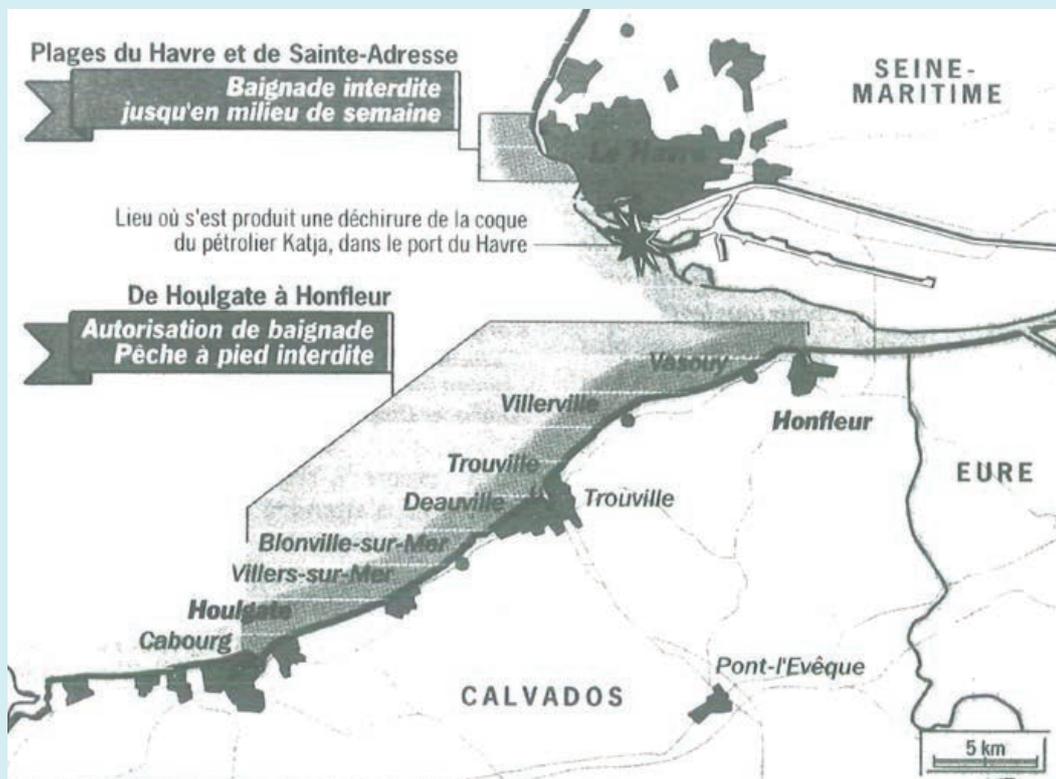


FIGURE B Impacts de l'accident du Katja (Libération, le 11 août 1997).

II SITES ET SOLS POLLUÉS ET FRICHES D'ACTIVITÉ DE LA PLAINE ALLUVIALE



Du fait de son passé industriel, la vallée de la Seine abrite de nombreux sites et sols pollués et friches d'activité. Cet héritage industriel est présenté dans ce chapitre pour la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine. Il s'appuie essentiellement sur les inventaires réalisés par l'Administration et disponibles dans les bases de données BASOL et BASIAS. Un zoom relatif à l'héritage lié à la gestion des déchets à l'embouchure de la Seine est également présenté.

A. LES SITES ET SOLS POLLUÉS

Un site pollué est un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas. Des activités sont particulièrement ciblées et les sites concernés sont considérés comme « à risque » : usines à gaz, pressings, ateliers de mécanique, ateliers de traitement de surface, casses ou garages automobiles, imprimeries, dépôts d'hydrocarbures ou substances dangereuses, stations-services, sites chimiques et pharmaceutiques, etc. Ces pollutions sont le plus souvent concentrées, avec des teneurs élevées en substances chimiques (principalement hydrocarbures, HAP, métaux, solvants halogénés) sur une surface

réduite (de l'ordre de quelques dizaines d'hectares au maximum). En France, des recensements de ces sites sont menés par l'administration et viennent alimenter deux bases de données : BASOL et BASIAS [Encart n°4 – BASOL et BASIAS : deux outils d'inventaire des sites et sols pollués].

Du fait de son passé industriel, la vallée de la Seine est particulièrement concernée par cette problématique. En effet, de nombreuses activités ont laissé un héritage de pollution des sols avec divers impacts, principalement des teneurs anormales en substances chimiques dans les eaux souterraines, les eaux superficielles et/ou les sédiments. Ces pollutions peuvent être accidentelles (déversement ponctuel de substances polluantes) ou chroniques (apport de substances polluantes sur une longue période), mais ont comme point commun de marquer durablement l'environnement.

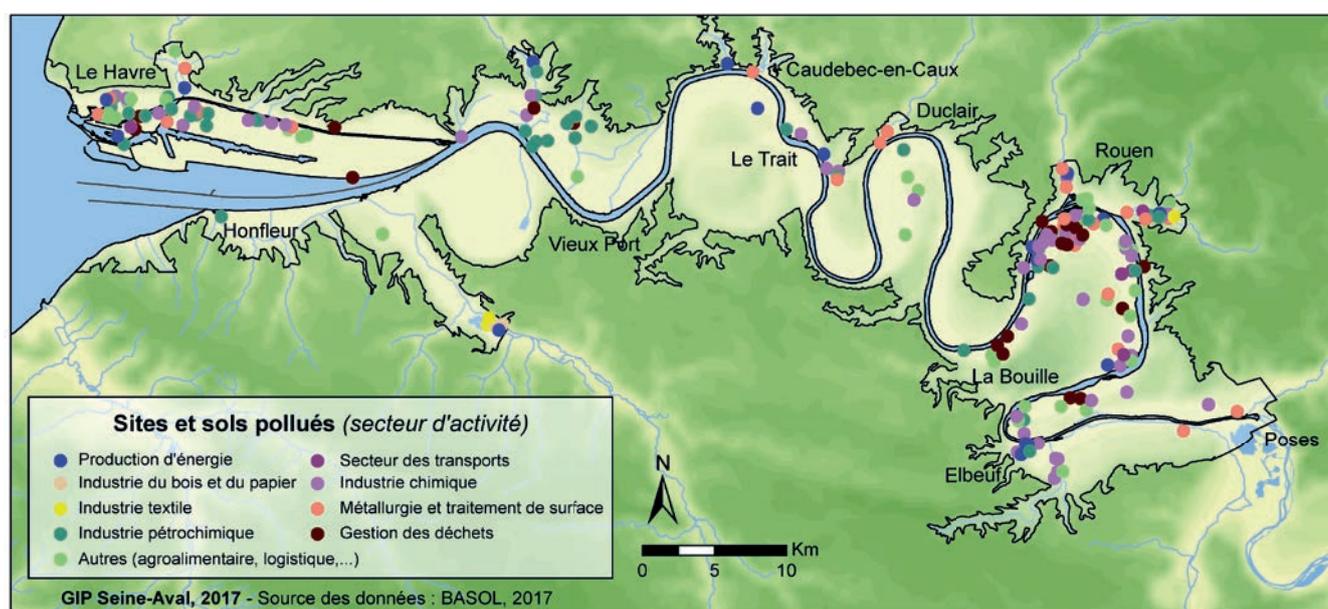


FIGURE 16 Sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

ENCART N° 4

BASOL et BASIAS : deux outils d'inventaire des sites et sols pollués

Le recensement des sites et sols pollués répond à deux objectifs principaux : **1)** documenter l'origine, la nature et l'étendue d'une pollution ; **2)** évaluer les contraintes pour l'aménagement du site considéré. En France, les inventaires réalisés viennent alimenter deux outils de porté à connaissance des sites et sols pollués ou potentiellement pollués par des produits chimiques ou radioactifs : BASOL et BASIAS.

BASOL

BASOL est une base de données nationale regroupant « les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif ». Destinée à devenir la "mémoire" des sites et sols pollués en France, elle recense les sites pollués par des activités industrielles existantes. Alimentée depuis 1994 par des recensements réalisés par l'Administration (Préfectures et DREAL) et tenue à jour par la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du Ministère chargé de l'environnement, elle comptabilise (au 06/06/2017) 6 553 sites à l'échelle nationale et 204 sites pour la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine [Figure C].

BASOL est accessible au public (<http://basol.developpement-durable.gouv.fr>) et permet des consultations géographiques des sites, selon leur niveau de risque et de danger :

- **Vert** : Site traité et libre de toute restriction. Ces sites ont fait l'objet d'évaluation et/ou de travaux. Suite aux travaux, leur niveau de contamination est tel qu'il n'est pas nécessaire d'exercer une surveillance. Il est toutefois nécessaire de garder la mémoire de ces sites.
- **Orange** : Site en cours de travaux. Les évaluations et/ou travaux menés sur ces sites amènent au constat d'une pollution résiduelle, compatible avec leur usage actuel mais qui nécessite des précautions particulières avant d'en changer l'usage et/ou d'effectuer certains travaux. Une surveillance de l'impact de cette pollution peut aussi être nécessaire.

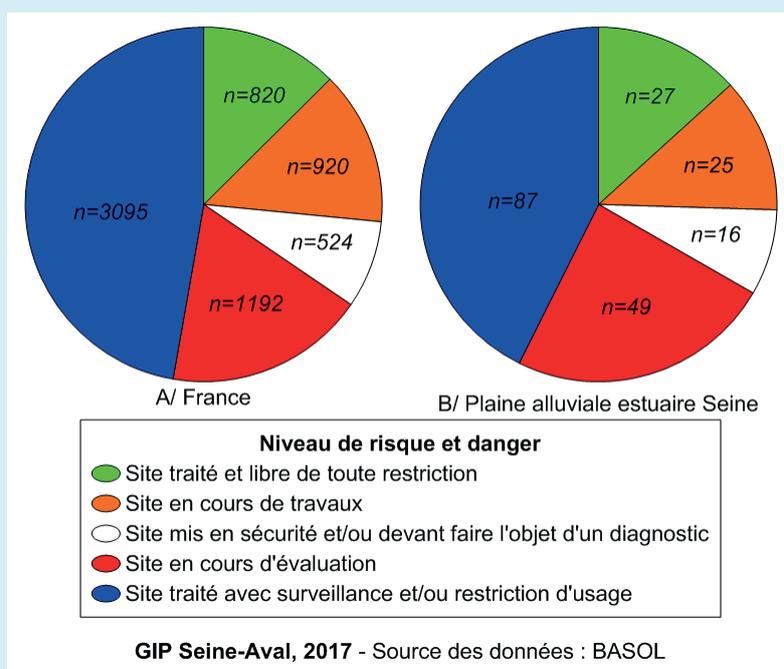


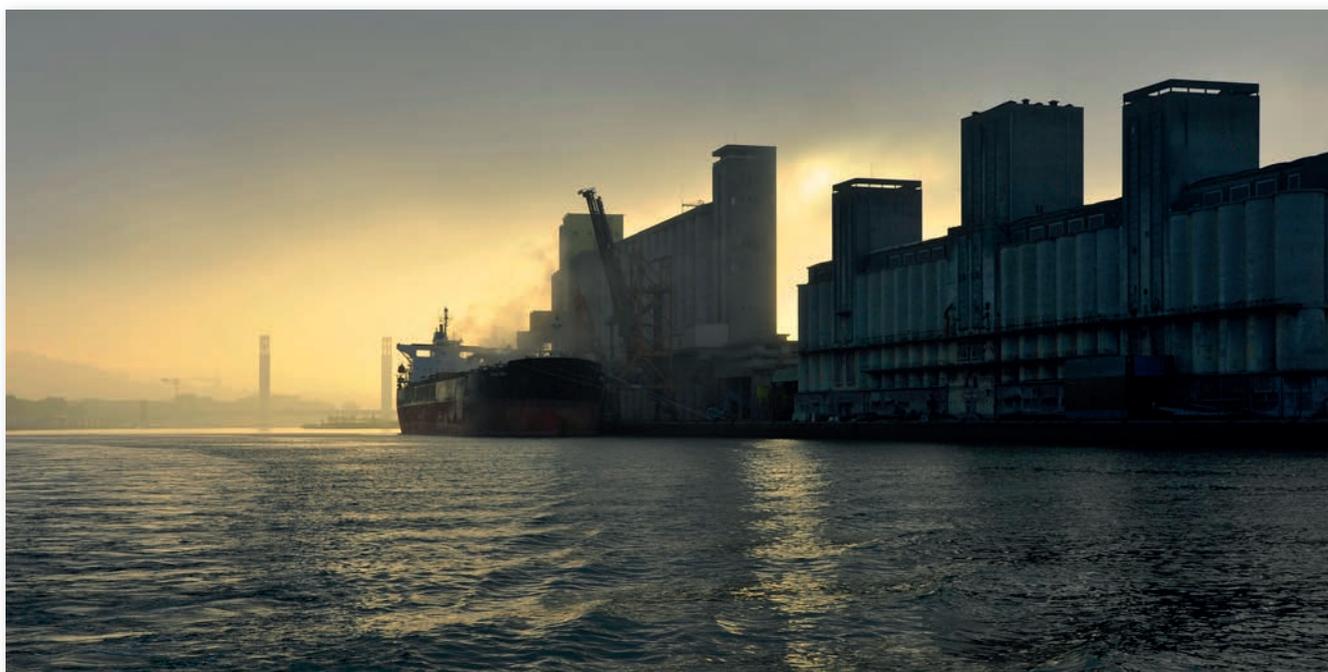
FIGURE C Sites inventoriés dans BASOL (au 6 juin 2017) A/ à l'échelle française et B/ à l'échelle de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

- **Blanc** : Site mis en sécurité et/ou devant faire l'objet d'un diagnostic. La pollution de ces sites n'est pas avérée mais diverses raisons (nature de l'activité, accidents survenus dans le passé..) font penser que tel pourrait être le cas. Pour prévenir une découverte fortuite de cette pollution et avant celle d'un éventuel impact, la réalisation d'un diagnostic de l'état des sols a été demandée par l'administration aux responsables de certains sites en activité. Les sites pour lesquels les investigations ne sont pas achevées font partie de cette catégorie.
- **Rouge** : Site en cours d'évaluation. La pollution de ces sites est avérée et a entraîné l'engagement d'actions de la part de ses responsables.
- **Bleu** : Site traité avec surveillance et/ou restriction d'usage.

Elle reprend également de nombreuses informations pour chaque site à travers les rubriques suivantes : localisation et identification du site, caractérisation du site, description du site, situation technique du site, caractérisation de l'impact, environnement du site, surveillance du site, restrictions d'usage et mesures d'urbanisme, traitement effectué.

