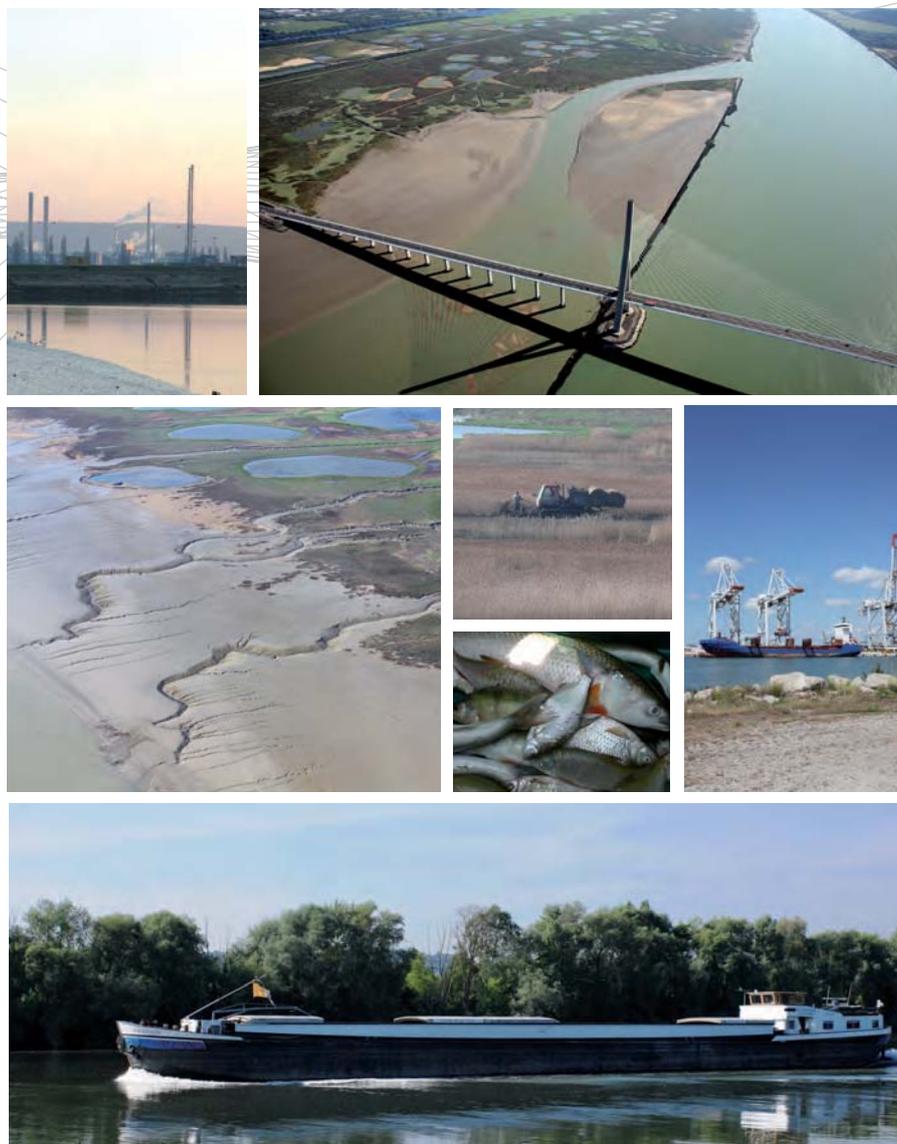


# L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ÉTAT DE SANTÉ ET ÉVOLUTION



Coordinateur : Cédric Fisson



# L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ÉTAT DE SANTÉ ET ÉVOLUTION

**Coordinateur :** Cédric Fisson<sup>1</sup>

**Auteurs :** Cédric Fisson<sup>1</sup>, François Leboulenger<sup>2</sup>, Thomas Lecarpentier<sup>3</sup>, Stéphanie Moussard<sup>1</sup>, Géraud Ranvier<sup>4</sup>

**Contributions :** Nicolas Bacq<sup>1</sup>, Thierry Berthe<sup>5</sup>, Hélène Budzinski<sup>6</sup>, Séverine Fluteau<sup>1</sup>, François Gabillard<sup>2</sup>, Jean-Philippe Lemoine<sup>1</sup>, Sébastien Lutz<sup>2</sup>, François Marchalot<sup>2</sup>, Jean-Michel Olivier<sup>7</sup>

- (1) GIP Seine-Aval
- (2) Groupe Mammalogique Normand
- (3) Maison De l'Estuaire
- (4) Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande – Observatoire de l'Avifaune
- (5) Université de Rouen/Caen, CNRS UMR 6143 M2C
- (6) Université de Bordeaux, CNRS UMR 5805 EPOC
- (7) Université de Lyon

# SOMMAIRE

SOMMAIRE	4	<b>II. ETAT DE SANTE DU MILIEU</b>	<b>20</b>
TABLES DES ILLUSTRATIONS	5	A. Qualité de l'eau	20
Liste des figures	5	1. Oxygénation et apports en nutriments	20
Liste des tableaux	5	2. Micropolluants chimiques	22
<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>	3. Contamination par les micro-organismes	25
<b>I. PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE</b>	<b>8</b>	B. Peuplements aquatiques	26
A. Espace géologique et bassin hydrographique	8	1. Compartiment planctonique et invertébrés benthiques	26
B. 250 ans d'aménagement	10	2. Ichtyofaune	28
C. Espace de vie et occupation du sol	14	3. Avifaune	32
D. Usages liés à l'estuaire de la Seine	16	4. Mammifères marins	34
		<b>III. RESTAURATION ECOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE</b>	<b>35</b>
		A. De nombreux projets locaux	35
		B. Vers des priorités de restauration à l'échelle de l'estuaire	36
		<b>CONCLUSION</b>	<b>39</b>
		ABREVIATIONS	40
		GLOSSAIRE	41
		BIBLIOGRAPHIE	42

## TABLES DES ILLUSTRATIONS

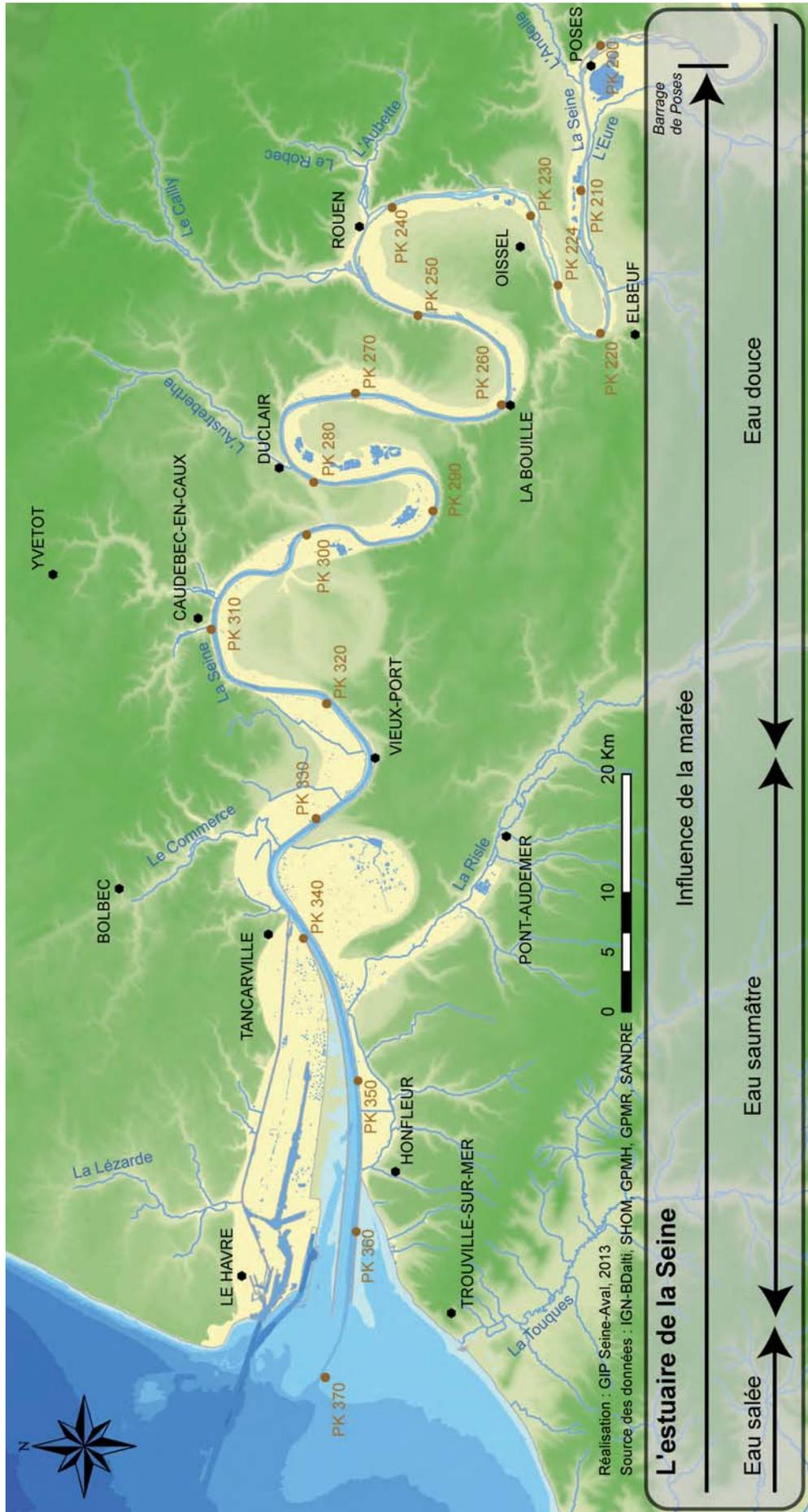
### Liste des figures

<b>Figure 1</b>	Réseau hydrographique du bassin versant de la Seine.	8
<b>Figure 2</b>	Zonation hydro-géo-morphologique de l'estuaire de la Seine.	8
<b>Figure 3</b>	Topographie du lit majeur de l'estuaire de la Seine.	9
<b>Figure 4</b>	Bathymétrie à l'embouchure de la Seine.	9
<b>Figure 5</b>	Baie de Seine et bassins versants littoraux.	9
<b>Figure 6</b>	L'estuaire de la Seine en 1750.	10
<b>Figure 7</b>	Aménagements de l'embouchure de la Seine.	11
<b>Figure 8</b>	Indices d'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine (1750-2010).	11
<b>Figure 9</b>	Évolution bathymétrique de l'embouchure (1975- 2010).	11
<b>Figure 10</b>	Occupation du sol du bassin versant de la Seine.	14
<b>Figure 11</b>	Occupation du sol du lit mineur et de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine (1973-2009).	16
<b>Figure 12</b>	Évolution du trafic au port de Rouen et tirant d'eau admissible à la montée.	16
<b>Figure 13</b>	Les usages récréatifs dans l'estuaire de la Seine.	17
<b>Figure 14</b>	Sources de contaminants à l'estuaire.	20
<b>Figure 15</b>	Amplitude spatiale et durée annuelle du déficit en oxygène dans l'estuaire de la Seine.	20
<b>Figure 16</b>	Concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin versant d'alimentation de l'aquifère de la craie de Haute-Normandie.	21
<b>Figure 17</b>	Épisodes de toxicité algale en baie de Seine.	21
<b>Figure 18</b>	Contamination métallique des sédiments et bruit de fond géochimique.	22
<b>Figure 19</b>	Détection des pesticides dans les eaux de l'estuaire de la Seine.	22
<b>Figure 20</b>	Contamination en HAP des sédiments fins de surface.	22
<b>Figure 21</b>	Respect de la Teneur Maximale Admissible en PCB pour les poissons des cours d'eau de Haute-Normandie.	23
<b>Figure 22</b>	Qualité microbiologique des eaux de la Seine.	25
<b>Figure 23</b>	Risque microbiologique des eaux de l'estuaire de la Seine.	25
<b>Figure 24</b>	État des peuplements benthiques dans l'estuaire fluvial.	27
<b>Figure 25</b>	État des peuplements benthiques dans la baie de Seine orientale.	27
<b>Figure 26</b>	Structuration commune (1988-1991-1966-2001- 2006-2009) du système «baie de Seine orientale - embouchure» en termes de spots d'abondance et de richesse spécifique.	27
<b>Figure 27</b>	Assemblages ichtyologiques en estuaire de Seine.	28
<b>Figure 28</b>	Évolution des noyaux d'abondance pour les principales guildes fonctionnelles de poissons dans l'estuaire de la Seine.	29
<b>Figure 29</b>	Localisation potentielle des espèces migratrices.	31
<b>Figure 30</b>	Probabilité de présence de 11 espèces de poissons dans le bassin versant de la Seine selon deux scénarios.	31
<b>Figure 31</b>	Évolution des effectifs d'espèces exploitant les vasières de l'embouchure de la Seine.	32
<b>Figure 32</b>	Observation et échouage de Marsouins en baie de Seine (Barfleur - Cap de la Hève).	34

<b>Figure A</b>	Zones intertidale et subtidale dans l'estuaire de la Seine.	10
<b>Figure B</b>	Évolution de l'île Durant et profil transversal entre 1956 et 2005.	12
<b>Figure C</b>	Évolution de la fosse nord suite aux aménagements "Port 2000".	13
<b>Figure D</b>	Unités fonctionnelles composant les habitats du lit mineur et de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.	15
<b>Figure E</b>	Niveau de protection réglementaire du patrimoine naturel dans l'estuaire de la Seine.	18
<b>Figure F</b>	Besoins pour la gestion hydraulique des prairies subhalophiles de la Réserve Naturelle de l'Estuaire de la Seine.	19
<b>Figure G</b>	Couples nicheurs de Faucon pèlerin dans la vallée de la Seine.	23
<b>Figure H</b>	Concentration en substances pharmaceutiques le long de l'estuaire de la Seine.	24
<b>Figure I</b>	Indice 'habitat fonctionnel' pour les nourriceries de juvéniles marins.	30
<b>Figure J</b>	Évolution de l'indice "habitat fonctionnel" pour les nourriceries de juvéniles marins entre 1975 et 2010.	30
<b>Figure K</b>	Tendances d'évolution des populations d'oiseaux nicheurs par secteur géographique de la ZPS.	33
<b>Figure L</b>	Projets de restauration finalisés.	36
<b>Figure M</b>	Création de la vasière artificielle.	37

### Liste des tableaux

<b>Tableau I</b>	Comparaison des grands estuaires français.	8
<b>Tableau II</b>	Évolutions morphologiques récentes de la fosse nord : prévu vs observé.	14
<b>Tableau III</b>	Interdictions de pêche permanentes en estuaire et baie de Seine liées à la contamination.	17



## INTRODUCTION

L'aménagement de l'estuaire de la Seine a débuté dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle et a été principalement motivé par le développement urbain et industriel de sa vallée. La prise en considération des impacts environnementaux était alors inexistante, en tant que telle, dans les débats et les projets. Ce n'est qu'à la fin des années 1960, avec le projet puis la création en 1974 du Parc Naturel Régional de Brotonne, que les réflexions sur l'écologie de l'estuaire ont réellement débuté. L'objectif premier était de favoriser le maintien d'une coupure verte entre les pôles rouennais et havrais, avec un argumentaire culturel, écologique et paysager. À cette époque, les constats concernant la dégradation de la qualité de l'eau et l'altération de la diversité des habitats se sont multipliés. Ils s'appuyaient sur une connaissance de terrain et sur les premiers suivis scientifiques, tels le réseau de Suivi de la Qualité des Eaux de la Seine à l'aval de Poses débuté en 1956 ou le Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer (SAUM) de l'estuaire de la Seine mené entre 1976 et 1982. Dans les années 1970, les pêcheurs ont lancé les premières alertes motivées par les enjeux 1) de maintien de la pêche à la crevette, en fort déclin dans l'estuaire depuis les années 1970 et ; 2) de favoriser le retour d'espèces disparues (éperlan, sprat, carrelet,...). Ils insistaient alors sur la nécessité d'améliorer la qualité de l'eau de la Seine et de maintenir en eau les vasières à l'embouchure, par l'arrêt de la chenalisation de la Seine et la création de brèches dans les digues [Creze, 1980].

La « sensibilité du milieu naturel de la Basse-Seine aux modifications induites par le développement urbain et économique » et la « nécessité de réaliser un effort important pour réduire la pollution liée à ce développement » ont quant à eux présidés à la création du Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) en basse Seine en 1977, afin d'aboutir à une « amélioration rapide de l'environnement en Basse-Seine » [Préfecture BN & Préfecture HN, 1977]. Dès le départ, l'une des préoccupations majeures relayée par cette instance était axée sur les rejets dans l'eau avec des programmes 1) de réduction des pollutions oxydables, 2) de suppression des rejets industriels des « boues rouges » (liées à la fabrication d'oxyde de titane) et des « boues jaunes » (liées à l'immersion des phosphogypses produits par la fabrication d'engrais), ainsi que 3) de suivis de la qualité du milieu en baie de Seine. Cette démarche de reconquête de la qualité des eaux s'appuyait notamment sur la loi sur l'eau (1964) qui a permis, via la création des Agences financières de bassin, la mise en place de la collecte et du traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles (construction de stations d'épuration).

