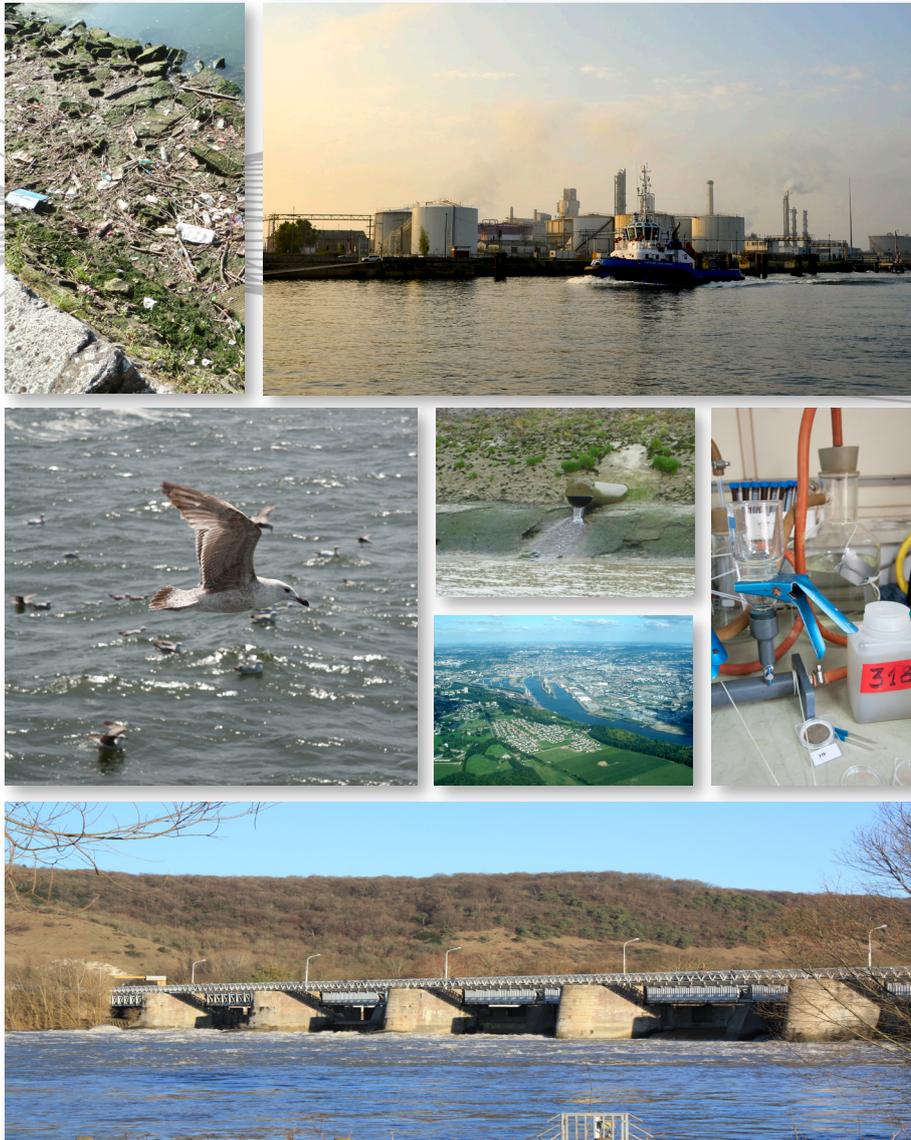


QUALITÉ DES EAUX DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE





QUALITÉ DES EAUX DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

COORDINATEUR

Cédric Fisson¹

AUTEUR

Cédric Fisson¹

CONTRIBUTIONS

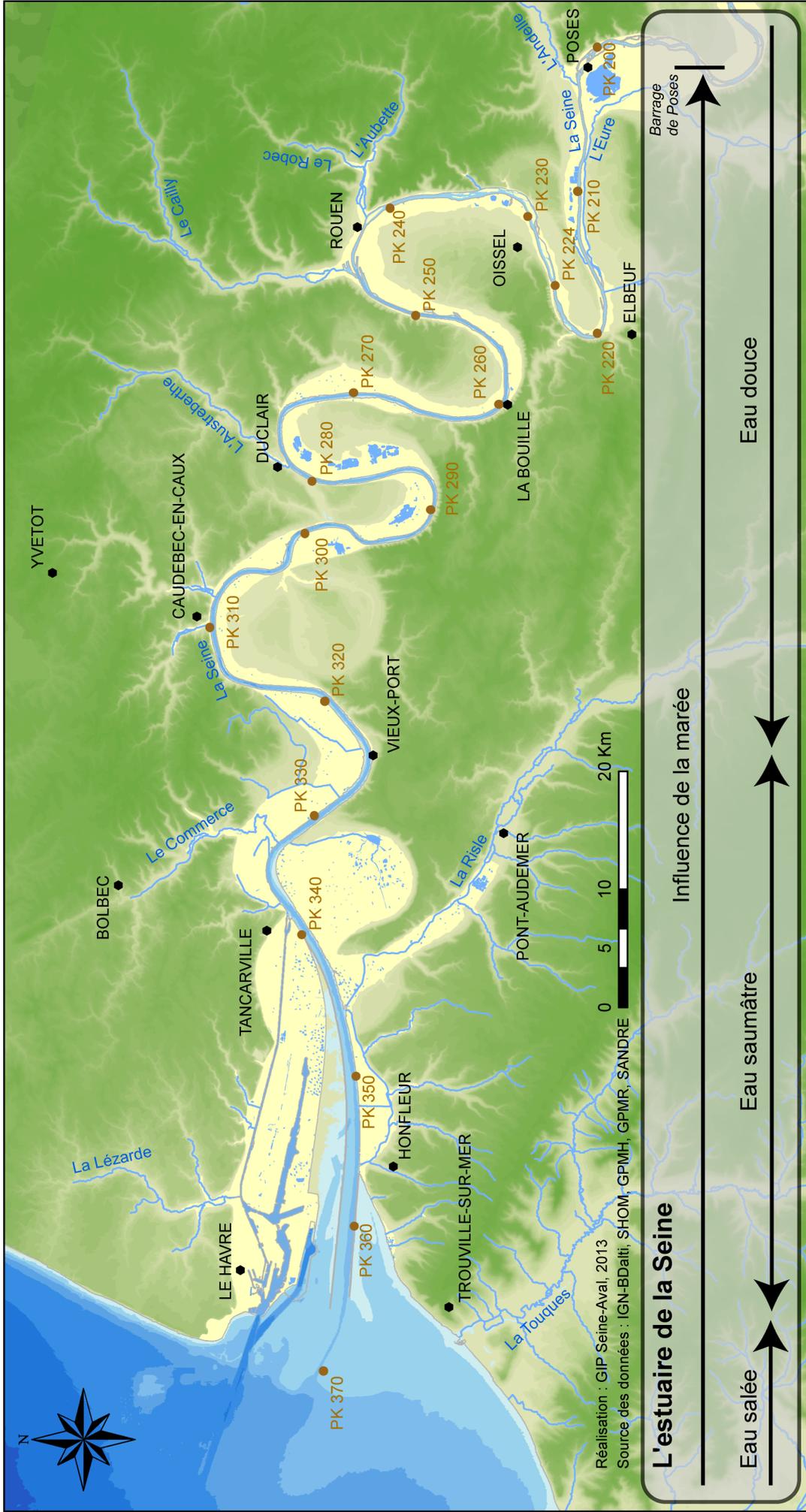
Nicolas Bacq¹, Gilles Billen², Dominique Boust³, Hélène Budzinski⁴, Jean Duchemin⁵, Tristan Fontaine⁶,
Josette Garnier², Sylvie Homer⁷, Jérôme Lacroix⁸, Barbara Leroy⁵, Sandrine Sansom⁹

DÉCEMBRE 2014

- (1) GIP Seine-Aval
- (2) Université Pierre & Marie Curie, CNRS UMR 7619 METIS
- (3) IRSN, Laboratoire de Radioécologie de Cherbourg-Octeville
- (4) Université de Bordeaux, CNRS UMR 5805 EPOC
- (5) Agence de l'Eau Seine-Normandie
- (6) DREAL de Haute-Normandie
- (7) Agence Régionale de Santé
- (8) Grand Port Maritime du Havre
- (9) Grand Port Maritime de Rouen

Sommaire

■ INTRODUCTION	6
I LES PRESSIONS POLLUANTES DE NOMBREUSES SOURCES DE CONTAMINANTS À L'ESTUAIRE	7
A Les zones urbaines	7
B L'activité agricole	9
C L'activité industrielle	11
Encart n° 1 L'exemple historique des phosphogypses	
D Le transport maritime	13
E Les sources secondaires	14
II L'ÉTAT DU MILIEU DE NETTES AMÉLIORATIONS... MAIS DES PRÉOCCUPATIONS ENCORE FORTES	16
A L'oxygénation des eaux	16
B Les apports en nutriments	17
C L'eutrophisation	19
Encart n° 2 Mise en place d'une chaîne de modélisation pour simuler le rôle des flux de nutriments sur l'eutrophisation en baie de Seine	
D La contamination chimique	20
Encart n° 3 Des carottes sédimentaires pour lire la contamination du passé	
Encart n° 4 La signature isotopique pour tracer les sources de contamination métallique	
Encart n° 5 Identification des molécules responsables d'un effet toxique	
Encart n° 6 Des méthodes analytiques innovantes pour suivre les résidus médicamenteux dans les eaux	
Encart n° 7 Des biomarqueurs et des bioessais pour évaluer la toxicité des matrices environnementales	
E Les microorganismes	33
F Les macrodéchets	34
III LES CONSÉQUENCES DES EFFETS VISIBLES À DIFFÉRENTS NIVEAUX	35
A Un état des masses d'eau jugé mauvais par la réglementation européenne	35
B Des impacts environnementaux visibles sur les organismes aquatiques	36
C Des mesures de suivi et de gestion du risque sanitaire	38
D Des perceptions sociales qui évoluent	40
■ CONCLUSION	41
■ ANNEXE LES DONNÉES DE SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX	42
Les matrices de suivi	42
Les réseaux de suivi	42
Les campagnes ponctuelles et les études	44
■ ABRÉVIATIONS	45
■ GLOSSAIRE	46
■ BIBLIOGRAPHIE	47
■ TABLES DES ILLUSTRATIONS	51
Liste des figures	51
Liste des tableaux	52



INTRODUCTION



Situé à l'interface entre le milieu continental et le milieu marin, l'estuaire de la Seine voit la qualité de ses eaux impactée par les apports polluants*, qu'ils soient directement rejetés dans la zone estuarienne ou bien issus du réseau hydrographique amont. La qualité du milieu estuarien est ainsi le reflet des pressions des activités humaines présentes sur son bassin versant*, et plus largement, sur tout le bassin versant de la Seine. Le fonctionnement hydrosédimentaire* particulier aux estuaires joue également un rôle important sur la qualité des eaux, via son impact sur le transport, la dilution, la transformation ou le stockage de la matière organique*, des nutriments* et des contaminants*. Le bouchon vaseux* assure un rôle de filtre, stocke et transforme ces éléments : il retient les germes microbiens et les micropolluants par adsorption sur les particules fines et les sédiments ; certaines substances y sont piégées alors que d'autres sont modifiées et expulsées vers l'aval. Enfin, les apports de la Seine au milieu marin influencent la qualité des eaux de la baie de Seine et jouent un rôle dans les dynamiques écologiques des différentes composantes de l'écosystème (phytoplancton*, invertébrés benthiques*, poissons, etc.).

Pour suivre la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine, divers paramètres (physico-chimiques, chimiques, microbiologiques) sont suivis dans des compartiments environnementaux complémentaires (eau, matières en suspension* (MES), sédiment, coquillages, poissons, etc.). Ces données sont acquises par des réseaux de suivi pérennes ou bien lors de campagnes plus ou moins ponctuelles [ANNEXE A]. L'analyse de ces données permet de tracer les pollutions qui peuvent

être de sources multiples (industrielles, agricoles, urbaines) et prendre de nombreuses formes : eutrophisation, présence de substances toxiques (micropolluants* minéraux ou organiques), présence de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, parasites, microalgues), accumulation de macrodéchets, etc. Ces données apportent également des éléments de connaissance importants sur les conséquences environnementales (effets délétères sur les organismes aquatiques) et les risques sanitaires (baignade, consommation des produits de la pêche) liés à la qualité des eaux. Enfin, le suivi de l'évolution temporelle de la qualité des eaux permet de documenter les améliorations ou détériorations observées dans le milieu naturel et de les relier avec une modification des usages ou des pratiques, tels les changements de procédés industriels, la maîtrise des rejets urbains ou industriels, la modification des pratiques agricoles, l'évolution de l'occupation des sols, etc.

Le présent fascicule vise à faire un bilan de la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine à travers ses diverses composantes. Les pressions polluantes et les sources de contaminants à l'estuaire sont détaillées : zones urbaines, activité agricole, activité industrielle, transport maritime, sites et sols pollués et points noirs environnementaux. L'état du milieu est dressé et mis en perspective des évolutions historiques pour les principaux paramètres d'altération de la qualité des eaux, les grandes familles de micropolluants, les microorganismes et les macrodéchets. Enfin, les conséquences d'une qualité des eaux dégradée sont analysées dans ses composantes environnementales, sanitaires, réglementaires et sociales.

I LES PRESSIONS POLLUANTES : DE NOMBREUSES SOURCES DE CONTAMINANTS À L'ESTUAIRE



La pollution des eaux naturelles provient essentiellement des activités humaines, les sources étant classiquement reliées aux pressions urbaines (eaux pluviales et rejets domestiques), industrielles et agricoles. En milieu urbain, selon la configuration du réseau, les eaux pluviales peuvent rejoindre directement le milieu récepteur ou alors passer par une station d'épuration urbaine (si le réseau d'assainissement est unitaire). Ces installations traitent les eaux usées domestiques et parfois industrielles lorsque les rejets aqueux y sont directement acheminés (suite à un premier traitement éventuel sur site). En ce qui concerne les pressions agricoles, les surplus d'engrais non captés par les plantes (nitrates, phosphates) et les pesticides* épandus peuvent rejoindre le milieu récepteur après ruissellement en surface, ou via les nappes souterraines après infiltration dans le sol. Il faut également citer les dépôts atmosphériques, qu'ils soient de temps sec ou humide, qui peuvent rejoindre les eaux de surface, soit directement, soit après ruissellement en surface. Enfin, les sources dites secondaires correspondant à des remobilisations de contaminants déjà présents dans l'environnement, que ce soit par ruissellement sur des sites et sols pollués, ou par une remise en suspension – lors de crues ou par dragage* – des sédiments contaminés déjà présents dans les cours d'eau [FIGURE 1].

Ce schéma général des sources et voies de transferts de polluants vers un cours d'eau s'applique à l'estuaire de la Seine, avec des sources de pollution diverses: rejets directs dans l'estuaire via les stations d'épuration urbaines et industrielles, sources diffuses via le ruissellement ou la remise en suspension de sédiments, apports des bassins versants intra-estuariens via les affluents ou les nappes d'eau souterraines, apports du bassin versant amont via la

A. LES ZONES URBAINES

Particulièrement importante sur l'axe Seine avec les agglomérations parisienne, rouennaise et havraise, la pression urbaine est source de nombreux polluants liés *I*) aux usages domestiques de l'eau (détergents, graisses, débris organiques, matière organique azotée, germes fécaux, etc.), *II*) aux activités artisanales, industrielles et commerciales (matières organiques, micropolluants, etc.) et *III*) aux eaux pluviales (matières organiques et minérales, micropolluants, etc.). La

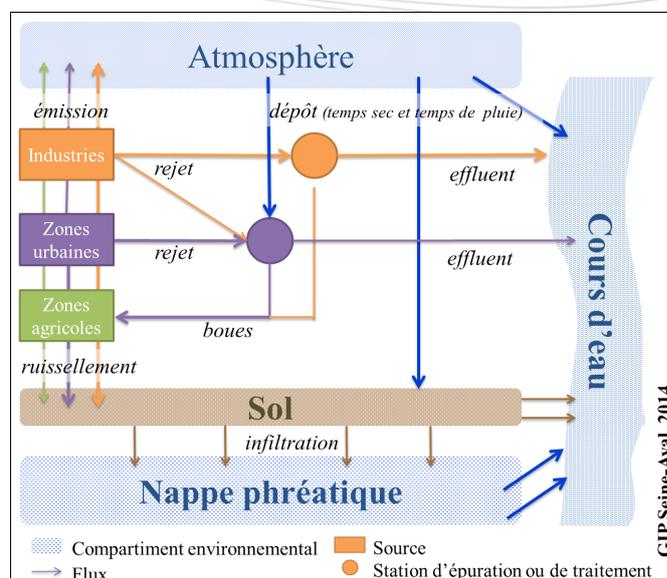


FIGURE 1 Sources et voies de transfert des polluants dans un cours d'eau.

Seine. Les flux amonts ont largement été réduits depuis les années 1970-1980, témoin des efforts réalisés sur le bassin versant. L'analyse de la contribution actuelle de chacune de ces sources dans le flux global de contaminants dissous à l'estuaire de la Seine montre la prépondérance des apports de son bassin versant amont (i.e. flux à Poses) sur les autres apports. Ces apports amont sont globalement 10 à 20 fois plus importants que les apports des affluents et représentent plusieurs centaines de fois les apports directs à l'estuaire (rejets industriels et urbains). Ce constat général peut être pondéré pour certains contaminants et reste à compléter par les apports particulaires [LACHAMBRE & FISSON, 2007].

collecte et le traitement de ces eaux résiduares urbaines sont des enjeux majeurs pour la protection des milieux aquatiques. Des réseaux de collecte et des unités de traitement se sont progressivement mis en place et renforcés, notamment en réponse à la réglementation française (Loi sur l'eau du 16 décembre 1964) et européenne (Directive européenne Eaux Résiduares Urbaines du 21 mai 1991; Directive Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000).

Jusqu'en 1987 où une politique de déconcentration des unités de traitement a été initiée, la station « Seine aval » située sur le site d'Achères était le seul site épuratoire pour les eaux usées, pluviales et industrielles de l'agglomération parisienne. Mise en service en 1940, elle a progressivement été agrandie (ajout de tranches en 1966, 1972 et 1978) et les performances ont été améliorées pour répondre aux exigences réglementaires (1999 : traitement physico-chimique des eaux excédentaires de temps de pluie; 2007 : traitement spécifique partiel des pollutions azotées par nitrification-

dénitrification; 2011 : unité complémentaire de dénitrification). Aujourd'hui les effluents de l'agglomération parisienne sont traités sur six stations d'épuration (STEP) avant leur rejet dans la Seine ou la Marne. Cela représente 2,5 millions de m³ d'eaux usées chaque jour, soit les rejets de 9 millions d'usagers [TABLEAU I; SIAAP, 2014]. En cas de grosses pluies, les réseaux unitaires et les bassins d'orage sont à l'origine de rejets d'eaux brutes en Seine pouvant atteindre 4 millions de m³, malgré une régulation télécommandée et des stockages en réseau.

TABLEAU 1 Usines d'épuration de l'agglomération parisienne.

Station d'épuration		Date de mise en service (refonte ou tranches supplémentaires)	Capacité de traitement		Capacité utile	Taux élimination (2012)					
			Temps sec	Temps de pluie		MES	DBO5	DCO	NTK	NGL	Pt
Marne aval	Noisy-le-Grand (93)	1976 (2009)	75 000 m ³ /j	100 000 m ³ /j	500 000 EH	97 %	97 %	93 %	94 %	84 %	93 %
Seine amont	Valenton (94)	1987 (1992, 2005)	600 000 m ³ /j	1 500 000 m ³ /j	2 618 000 EH	98 %	99 %	96 %	97 %	70 %	90 %
Seine centre	Colombes (92)	1998	240 000 m ³ /j	404 800 m ³ /j	900 000 EH	98 %	97 %	95 %	96 %	70 %	94 %
Seine Grésillons	Triel-sur-Seine (78)	2008	300 000 m ³ /j	315 000 m ³ /j	1 000 000 EH	97 %	97 %	93 %	96 %	85 %	90 %
Seine aval	Saint-Germain-en-Laye (78)	1940 (1966, 1972, 1978, 1999, 2007, 2011)	1 460 000 m ³ /j	2 900 000 m ³ /j	4 564 000 EH	95 %	93 %	88 %	85 %	71 %	85 %
Seine Morée	Blanc-Mesnil (93)	2014	52 300 m ³ /j	76 500 m ³ /j	300 000 EH						

Source des données: SIAAP, 2014

Le long de l'estuaire de la Seine, plusieurs stations d'épurations assurent le traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles avant leur rejet dans le milieu. Les principales sont la station Émeraude pour l'agglomération rouennaise (mise en service en 1997, avec une mise en conformité en 2009 pour le traitement de l'azote et du phosphore) et

Edelweiss pour l'agglomération havraise (mise en service en 2011 en remplacement de l'ancienne STEP du Havre). L'ensemble de ces stations permet le traitement des effluents de plus d'un million d'usagers, avec un rendement d'épuration satisfaisant [TABLEAU II; CREA, 2013; CODAH, 2013].

TABLEAU 2 Usines d'épuration (> 10 000 EH) dans l'estuaire de la Seine.

Station d'épuration		Date de mise en service	Capacité utilisée	Taux élimination (2012)					
				MES	DBO5	DCO	NTK	NGL	Pt
Émeraude	Petit Quevilly (76)	1997	550 000 EH	96 %	98 %	95 %	95 %	80 %	89 %
Edelweiss	Le Havre (76)	2011	322 000 EH	83 %	92 %	85 %	88 %	78 %	76 %
	Saint-Aubin-lès-Elbeuf	2001	110 000 EH	98 %	98 %	93 %	96 %	94 %	95 %
	Grand Quevilly (76)	1995	58 000 EH	98 %	98 %	96 %	94 %	93 %	87 %
	Honfleur (14)	2004	26 000 EH						
	Grand Couronne (76)	1995	20 000 EH	98 %	99 %	97 %	97 %	86 %	86 %
	Le Trait (76)	2001	10 800 EH	99 %	99 %	97 %	95 %	93 %	55 %

Source des données: CREA, 2013; CODAH, 2013

À l'échelle du bassin Seine-Normandie, les rejets des collectivités représentent environ 2/3 des rejets en DCO, en DBO₅ et en azote réduit (respectivement 183,62 et 15,5 kt/an) et 50 % des rejets en phosphore (4,4 kt/an). Pour ce dernier paramètre, l'importance relative des rejets urbains par rapport aux apports agricoles diminue depuis la suppression des

phosphates dans les lessives et la mise en place d'unité de déphosphatation dans les grandes STEP. Pour l'azote oxydé (NO₃), les rejets des collectivités représentent moins de 20 % des rejets globaux sur le bassin Seine-Normandie [FIGURE 2; AESN & PRÉFECTURE D'ÎLE DE FRANCE, 2013].

Bien que les usages des pesticides par les particuliers et les communes soient moindres que les usages agricoles, cette pression en milieu urbain est réelle. Pour réduire l'usage global de ces substances et atteindre les objectifs du plan Ecophyto (réduction de 50 % en 2018 par rapport à 2008), ils seront interdits dans les zones non agricoles d'ici 2022 (2020 pour les collectivités et 2022 pour les particuliers). Pour anticiper ces changements de pratiques, de nombreuses collectivités s'engagent dans une démarche « zéro phyto ». C'est notamment le cas des communes de l'agglomération rouennaise pour la gestion des espaces verts et du département de Seine-Maritime qui expérimente de nouvelles techniques de désherbage sans pesticides sur les berges de Seine.

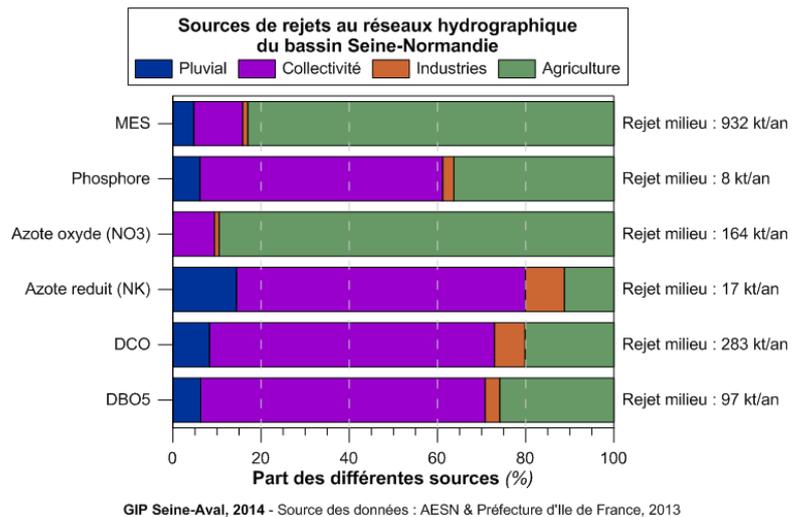
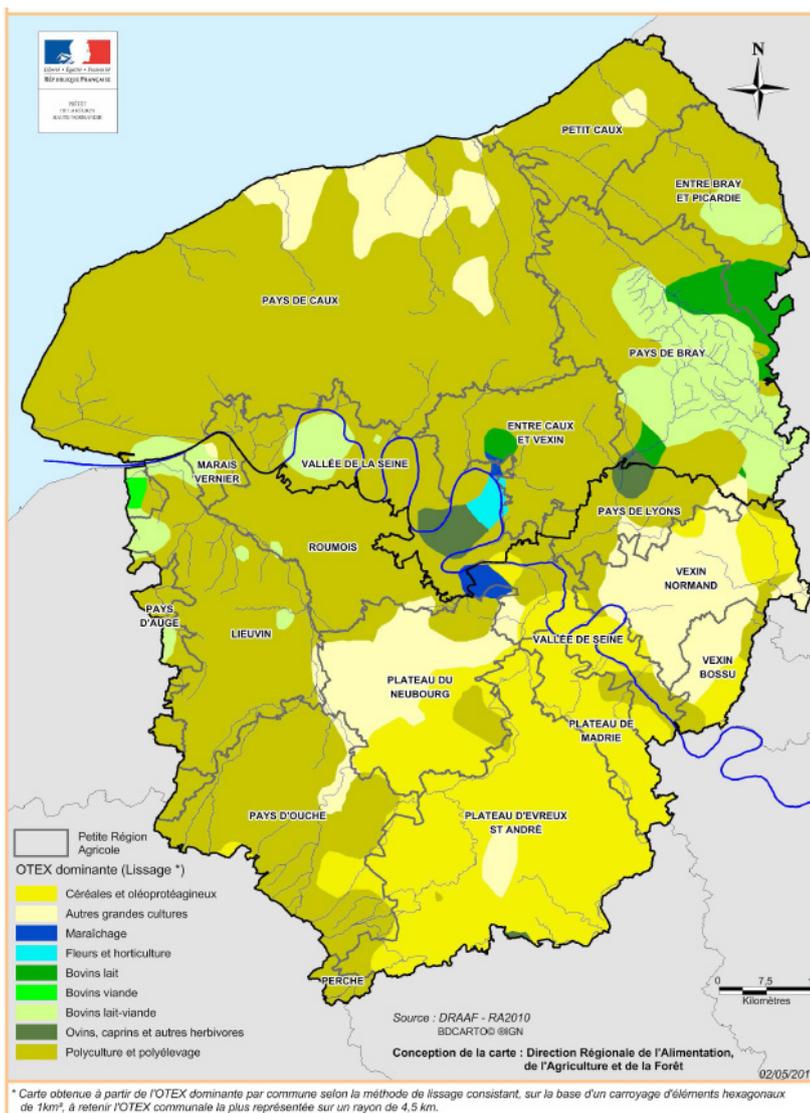


FIGURE 2 Origine et estimation des rejets polluants dans le bassin Seine-Normandie.

B. L'ACTIVITÉ AGRICOLE



L'agriculture du bassin de la Seine est particulièrement développée et couvre aujourd'hui 60 % de la surface de son bassin versant. Elle est dominée par les exploitations spécialisées en céréales et oléoprotéagineux (43 % de la SAU); les exploitations en cultures générales (19 %), grandes cultures et herbivores (17 %) et les exploitations dirigées vers la production de lait ou de viande complètent ce schéma [SCHOTT C. ET AL., 2009]. En s'intéressant plus spécifiquement au bassin versant de l'estuaire de la Seine, on constate que l'activité agricole est également très présente, avec des orientations techniques adaptées aux conditions pédoclimatiques locales: *i*) grandes cultures sur les terres limoneuses du sud de la Seine avec des particularités régionales en pomme de terre, betterave et lin (pays de Caux, plateaux du Vexin et du Neubourg); *ii*) élevage bovin (laitier et viande) sur les reliefs accidentés (Pays de Bray et d'Auge); *iii*) exploitations mixtes (polyculture-élevage) au nord de la Seine (Pays de Caux, Roumois). Dans la vallée de la Seine, des orientations plus spécifiques sont présentes avec des cultures maraîchères en périphérie des villes, de l'horticulture et de l'arboriculture dans des boucles de la Seine [FIGURE 3; DRAAF-HN, 2013].