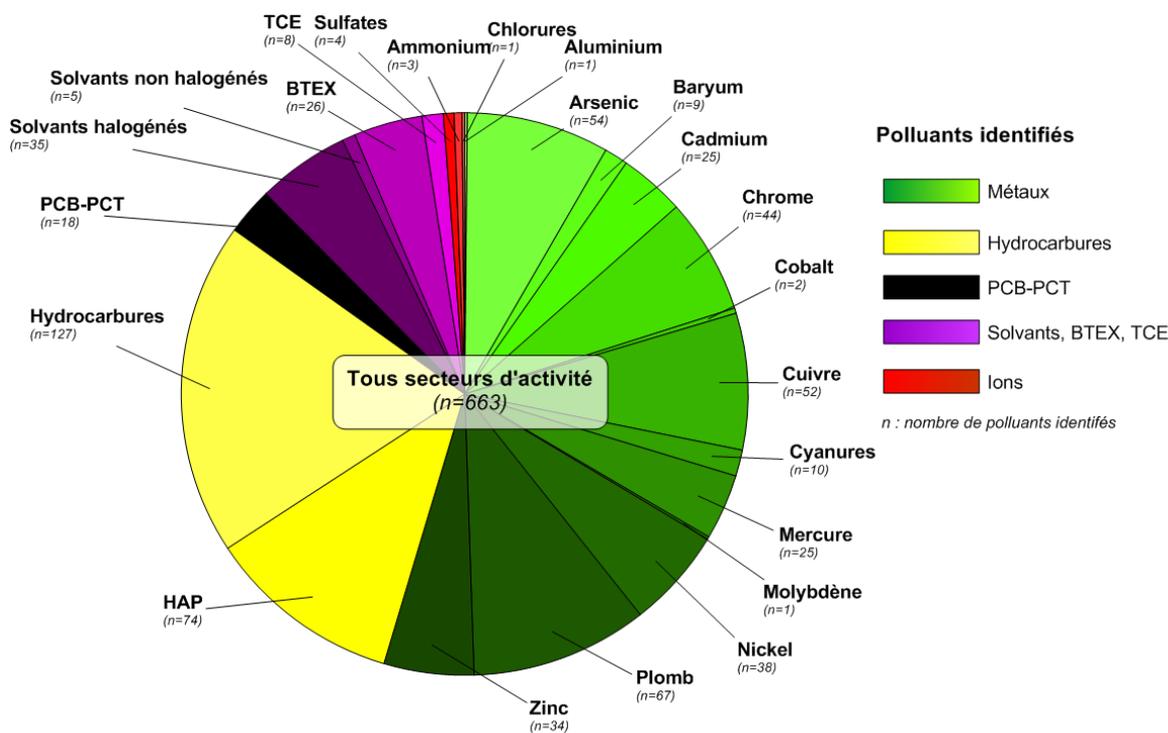
BASIAS

BASIAS est une base de données nationale regroupant les « anciens sites industriels et activités de service », susceptibles d'avoir laissé des installations ou des sols pollués. Créée en 1998 par le Ministère en charge de l'Environnement, elle regroupe les données de l'inventaire national commencé en 1978, puis des inventaires historiques régionaux entamés en 1994. Cette base est accessible au public (<http://basias.brgm.fr>) et permet **1)** de recenser, de façon large et systématique, tous les sites industriels abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement ; **2)** de conserver la mémoire de ces sites ; **3)** de fournir des informations utiles aux acteurs de l'urbanisme, du foncier et de la protection de l'environnement.



Le recensement des sites et sols pollués (ou potentiellement pollués), pour lesquels un diagnostic de l'état des milieux a été engagé ou demandé par l'Administration, témoigne de cette forte pression industrielle, notamment dans les boucles rouennaise et elbeuvienne, à Port-Jérôme et dans la région havraise. Pour l'ensemble de la plaine alluviale estuarienne, cela concerne plus de 200 sites. Ils témoignent de la diversité du tissu industriel du secteur, avec une forte proportion de sites liés à une activité de pétrochimie, chimie, métallurgie et traitement de surface, gestion des déchets ou production d'énergie [Figure 20].

Pour les sites et sols pollués recensés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, des impacts sur l'environnement sont constatés dans près de 90 % des cas, avec des teneurs anormales mesurées dans les eaux souterraines (50 % des cas) ou les sols (15 % des cas). Les impacts mesurés sur les eaux superficielles et/ou les sédiments, les végétaux ou les captages d'eau potable sont beaucoup plus rares. En terme de polluants, les métaux (principalement le plomb, l'arsenic, le cuivre, le chrome et le nickel) sont retrouvés sur plus de la moitié des sites, les hydrocarbures ou les HAP sur 30 % de sites, les solvants (halogénés ou non) et les BTEX dans plus de 10 % des sites [Figure 17].



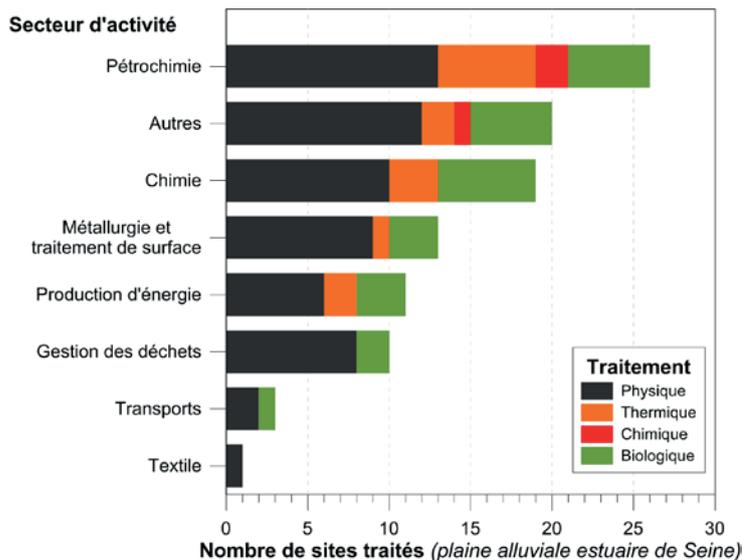
GIP Seine-Aval, 2017 - Source des données : BASOL

FIGURE 17 Polluants retrouvés en teneurs anormales dans les eaux souterraines, les eaux superficielles, les sols ou les sédiments à proximité des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

A l'échelle de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, 113 sites et sols pollués ont été recensés comme ayant fait l'objet d'une mesure de traitement. Ces sites sont représentatifs de l'activité présente sur ce secteur, avec une prédominance de la pétrochimie, de la chimie, de la métallurgie et du traitement de surface. La majorité des traitements mis en place concerne des traitements physiques (stockage, confinement, excavation) ; les traitements biologiques représentant près d'un tiers des sites concernés, les traitements thermiques 12 % et les traitements chimiques 3 % [Figure 18 ; MEDDE].

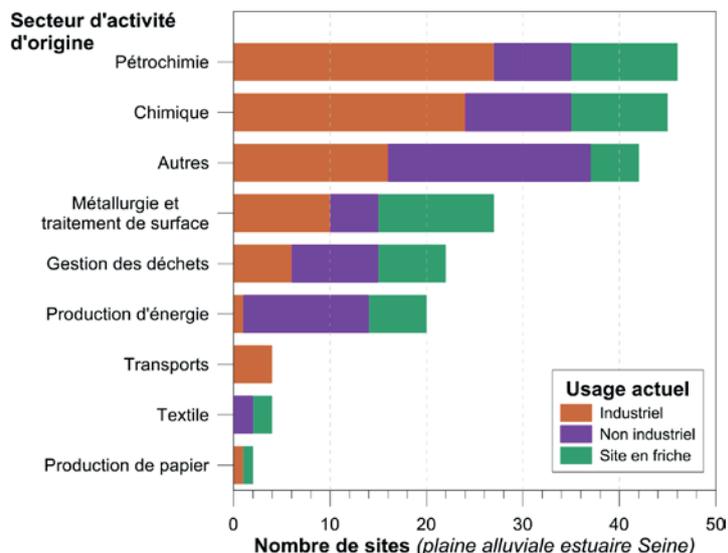
70 % des sites et sols pollués identifiés sur la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine sont aujourd'hui considérés comme traités, même si une surveillance ou des restrictions d'usages

sont mises en place pour près des 2/3 d'entre eux. 24 % des sites identifiés sont en cours d'évaluation, 12 % sont en cours de travaux et 8 % ont été mis en sécurité et/ou doivent faire l'objet d'un diagnostic. Le devenir de ces sites est également intéressant à considérer, avec 1/3 des sites qui ont été réaffectés à un nouvel usage après traitement (parking, espace vert, commerce,...). Les autres sites sont toujours supports d'une activité industrielle (42 %) ou en friche (25 %). Cette répartition est à pondérer en fonction de l'activité d'origine, avec des réutilisations pour de nouveaux usages plus fréquents pour les anciens sites de production d'énergie ; ou un ratio important de friches industrielles issues d'anciens sites métallurgiques ou de traitement de surface [Figure 19].



GIP Seine-Aval, 2017 - Source des données : BASOL

FIGURE 18 Traitements mis en place pour la gestion des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.



GIP Seine-Aval, 2017 - Source des données : BASOL

FIGURE 19 Utilisation actuelle des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, selon l'activité d'origine.

Sites et sols pollués de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine	Pétrochimie	Chimique	Autres	Métallurgie et traitement de surface	Gestion des déchets	Production d'énergie	Transports	Textile	Production de papier
Situation géographique									
<i>n</i> : nombre de sites	n=44	n=43	n=41	n=26	n=23	n=17	n=5	n=3	n=2
Situation technique du site									
<ul style="list-style-type: none"> Mis en sécurité et/ou diagnostic à mener En cours d'évaluation En cours de travaux Traité avec surveillance et/ou restriction d'usage Traité et libre de toute restriction 	n=44	n=43	n=41	n=26	n=23	n=17	n=5	n=3	n=2
Polluants identifiés									
<ul style="list-style-type: none"> Métaux Hydrocarbures PCB-PCT Solvants,... Ions 	n=144	n=143	n=80	n=133	n=86	n=29	n=14	n=27	n=7
Traitements mis en place									
<ul style="list-style-type: none"> Traitement physique Traitement chimique Traitement thermique Traitement biologique 	n=26	n=19	n=20	n=133	n=10	n=11	n=3	n=1	n=0
Usage actuel									
<ul style="list-style-type: none"> Non industriel Industriel site en friche 	n=46	n=45	n=42	n=27	n=22	n=20	n=4	n=4	n=2

FIGURE 20 Utilisation actuelle des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, selon l'activité d'origine.

B. LES FRICHES D'ACTIVITÉ

En complément de l'identification des sites et sols pollués présents dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, un inventaire des friches d'activité a été mené sur l'axe Seine haut-normand [Figure 21 ; EPFN, 2011]. Ces friches d'activité sont définies comme des espaces, bâtis ou non, ayant connu une activité économique (hors agricole) et qui aujourd'hui ne sont plus utilisés. Un site peut avoir été traité dans le passé mais n'a pas retrouvé d'usage depuis. Les friches faisant l'objet de projets de recyclage sont recensées tant que les

travaux d'aménagement ou de construction n'ont pas commencé. 246 sites ont été identifiés, pour un total de 826 ha (10.7 % des espaces d'activité des communes considérées), avec la moitié des sites qui font moins de 0.8 ha. Concernant leur distance à la Seine, 10 sites sont des bords à quais, 28 sont en bord de Seine et 14 à moins de 1 km de la Seine. A la date de l'inventaire (2011), un projet de réhabilitation était engagé ou en réflexion pour 2/3 des sites, représentant 83 % de la surface totale des friches identifiées [EPFN, 2011].

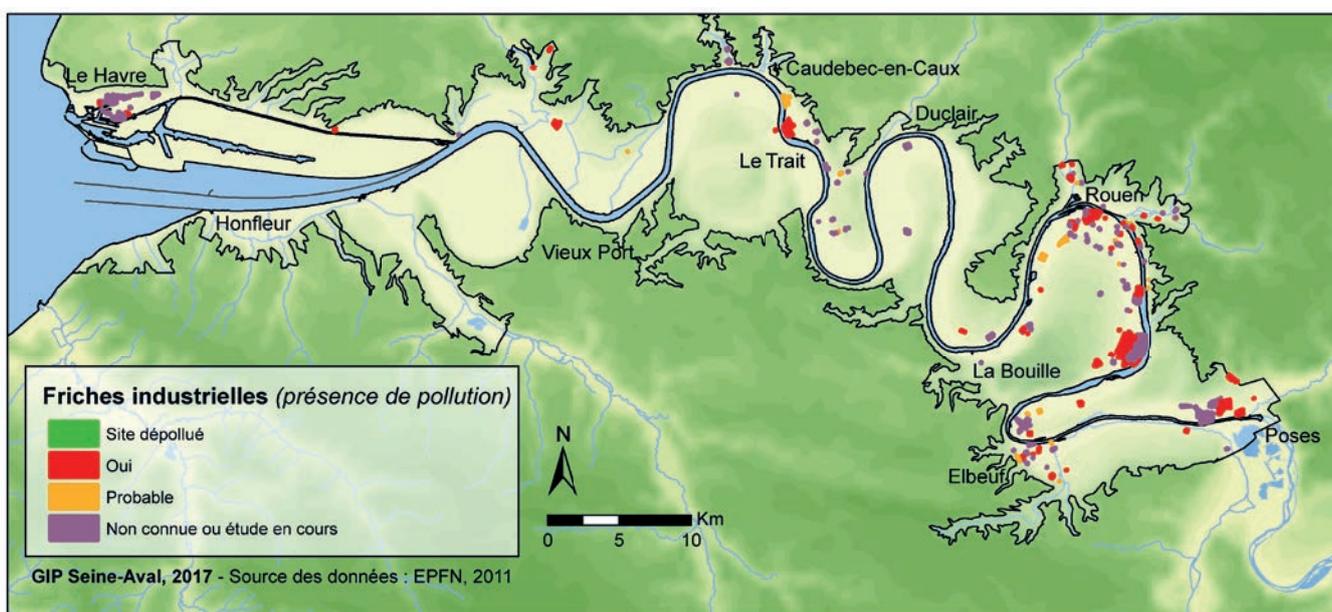


FIGURE 21 Friches industrielles identifiées dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

C. ZOOM SUR LA GESTION DES DÉCHETS À L'EMBOUCHURE DE LA SEINE

La forte présence industrielle à l'embouchure de la Seine fait de la gestion des déchets une problématique importante pour ce secteur. L'évolution de cette gestion témoigne également des changements dans la prise en compte environnementale d'une activité et de l'héritage qu'elle peut laisser. Plusieurs sites de stockage de déchets se sont ainsi succédé à l'embouchure de la Seine [Figure 22]. Le site le plus ancien, dit « décharge Gasheau » a fonctionné entre 1960 et 1988. Il servait au stockage de déchets industriels, sans réel contrôle de la composition des matériaux entreposés. L'étanchéité du site était seulement assurée au fond par une couche d'argile, les eaux de pluie n'étant pas récupérées. Le site dit « CETH1 », situé plus à l'ouest, a fonctionné entre 1988 et 1992 et accueillait des déchets inertes. La présence de bactéries sulfato-réductrices (observation ponctuelle d'écoule-

ments roses) témoigne du stockage de matière fermentescibles, ce qui a nécessité la pose de reniflards pour permettre aux gaz de s'échapper. Des fossés ceinturent le site et permettent de récupérer les eaux de ruissellement. Entre 1992 et 2002, le site dit « CETH2 » a pris le relais pour le stockage de matériaux inertes, même si des matières fermentescibles sont encore présentes. Ce site est mieux organisé, avec des bassins de rétention vidangés régulièrement par des camions citernes. L'étanchéité du toit est également assurée, limitant la percolation. Sur les communes de Gonfreville-l'Orcher et de Rogerville une installation de stockage de déchets non dangereux est installée depuis 2001. Elle est autorisée à recevoir 120 000 tonnes de déchets industriels banals par an, sur une surface de 19 ha. Cette installation peut également accueillir certains déchets pollués dans la limite des

seuils autorisés. Sur la commune de Saint-Vigor d'Ymonville, une installation de stockage de déchets inertes est autorisée à recevoir 280 000 tonnes de déchets inertes par an, également depuis 2001. Ces deux installations répondent à la réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement et sont conçues pour éviter tout dommage à l'environnement (protection des sols, étanchement des fonds). Les modalités d'acceptation des déchets nécessitent une description précise du déchet pour s'assurer de sa compatibilité avec les autorisations de l'installation. Les contrôles à l'entrée sont également renforcés pour vérifier l'absence de déchets non autorisés.