À partir des années 1980, diverses associations de protection de l'environnement, telle SOS Estuaire créée en 1988 et fédérant 18 associations, militent en faveur de l'environnement sur l'estuaire. Ces revendications se font l'écho de la réglementation européenne (Directive Oiseaux en 1979, Directive Nitrates en 1991, Directive Eaux Résiduaires Urbaines en 1991, Directive Habitats Faune Flore en 1992,...) qui a permis la reconnaissance de la richesse écologique de l'estuaire (classement en ZNIEFF et création d'une ZICO en 1984, création d'une réserve conventionnelle en 1985 sur les terrains portuaires de l'embouchure de l'estuaire, extension (en 1997) de la première ZPS créée en 1990 et création de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine en 1992).

L'expertise scientifique s'affirme également et s'appuie sur une intensification des suivis et une compréhension de plus en plus fine du fonctionnement estuarien et de la baie de Seine (création du Groupe d'Étude des Milieux Estuariens et Littoraux (GEMEL) en 1981, création de la Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN) en 1986, lancement du programme scientifique Seine-Aval en 1995, création de l'Observatoire de l'Avifaune en 2002,...).

Le début des années 1990 marque un tournant dans l'aménagement de l'estuaire de la Seine, avec les premières mesures compensatoires adossées aux projets de développement. La construction du pont de Normandie (1995) a ainsi été le premier projet d'envergure accompagné d'une restauration environnementale (loi de protection de la nature de 1976 et loi Barnier 1995), avec notamment la reconstitution d'une vasière intertidale devant permettre l'accueil d'invertébrés benthiques, ressource trophique pour les oiseaux limicoles (à marée basse) et les juvéniles de poissons (à marée haute). Par la suite, la mise en œuvre des programmes de reconquête de la qualité des eaux (création des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) en 1996, repris par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en 2000) a également favorisé l'intégration de la dimension environnementale dans les projets d'aménagement et la poursuite de l'amélioration de la qualité des eaux (efficacité accrue du traitement des rejets, meilleure connaissance des substances dangereuses,...). Les restaurations ou compensations écologiques se sont par ailleurs multipliées 1) grâce à des incitations financières et la contrainte réglementaire (reposoir sur dune, îlot du Ratier, méandre artificiel), 2) grâce au développement des compétences environnementales au sein des collectivités (restauration de la Fontenelle...), d'initiatives locales d'aménagements à la dimension environnementale affirmée (ballastière d'Yville-sur-Seine), ou 3) devant l'intérêt croissant pour la qualité paysagère et environnementale des milieux aquatiques et humides dans le paysage urbain (étangs de Pont-Audemer, Écoquartier Flaubert à Rouen...). Cette volonté de restauration (au sens large du terme) se décline encore aujourd'hui à une échelle plutôt locale, sur le territoire de chaque acteur et sans véritable cohérence d'ensemble à l'échelle de l'estuaire. Pour gagner en efficacité et atteindre l'objectif commun de « bon fonctionnement » de l'estuaire, des priorités de restauration et de préservation de ses fonctions écologiques doivent maintenant être proposées et discutées pour inscrire l'estuaire dans une trajectoire d'évolution partagée.

Après une description actualisée du territoire d'étude en première partie, le présent fascicule s'intéresse à l'évolution de l'état de santé de l'estuaire de la Seine. Le choix thématique retenu pour cette deuxième partie (qualité de l'eau et peuplements aquatiques) sert de fil conducteur à la lecture et intègre le fonctionnement écologique sous-jacent de l'estuaire (dynamique hydro-sédimentaire, effets de la contamination, habitats,...). Elle doit faciliter une approche globale du système "estuaire de Seine" dont l'état de santé croise de nombreux aspects. Enfin, une troisième partie s'appuie sur les expériences issues des sites et projets d'aménagements de milieux naturels menés dans l'estuaire de la Seine pour aller vers la proposition de priorités de restauration à une échelle globale et plus cohérente pour l'estuaire. Ce fascicule présente un bilan des connaissances actuelles sur l'état de santé et l'évolution de l'estuaire de la Seine et renvoie à de nombreux documents qui fournissent au lecteur des informations plus détaillées sur les différents thèmes abordés.

# I. PRÉSENTATION DU TERRITOIRE D'ÉTUDE

## A. Espace géologique et bassin hydrographique

Le **bassin versant de la Seine** est presque entièrement situé dans le bassin parisien, vaste formation géologique constituée d'un empilement de roches calcaires, argileuses et sableuses déposées aux ères secondaire, tertiaire et quaternaire. Le relief de ce bassin est peu accidenté et l'altitude moyenne est faible (<300m). La structure géologique contrôle le tracé du réseau hydrographique de surface qui se compose de cours d'eau à faible pente, coulant globalement de l'est vers l'ouest en incisant les formations sédimentaires. Ce système « Seine » représente 23 000 km de cours d'eau au travers desquels s'écoulent 14 milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an. La Seine prend sa source à 471 m d'altitude sur le plateau de Langres (Champagne-Ardenne) et s'écoule sur 776 km jusqu'à son embouchure normande [Figure 1]. La Seine et ses principaux affluents (Aube, Marne, Yonne, Oise, Eure) ont un régime hydrologique similaire au sien, avec des débits maximaux atteints en hiver et des étiages\* en été [Billen *et al.*, 2009 ; Viennot *et al.*, 2009].



Figure 1 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Seine

L'**estuaire de la Seine** est défini par la zone d'influence de la marée dynamique sur le cours d'eau, soit les 160 derniers kilomètres du fleuve. Il est délimité par le barrage de Poses en amont (barrage le plus en aval sur la Seine) et la partie orientale de la baie de Seine en aval. Latéralement, l'estuaire inclut la plaine alluviale, notamment les berges et les zones humides connexes, ainsi que la frange littorale et la zone maritime proche. L'espace qui recueille les eaux de ruissellement et d'infiltration alimentant la partie estuarienne de la Seine s'étend sur une superficie de 11 500 km<sup>2</sup> [Tableau I].

Tableau I : Comparaison des grands estuaires français.

	Superficie du bassin versant du fleuve	Superficie du bassin versant intra-estuarien	Influence de la marée	Pénétration de la salinité	Marnage maximal (vive-eau)	Débit moyen (amont de l'estuaire)
Seine	79 000 km <sup>2</sup>	11 500 km <sup>2</sup>	160 km - Poses	40 km - Vieux-Port	7,5 m - Le Havre	400 - 500 m <sup>3</sup> /s
Loire	118 000 km <sup>2</sup>	7 470 km <sup>2</sup>	97 km - Ancennis	60 km - Nantes	6 m - Nantes	850 m <sup>3</sup> /s
Gironde	56 075 km <sup>2</sup>	2 297 km <sup>2</sup> (à partir du bec d'Ambès)	180 km Casseuil (Garonne), Castillon-la-Bataille (Dordogne), Laubardemont (Isle)	95 km Bec d'Ambès	5,5 m Bordeaux	800 - 1000 m <sup>3</sup> /s

L'estuaire de la Seine peut être décomposé en quatre ensembles hydro-géo-morphologiques principaux [Figure 2 ; Guézennec *et al.*, 1999 ; Salvaudon, 2008 ; Lavabre & Fisson, 2012] :

- Le **lit mineur\*** qui correspond à l'espace occupé par l'écoulement du cours d'eau, hors événement hydrologique exceptionnel. Il est séparé du lit majeur\* par les berges et, dans ce contexte estuarien, inclut la zone intertidale\* [Encart n°1 "Les zones intertidales de l'estuaire de la Seine."]. Il peut être découpé selon un gradient de salinité qui détermine en grande partie les biocénoses qui pourront coloniser les différents milieux aquatiques rencontrés :
  - l'estuaire limnique\* (salinité <0.5 g/l) : de Poses à Vieux-Port,
  - l'estuaire saumâtre\* (salinité entre 0.5 et 30 g/l) : de Vieux-Port à Honfleur,
  - l'estuaire marin (salinité > 30 g/l) : d'Honfleur à la proche baie de Seine ;
- La **plaine alluviale** qui correspond à la zone topographique basse comprise entre le lit mineur et les terrasses alluviales ; le haut de la zone intertidale (ou la berge) composant la limite avec le lit mineur. La plaine alluviale est structurée par le substrat qui déterminera les biocénoses rencontrées :
  - la plaine alluviale alluvionnaire,
  - la plaine alluviale tourbeuse ;
- Les **terrasses alluviales** qui se composent d'alluvions anciennes ;
- Les **coteaux** qui se composent de terrains sédimentaires crayeux caractérisés par de fortes pentes ; le point de changement géologique entre alluvions récentes et anciennes composant la limite entre la plaine alluviale et le coteau.



Figure 2 : Zonation hydro-géo-morphologique de l'estuaire de la Seine.

Les principales entités structurales actuelles de l'estuaire de la Seine peuvent être identifiées à partir de critères topographiques et bathymétriques [Figure 3 ; Figure 4]. L'encaissement de la vallée de la Seine bordée par des coteaux culminant à plusieurs dizaines de mètres se distingue ainsi de la plaine alluviale et de certains secteurs spécifiques (marais Vernier, basse vallée de la Risle,...). De nombreux points bas sont présents dans le lit majeur de la Seine et sont souvent séparés du lit mineur par un bourrelet alluvial ou une digue. La bathymétrie fait apparaître le chenal de navigation du port de Rouen et les chenaux d'accès au port du Havre, les bancs de la Passe et du Ratier, ainsi que la chute des fonds en baie de Seine orientale.

La **baie de Seine** correspond à la portion de Manche qui s'étend entre le pays de Caux à l'est et la presqu'île du Cotentin à l'ouest. C'est l'exutoire de la Seine et de nombreux fleuves côtiers (Orne, Dives, Touques, Saône, Yères, Scie, Valmont,...). Le **littoral** de la baie de Seine présente une grande variété et les paysages contrastés révèlent l'histoire géologique de la région, entre massif armoricain et bassin parisien. Cette bande côtière a été façonnée au quaternaire, sous l'influence combinée de la Manche et du réseau hydrographique continental dominé par la Seine. La nature des côtes est variée avec 1) au nord-est, les côtes à falaises de Haute-Normandie qui dominent 2) au sud, une alternance de côtes basses sableuses et de falaises, et 3) à l'ouest, des côtes sableuses comme la baie des Veys [Figure 5 ; Le Gall et al., 2003].

**Topographie du lit majeur de l'estuaire de la Seine**

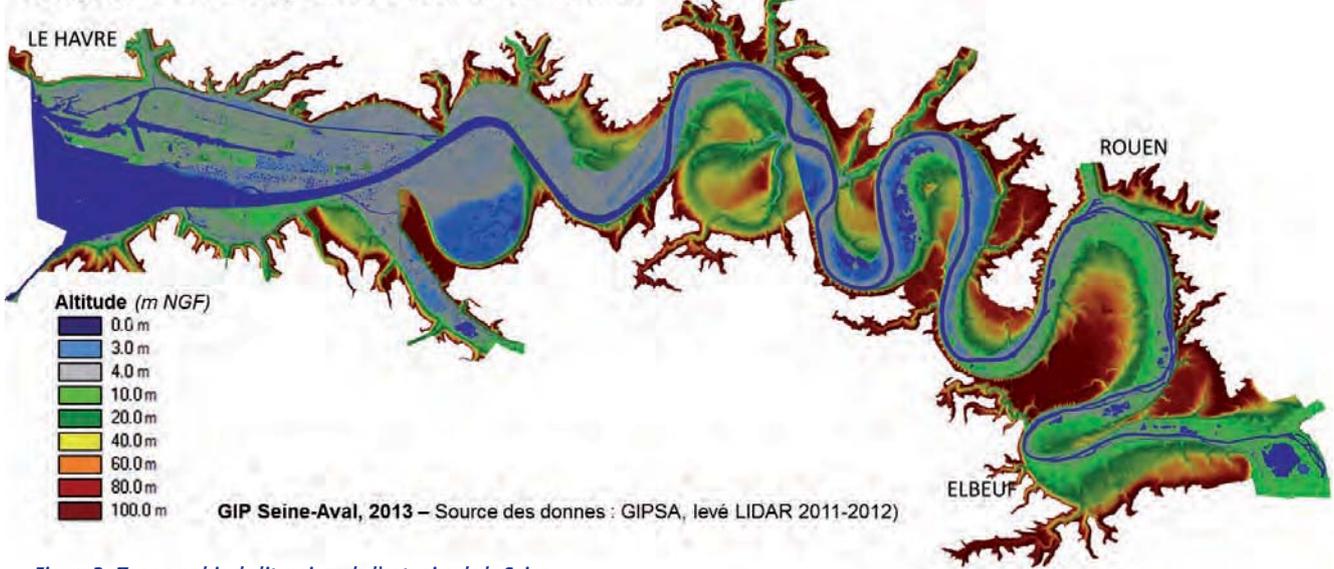


Figure 3 : Topographie du lit majeur de l'estuaire de la Seine.

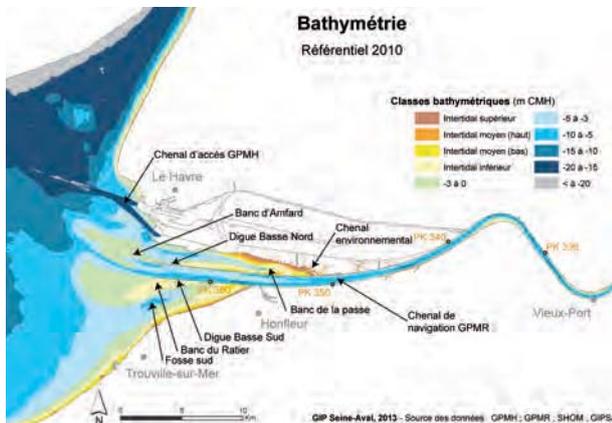


Figure 4 : Bathymétrie à l'embouchure de la Seine.

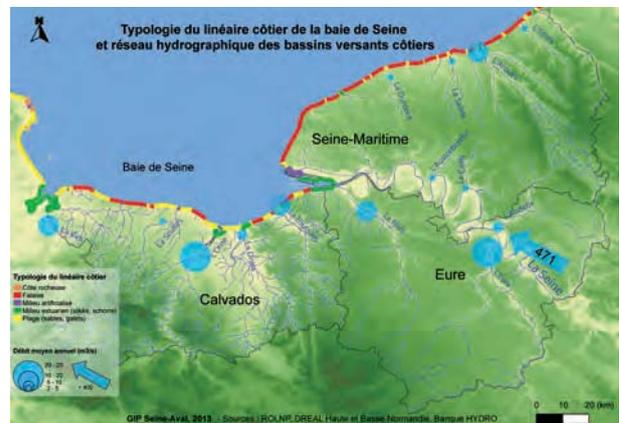


Figure 5 : Baie de Seine et bassins versants littoraux

## Encart n°1 - Les zones intertidales de l'estuaire de la Seine

Les variations de hauteur d'eau liées à la conjugaison de la marée et des apports en eaux douces induisent des cycles d'immersion/émersion pour les zones topographiquement intermédiaires entre le milieu strictement aquatique toujours en eau (zone subtidale) et le milieu terrestre situé en arrière des berges. Ce secteur intermédiaire de balancement de marée (ou zone marnante) constitue la zone intertidale et revêt un triple intérêt pour les estuaires [Loire Estuaire CMB, 2004] : 1) **intérêt mécanique** en étant source de frottements pour l'onde de marée, ce qui atténue l'énergie liée à sa progression ; 2) **intérêt écologique**, comme support d'habitat de nombreuses espèces (zones de nurserie pour certains poissons par exemple) ; 3) **intérêt sédimentaire** comme piège de particules fines et zone de stockage plus ou moins pérenne de sédiments.

La répartition et la surface de ces zones intertidales ont été estimées par le croisement de deux données : 1) des statistiques de niveau d'eau, avec une extrapolation entre les marégraphes du pourcentage de temps d'immersion pour une cote donnée ; 2) des données bathymétriques et topographiques haute-résolution.

À l'échelle de l'estuaire de la Seine (de Poses à l'amont, jusqu'au droit du cap de la Hève à l'embouchure), le cumul des surfaces intertidales représente **4 276 hectares**, contre 10 739 hectares de zone subtidale, soit **28% de surface marnante**. L'analyse de ces surfaces selon les secteurs de l'estuaire montre que c'est entre le pont de Tancarville et Honfleur que la zone intertidale est la plus importante (1 681ha, soit 60% du secteur et près de 40% de la zone intertidale totale de l'estuaire). Le secteur des îles (Elbeuf / Amfreville-la-Mi-Voie) présente également un réel intérêt en terme de zone intertidale avec 166ha (soit 34% du secteur) quand on le compare au secteur endigué entre Amfreville-la-Mi-Voie et Norville, où les zones intertidales ne représentent que 291ha (soit 12% du secteur) sur un linéaire de 81km [Figure A].