FIGURE 3 Orientations technico-économiques des exploitations agricoles de Haute-Normandie.

Les pressions liées à l'activité agricole englobent différentes problématiques environnementales: *I*) maîtrise du ruissellement, *II*) érosion des sols et *III*) pollution des eaux de surface et souterraines, avec des apports par les effluents des bâtiments d'élevage (azote, antifongiques, antibiotiques...) et des apports diffus liés aux différentes cultures et élevages (intrants azotés, pesticides, phosphore des lisiers et fumiers...). Les modes de production jouent donc un rôle important sur la qualité des sols, des nappes phréatiques, des cours d'eau et in fine de la baie de Seine.

La qualité de la ressource en eau constitue une problématique environnementale majeure à l'échelle régionale (classement de la région en zone vulnérable au titre de la Directive Nitrates; présence de captages prioritaires « grenelle » au titre des pesticides et des nitrates) et l'accroissement des pollutions diffuses constaté dans les eaux souterraines et superficielles pour les pesticides et les nitrates est notamment à relier aux profondes mutations de cette activité depuis la deuxième moitié du *xx*^e siècle (intensification des pratiques, agrandissement des exploitations, réorganisation des surfaces cultivées). Cette problématique est donc à considérer à l'échelle du bassin versant. Pour le bassin versant Seine-Normandie, l'agriculture est à l'origine de 90 % des rejets en nitrates, 83 % des rejets en MES et 36 % des rejets en phosphore au milieu hydrique (respectivement 147,773 et 2,9kt/an) et *in fine* à l'estuaire de la Seine [FIGURE 2; AESN & PRÉFECTURE D'ÎLE DE FRANCE, 2013]. Des phénomènes plus locaux sont également à prendre en compte, telle la présence de marnière et de bétouilles dans le Pays de Caux qui rendent la nappe souterraine vulnérable aux apports de sédiments lors d'épisodes pluvieux et d'érosion des sols [DRAAF-HN, 2013].



La pression agricole sur la qualité des eaux peut être approchée par le suivi de l'intensité d'utilisation des intrants azotés et des pesticides sur les cultures. Pour ces derniers, l'indice de fréquence de traitement permet de suivre le nombre de doses homologuées appliquées à l'hectare sur un cycle complet de récolte. En Haute-Normandie cet indice est globa-

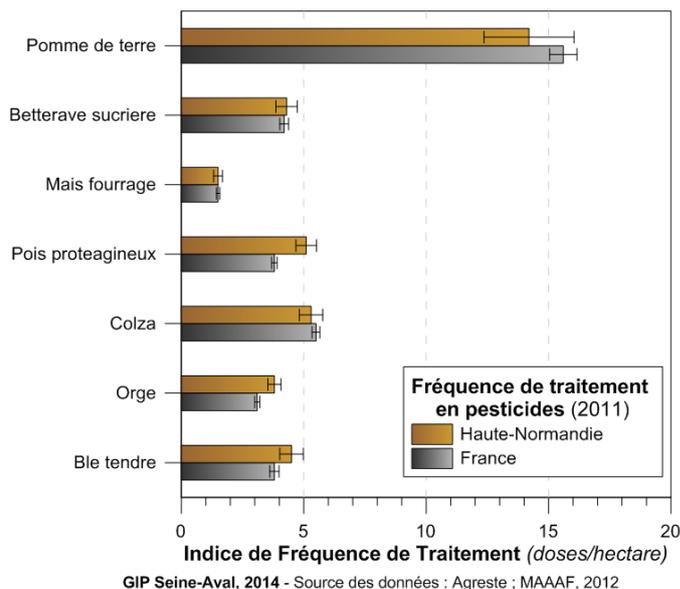


FIGURE 4 Indice de fréquence de traitement sur les cultures de Haute-Normandie.

lement supérieur à la moyenne nationale, notamment pour le blé tendre, l'orge (fongicide) et les pois protéagineux; et aucune évolution notable n'est notée entre 2006 et 2011. [FIGURE 4]. À l'échelle plus large du bassin versant et au-delà des cultures céréalières ou légumières, des cultures comme la vigne ou l'arboriculture sont également des sources de pesticides. Le suivi des pesticides dans les eaux souterraines et de surface permet également de relier l'état du milieu à la pression agricole. Les herbicides et leurs métabolites* sont les substances majoritairement détectées dans les eaux souterraines de Haute-Normandie (78 % des 64 substances actives détectées parmi les 366 recherchées), même si quelques substances fongicides et insecticides le sont également (respectivement 11 % et 8 %). Malgré leur interdiction d'utilisation en 2003, les triazines (atrazine et ses métabolites, simazine et ses métabolites) sont les substances les plus souvent retrouvées en raison de leur persistance dans les sols et les eaux [MAAAF, 2012]. Dans les eaux superficielles, la principale substance détectée est le glyphosate (et l'AMPA, son principal métabolite).

Différentes mesures sont mises en œuvre pour diminuer la pression agricole sur la ressource en eau, avec notamment la déclinaison locale du plan Ecophyto, dont l'un des objectifs est de réduire l'usage des pesticides, par l'agriculture et en zone non agricole. Des mesures agro-environnementales territorialisées sont également mises en place pour lutter contre l'érosion des sols, protéger les captages d'alimentation en eau potable, les zones humides et les sites naturels (Natura 2000).

C. L'ACTIVITÉ INDUSTRIELLE

Historiquement, l'activité industrielle s'est fortement développée à proximité de la Seine et l'implantation des industries s'est toujours faite en rapport avec le fleuve, que ce soit par *I*) l'utilisation de la force hydraulique des affluents pour l'industrie textile (très présente jusqu'au début du ^{xx}e siècle); *II*) la proximité des ports (apport du pétrole brut par des navires) et de la Seine (transport fluvial des hydrocarbures, eaux de refroidissement pour les procédés industriels) pour l'industrie pétrolière; *III*) la capacité de dilution de la Seine et d'évacuation par voie d'eau des contaminants pour les rejets aqueux ou; *IV*) la présence de vastes terrains plats dans certains méandres pour l'établissement d'unités de production de grande taille, telles les raffineries, les unités de production d'engrais ou de construction automobile [IPCHN, 2008].

Cette histoire industrielle de l'axe Seine a profondément marqué la qualité des eaux de l'estuaire, à travers des pratiques anciennes peu soucieuses de l'environnement (rejets de matières en suspension, de matières oxydables, de métaux, de HAP, de PCB, etc.) et une présence de polluants dans les sédiments encore d'actualité [ENCART N° 1]. L'activité industrielle est aujourd'hui toujours présente en bord de Seine et de nombreux établissements industriels rejettent leurs effluents aqueux dans le milieu, après un traitement plus ou moins poussé. Un inventaire des micropolluants présents dans ces rejets à la Seine a permis d'estimer la pression actuelle des divers secteurs d'activité sur l'estuaire et d'actualiser ces

connaissances [TABLEAU III; MEDDE & INERIS, 2014]. 32 établissements ont ainsi été identifiés comme ayant un rejet direct de contaminants dans l'estuaire de la Seine et 47 substances chimiques différentes ont été quantifiées. L'industrie de la chimie et l'industrie pétrolière sont les secteurs les plus représentés (respectivement 10 et 6 établissements) et rejettent le plus grand nombre de substances (respectivement 32 et 23 substances différentes identifiées). Les métaux (zinc, cuivre, nickel, chrome), les HAP (fluoranthène, naphthalène, anthracène, benzo (b) fluoranthène, benzo (g, h, i) pérylène), les nonylphénols, le chloroforme et le tributylphosphate sont les substances les plus souvent détectées, avec une présence dans les rejets d'au moins 15 établissements. En terme de flux, trois substances sont rejetées dans l'estuaire de la Seine à plus d'une tonne par an (le zinc: 4,4 t/an; le nickel: 2,3 t/an; le xylène: 1,5 t/an) et cinq substances à plus de 100 kg par an (le naphthalène: 634 kg/an; le benzène: 525 kg/an; le cuivre: 237 kg/an; le biphenyle: 166 kg/an; l'arsenic: 128 kg/an). À l'issue de cet inventaire, des arrêtés préfectoraux complémentaires ont été prescrits pour adapter la surveillance des rejets à leur composition et ainsi mieux documenter et gérer les pressions industrielles. En fonction du classement de la substance (prioritaire et/ou dangereuse), des évolutions des procédés industriels devront également être mises en œuvre pour sa réduction ou sa suppression.

Les établissements industriels sont également des sources de pollutions plus « classiques », avec notamment des rejets de matières oxydables, de matières en suspension, d'azote ou de phosphore. Afin de rendre compatible les rejets industriels avec les orientations du SDAGE (Disposition 1: « adapter les rejets issus des industries [...] au milieu récepteur »), la DREAL-HN a développé une démarche pour étudier l'adéquation des seuils réglementaires des rejets pour 20 paramètres avec l'objectif de qualité des masses d'eau au regard des critères de bon état (ou bon potentiel) fixés par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). À l'issue de cette étude, les arrêtés préfectoraux d'autorisation de rejet (valeurs limites d'émission) des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement soumises à autorisation ayant un rejet direct vers le milieu ont été revus pour les rendre compatibles avec le bon état du milieu récepteur.

TABEAU 3 Micropolluants rejetés dans l'estuaire de la Seine par les établissements industriels.

Secteurs d'activité	Nombre d'établissement avec un rejet				Nombre de substances mesurées (n/112)			
	Estuaire amont	Estuaire moyen	Estuaire aval	Bilan	Estuaire amont	Estuaire moyen	Estuaire aval	Bilan
Industrie de la chimie	5		5	10	25		21	32
Industrie pétrolière	2		4	6	20		19	23
Industrie du traitement et du stockage des déchets	1		3	4	11		20	22
Industrie papetière	3			3	8			8
Industrie du caoutchouc	1		1	2	8		6	12
Industrie de la métallurgie	1		1	2	8		7	11
Industrie du travail mécanique des métaux		1	1	2		6	6	9
Centrales thermiques de production d'électricité			1	1			5	5
Industrie agro-alimentaire	1			1	4			4
Industrie du traitements, revêtement de surface		1		1		11		11
TOTAL	14	2	16	32	33	11	37	47

GIP Seine-Aval, 2014 — Source des données: Action 3RSDE [MEDDE & INERIS, 2014]

ENCART N° 1

L'exemple historique des phosphogypses

Implantée dans la région rouennaise dans la première moitié du xx^e siècle, l'industrie des phosphates a longtemps produit l'acide phosphorique nécessaire à la fabrication des engrais phosphatés. Le procédé industriel mis en œuvre générait un résidu de sulfate de calcium, appelé phosphogypse, qui était directement rejeté en Seine (jusqu'à 1 500 t/j). L'ion sulfate a ainsi été l'un des principaux polluants de l'eau de Seine en aval de Rouen, au point que les industriels se détournaient de l'eau de la Seine, trop coûteuse à déminéraliser. Les concentrations atteintes (plus de 150 mg/l en

étiage à l'aval de Rouen dans les années 1970 [FIGURE A]) pouvaient également présenter un

risque pour l'intégrité des ouvrages en béton baignés par la Seine. Après 1974, l'interdiction des rejets de phosphogypse en Seine et l'obligation de leur transport en barge pour un déversement en baie de Seine ont considérablement diminué les concentrations atteintes à l'aval de Rouen. Cependant, la surverse des barges chargées d'évacuer le phosphogypse en mer (entre 100 000 et 250 000 t/mois déversées en mer) provoquait toujours un accroissement sensible du taux de sulfate à l'aval de Rouen, même si la technique de chargement s'améliorait au cours des années. À partir de 1984, les phosphogypses sont progressivement stockés à terre et l'accroissement de la concentration de sulfate entre Poses et La Bouille s'atténue dès lors considérablement. Depuis 1987, la totalité du gypse produit à Rouen est stockée à terre, supprimant ainsi les rejets par surverse et permettant à la Seine de retrouver une concentration comparable à celle naturelle (30 – 40 mg/l). Cette activité a été définitivement stoppée en 2004 [CLP, 1991; DILLIES, 2010].

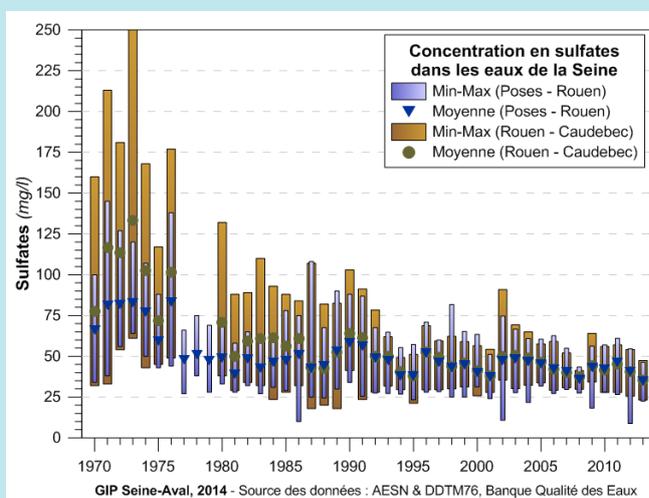


FIGURE A Évolution des concentrations en sulfate dans les eaux de la Seine entre Poses et Rouen, et entre Rouen et Caudebec-en-Caux.

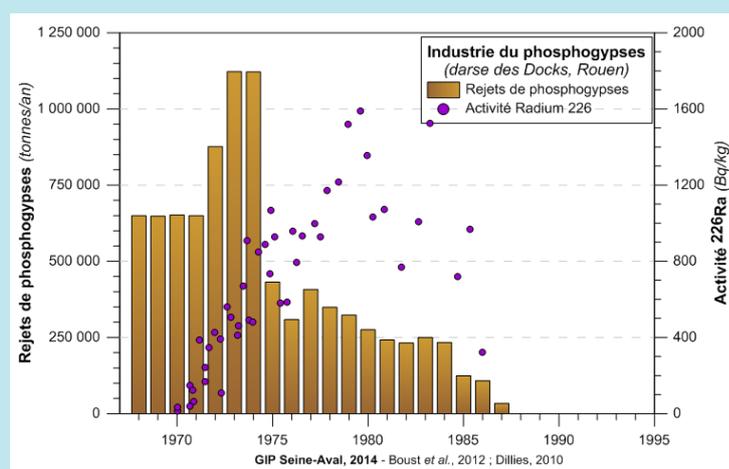


FIGURE B Rejets de phosphogypses en Seine et activité en ^{226}Ra dans les sédiments de la darse des Docks.

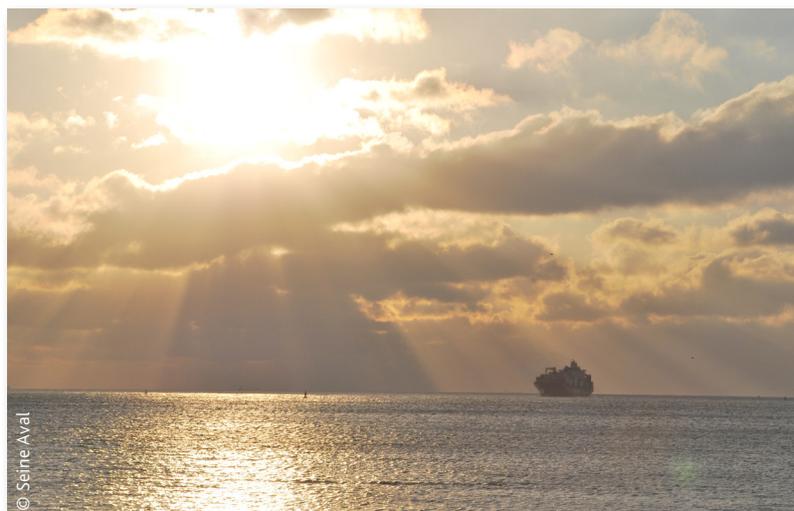
de ces contaminants suivent les mêmes profils que les rejets de phosphogypses et l'arrêt progressif de cette pratique a permis de retrouver des niveaux comparables à ceux considérés comme naturels [FIGURE B; DILLIES, 2010; BOUST ET AL., 2012].

Outre les sulfates, le phosphogypse contenait de nombreux métaux et éléments radioactifs provenant des impuretés naturelles des minerais phosphatés (cadmium, titane, strontium, baryum, zirconium, etc.). Les tonnages déversés en Seine étaient tels (jusqu'à 1 million de tonnes par an au début des années 1970) que cette activité a fortement imprégné les compartiments estuariens. Une analyse rétrospective de la contamination métallique dans une carotte sédimentaire prélevée dans un bassin portuaire proche de Rouen (Darse des docks) montre l'impact de ces rejets massifs dans les années 1970 : enrichissement de 350x en cadmium et en bismuth ; des activités radioactives maximales de 1 500 Bq/kg en radium 226, par exemple. Les évolutions

D. LE TRANSPORT MARITIME

Les activités de transport maritime et l'exploitation portuaire exercent diverses pressions sur le milieu, notamment sur la qualité des eaux. Cette dernière peut ainsi être altérée par *I*) l'introduction de substances dangereuses dans le milieu (diffusion des composés organostanniques présents dans les revêtements anti-salissures des coques des navires, déversement des effluents de carénage, rejets des eaux usées par les installations portuaires, pollutions accidentelles et rejets illicites, perte de matière lors des chargements/déchargements, rejets de macrodéchets, etc.) ou ; *II*) les activités de dragage/clapage* menées lors de travaux d'aménagement ou d'entretien des chenaux de navigation et des bassins portuaires (remise en suspension de sédiments et biodisponibilité des contaminants associés) [CUMUNEL & GUINGAND, 2012]. L'estuaire de la Seine est particulièrement concerné par ses pressions, du fait d'un trafic maritime intense assuré par les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre (près de 100 millions de tonnes de trafic annuel cumulé), d'importants volumes de sédiments dragués pour l'entretien des chenaux de navigation et des bassins portuaires (entre 6 et 7 millions de m³ par an) et lors de travaux d'aménagement comme Port 2000. Les sédiments dragués sont clapés sur deux sites d'immersion principaux (Kannik et Octeville) et deux sites secondaires (zone temporaire amont et zone intermédiaire) [FIGURE 5].

Afin de mesurer l'impact de l'activité de dragage sur la qualité des eaux, des sédiments et du biote, divers programmes de suivi sont menés par les Grands Ports Maritimes, selon



les prescriptions définies par des arrêtés préfectoraux. Les principaux contaminants chimiques (métaux lourds, PCB, HAP, TBT) et la qualité bactériologique (flore indicatrices, *Escherichia coli*, Salmonelles) sont notamment mesurés sur les sédiments dragués, ainsi que sur les sédiments clapés et les eaux des sites d'immersion. Pour la qualité chimique des sédiments, les mesures sont comparées aux seuils réglementaires en vigueur pour les sédiments marins et estuariens destinés à la ré-immersion (pour les HAP, les seuils sont entrés en vigueur en 2013; pour les PCB, ils ont été abaissés en 2014). Les mesures sont majoritairement inférieures au niveau GEODE N1, indiquant un impact potentiel jugé neutre ou négligeable (valeurs mesurées comparables aux bruits de fond environnementaux). Des dépassements ponctuels de ces seuils sont cependant observés, notamment pour les sédiments dragués dans le port du Havre (métaux,

PCB) et les canaux. Sur les sites d'immersion, les dépassements des seuils réglementaires sont très rares et les évolutions des teneurs en contaminants chimiques ne montrent pas de dégradation dans le temps [TABLEAU IV; GPMR, 2009; GPMR, 2013; GPMH, 2014]. La pratique du dragage/clapage pour l'entretien des chenaux de navigation et d'accès portuaires est ainsi une problématique plus liée à la remobilisation d'importants volumes de sédiments qu'à leur qualité chimique. Pour les travaux d'aménagement nécessitant le dragage de sédiments anciens potentiellement pollués, une attention particulière doit être portée à leur qualité chimique, afin d'adopter un mode gestion prévenant toute remise en suspension de contaminants.

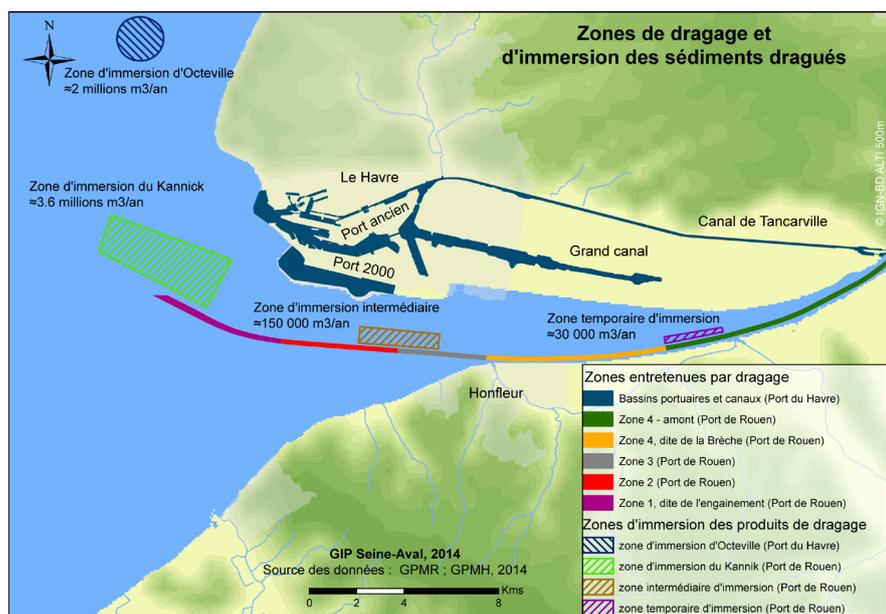


FIGURE 5 Zones de dragage et sites d'immersion des sédiments dragués.

TABLEAU 4 Dépassement des seuils GEODE N1 (N2) dans les sédiments dragués par le GPMH et le GPMR et sur les sites d'immersion (nombre de dépassements et contaminants concernés).

		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*	2013*
Zones de dragage	Port ancien (Le Havre) 22 stations	17 (+1) Hg, Cu, Cd, Zn	19 Hg, Cu	15 (+1) Hg, Cu, TBT	20 Hg, Cu, Cd, Ni, PCB	23 Hg, Cu, Cd, Cr, Zn	18 Hg, Cu	18 Hg, Cd, Cu, PCB	16 Hg, Cd, Cu, PCB	15 Cd, Hg	14 Cu, Hg, HAP
	Port 2000 (Le Havre) 8 stations	/	4 Hg	5 Hg	6 Hg	7 Hg, PCB	5 Hg	2 Hg	2 Hg	9 Hg, Cd, HAP	3 Hg, HAP
	Port d'Antifer 4 stations	0	0	/	/	0	/	/	0	/	/
	Grand canal 4 stations	3 Hg, Cd	5 Hg, Cd	/	/	1 Hg	/	/	5 Cu, Hg, Ni, TBT	/	/
	Canal de Tancarville 4 stations	4 Hg	4 Hg, Cu, Ni	/	/	6 Hg, Ni	/	/	4 Hg, Ni	10 Hg, HAP	15 Hg, HAP
	Engainement 3 stations	0	0	0	1 Hg	0	0	0	0	0	0
	Brèche 3 stations	0	8 Cd, Cr, Cu, Hg	0	0	0	0	0	0	0	0
	Quais en Seine (Honfleur)	/	/	0	/	/	0	/	/	1 HAP	/
	Fatouville	/	/	0	/	/	0	/	/	0	/
Radicatel	/	/	1 Hg	/	/	1 Hg	/	/	/	/	
Sites d'immersion	Dépôt d'Octeville 10 stations	/	/	/	/	/	1 TBT	0	0	0	7 Hg, HAP
	Zone d'influence Nord 17 stations	/	/	/	/	/	0	0	2 Hg, Pb	0	0
	Zone d'influence Sud 5 stations	/	/	/	/	/	0	0	0	0	0
	Kannik 3 stations	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* Les seuils GEODE pour les HAP ne sont considérés que pour les années 2012-2013 (entrée en vigueur le 08/02/2013); les seuils PCB ont été abaissés en 2014
GIP Seine-Aval, 2014 — Source des données: GPMR, 2009; GPMR, 2013; GPMH, 2014

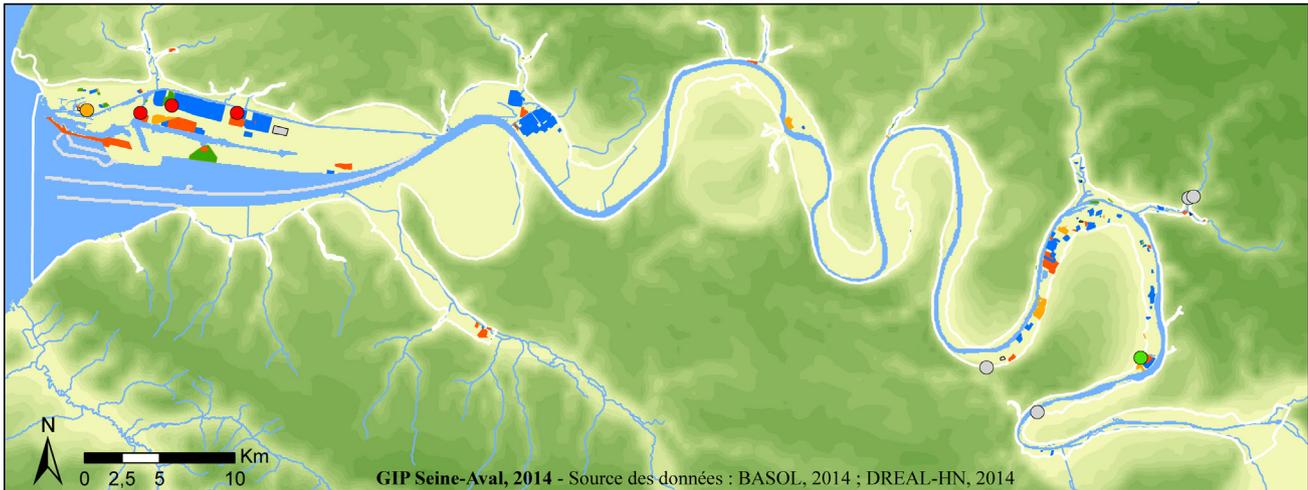
E. LES SOURCES SECONDAIRES

Les sources secondaires de pollution correspondent à une remobilisation de contaminants déjà présents dans l'environnement, que ce soit par ruissellement sur des sites et sols pollués, ou par une remise en suspension – lors de crues ou par dragage – des sédiments contaminés déjà présents dans les cours d'eau. La présence de ces « stocks » de contaminants dans l'environnement est l'une des spécificités de l'estuaire de la Seine. Elle est à relier au fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire, à son passé industriel et aux apports importants du bassin versant de la Seine.

La connaissance des sites et sols pollués en bord de Seine revêt ainsi un enjeu majeur, comme source potentielle de contaminants (récents ou anciens) par transfert au réseau hydrographique. 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 d'une 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 139 sites, dont 34 sites avec une pollution avérée qui a entraîné des actions toujours en cours [FIGURE 6; MEDDE, 2014].

En complément de cet inventaire qui se limite aux zones d'activité, la mobilisation des données de suivi de la qualité des cours d'eau a permis d'identifier les secteurs présentant les niveaux de contamination les plus forts. Ils peuvent être directement liés à des rejets (locaux ou non, passés ou actuels), mais aussi s'expliquer par le fonctionnement hydrosédimentaire du cours d'eau (zones d'accumulation de sédiments) ou par le transfert de contaminants le long de la chaîne trophique* (phénomène de bioaccumulation*). En cas de remobilisation (pour les sédiments) ou de consommation



GIP Seine-Aval, 2014 - Source des données : BASOL, 2014 ; DREAL-HN, 2014

Situation technique des sites et sols pollués dans la plaine alluviale estuarienne (inventaire BASOL)

- 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. **10 sites**
- Ces sites ont fait l'objet d'évaluation et/ou de travaux. A leur suite, 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. **19 sites**
- Ces sites ont fait l'objet d'évaluation et/ou de travaux. A leur suite, une surveillance et/ou des restriction d'usages ont été imposées ou sont en cours. **62 sites**
- 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. **14 sites**
- La pollution de ces sites est avérée et a entraîné l'engagement d'actions de la part de ses responsables. **34 sites**

FIGURE 6 Sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

(pour les poissons et les mollusques), des risques environnementaux et sanitaires pour les espèces prédatrices (dont l'homme) peuvent se poser. Pour l'estuaire de la Seine et ses affluents, les zones les plus contaminées ont été recensées pour les principales familles de contaminants (métaux, HAP, PCB, PBDE, phtalates, organoétains, pesticides organochlorés). La multi-contamination de la Seine a été confirmée, avec une présence de contaminants à des teneurs parfois élevées, notamment pour les métaux, les HAP, les PCB et les phtalates. La présence de PBDE est plus modérée.