De nombreuses industries ont également utilisé des sites de stockage pour les résidus liés à leur activité [Figure 22]. C'est par exemple le cas de l'usine Norsk Hydro Azote (ex COFAZ) qui a stocké des phosphogypses entre 1985 et 1992 sur un terrain de 30 ha contigu à l'usine. On peut également citer la mise en place d'un stockage à terre de titanogypses à partir de 1992 par la société Thann et Mulhouse (devenue ensuite Millenium, puis Lyondell et Cristal), avec une unité de neutralisation des effluents avant leur rejet en Seine. Un stockage des cendres venant de la centrale thermique du Havre était situé à proximité de la route de l'estuaire. Au-delà des résidus d'activité, de nombreux autres sites de stockage sont

présents sur le secteur : stockages de produits pétroliers dans l'enceinte des raffineries dès 1900 (TOTAL) et sur l'avant-port du Havre depuis les années 1920 (CIM), stockage de charbon dans l'enceinte de la centrale thermique et au sud du grand canal, stockage de sulfate de fer à l'est de la zone industrielle (OLMIX),...

Des pratiques de dépôts sauvages sont également rapportées [Figure 22], à l'image du site dit 'Amoco-Cadiz'. Suite au naufrage de l'Amoco-Cadiz en 1978, les déchets du ramassage des plages venaient par trains et camions pour être traités à la raffinerie. Des camionneurs déversaient les eaux de rinçage des citernes sur un même site. Un réseau de piézomètres a été mis en place et des résidus d'hydrocarbures ont été retrouvés dans la nappe, encore 10 ans après les déversements. Des résidus ont aussi été retrouvés dans les roseaux au sud du site.

L'incinération est un autre mode de gestion très présent à l'embouchure de la Seine [Figure 22], que ce soit pour la gestion de déchets industriels (SEDIBEX depuis 1977, CITRON entre 1997 et 2011), ménagers (Ecostu'air depuis 2004) ou leur utilisation comme combustible pour la production de ciment (LAFARGE). Une centrale thermique fonctionnant au charbon est également implantée au Havre (mise en service en 1963).

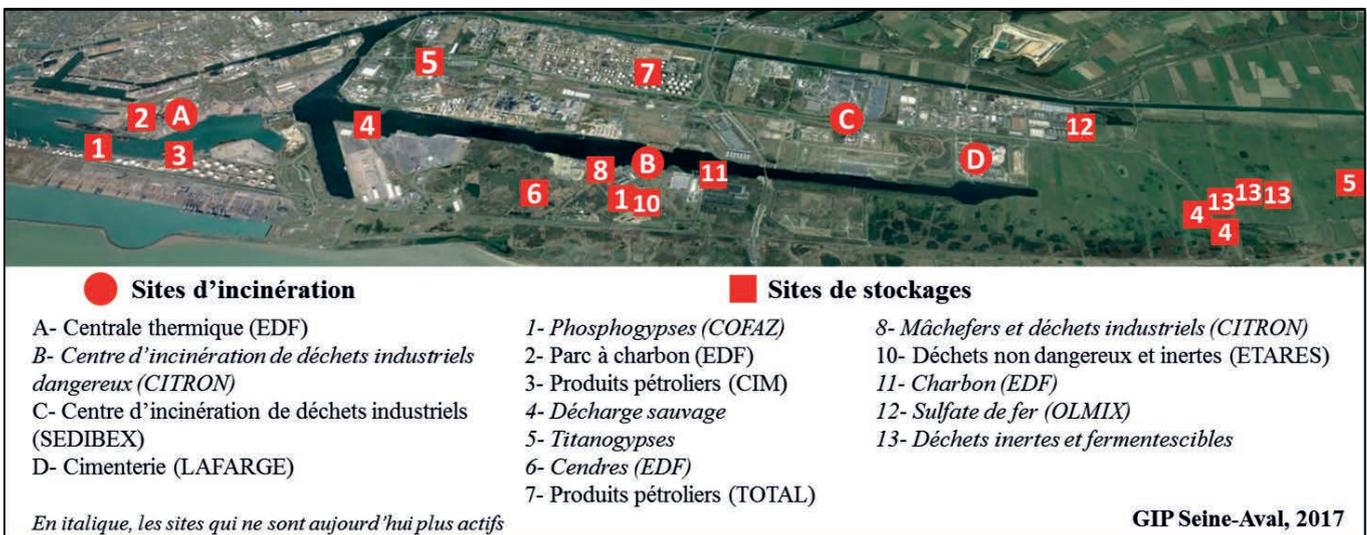
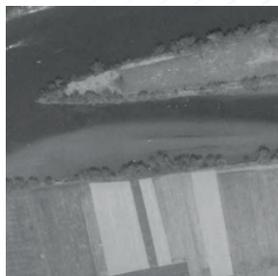


FIGURE 22 Principaux sites de stockage de déchets et d'incinération à l'embouchure de la Seine.

STOCKS DE CONTAMINANTS DANS LES SÉDIMENTS DE LA SEINE



Maximale dans les 1950 à 1980 du fait de nombreux rejets industriels dans le réseau hydrographique, la pollution chimique de l'estuaire de la Seine a laissé son empreinte dans les sédiments déposés dans le lit mineur de la Seine durant cette époque. A partir des années 1970, les apports industriels du bassin versant de la Seine et de ses affluents ont diminué pour les principaux polluants (métaux, PCB, pesticides organochlorés, radionucléides,...) et la qualité des eaux s'est améliorée. Aujourd'hui, les sédiments marqués par la pollution des années 1950-1980 peuvent encore être présents dans le milieu et constituer des stocks de contaminants. Les zones d'accumulation préférentielles des sédiments actuellement déconnectées de la Seine (anciens bras morts,...) et les zones de vasières présentant des concentrations en contaminants chimiques historiquement élevées (lit mineur) sont ainsi particulièrement ciblées.

Ce troisième chapitre s'appuie sur les données de contamination disponibles pour caractériser l'évolution temporelle de la qualité chimique des sédiments circulants ou déposés dans le lit mineur Seine. Il vise également à mettre en évidence les stocks potentiels de contaminants formés par les sédiments apportés par la Seine dans les années où leur contamination était élevée (1950-1980).

A. CONTAMINATION DES SÉDIMENTS CIRCULANT EN SEINE

L'analyse de la contamination chimique des sédiments de surface déposés dans les zones hydrauliques calmes du lit mineur de l'estuaire de la Seine permet de dresser une image des contaminants particuliers transitant en Seine à l'époque de la mesure. Cette donnée est acquise une fois par an sur les sédiments déposés sur les banquettes latérales de

différentes stations le long de l'estuaire, depuis 1980 pour les principaux métaux et les PCB (sous forme d'Arochlors jusqu'en 1990), depuis les années 1990 pour les HAP, les congénères de PCB et les pesticides organochlorés, et plus récemment pour les autres familles de contaminants (BTX, organoétains, PBDE, phtalates,...) [Figure 23].

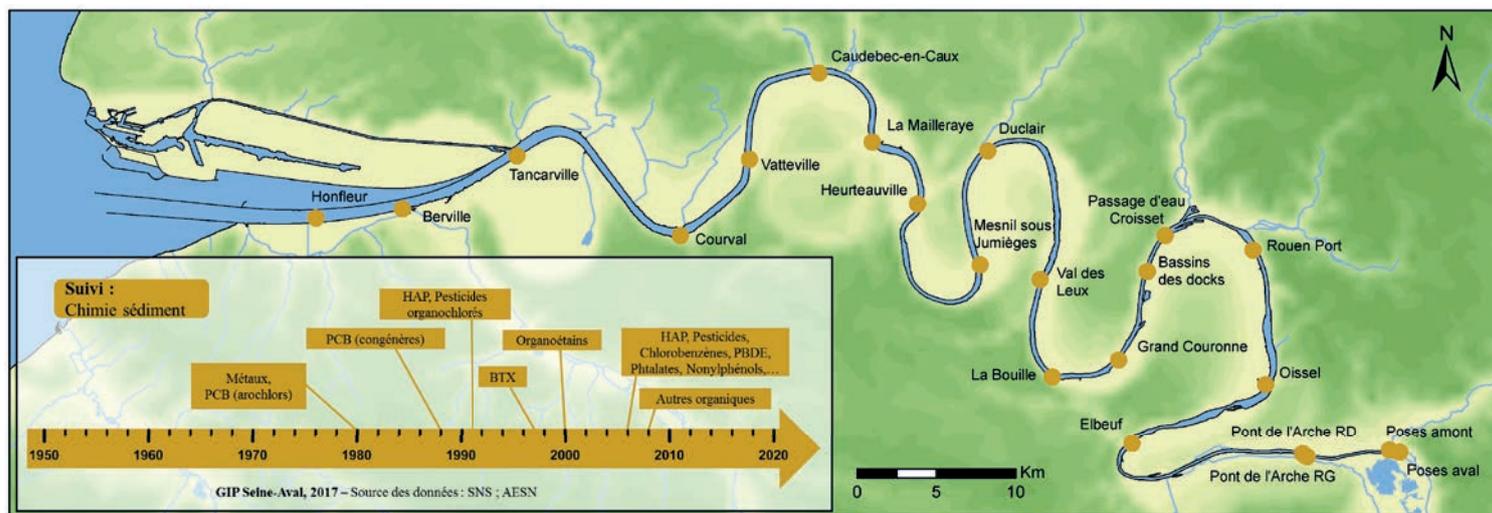
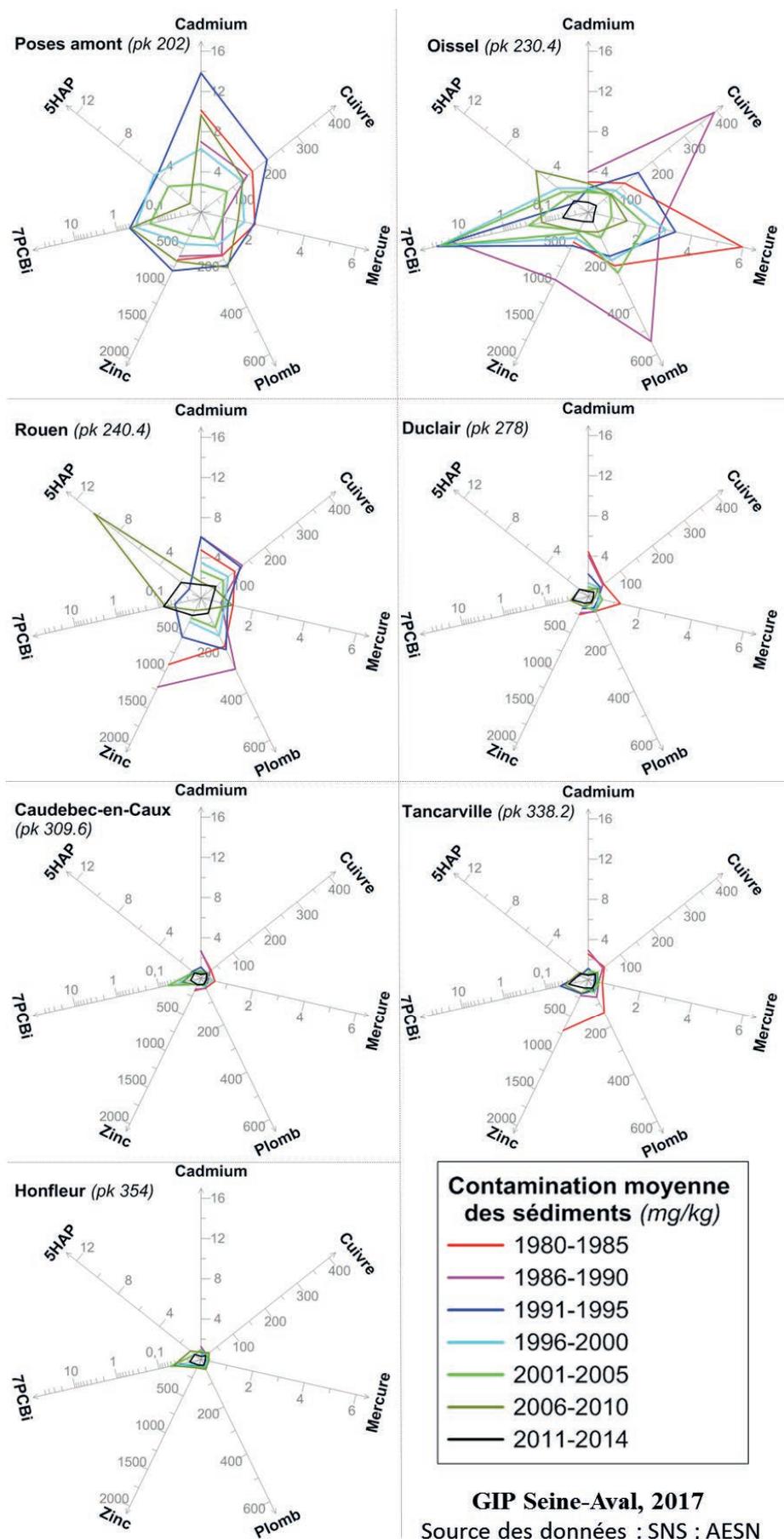


FIGURE 23 Stations et dates de début des chroniques de suivi de la qualité chimique des sédiments en estuaire de Seine.