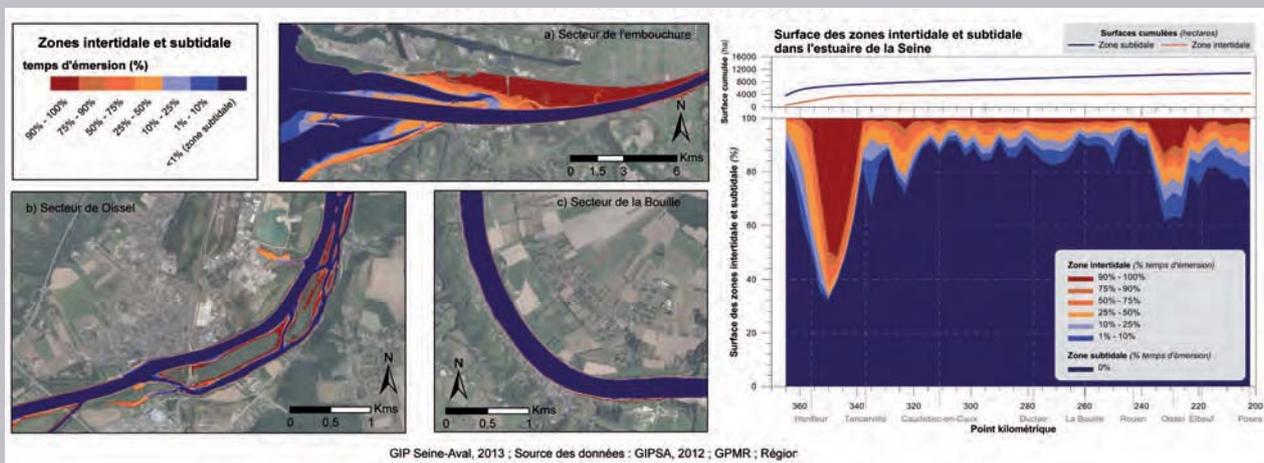


Figure A : Zones intertidale et subtidale dans l'estuaire de la Seine.

## B. 250 ans d'aménagement

Jusqu'au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'estuaire de la Seine n'a pas connu d'aménagement majeur ayant impacté sa morphologie et était alors encore qualifié de sauvage [Avoine, 1981]. Son lit mineur était relativement stable et régulier (peu de divagation) entre Poses et Caudebec-en-Caux, avec une succession de hauts fonds

et de fosses, ainsi que la présence de quelques pertuis (rétrécissement du fleuve, avec une forte pente, une faible profondeur et un courant rapide). En aval de Caudebec-en-Caux, la morphologie de la Seine changeait brutalement, le lit devenant plus large et sa position plus instable à l'échelle pluri-annuelle. L'embouchure, très mobile, était composée de deux unités morphologiques principales : les chenaux et les bancs sableux [Figure 6].



Figure 6 : L'estuaire de la Seine en 1750.

À partir de 1834, l'estuaire de la Seine fut progressivement aménagé et perdit son caractère sauvage [Avoine, 1981]. Réalisés pour favoriser la navigation et l'extension de l'emprise des ports de Rouen et du Havre, les aménagements (endiguement, comblement de bras morts, arasement d'îles, assèchement de marais, etc.) ont façonné l'estuaire et gouverné son évolution, notamment le comblement des zones latérales [Figure 7].

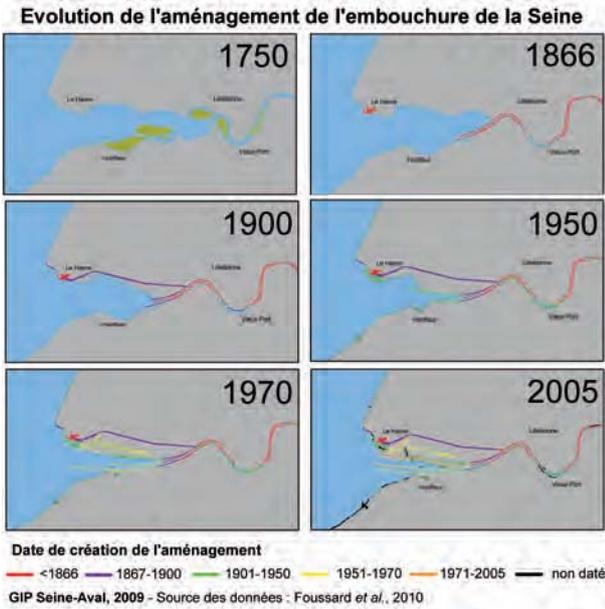


Figure 7 : Aménagements à l'embouchure de la Seine.

Le poids de ces aménagements à l'échelle globale de l'estuaire peut être approché par différents indicateurs morphologiques rendant compte 1) de la **linéarisation des berges** et de la **calibration du chenal** de navigation (rectification du tracé des berges par endiguement, approfondissement du chenal, ayant pour conséquence une raréfaction des annexes hydrauliques et des îles) [Encart n°2 "Les îles Saint-Catherine, Durand et Légarée: un exemple de rescindement d'îles à l'amont de Rouen"], 2) de la **migration vers l'aval de la limite de salinité et du bouchon vaseux\*** et 3) du **comblement de l'estuaire** (déplacement vers l'aval des dépôts sédimentaires par réduction de l'espace disponible dans l'estuaire amont, réduction du volume oscillant et de la surface en eau de l'estuaire, diminution de l'aire intertidale des vasières, déplacement du delta sableux tidal vers la baie de Seine orientale) [Figure 8 ; Foussard et al., 2010 ; GIPSA, 2009a ; GIPSA, 2011b].

Au-delà de ces évolutions morphologiques, l'endiguement progressif de l'embouchure par les digues de calibrage a fortement structuré le fonctionnement de ce secteur, avec une division en trois zones [Figure 4] : 1) la zone au nord des digues nord et basse nord, avec la fosse nord, le banc d'Amfard, le banc de la Passe, le chenal environnemental, la vasière nord, un système de filandres, la roselière ; 2) la zone centrale entre les digues nord et sud, d'une largeur proche du kilomètre et dont la profondeur peut atteindre 15 m en pleine mer de vive-eau\* ; 3) la zone au sud de la digue sud, avec le banc du Ratier, la fosse sud et littoral bas-normand. Schématiquement, le flot\* pénètre dans l'estuaire par les zones nord et sud, conduisant au remplissage de la zone centrale par déversement au-dessus des digues submersibles et par les brèches. Les apports sédimentaires liés au flot tendent ainsi à remonter les fonds des zones latérales. Les courants de jusant\* sont canalisés par les digues basses nord et sud, facilitant l'expulsion des sédiments présents dans le secteur intermédiaire et l'auto-dragage du chenal de navigation [GPMR, 2010].

Ce fonctionnement hydro-sédimentaire, les aménagements industrialo-portuaires et routiers (route de l'estuaire, Pont de Normandie, Port 2000) et les pratiques liées au maintien de la navigation (dragage\*/clapage\*) ont eu des conséquences visibles sur la bathymétrie des 30 dernières années et entraîné un compartimentation du système : atterrissement en rive droite, remontée du niveau des bancs du Ratier et d'Amfard, approfondissement du chenal de navigation du port de Rouen et de l'accès au port du Havre, creusement de la fosse sud, remplissage des sites de clapage du Kannick et d'Octeville, etc.) [Figure 9 ; Encart n°3 'Les travaux 'Port 2000' : zoom sur 10 ans d'évolution de la fosse nord'].

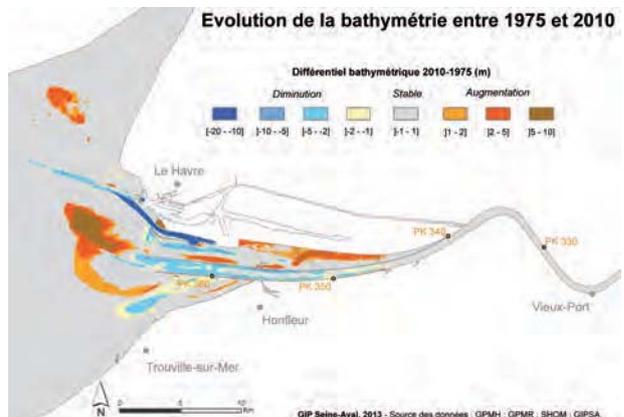


Figure 9 : Évolution bathymétrique de l'embouchure (1975-2010).

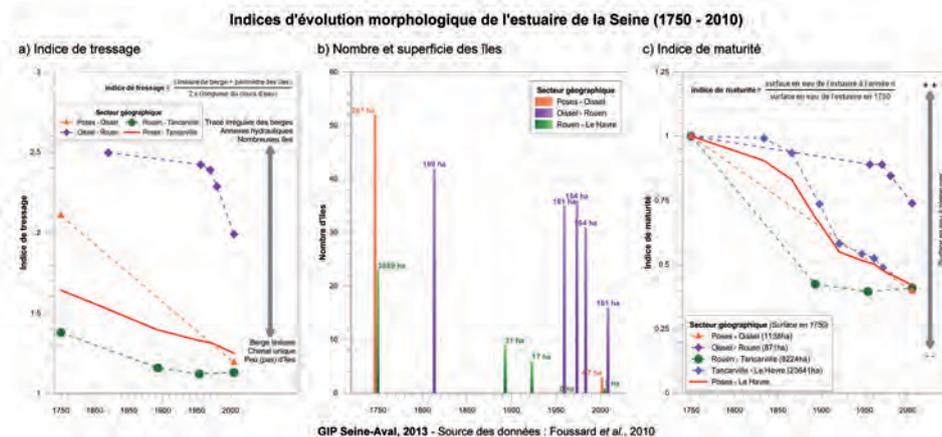


Figure 8 : Indices d'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine (1750-2010).

## Encart n°2 - Les îles Saint-Catherine, Durand et Légarée : un exemple de rescindement d'îles à l'amont de Rouen

Jusqu'aux aménagements de la 2<sup>nd</sup> moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, le lit de la Seine à l'amont de Rouen était parsemé d'îles et de bras morts. La faible profondeur de ce secteur n'autorisait que la navigation de bateaux de petite envergure n'excédant pas 1.5 à 2.5 m de tirant d'eau selon le débit de la Seine et les conditions de marée. La pratique du halage était courante et les écluses et barrages constituaient de nombreux obstacles. Entre Elbeuf et Rouen, les grands travaux « d'amélioration de la Seine » effectués à partir de 1944 avaient pour objectif d'une part de garantir un tirant d'eau de 3 m en toutes circonstances et d'autre part de limiter les perturbations hydrauliques engendrées dans le chenal principal par les îles et les bras morts.

L'évolution des îles Sainte Catherine, Durand et Légarée-de-dessous est un exemple de ces aménagements. Entre 1956 et 1970, une première phase de travaux a permis l'arasement partiel des îles Durand et Sainte Catherine pour faciliter la navigation au nord de ces dernières. À la fin des années 1970, une digue avec une brèche a été mise en place entre l'île Légarée et l'île Durand, le bras secondaire situé entre l'île Durand et l'île Sainte Catherine a été fermé puis comblé avec les sédiments de dragage extraits du chenal principal qui a été approfondi et quelques zones ont été arasées. Au début des années 1980, la section du lit de la Seine a été réduite à l'aide d'une digue en rive gauche, en arrière de laquelle le terrain a été comblé, permettant le développement d'une activité agricole [Figure B; GIPSA, 2008d]. Ces îles, classées en ZNIEFF depuis 2002, sont bordées de vasières sur le côté opposé au chenal de navigation et les formations végétales rencontrées sont originales, bien que souvent relictuelles : bois alluviaux ou riverains à saule blanc (*Salix alba*), érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et au très rare frêne à folioles étroites (*Fraxinus angustifolia*) ; mégaphorbiaie à tendance nitrophile prononcée avec la petite bardane (*Arctium minus*), la grande berce (*Heracleum spondylium*), le liseron des haies (*Calystegia sepium*) et le pigamon jaune (*Thalictrum flavum*) dans la partie centrale des îles Durand et Légarée ; prairie mésophile avec quelques pieds d'orge faux-seigle (*Hordeum secalinum*) sur les îles Sainte-Catherine et Légarée [INPN, 2010a ; INPN, 2010b].

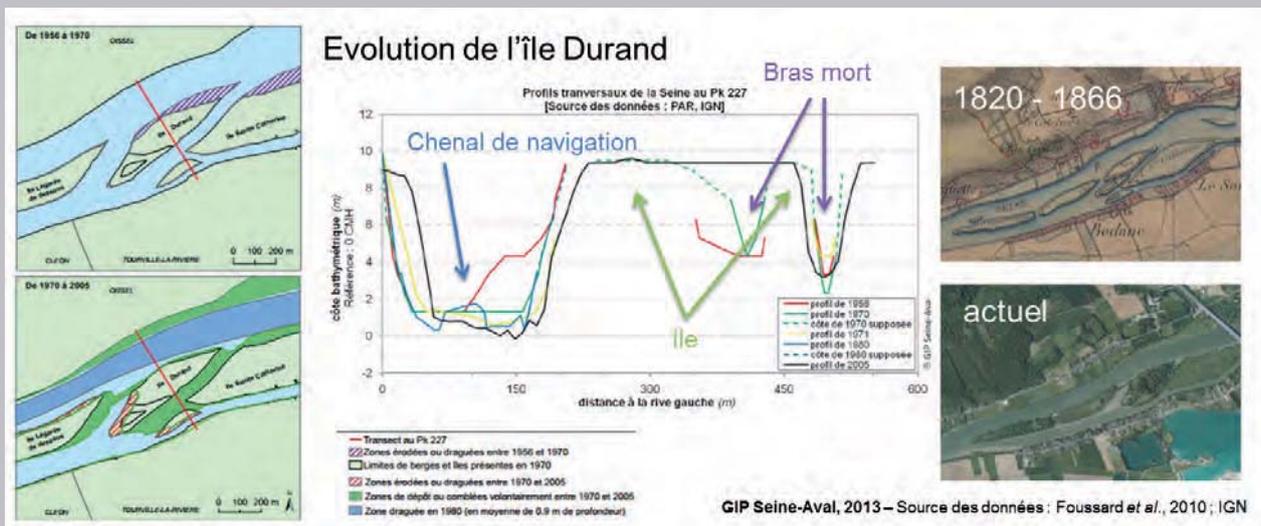


Figure B : Évolution de l'île Durand et profil transversal entre 1956 et 2005.

### Encart n°3 - Les travaux "Ports 2000" : zoom sur 10 ans d'évolution de la fosse nord

Les travaux dits "Port 2000" constituent les aménagements d'envergure les plus récents ayant impacté la morphologie de l'embouchure de la Seine. Réalisés entre 2003 et 2006, ces travaux d'extension du port du Havre se sont accompagnés de mesures environnementales et d'un ensemble de suivis hydro-morpho-sédimentaires et biologiques. Dix ans après le début des travaux, un bilan des évolutions morphosédimentaires, hydrodynamiques, biosédimentaires et halieutiques du secteur de la fosse nord a ainsi pu être réalisé et est ci-après résumé [ARTELIA, 2012].

Le contexte morphosédimentaire pré-travaux (2001) comprenait trois bancs sableux au sein de la fosse nord : les bancs d'Amfard, d'Amfard-sud et le banc de la Passe. Ces bancs s'étalaient en travers de la fosse nord, limités au nord par le chenal de la fosse nord et au sud par la digue basse nord. Les premiers travaux de dragage (2003-2004) ont été réalisés sur le lieu de la nouvelle extension portuaire, en bordure du chenal de la fosse nord aval. Ils ont mis à jour des fonds inaffouillables de substrat ancien qui ont entraîné un creusement différentiel par les courants (creusement des fonds mobiles détournés par les fonds durs). Le chenal s'est alors élargi et décalé vers le sud, allant éroder le banc d'Amfard-sud dès 2004 et ne laissant qu'une mince bande de sable adossée à la digue basse nord en 2011. Ce même banc se retrouve également démantelé dans sa partie ouest avec une langue de sable qui reste adossée à l'extrémité de la digue et un banc qui vient barrer l'engainement depuis 2008. Le banc d'Amfard a lui été effacé par un pré-dragage car il se situait dans l'axe du futur chenal de la fosse nord aval. Fin 2004, l'épi de la Passe est construit, décalant au nord le chenal de la fosse nord amont qui devient alors le chenal d'érosion nord. Associée à ce chenal d'érosion, le creusement du chenal environnemental et la création de la brèche amont (2005) ont permis de stopper l'avancer du schorre à l'amont du pont de Normandie et de créer une vasière contre l'épi et la digue basse nord. Ils ont également entraîné la formation d'une encoche de flot au travers du banc de la Passe, avec de forts courants érosifs favorisant une sédimentation sableuse. Le chenal environnemental qui devait s'auto-draguer grâce à un courant de flot précédant le flot dans le chenal de navigation et le rejoignant à la sortie de la brèche amont n'a pas évolué ainsi du fait de hauts fonds bloquant le flot et créant un système inversé durant le flot et également durant le jusant à partir de 2008. Dans un contexte hydrologique présentant des débits peu soutenus, les apports sédimentaires maritimes ont gagné en importance, entraînant une sédimentation majoritairement sableuse et un comblement du chenal environnemental et du chenal d'érosion nord. Suite à la construction de l'épi de la Passe, un banc aval s'est développé avec des sédiments d'abord sableux, puis vaseux à partir de 2006 [Figure C ; Tableau II ; ARTELIA, 2012].