Certains affluents comme le Cailly, le Robec, le Commerce ou la Lézarde présentent également des secteurs avec des multi-contaminations élevées [FIGURE 7; FISSON, 2012B].

Qu'ils soient dans le lit mineur de la Seine ou sur des terrains en arrière des berges, une caractérisation plus fine de ces sites est aujourd'hui nécessaire. Elle nécessitera une identification des contaminants concernés, de leur toxicité*, des volumes mis en jeu et de leur biodisponibilité*, afin de mettre en place une gestion adaptée pour éviter leur remobilisation dans l'environnement.



FIGURE 7 Sédiments multi-contaminés identifiés dans l'estuaire de la Seine et ses affluents.

II L'ÉTAT DU MILIEU : DE NETTES AMÉLIORATIONS... MAIS DES PRÉOCCUPATIONS ENCORE FORTES

A. L'OXYGÉNATION DES EAUX



L'oxygène est un élément fondamental pour juger de la qualité des eaux douces et marines, car indispensable au développement de toute forme de vie. Des faibles concentrations en oxygène provoquent des dysfonctionnements écologiques et mettent en péril la survie d'organismes aquatiques (asphyxie) ou le déroulement de leur cycle de vie (barrière infranchissable entre l'océan et les eaux continentales pour les poissons migrateurs tels que la truite de mer ou l'anguille). Particulièrement importants lors de situations de faible débit (<300 m³/s) et de forte température de l'eau (>20°C) du fait d'une moindre solubilité de l'oxygène, les déficits en oxygène sont renforcés par des processus biologiques de consommation d'oxygène (dégradation de la matière organique, dénitrification).

En 1955, l'été fut très chaud et le débit de la Seine très bas. Une hécatombe de poissons en découla et fut le déclencheur des premières mesures de la qualité des eaux de la Seine. L'oxygène a ainsi été le premier paramètre à avoir été mesuré en routine [CLP, 1991]. Dans la partie fluviale de l'estuaire de la Seine, un déficit en oxygène chronique apparaît en période estivale et automnale dès les premières mesures au milieu des années 1950 [FIGURE 8; AESN & DDTM76, 2012]. Les mesures de maîtrise de la pollution prises suite à la loi sur l'eau de 1964 (réduction des rejets, construction de stations d'épuration) puis à l'application de la Directive Eaux Résiduaires Urbaines de 1991 apportent une amélioration

visible de l'oxygénation des eaux de l'estuaire de la Seine, avec une moindre amplitude spatiale et une durée plus faible des hypoxies à partir des années 1970. Les mises en service I) de la STEP Emeraude en 1997 pour traiter les effluents de l'agglomération rouennaise, puis II) d'une unité de nitrification-dénitrification sur la STEP « Seine-Aval » en 2007, puis 2012 pour traiter de manière spécifique les pollutions azotées et réduire la charge ammoniacale apportée par l'agglomération parisienne ont permis une très nette amélioration de l'oxygénation pour atteindre un niveau satisfaisant après 2007. L'impact positif de la forte réduction de la charge ammoniacale apportée par l'agglomération parisienne s'explique par la limitation du phénomène de nitrification à l'aval de Rouen. Avant 2007, l'ammonium présent dans les eaux était oxydé en nitrites puis en nitrates par des bactéries nitrifiantes grandes consommatrices d'oxygène, dont le temps de développement impliquait un phénomène principalement actif à l'aval de Rouen.

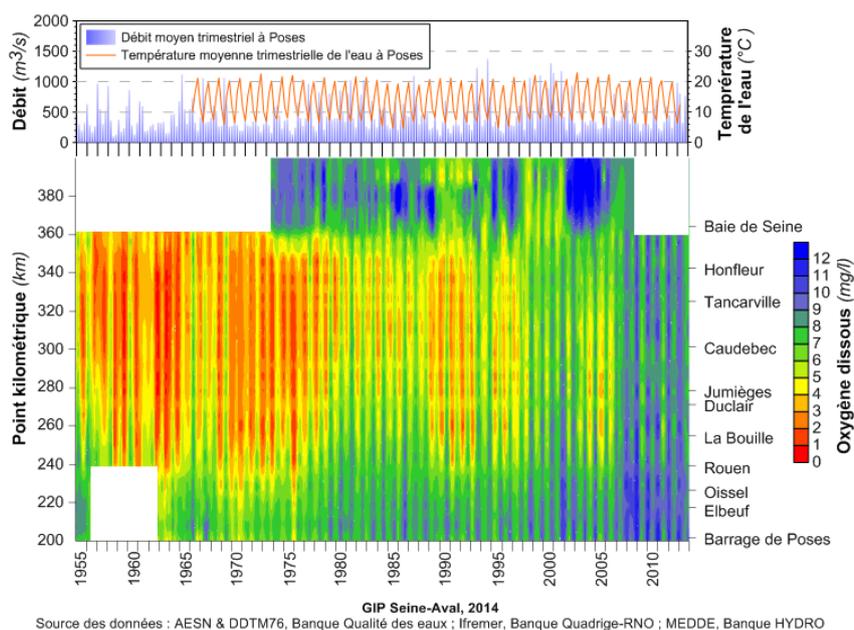


FIGURE 8 Concentration en oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine.

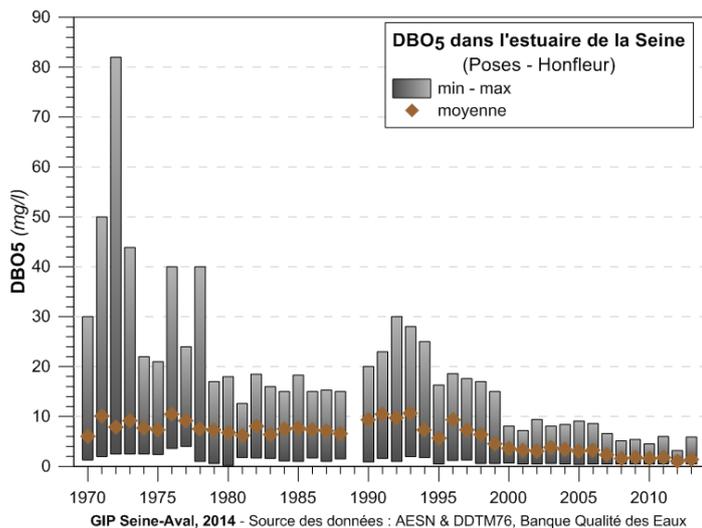


FIGURE 9 Évolution de la DBO₅ dans la partie fluviale de l'estuaire de la Seine.

B. LES APPORTS EN NUTRIMENTS

Naturellement faiblement présents dans les écosystèmes aquatiques, les sels nutritifs (azote, phosphore, silice) sont des éléments indispensables à la croissance des organismes. Les apports anthropiques* en azote et en phosphore résultent principalement des activités agricoles (azote sous forme de nitrates résultants du lessivage des sols engraisés, azote ammoniacal dans les régions d'élevage), des rejets industriels et des rejets urbains. La silice, quant à elle, provient essentiellement de l'altération des roches et n'est que faiblement influencée par l'activité humaine.

L'équilibre trophique de la baie de Seine est fortement lié à la maîtrise des apports en nutriments de la Seine. Le bouchon vaseux présent en estuaire de Seine joue également un rôle primordial, par la régulation des apports en sels nutritifs à la mer. En fonction de l'hydrologie et de leur affinité pour les particules, les différents nutriments y sont plus ou moins stockés et dégradés : jusqu'à 40 % du flux d'azote en situation hydrologique sèche, contre 12 % en situation humide. Les flux de phosphore sont quant à eux très faiblement réduits, quelle que soit l'hydrologie (rétention inférieure à 10 %) [BILLEN & GARNIER, 2006].

Les flux en nitrates (NO₃) à la Manche sont majoritairement liés à l'activité agricole (part estimée entre 54 % et 77 % à l'échelle du bassin Seine-Normandie) avec un flux total en azote compris entre 100 et 250kt/an. Cet apport en azote est très sensible à la pluviométrie et 75 % du flux de nitrates est expliqué par les variations de débit des cours d'eau. Depuis la mise en place en 2011 d'une unité complémentaire de dénitrification à la STEP Seine-Aval, le rejet d'environ 20kt/an d'azote à la Seine est évité. [MARTIN ET AL., 2012; DUBOIS ET AL., 2012]. Dans l'estuaire de la

par exemple), le taux d'oxygène peut chuter et présenter un risque d'asphyxie pour les poissons. Pour pallier à cela et lorsque le taux d'oxygène atteint un niveau problématique, l'oxygène nécessaire à la survie des poissons pourrait être diffusé dans le lit du fleuve pendant un temps limité, à l'image des « îlots de survie » mis en place sur cinq zones sensibles de la Seine en région parisienne [SIAAP, 2014].

L'évolution des mesures de DBO₅ traduit cette amélioration, ce paramètre permettant d'évaluer la quantité de matières biodégradables carbonées présentes dans l'eau par une mesure de l'oxygène consommé par des bactéries sur 5 jours. Ces mesures montrent une diminution très nette des valeurs maximales dans l'estuaire fluvial (Poses – Vieux-Port) jusqu'en 1980, conséquence de l'amélioration du traitement des effluents industriels. Une nouvelle baisse est observée à partir de 1997, date de mise en service de la station de traitement des effluents urbains de la région rouennaise (Emeraude) [FIGURE 9].

Seine, les concentrations moyennes en nitrates présentant une tendance à la hausse depuis le début des suivis, avec une concentration moyenne de 25 mg/l sur les dix dernières années et des valeurs pouvant dépasser les 35 mg/l [FIGURE 10]. Cette hausse est également observée dans les autres cours d'eau du bassin versant de l'estuaire, ainsi que dans les eaux souterraines où un apport croissant provenant de l'Eure-et-Loir est visible. Ceci révèle la présence d'un réservoir de contamination en nitrates dans l'aquifère de la

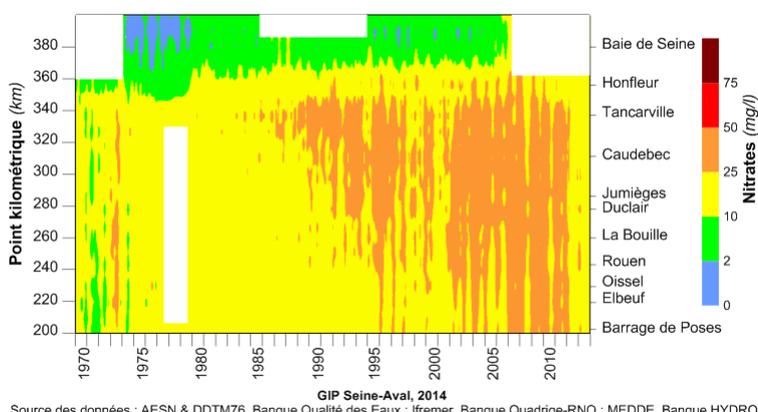


FIGURE 10 Concentration en nitrate dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.

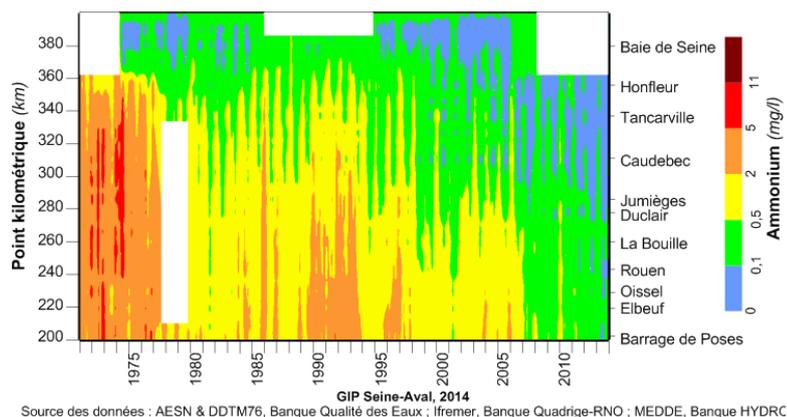


FIGURE 11 Concentration en ammonium dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.

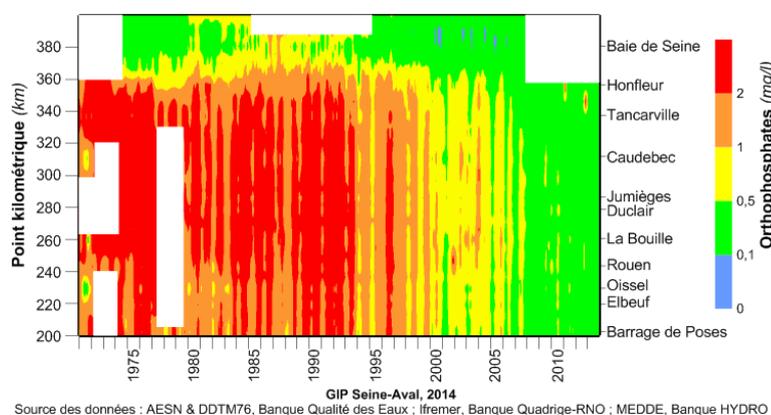


FIGURE 12 Concentration en orthophosphates dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.

Craie, alimenté par les apports agricoles. Compte tenu de la tendance à l'extension des zones arables observée depuis les dernières décennies et l'inertie au niveau des aquifères qui a été estimée supérieure à 30 ans (percolation très lente des eaux interstitielles dans la craie), cette tendance à la hausse devrait se poursuivre durant plusieurs années, et ce malgré les efforts du monde agricole allant vers une moindre utilisation d'intrants azotés [DUPONT ET AL., 2009]. Des mesures agro-environnementales comme le fractionnement des apports en azote, la mesure des reliquats (au printemps et surtout en automne) et une couverture hivernale complète des sols permettraient de réduire les apports en azote aux eaux souterraines, mais seul un scénario de modification drastique des pratiques agricoles vers une agriculture plus sobre en intrants azotés semble pouvoir apporter un abattement significatif des flux d'azote [GARNIER ET AL., 2012].

Les flux en ammonium (NH_4) à la Manche sont essentiellement liés aux apports de la Seine, la part des autres cours d'eau et les apports diffus ne représentant que 10 à 20 % du flux total [DUBOIS ET AL., 2012]. Plutôt d'origine urbaine, ces

apports ont largement diminué depuis le début des suivis et les concentrations dans l'estuaire de la Seine sont en constante baisse depuis une quarantaine d'années (de plusieurs mg/l de NH_4 dans les années 1970 à moins de 1 mg/l depuis 2007) [FIGURE 11]. Cette baisse est liée à l'amélioration du dispositif de traitement des eaux des agglomérations parisiennes et rouennaises (traitement de l'azote). En zone rurale, les actions du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole ont pu également contribuer à la baisse des apports fluviaux liés à l'ammonium, par une meilleure gestion des rejets en zone d'élevage (stockage et épandage des lisiers et fumiers).

Pour le phosphore, l'apport à la Manche de chaque cours d'eau est proportionnel aux surfaces de bassin versant drainé [DUBOIS ET AL., 2012]. La réduction des flux à la mer est plus récente, mais tout aussi nette que pour l'ammonium. Cette baisse des apports est visible dans les concentrations des eaux de la Seine, globalement inférieures à 0,5 mg/l depuis 2008 pour les orthophosphates (PO_4) [FIGURE 12]. Cette amélioration est à relier à une meilleure maîtrise des rejets issus des activités anthropiques (interdiction d'utilisation des phosphates dans les lessives ; mise en place d'unités de traitement du phosphore dans les STEP ; réduction des rejets industriels). Par ailleurs, la réduction d'utilisation d'engrais phosphatés initiée depuis les années 1980 sur la majorité des surfaces drainées de cette zone et la meilleure gestion des lisiers et fumiers pourrait également expliquer dans une moindre mesure cette baisse.



C. L'EUTROPHISATION

L'eutrophisation est une forme de pollution du milieu aquatique liée à un excès ou un déséquilibre des apports en nutriments (phosphore, azote). Les conséquences potentielles sont nombreuses : *i*) augmentation de la biomasse algale et prolifération d'algues planctoniques (blooms); *ii*) efflorescences d'espèces algales indésirables (production de phycotoxines, accumulation de mucus); *iii*) modification des caractéristiques physico-chimiques de l'eau (baisse du pH, réduction de la teneur en oxygène) et altération de sa qualité engendrant des effets néfastes sur les écosystèmes (asphyxie de la faune aquatique par exemple). La température, l'ensoleillement, un faible renouvellement et une stratification des eaux peuvent amplifier ce phénomène.

La réduction des flux de nutriments apportés par la Seine (essentiellement PO_4 et NH_4) s'accompagne d'une baisse des taux moyens et des maxima de chlorophylle a observés dans l'estuaire fluvial de la Seine, témoin de sa moindre eutrophisation que dans le passé [FIGURE 13]. De même, aucune manifestation d'eutrophisation (concentration excessive en chlorophylle a ou en phéopigments, sursaturation en oxygène) n'a été observée en Seine ces dernières années [AESN & DDTM76, 2012].

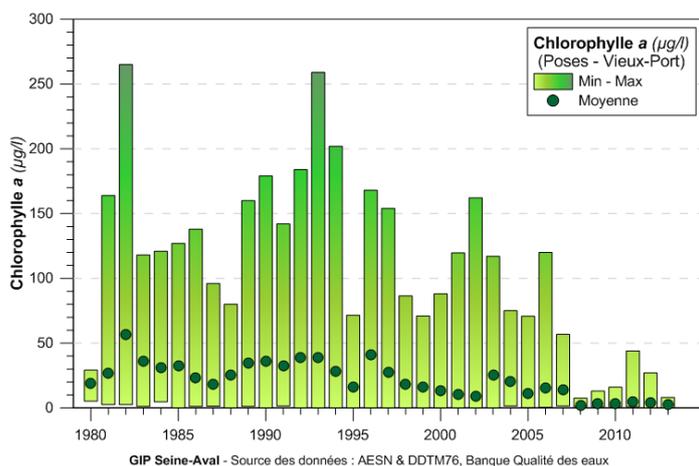


FIGURE 13 Évolution de la concentration chlorophylle a dans l'estuaire fluvial de la Seine.

En baie de Seine, des manifestations d'une eutrophisation côtière sont régulièrement observées : *i*) fort développement de la biomasse phytoplanctonique (blooms); *ii*) efflorescences algales nuisibles. Concernant le développement phytoplanctonique, les concentrations mesurées dans les eaux peuvent être très élevées lors des épisodes de blooms : plusieurs centaines de milliers de cellules par litre pour les dinoflagellés et plusieurs millions de cellules par litre pour les diatomées. Dans la partie orientale de la baie de Seine, plusieurs épisodes de blooms sont ainsi observés tous les ans, généralement entre juin et septembre et majoritairement liés à des diatomées [FIGURE 14; IFREMER, 2014B].

Des efflorescences algales nuisibles sont également observées en baie de Seine. Elles sont le fait du développement de quelques espèces phytoplanctoniques qui émettent des phycotoxines qui s'accumulent dans les coquillages et qui peuvent être toxiques pour les consommateurs. C'est le cas

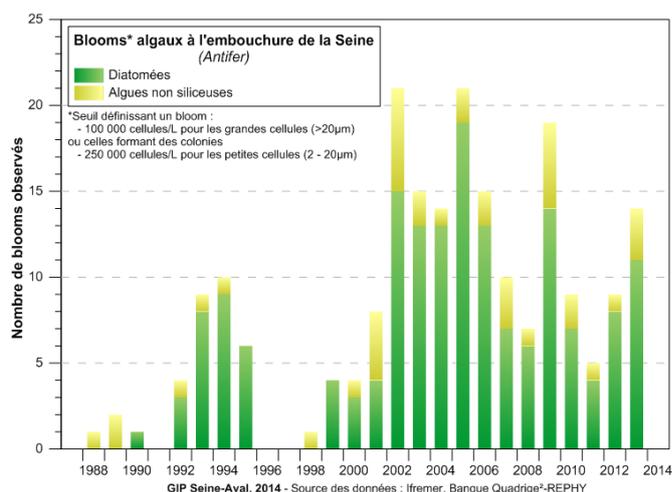


FIGURE 14 Blooms phytoplanctoniques en baie de Seine orientale.

de *Dinophysis* (dinoflagellé) qui produit des toxines diarrhéiques de type DSP (Diarrhetic Shellfish Poisoning). Cette espèce, observée en été et en automne en baie de Seine, a la particularité de ne jamais proliférer à de fortes concentrations et d'être susceptible de contaminer les coquillages même quand elle est observée à très faible concentration. Pendant les périodes à risque, les toxines sont donc recherchées dans les coquillages et les niveaux mesurés donnent régulièrement lieu à des alertes sanitaires et des interdictions temporaires de pêche à pied. Certaines espèces de diatomées du genre *Pseudo-nitzschia* émettent quant à elles des toxines amnésiantes de type ASP (Amnesic Shellfish Poisoning) qui pourront être présentes dans les coquillages en cas de fort développement de ces espèces toxiques. Plusieurs arrêtés préfectoraux d'interdiction de pêche de la coquille St Jacques ont été pris en baie de Seine ces dernières années (2004, 2011, 2012) du fait d'une trop forte concentration de ces toxines. Ces efflorescences algales nuisibles sont à relier à des paramètres environnementaux (température et salinité de l'eau, stratification des masses d'eau, ensoleillement, vent) et à des facteurs nutritionnels (apports excessifs en sels nutritifs, déséquilibres entre les apports en azote, phosphore et silice), même si leur origine et leur déterminisme précis ne sont pas clairement établis [IFREMER, 2014B]. Il sera ainsi intéressant de suivre les conséquences des progrès du traitement de l'azote de la station d'épuration « Seine-Aval » sur les blooms observés en baie de Seine.

La réponse du phytoplancton à différents scénarios d'évolution des pressions (et donc des flux de nutriments) a été testée par modélisation [ENCART N°2]. Le scénario réglementaire (poursuite de la mise aux normes des stations d'épuration permettant un abattement significatif du flux de phosphore à Poses) montre un effet très significatif sur les blooms de dinoflagellées (3 à 5 fois moins), mais une réduction limitée pour les diatomées. En ajoutant à ce scénario une réorientation des pratiques agricoles considérant des mesures agro-environnementales (hypothèse de passage à des pratiques d'agriculture biologique sur tout le bassin de la Seine permettant un abattement supérieur à deux du flux d'azote à Poses), la réduction des blooms de dinoflagellées est encore plus importante (de 20 à 40 fois) et la diminution de la croissance des diatomées reste limitée (10 à 15 %). Pour les dinoflagellées comme *Dynophysis*, les effets de la chute des apports en azote sont plus marqués que pour ceux en phosphore.

L'exploration de ces scénarios montre *I)* que même en cas d'apports phosphorés et azotés réduits, la baie de Seine reste une zone naturellement productive; *II)* que seul un scénario de réorientation des pratiques agricole à l'échelle du bassin versant de la Seine est à même de réduire les blooms de *Dynophysis* en baie de Seine [FIGURE 15; GARNIER ET AL., 2012].

D. LA CONTAMINATION CHIMIQUE

1. La contamination métallique

Les métaux sont des composants naturels de l'écorce terrestre et rejoignent les compartiments aquatiques et terrestres lors d'épisodes de volcanisme ou d'incendies de forêt. Cette présence naturelle est appelée « fond géochimique » ou « bruit de fond* » et peut parfois expliquer des concentrations élevées dans les sédiments ou les eaux souterraines en l'absence de tout apport anthropique.

Utilisés par l'homme depuis l'antiquité, d'abord pour sa survie, puis son confort et ses loisirs, les métaux comptent de nombreuses et diverses utilisations (alliages, batteries, pigments, pesticides, médicaments, photographie...) responsables de leur large dissémination dans l'environnement et de l'augmentation des concentrations naturelles. Bien que certains métaux soient indispensables au métabolisme des êtres vivants (ex. : arsenic, chrome, cuivre, fer, nickel, zinc), ils deviennent toxiques au-delà d'une certaine concentration. D'autres métaux, tels que le cadmium ou le plomb, ne sont pas nécessaires à la vie et sont toxiques.

La biodisponibilité des métaux en milieu aquatique est limitée du fait de leur forte capacité d'absorption (sédiments, matières organiques) et de complexation, bien qu'elle soit très variable suivant les conditions physico-chimiques du milieu (par exemple, le cadmium passe de la phase particulaire à la phase dissoute lorsque la salinité augmente). La toxicité peut également varier avec la spéciation du métal (par exemple le méthyl-mercure est beaucoup plus toxique que le mercure sous forme minérale; c'est l'inverse pour l'arsenic qui est plus toxique sous sa forme minérale que sa forme organique). L'accumulation de métaux dans les sédiments pose par ailleurs le problème de leur remobilisation et de la persistance éventuelle de leurs nuisances bien au-delà d'un arrêt des rejets.

Les importantes réductions des rejets industriels (modifications de pratiques, amélioration du traitement des effluents...) et la meilleure maîtrise des rejets urbains ont permis une nette amélioration de la qualité des eaux de la Seine du point de vue de la contamination métallique

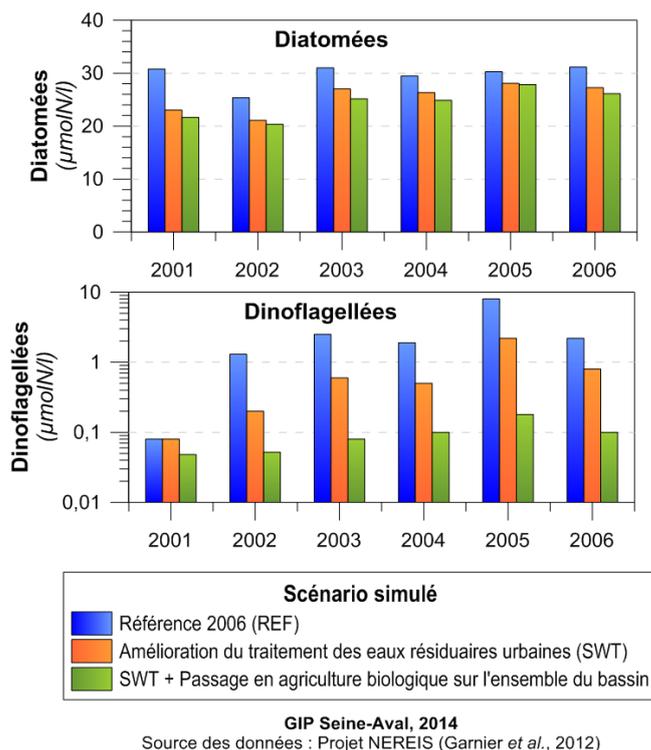
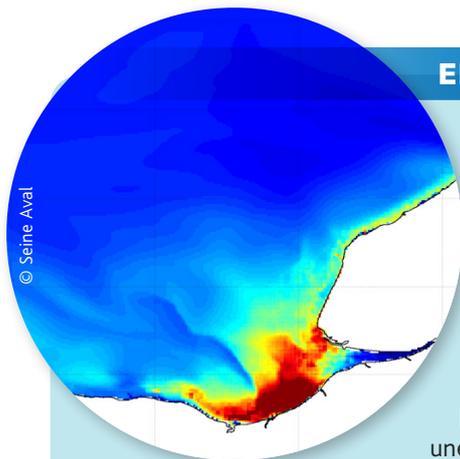


FIGURE 15 Maxima annuels en diatomées et en dinoflagellés en baie de Seine – application de différents scénarios.

ENCART N° 2

Mise en place d'une chaîne de modélisation pour simuler le rôle des flux de nutriments sur l'eutrophisation en baie de Seine



Le projet NEREIS (2008-2012) visait à reproduire les variations spatio-temporelles du transport des nutriments dans le bassin versant de la Seine et le développement algal dans la baie de Seine [GARNIER ET AL., 2012]. Pour cela, il s'est appuyé sur une chaîne de modélisation qui englobe deux modèles: *I*) l'un décrivant les processus de transfert des éléments nutritifs (N, P, Si) dans le réseau hydrographique continental (Seneque/Riverstrahler [THIEU ET AL., 2009]); *II*) l'autre mobilisant un modèle hydrodynamique de la Manche (MARS-3D, [LAZURE & DUMAS, 2008] couplé à un modèle écologique [CUGIER ET AL., 2005] pour reproduire les variations spatio-temporelles du transport des nutriments et le développement phytoplanc-tonique dans le milieu marin. Cette chaîne de modélisation couvre d'amont en aval le continuum aquatique depuis le réseau hydrographique de la Seine, sa zone estuarienne et la baie de Seine du Cotentin à la baie de Somme [FIGURE C].