Même si ces données ne couvrent pas la période de contamination maximale de l'estuaire de la Seine, elles permettent de montrer l'empreinte chimique de la pollution présente en Seine à partir des années 1980 pour les métaux et des années 1990 pour les contaminants organiques. L'analyse globale de ces données indique [Figure 24 ; SNS, 1987 ; Fisson, 2014] :

- 1) une baisse significative de la contamination depuis 1980, du fait d'une maîtrise accrue des rejets et donc des apports ;
- 2) des niveaux plus élevés au droit des secteurs d'activité industrielle majeurs, que dans le reste de l'estuaire ;
- 3) une décroissance des niveaux mesurés vers l'aval de l'estuaire du fait d'une dilution des apports ;
- 4) la présence de pics ponctuels de contamination, ciblés sur une période et/ou un secteur. Ces pics peuvent refléter les apports importants d'un secteur géographique donné (cas des métaux entre Elbeuf et La Bouille, des HAP entre Rouen et La Bouille), un rejet industriel qui a perduré dans le temps (cas de PCB rejetés par une industrie à Oissel dans les années 1980) ou d'un rejet massif et ponctuel dans le temps (cas des pics en zinc et en plomb mesurés en 1985 à l'embouchure de la Seine, pendant le chantier de sablage et de peinture du pont de Tancarville).

FIGURE 24 Contamination en métaux, PCB et HAP des sédiments fins de surface déposés sur les banquettes latérales de l'estuaire de la Seine.



B. IDENTIFICATION DE STOCKS DE CONTAMINANTS PAR CAROTTAGE

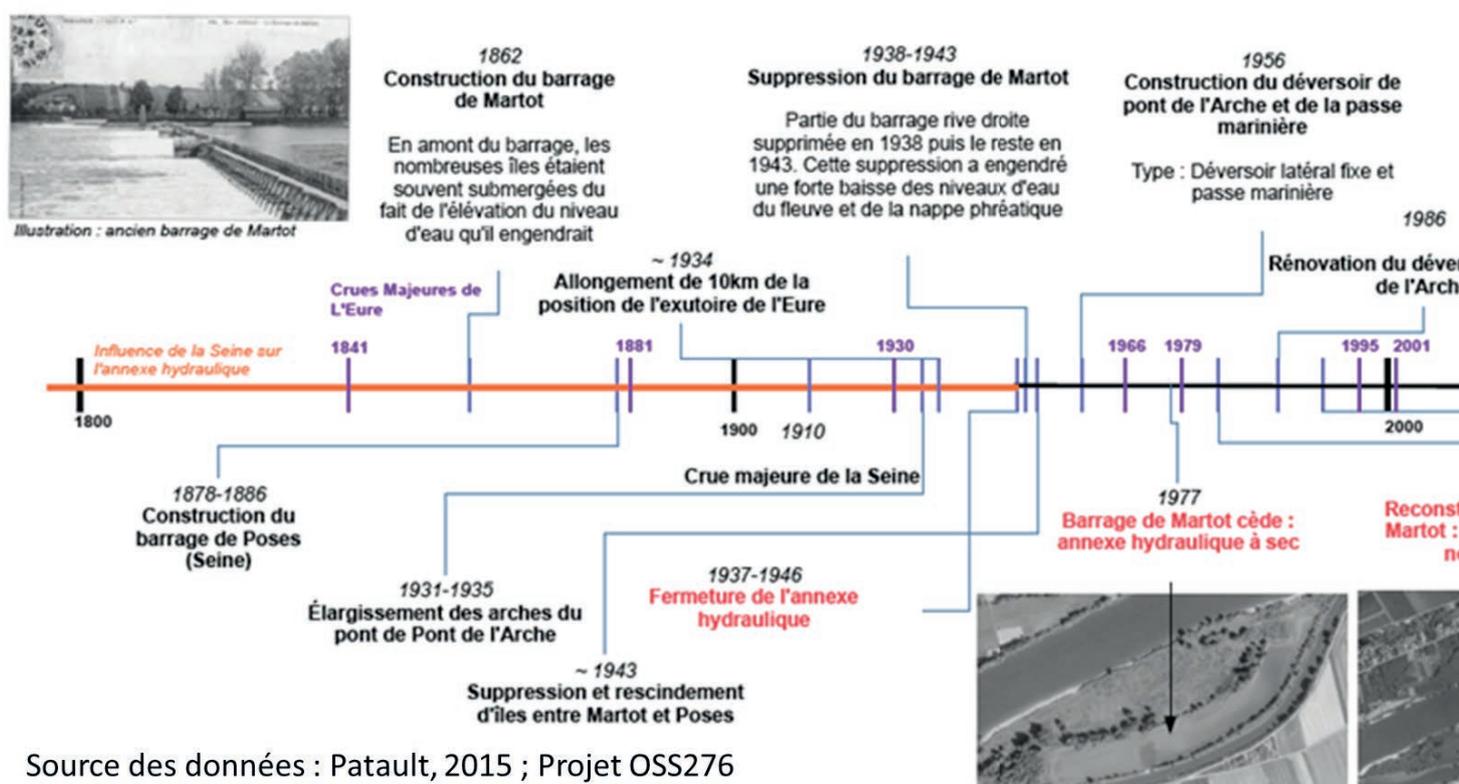
L'étude de carottes prélevées sur des sites d'accumulation sédimentaire permet de mettre en évidence la présence (ou non) de contaminants dans les couches plus ou moins profondes des sédiments. La datation des différents horizons renseigne également sur la contamination chimique associée à la phase particulaire circulant à une époque donnée. Ces carottes constituent ainsi des archives sédimentaires. En estuaire de Seine, de telles données sont disponibles sur quelques sites et permettent de documenter les apports historiques en contaminants chimiques et leur présence en profondeur.

1. Cas du secteur des îles

Situé entre Poses et Rouen, le secteur des îles était initialement composé de nombreuses îles entre lesquelles la Seine se frayait un passage. Suivant une volonté d'améliorer le lien économique entre la mer et la capitale, ce secteur a été très largement aménagé pour sécuriser et faciliter la navigation. Construit en 1864, le barrage de Martot était initialement situé sur la Seine et permettait de rehausser le niveau du fleuve au niveau du pertuis de Martot. Le lit principal de la Seine a lui été recalibré afin de pouvoir augmenter le tirant d'eau disponible, et ceci dès la fin du XIX^e siècle. Les îles

ont progressivement disparu soit par leur destruction, soit par leur regroupement entre elles lors du re-profilage du lit actuel. Enfin, le lit de L'Eure a été détourné de près de 11 km depuis sa confluence naturelle au niveau des Damps, utilisant les produits des dragages en Seine pour remblayer le secteur. Le barrage de Martot est alors devenu un obstacle à l'écoulement de L'Eure depuis 1943 environ, avec une partie qui est devenu un étang, initialement connecté à la Seine puis à l'Eure [Figure 25 ; CASE, 2012 ; Foussard, 2009 ; Foussard et al., 2010 ; IGN ; Launay, 2011 ; Patault, 2015]. Alimenté par les sédiments apportés par la Seine puis par l'Eure, l'étude de ce site est particulièrement intéressante pour reconstruire l'historique des polluants en provenance du plus grand bassin versant de la Seine Aval : L'Eure. L'arasement du barrage de Martot en septembre 2017 a également été une opportunité pour s'intéresser à la modification du transfert sédimentaire et au devenir des sédiments (et des polluants associés) stockés dans l'Etang de Martot, mais aussi dans le lit de l'Eure [Debret & Koltato, Projet OSS276 (2016-2019)].

Les travaux scientifiques menés dans ce cadre permettent d'accéder à un enregistrement sédimentaire exceptionnel en environnement fluvial, couvrant environ 120 ans. Les der-



Source des données : Patault, 2015 ; Projet OSS276

FIGURE 25 Fresque historique des principaux forçages anthropiques et des principales crues recensées sur la zone d'étude comprise entre Martot et les Damps.

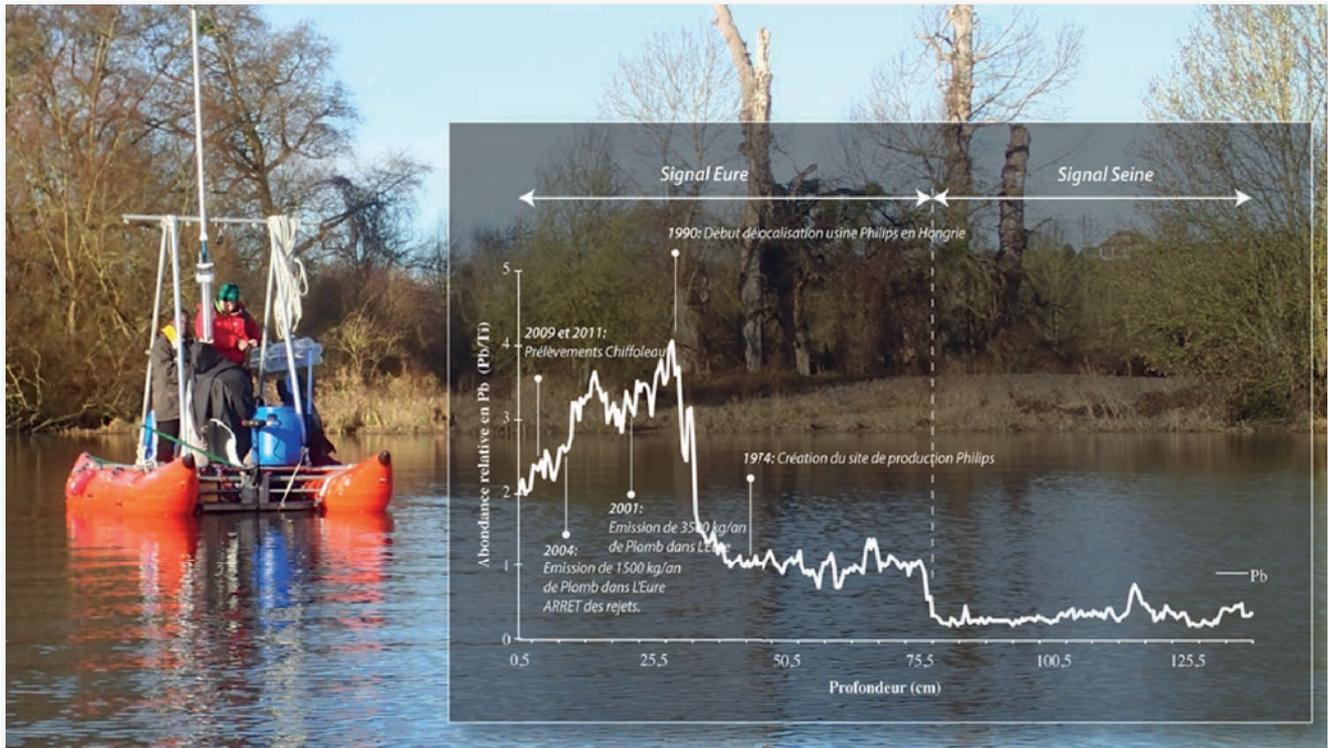
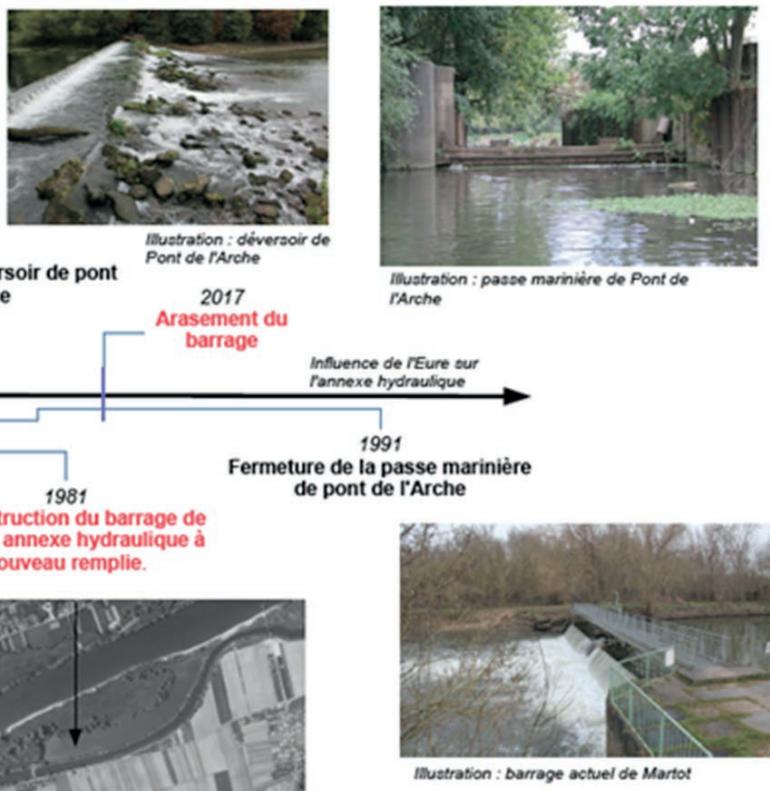


FIGURE 26 Evolution des teneurs en plomb normalisées au titane dans une carotte sédimentaire prélevée dans l'étang de Martot.

niers 70 ans sont particulièrement intéressants puisque ils permettent de reconstruire les pressions anthropiques liées aux activités du bassin versant de l'Eure, à haute résolution. Les premiers résultats montrent que l'historique des pollutions (métalliques, organiques et pesticides) est remarquablement préservé dans l'étang de Martot. Par exemple, il a été possible de retracer l'activité d'une usine productrice de tube cathodique à Dreux, au travers de la teneur en plomb dans le sédiment. L'évolution de ces teneurs est en cohérence avec les phases d'activité de cette industrie, avec des niveaux pouvant atteindre 700 mg/kg au maximum de la production [Figure 26 ; Laberdesque, 2016].

Cet exemple illustre la présence de stocks de contaminants dans une annexe hydraulique du système Seine et pose la question de leur remobilisation en cas de déstabilisation du cours du fleuve, comme c'est ici le cas avec l'arasement du barrage de Martot. En effet, afin de respecter la Directive Cadre sur l'Eau, le barrage de Martot a été arasé en 2017 afin de rétablir le libre transfert des sédiments et la continuité écologique. Les conséquences de cet arasement (réintroduction de la marée de façon permanente, assèchement de l'étang, déstabilisation des rives, etc) sont en cours d'étude [Debret & Koltato, Projet OSS276 (2016-2019)]. Le principal objectif est d'identifier et d'estimer la quantité de polluants stocké dans la partie aval de l'Eure, mais aussi leur mobilité et leur bio accessibilité.