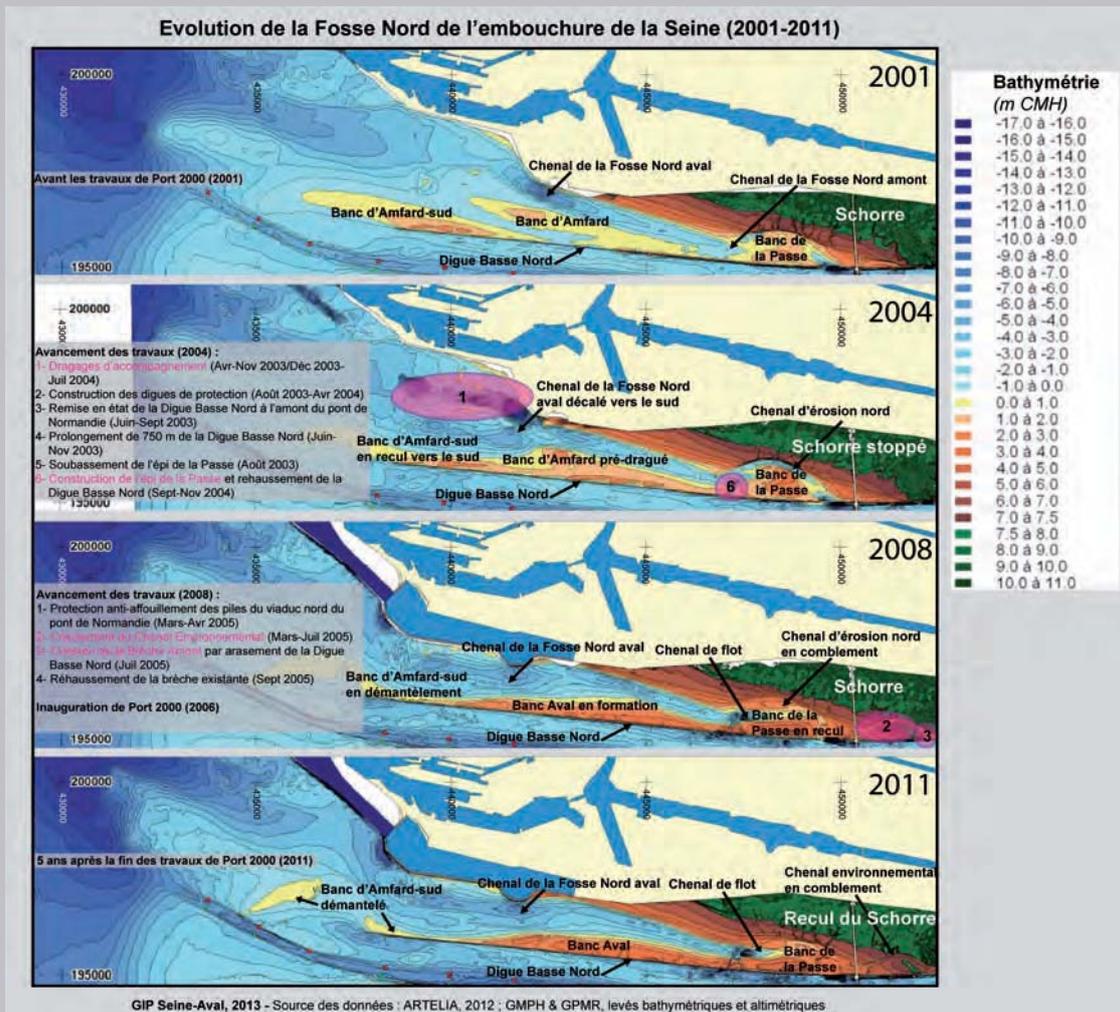


Figure C : Évolution de la fosse nord suite aux aménagements "Port 2000".

Tableau II : Évolutions morphologiques récentes de la fosse nord : prévu vs observé.

Conception Port 2000 (objectifs des mesures environnementales)	Observations (2001 - 2011)
Déplacement et creusement vers le sud de la Fosse Nord aval	La Fosse Nord s'est largement creusée et se décale plus au sud que prévu du fait de couches inaffouillables
Déplacement vers le nord et comblement de la Fosse Nord amont (avec épi de la Passe)	Ok Création d'un Banc Aval le long de la Digue Basse Nord
Réorganisation du banc de la Passe pour stopper l'avancée du schorre et création d'une vasière contre l'épi et la Digue Basse Nord	Avancée du schorre stoppé Banc en développement mais sédimentation sableuse trop importante
Creusement et pérennisation du Méandre Amont	Comblement du Méandre Amont

Source des données : ARTELIA, 2012

D'un point de vue écologique, le remaniement des structures biosédimentaires a entraîné 1) un recul de la communauté oligospécifique des vases estuariennes à *Macoma balthica*, ressource trophique importante pour les maillons supérieurs ; 2) une progression du faciès sableux de la communauté marine des sables fins envasés à *Abra alba* – *Lagis koreni*, faciès pauvre et à faible intérêt trophique caractérisé par des espèces fouisseuses affines des sables fins à moyens propres mobiles et fortement drainés (*Nephtys cirrosa*, *Magelona johnstoni*, *Haustorius arenarius*, *Bathyporeia pilosa*) ; 3) l'installation d'un gisement important de mollusques sur le banc aval. Au final, quatre secteurs présentent alors un intérêt trophique notable : 1) la vasière du secteur amont au pont de Normandie et de la Grande Vasière ; 2) la vasière du banc aval interne de l'épi de la Passe ; 3) l'assemblage des galets envasés à l'ouest de la fosse nord aval ; 4) les bancs sablo-vaseux au pied de la digue sud de Port 2000 [Dancie, 2012 ; Dauvin & Pezy, 2012]. Concernant les peuplements piscicoles, une chute d'attractivité est observée suite à la mise à jour des fonds inaffouillables. En 2010, le système évolue vers un peuplement caractéristique des espèces indicatrices de fonds durs. Le banc aval qui s'envase permet l'augmentation en 2010 des paramètres halieutiques (richesse spécifique, poissons benthiques, crevette grise). Ils augmentent également à l'entrée de la fosse dans le trajet du chenal de flot mais diminuent au sein même de ce chenal. Néanmoins, les espèces de poissons sont majoritairement peu dépendantes du fond et plutôt reliées à la circulation des masses d'eau [De Roton, 2012].

## C. Espace de vie et occupation du sol

Le **bassin versant de la Seine** représente 12% de la superficie nationale. 17.5 millions de personnes vivent sur ce territoire de 78 600 km<sup>2</sup>, soit plus du quart de la population française [IGN, 2012]. Cette population, à 85% urbaine, se concentre dans l'agglomération parisienne (10 millions d'habitants), le long de l'axe Seine et des grands affluents (Aube, Marne, Yonne, Oise) et à son embouchure avec les agglomérations de Rouen puis du Havre. D'abord aménagé pour répondre aux besoins fondamentaux croissants de ses habitants (produire la nourriture, assurer le logement et fournir les équipements), le bassin de la Seine a également assuré son développement par la mise en place d'infrastructures pour le transport des biens, la fourniture d'énergie et l'élimination des déchets [Billen *et al.*, 2009]. Ce territoire assure 50% du trafic fluvial français, 40% de l'activité économique et 30% de l'activité agricole nationale. En matière d'occupation du sol, les territoires artificialisés représentent 7,1% de la superficie totale du bassin versant de la Seine, les territoires agricoles 66,5%, les forêts et les milieux semi-naturels 25,6%, les zones humides et les surfaces en eau 0,7% [Figure 10].

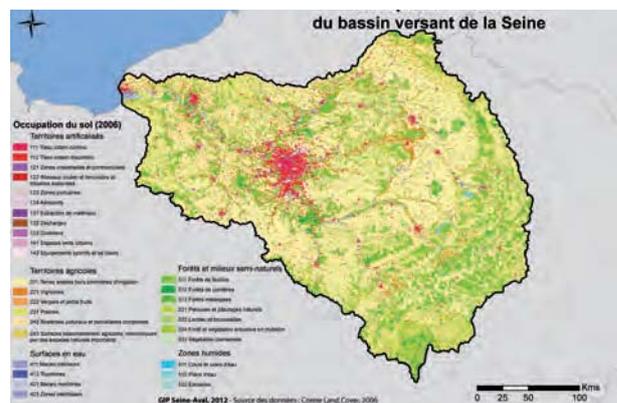


Figure 10 : Occupation du sol du bassin versant de la Seine.

L'estuaire de la Seine se répartit sur les régions Haute-Normandie et Basse-Normandie et les départements de la Seine-Maritime, de l'Eure du Calvados et de l'Eure et Loir (pour l'Eure). Le réseau urbain est structuré autour de deux pôles : la communauté d'agglomération du Havre (250 000 habitants pour 17 communes) et la communauté d'agglomération Rouen, Elbeuf, Austreberthe (près de 500 000 habitants pour 71 communes) [GIPSA, 2011a]. Le lit mineur et la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine sont composés pour 39% de terrains agricoles (19 958 hectares), pour 26% de surfaces en eau (13 131 hectares), pour 23% de terrains artificialisés (11 575 hectares) et pour 12% de forêts et de milieux semi-naturels (6 010 hectares) [Encart n°4 "Habitats naturels de l'estuaire de la Seine."].

## Encart n°4 - Habitats naturels de l'estuaire de la Seine

Afin de proposer une typologie homogène des habitats naturels rencontrés dans l'estuaire de la Seine, une première analyse des typologies existantes a été réalisée : CORINE Biotopes [Rameau *et al.*, 1997], Natura 2000 [Council Directive 92/43/EEC, 1992], EUNIS [Davies *et al.*, 2004 ; EEA, 2012], MOS [PNRBSN & GIP Seine-Aval, 2012]. Cette analyse a montré que les typologies existantes ne permettaient pas l'obtention d'une homogénéité sur tous les compartiments étudiés, certains habitats étant définis selon les principales espèces végétales qu'ils abritent, d'autres en fonction de leurs caractéristiques écologiques. Une typologie basée sur les caractéristiques physiques et biologiques des habitats et homogène à l'échelle de la zone d'étude a donc été construite. Elle regroupe les habitats naturels présentant des caractéristiques similaires (salinité, trophie, hygrophilie, substrat,...) et des unités de végétation proches en unités fonctionnelles auxquelles se rattachent des fonctions écologiques. Cette typologie s'affranchit ainsi volontairement des descriptions liées à une structure particulière (île, filandre, bras secondaire,...) car celles-ci sont en réalité la somme de plusieurs habitats (par exemple, une île est composée des habitats "vasière intertidale", "mégaphorbiaie non halophile", "forêt alluviale",...) qui peuvent supporter des fonctions écologiques. Les 16 unités fonctionnelles présentes dans le lit mineur et la plaine alluviale de l'estuaire sont les suivants : eaux libres, eaux closes, substrats subtidiaux, substrats intertidaux de bord des eaux, plages de sable et de galet, herbiers, gazons pionniers et prés salés, dunes, sources, gazons amphibies, roselières et magnocariçaies, mégaphorbiaies, prairies humides, landes, végétations arbustives, forêts alluviales et ripisylves\* [Figure D ; Lavabre & Fisson, 2013]. Les habitats qui composent chaque unité fonctionnelle ont été précisément décrits sur la base de leurs 1) caractéristiques majeures : hygrophilie, inondabilité, salinité, trophie, substrat, strate végétale ; 2) correspondances avec les principales typologies : CORINE Biotopes, Natura 2000, EUNIS, le Mode d'Occupation du Sol ; 3) caractéristiques écologiques, hydromorphologiques et biologiques des habitats ; 4) fonctions réalisées ou potentielles supportées [Lavabre & Fisson, 2013]. Une description précise des végétations représentatives de l'estuaire de la Seine a également été réalisée, en se concentrant sur les végétations sous influence halophile à subhalophile et sur celles du lit mineur liées aux eaux douces. Les végétations les plus spécifiques de la plaine alluviale, tourbeuse ou non, sont également décrites selon un gradient topographique (du niveau le plus bas vers le niveau le plus haut) et dynamique (de la végétation pionnière annuelle au stade boisé) [Lévy *et al.*, 2013].

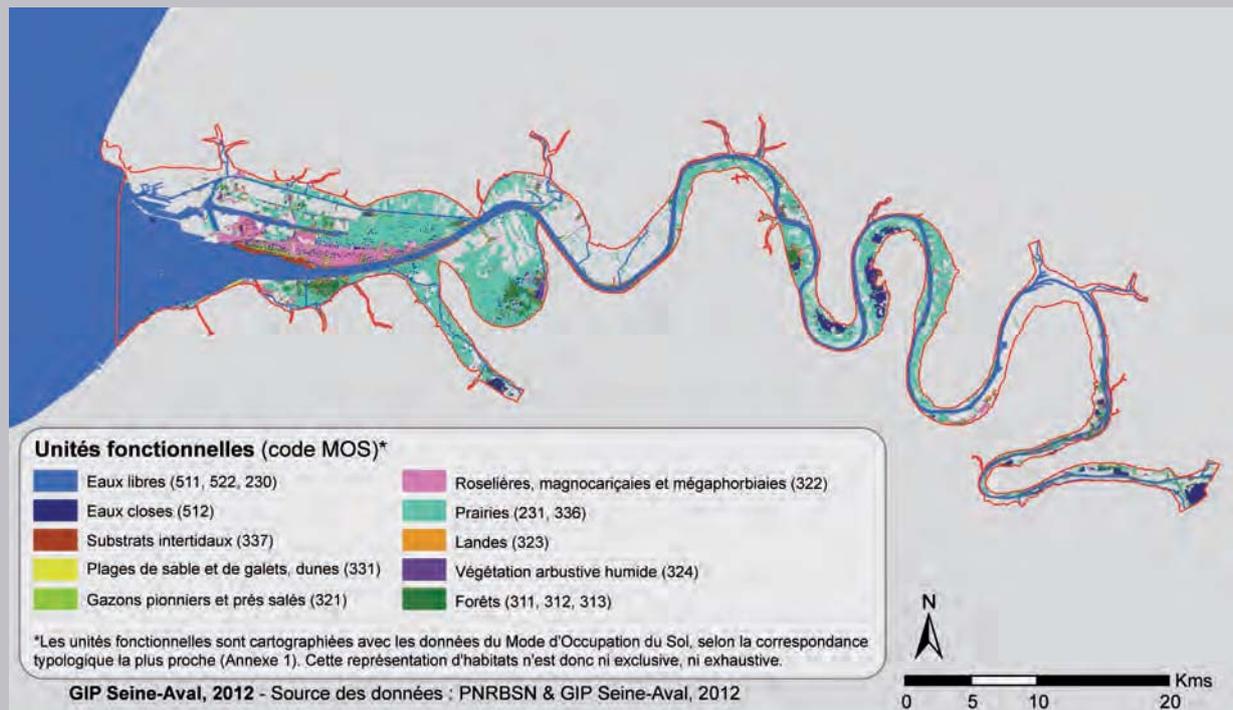


Figure D : Unités fonctionnelles composant les habitats du lit mineur et de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

Cette répartition a fortement évolué depuis les premiers aménagements réalisés sur l'estuaire, avec des changements d'affectation des sols assez importants. Ainsi, une analyse des modifications depuis 1973 montre une mise en culture des prairies (perte de prairies au profit de terres arables), une croissance des milieux à végétation herbacée et/ou arbustive (dont le schorre\*), une artificialisation des sols (développement des zones industrielles et commerciales, des zones portuaires et du tissu bâti discontinu), une croissance des plans d'eau (creusement de gravières et de mares de chasse) et des bassins portuaires (Port 2000) [Pons, 2009 ; Figure 11].

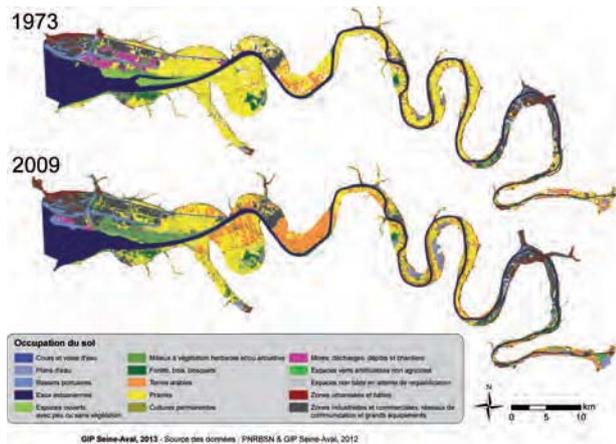


Figure 11 : Occupation du sol du lit mineur et de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine (1973-2009).