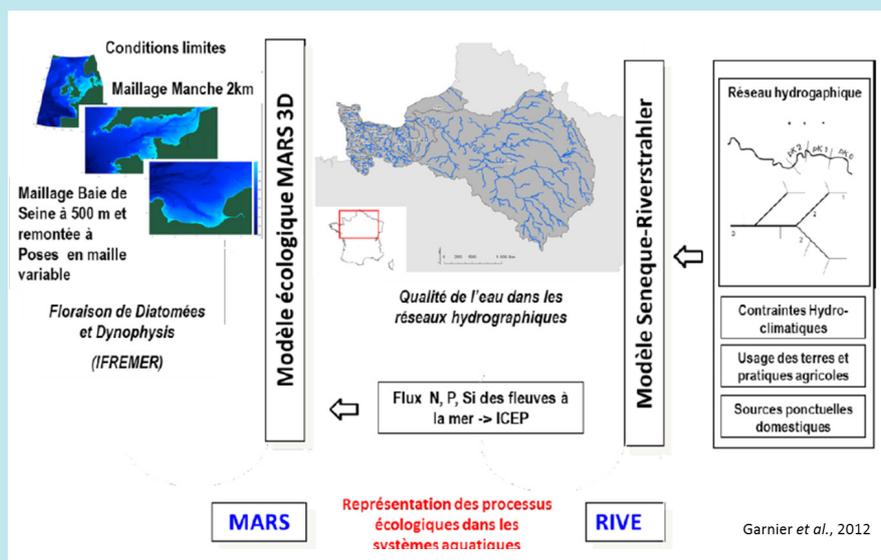


FIGURE C Domaine de développement et d'application des modèles.

Les modèles, couplés, ont été validés aux exutoires des rivières et à la zone côtière. À Poses, les débits, les concentrations en nitrate, phosphore total et silice, calculés par Seneque/Riverstrahler de 2000 à 2007 montrent un bon accord avec les observations. De même, une bonne adéquation est obtenue à la baie de Seine, entre les simulations des nutriments et de la chlorophylle a et les mesures sur trois stations. En outre, la concentration maximale simulée pour les dinoflagellés au cours des années correspond avec les événements toxiques de *Dynophysis*.

Cette chaîne de modélisation a été mobilisée pour évaluer les leviers pouvant modifier les flux de nutriments et, *in fine*, réduire les blooms phytoplanctoniques en baie de Seine. Pour cela, trois scénarios ont été construits et simulés: *1*) un scénario de référence actuel; *2*) un scénario considérant des mesures relatives aux rejets urbains (amélioration du traitement des STEP); *3*) un scénario considérant des mesures agro-environnementales (passage à des pratiques d'agriculture biologique sur tout le bassin).

Le projet RESET (2013-2017) s'appuiera sur cette chaîne de modélisation mise à jour pour construire et simuler de nouveaux scénarios contrastés de l'évolution du fonctionnement du territoire normand et de ses écosystèmes à un horizon 30-50 ans [GARNIER ET AL., 2013]

atteindre aujourd'hui dans la partie fluviale de l'estuaire, des niveaux faibles qui tendent vers les bruits de fond naturels pour la plupart des métaux. Cette évolution est bien visible à la source, avec des concentrations qui ont par exemple été divisées par 20 en 15 ans dans les boues de la STEP Seine-Aval.

L'évolution temporelle de la contamination métallique dans l'estuaire peut être traduite par le calcul d'un indice de contamination métallique qui correspond à la somme des différences relative entre la contamination et le bruit de fond géochimique de cinq métaux représentatifs de la contamination de l'estuaire: cadmium, cuivre, mercure, plomb, zinc. Cet indice, moyenné entre Poses et Honfleur, a été réduit d'un facteur supérieur à 5 entre les années 1980 et les années 2010 [FIGURE 16]. Cet indice est révélateur du niveau moyen de contamination métallique et ne fait cependant pas apparaître les contaminations plus localisées. Spatialement, une décroissance des niveaux de contamination est généralement observée de l'amont de l'estuaire vers l'aval.

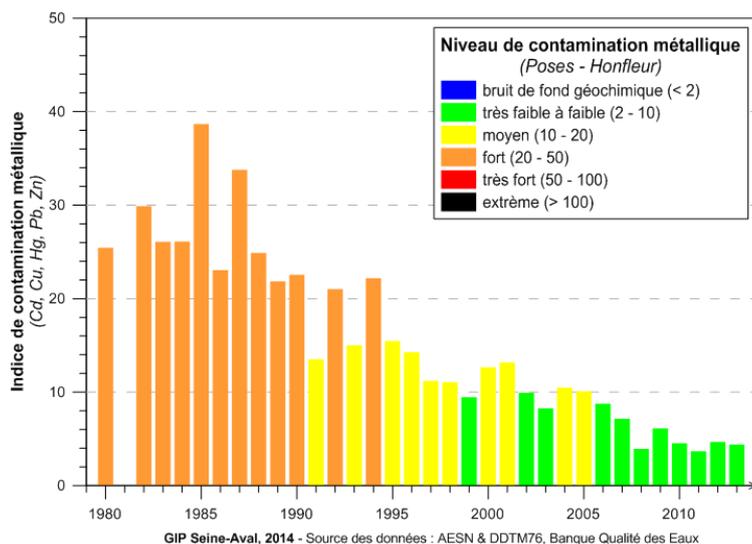


FIGURE 16 Évolution temporelle de la contamination métallique dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.

Une rétrospective de la contamination métallique par l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans un bassin portuaire proche de Rouen (darse des Docks) permet d'affiner l'historique de cette contamination [ENCART N° 3]. 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 contenue depuis, pour des métaux présents dans les rejets de phosphogypses (Ba, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Th, U, Y, lanthanides) [FIGURE 17; BOUST ET AL., 2012].

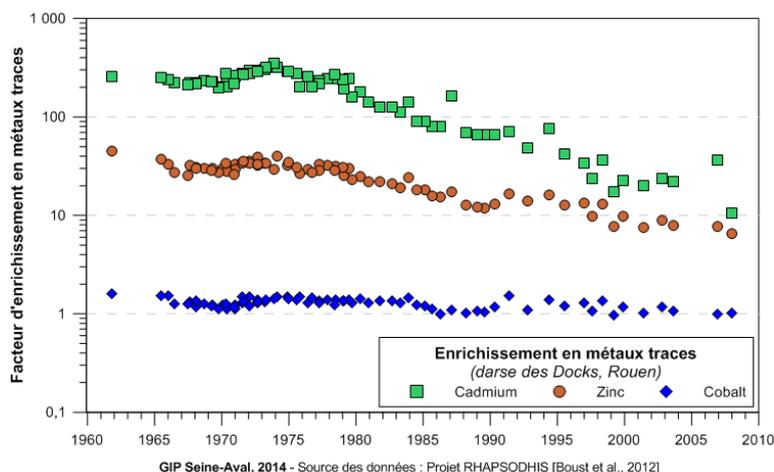


FIGURE 17 Évolution temporelle des facteurs d'enrichissement du cobalt, du zinc et du cadmium dans les sédiments de la darse des Docks.

Un travail spécifique a été mené sur l'évolution des sources de trois métaux (plomb, zinc et mercure) à l'estuaire de la Seine, en utilisant la signature isotopique de ces derniers [ENCART N° 4]. Appliquée à des échantillons prélevés dans différents compartiments de l'estuaire de la Seine (sédiment, MES, moules), cette méthode a permis d'obtenir les résultats suivants [CHIFFOLEAU ET AL., 2012]:

- Identification de trois sources de plomb anthropique très distinctes: 1) une source industrielle diffuse provenant de l'amont de la Seine; 2) une source ponctuelle sur l'Eure attribuable à une industrie de fabrication d'écrans cathodiques; 3) une source historique à Rouen liée aux rejets de phosphogypses.
- Changement majeur dans les principales sources de zinc à l'estuaire, avec un passage d'un impact mesurable des déchets et émissions métallurgiques en 1964 vers une source actuelle dominée par les effluents urbains de Paris, y compris les stations de traitement des eaux, les incinérateurs d'ordures et le lessivage des toits en zinc.
- Diminution considérable des apports directs en mercure dans la première moitié des années 1990, à relier aux restrictions d'usage (interdiction des thermomètres à mercure, de l'utilisation du mercure dans les piles et les matériaux automobiles, récupération des amalgames dentaires

ENCART N° 3

Des carottes sédimentaires pour lire la contamination passée

Le projet RHAPSODIS (2008-2012) visait l'analyse rétrospective de séries pluri-annuelles archivées dans le sédiment, avec pour objectifs principaux *I*) d'améliorer la connaissance de la dynamique sédimentaire passée; *II*) de documenter les apports en contaminants particuliers (métalliques, organismes, microorganismes pathogènes); *III*) de reconstituer l'historique de l'apparition de gènes bactériens de résistance aux contaminants métalliques et aux antibiotiques [BOUST ET AL., 2012].

Ce projet supposait le prélèvement de carottes sédimentaires dans une zone de stockage de particules sédimentaires peu remaniée depuis une cinquantaine d'années: la darse des Docks à Petit-Couronne (pk 250). La stratégie de carottage devait permettre de prélever plusieurs carottes, les plus longues possible en évitant toute perturbation physique et contamination extérieure. Au final, deux campagnes ont été menées et ont permis de prélever 12 carottes sédimentaires.

La datation des carottes était la seconde étape clef du projet et conditionnait les interprétations de toutes les autres analyses (sédimentologiques, géochimiques, chimiques, microbiologiques, écotoxicité). Cette datation a été établie à partir *1*) de repères chronologiques fournis par les analyses d'activité de radionucléides artificiels (^{137}Cs : retombée atmosphérique de l'accident de Tchernobyl



en 1986; ^{238}Pu : rejets dus aux activités du CEA à Fontenay-aux-Roses en 1975 [ASN, 2014]; ^{137}Cs : retombées atmosphériques des essais nucléaires jusqu'en 1963) et par la comparaison avec des données d'une carotte prélevée à l'amont du barrage de Poses, elle-même datée; *2*) des taux de sédimentation déterminés à l'aide des cartes bathymétriques historiques et de l'analyse des images SCOPIX® par traitement du signal appliqué à la sédimentation ($\sim 18\text{cm. an}^{-1}$ de 1960 à 1990; ralentissement de 1990 à 2008 du fait du comblement progressif du bassin). Une fois la carotte datée, l'échelle des profondeurs est transposée en échelle de temps et permet de dater les différents profils analysés (contamination chimique notamment) [FIGURE D; VREL ET AL. 2013]. L'enregistrement sédimentaire obtenu est très bien conservé de 1965 à 2008, mais est perturbé avant 1965 par la présence de hiatus (périodes manquantes dans l'enregistrement sédimentaire).

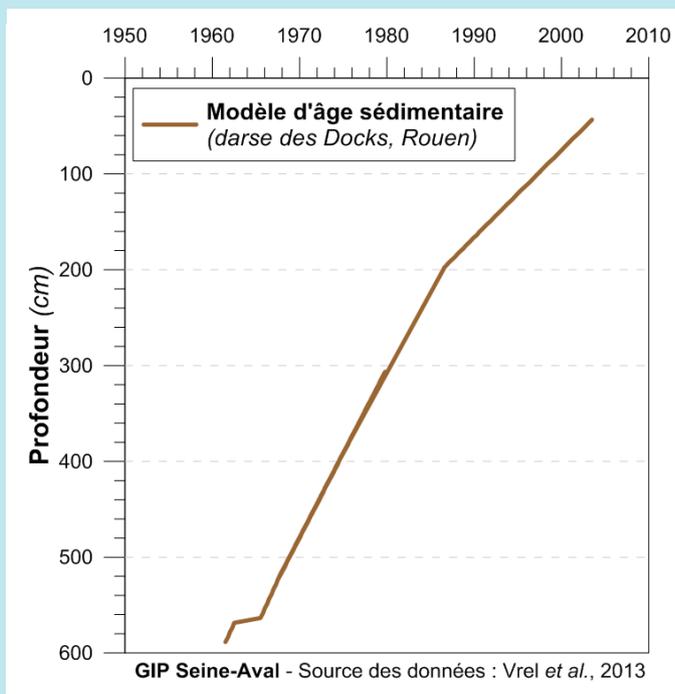
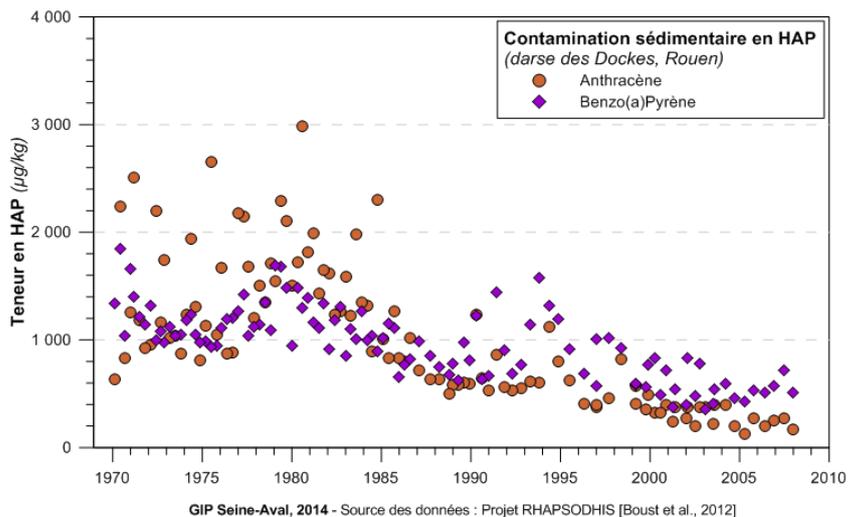


FIGURE D Relation « profondeur/année » (modèle d'âge) dans la darse des Docks.

par les dentistes, etc.). Les apports actuels restent difficiles à identifier sans caractérisation fine des sources en mercure dans le bassin versant de la Seine. Cette baisse des apports en mercure concerne essentiellement le mercure inorganique, alors que le méthylmercure reste stable. Or c'est ce dernier qui est toxique par ingestion et qui est le plus préoccupant pour la santé de l'écosystème et de l'homme.

FIGURE 18 Évolution de la teneur en Anthracène et en Benzo (a) Pyrène dans les sédiments de la darse des Docks.



2. Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Présents dans tous les compartiments de l'environnement, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) regroupent plusieurs centaines de substances chimiques constituées de plusieurs cycles aromatiques. Ils sont formés en mélange et ont trois origines principales : 1) pyrolytique (combustion de matériel organique par les industries, transports, incinérateurs, incendies); 2) pétrogénique (introduction dans l'environnement à partir de produits pétroliers et dérivés); 3) diagénétique (formation naturelle du pétrole). Ils sont peu solubles dans l'eau, ont tendance à s'adsorber sur les matières en suspension et à s'accumuler aussi bien dans les sédiments (plus spécifiquement sur les particules fines) que dans les organismes vivants. Ce risque de bioconcentration, important chez les invertébrés aquatiques (phytoplancton, zooplancton, bivalves, gastéropodes), est moindre chez les vertébrés (poissons, mammifères) du fait de la dégradation des HAP par le système enzymatique. Cependant, la métabolisation des HAP n'est pas complète et produit des métabolites dont la toxicité est mal connue.

La persistance et la toxicité des HAP augmentent avec leur poids moléculaire. Les substances de poids moléculaire faible sont plus facilement dégradées dans l'environnement et divers organismes peuvent les métaboliser plus ou moins complètement. Certaines molécules telles que le dibenzo (a, h) anthracène, le benzo (a) pyrène, l'indéno (1,2,3-cd) pyrène et le benzo (a) anthracène sont particulièrement toxiques et ont des effets cancérogènes, mutagènes et reprotoxiques. Des effets perturbateurs endocriniens* sont également suspectés.

Une rétrospective de la contamination en HAP par l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans un bassin portuaire proche de Rouen (darse des Docks) permet de retracer l'évolution temporelle des apports en HAP à la Seine depuis les années 1970 [ENCART N° 3]. Une décroissance régulière de la contamination est observée, même si elle reste relativement lente, du fait d'apports qui restent importants, diffus et difficiles à maîtriser [FIGURE 19; BOUST ET AL., 2012]. Parmi les composés analysés, l'anthracène présente la durée de demi-décontamination la plus faible (13 ans) et passe de teneurs supérieures à 2000 µg/kg PS dans les années 1970 à moins de 300 µg/kg PS aujourd'hui. Plusieurs substances présentent des durées de demi-décontamination qui dépassent les 25 ou 30 ans, comme l'indéno (1,2,3-cd) Pyrène, le benzo (a) anthracène, le pérylène ou le benzo (a) pyrène. Pour ce dernier, les teneurs dépassaient 1500 µg/kg PS dans les années 1970, contre moins de 500 µg/kg PS aujourd'hui. En analysant les différents composés selon leur origine, il est possible de relier leur évolution avec une meilleure maîtrise

des apports par le transport pétrolier et le raffinage (hydrocarbures alkylés) et une constance dans les apports liés à la combustion de combustibles (charbon, bois, pétrole). Cette même diminution des teneurs en HAP est observée dans les moules suivies à l'embouchure de la Seine [IFREMER, 2014A].

Le suivi annuel des sédiments de surface renseigne sur l'imprégnation actuelle en HAP et permet d'avoir une vision spatiale de la contamination, avec une décroissance globale observée de l'amont vers l'aval. Les teneurs moyennes pour la somme des neuf HAP principaux sont de plusieurs centaines à quelques milliers de µg/kg PS. Des teneurs plus élevées (> 5 mg/kg PS) sont cependant observées de manière récurrente à Poses, Oïssel et Rouen, indiquant de probables sources locales ou des zones préférentielles d'accumulation de sédiments fins contaminés [FIGURE 19]. En baie de Seine, les teneurs sont moindres (< 200 µg/kg PS), mais l'influence du panache de la Seine reste visible à l'embouchure et le long de la côte du pays de Caux. Le suivi des HAP dans les moules prélevées sur le littoral montre

ENCART N° 4

La signature isotopique pour tracer les sources de contamination métallique

Le **projet ISOMET** (2008-2012) visait à discriminer les différentes sources de contamination de l'estuaire de la Seine par certains métaux traces (Pb, Zn, Hg), 1) d'une part en mettant en parallèle des échantillons contemporains, prélevés durant le projet, et des échantillons historiques issus de carottes sédimentaires ou de banques d'échantillons et; 2) d'autre part en identifiant dès que c'était possible une signature propre à chaque source (i.e. la signature isotopique) [CHIFFOLEAU *ET AL.*, 2012].

Cette dernière technique s'appuyait sur la quantification des différents isotopes stables propres à chaque composé métallique. Par exemple, le plomb naturel est constitué de quatre isotopes stables quantifiables (204, 206, 207, 208) dont l'abondance respective est fonction de l'âge du minerai. Les procédés industriels de préparation des matériaux ne fractionnant pas les isotopes, leur composition isotopique reste identique à celle du minerai d'origine. Ainsi, des matériaux d'origine différente auront des ratios différents entre les isotopes stables et il sera possible de relier la signature isotopique d'un échantillon à une source. Pour le plomb, la comparaison des rapports entre les quatre isotopes stables permet de distinguer trois sources majeures: 1) le plomb naturel, caractéristique d'une région, issu du lessivage des sols et des extractions minières éventuelles; 2) le plomb issu des carburants automobiles; 3) le plomb « industriel » caractéristique des pays industrialisés constitué de divers mélanges et directement émis dans l'atmosphère ou les eaux.

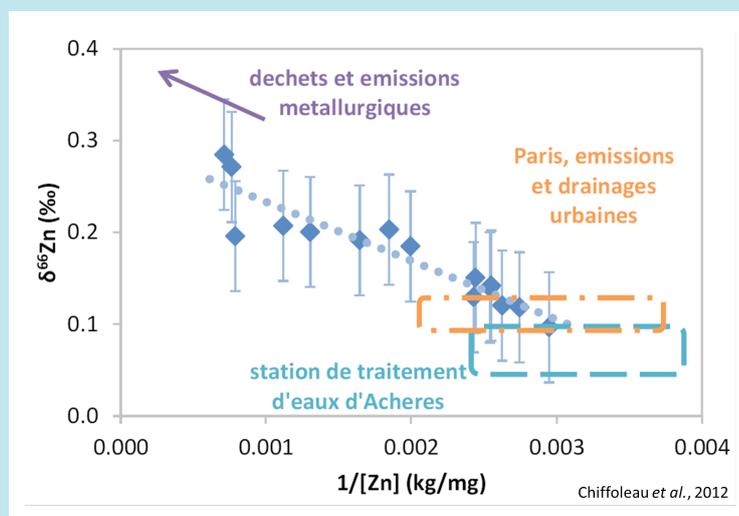


FIGURE E Mélange isotopique du zinc entre 1964 et 2007.

La signature isotopique d'un échantillon est obtenue en reportant un rapport isotopique par rapport à un autre sur un graphique. La position de la signature isotopique de différents échantillons sur un même graphique permet d'obtenir *a priori* la part respective de chaque source bien individualisée composant chaque échantillon [FIGURE E].

Pour le mercure et le zinc, la signature isotopique d'une source peut être modifiée durant le transit dans l'environnement, par des processus physico-chimiques (réduction ou volatilisation du mercure; précipitation du zinc). Les variations de leurs rapports isotopiques (202 et 198 pour le mercure; 66 et 64 pour le zinc) sont exprimées relativement à des standards internationaux.

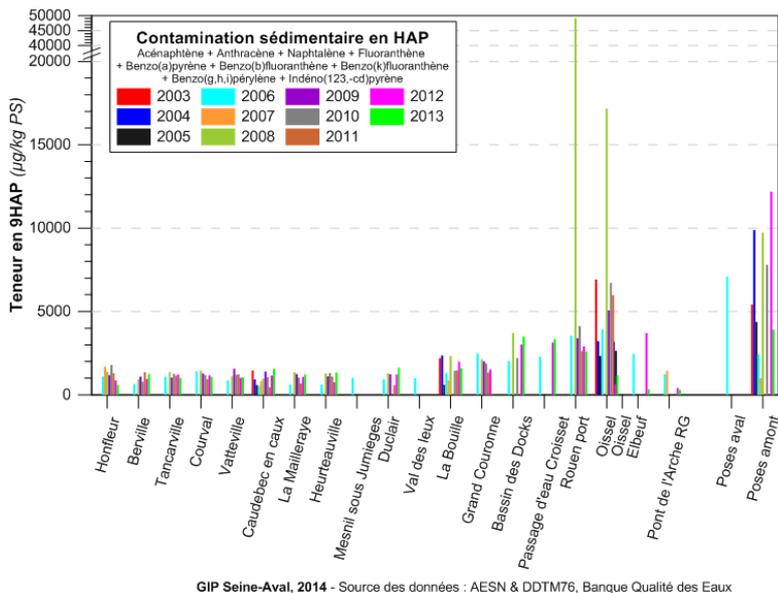


FIGURE 19 Contamination en HAP dans les sédiments de l'estuaire de la Seine, entre Poses et Honfleur, de 2003 à 2013.

que l'embouchure de la Seine reste un site très contaminé (6.4 fois la médiane nationale pour le fluoranthène au Cap de la Hève). Une décroissance des teneurs s'observe de l'ouest vers l'est de la baie de Seine, où elles sont comparables à la médiane du littoral français [IFREMER, 2014A].

3. Les PolyChloroBiphényles



Les PolyChloroBiphényles (PCB) sont des composés aromatiques organochlorés dérivés du biphényle. Ce sont des éléments non naturels synthétisés industriellement sous forme de mélanges et forment une famille de 209 composés (congénères). Les PCB de type dioxine (PCB-DL) regroupent 12 congénères de PCB dont la configuration plane induit des mécanismes de toxicité semblables à ceux des dioxines. Les PCB non apparentés aux dioxines (PCB-NDL) regroupent le reste des congénères de PCB. De configuration non coplanaire, ils présentent d'autres mécanismes de toxicité. Les PCB indicateurs (PCBi) regroupent 7 congénères (6 PCB-NDL et 1 PCB-DL) à rechercher en priorité dans les analyses de matrices organiques (sédiments, sang, chair, graisse) du fait de leur persistance et de leur abondance relative (> 100 fois celle des autres PCB) dans l'environnement ainsi que de leurs propriétés toxicologiques.

Les PCB ont été utilisés dans diverses applications industrielles – que ce soit en usage ouvert ou fermé (transformateurs, condensateurs électriques, additifs aux peintures, plastiques...) – pour leur inertie chimique, leur résistance au feu et leur constante diélectrique élevée. En réponse à plusieurs restrictions, dont celle de l'OCDE en 1973, les fabricants ont progressivement cessé la production de PCB. Ils ont été interdits d'usage en France en 1987, même si certains usages fermés ont été maintenus.

Leur caractère lipophile (affinité pour les graisses et faible solubilité dans l'eau) et très persistant induit une tendance à la bioaccumulation dans les organismes et le long de la chaîne alimentaire, exposant ainsi les organismes filtreurs, les prédateurs en bout de chaîne trophique (mammifères marins...) et l'homme. Les PCB sont classés comme perturbateurs endocriniens et peuvent avoir des effets toxiques et cancérigènes.

Connaissant le caractère cancérigène, mutagène et reprotoxique de certains HAP retrouvés en Seine, cette famille de contaminants est particulièrement ciblée comme partiellement responsable des effets génotoxiques observés sur des sédiments estuariens [ENCART N° 5; CACHOT ET AL., 2012; COUTEAU ET AL., 2012]. Ces effets se traduisent chez les poissons par des dommages à l'ADN et des mutations qui peuvent conduire au développement tumoral. Ainsi, des adduits à l'ADN spécifiques des HAP sont retrouvés dans les foies de flets à des taux corrélés aux concentrations de HAP mesurées dans les sédiments. En outre, les HAP peuvent également engendrer des effets embryo- et fœto-toxiques qui se traduisent par un accroissement de la mortalité et des malformations à la fois chez les poissons et les bivalves [CACHOT ET AL., 2005; CACHOT ET AL., 2006]. Il existe donc un risque écologique réel associé à la contamination élevée de l'estuaire

de Seine (notamment la partie amont) par les HAP. Enfin, la métabolisation rapide des HAP incite à mener des recherches sur leurs métabolites, dont certains sont plus toxiques que les composés parents.

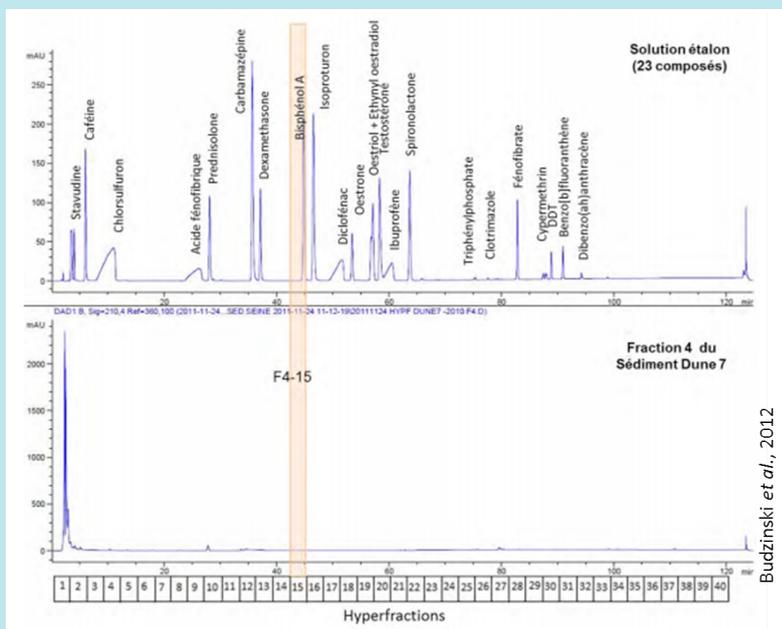
ENCART N° 5

Identification des molécules responsables d'un effet toxique

L'approche TIE (Toxicity Identification Evaluation) est une méthode couplant analyses chimiques et bioessais visant à caractériser et à identifier les composés (ou familles de composés) responsables de potentiels effets toxiques à partir d'échantillons prélevés dans le milieu naturel. Le principe de cette méthode est de fractionner des échantillons en fonction de leurs propriétés chimiques et de tester le potentiel toxique pour chaque fraction. Si une fraction se révèle réactive, alors celle-ci

est de nouveau fractionnée et la toxicité de chacun des fragments est alors évaluée. Ces fractionnements sont répétés jusqu'à obtenir la substance (ou famille de substance) responsable de la toxicité. Différentes méthodes analytiques (chromatographie en phase liquide, spectrométrie de masse) sont alors mises en œuvre pour identifier les fractions toxiques.