2. Cas de la darse des docks

Située en rive gauche de la Seine à Petit-Couronne (pk 251), la darse des Docks a été creusée à la fin des années 1920 pour permettre l'installation de quatre docks. Elle était affectée à la réparation de navires. Très intense jusqu'en dans les années 1960, cette activité a progressivement été abandonnée jusqu'à la cessation totale en 1988. Positionnée dans le sens de la marée montante, la surface de la darse est d'une quinzaine d'hectares et sa connexion à la Seine s'effectue par un chenal d'entrée d'environ 200 m. Bien que cette darse ait fait l'objet d'entretiens par dragage entre 1949 et 1979, elle a permis l'accumulation des sédiments fins transitant en Seine [Figure 27].

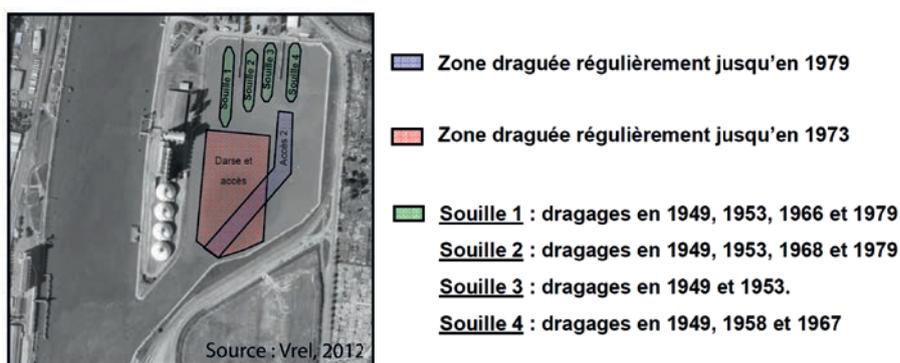


FIGURE 27 Dragages d'entretien effectués dans la darse des docks.

Les excès en contaminants chimiques (métaux, HAP, pesticides,...) observés dans les sédiments profonds de la darse des docks (entre 3 et 5 m) sont dus aux 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 la 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 et témoignant de l'activité globale du bassin versant de la Seine [Figure 28 ; Boust *et al.*, 2012 ; Vrel, 2012].

Afin d'estimer le stock de polluants contenus dans les sédiments de la darse, les données de contamination chimique acquises sur les carottes sédimentaires prélevées sur ce site ont été associées aux taux de sédimentation calculés pour la darse. Ce stock est ensuite comparé avec les flux actuels apportés par la Seine à Poses pour calculer un flux équivalent. Ce dernier correspond à la durée théorique pour que les apports actuels de la Seine soient équivalents au stock

de contaminants contenus dans les sédiments de la darse [Tableau I ; Fisson, 2015]. Les stocks de métaux sont relativement importants, car ils représentent de quelques dizaines (argent, cadmium, nickel) à plusieurs centaines de tonnes (chrome, cuivre, plomb, zinc). Comparés aux flux métalliques apportés par la Seine à l'estuaire, ces stocks représentent plusieurs années d'apports actuels. Pour les HAP, le stock contenu dans les sédiments de la darse des docks est estimé à 28 tonnes, ce qui représente une dizaine d'année d'apports actuels par la Seine à Poses. Le stock de PCB est lui estimé à près de 3 tonnes, ce qui représente plus de 100 ans du flux actuel à Poses. Bien qu'indicatifs car soumis à de nombreuses incertitudes, ces calculs montrent tout l'enjeu d'identification des sites historiques d'accumulation de sédiments pour mettre en place une gestion permettant d'éviter la remobilisation des stocks de polluants qu'ils peuvent contenir.

L'étude de cette archive sédimentaire permet également de documenter la contamination chimique associée à la phase particulaire circulant à une époque donnée et l'évolution de cette contamination au cours du temps [Figure 28 ; Boust *et al.*, 2012 ; Vrel, 2012].

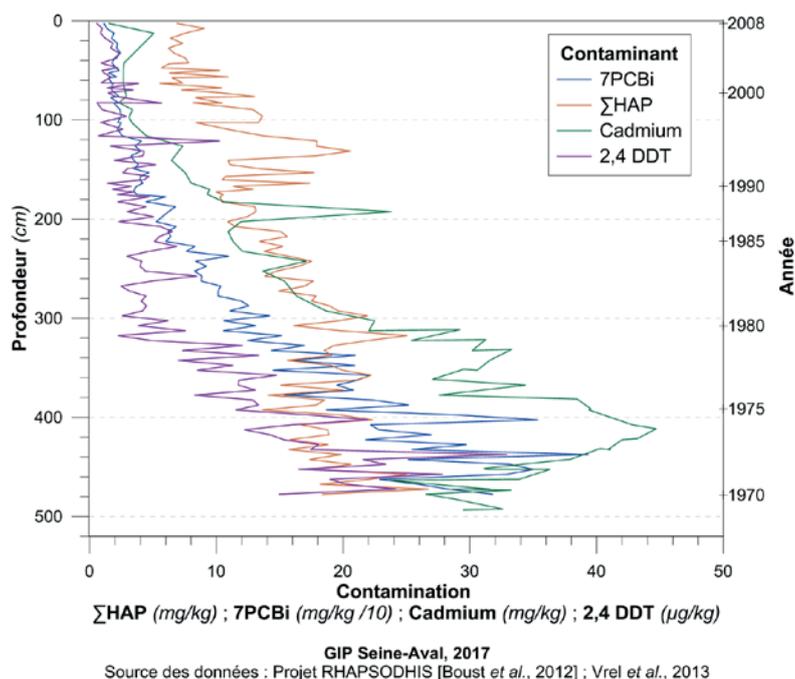


FIGURE 28 Evolution de polluants (cadmium, HAP, PCB, DDT) dans une carotte sédimentaire prélevée dans la darse des Docks (Petit-Couronne).

Contaminant	Stock estimé dans la darse des docks (tonnes)	Flux actuel apporté par la Seine à Poses (tonnes/an)	Flux équivalent : Stock / Flux actuel (an)
Antimoine	6,80	nd	nd
Argent	21,7	nd	nd
Arsenic	33,9	7,20 - 22,9	1,5 - 4,7
Cadmium	35,1	0,30 - 7,62	4,6 - 103
Chrome	445,4	16,3 - 31,3	14 - 27
Cuivre	343	45,8	7,5
Etain	57,1	nd	nd
Mercur	4,70	nd	nd
Nickel	96,2	29,1	3,3
Plomb	421	31,2	13
Zinc	1618	174	9
16 HAP	27,8	1,80 - 2,31	12 - 15
Pesticides organochlorés	0,20	nd	nd
7PCBi	2,80	< 0,028	> 100
4PBDE	0,03	nd	nd

TABLEAU I

Estimation des stocks de polluants dans la darse des Docks et comparaisons aux flux actuels apportés par la Seine.

Pour les métaux, trois évolutions types ont ainsi été identifiées :

- 1) des concentrations constantes et proches des niveaux naturels, pour des métaux peu ou pas rejetés en Seine (Co, Cs, Ga, Ge, Hf, Nb, Rb Ta, V, Zr) ;
- 2) des concentrations en constante diminution avec des niveaux de contamination très importants notamment dans les années 1960, pour des métaux dont les rejets ont peu à peu été maîtrisés (Ag, As, Pb, Sb, Sn, W, Zn) ;
- 3) des concentrations maximales dans les années 1970 et en diminution constante depuis, pour des métaux présents dans les rejets de phosphogypses (Ba, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Th, U, Y, lanthanides).

Un enrichissement en radionucléides naturels est également observé. Il est à relier aux rejets de phosphogypses (^{226}Ra), aux retombées des essais nucléaires atmosphériques dans les années 1960 et à l'accident de Tchernobyl en 1986 (^{237}Cs), ainsi qu'à un rejet d'une installation nucléaire en 1975 (^{238}Pu).

Pour les HAP, une décroissance régulière est observée depuis les années 1970, même si elle reste relativement lente, du fait d'apports qui restent importants, diffus et difficiles à maîtriser. En analysant les différents composés selon leur origine, il est possible de relier leur évolution avec une meilleure maîtrise des apports par l'activité de transport pétrolier et de raffinage (hydrocarbures alkylés) et une constance dans les apports liés à la combustion de combustibles (charbon, bois, pétrole). L'évolution des teneurs en PCB dans l'estuaire de la Seine est conforme à leur usage : la contamination est maximale sur la période 1970-1975, puis une décroissance rapide est observée jusque dans les années 1995. Depuis une

quinzaine d'années, cette décroissance est largement ralentie, du fait d'une dégradabilité très faible de ces substances.

Pour les pesticides organochlorés, les mesures montrent des tendances à la baisse bien marquées, du fait des restrictions ou interdictions d'usages. C'est par exemple le cas du DDT (interdit d'usage en 1987) dont les teneurs dans les sédiments ont été divisées par plus de 10 en quarante ans. Des évolutions semblables sont observées pour ses métabolites* et les autres pesticides organochlorés.

Cet exemple montre l'apport de l'analyse d'une archive sédimentaire pour caractériser et dater la présence de contaminants dans les sédiments ayant transités par la Seine et s'étant déposé dans une annexe hydraulique.

3. Cas de la vasière nord

A l'embouchure de la Seine, l'analyse des sédiments profonds de la vasière nord permet de documenter la contamination de ce secteur sur la période 1968-2001. La contamination chimique y est moins prononcée que dans la boucle de Rouen et semble plus lissée dans le temps. Les contaminants chimiques apportés par la Seine sous forme particulaire sont en effet mélangés avec un stock sédimentaire très important à l'embouchure de la Seine et largement moins contaminé, ce qui explique les enrichissements plus faibles. C'est par exemple le cas pour la contamination métallique et radioactive associée aux importants rejets de phosphogypses à l'embouchure, qui ne semblent pas marquer significativement les sédiments analysés. En revanche, ces sédiments sont marqués par des isotopes du plutonium (^{238}Pu et $^{239, 240}\text{Pu}$) entre la fin des années 1970 et la fin des années

1990, correspondant à des profondeurs de 1 à 2 m ; ils proviennent des rejets liquides de l'usine de retraitement des combustibles nucléaires de la Hague [Figure 29 ; Vrel, 2012]. Cet exemple illustre la dilution des apports du bassin versant dans les sédiments de l'embouchure, mais aussi le marquage possible par des apports en contaminants venus de la baie de Seine.

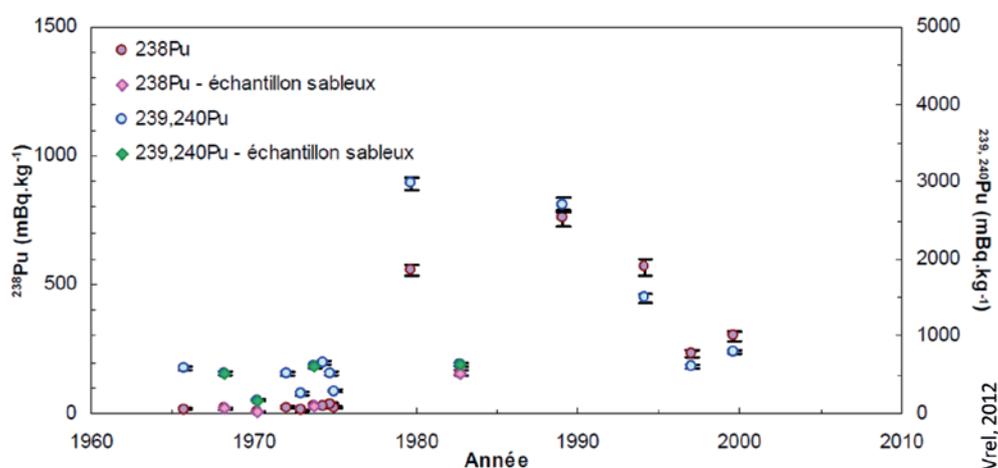


FIGURE 29 Activité en plutonium des sédiments de la vasière Nord.

C. LOCALISATION DES STOCKS POTENTIELS DE CONTAMINANTS

L'aménagement de l'estuaire de la Seine au cours des XIX^e et XX^e siècles a largement influencé sa morphologie : approfondissement du chenal de navigation, rectification et artificialisation des berges, arasement d'îles, comblement de bras morts, perte de surfaces intertidales,... [Foussard *et al.*, 2010]. Une partie de ces aménagements a été effectuée entre les années 1950 et 1980, posant la question du devenir des sédiments (et des contaminants associés) déposés sur cette période dans le lit mineur de la Seine. En effet, les sédiments marqués par la pollution de la Seine des années 1950-1980 peuvent encore aujourd'hui être présents dans le milieu et constituer des stocks de contaminants. Les sites d'accumulation de sédiments fins présents dans le lit mineur à cette époque et aujourd'hui déconnectés de la Seine sont ainsi particulièrement ciblés comme stock potentiel de contaminants. Afin de les identifier un travail de photo-interprétation a été mené entre Poses et Tancarville [Houllemare P., 2017].

Tout d'abord, les limites du lit mineur de la Seine ont été tracées pour 1954 et 2015 à partir d'ortho-photographies. La comparaison de ces deux tracés a permis d'identifier les zones historiquement dans le lit mineur et aujourd'hui déconnectées de la Seine. Ces différences sont explicables **1)** par une accumulation naturelle des sédiments (obtention d'une vasière qui peut contenir des sédiments contaminés en profondeur), **2)** par un remblaiement (présence de sédiments contaminés en cas d'utilisation de sédiments prélevés en Seine avant les années 1980) ou **3)** par un endiguement qui a immobilisé des sédiments en arrière de berge. Dans un second temps, des clichés aériens ont été mobilisés pour

caractériser les sites pouvant contenir des stocks de contaminants : tracé du périmètre concerné et calcul de sa surface, estimation de la période de dépôt des sédiments, estimation de la date de déconnection du site,... Au final, une vingtaine de sites contenant potentiellement des sédiments ayant transité en Seine entre 1950 et 1980 a été identifiée [Figure 30].

D'une manière plus générale, trois configurations intéressent particulièrement la problématique des stocks de contaminants dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine :

- 1)** les sites d'accumulation de sédiments fins aujourd'hui en zone intertidale ou subtidale ;
- 2)** les sites d'accumulation de sédiments fins historiquement dans le lit mineur, mais aujourd'hui déconnecté de la Seine ;
- 3)** les sites remblayés par des sédiments anciens prélevés dans le lit mineur de la Seine.