## D. Usages liés à l'estuaire de la Seine

Interfaces entre le milieu marin et le milieu fluvial d'une part, et le milieu aquatique et terrestre d'autre part, les estuaires sont des écosystèmes très dynamiques caractérisés par une mosaïque d'habitats très diversifiés (étendue d'eau, vasière, prairie humide, roselière, forêt alluviale,...). Leur fonctionnement global résulte de processus écologiques qui s'expriment au sein de ces milieux naturels ou artificiels sous l'influence de facteurs naturels (marée, courants, salinité, nature des sédiments,...) et anthropiques\* (contamination chimique, aménagements, occupation et usages du sol,...). Ces contraintes sont à l'origine de multiples gradients qui confèrent aux estuaires une richesse importante [Encart n°5 "Protection réglementaire du patrimoine naturel."].

Le fonctionnement écologique d'un estuaire et le maintien ou le développement des usages qui lui sont liés (navigation, exploitation halieutique ou agricole, dilution des rejets aqueux,...) dépendent ainsi de la bonne exécution des processus écologiques supportés par les milieux. Les grands estuaires des zones tempérées ont été aménagés depuis plusieurs siècles et de nombreux usages sont associés à ces milieux (navigation, exploitation halieutique ou agricole, dilution des rejets aqueux,...). De plus, ils constituent les parties aval des grands cours d'eau et les débits (liquides et solides) ainsi que la qualité des eaux provenant de l'amont dépendent directement de l'impact des activités humaines à l'échelle du bassin versant. Dans ce contexte (celui d'un anthroposystème complexe), le maintien des processus écologiques fondamentaux compatibles avec les usages et services écosystémiques constitue un enjeu majeur.

Les usages liés à l'estuaire de la Seine sont nombreux, qu'ils aient une valeur marchande (pêche professionnelle, navigation, épuration des rejets, protection contre les inondations, construction d'habitations avec vue sur Seine, croisières impressionnistes,...) ou non (production artistique personnelle, ballades en bord de fleuve, loisirs nautiques,...).

La **navigation commerciale** est l'un des usages principaux. En effet, la navigation sur la Seine et certains de ses affluents permet de relier l'amont du bassin versant à la baie de Seine. Elle joue un rôle majeur dans l'exportation des produits agricoles (notamment les cultures de céréales - blé, orge - et d'oléoprotéagineux - colza, pois - sur les plateaux de la Beauce) et dans la réponse aux besoins en produits manufacturés et en énergie du bassin versant. Le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) est ainsi le 1<sup>er</sup> port d'exportation céréalière en Europe et le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) joue un rôle majeur dans le trafic de conteneurs et l'approvisionnement en produits pétroliers. Cet usage a fortement augmenté au cours du temps, en lien avec les nombreux aménagements réalisés pour 1) sécuriser et faciliter les conditions de navigation, historiquement périlleuses, et 2) accroître le trafic. Au fur et mesure des travaux d'aménagement débutés dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, le chenal de navigation s'est stabilisé et a été approfondi, permettant ainsi à des navires de plus en plus imposants de remonter la Seine jusqu'à Rouen en toute sécurité et engendrant un accroissement du trafic [Figure 12 ; Foussard *et al.*, 2010]. Le tirant d'eau\* admissible à la montée (Le Havre - Rouen) en conditions de vive-eau (coefficient de marée de 115) est ainsi passé de 2.50m en 1842 à 8m en 1945 et 12,60m en 2007. Aujourd'hui, un navire relie Le Havre à Rouen en 6 heures.

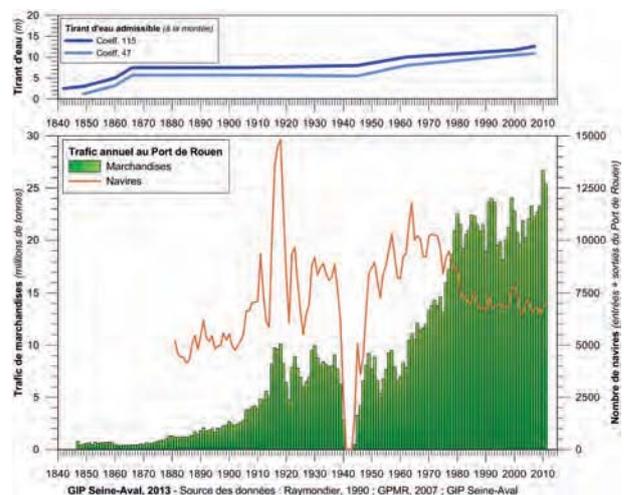


Figure 12 : Évolution du trafic au port de Rouen et tirant d'eau admissible à la montée.

L'**activité industrielle** s'est fortement développée à proximité de la Seine et l'implantation des industries s'est toujours faite en rapport au fleuve, que ce soit par 1) l'utilisation de la force hydraulique des affluents pour l'industrie textile (très présente jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle) ; 2) la proximité des ports pour l'apport du brut par navires, et de la Seine (transport fluvial des hydrocarbures, refroidissement des processus industriels) pour l'industrie pétrolière ; 3) la capacité de dilution et d'évacuation des contaminants pour les rejets aqueux ou ; 4) la présence de vastes terrains plats dans certains méandres pour l'établissement d'unités de production de grande taille, telles les raffineries ou les unités de construction automobile.

Un autre exemple d'activité industrielle dépendante du fonctionnement estuarien est celui de l'exploitation des sables alluvionnaires déposés par le fleuve depuis des millénaires (carrières en amont de Rouen et sur les boucles de Duclair et de Jumièges) et des granulats marins (en baie de Seine), pour alimenter l'industrie des travaux publics et du bâtiment des régions proches [PCHN, 2008]. **L'activité agricole** menée dans la plaine alluviale est fortement dépendante de la productivité biologique liée au fleuve et aux zones humides connexes, avec des pratiques en partie sous contrôle du fonctionnement hydrologique de l'estuaire (variation des niveaux d'eau [Encart n°6 "Les prairies humides de la Réserve naturelle de l'estuaire de la Seine : une gestion concertée pour concilier objectifs environnementaux et usages."], présence de sel sur les terrains à l'embouchure,...). **L'activité de pêche** exercée en baie de Seine est également dépendante de l'estuaire pour les espèces y réalisant une partie de leur cycle de vie. C'est par exemple le cas de la sole dont les juvéniles\* fréquentent notamment les fonds subtidiaux\* plus ou moins envasés et riches en benthos\* à l'embouchure de la Seine ; ou de migrateurs comme l'anguille qui passent par l'estuaire de la Seine pour rejoindre leur zone de reproduction [Morin *et al.*, 2010]. Le **développement urbain** le long de l'axe Seine s'est lui aussi réalisé en lien avec le cours d'eau, que ce soit pour des raisons liées au métabolisme urbain (utilisation de la Seine comme voie de transport pour l'alimentation des villes, comme réceptacle pour diluer et évacuer les rejets aqueux,...), à l'attractivité paysagère ou à la proximité des emplois (activités industrielles et agricoles dépendantes de l'estuaire) [GIPSA, 2010]. L'estuaire de la Seine est enfin le siège de nombreux **usages récréatifs**, que ce soit 1) des activités nautiques (pratique instituée de la voile, du kayak, de l'aviron, du motonautisme,... ; usages non institutionnels, voire transgressifs, d'activité de baignade ou de ski nautique) ; 2) des temps de loisirs sur les berges et le littoral (promenades à pied, à vélo, en roller, à cheval sur les quais ou les chemins de halage ; pauses contemplatives en bord de Seine ; plages, promenades et sites du littoral avec leur tradition de bain de mer ; activité de chasse, pêche, cueillette,...) ou ; 3) une mise en spectacle du fleuve (Armada avec des animations sur l'eau et les quais à Rouen et la « grande parade » de Rouen à la mer ; événements ponctuels utilisant la Seine comme support avec Rouen plage, la foire Saint Romain ou les feux d'artifice tirés sur les berges ou les ponts,...) [Figure 13 ; Sirost & Féménias, 2012 ; Sirost *et al.*, 2012 ; Sirost *et al.*, 2008].

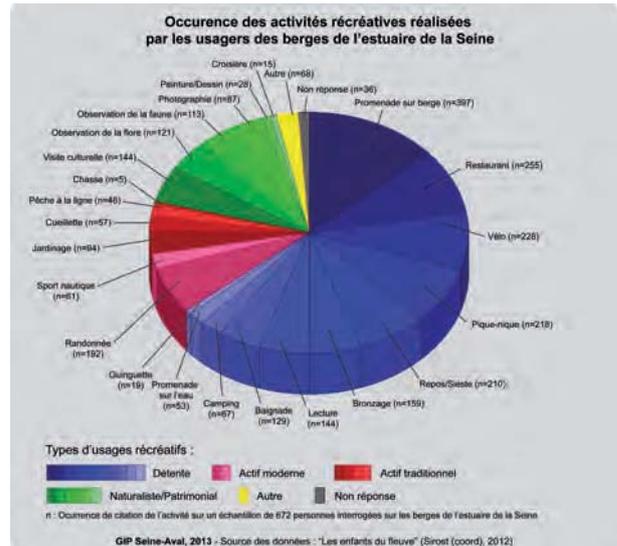


Figure 13 : Les usages récréatifs dans l'estuaire de la Seine.

Ces nombreux usages s'appuient sur des bénéfices que l'homme retire du fonctionnement de l'estuaire, mais ce dernier peut également être **source de préjudices**. Ils peuvent être illustrés par les crues et les courants de la Seine qui impliquent de régulièrement renforcer et repenser les aménagements de lutte contre l'érosion des berges et de défense contre les inondations. L'enjeu est important car il s'agit d'assurer le maintien et la sécurité d'infrastructures de transport, d'urbanisation, d'activités économiques industrialo-portuaires implantées en bordure de fleuve. Le stockage de contaminants dans les vasières et leur remobilisation lors d'événements particuliers (crue\*, tempête, aménagement) ou leur transfert le long de la chaîne trophique\* porte également préjudice à l'activité de pêche par exemple [Tableau III]. Une autre illustration d'un préjudice lié au fonctionnement de l'estuaire concerne le déplacement des sables et des vases dont une fraction se dépose dans le chenal de navigation, impliquant un dragage fréquent pour maintenir une hauteur d'eau compatible avec la navigation.

Tableau III : Interdictions de pêche permanentes en estuaire et baie de Seine liées à la contamination.

Cause de l'interdiction	Organisme(s) concerné(s)	Secteur(s)	Arrêté préfectoral
Microbiologie	Coquillages	Baie de Seine : - 500m autour des centrales nucléaires - 300m autour de l'entrée des ports et de l'embouchure des rivières - dans les ports - zones de clapage	du 21/01/2004
Classement de salubrité (D)	Coquillages	Baie de Seine : - de Trouville à Honfleur (zone 14-020) - estuaire de l'Orne (zone 14-040)	07-2008 du 31/01/2008 modifié par l'arrêté 18-2009 du 23/03/2009
Cadmium	Bulots >70mm	Baie de Seine : d'Antifer au Tréport	du 21/01/2004
Contaminants	Coquillages	Baie de Seine : du Havre à Antifer	11-2004 du 05/02/2004
PCB	Anguilles	Baie de Seine : d'Isigny au Tréport	08-017 du 23/01/2008
PCB	Sardines	Baie de Seine : de Barfleur à Dieppe	10-20 du 08/02/2010
PCB	Tous poissons	Seine : départements 76	08-0785 du 30/09/2008
PCB	Poissons fortement bioaccumulateurs (brèmes, silures, carpes, barbeaux, anguille) et faiblement bioaccumulateurs (Sandres, gardons et brochets)	Seine : départements 27	2013135-0003 du 15/05/13

GIP Seine-Aval, 2013 - Source des données : Préfectures 76, 14 et 27

## Encart n°5 - Protection réglementaire du patrimoine naturel

L'analyse des dispositions réglementaires visant à protéger le patrimoine naturel est une autre approche pour appréhender l'intérêt écologique et de la richesse des milieux. Leur cartographie permet de situer l'étendue spatiale des différentes mesures et de visualiser leur superposition sur le territoire estuarien [Figure E]. La majorité des mesures se concentre autour des cours d'eau et de leurs vallées (Seine, Risle), ce qui témoigne de la richesse de ces milieux et du fort potentiel écologique des zones intertidales et des zones humides. La partie aval de l'estuaire (entre Tancarville et le Havre) est la zone qui présente le plus de mesures de protection, avec des entités comme la Vasière Nord, le Marais du Hode ou la Grand-Mare qui cumulent un grand nombre de mesures. Dans la partie amont de l'estuaire, la protection est beaucoup plus faible, d'autant plus qu'on s'éloigne de la vallée. Cependant, ce sont encore les zones humides qui sont le plus protégées : marais de Jumièges, Tourbière d'Heutreauxville, ... [GIPSA, 2008e ; Alard *et al.*, 2002].



Figure E : Niveau de protection réglementaire du patrimoine naturel dans l'estuaire de la Seine.

## Encart n°6 - Les prairies humides de la Réserve naturelle de l'estuaire de la Seine : une gestion concertée pour concilier objectifs environnementaux et usages

### UN FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE PARTICULIER, SOUS INFLUENCE NATURELLE ET ANTHROPIQUE

La Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine est un bon exemple d'espace naturel avec une gestion hydraulique complexe. En effet, ce territoire à forts enjeux patrimoniaux se situe dans un contexte estuarien « compartimenté ». C'est-à-dire que le régime hydraulique est dépendant en grande partie des cycles de marées de vives eaux, elles-mêmes conditionnées par la présence d'infrastructures (digues constituées par la route de l'estuaire et le chemin de halage, digues du chenal de navigation de la Seine). Ces aménagements ont nécessité la mise en place d'ouvrages hydrauliques qui, avant la création de la réserve, avaient pour objectif principal de drainer le marais. Aujourd'hui, leur vocation est aujourd'hui de permettre une gestion hydraulique adaptée à l'ensemble des contraintes environnementales mais n'est pas adaptée à la gestion fine voulue par le gestionnaire (sous-section des buses d'alimentations en eau sous les digues, pas de surverse modulable possible...).

### DES BESOINS ENVIRONNEMENTAUX DE DIFFÉRENTS ORDRES

Les besoins environnementaux sont de différents ordres et parfois contradictoires sur un même secteur. En effet, la compartimentation et la gestion hydraulique d'un marais endigué favorisent l'installation d'espèces patrimoniales (Butor étoilé, Barge à queue noire, Busard des roseaux *Triglochin palustre*, *Trifolium squamosum*...) et le développement de fonctions environnementales spécifiques (capacité d'accueil de l'avifaune, alimentation de certains poissons, qualité de l'eau...) qui justifient le classement du territoire en réserve naturelle. Cependant, la situation de la réserve dans la partie aval de l'estuaire de la Seine implique également de prendre en considération les fonctions associées (nourriceries et nurseries de poissons et de crustacés, habitats estuariens : filandres).

Le mode de gestion actuel ne permet donc pas de répondre à tous ces objectifs puisque dans les parties endiguées, le fonctionnement hydraulique s'approche actuellement plus d'un fonctionnement d'un marais endigué que d'un milieu estuarien naturel.

Pour les habitats et les espèces représentatives des prairies humides en marais endigués, la gestion hydraulique actuelle est essentiellement basée sur les besoins de l'avifaune et se déroule de la façon suivante [Figure F] : 1) maintien d'un niveau d'eau haut hivernal jusque mars /avril pour favoriser l'accueil de l'avifaune en halte migratoire et en nidification, puis 2) un ressuyage progressif naturel pour assurer le succès de reproduction de l'avifaune nicheuse jusqu'à atteindre une cote minimale en été permettant le maintien de la vie aquatique des fossés, enfin 3) à partir du mois d'août/septembre et à chaque marée de vives-eaux, la recharge progressive du marais s'opère jusqu'à atteindre à nouveau un niveau haut en novembre/décembre. Dans la réalité, cette gestion est problématique car les ouvrages en place laissent peu de marge de manœuvre au gestionnaire ne permettant pas l'évacuation rapide des excédents d'eau qui peuvent être préjudiciables pour l'avifaune nicheuse et certains usages de la réserve au printemps. A contrario, pour optimiser les fonctionnalités estuariennes, il est primordial de disposer d'un va-et-vient entre la Seine et les parties endiguées. Celui-ci permettant l'entrée et sortie des poissons (juvéniles de bars, soles, flets, épinoches, etc.) et crustacés (crevettes grises) mais aussi l'auto-entretien des filandres, vecteur de l'ensemble des flux bio-géo-chimiques qui alimentent les prairies. Ce marnage n'est actuellement pas possible du fait du stockage de l'eau pour répondre à la fonctionnalité des prairies humides mais aussi du fait des ouvrages hydrauliques en présence.