Les **projets BCG et TOXSEINE** (2008-2012) ont mis en œuvre cette méthodologie pour tenter d'identifier les substances responsables d'effets génotoxiques, respectivement sur des sédiments prélevés dans la vasière nord à l'embouchure de la Seine et sur des sédiments prélevés à Poses [COUTEAU ET AL., 2012; CACHOT ET AL., 2012].



Budzinski et al., 2012

FIGURE F Chromatogrammes HPLC d'une solution étalon et d'une fraction d'un échantillon environnemental génotoxique.

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 (utilisation maximale dans les années 1970-1975, puis réglementation et limitation progressive des usages, jusqu'à la cessation de leur production en 1987 pour la France). Depuis une quinzaine d'années, cette décroissance est largement ralentie, du fait d'une dégradabilité très faible de ces substances [FIGURE 20; BOUST ET AL., 2012].

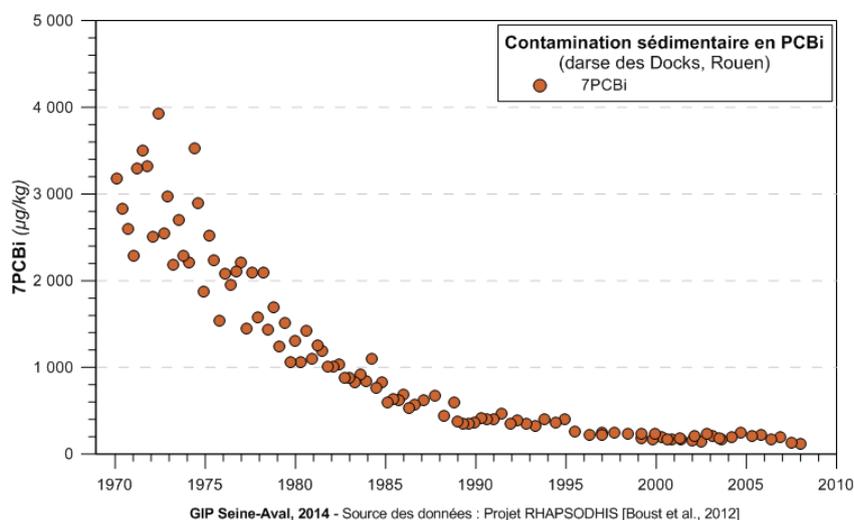


FIGURE 20 Évolution temporelle des teneurs en 7PCBi dans les sédiments de la darse des Docks.

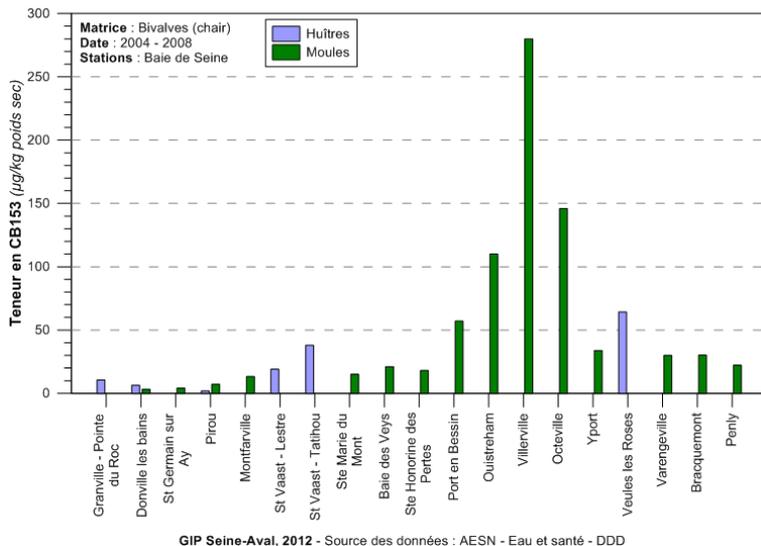


FIGURE 21 Teneurs en PCB153 dans les bivalves sur le littoral de la baie de Seine.

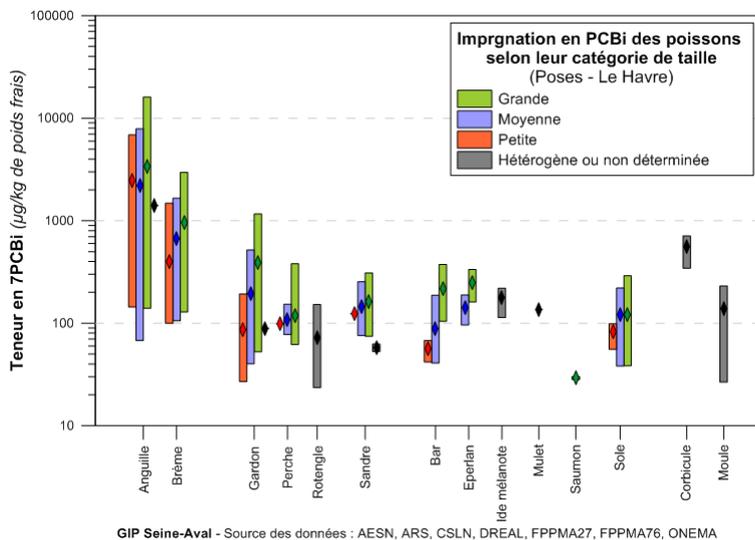


FIGURE 22 Imprégnation en 7PCBi des poissons prélevés dans l'estuaire de la Seine, les canaux et les bassins portuaires.

Cette tendance est confirmée par des analyses réalisées sur les moules à l'embouchure de la Seine, avec une diminution très lente de l'imprégnation en PCB sur les 15 dernières années. Ces teneurs restent élevées au regard du reste du littoral où la diminution est plus nette. De plus faibles teneurs sont observées dans les moules prélevées dans le reste de la baie de Seine (gradient de contamination entre l'ouest et de l'est de la baie de Seine), moins marquées par l'influence du panache de la Seine [FIGURE 21; IFRIMER, 2014A; DARGNAT & FISSON, 2010].

Les nombreuses mesures réalisées dans le cadre du plan régional PCB ont permis d'établir une image de l'imprégnation des poissons prélevés dans l'estuaire de la Seine, les canaux et les bassins portuaires pour la période 2008-2011. Leur contamination varie selon la capacité de bioaccumulation de l'espèce (l'anguille et la brème sont les espèces les plus contaminées car les plus fortement bioaccumulatrices, du fait d'une forte teneur des tissus en lipides) et la taille des individus (les plus âgés, et donc les plus gros, sont généralement les plus contaminés). Pour les anguilles, les teneurs mesurées en 7PCBi peuvent atteindre plusieurs mg/kg de poids frais, contre quelques centaines pour le gardon ou le bar [FIGURE 22; FISSON, 2012A].

4. Les pesticides

Les pesticides sont des substances chimiques destinées à lutter contre des organismes nuisibles, qu'ils soient animaux ou végétaux. Il en existe diverses familles, dont les herbicides (lutte contre les mauvaises herbes), les insecticides (lutte contre les insectes nuisibles), les fongicides (lutte contre les moisissures et les parasites fongiques des plantes), etc. Utilisées depuis le début du xx^e siècle, de nombreuses familles de substances se sont succédé. Par définition, les pesticides sont nocifs et peuvent donc avoir des effets toxiques pour l'homme et l'environnement.

À l'inverse des herbicides généralement hydrophiles, les insecticides (particulièrement les organochlorés) peuvent être bioaccumulables et se retrouver dans les tissus adipeux des organismes, tout au long de la chaîne alimentaire. De plus, la rémanence* des substances actives ou de leurs métabolites entraîne une large dissémination de ces molécules dans l'environnement et une toxicité qui peut s'exercer longtemps après l'arrêt de leur utilisation.

Les organoétains ont essentiellement été utilisés comme biocides dans les peintures marines antisalissure et les produits de préservation du bois. Bien qu'aujourd'hui interdits d'utilisation, leur biodégradabilité modérée dans l'eau de mer et lente dans les sédiments fait qu'ils peuvent encore aujourd'hui être retrouvés dans les sédiments et dans le biote. Certains de ces composés présentent un caractère cancérigène et perturbateur endocrinien, ainsi qu'un fort potentiel de bioaccumulation. Par ailleurs, des altérations provoquées spécifiquement par le TBT sont observées en milieu côtier sur les mollusques gastéropodes *Nucilla lapillus*, dont les femelles développent des organes sexuels typiquement mâles. C'est le phénomène d'imposex.

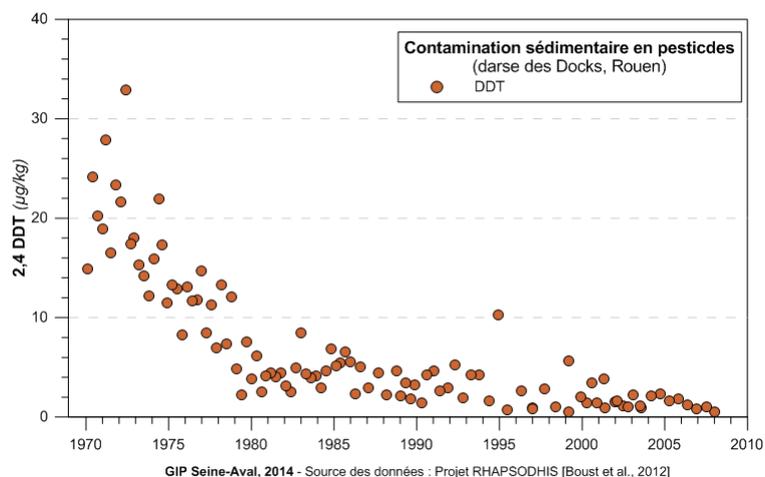


FIGURE 23 Évolution temporelle des teneurs en DDT dans les sédiments de la darse des Docks.

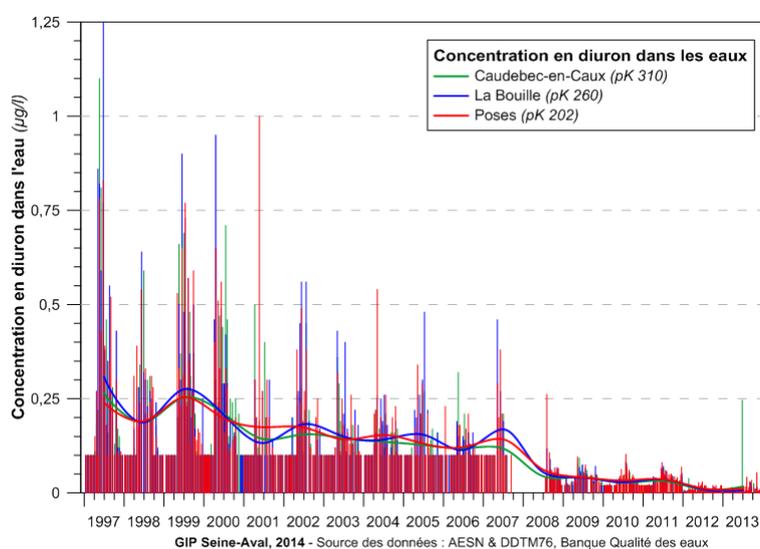


FIGURE 24 Évolution temporelle de la concentration en diuron dans les eaux de la Seine.

Une rétrospective de la contamination en pesticides organochlorés par l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans un bassin portuaire proche de Rouen (darse des Docks) permet de retracer l'évolution temporelle des apports à la Seine de quelques pesticides depuis les années 1970 [ENCART N° 3; BOUST ET AL., 2012]. Ces mesures montrent des tendances à la baisse bien marquées, en réponse à 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 [FIGURE 23]. Des évolutions semblables sont observées pour ses métabolites et les autres pesticides organochlorés.

La baisse de la contamination en pesticides visible dans les sédiments est confirmée par les analyses dans l'eau. Par exemple, suite à l'interdiction de l'utilisation du diuron (2002), la concentration moyenne dans les eaux et l'intensité des pics observés lors de la période d'utilisation ont largement baissé, ne dépassant pas 0,1 µg/l depuis quelques années [FIGURE 24]. Cette baisse de la contamination ne doit cependant pas occulter le fait que les pesticides, dont l'usage est réduit ou interdit, sont remplacés par de nouvelles générations de molécules actives à de plus faibles doses, ce qui rend leur détection (et celles de leurs métabolites) plus ardue : seuls 15 % des pesticides recherchés dans les eaux de la Seine ont été détectés au moins une fois sur la période 2007-2009 par le réseau de surveillance de la qualité des eaux de la Seine [FISSON ET AL., 2014]. Pour des pesticides moins dégradables et plus hydrophobes (lindane, DDT...), la rémanence des molécules dans les sédiments et la chaîne alimentaire reste une réalité, même plusieurs années après leur interdiction.

5. Les micropolluants d'intérêt émergent

Dans l'environnement, le terme de « micropolluant émergent », désigne des substances // dont la détection dans le milieu aquatique s'explique par de nouveaux usages sur le bassin versant, ou par l'amélioration significative des instruments et des procédures analytiques; // qui présentent un danger sanitaire ou environnemental inconnu jusqu'alors.

Ainsi, ces molécules émergentes peuvent être d'origine récente dans l'environnement ou au contraire être présentes depuis plusieurs décennies à des teneurs parfois non négligeables. Il s'agit de produits cosmétiques ou de substances pharmaceutiques (hormones, stéroïdes, antibiotiques...), de composants d'objets manufacturés (retardateurs de flamme, plastifiants, nanoparticules...), de substances utilisées dans l'industrie (biocides, tensio-actifs...) ou dans le milieu agricole – culture ou élevage – (pesticides, produits vétérinaires...).

Les effets potentiels de ces substances et de leurs métabolites dans l'environnement et sur l'homme ne sont pas ou très peu connus, bien que suspectés (notamment les effets sur les fonctions endocrines).

(1) Les PolyBromoDiphénylesEthers

Les PolyBromoDiphénylEthers (PBDE) sont des retardateurs de flamme utilisés dans une vaste gamme de produits de consommation (rembourrage de siège, fibres textiles, isolants électriques, boîtiers d'ordinateurs...). Ils sont persistants dans l'environnement et présentent un fort potentiel de bioaccumulation et de biomagnification. Leur cancérogénicité n'est pas établie, mais ce sont des perturbateurs endocriniens potentiels.

Dans l'estuaire de la Seine, les PBDE ne montrent pas de contamination notable dans les eaux (concentration moyenne toujours inférieure à 1 ng/l entre 2007 et 2010), bien que les concentrations soient supérieures à celles mesurées dans les affluents et les cours d'eau côtiers. Dans les sédiments, quelques sites présentent des teneurs moyennes supérieures à 5 µg/kg de poids sec, que ce soit dans la Seine ou certains de ses affluents (le Théluet à Notre-Dame-de-

Gravenchon, l'Austreberthe à Duclair, le Robec à Rouen, le Commerce à Lillebonne), témoignant de contaminations locales. Les poissons présentent des valeurs moyennes de l'ordre de quelques dizaines de µg/kg poids sec (pour la somme de 4 PBDE: 47, 99, 100, 153). Concernant le littoral normand, une faible imprégnation est visible (de l'ordre du µg/kg poids sec) sur les coquillages, les crustacés et les poissons [AESN; FISSON, 2012B].

(2) Les détergents et les plastifiants

Les phtalates sont un ensemble de substances chimiques dont les plus courants sont le diméthylphtalate, le diéthylphtalate (DEP), le diisobutylphtalate (DBP), le benzylbutylphtalate et le di (2-éthyl-hexyl) phtalate (DEHP). Ces composés sont des substances de synthèse entrant notamment dans la composition des matières plastiques, des cosmétiques, des peintures, des fluides diélectriques et des insecticides. Ils sont très hydrophobes et sont donc fortement fixés sur les sédiments et dans les organismes. La toxicité chronique du DEHP (principal composé de la famille des phtalates) vise le foie, le rein, le système reproductif. Le DEHP est un perturbateur endocrinien, faiblement biodégradable et pouvant être bio-accumulé.

Les alkylphénols sont des substances synthétiques intervenant notamment dans la fabrication de détergents ou d'agents de mouillage comme tensio-actifs. Les principales substances sont les octyl- et les nonyl-phénols. Ces substances sont peu biodégradables, bioaccumulables et toxiques. Ce sont des perturbateurs endocriniens possibles.

Le bisphénol A est une substance synthétique généralement associée à d'autres produits pour la fabrication des plastiques et des résines. Il est toxique et présente un caractère de perturbateur endocrinien possible (activité similaire aux œstrogènes).

Parmi les phtalates, le DEHP est le composé le plus souvent détecté dans l'environnement et il présente les concentrations les plus élevées. Sur la période 2007-2010, 85 % des mesures en DEHP dans les sédiments fins de surface des principaux cours d'eau haut-normands sont supérieures à 100 µg/kg de poids sec, témoin d'une présence marquée de ce composé, notamment dans l'estuaire de la Seine et ses affluents. Il n'est que peu détecté dans les eaux et semble en diminution dans l'estuaire depuis le début des années 1990 [LACHAMBRE & FISSON, 2007]. Du DEP et du DBP sont également retrouvés dans le biote marin. Le caractère lipophile et peu dégradé de ces composés fait qu'il est retrouvé dans les poissons, à des teneurs parfois importantes [FISSON, 2012B]. Le compartiment atmosphérique semble jouer un rôle prépondérant dans le transfert des phtalates, avec des retombées atmosphériques sur le bassin versant de la Seine bien supérieures aux apports à Poses (flux jusqu'à quatre fois plus élevés) et un maximum de contamination en

milieu urbain induisant des apports par ruissellement diffus au milieu aquatique [DARGNAT, 2008].

Les alkylphénols (4-nonylphénol et 4-tert-octylphénol) ne sont que rarement détectés dans les eaux de l'estuaire de la Seine et cela à des concentrations très faibles, en deçà des normes de qualité environnementale (respectivement 0,3 µg/l et 0,01 µg/l). Les interdictions d'usage ont permis une baisse des concentrations dans les eaux [AESN & DDTM76, 2012].

Sur les 6 dernières années (2008-2013), le bisphénol A n'est quasiment jamais détecté dans les eaux de l'estuaire de la Seine (limite de détection: 0,07 µg/l) et n'est pas détecté dans les sédiments (limite de détection: 33 µg/kg PS) [AESN & DDTM76, 2012]. Sur le littoral normand, il peut être retrouvé dans la chair d'éperlan, de mulot, de maquereau ou dans des moules [AESN].

(3) Les substances pharmaceutiques

Les substances pharmaceutiques regroupent différentes classes thérapeutiques (antibiotiques, anti-inflammatoires, antalgiques, psychotropes, bêtabloquants, hypolipémiants, etc.) caractérisées par une grande diversité dans leur structure chimique et leurs activités biologiques. En France, l'ordre de grandeur est de 3000 molécules prescrites en médecine humaine et de 300 molécules liées aux pratiques vétérinaires. Après ingestion par l'homme ou les animaux, la molécule est rejetée via les urines ou les fèces sous la forme initiale ou sous forme de métabolites. Ces résidus sont rejetés dans l'environnement aquatique *I)* principalement via les effluents traités de station d'épuration des eaux usées qui permettent une élimination plus ou moins complète, fonction de la dégradabilité propre à chaque substance et *II)* via le ruissellement ou le lessivage des zones d'élevage.

À l'échelle d'un bassin versant, les apports en substances pharmaceutiques d'origine humaine sont principalement dus aux zones urbaines et, dans une moindre mesure, aux hôpitaux; alors que les apports d'origine animale sont liés aux zones d'élevage intensif (aquaculture, élevage porcin, ovin ou aviaire).

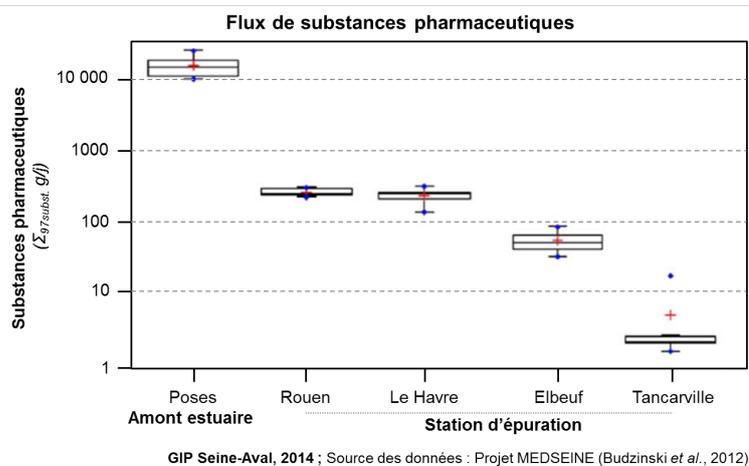


FIGURE 25 Flux de substances pharmaceutiques (n = 97) dans l'estuaire de la Seine.

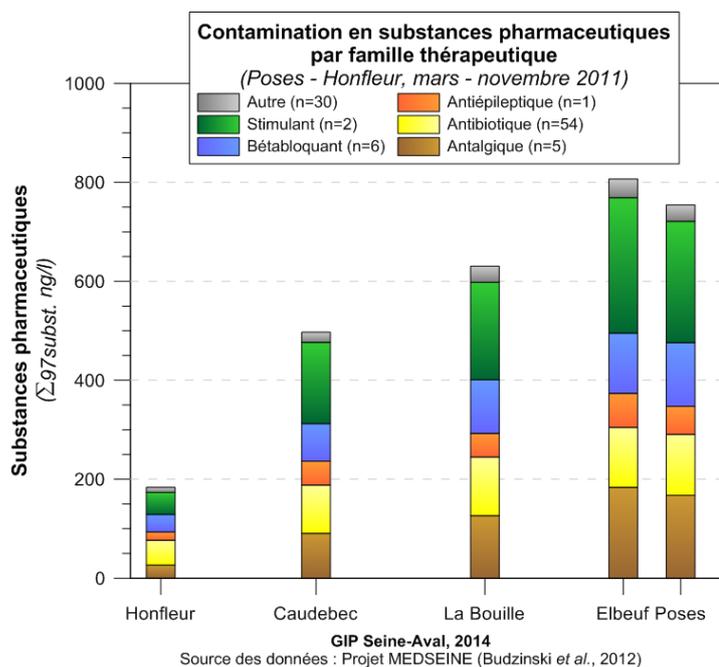


FIGURE 26 Concentration en substances pharmaceutiques le long de l'estuaire de la Seine.

Vu leur présence à des concentrations très faibles (de l'ordre du ng/l), la recherche et la quantification des substances pharmaceutiques dans le milieu naturel demandent la mise au point de techniques analytiques de pointe [ENCART N° 6]. Dans l'estuaire de la Seine, les apports principaux en substances pharmaceutiques proviennent du bassin versant de la Seine, avec un flux à Poses largement supérieur aux apports intra-estuariens, qu'ils proviennent des stations d'épuration urbaines ou des affluents. La recherche d'une centaine de substances pharmaceutiques au niveau du barrage de Poses et en sortie des stations d'épuration d'Elbeuf, de Rouen, de Tancarville et du Havre (2011) montre que le flux total en entrée d'estuaire (à Poses) est de l'ordre de 15 kg/j, contre quelques dizaines à centaines de grammes apportés par les stations d'épuration de l'estuaire [FIGURE 25; BUDZINSKI *ET AL.*, 2012].

Source majoritaire d'apports en substances pharmaceutiques à l'estuaire de la Seine, l'activité anthropique de la région parisienne gouverne les profils de contamination observés. Sur une centaine de molécules recherchées, 41 substances pharmaceutiques ont été détectées dans l'estuaire de la Seine. Les profils retrouvés sont dominés par les anti-inflammatoires non stéroïdiens (kétoprofène, ibuprofène, diclofénac), les bêtabloquants (sotanolol, aténolol), des antibiotiques (érythromycine, spiramicyne), la caféine ou encore un antiépileptique (carbamazépine) [FIGURE 26]. Ces données acquises par échantillonnage ponctuel ont été complétées par un suivi mobilisant des échantillonneurs passifs (de type POCIS) qui a montré la présence d'autres substances dans l'estuaire de la Seine (oxazepam, acébutolol, cétirizine, bezafibrate, etc.) [BUDZINSKI *ET AL.*, 2012]. Cette méthodologie innovante permet la détection de substances hydrophiles présentes à de très faibles concentrations dans le milieu et donne accès à une concentration moyenne sur la durée d'exposition, contrairement à l'échantillonnage ponctuel qui donne une image instantanée de la contamination.

ENCART N° 6

Des méthodes analytiques innovantes pour suivre les résidus médicamenteux dans les eaux

Les composés potentiellement présents à l'état de traces dans les eaux posent des difficultés analytiques importantes pour leur détection et leur quantification. Des méthodes analytiques innovantes et des méthodologies d'échantillonnage alternatives doivent ainsi être développées et mises en place pour relever ce défi.

Le **projet MEDSEINE** (2008-2012) a ainsi permis d'étudier la contamination par les composés pharmaceutiques de l'estuaire de la Seine et d'évaluer les apports de la Seine (à Poses) et des principales STEP de l'estuaire (Rouen, Elbeuf, Tancarville, Le Havre) [BUDZINSKI *ET AL.*, 2012]. Pour cela, plusieurs méthodologies innovantes ont été mises en place :

- Développement et optimisation de **méthodes d'extraction et d'analyse** multi-résidus (couplage LC/MS/MS) pour le screening des substances pharmaceutiques dans les eaux (une centaine de substances). Une analyse combinée supplémentaire a été mise au point pour diminuer le temps passé et le coût des analyses pour 53 substances, avec des limites de détection entre 0.01 et 45 pg injectés. Un protocole de dosage spécifique de la carbamazépine et de ses métabolites principaux a également été mis en place, ainsi qu'une méthodologie de dosage ciblée sur une trentaine d'hormones.
- Développement de nouvelles **méthodologies d'échantillonnage**, avec la mise en place d'échantillonneurs passifs de type POCIS [FIGURE G] permettant de mieux quantifier ces substances dans les milieux naturels en tenant compte de la variabilité temporelle (intégration dans le temps de la contamination). Les données de concentration exprimées

en ng.g^{-1} dans les POCIS peuvent être transformées en concentration dans l'eau. Pour cela, des molécules non interférentes et isotopiquement substituées (i.e. composés de référence et de performance) sont introduites dans les POCIS avant leur exposition. Leur désorption durant la période d'exposition permet de calculer un taux d'échantillonnage corrigé qui établit un lien direct entre la quantité de composés retenue par les POCIS et leur concentration dans le milieu.

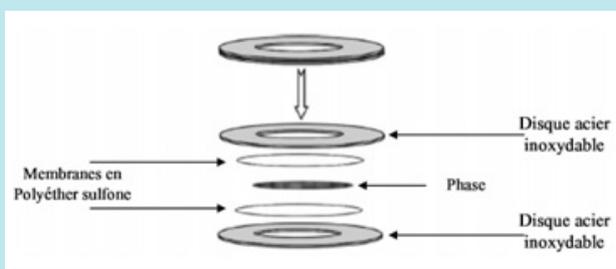


FIGURE G Schéma d'un POCIS.

Le **projet CRAPPSE** (2013-2017) va permettre de poursuivre ses travaux, en se focalisant sur les contaminants organiques polaires émergents (autres résidus de médicaments, pesticides, biocides, filtres UV, désinfectants, etc.). Outre l'imprégnation du milieu et la recherche d'effets toxiques potentiels, la réactivité de ces contaminants sera étudiée sous deux conditions : photodégradation et dégradation en présence d'échantillons du bouchon vaseux. En cas de mise en évidence d'une toxicité accrue, les produits de dégradation responsables de cette évolution seront recherchés dans les échantillons, puis dans le milieu naturel [MAZELLIER *ET AL.*, 2013].

La concentration totale en substances pharmaceutiques reste faible ($< 1 \mu\text{g/l}$ pour le cumul d'une centaine de substances). Elle est maximale à l'amont de Rouen et décroît vers l'embouchure de la Seine, indiquant une dilution progressive, ainsi que très certainement une dégradation de certaines de ces substances. Que ce soit dans le milieu estuarien ou

dans les effluents de STEP, aucune évolution qualitative ou quantitative marquée n'a été observée depuis le début des années 2000. De même, les concentrations en sortie de STEP sont dans la gamme des concentrations moyennes des STEP européennes, dont le rendement d'élimination est supérieur à 80 % pour de nombreuses molécules [BUDZINSKI *ET AL.*, 2012; TOGOLA, 2006].