Concernant la première configuration permettant la constitution de stocks de contaminants, il s'agit plus précisément de sites d'accumulation de sédiments fins sur lesquels des sédiments déposés avant les années 1980 peuvent être encore présents en profondeur. C'est par exemple le cas des darses qui n'ont pas fait l'objet d'entretien par dragage depuis cette époque et des vasières intertidales ou subtidales pour lesquelles les sédiments déposés avant les années 1980 sont encore présents en profondeur. Plusieurs sites correspondant à cette configuration ont été identifiés, comme le bras de Fresneuse (pk 212-215), le bras d'Orival (pk 220), la darse d'Oissel (pk 231) ou la darse des Docks (pk 251). Pour s'assurer de la présence de contaminants dans les sédiments pré-

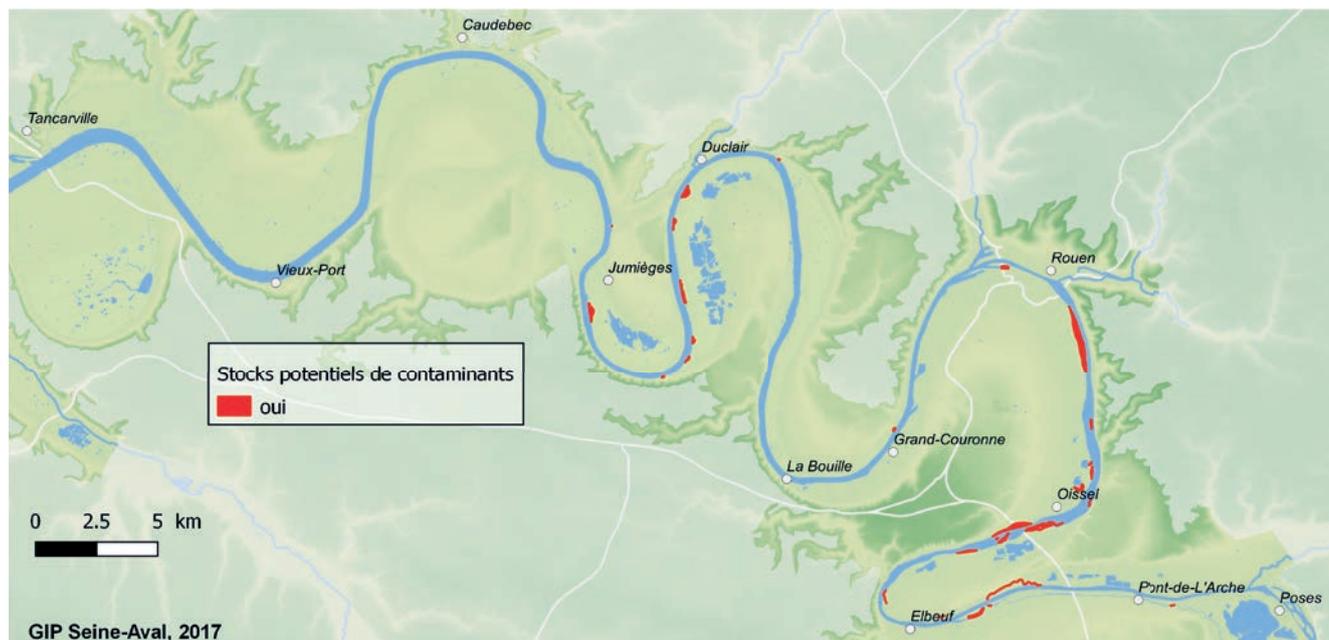


FIGURE 30 Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine.

sents sur ces sites et en estimer le stock, des carottages pour analyse chimique et une compréhension fine de la dynamique hydro-sédimentaire du site restent cependant nécessaires.

La deuxième configuration entraînant la formation d'un stock de contaminants concerne les zones d'accumulation de sédiments fins, déconnectées du lit mineur de la Seine entre 1950 et 1980. Dans cette configuration, des sédiments transitant en Seine antérieurement à la déconnection peuvent se trouver sur les terrains concernés. Un exemple caractéristique est celui de la zone située au pied du viaduc d'Oissel, construit pour le passage de l'A13 au-dessus de la Seine, avec une zone de 16 ha déconnectée du lit mineur de la Seine dans les années 1970 [Figure 31]. Une telle configuration est également observée à Saint-Etienne-du-Rouvray avec le rattachement à la berge de l'île du Jonquay (pk 237-240) durant la même période. Le site dit du « trou de la Martellerie » présente la même problématique, avec une sédimentation active au début des années 1970, puis la création d'une digue à la fin des années 1970 [Figure 32]. Bien que ces sédiments « anciens » puissent aujourd'hui être recouverts, la présence de contaminants en profondeur semble très probable.

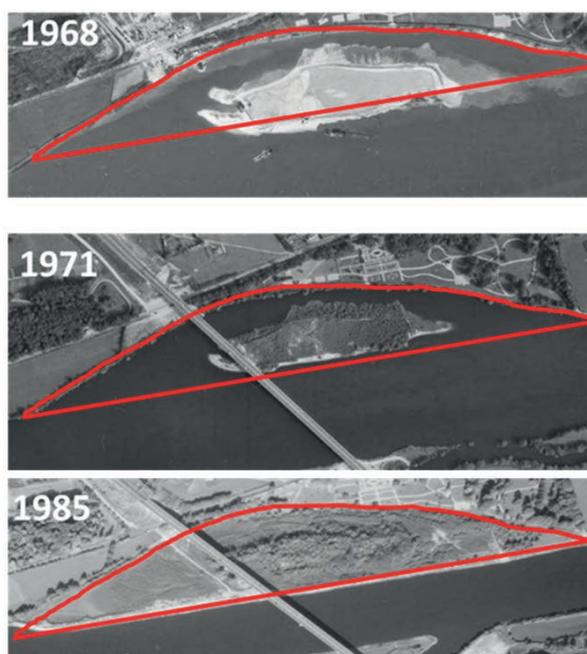


FIGURE 31 Analyse diachronique du site au pied du viaduc d'Oissel (pk 227-228).



FIGURE 32 Analyse diachronique de trou de la Martellerie (pk 279).

La troisième configuration entraînant la formation d'un stock de contaminants concerne les sites remblayés par des sédiments de Seine à l'époque où ils étaient fortement contaminés (1950-1980). Il peut s'agir de zones initialement dans le lit mineur, comme des bras morts comblés ou des fusions d'îles. Le rattachement des îles Durant et Sainte-Catherine (pk 227) à la fin des années 1960 en est un bon exemple, avec une zone de 4 ha remblayée avec des sédiments transitant en Seine à cette période [Figure 33]. Les zones remblayées pour l'extension de zones industrielles dans le secteur de Sotteville-lès-Rouen et la construction des quais à Oissel en sont d'autres exemples.

Enfin, les sites de dépôt ou de transit en bord de Seine utilisées dans les années 1950-1980 pour le dépôt des sédiments dragués en Seine, peuvent également contenir des stocks de contaminants, dans le cas d'un remplissage avec des sédiments fins transitant en Seine à cette époque [Figure 34]. De même, les sites dédiés au dépôt de sédiments dépassant les normes de qualité environnementale peuvent entrer dans cette configuration.



FIGURE 33 Analyse diachronique des îles Durant et Saint-Catherine (pk 227).

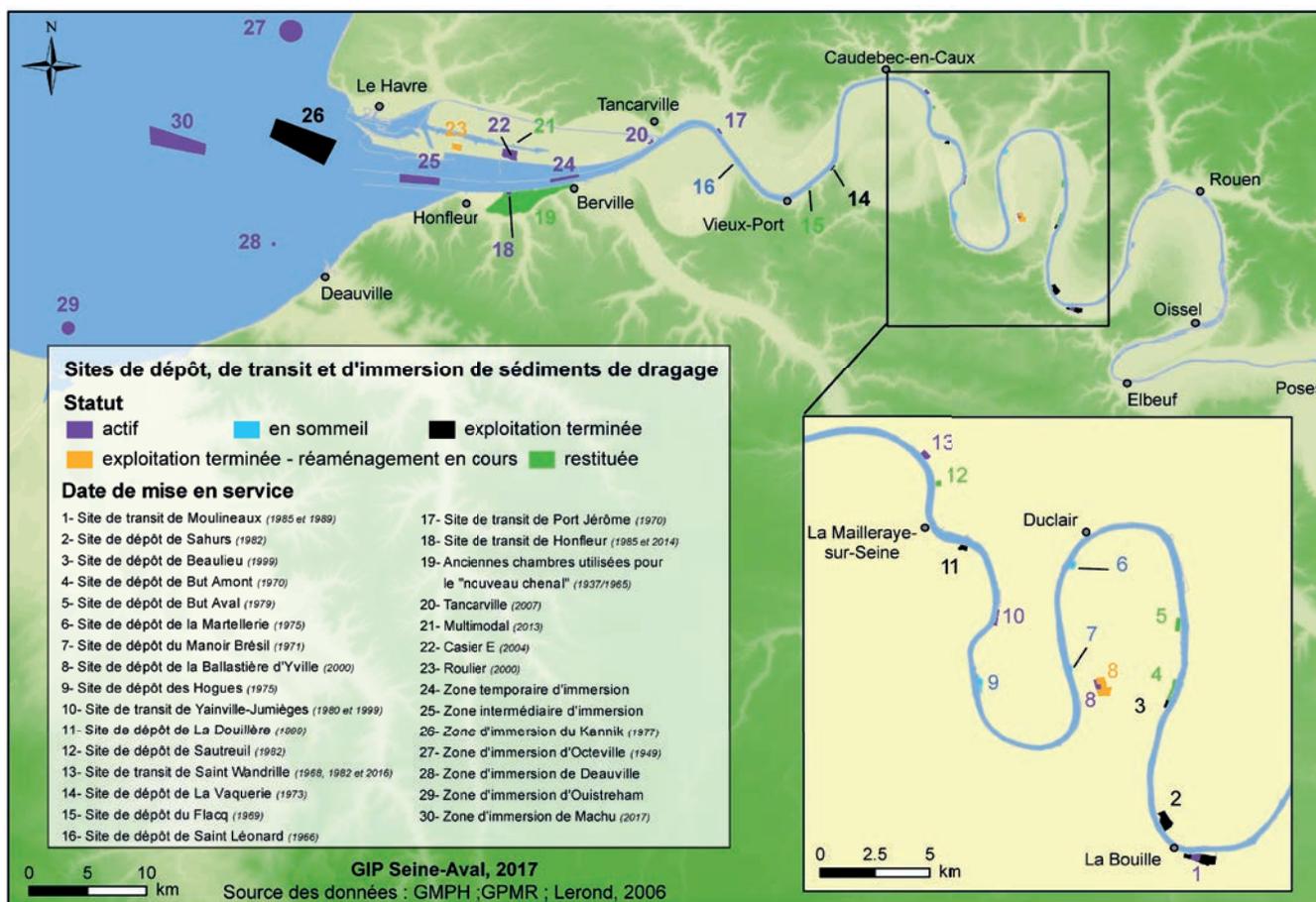


FIGURE 34 Sites de dépôt, sites de transit et sites d'immersion des sédiments de dragage.

IV TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION APPLICABLES EN ESTUAIRE



Dans un contexte de pression foncière, de volonté de réutilisation des friches industrielles et de mise en œuvre de mesures de restauration écologique en bord de Seine, la caractérisation et le traitement des pollutions présentent des enjeux qui prennent de l'ampleur.

Le traitement d'une pollution peut faire appel à une ou plusieurs techniques, permettant de dégrader les polluants, de les immobiliser ou de les transférer vers une autre matrice. De nombreuses techniques de dépollution sont décrites dans la littérature et sont largement documentées par des retours d'expérience. Elles peuvent être catégorisées selon plusieurs approches qui seront reprises dans ce dernier chapitre [Colombano *et al.*, 2010] : **1)** la nature des procédés employés (physiques, thermiques, chimiques, biologiques) ; **2)** le lieu de traitement (*in situ*, sur site, hors site) ; **3)** le devenir des polluants (destruction ou immobilisation).

A. DESCRIPTION DES PROCÉDÉS

Les traitements physiques consistent à injecter des fluides (eau ou gaz) dans la matrice polluée, pour les utiliser comme vecteur de transport des polluants vers un point d'extraction (ex. : ventilation de la zone non saturée, extraction double phase, pompage et traitement) ou pour les immobiliser (ex. : confinement physique ou hydraulique). Ces traitements couvrent une gamme importante de techniques, applicables *in situ*, sur site ou hors site après excavation de la matrice polluée. Les traitements thermiques utilisent la chaleur afin de dénaturer, volatiliser ou immobiliser les polluants. Ils peuvent être déployés *in situ* (ex. : vitrification, désorption thermique), sur site ou hors site (ex. : incinération, pyrolyse, vitrification, désorption thermique) et être appliqués pour une large gamme de polluants, même présents en grande quantité. Les traitements chimiques permettent d'inertiser, de détruire ou de séparer les polluants de la matrice polluée, en favorisant des réactions chimiques adaptées aux propriétés chimiques des polluants. Une destruction ou une transformation des polluants en composés moins toxiques et/ou plus facilement dégradables sont alors visées. Les réactions d'oxydation ou de réduction des polluants par ajout d'une espèce réactive sont les principales techniques mises en œuvre, mais des mises en solution des polluants par lavage peuvent aussi être proposées. Ces traitements permettent une action sur un volume important de matrice polluée, sur une large gamme de polluants avec de fortes concentra-

tions. Les traitements biologiques se basent sur le métabolisme des microorganismes, des végétaux et plus rarement des champignons, afin de dégrader (partiellement ou totalement) ou piéger les polluants. Selon les réactions mises en jeu, des dégradations peuvent se faire en conditions aérobie ou anaérobie. Différentes techniques sont disponibles pour des traitements *in situ* (ex. : bioventing, biosparging, atténuation naturelle contrôlée), sur site ou hors site (ex. : bioréacteur, bioterre, compostage, landfarming). Bien que pouvant être très performants, les traitements biologiques *in situ* nécessitent des durées de traitement souvent longues. Une attention particulière doit également être apportée aux tests de faisabilité pour mettre en œuvre la technique la plus appropriée, le biodégradabilité d'un polluant étant fonction de nombreux facteurs (présence de microorganismes indigènes compétents, teneur en eau, pH, température, disponibilité des nutriments minéraux, disponibilité d'accepteurs ou donneurs d'électrons, concentration en polluants inférieure au seuil d'inhibition,...). La phytoremédiation est un cas particulier de traitement biologique, car elle utilise des végétaux pour traiter les pollutions, par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation. Ces traitements peuvent s'appliquer à la fois **I)** pour des composés inorganiques qui seront généralement immobilisés ou extraits et ; **II)** pour des composés organiques qui seront dégradés partiellement ou totalement [Colombano *et al.*, 2010].