### DES USAGES AVEC DES BESOINS POUVANT ÊTRE CONTRADICTOIRES

Les usages rendent également la gestion hydraulique optimale difficile car les besoins des usagers peuvent différer selon la saison [Figure F]. Du point de vue des **exploitants agricoles** des prairies humides, un ressuyage rapide dès le début du printemps (mi-mars) est nécessaire pour permettre une bonne portance des terrains avant la mise en pâture des parcelles et la reprise de l'activité bactérienne du sol permettant la repousse de la végétation. Ceci est contradictoire avec les objectifs de la réserve car, à cette époque, l'avifaune inféodée aux zones humides est en nidification. Ainsi la baisse rapide des niveaux d'eau compromet le succès de reproduction (prédation, isolement du nid). Autre exemple, la **coupe des roseaux** s'opère généralement entre janvier et la mi-mars et nécessite d'abaisser les niveaux pour permettre l'exploitation et le passage des engins, cette action peut poser problème vis-à-vis de la nidification précoce de certaines espèces d'oiseaux pouvant s'installer avant la remise en charge du marais aux marées d'équinoxes de mars (nécessité de recharger en eau après l'exploitation du roseau pour assurer les conditions hydrauliques printanières). Ces deux activités professionnelles, pour être pérennes, doivent être rentables. L'adaptation de ces pratiques aux objectifs de la réserve est donc un préalable nécessaire pour arriver à un optimum écologique mais reste difficile à mettre en œuvre afin que chacun s'y retrouve. Les chasseurs de la réserve poursuivent, quant à eux, des objectifs en matière de gestion hydraulique compatibles avec ceux de la réserve naturelle en période hivernale.

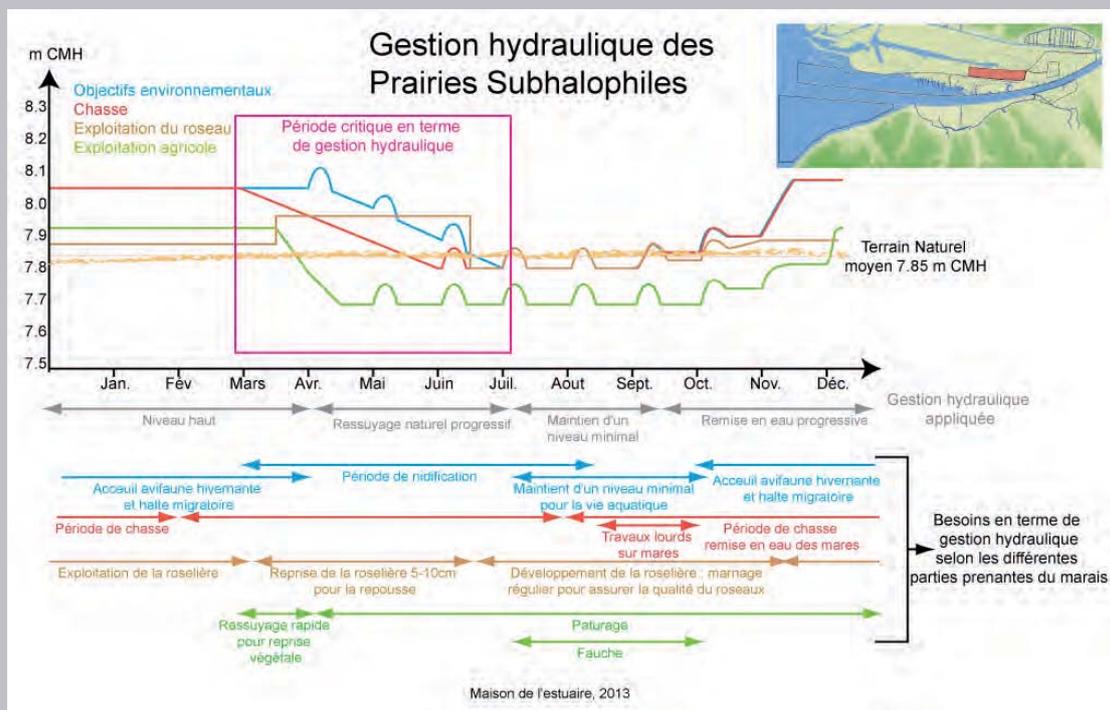


Figure F : Besoins pour la gestion hydraulique des prairies subhalophiles de la Réserve Naturelle de l'Estuaire de la Seine.

### UNE GESTION HYDRAULIQUE À CONSTRUIRE DE MANIÈRE CONCERTÉE

Le troisième plan de gestion de la réserve, récemment approuvé, a permis de redéfinir la gestion hydraulique sur les secteurs endigués. Celle-ci a été longuement discutée avec les acteurs sur la base d'un cadre fixé par l'État sans forcément aboutir à un consensus. Ainsi, le gestionnaire, sur les 5 prochaines années, tachera de mettre l'accent sur chacun de ces secteurs en considérant l'état actuel des populations et des habitats et leur devenir face aux changements climatiques annoncés. Des choix devront être faits face à un retour d'une certaine naturalité afin de garantir la pérennité des habitats, des espèces et des fonctionnalités de ce territoire classé. Ils passeront obligatoirement par une phase d'aménagements qui devra être réfléchie avec l'ensemble des acteurs pour répondre, autant que faire se peut, à l'ensemble des objectifs fixés. L'adaptation des pratiques professionnelles et récréatives sera nécessaire pour accepter ce nouveau mode de fonctionnement et garantir la viabilité de l'exploitation des prairies et de la roselière.

## II. ÉTAT DE SANTÉ DU MILIEU

Ce chapitre dresse l'évolution de l'état de santé de l'estuaire de la Seine, à travers une double approche thématique permettant d'en appréhender le fonctionnement et l'évolution : 1) la **qualité de l'eau** traite des pressions impactant l'estuaire, de sa contamination et des effets sur le vivant ; 2) les **peuplements aquatiques** sont abordés via les compartiments clés de l'écosystème estuarien (benthos, plancton, ichtyo-faune, avifaune, mammifères marins) et intègrent la notion d'habitat. Cette double vision apporte ainsi une image de l'état de santé de l'estuaire prenant en considération les différentes composantes.

### A. Qualité de l'eau

La qualité des eaux d'un milieu peut être appréciée par le suivi de divers paramètres (physico-chimiques, chimiques, microbiologiques) sur des matrices environnementales complémentaires (eau, sédiment, biote), dans le but de tracer une pollution, c'est-à-dire une altération de l'eau qui rend son utilisation dangereuse et (ou) qui perturbe l'écosystème aquatique car exerce une toxicité\*. Les sources de cette altération peuvent être multiples (industrielles, agricoles, urbaines) et prennent de nombreuses formes : eutrophisation, présence de substances toxiques (micropolluants\* minéraux ou organiques), présence de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, parasites), présence de macro-déchets, etc.

Les causes de pollutions sont diverses dans l'estuaire de la Seine, du fait des apports du bassin versant amont (source majoritaire en polluants\*), des sources intra-estuariennes (pôles urbains, zones industrielles, terrains agricoles en bord de Seine) et de la remise en suspension possible - lors d'épisodes de crue, de tempête ou lors de travaux - de sédiments anciens contaminés [Figure 14].

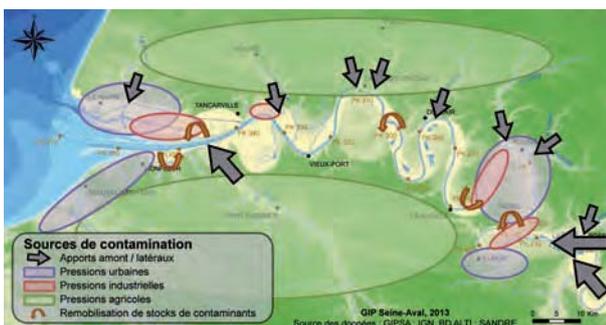


Figure 14 : Sources de contaminants à l'estuaire.

Le fonctionnement hydrosédimentaire propre aux cours d'eau et plus particulier aux estuaires joue un rôle important sur la qualité des eaux et l'impact qu'elle peut avoir sur les peuplements aquatiques. Cette dynamique impacte le transport et la dilution de la matière organique, des nutriments et des contaminants. Le bouchon vaseux assure quant à lui un rôle de filtre, stocke et transforme les contaminants. 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.

### 1. Oxygénation et apports en nutriments

Dans la partie fluviale (non soumise à la salinité) de l'estuaire de la Seine, un **déficit en oxygène chronique** apparaissait en période estivale et automnale. Particulièrement important lors de situations de faible débit de la Seine (<300 m<sup>3</sup>/s) et de forte température de l'eau (>20°C), ce déficit est en partie dû à des processus biologiques de consommation d'oxygène (nitrification, dégradation de la matière organique) et peut provoquer un dysfonctionnement écologique mettant en péril la survie d'un grand nombre d'organismes (barrière parfois infranchissable entre l'océan et les eaux continentales pour les poissons migrateurs tels que la truite de mer ou l'anguille) [Billen *et al.*, 1999]. Ce constat historique a aujourd'hui évolué et l'analyse des mesures d'oxygène montre la remarquable régression de la zone déficiente en oxygène dans l'estuaire de la Seine depuis les années 1970, avec une moindre amplitude spatiale et une durée plus faible des hypoxies [Figure 15 ; GIPSA, 2008a]. Le retour de l'éperlan avec une augmentation des abondances observée à partir de 2003, alors que cette espèce était encore rare à la fin des années 1990, est l'un des signes témoignant de l'amélioration de l'oxygénation dans l'estuaire [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, avec des effectifs annuels allant jusqu'à 150 individus observés en montaison en 2008 [Ciolfi & Paplorey, 2012]. Aucune zone d'hypoxie n'a d'ailleurs été observée par le réseau de suivi mensuel de la qualité des eaux de la Seine depuis 2007, mais une succession d'années marquées par des faibles débits, des températures estivales élevées et des apports importants en matières biodégradables à la Seine pourraient remettre en cause ce fragile équilibre [Figure 15 ; AESN & DDTM76, 2011]. Cette amélioration très nette de l'oxygénation des eaux est due aux efforts de traitement des effluents et de contrôle des rejets, aussi bien dans les industries que dans les villes et les efforts entrepris doivent être poursuivis, aussi bien dans la performance du traitement des effluents que dans la maîtrise des rejets. La refonte des stations d'épuration de l'agglomération parisienne a ainsi permis une amélioration sensible et surtout durable de l'oxygénation des eaux estuariennes [Billen *et al.*, 2007 ; Garnier *et al.*, 2012 ; SIAAP, 2013].

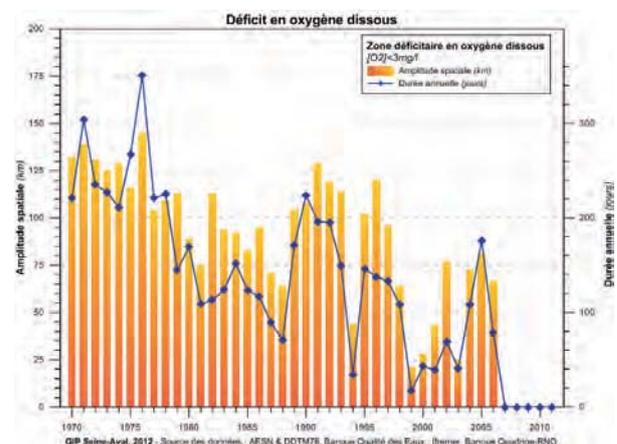


Figure 15 : Amplitude spatiale et durée annuelle du déficit en oxygène dans l'estuaire de la Seine.

Selon l'élément nutritif considéré, les profils d'évolution des concentrations dans l'estuaire diffèrent : diminution pour les orthophosphates et l'ammoniac, augmentation pour les nitrates, maintien pour la silice [AESN & DDTM76, 2011]. L'amélioration observée pour les **flux de phosphore** est à mettre en relation avec une meilleure maîtrise des rejets issus des activités anthropiques. Cette tendance devrait se poursuivre dans la décennie à venir de telle sorte que le phosphore deviendrait l'élément limitant pour les blooms algaux observés en milieu côtier [Garnier *et al.*, 2012]. Pour ce paramètre, l'objectif de réduction par deux du flux de phosphore visé par la convention OSPAR devrait être atteint (la convention d'Oslo-Paris pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est entrée en vigueur le 25 mars 1998 définit diverses recommandations visant à réduire les pressions des activités anthropiques sur le milieu marin). La réduction très sensible de l'**ammoniac** devrait également se poursuivre dans la décennie à venir grâce à la généralisation du traitement de l'azote dans les stations d'épuration de l'agglomération parisienne. Concernant les **nitrates**, une hausse des concentrations est observée à l'échelle régionale, que ce soit dans les eaux de surface ou souterraines, avec des valeurs plus élevées dans ces dernières. Ceci révèle la présence d'un réservoir de contamination en nitrates dans l'aquifère de la Craie, principalement alimenté par les apports agricoles [Figure 16]. 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, 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].

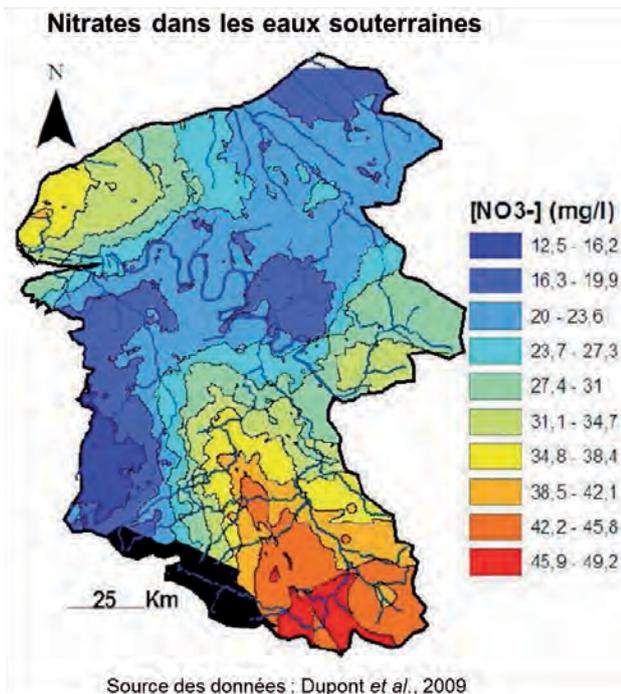


Figure 16 : Concentration en nitrates dans les eaux souterraines du bassin versant d'alimentation de l'aquifère de la craie de Haute-Normandie.

Cette présence d'éléments nutritifs en excès et le déséquilibre de leur part respective dans le milieu sont en partie responsables des **blooms algaux** observés en baie de Seine, avec parfois des efflorescences d'algues produisant des phycotoxines pouvant être dangereuses pour la faune aquatique et pour l'homme, via la consommation de fruits de mer ayant accumulé ces dernières [Garnier *et al.*, 2012]. Dans la partie orientale de la baie de Seine, les toxines de type PSP (toxines paralysantes produites par *Alexandrium*) et de type ASP (toxines amnésiantes produites par *Pseudo-Nitzschia*) ne sont pas observées depuis 10 ans, à l'exception d'un épisode toxique ASP entre novembre 2005 et juin 2006. Quant aux toxines de type DSP (toxines diarrhéiques produites par *Dynophysis*), elles sont observées tous les ans (généralement entre août et octobre) à des seuils supérieurs aux recommandations sanitaires et entraînent l'édiction régulière d'arrêtés préfectoraux interdisant temporairement la vente et le ramassage de coquillages devenus impropres à la consommation [Figure 17 ; Ifremer LERN, 2012 ; Belin, 2004].

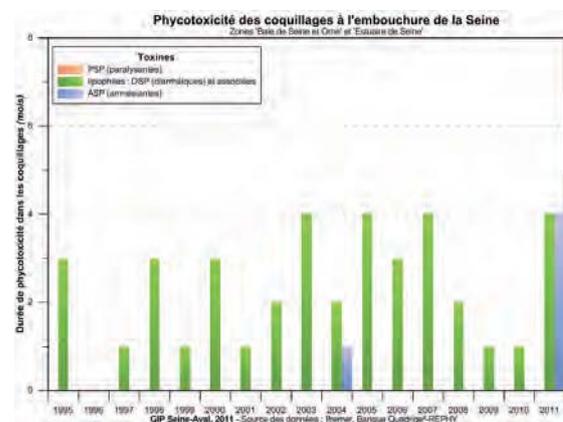


Figure 17 : Épisodes de toxicité algale en baie de Seine.

Les efforts de traitement des effluents urbains et industriels ont amélioré significativement les taux d'oxygénation des eaux de la Seine. Les déficits observés aujourd'hui sont ponctuels (dans le temps et l'espace) et ne semblent plus limitants pour les espèces les plus sensibles à ce paramètre. Les efforts de traitement et la réduction de certaines sources ont également permis une réduction sensible des flux à la Seine pour l'ammoniac et le phosphore.

Les apports en nitrates restent à des niveaux toujours problématiques (~100 000 t/an à Poses) et le bassin de la Seine est classé en zone vulnérable pour ce paramètre. La maîtrise de ce flux est problématique car les apports sont diffus et se font par ruissellement et apport de la nappe de la Craie. L'inertie de ce système hydrogéologique fait craindre une poursuite de la hausse des concentrations de nitrates dans la Seine et une non-atteinte des exigences réglementaires.