E. LES MICROORGANISMES

Les eaux de surface véhiculent de nombreux microorganismes comme des bactéries, des virus, des protozoaires, des algues... Une grande partie de ces microorganismes est naturellement présente dans le milieu aquatique et joue un rôle considérable dans les cycles biogéochimiques s'y déroulant. À l'opposé, certains microorganismes sont apportés dans les milieux aquatiques qui ne constituent pas leur environnement habituel. C'est notamment le cas des bactéries telluriques (apportées par les eaux de ruissellement), de divers virus et des bactéries d'origine fécale (issues des rejets d'eau usée). L'apport dans le milieu naturel de ces dernières est très largement réduit par les traitements des eaux usées mis en place dans les stations d'épuration, mais des rejets non maîtrisés peuvent subsister, tels que *I*) des rejets directs d'eaux usées domestiques ou de systèmes d'assainissement autonome défectueux; *II*) des rejets des déversoirs d'orage en réseau unitaire ou de surverses de postes de refoulement d'eaux usées; *III*) des débordements de fosses à lisier et du ruissellement sur des surfaces d'élevage ou d'épandage; *IV*) des rejets d'industries agroalimentaires (abattoirs...). La présence possible dans le milieu naturel de microorganismes pathogènes pour l'homme (bactéries entéropathogènes, virus de gastro-entérites, parasites intestinaux, etc.) et la présence d'usages pouvant entraîner une exposition (pratiques nautiques, baignade, pêche à pied...) justifient alors l'importance sanitaire et épidémiologique de leur suivi.

Les mises en service successives des unités de traitement des stations d'épuration urbaines ont un impact quasi immédiat sur la qualité bactériologique du milieu. La mise en service de la station Emeraude qui traite les eaux usées de l'agglomération rouennaise depuis 1997 a ainsi permis de réduire sensiblement la contamination bactérienne de l'estuaire de la Seine. Bien qu'elle ne possède pas de système de désinfection, cette station comporte un traitement biologique secondaire qui améliore nettement l'abattement du nombre de germes en sortie de station (réduction d'un facteur 100 à 1000 par rapport aux effluents bruts). Cette amélioration est visible dans le milieu, via le dénombrement des abondances des bactéries indicatrices de contamination fécale (*E. coli* et entérocoques intestinaux (*Enterococcus*)) qui a été réduit d'un facteur 10 [FIGURE 27; AESN & DDTM76, 2012].

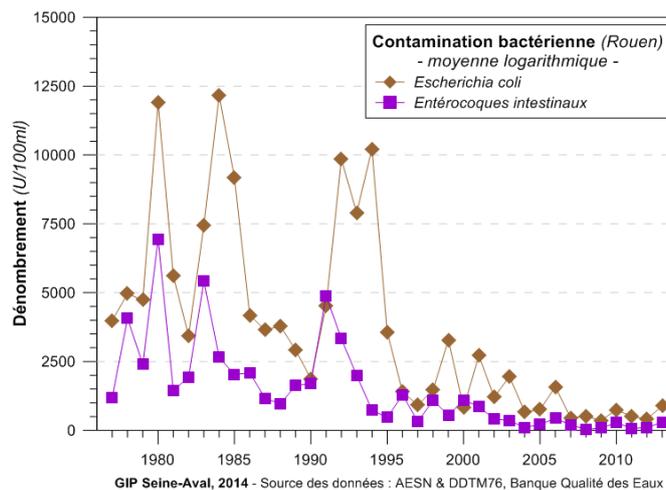


FIGURE 27 Évolution temporelle de la contamination bactérienne moyenne annuelle dans la Seine à Rouen.



F. LES MACRODÉCHETS

Les macrodéchets correspondent aux déchets solides d'origine anthropique, visibles à l'œil nu. Leur nature est diverse (plastique, verre, métaux, bois, textile, papier, etc.), tout comme leur origine (activité économique : transport, industrie, port, tourisme, pêche, agriculture, aquaculture, etc. ; installation de collectivité : station ou réseau de collecte et de traitement des eaux usées domestique et pluviale, décharge ; comportement individuel ou de groupe : perte accidentelle ou par négligence, rejets illicites, abandon volontaire). La proximité immédiate d'une source explique directement la présence de certains dépôts, mais les déchets peuvent avoir une origine très lointaine car transportés par les courants et les vents. Suivant la configuration hydrodynamique* d'un site, des zones de dépôts préférentiels et d'accumulation sont présentes le long des fleuves et en zone côtière [KERAMBRUN & EVRARD, 2012]. La présence de ces macrodéchets impacte les communautés benthiques en modifiant ou détruisant les habitats. Les espèces pélagiques ou démersales, les oiseaux et les mammifères marins sont également touchés, avec de nombreux cas de piégeage, d'étranglement ou d'enchevêtrement. L'ingestion de ces macrodéchets (par accident ou par confusion de proie) cause des dommages physiques au tube digestif en bloquant mécaniquement le passage du bol alimentaire ou en générant une fausse sensation de satiété et un dysfonctionnement de la digestion [PIBOT & CLARO, 2012].

La dégradation des macrodéchets plastiques dans le milieu aquatique est responsable de la formation de micro-particules (taille entre 500 µm et 5 mm) retrouvées en mer ou dans les lasses de mer. Différentes substances chimiques (métaux, PCB, HAP, etc.) sont susceptibles d'être adsorbées à leur surface et ingérées par les organismes marins, alors exposés à ces contaminants et aux composés propres aux plastiques (phtalates, bisphénol A) [GERIGNY ET AL., 2012]. Cette problématique est à rapprocher de la présence de microbilles dans les produits cosmétiques qui ne sont pas retenues par les STEP et qui peuvent avoir des effets physiques multiples sur la faune aquatique.

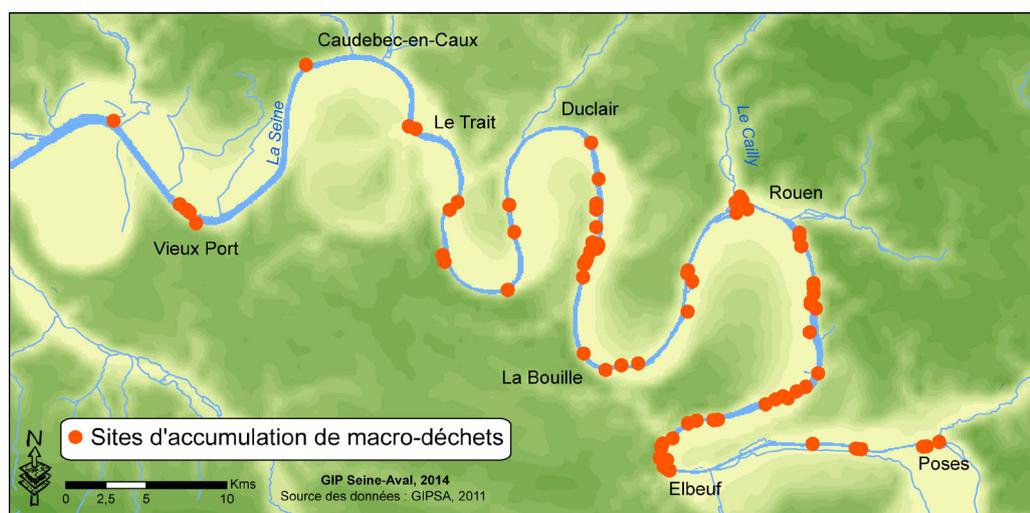


FIGURE 28 Sites d'accumulations de macro-déchets identifiés sur les berges de l'estuaire de la Seine.

Sur le littoral normand, les déchets proviennent essentiellement de la mer (plaisance, transport maritime) ou sont abandonnés sur place par les usagers. Des ramassages réguliers sont organisés, avec des volumes collectés relativement importants (> 50 t/an sur 20 km de littoral dans le secteur du Havre). Sur ce même secteur havrais, une typologie des déchets ramassés montre la prédominance des plastiques et polystyrène (88 %) sur le bois (6 %) ou les métaux (4 %), essentiellement sous forme de débris [OSPAR, 2010].

La Seine est également importante à considérer, en tant que

zone de transit (800 t/an d'objets flottants) et zone d'accumulation (9000 t de déchets accumulés entre Poses et l'embouchure sur 30 ans, soit environ 30000 m³) [CEDRE, 1997]. Entre Poses et Tancarville, 87 sites d'accumulation de macrodéchets ont été identifiés, dont une vingtaine de sites supérieurs à 100 m². La plupart des sites détritiques identifiés sont localisés sur des

secteurs naturels, la végétation rivulaire jouant un rôle de peigne en retenant les déchets lors de leur dérive en période de crue ou de forte marée [FIGURE 28; GIPSA, 2011]. Différents programmes de nettoyage des berges permettent d'en récupérer une partie et 4000 t de déchets ont ainsi déjà été enlevées et recyclées depuis 2001, dont 3670 tonnes de bois, 138 tonnes de plastiques et papiers, 10 tonnes de verres, 26 tonnes de ferrailles et de nombreux autres déchets (seringues, médicaments, roues de voiture, pots de peinture, aérosols, etc.) [PNRBSN, 2014; SOS MAL DE SEINE, 2014].

III LES CONSÉQUENCES : DES EFFETS VISIBLES À DIFFÉRENTS NIVEAUX

A. UN ÉTAT DES MASSES D'EAU JUGÉ MAUVAIS PAR LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

La Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) vise trois objectifs : 1) stopper toute dégradation des eaux; 2) atteindre le bon état qualitatif des eaux superficielles et côtières, et le bon état qualitatif et quantitatif des eaux souterraines; 3) réduire les rejets des substances prioritaires et supprimer les rejets des substances prioritaires dangereuses. Cette Directive introduit la notion de « bon état » d'une masse d'eau qui résulte de l'agrégation de I) l'état écologique défini par des éléments de qualité physico-chimique, de qualité biologique et de l'état hydromorphologique et II) de l'état chimique. Les paramètres de l'état écologique sont répartis en cinq classes (très bon état, bon état, état moyen, état médiocre, mauvais état); l'état chimique est obtenu par comparaison de la concentration dans l'eau des 41 substances prioritaires avec leur norme de qualité environnementale respective qui ne doit pas être dépassée, afin de protéger la santé humaine et l'environnement. L'état global d'une masse d'eau correspond à l'état de l'élément le plus déclassant.

L'estuaire de la Seine est découpé en trois masses d'eau de transition considérées comme « fortement modifiées » : FRHT01 (Estuaire amont), FRHT02 (Estuaire moyen) et FRHT03 (Estuaire aval). Une masse d'eau de transition : FRHT07 (Risle estuarienne); trois masses d'eau souterraines à dominante sédimentaire : FRHG202 (Craie altérée de l'estuaire de Seine), FRHG201 (Craie + buttes eocène) et FRHG212 (Craie du Lieuvin - Ouche – bassin versant de la Risle) et une masse d'eau alluvionnaire : FRHG001 (Alluvions de la Seine moyenne et aval) sont rattachées à l'estuaire de la Seine. Enfin, deux masses d'eau côtières sont positionnées de part et d'autre de l'embouchure de la Seine : FRHC15 (Côte Fleurie) et FRHC16 (Le Havre – Antifer) [FIGURE 29].

L'application des critères DCE débouche sur un classement des quatre masses d'eau de transition en mauvais état global (état des lieux 2013), avec un déclassement lié à l'état chimique (DEHP, TBT, HAP, octylphénols) et à l'indicateur poisson pour FRHT01 et FRHT02 (indicateur spécifique aux masses d'eau de transition). Ces quatre masses d'eau présentent un risque de non atteinte des objectifs environnementaux (biologie et chimie) à l'échéance 2021. La masse

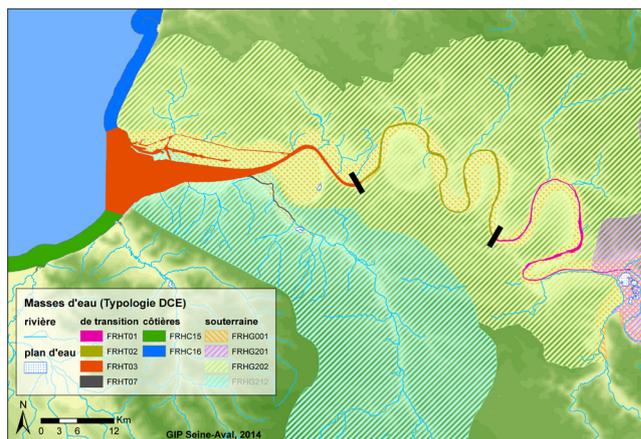


FIGURE 29 Masses d'eau associées à l'estuaire de la Seine.

d'eau côtière au nord de l'embouchure de la Seine (FRHC16) est considérée en mauvais état, du fait de son état chimique (TBT, dont la contamination peut être attribuée au panache de la Seine et à l'activité portuaire); la masse d'eau côtière au sud de l'embouchure de la Seine (FRHC15) est considérée en état moyen, du fait de son état biologique (indicateur phytoplancton) [TABLEAU V; AESN, 2013; IFREMER & AESN, 2014]. Les quatre masses d'eau souterraines associées à l'estuaire de la Seine sont considérées dans un bon état quantitatif, mais dans un état médiocre pour les éléments de qualité chimique (nitrates et pesticides). Pour ces éléments, ces masses d'eau présentent un risque de non atteinte des objectifs environnementaux à l'échéance 2021 [AESN, 2013].



TABLEAU 5 État des masses d'eau associées à l'estuaire de la Seine, selon la DCE.

Etat des lieux 2006-2011		Masses d'eau côtières		Masses d'eau de transition				
		FRHC16	FRHC15	FRHT03	FRHT02	FRHT01	FRHT07	
Etat global		Mauvais	Moyen	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Mauvais	
Etat écologique	Etat biologique	Invertébrés benthiques	Très bon	Très bon	ND	NP	NP	NP
		Poissons	NP	NP	Médiocre	Mauvais	Mauvais	Moyen
		Phytoplancton	Moyen	Moyen	NP	NP	NP	NP
		Autre flore aquatique	ND	Très bon	ND	NP	NP	NP
	Etat physico-chimique	Transparence	Très bon	Très bon	NP	NP	NP	NP
		Oxygène dissous	Très bon	Très bon	Très bon	ND	ND	ND
		Température	Très bon	Très bon	NP	NP	NP	NP
		Nutriments	ND	ND	NP	ND	ND	ND
		Polluants spécifiques	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Etat hydromorphologique		Inférieur au très bon état		Inférieur au très bon état			
Etat chimique	Etat chimique	Métaux lourds	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
		Pesticides	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon
		Polluants industriels	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Mauvais
		Autres polluants	Mauvais	Bon	Mauvais	Mauvais	Mauvais	Bon

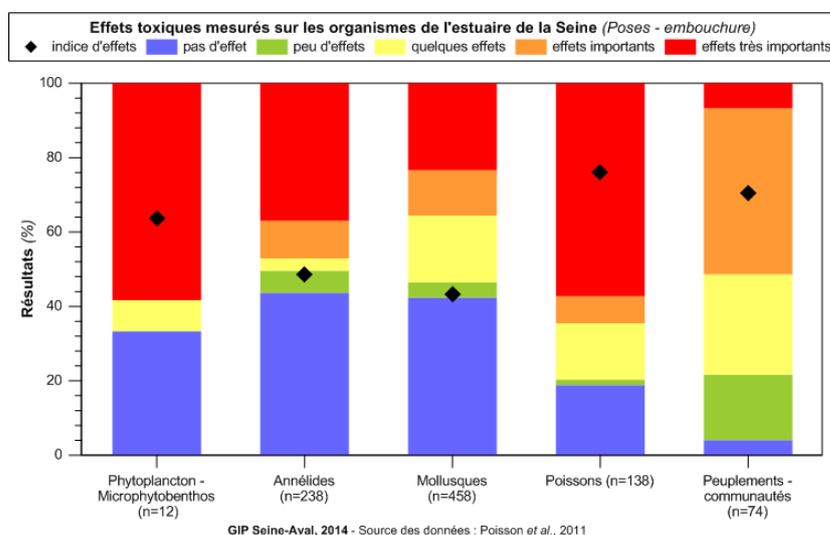
Source des données: AESN, 2013

B. DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX VISIBLES SUR LES ORGANISMES AQUATIQUES

Une qualité dégradée des eaux peut impacter la faune et la flore. Afin d'estimer les effets de la multi-contamination sur les organismes aquatiques vivant dans l'estuaire de la Seine, de nombreux tests éco-toxicologiques* et observations ont ainsi été menés depuis de nombreuses années [ENCART N° 7]. Des effets ont été mis en évidence sur les mollusques, les annélides et les crustacés: cassures à l'ADN sur des moules bleues et des dreissènes, inhibition d'une enzyme impliquée dans la transmission de l'influx nerveux chez des copépodes et des vers, développement d'un organe de reproduction mâle chez des femelles de nucelle, etc. Les poissons sont particulièrement touchés par la multi-contamination du milieu estuarien, avec de nombreux dysfonctionnements observés: *I*) sur le génome: apparition de lésions tumorales après exposition en laboratoire à des sédiments prélevés dans l'estuaire; *II*) sur le système nerveux, sur la physiologie, sur le système immunitaire: présence de nécroses cutanées et de lymphocytis chez des flets; *III*) sur la reproduction et le développement: perturbations endocriniennes, présence de tissus intersexués chez des flets; dérèglements hormonaux chez des flets et des gardons, etc. Ces effets de la contamination sur la reproduction et le développement sont à souligner, car des répercussions sont possibles sur les

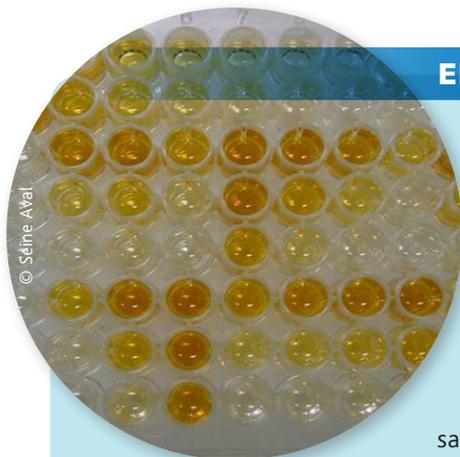
populations et les communautés (modification des sex-ratios, des structures de population, etc.) [FIGURE 30; POISSON ET AL., 2011].

Les effets mis en évidence par ces nombreuses études ponctuelles justifient la mise en place d'un suivi des effets de la contamination chimique à l'embouchure de la Seine. Dans un premier temps prévu sur 3 ans (2015-2017), ce suivi reposera sur une approche multi-espèce (annélides, mollusques, crustacés, poissons, oiseaux) visant à favoriser la représentativité taxonomique et trophique des espèces vivantes à l'embou-


FIGURE 30 Niveaux d'effets mis en évidence par les études in situ réalisées dans l'estuaire de la Seine.

ENCART N° 7

Des biomarqueurs et des bioessais pour évaluer la toxicité des matrices environnementales



© Seine-Aval

L'évaluation des effets toxiques potentiels d'un échantillon environnemental sur les organismes peut être appréhendée par l'analyse de biomarqueurs et la réalisation de bioessais. Ces outils apporteront des éléments réponses complémentaires selon l'effet recherché (génotoxicité, reprotoxicité, immunotoxicité, neurotoxicité, etc.), le comportement et le niveau trophique de l'espèce ciblée et le niveau d'organisation biologique visé (sub-individu, individu, population). Un biomarqueur correspond à un changement structurel ou fonctionnel, observable et/ou mesurable à divers niveaux d'organisation biologique (moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportementale), qui révèlent l'exposition présente ou passée d'un individu à au moins une substance chimique à caractère polluant [LAGADIC ET AL., 1997]. C'est par exemple, le cas de l'Acétylcholinestérase (neurotoxicité), des adduits à l'ADN, des tests micronoyaux ou comète (génotoxicité), de l'imposex ou de la vitellogénine (perturbation endocrinienne). Les bioessais (ou biotests) sont des expérimentations en laboratoire reposant sur l'exposition d'organismes vivants, à un ou plusieurs paramètres (substances chimiques, rayonnements, etc.), pour lesquels des effets sont recherchés. Ces bioessais respectent un protocole expérimental précis (durée, température, salinité, photopériode, stade de développement, etc.). Ils peuvent être normalisés et intervenir pour l'établissement de valeurs toxicologiques de références.

De nombreux biomarqueurs et bioessais ont été utilisés ou mis au point sur l'estuaire de la Seine, afin d'intégrer au mieux les spécificités de ce milieu et des espèces présentes.

Le **projet BCG** (2008-2012) a ainsi cartographié le potentiel génotoxique des sédiments de la vasière nord à l'embouchure de la Seine à partir du SOS-Chromotest. Le potentiel génotoxique de l'eau de Seine et des matières en suspension présentes dans le bouchon vaseux de l'estuaire a été évalué à l'aide du même biomarqueur et les effets génotoxiques induits chez deux organismes (*Eurytemora affinis* et *Platichthys flesus*) ont été caractérisés avec le SOS-Chromotest, le dosage des adduits à l'ADN et le test des comètes [COUTEAU ET AL., 2012].

Le **projet TOXSEINE** (2008-2012) a analysé de manière rétrospective de multiples effets (cytotoxicité : test Microtox® ; génotoxicité : SOS Chromotest ; oestrogénicité : test YES ; neurotoxicité : inhibition activité AchE) sur différents horizons d'une carotte sédimentaire. La toxicité des sédiments superficiels de l'estuaire de la Seine (7 sites) a également été estimée à l'aide des mêmes biomarqueurs et de différents bioessais développés sur *Corophium spp*, *Eurytemora affinis* et sur des embryons et des larves de poissons médaka et de truites arc-en-ciel [CACHOT ET AL., 2012].

Le **projet MEDSEINE** (2008-2012) a permis l'étude du potentiel toxique des effluents de STEP et des eaux de surface, avec l'application de tests *in vitro* pour rechercher des effets perturbateurs endocriniens (activation de récepteurs de la dioxine, des œstrogènes, des androgènes, des glucocorticoïdes) et la mise au point de tests *in vivo* sur *Eurytemora affinis* (test de survie et de croissance, tests de neurotoxicité). L'application de ces tests a nécessité le prélèvement et l'acclimatation en laboratoire de copépodes prélevés en Seine, puis l'exposition de *nauplii* aux différents extraits testés [BUDZINSKI ET AL., 2012].

chure de la Seine et des habitats représentés. Les effets de la contamination seront examinés à différents niveaux d'organisation biologique (sub-individu, individu, population) afin d'estimer l'état de santé des individus et de guider des interprétations écologiques à l'échelle des populations. Les perturbations en lien avec des grandes fonctions biologiques

susceptibles d'avoir des répercussions à long terme, notamment sur le niveau de performance écologique des individus, et d'occasionner des déséquilibres populationnels, voire écosystémiques, sont particulièrement ciblées (i.e. génotoxicité, reprotoxicité, immunotoxicité et pathologies, comportement, traits d'histoire de vie) [XUEREB ET AL., 2014].

C. DES MESURES DE SUIVI ET DE GESTION DU RISQUE SANITAIRE

L'existence d'un risque sanitaire et donc d'effets potentiels sur la santé publique résulte de l'exposition de la population à un danger. Pour les risques liés à la qualité des eaux, les principaux dangers sont liés à la présence *I*) de micropolluants ; *II*) de toxines algales ; *III*) de microorganismes pathogènes. La population peut être exposée via la consommation des produits de la mer ou la pratique d'activité de loisirs liés à l'eau (baignade...). Afin de prévenir les risques et protéger la santé des consommateurs, la contamination des produits de la pêche (coquillages, poissons) et la qualité des eaux de baignade font l'objet d'une surveillance et de mesures de gestion.

La contamination en micropolluants (cadmium, mercure, argent, PCB, pesticides organochlorés) des produits de la pêche montre une tendance générale à la baisse, même si des problèmes persistent encore du point de vue de la réglementation sanitaire. C'est par exemple le cas pour la contamination en PCB des poissons pêchés dans l'estuaire de la Seine : la quasi-totalité des lots constitués d'espèces accumulant fortement les PCB (anguille, brème) ne respecte pas la Teneur Maximale Admissible (TMA) fixée par le règlement européen 1259/2011/CE et seuls 40 % des lots d'espèces accumulant faiblement les PCB (chevaine, gardon, perche, rotengle, sandre) respectent la TMA entre Poses et l'embouchure de la Seine [FIGURE 31 ; FISSON, 2012A]. Afin de limiter l'exposition de la population, des mesures d'interdictions de pêche ont été prises pour les poissons de l'estuaire de la Seine, en vue de leur consommation ou de la commercialisation. De même, les anguilles sont interdites de pêche sur les eaux littorales de Seine-Maritime et du Calvados et dans les cours d'eau de l'Eure et de Seine-Maritime.

Les sardines sont interdites de pêche en baie de Seine (de Barfleur à Dieppe). Par ailleurs, pour les consommateurs moyens ou forts de produits de la mer, la consommation de mollusques et de poissons provenant de l'est de la baie de Seine peut entraîner le dépassement des valeurs toxicologiques de référence pour les PCBi et les PCB

de type dioxines et furanes [BOCQUENÉ ET AL., 2012 ; LEBLANC ET AL., 2006].

Les risques sanitaires liés aux **toxines du phytoplancton** font l'objet d'une surveillance assurée par Ifremer (réseau REPHY), à travers le suivi des concentrations d'espèces phytoplanctoniques toxiques (*Dinophysis*, *Alexandrium* et *Pseudo nitzschia*) dans les eaux de la baie de Seine. En cas de dépassement de concentrations seuils de ces espèces dans les eaux, les toxines sont recherchées dans les coquillages et des tests de toxicité sont menés. Cette surveillance donne lieu à des alertes et des interdictions temporaires de pêche (de loisir ou professionnelle) afin de limiter le risque d'intoxications. Elles sont essentiellement liées à la présence en été-automne de toxines diarrhéiques de type DSP (*Dinophysis*) dans les moules entre Le Havre et Veulettes-sur-mer, ainsi qu'à la présence de toxines amnésiantes de type ASP (*Pseudo nitzschia*) dans les coquilles St Jacques de la baie de Seine [IFREMER LERN, 2012 ; BELIN, 2004].

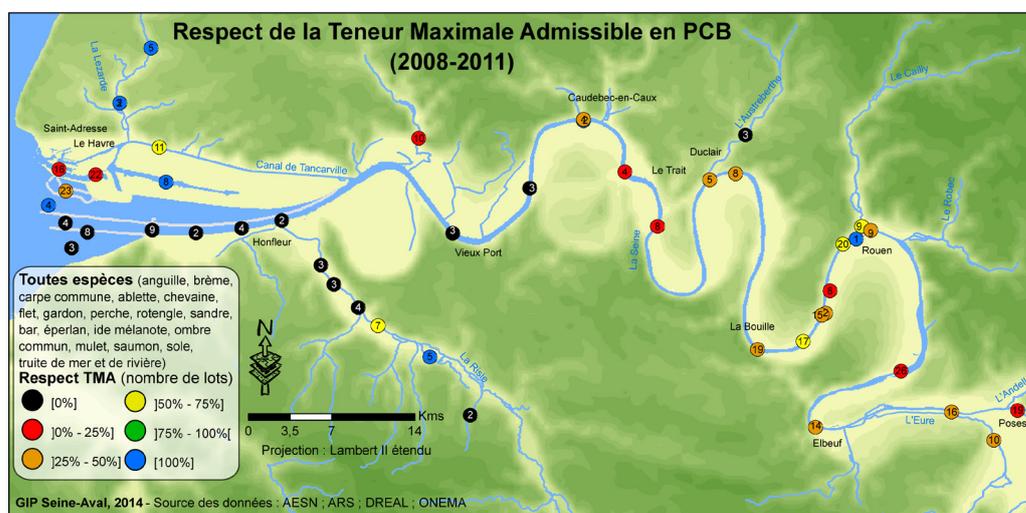


FIGURE 31 Respect de la Teneur Maximale Admissible en PCB pour les poissons de l'estuaire de la Seine et ses affluents.