Les traitements *in situ* sont réalisés directement dans la matrice (sous-sol, nappe phréatique, vasière,...) sans excavation de celle-ci. Les techniques applicables dans ce cas sont celles permettant *I)* une extraction des polluants et un transfert dans une autre phase ; *II)* une dégradation des polluants ou ; *III)* un piégeage des polluants dans la matrice concernée. Une application pour un volume important est possible, mais la matrice doit être relativement homogène. La nature de la matrice et des polluants est ici déterminante pour le choix de la technique. Les traitements sur site nécessitent une excavation de la matrice polluée qui sera traitée dans une installation dédiée sur le site. Cette solution permet d'adapter la technique de dépollution à une gamme plus large de polluants et offre un éventail de choix plus important en termes d'efficacité et de délais. Elle sera plus adaptée au traitement d'une pollution limitée [Tableau II ; Colombano *et al.*, 2010]. Ces deux traitements (*in situ* et sur site) sont à privilégier pour limiter la production et le transport de déchets. Ils facilitent également la réutilisation des matrices sur le site d'origine. Les traitements hors site supposent le

retrait du milieu pollué (eau, sol) et son évacuation, ce qui implique l'application de la législation sur les déchets. Le milieu pollué peut alors être dirigé vers une filière de traitement adaptée à la nature de la matrice et des polluants, ce qui couvre une large gamme de technique de dépollution : traitements thermiques, chimiques ou biologiques. L'incinération ou le stockage sont également possibles, mais ne sont pas à privilégier. Pour optimiser les flux de déchets à évacuer (réduction du volume et de la concentration en polluants), un traitement préalable *in situ* ou sur site peut être réalisé. Enfin, quand aucun traitement n'est possible (multiplicité des polluants, quantités très importantes, pas d'enjeu à protéger,...) ou pour gérer une pollution résiduelle après un traitement *in situ*, un confinement peut être envisagé. Il visera à empêcher ou maîtriser la migration des polluants dans les compartiments environnants, par la mise en place d'une barrière physique (géomembrane, palplanches,...) ou hydraulique. Une vigilance particulière doit être apportée à la pérennité dans le temps de la solution adoptée [MEEM, 2017].

TABLEAU II Applicabilité des traitements *in situ* vs sur site ou hors site, selon les caractéristiques du site.

Caractéristiques du site	Traitement <i>in situ</i>	Traitement sur site ou hors site
Etendue de la pollution	Etendue verticale et horizontale importante	Etendue verticale et horizontale limitée (hot spot)
Caractéristiques des sols	Uniforme, perméable à modérément perméable	Très hétérogène, écoulement préférentiels
Structures de la surface	Présence de structure sur la zone de pollution	Pas d'encombrement du site
Proximité des récepteurs	Récepteurs sensibles à proximité immédiate	Pas de récepteurs sensibles à proximité immédiate
Contraintes de dépollution	Dépollution rapide non nécessaire	Nécessité de dépolluer rapidement

B. CHOIX DES TECHNIQUES

En cohérence avec les politiques publiques relatives aux sites et sols pollués, la gestion d'une pollution doit être articulée avec l'usage futur du site pour considérer *1)* les enjeux sanitaires et *2)* les enjeux de maîtrise de la qualité des milieux. La démarche adoptée pour gérer une pollution comprend ainsi le traitement de la pollution concentrée* et de ses sources*, ainsi que la maîtrise des pollutions résiduelles*. Au final, la gestion d'un site pollué repose sur une combinaison de mesures de gestion dont la détermination repose sur des considérations sanitaires, environnementales, techniques et économiques [MEEM, 2017].

Pour choisir le traitement (ou la combinaison de traitements) à appliquer pour dépolluer un site donné, plusieurs critères sont à considérer, au-delà des caractéristiques intrinsèques de chaque technique [Tableau III ; Houllémare, 2017]. Les caractéristiques environnementales du site (géologie, hydrogéologie, topographie, hydrologie,...) sont les premiers éléments à prendre compte, car déterminants pour le devenir des polluants. Des techniques de traitement *in situ* ou un confinement seront ainsi privilégiées pour un site peu dispersif (sédiments en profondeur dans une darse abritée, sédiments en arrière de berge et non connectés à la nappe

phréatique...), à l'inverse d'un site favorisant la dispersion des polluants où une excavation de la pollution sera souvent mise en œuvre dans un premier temps (vasières en érosion, sédiments de surface sur un sol soumis au ruissellement,...). Les caractéristiques de la pollution (nature et concentration des polluants, comportement, éventuels mélanges, toxicité intrinsèque,...) sont également importantes à considérer pour choisir une technique adaptée. Les traitements physiques ou thermiques offrent ainsi un panel plus large de possibilités,

alors que les traitements chimiques ou biologiques permettent de mieux cibler une famille ou un comportement des polluants. Enfin, les usages présents ou futurs du site sont le dernier élément à considérer, car ils permettent de déterminer le niveau de dépollution attendu. Il reste cependant difficile d'associer une stratégie de gestion à un type de pollution, chaque cas étant spécifique car résultant d'une combinaison unique de ces différents critères.

TABEAU III Contraintes identifiées pour le déploiement d'une technique de traitement biologique.

		Traitement biologique			
		Bioventing	Bioterre	Bioslurry	Phytoremédiation
Contraintes liées au traitement	Volume traité	Important	Limité par la surface d'étalement	Limité par la taille du réacteur	Important
	Lieu de traitement	<i>In situ</i>	On site / hors site	On site / hors site	<i>In situ</i>
	Composés traités	Métaux + organiques	Métaux + organiques	Métaux + organiques	Métaux + organiques
	Profondeur	Importante	Limitée par l'excavation	Limitée par l'excavation	Faible (limitée par les racines)
	Risque de dispersion	Aucun	Aucun	Aucun	Bioaccumulation possible par les herbivores. Dispersion par le vent de la biomasse (feuilles) contaminée
Contraintes liées à la pollution	Situation du site pollué	Emergé ou immergé	Emergé	Emergé	Emergé
	Type de pollution traité	Dépend des microorganismes présent dans le milieu	Multiple	Multiple	Multiple
	Niveau de contamination	Limité sinon risque de toxicité pour les microorganismes	Limité sinon risque de toxicité pour les microorganismes	Limité sinon risque de toxicité pour les microorganismes	Limité sinon risque de toxicité pour les microorganismes et les végétaux
Faisabilité technique	Délais	Quelques mois à quelques années	Quelques semaines à quelques mois	Quelques semaines à quelques mois	Quelques années
	Coût	15 - 50 €/tonne	30 - 80 €/tonne	50 - 120 €/tonne	2 - 40 €/m ²
	Retours d'expériences	Nombreux	Nombreux	Très nombreux	Nombreux

Niveau de contrainte :

- faible
- moyen
- fort

CONCLUSION

Les premières grandes zones d'activité industrielle de l'estuaire de la Seine voient le jour au début du XX^e siècle. Les activités de production d'énergie (centrales thermiques), de construction navale, de distillation d'hydrocarbures, de production chimique, d'artillerie sont les premières à s'implanter autour des centres urbains rouennais et havrais. Durant l'entre-deux-guerres, ces zones s'étendent avec le développement d'activités métallurgiques, de raffineries et de papeteries. A cette période, le site industriel de Port-Jérôme se met en place. Il sera renforcé après la seconde guerre mondiale avec l'arrivée de l'industrie pétrochimique et automobile. Dans le même temps, les complexes céréaliers et logistiques prennent de l'ampleur dans les ports de Rouen et du Havre. Associée à l'implantation de ces activités industrielles, une pression polluante grandissante s'est exercée sur l'estuaire de la Seine jusqu'à la fin des années 1970. A cette époque, la qualité des eaux de la Seine était très dégradée, avec une responsabilité importante des différents secteurs industriels [Tableau IV].

A partir des années 1970, une prise de conscience des impacts environnementaux des activités humaines et la volonté d'un développement économique soucieux de préserver les ressources et la qualité des milieux aquatiques ont débouché sur la mise en place de mesures pour limiter les pollutions (réduction des rejets les plus polluants, construction d'unités de traitement des effluents, gestion des déchets,...). En parallèle, le suivi de la qualité des eaux de la Seine s'est mis en place pour cibler les priorités et rendre compte des améliorations en cours. La décennie 80 marque un tournant dans la trajectoire de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine, avec de nombreux paramètres qui ont commencé à s'améliorer [Figure 1]. Une bascule s'est également opérée dans les sources de contaminants, avec //) une empreinte chimique principalement liée aux apports internes à l'estuaire (rejets directs et apports par les affluents intra-estuariens) avant les années 1980 et //) une empreinte qui est progressivement devenue plus globale, témoignant de l'activité de l'ensemble du bassin versant de la Seine dans ses composantes industrielles, urbaines et agricoles.

TABLEAU IV Pressions sur la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine des principaux secteurs industriels entre 1950 et 1980.

Activité	Principales pressions exercées sur la Seine (1950-1980)
Production d'énergie	Réchauffement des eaux
Industrie du bois et du papier	Rejets de matière oxydable et de MES Baisse de l'oxygénation des eaux
Industrie textile	Coloration des eaux Rejet de métaux
Industrie pétrochimique	Rejets d'hydrocarbures
Industrie chimique	Rejets de substances toxiques
Métallurgie et traitement de surface	Rejets de métaux
Production d'engrais	Rejets et dépôts de phosphogypses
Gestion des déchets	Déversement de déchets Stockage non contrôlés

La mobilisation des données de suivi de la qualité des milieux aquatiques dans différentes matrices (eau, sédiment, biote) permet de documenter cette trajectoire et de la mettre en lien avec la réduction des rejets, l'amélioration des capacités de traitement des effluents et l'évolution des pratiques agricoles et industrielles. L'oxygénation des eaux de la Seine s'est ainsi largement améliorée grâce à la mise en place et l'optimisation des stations de traitement des effluents urbains et industriels ; la contamination en micropolluants chimiques (métaux, organochlorés, PCB,...) et en certains nutriments (phosphore, ammoniac) a largement baissé grâce à une meilleure maîtrise des rejets, à des restrictions d'usage et des évolutions des procédés industriels ; la contamination microbiologique a été réduite, là encore suite à l'augmentation des capacités de traitement des effluents et à une meilleure maîtrise des rejets ; ... Ces signaux positifs témoignent d'une trajectoire allant vers une reconquête de la qualité des eaux de la Seine, mais ne doivent pas occulter les efforts qui restent à mener et les préoccupations qui persistent. En effet, ces décennies « noires » ont laissé une empreinte durable sur la Seine et les terrains adjacents, avec de nombreux sites et sols pollués et la présence de stocks de contaminants dans

le lit mineur ou en bord de Seine. Les sédiments circulant en Seine à cette période et présentant des niveaux de contamination élevés ont pu se déposer en Seine ou être utilisés pour remblayer des bras morts, des terrains en arrière de digue ou déposés à terre. Ces sédiments sont encore aujourd'hui partiellement présents et peuvent constituer des stocks de contaminants potentiellement remobilisables lors d'un aménagement, d'une crue ou d'une tempête [Figure 35].

Dans un contexte de pression foncière, de volonté de réutilisation des friches industrielles et de mise en œuvre de mesures de restauration écologique, l'inventaire et la caractérisation de ces stocks potentiels de contaminants revêtent ainsi un enjeu capital pour éviter ou maîtriser une éventuelle remobilisation dans le milieu. Pour ce faire, les études historiques et les analyses de carottes sédimentaires sont les premiers outils à mobiliser. Ils permettent d'affiner l'histoire d'un site et d'estimer le stock de contaminant présent. Dans un second temps, la gestion d'une pollution reposera sur une combinaison de mesures déterminées sur des considérations sanitaires, environnementales, techniques et économiques.

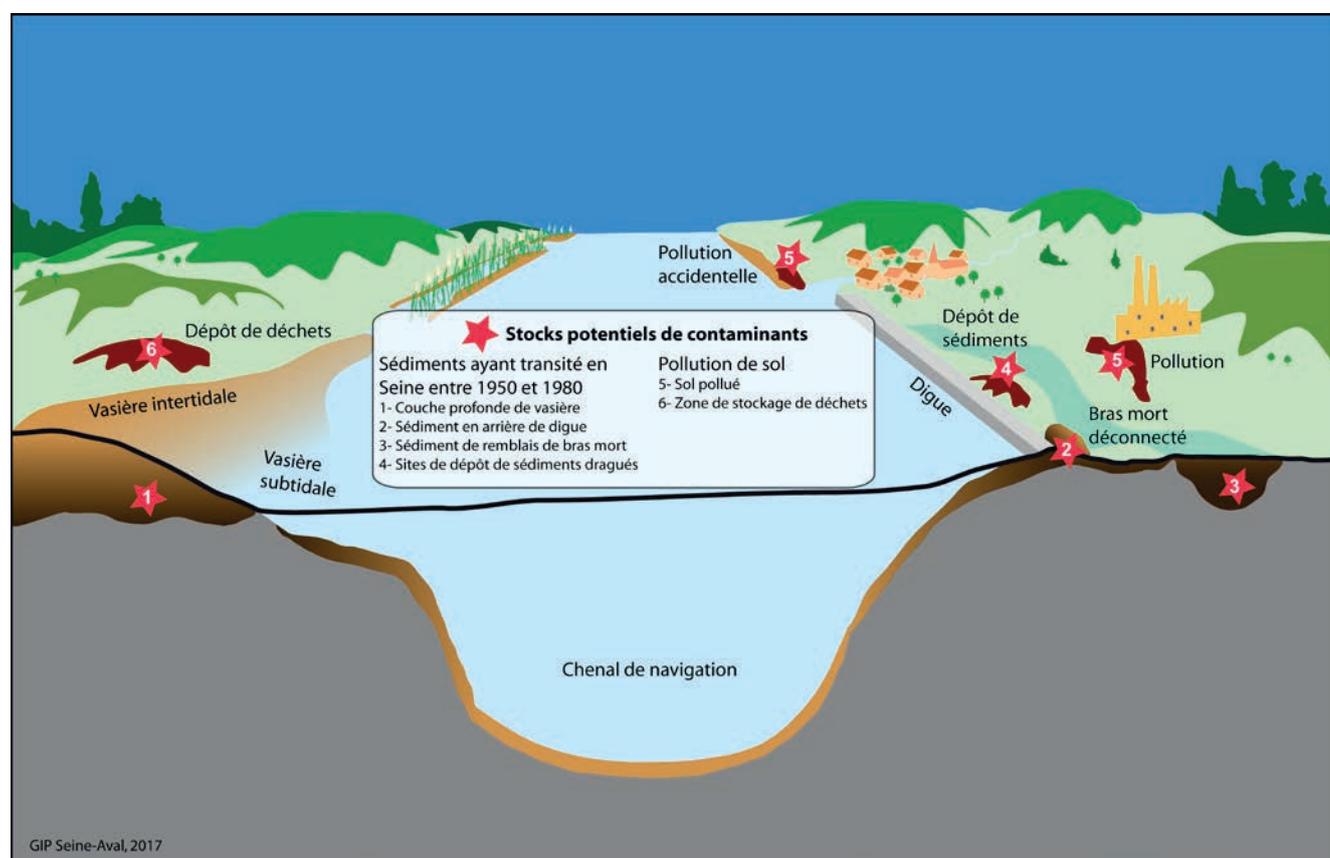


FIGURE 35 Schématisation des stocks potentiels de contaminants en estuaire de Seine.