Au-delà des problèmes environnementaux posés par les fortes concentrations en nutriments, le déséquilibre de leurs apports (notamment silice/azote) joue un rôle dans les blooms d'algues régulièrement observés en baie de Seine et dans la production de phycotoxines qui présentent des risques pour la santé humaine. Des normes sanitaires sont associées à ces dernières et leur dépassement régulier engendre des interdictions ponctuelles de vente et de ramassage des coquillages en baie de Seine.

2. Micropolluants chimiques

Parmi les micropolluants dits historiques, les **métaux** sont certainement ceux qui ont connu la diminution la plus nette dans l'estuaire de la Seine depuis plusieurs décennies. En effet, la contamination métallique de l'estuaire de la Seine, maximale et très importante dans les années 1950 à 1970, a connu une très forte baisse depuis les années 1970 et 1980 (baisse des concentrations moyennes dans l'eau d'un facteur de 3 à 10 pour le cadmium, le nickel, le plomb et le zinc en trente ans). Les teneurs moyennes en métaux aujourd'hui mesurées sont proches des bruits de fond naturels\* pour les sédiments fins de surface prélevés dans l'estuaire de la Seine. Une décroissance des niveaux de contamination est généralement observée de l'amont vers l'aval. Ce constat n'est cependant pas homogène et des contaminations persistent pour le plomb, le zinc et surtout le cadmium et le mercure [Figure 18 ; Fisson, 2012b ; Boust *et al.*, 2012 ; AESN & DDTM76, 2011 ; Lachambre & Fisson, 2007]. Cette amélioration de la contamination métallique est à relier aux importantes réductions des rejets industriels (modifications de pratiques, amélioration du traitement des effluents,...) en réponse au durcissement de la réglementation.

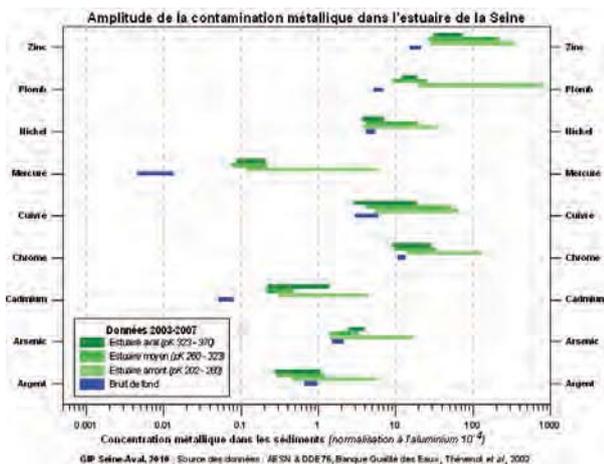


Figure 18 : Contamination métallique des sédiments et bruit de fond géochimique.

L'utilisation massive des **pesticides** a engendré leur dissémination dans l'environnement et leur activité toxique fait peser un risque sur le milieu [Encart n°7 "Le faucon pèlerin et le DDT."]. Dans l'estuaire de la Seine, de nombreux pesticides sont détectés dans les eaux, les sédiments et les organismes y vivant. L'empreinte de cette contamination a très largement évolué au cours du temps. En effet, de nombreuses molécules aux effets avérés sur l'environnement ont vu leurs usages progressivement restreints ou interdits (En France : 1973 pour le DDT, 1992 pour l'aldrine, 1998 pour le lindane, 2001 pour l'atrazine, 2008 pour le diuron,...) permettant une baisse des concentrations environnementales et leur fréquence de détection [Figure 19]. Cependant, la rémanence\* de certaines de ces molécules dans les sédiments et la chaîne alimentaire reste une réalité et les nouvelles générations de pesticides posent de nouveaux défis analytiques, les molécules étant actives à de plus faibles doses, ce qui rend leur détection (et celles de leurs métabolites) plus difficile.

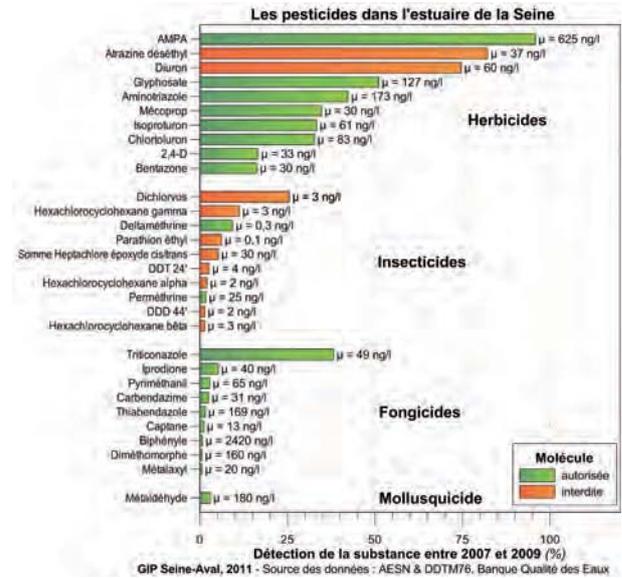


Figure 19 : Détection des pesticides dans les eaux de l'estuaire de la Seine

Bien que pouvant avoir une origine naturelle (feux de forêt, volcanisme, suintements,...), les **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)** aujourd'hui retrouvés dans l'environnement proviennent majoritairement des activités humaines (chauffage, transport routier,...). Le suivi de ces substances dans l'estuaire de la Seine ne permet pas de dégager une tendance claire sur l'évolution des niveaux de contamination et ils restent extrêmement élevés au regard des bruits de fond naturels (enrichissement entre 10 et 1500 fois selon les HAP), avec une décroissance de teneurs observées de l'amont vers l'aval et la baie de Seine [Figure 20 ; GIPSA, 2008b]. Les études scientifiques menées pour déterminer les effets de la contamination sur les organismes font apparaître le rôle prépondérant des HAP dans la génotoxicité associée au contact d'organismes à des sédiments de l'estuaire de la Seine. Cette génotoxicité peut par exemple se traduire par des dommages à l'ADN et des mutations pouvant conduire à des tumeurs chez les poissons [Cachot *et al.*, 2005 ; Cachot *et al.*, 2006]. Des perturbations du développement et de la fonction neuromusculaire ont également été observées chez le copépode *Eurytemora affinis* (espèce planctonique dominante dans la zone du gradient de salinité) après exposition à l'eau de Seine chargée en matières en suspension\*, éléments sur lesquels les HAP sont majoritairement retrouvés. Le caractère génotoxique des HAP semble donc bien s'exprimer sur des organismes vivant dans l'estuaire de la Seine [Cailleaud *et al.*, 2006 ; Poisson *et al.*, 2011].

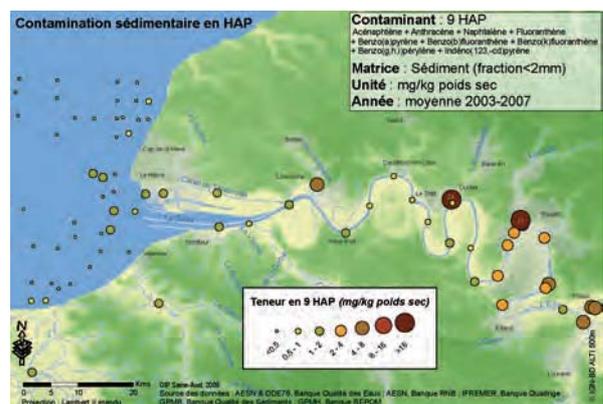


Figure 20 : Contamination en HAP des sédiments fins de surface

## Encart n°7 - Le faucon pèlerin et le DDT

Le faucon pèlerin est un rapace qui niche dans les falaises. Sa présence sur le littoral haut-normand est documentée dès le XIX<sup>ème</sup> siècle et l'évolution des effectifs a été retracée depuis 1934. À cette date, 15 couples sont recensés en vallée de Seine et un déclin débuté en 1950 débouche sur une disparition de l'espèce en Normandie en 1965. Un retour a été amorcé au début des années 1980 sur les falaises du pays de Caux et une population croissante a dès lors recolonisé le littoral. En vallée de Seine, un premier couple a été observé en 2000 et 17 couples sont dénombrés en 2010, soit une population du même ordre de grandeur que les effectifs historiques [Figure G ; Ranvier & Dumais, 2011].

L'emploi des pesticides, et particulièrement du DDT (insecticides organochlorés), a largement contribué à cette chute des effectifs qui a été mondiale, avec des extinctions sur des régions entières. En effet, la stabilité chimique du DDT lui permet de se bioamplifier le long de la chaîne trophique et d'exercer sa toxicité sur les animaux au sommet de cette chaîne. C'est le cas du faucon pèlerin, dont la reproduction a été fortement impactée : chez les femelles intoxiquées, un amincissement de la coquille lié à un défaut de calcification fragilisait les œufs qui se brisaient lors de l'incubation. Le DDT, d'usage courant en agriculture dès les années 1950, a été interdit dans les années 1970 dans de nombreux pays (1972 en France).

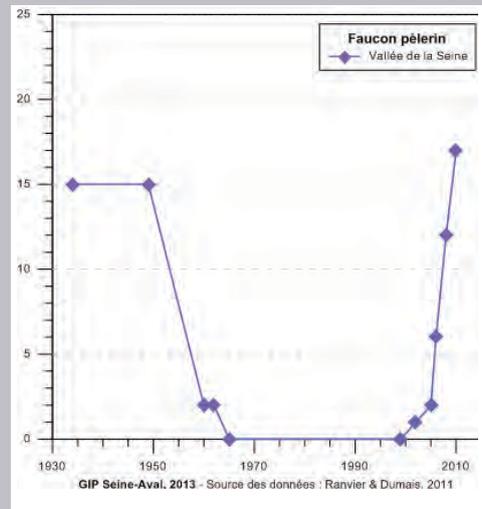


Figure G : Couples nicheurs de Faucon pèlerin dans la vallée de la Seine.

D'origine anthropique et fortement utilisés jusque dans les années 1980 pour leur stabilité, les **PolyChloroBiphényles (PCB)** ont largement contaminé les différents compartiments environnementaux. Leur forte rémanence et leur liposolubilité\* expliquent en grande partie qu'ils soient encore retrouvés dans tous les compartiments physiques et biologiques malgré les réglementations de restriction puis d'interdiction de leur usage (1987 en France). Bien qu'une diminution globale de la contamination soit observée dans les différents compartiments environnementaux, les teneurs mesurées dans certains organismes aquatiques dans divers cours d'eau de Haute-Normandie, dont la Seine, posent un problème sanitaire avec des non-respects de la teneur maximale admissible en PCB [Figure 21]. Diverses études ont également montré que pour des consommateurs de produits de la mer, la consommation importante et régulière de mollusques et de poissons provenant de la baie de Seine peut entraîner le dépassement des valeurs toxicologiques de référence pour les PCB<sub>i</sub> et les PCB de type dioxines et furanes. Ces résultats sanitaires ont débouché sur l'édiction d'arrêtés interdisant, depuis 2008, la pêche de toutes les espèces de poissons dans la Seine (départements 76, 14 et 27) en vue de leur consommation ou de leur 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 depuis 2008. Les sardines sont interdites de pêche en baie de Seine (de Barfleur à Dieppe) depuis 2010. [Bocquené *et al.*, 2012 ; Leblanc *et al.*, 2006 ; Dagnat & Fisson, 2010 ; Fisson, 2012a].

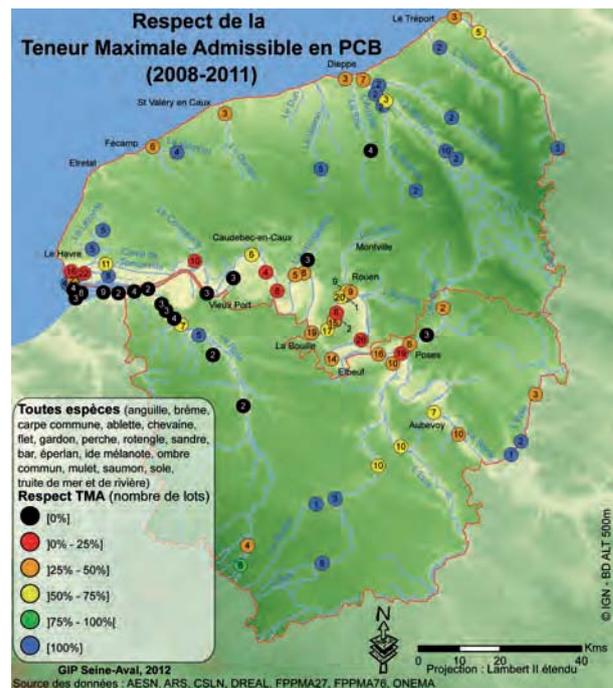


Figure 21 : Respect de la Teneur Maximale Admissible en PCB pour les poissons des cours d'eau de Haute-Normandie.

Le terme « **émérgent** » associé aux micropolluants désigne des substances dont l'intérêt environnemental est récent, soit 1) du fait d'utilisations nouvelles, 2) de la mise en évidence d'effets sanitaires ou environnementaux alors inconnus ou 3) de l'amélioration significative des instruments et des procédures analytiques. Ces substances dites émergentes peuvent ainsi être présentes dans l'environnement depuis plusieurs décennies à des teneurs parfois non négligeables ou au contraire avoir une occurrence récente. Il s'agit de produits cosmétiques ou pharmaceutiques (hormones, stéroïdes, antibiotiques,...) [Encart n°8 "Présence de substances pharmaceutiques dans l'estuaire de la Seine."], de produits présents dans des objets

manufacturés (retardateurs de flamme, plastifiants, nanoparticules,...), de substances utilisées dans l'industrie (biocides, tensio-actifs,...) ou issues du milieu agricole - culture ou élevage - (pesticides, produits pharmaceutiques,...). Dans l'estuaire de la Seine, certaines de ces substances ont été recherchées et retrouvées (pesticides, phtalates, PBDE, anti-inflammatoires, antibiotiques, etc.). 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).

Afin d'estimer les **effets de cette multi-contamination** sur les organismes aquatiques vivant dans l'estuaire de la Seine, de nombreux tests écotoxicologiques\* et observations ont été menés depuis plusieurs années. Des effets ont ainsi été mis en évidence sur les mollusques, les annélides et les crustacés : cassures à l'ADN sur des moules bleues et des dreissenés, 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 : 1) sur le génome : apparition de lésions tumorales après exposition en laboratoire à des sédiments prélevés dans l'estuaire ; 2) sur le système nerveux, sur la physiologie, sur le système immunitaire : présence de nécroses cutanées et de *lymphocystis* chez des flets ; 3) 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 constatés de la contamination sur la reproduction et le développement chez des individus sont à souligner, car des répercussions sont possibles sur les populations\* et les communautés\* (modification des sexratios, des structures de population), même si les effets de la contamination sont difficiles à appréhender à ces niveaux d'organisation [Poisson *et al.*, 2011].

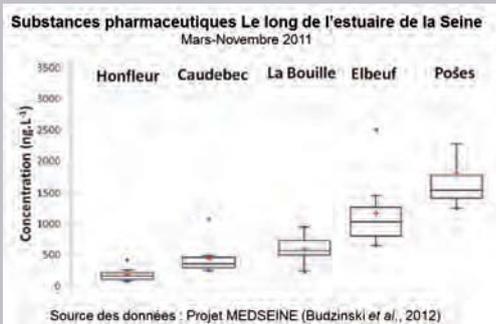
Au-delà de ces effets sur l'environnement, la multi-contamination de l'estuaire de la Seine pose des problèmes sanitaires et économiques (interdiction de pêche des poissons de l'estuaire en lien avec les PCB, interdiction de consommation des bulots de plus de 70mm en lien avec le cadmium,...), réglementaires (report d'objectif pour l'atteinte du bon potentiel demandé par la Directive Cadre sur l'Eau, difficultés dans les procédures réglementaires de projets d'aménagement ou de gestion des sédiments de dragage) et sociétaux (vision négative de la Seine [Sirost *et al.*, 2006]).

Les niveaux de contamination pour les substances « anciennes » (métaux, pesticides de première génération) ont très largement diminué, en lien avec la baisse continue des rejets industriels depuis plusieurs dizaines d'années et les interdictions ou restrictions d'usage de molécules. Ces améliorations significatives ne doivent cependant pas occulter 1) le « stockage » de contaminants dans les couches profondes de sédiments potentiellement remobilisables lors de crues, de tempêtes ou de travaux ; 2) la présence de substances (HAP, PCB,...) à des teneurs posant des problèmes environnementaux visibles à moyen-long terme (effets génotoxiques, perturbations endocriniennes,...) ; 3) la présence d'un cocktail de molécules à faibles concentrations (phtalates, pesticides et métabolites, PBDE, résidus de produits pharmaceutiques ou cosmétiques), ayant un impact sur le compartiment biologique en laboratoire et dont la répercussion sur les populations aquatiques pose question.