Les zones de production et de reparcage des coquillages font l'objet d'une surveillance sanitaire, avec un classement de salubrité pour les différents groupes de coquillages. Il est basé sur la qualité microbiologique et chimique (métaux lourds, HAP et PCB). Pour l'embouchure de la Seine, cela concerne essentiellement les moules (bivalves filtreurs de groupe 3), avec des zones classées en D ou N pour cause de dépassement des normes microbiologiques, interdisant toute activité de pêche ou d'élevage [FIGURE 32]. En ce qui concerne la pêche à pied de loisir, elle est interdite du Havre au cap d'Antifer, de Trouville-sur-Mer à Honfleur, dans les ports et 300 m autour de l'entrée des ports, de l'embouchure des rivières et des centrales nucléaires; aucun site surveillé



Classement de salubrité des zones conchylicoles (groupe 3 : mollusques bivalves filtreurs)

- Zone A : Zones dans lesquelles les coquillages peuvent être récoltés pour la consommation humaine directe.
- Zones B : Zones dans lesquelles les coquillages peuvent être récoltés mais ne peuvent être mis sur le marché pour la consommation humaine qu'après avoir subi, pendant un temps suffisant, un traitement dans un centre de purification. La pêche de loisir est possible, en respectant des conditions de consommation édictées par le ministère de la santé, comme la cuisson des coquillages.
- Zones C : Zones dans lesquelles les coquillages ne peuvent être mis sur le marché pour la consommation humaine qu'après un reparcage qui, en l'absence de zones agréées dans cet objectif, ne peut avoir lieu en France. La pêche de loisir y est interdite.
- Zones D : Zones dans lesquelles toute activité de pêche ou d'élevage y est interdite, du fait d'une contamination avérée des coquillages présents.
- Zones N : Zones non classées, dans les quelles toute activité de pêche ou d'élevage est interdite.

FIGURE 32 Classement de salubrité des zones conchylicoles pour les mollusques bivalves de groupe 2.

n'est classé en A sur le littoral de Seine-Maritime [PRÉFECTURE DE SEINE-MARITIME, 2014; PRÉFECTURE DU CALVADOS, 2008]. Pour les zones non interdites, la pêche de loisir est possible en respectant des règles de bonnes pratiques qui permettent de limiter les risques sanitaires (choisir les sites de pêche les moins impactés par les pressions de contamination, se renseigner sur les fermetures temporaires des sites surveillés par les services sanitaires, conserver le produit de sa pêche au frais, temps de cuisson suffisant pour réduire les risques microbiologiques...) et réduire la pression environnementale (adapter sa pêche à sa consommation, respecter les tailles minimales de pêche, replacer les cailloux...).

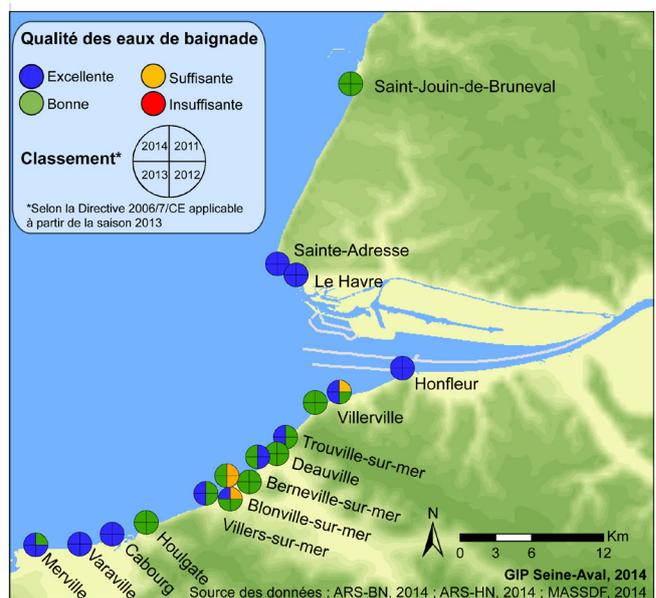


FIGURE 33 Qualité des eaux de baignades (2011-2014).

La pratique de la baignade peut être source de risques sanitaires. Les risques principaux sont liés à une dégradation de la **qualité microbiologique** de l'eau qui peut être à l'origine de gastro-entérites ou d'affection ORL ou respiratoire. La qualité microbiologique des eaux de baignades est suivie durant la saison estivale est conduit à un classement des plages des surveillées. Cela concerne l'ensemble des zones accessibles au public, où la baignade est habituellement pratiquée par un nombre important de baigneurs et qui n'ont pas fait l'objet d'un arrêté d'interdiction. Le classement des eaux de baignade se fait par une méthode statistique sur la base d'analyses microbiologiques réalisées pendant 4 années consécutives, par comparaison à des seuils sur des germes indicateurs de contamination fécale. Le respect de ces seuils garantit une baignade sans risque significatif sur la santé. Sur le littoral de la baie de Seine orientale (d'Antifer à Ouistreham), 17 sites sont surveillés et présentent majoritairement une bonne ou excellente qualité des eaux de baignade [FIGURE 33; ARS; MASSDF, 2014].

D. DES PERCEPTIONS SOCIALES QUI ÉVOLUENT

Les enquêtes sociologiques permettent de recueillir la vision des habitants d'un territoire sur une problématique. Pour la qualité des eaux, il est ainsi possible d'analyser la perception de riverains sur la contamination de l'estuaire et sur le risque chimique associé. Basées sur des ressentis, un vécu ou des éléments plus tangibles, ces enquêtes sont également une manière d'appréhender la conscience collective sur la présence d'éléments polluants dans le fleuve et sur ses berges. La connaissance des traitements et réglementations mis en place pour réduire les flux et les effets néfastes des contaminants est un autre axe abordé par ces enquêtes. Plus globalement, elles sont une ressource pour apprécier les relations entre les habitants et leur environnement et les facteurs influençant leur perception du milieu.

Les habitants de l'estuaire de la Seine émettent un jugement sévère sur la qualité de l'eau de l'estuaire. En effet, 61 % de la population interrogée l'estime de très mauvaise ou mauvaise qualité et uniquement 8 % des questionnés la jugent de bonne ou d'excellente qualité. En posant directement la question « *Selon vous, existe-t-il une pollution chimique des eaux de la Seine ?* », 86 % des personnes interrogées répondent positivement et perçoivent donc très nettement



© Seine-Aval

l'existence d'une pollution chimique dans l'estuaire de la Seine. Cette perception négative est d'autant plus marquée chez les jeunes et les personnes vivant à proximité d'un paysage aménagé ou industrialisé. À l'inverse, l'image est plus positive chez les personnes en contact avec l'estuaire (pêche, activités nautiques, baignade...) [SIROST ET AL., 2006]. Ces résultats renvoient aux éléments d'interprétation suivants :

- l'âge et la capacité à situer dans le temps l'évolution de la Seine ;
- l'expérience du fleuve directement dépendante d'une ou plusieurs activités (navigation, pêche, promenade et détente) ;
- le poids de l'écologie dans la société, avec une sensibilisation plus forte des nouvelles générations et une médiation plus présente aujourd'hui.

Un niveau de conscience élevé des risques sanitaires liés à la contamination des produits de la mer semble également émerger des réponses apportées par les forts consommateurs de ces produits (250 personnes interrogées au Havre) : 81 % des personnes interrogées répondent positivement à la

question « La pollution de la mer présente-t-elle un risque majeur pour la santé via la consommation de produits de la mer ? » et citent les HAP, les métaux ou les PCB comme étant présents dans les produits de la mer [LEBLANC ET AL., 2006].

Des entretiens avec des usagers de l'estuaire de la Seine permettent également de donner une image de l'évolution de sa perception [ASCA, 2014]. Ainsi, les pêcheurs professionnels identifient les pollutions de l'eau comme des éléments forts dans l'évolution de l'estuaire et de ses ressources, avec une dégradation de la qualité des eaux constatée dès les années 1960 et maximale dans les années 1970 (nappes d'hydrocarbures ; mousses liées aux détergents ; fortes mortalités de poissons ; disparition d'espèces comme l'éperlan, l'alose, le saumon ou la truite de mer ; etc.). Le constat des pêcheurs de loisirs est le même, avec une activité qui décline dans les années 1970 pour se tourner vers les plans d'eau et les étangs. Plus généralement, cette « mauvaise réputation » de la Seine à la fin des années 1970 impacte les nombreux usages de loisirs et détourne les habitants de leur fleuve. Après ces « années noires », des améliorations sont constatées et reliées à une réglementation plus stricte des rejets industriels et la réhabilitation des stations d'épuration urbaines. Les pollutions sont moins visibles, le taux d'oxygène remonte et des espèces de poissons disparues sont de nouveau pêchées. C'est par exemple le cas de l'éperlan dont les abondances augmentent depuis 2003, alors qu'il était encore rare à la fin des années 1990 [MORIN ET AL., 2010 ; DUHAMEL ET AL., 2012]. Le saumon atlantique, espèce également très sensible aux déficits en oxygène, est observé à la passe à poisson de Poses depuis le début du suivi en 2008, alors qu'il avait disparu de l'estuaire [CIOLFI & PAPLOREY, 2012]. Progressivement et en lien avec cette amélioration constatée et la valorisation de ses berges, l'estuaire de la Seine redevient un territoire attractif pour les usages ludiques (promenade, activités nautiques, pêche de loisir, etc.). Cette reconquête de l'estuaire de la Seine doit s'accompagner d'une information claire sur i) l'état du milieu, ii) le niveau de risque lié à chaque pratique et iii) les mesures de gestion et de bonne pratique à respecter, afin de concilier ces usages avec un bon état écologique du milieu.

CONCLUSION

La qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine est le reflet des pressions passées et actuelles issues des activités menées sur son bassin versant. Le constat historique de qualité très dégradée des eaux de la Seine a aujourd'hui bien évolué et de nombreuses améliorations sont à noter et à 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 STEP pour le traitement des effluents urbains; 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. La remobilisation potentielle des contaminants stockés en profondeur dans certaines vasières ou présents dans le lit majeur de la Seine est à considérer comme une source secondaire de contaminants pouvant se retrouver dans le milieu et représenter des flux non négligeables. Le maintien des flux de nitrates à la mer à un niveau élevé est une problématique toujours d'actualité. L'exposition de la faune aquatique à un cocktail de contaminants (HAP, PCB, pesticides, PBDE, phtalates, résidus médicamenteux, etc.) pose également question, que ce soit

- I) pour les effets environnementaux directs sur ces organismes,
 - II) pour les répercussions sur les populations ou les écosystèmes,
 - III) ou pour les risques sanitaires si ces produits sont consommés (coquillages, poissons).
- L'amélioration de la connaissance est également un enjeu fort pour apporter des éléments d'aide à la décision et à la gestion. Des recommandations ou pistes de travail peuvent ainsi être proposées sur les différentes composantes de la qualité des eaux, à savoir :
- les **sources de contaminants**: caractériser plus finement les différentes sources de contaminants à l'estuaire et suivre leur évolution temporelle; identifier et quantifier les « stocks » de contaminants potentiellement remobilisables;
 - l'**impregnation environnementale**: favoriser la surveillance sur des milieux intégrateurs comme le sédiment ou le biote; déployer des techniques innovantes de suivi (échantillonneurs passifs) pour les substances présentes à l'état de trace; développer des méthodes analytiques pour

- des nouveaux contaminants comme les nanoparticules;
- les **effets de la contamination**: systématiser l'utilisation de tests d'écotoxicologie; prendre en compte la biodisponibilité des contaminants dans l'évaluation des risques; évaluer l'exposition de la faune aquatique en considérant l'ensemble de la chaîne trophique (du plancton au super-prédateur); faire le lien avec la santé humaine via l'exposition à l'homme.

Au-delà de ces pistes pour consolider la connaissance actuelle des sources de pression, de la qualité des eaux et des effets de la contamination, il est également important de renforcer la compréhension des processus hydro-sédimentaires, physico-chimiques et biologiques à la base du fonctionnement estuarien et permettant d'assurer les services écosystémiques en lien avec la qualité des eaux. Par exemple, la bonne compréhension des processus hydrosédimentaires qui s'appliquent à l'estuaire de la Seine peut permettre d'affiner la connaissance de la dynamique des contaminants (transport, dilution) et identifier des zones de stockage potentielles. Une meilleure quantification du rôle des végétaux (algues, roseaux, ripisylve) dans la dénitrification pourrait permettre quant à elle de mieux estimer le pouvoir épurateur de l'estuaire de la Seine et aider à proposer des pistes de restauration cohérente avec une baisse des flux de nitrates à la mer. Une caractérisation plus fine de la nature et des propriétés de la matière organique (particulaire et dissoute) permettrait de mieux caractériser son rôle dans la dynamique des nutriments et des contaminants organiques ou métalliques, notamment dans la zone du bouchon vaseux. En effet, une forte teneur en matière organique particulaire peut influencer la stabilité et la biodisponibilité des contaminants et sa composition joue sur les mécanismes impliqués dans le transport et la transformation des nutriments et des contaminants. L'identification des liens trophiques entre les différentes composantes de l'écosystème serait également une base indispensable pour appréhender le transfert des contaminants dans la chaîne trophique. La distribution des contaminants dans les organes et l'identification des voies de métabolisations éventuelles devraient également permettre de mieux estimer l'exposition de la faune aquatique et de l'Homme à la multi-contamination de l'estuaire.

Dans son axe 3 « Anthropisation, contaminations: où en est le milieu? », le programme de recherche Seine-Aval 5 (2013-2017) aborde ces questions. Pour apporter des éléments de réponse, plusieurs projets de recherche sont en cours et contribueront à améliorer la connaissance sur la dynamique des contaminants et la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine [GIPSA, 2014].

ANNEXE : LES DONNÉES DE SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX

LES MATRICES DE SUIVI

Les eaux superficielles correspondent aux eaux ouvertes sur l'atmosphère. Elles comprennent à la fois les eaux courantes (rivières, fleuves, estuaires...) et non courantes (océans, lacs, étangs, réservoirs...). Du fait de la grande variabilité hydrologique (crues/étiages, courants) et physico-chimique (concentration en matières en suspension, oxygénation, salinité, etc.) des eaux courantes, le suivi des paramètres physico-chimiques et des contaminants dans ce compartiment ne peut représenter qu'un état ponctuel dans l'espace et dans le temps (lieu et moment de prélèvement). Pour être exploitables dans le cadre d'un état des lieux de la contamination, les mesures des micropolluants dans l'eau superficielle doivent être réalisées très régulièrement (plusieurs fois par an). Pour certaines substances organiques (PBDE, phtalates, pesticides, résidus médicamenteux, etc.), leur mesure dans l'eau fait appel des techniques analytiques dont les limites de détection et de quantification sont souvent proches ou supérieures aux concentrations présentes dans l'eau (de l'ordre de la dizaine de ng/l). À titre illustratif, on pourra mentionner que 92 % des analyses étaient inférieures à la limite de quantification lors de la campagne de suivi sur eau réalisée sur les masses d'eau côtières en 2012-2013.

Pour pallier ce biais, des techniques basées sur l'utilisation de **systèmes intégrateurs/concentrateurs** se développent (échantillonneurs passifs de type POCIS pour les micropolluants organiques hydrophiles, SPMD pour les molécules organiques hydrophobes, SBSE pour les composés organiques, etc.). Elles ne sont pas encore utilisées en routine, mais font l'objet de nombreux tests (AESN, Ifremer, laboratoires universitaires). Pour les paramètres physico-chimiques, la mise en place d'un suivi haute fréquence peut être une alternative et permettre de comprendre et intégrer les variations aux différentes échelles temporelles (de la marée à l'échelle pluriannuelle).

La surveillance des contaminants dans les **tissus d'organismes vivants** (coquillages, crustacés, poissons) est un bon moyen pour évaluer la contamination chimique du milieu. En effet, les organismes vivants ont la faculté, en particulier les organismes filtreurs comme les huîtres et les moules, d'accumuler les contaminants présents dans l'eau jusqu'à atteindre un équilibre avec celle-ci (organismes bioaccumulateurs). Les teneurs en contaminants mesurées dans les organismes sont

ainsi le reflet d'une situation moyenne sur les quelques mois précédant le prélèvement et sont représentatives de l'imprégnation chronique du milieu.

Si les organismes vivants intègrent la contamination sur plusieurs mois, les **sédiments** peuvent conserver dans leurs couches successives toute l'histoire chimique d'une région. En fonction des vitesses de sédimentation, des possibilités de remise en suspension et de la bioturbation (mélange des sédiments dû aux organismes vivants), les premiers centimètres de sédiment sont un mélange des quelques années précédant leur dépôt. La réalisation de carottes sédimentaires peut permettre de remonter le temps sur plusieurs dizaines d'années. Cependant, des phénomènes naturels ou anthropiques (crues, dragages, etc.) peuvent perturber cet agencement, en provoquant par exemple, l'érosion des dépôts récents ce qui a pour effet d'entraîner leur disparition dans les séries chronologiques.

LES RÉSEAUX DE SUIVI

De nombreux réseaux de suivi sont déployés dans l'estuaire de la Seine, la proche baie de Seine [FIGURE 34] et sur le littoral normand :

- **Le suivi de la qualité des eaux de la Seine à l'aval de Poses.** Créé en 1956 par la Cellule AntiPollution (CAP) de la Seine, il s'est progressivement enrichi et englobe aujourd'hui des mesures sur quatre supports : eau (physico-chimie, chimie, bactériologie), sédiment (chimie), macro-invertébrés benthiques (IBGA) et diatomées (IBD) [AESN & DDTM76, 2012]. Il a été redéfini en 2007 pour répondre aux exigences de la DCE pour les éléments « physico-chimie » et « chimie » et a intégré les Réseaux de Contrôle et de Surveillance (RCS), de Contrôle Opérationnel (RCO) et Complémentaire de Bassin (RCB) gérés par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie [FOUSSARD, 2014]. Ces réseaux constitués de 18 points de suivi prélevés 6 à 24 fois par an permettent d'évaluer l'état général des eaux et les tendances d'évolution au niveau d'un bassin, à travers le suivi physico-chimique et chimique de ces stations de mesures représentatives du fonctionnement global de la masse d'eau. Ils sont centrés, non pas sur le suivi des pressions et des pollutions, mais bien sur le suivi des milieux aquatiques sur le long terme, notamment pour évaluer les conséquences des modifications des condi-

tions naturelles (changement climatique par exemple) et des activités anthropiques.

- **Le Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du milieu marin (ROCCH).** Créé en 2008 sur la base du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO) qui existait depuis 1974, ce réseau est coordonné par l'Ifremer pour le compte du Ministère en charge de l'environnement et répond aux obligations nationales, communautaires et internationales de surveillance chimique du milieu marin (DCE, conventions OSPAR et de Barcelone). Il permet un suivi de la contamination chimique du littoral et du milieu marin sur trois matrices : eau, sédiment et biote ; ainsi que le suivi des effets biologiques du TBT (impo-sex) sur la nucelle au niveau du littoral [IFREMER, 2014A].
- **Le Réseau de surveillance du Phytoplancton et des Phycotoxines (REPHY).** Créé en 1984 par l'Ifremer, il permet de recenser les événements tels que les eaux colorées, les efflorescences exceptionnelles et les proliférations d'espèces toxiques ou nuisibles pour la faune marine ou produisant des toxines dangereuses pour les consommateurs de coquillages. Il se base sur un suivi des espèces phytoplanctoniques dans les eaux côtières et des toxines dans les coquillages [IFREMER, 2014B].
- **Le Réseau Hydrologique du Littoral Normand (RHLN).** Créé en 2000 par l'Ifremer, l'AESN et les DIREN et Haute et Basse-Normandie, il est a été redéfini en 2009 pour répondre aux besoins de surveillance de la DCE pour les

éléments « phytoplancton » et « physico-chimie » dans les eaux côtières normandes. Pour le littoral haut-normand, 4 points d'échantillonnage permettent un suivi de la qualité des masses d'eau littorales, avec une évaluation de leur niveau trophique et de leur degré d'eutrophisation [IFREMER, 2014C].

- **Le Réseau national de surveillance de la qualité des eaux et des sédiments des ports maritimes (REPOM).** Il a été mis en place en 1997 par le ministère en charge de l'environnement pour identifier l'impact des installations portuaires sur le milieu. Il permet un suivi dans l'eau et les sédiments des bassins portuaires.
- **Le suivi coquillage littoral 76.** Réalisé en partenariat avec l'ARS et l'AESN, ce réseau vise le suivi bactériologique (+ MES et nutriments) des rejets littoraux (stations d'épuration, résurgences, fleuves côtiers et réseaux pluviaux) en vue de qualifier leur impact sur les eaux de baignade et les bivalves filtreurs (suivi bactériologique, micropolluants et radioactivité) sur la façade seino-marine.
- **Le Système de surveillance automatisée de la physico-chimie en estuaire de Seine (SYNAPSES).** Mis en place en 2012 par le GIP Seine-Aval et le Grand Port Maritime de Rouen, ce réseau de mesure en continu est déployé sur six sites le long de l'estuaire de la Seine pour la mesure à haute fréquence de paramètres physico-chimiques (turbidité, oxygène, pH, conductivité, chlorophylle a) [GIPSA, 2014].

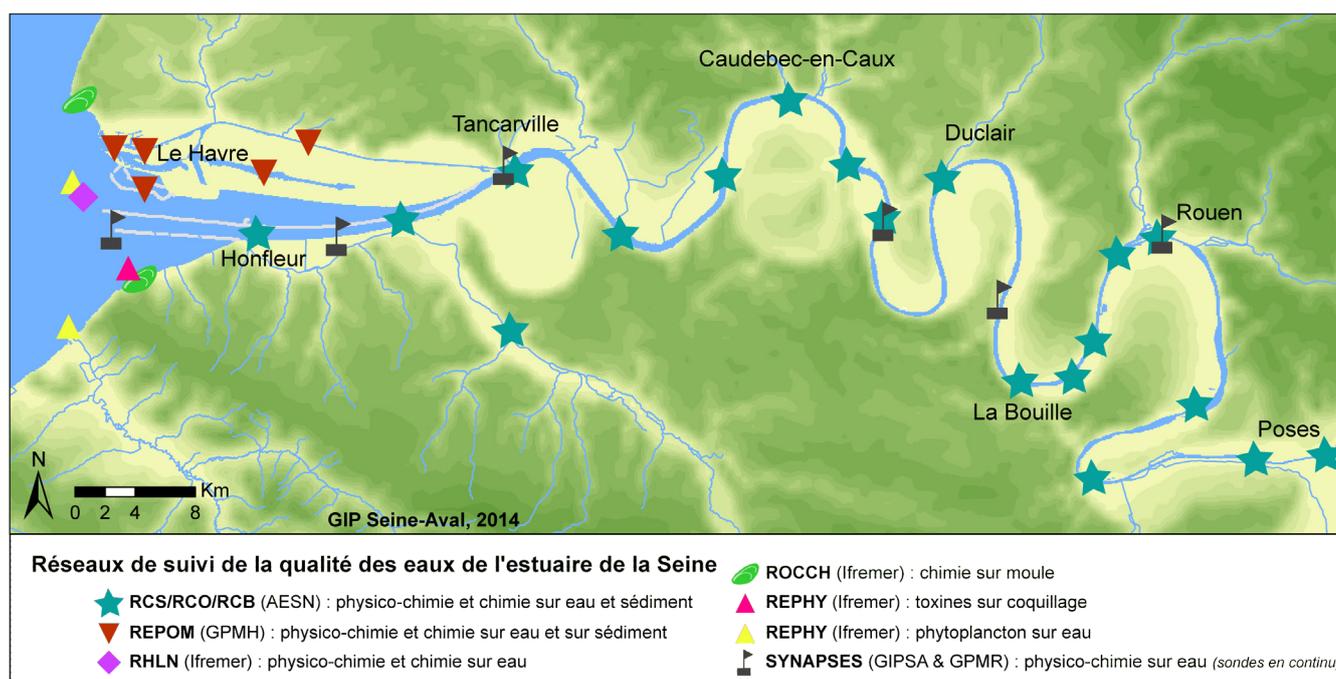


FIGURE 34 Stations de mesure des réseaux de suivi de qualité des eaux sur l'estuaire de la Seine.

LES CAMPAGNES PONCTUELLES ET LES ÉTUDES

En complément des suivis pérennes du milieu, des campagnes ponctuelles et des études dédiées permettant d'affiner la connaissance de la qualité des eaux. C'est par exemple le cas des études/campagnes suivantes :

- **L'Action de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans l'Eau pour les installations classées (3RSDE).** Cette action a été définie en 2002 par circulaire du ministère en charge de l'environnement et étendue en avril 2004 à des installations non classées telles que les stations d'épuration urbaines. Son objectif était de rechercher et quantifier les substances dangereuses rejetées par les industries et les STEP, afin de détecter les principaux secteurs émetteurs et non émetteurs par substance et d'élaborer les mesures de réduction appropriées. Cette action complète les données d'auto-surveillance des exploitants, qui visent à vérifier le respect des valeurs limites imposées par l'arrêté préfectoral d'autorisation ou l'arrêté ministériel de prescriptions générales régissant le fonctionnement des installations [INERIS & MEEDDAT, 2009; MEDDE & INERIS, 2014].
 - **Le Plan local PCB Haute-Normandie.** Acté en 2008 par le préfet de la région Haute-Normandie, cette déclinaison locale du plan national PCB est pilotée par la DREAL-HN. Il a notamment permis une surveillance des PCB dans les sédiments et le poisson des cours d'eau de Haute-Normandie et une synthèse de l'imprégnation environnementale [FISSON, 2012]. De nouvelles campagnes de prélèvement sont programmées pour les années à venir.
 - **Le suivi des produits de la pêche et de l'aquaculture.** Ce suivi est géré par l'Agence de l'Eau Seine Normandie dans un objectif de connaissance des niveaux d'imprégnation en micropolluants et de leur évolution dans le biote. Il permet un suivi des contaminants chimiques dans les coquillages, les crustacés et les poissons dans les eaux douces et marines de Normandie.
 - **Les suivis environnementaux.** Les projets pouvant impacter le milieu estuarien ou marin (dragage d'entretien ou d'approfondissement des chenaux de navigation, extraction de granulats, aménagements portuaires, etc.) font l'objet de suivis environnementaux, avec notamment une composante « qualité de l'eau ». La qualité des sédiments dragués par les Grands Ports Maritimes (de Rouen et du Havre) est ainsi suivie annuellement, tout comme la qualité des eaux et des sédiments des sites de clapage (engainement, site du Kannik, site d'Octeville) ou des zones d'extraction de granulats.
 - **Les projets scientifiques Seine-Aval.** Créé en 1995, le programme scientifique Seine-Aval vise à comprendre le fonctionnement environnemental de l'estuaire de la Seine, pour mieux le gérer. La thématique de la qualité des eaux est l'un des axes majeurs de recherche développés depuis près de 20 ans dans les phases successives du programme. Lors de la phase 4 du programme (2008-2012), le GIP Seine-Aval a ainsi financé plusieurs projets scientifiques qui ont permis d'acquérir de nombreux résultats [GIPSA, 2013]:
 - Historique de la contamination chimique et microbiologique (projet RHAPSODIS [BOUST ET AL., 2012]);
 - Sources en contaminants métalliques contemporaines et historiques (projet ISOMET [CHIFFOLEAU ET AL., 2012]);
 - Présence et sources de résidus médicamenteux (projet MEDSEINE [BUDZINSKI ET AL., 2012], projet FLASH [PETIT ET AL., 2012]);
 - Apports en nutriments et développement algaux (projet NEREIS [GARNIER ET AL., 2012]);
 - Génotoxicité des sédiments des vasières et du bouchon vaseux (projet TOXSEINE [Cachot et al., 2012], projet BCG [COUTEAU ET AL., 2012]);
 - Sources et devenir des contaminants microbiens (projet FLASH [PETIT ET AL., 2012]).
- De nouveaux projets scientifiques ont débuté en 2014 (Seine-Aval 5) et permettront de mettre à jour et améliorer la connaissance sur la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine [GIPSA, 2014].