ABRÉVIATIONS

AESN : Agence de l'Eau Seine-Normandie

BASIAS : Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Service

BASOL : Base de données sur les sites et SOLs pollués

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BTEX : Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes

CASE : Communauté d'Agglomération Seine-Eure

CEDRE : Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux

CETH : Centre d'Enfouissement Technique

CNEXO : Centre National pour l'Exploitation des Océans

CIM : Compagnie Industrielle Maritime

CITRON : Centre International de Traitement et de Recyclage des Ordures Nocives

COFAZ : Compagnie Française de l'AZote

DATAR : Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale

DBO5 : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DDT : DichloroDiphénylTrichloroethane

DDTM-76 : Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime

DRAE : Direction Régionale de l'Architecture et de l'Environnement de Haute-Normandie

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement de Haute-Normandie

EDF : Electricité De France

EPFN : Etablissement Public Foncier de Normandie

FE : Facteur d'Enrichissement

GEODE : Groupe d'Etudes et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement

GIP Seine-Aval : Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval

GPMH : Grand Port Maritime du Havre

GPMR : Grand Port Maritime de Rouen

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

IPCHN : Inventaire du Patrimoine Culturel région Haute-Normandie

MABN : Mission d'Aménagement de la Basse-Normandie

MEBS : Mission d'Etudes Basse Seine

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

MEEM : Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer

MES : Matières En Suspension

PBDE : PolyBromoDiphénylEthers

PCB : PolyChloroBiphényles

PCT : PolyChloroTerphényles

Pk : Point kilométrique

SAUM : Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer

SPPPI : Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles en Basse-Seine

TCE : TriChloroEthylène

GLOSSAIRE

Anoxie : Manque d'oxygène dissous dans l'eau, mettant en péril la survie de faune aquatique.

Bioaccumulation : Capacité des organismes aquatiques à concentrer et à accumuler les substances chimiques à des concentrations supérieures à celles où elles sont présentes dans l'eau qui les environne.

Bruit de fond géochimique : Concentration d'un élément chimique dans un compartiment environnemental (eau, sédiment, biote), en dehors de tout apport d'origine humaine. Pour les métaux des sédiments de la Seine, les valeurs sont les suivantes (en mg/kg) : Cd=0.2 ; Co= 10 ; Cr= 40 ; Ni= 16 ; Pb= 20 ; Zn=60 pour une concentration moyenne en aluminium de 33 000 mg/kg.

Chaîne trophique : Suite de maillons reliés par des liens trophiques, dans laquelle la (ou les) population(s) constituant un maillon consomme(nt) le maillon précédent et sert (servent) de nourriture au maillon suivant.

DBO₅ : La demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO₅) est un paramètre de qualité d'une eau. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toute la matière organique contenue dans une eau par voie biologique en 5 jours. Elle permet d'évaluer la fraction biodégradable de la charge carbonée d'une eau.

Carotte : Echantillon de sédiments prélevé avec un tube, dans une zone d'accumulation sédimentaire, afin de servir d'archive de la contamination d'un site.

DCO : La demande chimique en oxygène (DCO) est un paramètre de qualité d'une eau. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique et minérale contenue dans une eau.

Facteur d'enrichissement : Rapport entre la concentration d'un polluant mesurée dans le milieu et son bruit de fond géochimique*.

Friche d'activité : Espace, bâti ou non, ayant connu une activité économique (hors agricole) et qui aujourd'hui n'est plus utilisé.

Lit majeur : Espace correspondant à la plaine inondable d'un cours d'eau sans les aménagements. Il est limité par l'emprise des crues exceptionnelles.

Lit mineur : Espace occupé par l'écoulement d'un cours d'eau, hors événements hydrologiques exceptionnels. Il est séparé du lit majeur par des berges et dans le contexte estuarien, il inclut la zone intertidale.

Métabolite : Composé issu de la dégradation (dans l'environnement) ou de la biotransformation (par un organisme) d'une molécule mère. Dans certains cas, un métabolite peut être plus toxique que le composé initial.

Pollution concentrée : Volume d'un compartiment environnemental au sein duquel les concentrations en une ou plusieurs substances sont significativement supérieures aux concentrations mesurées à proximité immédiate.

Pollution diffuse : Présence d'une ou de plusieurs substances dont les concentrations sont relativement uniformes et impactent de grands volumes et grandes surfaces d'un ou plusieurs compartiments environnementaux.

Pollution résiduelle : Niveau de pollution dans un compartiment environnemental après une action, un traitement ou des travaux de réhabilitation réalisés pour diminuer la pollution initiale.

Site/sol pollué : Site/sol qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement.

Source de pollution : Capacité d'une installation ou d'un compartiment environnemental à émettre des pollutions, se traduisant par leur transfert dans l'environnement.

Teneur anormale : Dans le contexte des sites et sols pollués, une teneur anormale en un contaminant donné fait référence à une concentration supérieure à celle attendue dans un sol naturel (sans activité) pour un environnement lithologique et pédologique proche.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), 2014. **50 ans d'efforts au service de la qualité des eaux**. Brochure, 47p.
- Avenel A. & Bernard R., 1996. **Splendeur des indiennes bolbécaises**. 50p.
- 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.
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI). ARIA – **La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques**. [en ligne] <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>
- Communauté d'Agglomération Seine-Eure (CASE), 2012. **Programme pluriannuel de restauration et d'entretien de l'Eure sur le territoire de la communauté d'agglomération Seine-Eure. Phase 1. Etat de lieux et diagnostic**.
- Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE). **Accident du Katja**. [en ligne] <http://www.cedre.fr/Nos-ressources/Accidents/Accidents/Katja>
- Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Beranger S., Hube D., Blanc C., Zornig C., Girardeau I., 2010. **Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts-bénéfices**. Rapport final BRGM-RP-58609-FR, 399p.
- Dargnat C. & Fisson C., 2010. **Les PolyChloroBiphényles (PCB) dans le bassin de la Seine et son estuaire**. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval, 134p.
- Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (DATAR), 1970. **Projet de livre blanc – l'eau en Seine-Normandie**. Collection 'Travaux et Recherches de Prospective', 177p.
- Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS), 1997. **L'accident du pétrolier Katja dans le port du Havre – étude de presse du 8 au 24 août 1997**. Rapport pour la Préfecture du Département de Seine-Maritime, 10p. et annexes.
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime (DDTM76), 2001. **Suivi de la qualité des eaux de la Seine à l'aval de Poses**. 184p
- Direction Régionale de l'Architecture et de l'Environnement de Haute-Normandie (DRAE), 1989. **Tableau de bord de l'environnement de l'Eure**. 114p
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), 2017. **Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles en Basse-Seine**. [en ligne] <http://www.spinfos.fr/>
- Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement de Haute-Normandie (DRIRE), 1995. **L'industrie et l'environnement en Haute-Normandie – Bilan 1994**. 89p.
- Ecopol, 1976. **Etude de définition des objectifs de qualité sur la Seine aval**. Rapport réalisé pour l'Agence Financière de Bassin Seine-Normandie, 70p. et annexes
- Etablissement Public Foncier de Normandie (EPFN), 2011. **Recensement des friches d'activité en vallée de Seine**. Rapport d'étude, 18p
- 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., 2015. **Flux en contaminants à l'estuaire de la Seine**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 33p.
- Fisson C. (coord.), 2014. **Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine**. Fascicule Seine-Aval 3.2, 52p.
- Foussard V., 2009. **Evolution hydro-géo-morphologique de l'estuaire de la Seine, au regard des usages passés et présents**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 15p. et annexes
- 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.
- Houllemare P., 2017. **Techniques de dépollution des sédiments en milieu estuarien**. Rapport de stage réalisé au GIP Seine-Aval, 128p.

- Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). **Géoportail**.
[en ligne] <https://www.geoportail.gouv.fr/>
- Inventaire du Patrimoine Culturel région Haute-Normandie (IPCHN), 2008. **Le paysage industriel de la Basse-Seine**. Edité par Connaissance du Patrimoine de Haute-Normandie sous la direction de Claire Etienne. Collection Images du patrimoine, n°249. ISSN n°0299-1020, 264p.
- Jeanne L., 2010. **Pollutions accidentelles en estuaire de Seine**. Rapport de stage réalisé pour le GIP Seine-Aval, 34p. et annexes
- Laberdesque Y., 2016. **Historique des polluants persistants dans le bassin versant de l'Eure enregistrés dans les sédiments de l'étang de Martot**. Mémoire de Master, Université de Normandie, Rouen, Laboratoires M2C/COBRA.
- Launay A., 2011. **Grands travaux de la Seine dans la région de Pont-de-l'Arche (années 1930)**.
[en ligne] <http://pontdelarche.over-blog.com>
- Le Dez M., 2009. **Le commerce et l'industrie des pétroles dans la basse vallée de la Seine (1860-1940) : La naissance d'un complexe énergétique, entre interventions étatiques et initiatives locales**. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2 vol, 855 p.
- Meybeck M., Lestel L., Bonté P., Moilleron R., Colin J.L., *et al.*, 2007. **Historical perspective of heavy metals contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River basin (France) following a DPSIR approach (1950-2005)**. Science of the Total Environment, 375, pp.204 - 231.
- Mission d'Etudes Basse Seine (MEBS), Mission d'Aménagement de la Basse-Normandie (MABN), Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), 1980. **Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer (SAUM) Estuaire de la Seine – Synthèse des connaissances**. Dossier n°8, 148p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). **BASOL : sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif**.
[en ligne] <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>
- Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer (MEEM), 2017. **Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués**. Rapport d'étude, 128p.
- Patault E., 2015. **Caractéristiques, origine et variabilité des transferts hydro-sédimentaires sur le bassin versant de l'Eure : approche multi-échelle**. Mémoire de Master, Université de Normandie, Rouen, Laboratoire M2C.
- Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles en Basse-Seine (SPPPI), 1990. **Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution en estuaire et en baie de Seine**. Brochure, 36p.
- Service de Navigation de la Seine (SNS), 1987. **Etude des pollutions en Seine**. 29p. en annexes
- 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

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Autre publication

Site web

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution à long terme de la pollution des eaux du bassin versant de la Seine.....	6
Figure 2 : Centrale thermique de Dieppedalle	8
Figure 3 : Localisation des sites et sols pollués aux PCB.....	10
Figure 4 : Rejets industriels dans l'estuaire de la Seine en 1975	11
Figure 5 : Teneurs en oxygène dissous mesurées dans la Seine en périodes défavorables, entre 1975 et 1988	12
Figure 6 : Evolution du nombre d'établissements liés à l'industrie textile à Bolbec et implantations vers 1830	12
Figure 7 : Accostage d'un pétrolier à Rouen au début du XX ^e siècle.....	13
Figure 8 : Prototype d'hydravion dans le Port du Havre (1949)	14
Figure 9 : Principales industries polluantes sur le bassin versant de la Seine à la fin des années 1960.....	15
Figure 10 : Zone industrielle du Havre en 1937.	15
Figure 11 : Part de l'industrie de l'oxyde de titane et de phosphogypses dans les apports polluants en baie de Seine (1980).....	16
Figure 12 : Pollution par les métaux des cours d'eau de l'Eure en 1986	18
Figure 13 : Principaux rejets industriels à l'embouchure de la Seine en 1980	18
Figure 14 : Traitements collectifs des déchets industriels en 1986	19
Figure 15 : Incinérateur du pré aux loups (Rouen) en 1913	20
Figure 16 : Sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine	23
Figure 17 : Polluants retrouvés en teneurs anormales dans les eaux souterraines, les eaux superficielles, les sols ou les sédiments à proximité des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine. ...	26
Figure 18 : Traitements mis en place pour la gestion des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine	27
Figure 19 : Utilisation actuelle des sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine, selon l'activité d'origine	27
Figure 20 : Inventaire BASOL des sites et sols pollués de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine	27
Figure 21 : Friches industrielles identifiées dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine	28
Figure 22 : Principaux sites de stockage de déchets et d'incinération à l'embouchure de la Seine	29
Figure 23 : Stations et dates de début des chroniques de suivi de la qualité chimique des sédiments en estuaire de Seine	30
Figure 24 : Contamination en métaux, PCB et HAP des sédiments fins de surface déposés sur les banquettes latérales de l'estuaire de la Seine	31
Figure 25 : Fresque historique des principaux forçages anthropiques et des principales crues recensées sur la zone d'étude comprise entre Martot et les Damps	32

Figure 26 : Evolution des teneurs en plomb normalisées au titane dans une carotte sédimentaire prélevée dans l'étang de Martot.	33
Figure 27 : Dragages d'entretien effectués dans la darse des docks	34
Figure 28 : Evolution de polluants (cadmium, HAP, PCB, DDT) dans une carotte sédimentaire prélevée dans la darse des Docks (Petit-Couronne)	34
Figure 29 : Activité en plutonium des sédiments de la vasière Nord.	36
Figure 30 : Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine.	37
Figure 31 : Analyse diachronique du site au pied du viaduc d'Oissel (pk 227-228)	37
Figure 32 : Analyse diachronique de trou de la Martellerie (pk 279)	37
Figure 33 : Analyse diachronique des îles Durant et Saint-Catherine (pk 227)	38
Figure 34 : Sites de dépôt, sites de transit et sites d'immersion des sédiments de dragage	38
Figure 35 : Schématisation des stocks potentiels de contaminants en estuaire de Seine	43
Figure A : Facteurs d'enrichissement (FE) métallique dans les sédiments prélevés dans la plaine alluviale de la Seine, en amont de Poses.	17
Figure B : Impacts de l'accident du Katja (Libération, le 11 aout 1997)	22
Figure C : Sites inventoriés dans BASOL (au 6 juin 2017) A/ à l'échelle français et B/ à l'échelle de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Estimation des stocks de polluants dans la darse des Docks et comparaisons aux flux actuels apportés par la Seine	35
Tableau II : Applicabilité des traitements <i>in situ</i> vs sur site ou hors site, selon les caractéristiques du site.	40
Tableau III : Contraintes identifiées pour le déploiement d'une technique de traitement biologique	41
Tableau IV : Pressions sur la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine des principaux secteurs industriels entre 1950 et 1980.	42



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 ?

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., 2017.
Industrialisation de l'estuaire de la Seine : Quel héritage pour la qualité des eaux ? Fascicule Seine-Aval 3.6, 52 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 :