ABRÉVIATIONS

3RSDE : Recherche et Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans l'Eau	MEDDE : Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie
ADN : Acide DésoxyriboNucléique	MEEDDAT : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
AESN : Agence de l'Eau Seine-Normandie	MES : Matières En Suspension
AMPA : Acide aminométhylphosphonique	NH₄ : Ammonium
ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire	NO₃ : Nitrate
ASP : Amnesic Shelfish Poisoning	OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
CEDRE : CEntre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux	ORL : Oto-Rhino-Laryngologie
CLP : Cellule de Lutte contre la Pollution	PBDE : PolyBromoDiphénylEthers
CODAH : COmmunauté de l'Agglomération Havraise	PCB : PolyChloroBiphényles
CREA : Communauté de l'agglomération Rouen-Elbeuf-Austrerberthe	PCB-DL : PolyChloroBiphényles Dioxine Like
DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours	PCBi : PolyChloroBiphényles indicateurs
DBP : DiisoButylPhtalate	PCB-NDL : PolyChloroBiphényles Non Dioxine Like
DCE : Directive Cadre sur l'Eau	PNRBSN : Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande
DCO : Demande Chimique en Oxygène	PO₄ : Orthophosphate
DDT : DichloroDiphenylTrichloroethane	POCIS : Polar Organic Chemical Integrative Sampler
DDTM 76 : Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime	PS : Poids Sec
DEHP : Di (2- EthylHexyl) Phtalate	PSP : Paralytic Shelfish Poisoning
DEP : DiEthylPhtalate	Pt : Phosphore total
DRAAF-HN : Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Normandie	RCB : Réseau Complémentaire de Bassin
DREAL-HN : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – Haute-Normandie	RCO : Réseau de Contrôle Opérationnel
DSP : Diarrheic Shelfish Poisoning	RCS : Réseau de Contrôle de Surveillance
EH : Équivalent Habitant	REPHY : REseau de surveillance du PHYtoplancton et des phycotoxines
GEODE : Groupe d'Etudes et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement	REPOM : REseau national de surveillance de la qualité des eaux et des sédiments des POrts Maritimes
GIPSA : Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval	RHLN : Réseau Hydrologique du Littoral Normand
GPMH : Grand Port Maritime du Havre	ROCCH : Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du milieu marin
GPMR : Grand Port Maritime de Rouen	SAU : Surface Agricole Utile
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	SBSE : Stir Bar Sorptive Extraction
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER	SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
INERIS : Institut National de l'Environnement industriel et des RISques	SGG : Secrétariat Général du Gouvernement
IPCHN : Inventaire du Patrimoine Culturel région Haute-Normandie	SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
LERN : Laboratoire Environnement Ressources de Normandie	SPMD : SemiPermeable Membrane Device
MAAAF : Ministère de l'Agriculture de l'Agro-Alimentaire et de la Forêt	STEP : STation d'EPuration
MASSDF : Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et des Droits des Femmes	SYNAPSES : SYstème de surveillaNce Automatisée de la Physico-chimie en estuaire de Seine
	TBT : TriButylEtain
	TIE : Toxicity Identification Evaluation
	TMA : Teneur Maximale Admissible

GLOSSAIRE

Anthropique : Relatif à l'activité humaine.

Bassin versant : Territoire qui draine l'ensemble des eaux vers même exutoire (lac, cours d'eau, océan, etc.).

Bioaccumulation : Capacité d'un organisme à absorber et concentrer un composé chimique.

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

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

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

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.

Clapage : Vidange en mer des produits de dragage en un lieu réservé à cet effet.

Contaminant : Composé chimique présent dans un compartiment de l'environnement (eau, sédiment, biote).

Dragage : Opération d'extraction des matériaux (sable, gravier, vase) déposés au fond d'un cours d'eau.

Écotoxicologie : Science qui étudie le devenir des contaminants dans l'environnement (comportement et effets) et les conséquences biologiques et écologiques qui en découlent.

Hydrodynamique : Science qui étudie le mouvement des eaux, en lien avec le milieu dans lequel elles évoluent.

Hydrosédimentaire : Science qui étudie la dynamique des sédiments, au regard des conditions hydrodynamiques.

Benthos : Ensemble des organismes vivants en relation étroite avec les fonds subaquatiques. Il comprend notamment le **phytobenthos** (végétaux) et le **zoobenthos** (animaux). (vs Pelagos*)

Matières en suspension : Ensemble des particules solides de petite taille transportées au sein de la masse d'eau.

Matière organique : Matière fabriquée par les êtres vivants (vs matière minérale). Elle correspond à la biomasse vivante ou morte d'un écosystème.

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.

Micropolluant : Substance inexistante (xénobiotique) ou présente à une concentration très faible dans le milieu à l'état naturel, et susceptible d'induire des effets négatifs dans le milieu à très faible concentration. Les **micropolluants minéraux** (métaux et métalloïdes) se distinguent des **micropolluants** organiques (HAP, pesticides, PBDE,...).

Necton : Désigne les animaux aquatiques pouvant se déplacer librement malgré les courants. (vs Plancton)

Nutriment : Ensemble des éléments nécessaire à la croissance des végétaux (principalement l'azote, le phosphore, le potassium et la silice).

Pelagos : Ensemble des organismes aquatiques vivant en pleine eau sans lien étroit avec le fond. (vs Benthos)

Pesticide : substance chimique destinée à lutter contre des organismes considérés comme nuisibles. Sont concernés les **herbicides** (lutte contre les mauvaises herbes), les **insecticides** (lutte contre les insectes nuisibles), les **fongicides** (lutte contre les moisissures et les parasites fongiques des plantes), les **molluscicides** (lutte contre les mollusques), etc.

Perturbateur endocrinien : Se dit d'un contaminant affectant le système endocrinien d'un organisme.

Plancton : Désigne les organismes vivant en eaux douces, saumâtres ou salées et flottant passivement dans la colonne d'eau. Il peut être végétal (**phytoplancton**) ou animal (**zooplancton**). (vs Necton*)

Polluant : Contaminant ayant une incidence sur l'écosystème.

Pollution : altération de l'eau pouvant rendre son utilisation dangereuse et/ou perturbant l'écosystème aquatique en exerçant une toxicité.

Rémanence : Caractérise la durée de présence d'une substance chimique dans l'environnement.

Toxicité : Effet néfaste d'une substance chimique sur un organisme. Elle peut être de diverse nature : **neurotoxicité** (effets sur le système nerveux), **génotoxicité** (effets sur le génome), **immunotoxicité** (effets sur le système immunitaire), **reprotoxicité** (effets sur la reproduction), etc.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) & Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime (DDTM-76), 2012. **Suivi de la qualité des eaux de la Seine à l'aval de Poses – Année 2011**. Rapport d'étude, 124p.
- Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), 2013. **État des lieux du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands**. Adopté par le comité de bassin – délibération n° CB 13-08 du 5 décembre 2013, 329p.
- ASCA, 2014. **Rétrospective sur l'estuaire de la Seine : quelle « histoire écologique » vécue par les usagers ?** Projet PERCEES. Étude réalisée pour le GIP Seine-Aval, 32p.
- Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), 2014. **Traces historiques de radionucléides artificiels dans les dépôts sédimentaires de la Seine : l'ASN considère qu'il n'y a pas de risque sanitaire**. Communiqué de presse du 17/06/2014
- Belin C., 2004. **Bilan sur 20 ans des interdictions administratives de vente et de ramassage de coquillages, pour présence de phycotoxines, sur le littoral français**. Rapport IFREMER, 84 p.
- Billen G., Garnier J., Némery J., Sebilo M., Sferratore A., Barles S., Benoit P., Benoit M., 2007. **A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum**. *Science of the total environment* 375, p. 80-97
- Billen G. & Garnier J., 2006. **Diagnostic du fonctionnement biogéochimique du continuum Estuaire-panache de la Seine (DIAPASON)**. Projet Seine-Aval 3, 17 p.
- Billen G., Garnier J., Servais P., Brion N., Ficht A., Even S., Berthe T., Poulin M., 1999. **L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique**. Programme Scientifique Seine-Aval, Fascicule n°5, 31 p. Editions Ifremer, Plouzané (France). ISBN 2-84433-030-4
- Bocquené G., Abarnou A., Boulon A.I., Dallet M., Stril P., Bourretz O., 2012. **Projet RISKENSEINE : Risque sanitaire et environnemental d'origine chimique dans l'estuaire de la Seine**. Projet Seine-Aval 4, 114p.
- Boust D. (coord.), Berthe T., Lesueur P., 2012. **Projet RHAPSODIS : Reconstitution de l'Histoire des Apports Particulaires à la Seine par l'Observation De leur Intégration Sédimentaire**. Projet Seine-Aval 4, 163 p.
- Budzinski H. (coord.), Forget-Leray J., Aït-Aïssa S., 2012. **Projet MEDSEINE : Étude de la contamination par les médicaments de l'estuaire de la Seine. Application des capteurs passifs à un meilleur diagnostic de leur présence, flux et impact toxique**. Projet Seine-Aval 4, 53p.
- Cachot J. (coord.), Vicquelin L., Landi L., Clérandeau C., Pichon A., Barjhoux I., Lebihanic F., Le Menach K., Dévier M.H., Giraudel J.L., Gardia Parege C., Budzinski H., Forget-Leray J., Boulangé-Lecomte C., Petrucciani N., Barka S., Lesueur T., Minier C., Marie S., Ouddane B., Hamzeh M., Deloffre J., 2012. **Projet TOXSEINE : Analyse de la toxicité globale et identification des composés toxiques à risque dans l'estuaire de la Seine**. Projet Seine-Aval 4, 78p.
- Cachot J., Lacroix S., Winn R., Norris M., Budzinski H., Le Menach K. et Law M., 2006. **Évaluation des effets biologiques résultant d'une exposition chronique à des mélanges d'hydrocarbures aromatiques polycycliques sur un poisson modèle, le medaka japonais, *Oryzias latipes***. Projet Seine-Aval 3, 19 p.
- Cachot J., Andrée V., Prévost V., Sichel F., Le Goff J., Daon S., Budzinski H., Augagneur S., Le Menach K., Peluhet L., Laroche J., Quiniou L., Moraga D., Le Pennec M., Martinez J.C., David E., Marchand J., Rocher B., Minier C. et Manduzio H., 2005. **Évaluation intégrée des effets des contaminants à l'échelle individuelle et populationnelle sur deux espèces de bivalves, *Dreissena polymorpha* et *Mytilus edulis*, dans l'estuaire et l'embouchure de Seine**. Projet Seine-Aval 3, 33 p.
- Cellule de Lutte contre la Pollution (CLP), 1991. **Du barrage de Poses à l'estuaire, 30 ans de suivi de la qualité de la Seine**. 19p.
- Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE), 1997. **Inventaire et méthode d'évaluation des « petites » pollutions littorales : cas des macro-déchets**. Rapport réalisé pour les Agences de l'Eau, 53p.
- Chiffolleau J.F. (coord.), Sonke J.E., Auger D., Bretaudeau J., Joquet T., Larrieu M., Laffont L., Prunier J., Rozuel E., Zouiten C., 2012. **Projet ISOMET : Étude de la signature isotopique des métaux dans l'estuaire de la Seine. Une information essentielle pour le traçage et la discrimination des sources et processus**. Projet Seine-Aval 4, 45p.
- Ciolfi C. & Paplorey B., 2012. **Comité de pilotage du projet de système de vidéo-comptage à la chambre d'observation de Poses - Résultats 2011**. Rapport du Syndicat mixte de la base de plein air et de loisirs de Léry-Poses, 80p.
- Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH), 2013. **Rapport annuel 2012 sur le prix et la qualité du service public communautaire d'assainissement de la CODAH**. 144p.

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Autre publication

Site web

- Communauté de l'agglomération Rouen-Elbeuf-Austrerberthe (CREA), 2013. **Rapport annuel 2012 sur le prix et la qualité du service public communautaire d'assainissement de la CREA**. 304p.
- Couteau J. (*coord.*), Forget-Leray J., Budzinski H., Cachot J., Cuvilliez A., 2012. **Projet BCG : Cartographie de la géotoxicité en estuaire de Seine et étude du transfert des contaminants génotoxiques du milieu vers les organismes**. Projet Seine-Aval 4, 61p.
- Cugier P., Billen G., Guillaud, J.F., Garnier, J., Ménesguen A. 200). **Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading**. J. Hydrol. 304: 381-396.
- Cumunel C. & Guingand A., 2012. **Transport maritime et ports**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 18p.
- Dargnat C. & Fisson C., 2010. **Les PCB dans le bassin de la Seine et son estuaire**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 134p.
- Dargnat C., 2008. **Sources, transfert et devenir des phtalates sur le bassin versant de la Seine. Caractérisation des dangers pour l'environnement et les écosystèmes**. Thèse de doctorat, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie, 320p.
- Dillies R., 2010. **Historique des apports en contaminants dans l'estuaire de la Seine sur les 50 dernières années – étude portée sur les phosphogypses**. Rapport de stage de Master 2, Université de Rouen, 30 p.
- Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Normandie (DRAAF-HN), 2013. **Atlas agricole et rural de Haute-Normandie – Édition 2013**. 51p.
- Dubois A., Brannellec C., Bourrain X., 2012. **Apports fluviaux en nutriments et en matière organique**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 17p.
- Duhamel S. (*coord.*), Feunteun E., Cerisier S., Bacq N., De Roton G., Mayot S., Gouneau N., Lefrançois T., Berno A., Balay P., 2012. **Projet ICHTYO : Structuration spatio-temporelle des assemblages d'espèces de poissons dans l'estuaire de la Seine. État actuel et incidences du paysage aquatique sur la fonctionnalité des habitats**. Projet Seine-Aval 4, 30p. et annexes
- Dupont J.P., Valdès D., Slimani S., Jardani A., Brown J., Mouhri A., Rodet J., Masséi N., Laignel B., 2009. **Programme de suivi des points d'eau potable affectés par les problèmes de turbidité au sein du département de l'Eure – synthèse du contexte du fonctionnement hydrologique et de la vulnérabilité des ressources en eaux du Département de l'Eure**. 55p.
- Eaufrance, 2014. **Atlas des zones conchylicoles**. [en ligne] <http://www.zones-conchylicoles.eaufrance.fr/>
- Fisson C., Leboulenger F., Lecarpentier T., Moussard S., Ranvier G., 2014. **L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution**. Fascicule Seine-Aval 3.1, 55p.
- Fisson C., 2012a. **Imprégnation des cours d'eau haut-normands par les PCB – Exploitation des résultats du plan local PCB Haute-Normandie 2008-2011**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 29p.
- Fisson C., 2012b. **Imprégnation du compartiment aquatique de Haute-Normandie par les contaminants chimiques**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 30p. et annexes cartographiques.
- Foussard V., 2014. **Réseaux de contrôle de Surveillance des masses d'eau de transition de la façade Mer du Nord – Manche – Atlantique. Bilan sur les programmes de surveillance mis en œuvre au cours du SDAGE 2010-2015**. Rapport d'étude, 124p.
- Garnier J. (*coord.*), Riou P., Barles S., 2013. **Projet RESET : Rôle de l'estuaire de Seine dans l'écologie territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires – proposition**. Projet Seine-Aval 5, 18p.
- Garnier J. (*coord.*), Le Gendre R., Passy P., Billen G., Callens J., Cugier P., Tronquart O., Romero E., Riou P., 2012. **Projet NEREIS : Nutrient Export Role on Eutrophication : Indicators and model Scenarios**. Projet Seine-Aval 4, 46p.
- Gerigny O., Henry M., Tomasino C., Galgani F., 2012. **Micro-particules**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 2p.
- Grand Port Maritime du Havre (GPMH), 2014. **Dragages d'entretien du Grand Port Maritime du Havre - Synthèse des suivis réalisés sur la période 2009-2013 dans le cadre de l'arrêté inter préfectoral du 26/10/2009**. Demande de renouvellement de l'autorisation des dragages d'entretien du GPMH – Année 2014, 150p.
- Grand Port Maritime de Rouen (GPMR), 2013. **Expérimentation d'immersion de sédiments de dragage en baie de Seine orientale – premiers résultats des suivis après mes immersions expérimentales**. 222p.

- Grand Port Maritime de Rouen (GPMR), 2009. **Dragages d'entretien du chenal d'accès au port de Rouen et immersion des produits de dragage – Synthèse des suivis réalisés entre 2004 et 2009**. Demande de renouvellement d'autorisation de dragage et d'immersion, 60p.
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2014. **Système de surveillance Automatisé de la Physico-chimie en Estuaire de la Seine (SYNAPSES)**. [en ligne] <http://synapses.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2013. **La phase 4 du programme Seine-Aval : 2008-2012**. Recueil des résumés, 52p.
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2014. **Programme de recherche Seine-Aval 5 : 2013-2017**. Recueil des résumés des projets SA5, 27p.
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2011. **Cartographie des zones riveraines de l'estuaire de la Seine**. Rapport d'études réalisé par RIVE & CS, 117p.
- Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer), 2014a. **Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du littoral (ROCCH)**. [en ligne] http://envlit.ifremer.fr/surveillance/contaminants_chimiques/presentation
- Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer), 2014b. **Réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY)**. [en ligne] http://envlit.ifremer.fr/surveillance/phytoplancton_phycotoxines/presentation
- Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer), 2014c. **Réseau de surveillance Hydrologique et biologique du Littoral Normand (RHLN)**. [en ligne] <http://wwz.ifremer.fr/lern/Observation/Environnement/Chimie-de-l-eau/RHLN>
- Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) & Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), 2014. **Atlas DCE Seine-Normandie**. [en ligne] http://envlit.ifremer.fr/surveillance/directive_cadre_sur_l_eau_dce/la_dce_par_bassin/bassin_seine_normandie/fr/atlas_interactif
- Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) – Laboratoire Environnement Ressources de Normandie (LERN), 2012. **Qualité du milieu marin littoral – bulletin de la surveillance 2011**. 128p.
- Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS) & Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), 2009. **Action Nationale de Recherche et de Réduction des Rejets de Substances Dangereuses dans Les Eaux (AN3RSDE)**. [en ligne] <http://www.ineris.fr/rsde/>
- Inventaire du Patrimoine Culturel région Haute-Normandie (IPCHN), 2008. **Le paysage industriel de la Basse-Seine**. Édité par Connaissance du Patrimoine de Haute-Normandie sous la direction de Claire Etienne. Collection Images du patrimoine, n°249. ISSN n°0299-1020, 264p.
- Kerambrun L. & Evrard E., 2012. **Déchets sur le littoral**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 11p.
- Komarek M., Ettler V., Chrastny V., Mihaljevic M., 2008. **Lead isotopes in environmental sciences: A review**. Environment international, 34 : 562-577
- Lachambre M. & Fisson C., 2007. **La contamination chimique : quel risque en estuaire de Seine ? Fiches substances, atlas des sources, atlas de la contamination**. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 110p.
- Lagadic L., Caquet T., Amiard J.-C., 1997. **Biomarqueurs en écotoxicologie : Principes et définitions**. In Lagadic L., Caquet T., Amiard J.-C. and Ramade F. (Ed.), Biomarqueurs en écotoxicologie : Aspects fondamentaux. Masson, Paris, p1-9.
- Lazure, P. & Dumas, F., 2008. **An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)**. Advances in Water Resources 31, 233-250
- Leblanc J.C., Sirot V., Volatier J.L., Bemrah-Aouachria N., 2006. **Étude des Consommations Alimentaires de produits de la mer et Imprégnations aux éléments traces, Polluants et Oméga 3 (CALIPSO)**. AFSSA-DGAI-INRA, 162 p.
- Martin D., Branellec C., Bourrain X., Beauvais S., Blanck A., Giacomini E., 2012. **Analyse des sources directes et chroniques en nutriments, en matières en suspension et en matière organique vers le milieu aquatique**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 17p.
- Mazellier P. (coord.), Garric J., Couteau J., 2013. **Projet CRAPPSE : Contamination et réactivité de pesticides et de pharmaceutiques dans l'estuaire de Seine : bilan des contaminations, dégradation et impact toxique – proposition**. Projet Seine-Aval 5, 24p.

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Autre publication

Site web

- Ministère de l'Agriculture de l'Agro-Alimentaire et de la Forêt (MAAAF), 2012. **Ecophyto – Note de suivi 2012 pour la Région Normandie ; évolution 2008-2012 d'indicateurs en zones agricoles et non agricoles et éléments d'interprétation**. 45p.
- Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et des Droits des Femmes (MASSDF), 2014. **Eaux de baignades**. [en ligne] <http://baignades.sante.gouv.fr/>
- Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), 2014. **Pollution des sols : BASOL**. [en ligne] <http://basol.developpement-durable.gouv.fr/>
- Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) & Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS), 2014. **Registre français des émissions polluantes**. [en ligne] <http://www.irep.ecologie.gouv.fr/>
- Morin J. (coord.), Duhamel S., De Roton G., 2010. **Poissons, habitats & ressources halieutiques : cas de l'estuaire de la Seine**. Fascicule Seine-Aval n°2.5, 76p. ISBN 2-84834-057-6
- OSPAR, 2010. **Bilan de santé 2010**. [en ligne] <http://qsr2010.ospar.org/>
- Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande (PNRBSN), 2014. **Seine que j'aime – nettoyage des berges des boucles normandes de la Seine**. [en ligne] <http://www.seinequej aime.fr/>
- Petit F. (coord.), Denamur E., Budzinski H., Leclercq R., Favennec L., Chevê M., Bussi M., Féménias D., Garnier J., 2012. **Projet FLASH : Devenir des antibiotiques, FLux de gènes et de bactéries Antibiorésistantes en estuaire de Seine, exposition à l'Homme**. Projet Seine-Aval 4, 155p.
- Poisson E., Fisson C., Amiard-Triquet C., Burgeot T., Couteau J., Dur G., Durand F., Forget-Leray J., Letendre J., Souissi S., Xuereb B., 2011. **Effets de la contamination chimique. Des organismes en danger ?** Fascicule Seine-Aval 2.7, 68p. ISBN 2-84834-059-2
- Pibot A. & Claro F., 2012. **Impacts écologiques des déchets marins**. Contribution thématique au Plan d'Action pour le Milieu Marin – Manche – Mer du Nord, 13p.
- Préfecture de Seine-Maritime, 2014. **Arrêté du 17 juillet 2014 portant classement de salubrité et surveillance sanitaire des zones de production de coquillages vivants dans le département de Seine-Maritime**.
- Préfecture du Calvados, 2008. **Arrêté du 31 janvier 2008 relatif au classement de salubrité et à la surveillance des zones de production et des zones de reparcage de coquillages vivants dans le département du Calvados**.
- Schott C., Mignolet C., Benoît M., 2009. **Agriculture du bassin de la Seine**. Fascicule PIREN-Seine #5, 79p. ISBN 978-2-918251-04-0
- Sirost O., L'Aoustet O., Ajcardi R., 2006. **Perception du risque chimique chronique lié à la qualité de l'eau chez les acteurs et usagers de l'estuaire de la seine**. Projet Seine-Aval 3, 78 p.
- Secrétariat Général du Gouvernement (SGG), 2014. **Légifrance.gouv.fr – Le service public de la diffusion du droit**. [en ligne] <http://legifrance.gouv.fr>
- SOS Mal de Seine, 2014. **Inventaire des sites pollués de Rouen à la mer**. [en ligne] <http://maldeseine.free.fr/>
- Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), 2014. **Nos équipements**. [en ligne] <http://www.siaap.fr/nos-equipements>
- Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), 2013. **Seine aval demain – la refonte**. [en ligne] <http://www.seineavalde demain.siaap.fr>
- Thieu V., Billen G., Garnier J., 2009. **Nutrient transfer in three contrasting NW European watersheds: the Seine, Somme, and Scheldt Rivers. A comparative application of the Seneque/Riverstrahler model**. Water Research, 43(6):1740- 1754
- Togola A., 2006. **Présence et devenir des substances pharmaceutiques dans les écosystèmes aquatiques**. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 315p.
- Vrel A., Boust D., Lesueur P., Deloffre J., Dubrulle-Brunaud C., Solier L., Rozet M., Thouroude C., Cossonnet C., Thomas S., 2013. **Dating of sediment record at two contrasting sites of the Seine River using radioactivity data and hydrological time series**. Journal of Environmental Radioactivity 126: 20-31.
- Xuereb B. (coord.), Bustamante P., Mouneyrac C., Souissi S., Couteau J., Budzinski H., 2014. **Projet ECOTONES : Effets de la contamination sur les organismes de l'estuaire de la Seine – proposition**. Projet Seine-Aval 5, 33p.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Sources et voies de transfert des polluants dans un cours d'eau.....	7
Figure 2 : Origine et estimation des rejets polluants dans le bassin Seine-Normandie.	9
Figure 3 : Orientations technico-économiques des exploitations agricoles de Haute-Normandie.....	9
Figure 4 : Indice de fréquence de traitement sur les cultures de Haute-Normandie.....	10
Figure 5 : Zones de dragage et sites d'immersion des sédiments dragués.	13
Figure 6 : Sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.....	15
Figure 7 : Sédiments multi-contaminés identifiés dans l'estuaire de la Seine et ses affluents.....	15
Figure 8 : Concentration en oxygène dissous dans l'estuaire de la Seine.	16
Figure 9 : Évolution de la DBO5 dans la partie fluviale de l'estuaire de la Seine.	17
Figure 10 : Concentration en nitrate dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.....	17
Figure 11 : Concentration en ammonium dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.	18
Figure 12 : Concentration en orthophosphates dans les eaux superficielles de l'estuaire de la Seine.	18
Figure 13 : Évolution de la concentration chlorophylle a dans l'estuaire fluvial de la Seine.....	19
Figure 14 : Blooms phytoplanctoniques en baie de Seine orientale.....	19
Figure 15 : Maxima annuels en diatomées et en dinoflagellés en baie de Seine – application de différents scénarios.	20
Figure 16 : Évolution temporelle de la contamination métallique dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.....	22
Figure 17 : Évolution temporelle des facteurs d'enrichissement du cobalt, du zinc et du cadmium dans les sédiments de la darse des Docks.....	22
Figure 18 : Évolution de la teneur en Anthracène et en Benzo(a)Pyrène dans les sédiments de la darse des Docks.	24
Figure 19 : Contamination en HAP dans les sédiments de l'estuaire de la Seine, entre Poses et Honfleur, de 2003 à 2013....	26
Figure 20 : Évolution temporelle des teneurs en 7PCBi dans les sédiments de la darse des Docks.....	27
Figure 21 : Teneurs en PCB153 dans les bivalves sur le littoral de la baie de Seine.	28
Figure 22 : Imprégnation en 7PCBi des poissons prélevés dans l'estuaire de la Seine, les canaux et les bassins portuaires. ...	28
Figure 23 : Évolution temporelle des teneurs en DDT dans les sédiments de la darse des Docks.....	29
Figure 24 : Évolution temporelle de la concentration en diuron dans les eaux de la Seine.	29
Figure 25 : Flux de substances pharmaceutiques (n = 97) dans l'estuaire de la Seine.	31
Figure 26 : Concentration en substances pharmaceutiques le long de l'estuaire de la Seine.....	31
Figure 27 : Évolution temporelle de la contamination bactérienne moyenne annuelle dans la Seine à Rouen.....	33
Figure 28 : Sites d'accumulations de macro-déchets identifiés sur les berges de l'estuaire de la Seine.....	34
Figure 29 : Masses d'eau associées à l'estuaire de la Seine.	35
Figure 30 : Niveaux d'effets mis en évidence par les études in situ réalisées dans l'estuaire de la Seine.....	36
Figure 31 : Respect de la Teneur Maximale Admissible en PCB pour les poissons de l'estuaire de la Seine et ses affluents. ...	38

Figure 32 : Classement de salubrité des zones conchylicoles pour les mollusques bivalves de groupe 2.....39

Figure 33 : Qualité des eaux de baignades (2011-2014).....39

Figure 34 : Stations de mesure des réseaux de suivi de qualité des eaux sur l'estuaire de la Seine.43

Figure A : Évolution des concentrations en sulfate dans les eaux de la Seine entre Poses et Rouen,
et entre Rouen et Caudebec-en-Caux.....12

Figure B : Rejets de phosphogypses en Seine et activité en 226Ra dans les sédiments de la darse des Docks.....12

Figure C : Domaine de développement et d'application des modèles.....21

Figure D : Relation "profondeur / année" (modèle d'âge) dans la darse des Docks.23

Figure E : Mélange isotopique du zinc entre 1964 et 2007.....25

Figure F : Chromatogrammes HPLC d'une solution étalon
et d'une fraction d'un échantillon environnemental génotoxique.....27

Figure G : Schéma d'un POCIS.32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Usines d'épuration de l'agglomération parisienne.....8

Tableau II : Usines d'épuration (> 10 000EH) dans l'estuaire de la Seine.8

Tableau III : Micropolluants rejetés dans l'estuaire de la Seine par les établissements industriels.....11

Tableau IV : Dépassement des seuils GEODE N1 (N2) dans les sédiments dragués par le GPMH et le GPMR
et sur les sites d'immersion (nombre de dépassement et contaminants concernés).....14

Tableau V : État des masses d'eau associées à l'estuaire de la Seine, selon la DCE.....36

FASCICULES SERIE 2

- 2.1 Le Programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux
- 2.2 La génotoxicité : quel risque pour les espèces aquatiques ?
- 2.3 Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours
- 2.4 Le benthos de l'estuaire de la Seine
- 2.5 Poissons, habitats, & ressources halieutiques : cas de l'estuaire de la Seine
- 2.6 Le Risque inondation : conditions de déclenchement et perspectives
- 2.7 Effets de la contamination chimique : des organismes en danger ?
- 2.8 Ecologie du copépode *Eurytemora affinis* : une espèce au centre du réseau trophique estuarien
- 2.9 Contre vents et marées : Les tempêtes dans l'aval de la Seine entre 1750 et 1930
- 2.10 Les végétations de l'estuaire de la Seine

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

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, 2014. **Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine**. Fascicule Seine-Aval 32, 52p.

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 :