Bien que le danger lié à la contamination chimique de l'estuaire de la Seine ait fortement décliné depuis les années 1970 où il était maximal, les niveaux de contamination encore observés aujourd'hui rendent légitime la question des répercussions sanitaires potentielles, notamment pour les gros consommateurs de produits de la pêche. Le dépassement des normes sanitaires pour les PCB a d'ailleurs débouché sur une interdiction de consommation des poissons pêchés dans l'estuaire de la Seine.

## Encart n°8 - Présence de substances pharmaceutiques dans l'estuaire de la Seine

Les substances pharmaceutiques regroupent différentes classes thérapeutiques (antibiotiques, anti-inflammatoires, antalgiques, psychotropes, bêtabloquants, hypolipémiants, etc.) caractérisées par une grande diversité de structure chimique et des activités biologiques spécifiques. En France, cela représente plus de 3000 médicaments à usage humain et 300 médicaments vétérinaires. Après ingestion, leur excrétion se fait sous la forme initiale ou sous forme de métabolites dont des résidus sont retrouvés dans le milieu naturel,



Figure\_H : Concentration en substances pharmaceutiques le long de l'estuaire de la Seine.

même après leur passage en station d'épuration [MEDTL & MTE, 2011]. Dans l'estuaire de la Seine, 41 substances pharmaceutiques (sur 97 molécules suivies) ont ainsi été détectées. La concentration totale maximale est observée à Poses et elle décroît vers l'embouchure de la Seine, indiquant un apport majoritaire du bassin parisien, une dilution progressive par les eaux marines, ainsi que très certainement une dégradation. Les différents profils de contamination sont dominés par les anti-inflammatoires non stéroïdiens (kétoprofène, ibuprofène, diclofénac), les bêtabloquants (sotanolol, aténolol), des antibiotiques (érythromycine, spiramicyne), la caféine ou encore la carbamazépine (antiépileptique [Figure\_H ; Budzinski *et al.*, 2012]. Aucune évolution qualitative ou quantitative marquée n'a été observée depuis le début des années 2000 [Budzinski *et al.*, 2012 ; Togola, 2006]

### 3. Contamination par les micro-organismes

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'origines fécales (issues des rejets d'eaux usées). 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 1) des rejets directs d'eaux usées domestiques ; 2) des rejets de collecteurs pluviaux contaminés ; 3) des débordements de fosses à lisier et du ruissellement sur des surfaces d'élevage ou d'épandage ; 4) des rejets d'industries agroalimentaires (abattoirs, ...). La présence possible dans les eaux du milieu naturel de microorganismes pathogènes pour l'homme (bactéries entéropathogènes, virus de gastro-entérites, hépatites A, etc.) et la présence d'usages pouvant entraîner une exposition (pratiques nautiques, baignade, pêche à pied, ...) justifie alors l'importance sanitaire et épidémiologique de leur suivi.

Dans les eaux de l'estuaire de la Seine, les abondances des **bactéries indicatrices de contamination fécale** (*E. coli* et entérocoques intestinaux (*Enterococcus*)) sur lesquelles se base la réglementation européenne pour définir la qualité microbiologique des eaux de baignade sont ainsi suivies, bien que cette activité ne soit pas autorisée sur ce secteur. Les résultats 2008-2011 montrent une non-conformité globale des sites échantillonnés, avec des dépassements des seuils définissant une eau de qualité suffisante pour la baignade (respectivement 185 et 500 UFC/100mL pour les entérocoques et *E. coli* évalués au percentile 90) [Figure 22 ; AESN & DDTM76, 2011]. Sur une période de temps plus long,

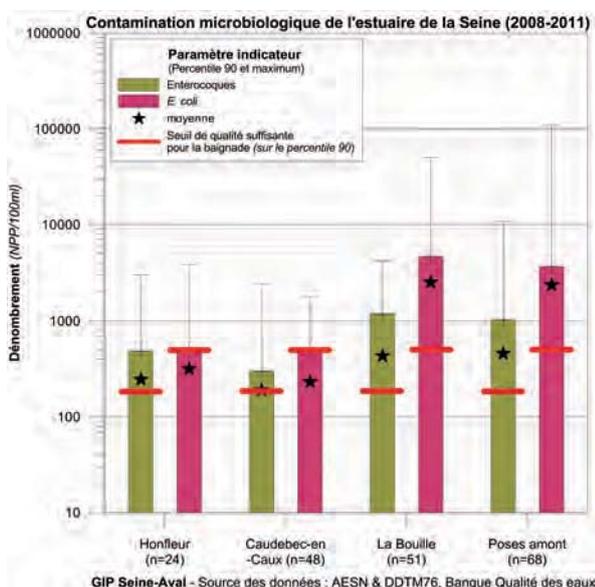


Figure 22 : Qualité microbiologique des eaux de la Seine.

la contamination bactérienne vue par ces deux indicateurs montre une amélioration nette à l'aval de Rouen depuis 1997, année de mise en service de la station d'épuration des eaux urbaines de l'agglomération rouennaise, dont le traitement biologique secondaire permet un net abattement des bactéries en sortie de station. Ainsi au niveau de La Bouille, la moyenne 1997-2011 représente un abattement de 43 % par rapport à la moyenne des 19 années précédentes pour les *Escherichia coli* et de 70 % pour les Entérocoques intestinaux [AESN & DDTM76, 2011].

Une synthèse de la présence de différents microorganismes, dont les indicateurs de contamination fécale, a permis de dresser une image plus complète de la qualité microbiologique des eaux de l'estuaire de la Seine [Figure 23 ; Petit & Berthe, 2007 ; Touron *et al.*, 2007]. Le secteur amont de l'estuaire (en période de fort débit), l'agglomération rouennaise et l'embouchure sont les zones où le « danger microbiologique » est le plus élevé, notamment mis en évidence par les flores indicatrices de contamination fécale (*E. coli* et entérocoques), les salmonelles et les parasites (*Cryptosporidium sp.* et *Giardia sp.*). À noter également, la présence de *Cryptosporidium* dans les moules de baie de Seine, qui restent néanmoins rarement contaminées par les bactéries d'origine fécale. Une première analyse n'a pas permis de mettre en évidence de virus infectieux, ceux-ci pourraient être rapidement inactivés dans les eaux de la Seine comme cela a été observé pour les eaux du Saint-Laurent [Petit & Berthe, 2007 ; Touron *et al.*, 2007]. Une contamination avérée en bactéries et parasites d'origine fécale est donc établie pour l'estuaire de la Seine, bien que variant selon les zones de l'estuaire (apport des affluents, usages sur les bassins versants, dynamique sédimentaire, salinité) et les facteurs hydrologiques (débit, pluviométrie). Des **multi-résistances à des antibiotiques** (essentiellement de prescription humaine, comme l'amoxicilline, la ticarcilline ou la tétracycline) ont également été montrées chez des *Escherichia coli* des eaux de l'estuaire de la Seine, sans que les concentrations en antibiotiques dans le milieu soient compatibles avec une pression de sélection qui expliquerait l'apparition de ces résistances. Leur origine est donc vraisemblablement liée aux apports des effluents urbains (et dans une moindre mesure des effluents agricoles) présentant des bactéries sélectionnées dans les réservoirs humains (et animaux) soumis à des traitements antibiotiques [Petit *et al.*, 2012].

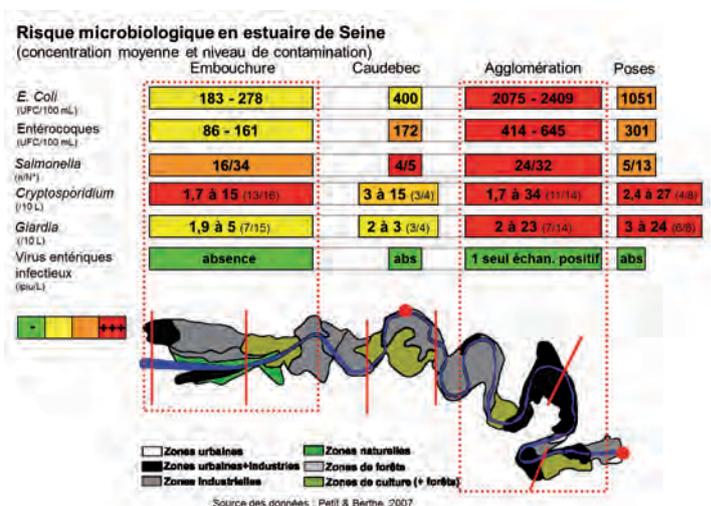


Figure 23 : Risque microbiologique des eaux de l'estuaire de la Seine.

L'usage « pêche à pied » à l'embouchure de la Seine a été ciblé comme pratique présentant un risque sanitaire lié à la contamination microbiologique des coquillages et des arrêtés interdisent leur pêche sur le littoral entre Trouville et Antifer ont été pris. Cependant, une pratique de pêche est établie sur divers sites (Le Havre, Octeville-sur-Mer, Saint-Jouin-Bruneval) pour une population estimée à 450 pêcheurs réguliers, dont l'exposition pose question. En effet, ils méconnaissent très majoritairement (94%) ces interdictions, ne considèrent pas (73%) cette zone comme polluée et n'identifient pas de risque sanitaire lié à une intoxication (93%). 17% des pêcheurs réguliers déclarent consommer le produit de leur pêche [Evrard, 2010].

La problématique de la contamination microbienne de l'estuaire de la Seine est toujours d'actualité avec une contamination avérée en bactéries et parasites d'origine fécale et un dépassement des seuils définissant une eau de qualité suffisante pour la baignade. Une très nette amélioration de la qualité microbienne des eaux à l'aval de Rouen a cependant été observée suite à la mise en service de la station d'épuration des eaux urbaines de l'agglomération rouennaise (1997).

Les apports microbiens liés à la pression urbaine (apports de l'amont et internes à l'estuaire) et agricole (apports ponctuels par ruissellement liés à l'élevage) restent supérieurs à la capacité de dilution et de dégradation de la Seine. Cette contamination peut poser des problèmes sanitaires en lien avec les usages ludiques de la Seine et la consommation de coquillages. A l'embouchure de la Seine, le niveau de contamination microbienne de ces derniers n'est d'ailleurs pas compatible avec leur consommation et la pêche à pied est interdite dans ce secteur.

## B. Peuplements aquatiques

La productivité et le fonctionnement de l'écosystème estuarien reposent sur les espèces structurant les réseaux trophiques aquatiques, leur présence étant à la fois liée à la qualité des eaux et à la nature et la structure des habitats. Sans chercher l'exhaustivité, ce chapitre se base sur les compartiments clés et les mieux documentés (phytoplancton, phytobenthos, méiofaune, zooplancton, suprabenthos, macrozoobenthos, ichtyofaune, avifaune) pour dresser une évolution de l'état de santé de l'estuaire de la Seine, à travers ses peuplements aquatiques.

### 1. Compartiment planctonique et invertébrés benthiques

Le plancton\* désigne les organismes vivant en eaux douces, saumâtres ou salées et flottant passivement dans la colonne d'eau, qu'il soit végétal (phytoplancton) ou animal (zooplancton : larves, copépodes, méduses,...). Le plancton occupe une position clé dans les réseaux trophiques, le phytoplancton étant consommé par le zooplancton qui sert lui-même de proie à une multitude d'organismes aquatiques, à leur tour la proie d'espèces de niveau trophique supérieur (crustacés, poissons, oiseaux, mammifères marins,...).

Très peu d'études ont été menées sur le **phytoplancton** de l'estuaire de la Seine et aucun inventaire récent n'est disponible pour ces espèces, hormis quelques données dans les bassins portuaires [Ruellet & Breton, 2012]. Issu de la production primaire, leur rôle dans le bilan d'oxygène des eaux a néanmoins

été montré, les déclin phytoplanctoniques coïncidant avec les déficits en oxygène observés dans les années 1990 [Garnier *et al.*, 1997]. Ce compartiment a été beaucoup plus étudié en baie de Seine, avec la problématique liée aux blooms phytoplanctoniques décrite dans le chapitre II.A.1.

Au-delà du rôle trophique du **zooplancton**, la composition, l'état physiologique et la dynamique des populations intègrent de nombreux facteurs environnementaux sur des échelles spatiales et temporelles plus ou moins larges : forçages hydroclimatiques multi-échelles, modifications morphologiques de l'habitat\* pélagique, pression liée aux contaminants,... Une première caractérisation des habitats des principaux copépodes *Eurytemora affinis*, *Acartia spp* et *Temora longicornis* en fonction du gradient de salinité montre que ces trois espèces occupent des habitats distincts en fonction du gradient de salinité. En plus de la salinité, la température joue un rôle important dans leur dynamique saisonnière. Ceci confirme que les changements climatiques vont affecter les habitats et nécessairement les populations de copépodes et par conséquent le reste du réseau trophique estuarien. Il est fort probable que l'importance des espèces marines (telle que *Temora longicornis*) va s'accroître avec l'intrusion saline dans l'estuaire. De même, l'augmentation de la température devrait favoriser le complexe d'espèces *Acartia spp* plus thermophiles [Souissi *et al.*, 2011]. Utilisé comme indicateur écologique, le suivi du zooplancton dans l'estuaire de la Seine permet d'apporter des éléments sur la qualité et l'évolution de ce système (salinité, température, contamination,...) [Devreker *et al.*, 2012 ; Souissi *et al.*, 2011 ; GIPSA, 2009b]. Ainsi, le stress chimique subi par le zooplancton induit notamment des modifications dans le comportement de ces organismes et peut influencer sur le succès de processus comportementaux (reproduction, capture de nourriture, esquive des prédateurs) dont dépend l'état de la population. Par exemple, l'exposition à des composés organiques (nonylphénols) perturbe le comportement natatoire (direction et vitesse de déplacement) d'*Eurytemora affinis*. Cette désorganisation des trajets suivis par ce copépode pourrait entraîner des perturbations dans les rencontres entre mâles et femelles lors de l'accouplement et par conséquent avoir des répercussions sur le renouvellement de la population [Forget-Leray, 2007]. Cependant, les copépodes étant présents à de fortes densités dans l'estuaire de la Seine, la question de mise en place de mécanismes de défense et d'adaptations physiologiques et biochimiques est posée. Des premiers éléments indiquent une adaptation de ce copépode et plus précisément 1) une capacité de résistance à la contamination chimique avec une acclimatation dès les premiers stades de vie et 2) une plasticité phénotypique (régulation entre la densité et la fécondité des femelles) observée à la troisième génération de copépodes exposés à divers contaminants. La croissance individuelle (taille) et la production d'œufs sont également des paramètres qui fluctuent en réponse à un stress chimique, selon des mécanismes relativement similaires à ceux observés en réponse à un stress thermique ou salin [Ben Radhia – Souissi, 2010 ; Forget-Leray *et al.*, 2012].

Le **benthos** regroupe l'ensemble des organismes vivants en relation étroite avec les fonds subaquatiques et comprend le phytobenthos (végétaux) et le zoobenthos (animaux). Les macro-invertébrés benthiques sont le groupe le mieux connu dans l'estuaire de la Seine et sont utilisés comme indicateur de la qualité écologique du milieu dans lequel ils vivent pour plusieurs raisons : ils sont sédentaires, ils vivent relativement longtemps (de plusieurs mois à plusieurs années), ils disposent d'une large diversité de réponses face à différentes perturbations (modification

du milieu, pollution,...) et ils ont un rôle fondamental dans le réseau trophique (nourriture pour les poissons, les oiseaux,...).

Le suivi de **macrofaune benthique** dans la Seine met en évidence une rupture dans la qualité biologique du milieu entre l'amont et l'aval du barrage de Poses. Cette dégradation se traduit par une baisse conjointe de la variété faunistique et de la sensibilité à la pollution des espèces présentes, avec une simplification extrême de la structure du peuplement en termes de groupes fonctionnels trophique. Cette évolution s'explique principalement par la modification des composantes hydromorphologiques : bief en amont caractérisé par un niveau d'eau constant, des vitesses lentes, faciès estuarien en aval caractérisé par une instabilité naturelle des habitats (marnage, inversions de courant, vitesses variables) amplifiée par l'artificialisation du lit et des berges. Les contraintes hydromorphologiques très fortes créées par la marée dynamique font que seuls des organismes ayant une valence écologique large peuvent s'implanter et persister : mollusques, crustacés, oligochètes, achètes, diptères nématocères, turbellariés. Cette dégradation se poursuit de l'amont de l'estuaire vers l'embouchure en lien avec les modifications naturelles du milieu entre l'amont et l'aval : augmentation de la salinité, augmentation de la concentration en particules en suspension, influence des courants de marée, diminution de la concentration en oxygène dissous. L'analyse temporelle des résultats montre une sensible amélioration jusqu'en 1997 à Poses, à Caudebec-en-Caux et à La Bouille. Cette amélioration de l'indice IBGA à la station en amont du barrage de Poses se confirme en 2008 avec la présence des plusieurs genres de trichoptères et une augmentation de la variété taxonomique lié à l'apparition de deux nouveaux ordres. Les caractéristiques physiques très particulières de cette station (bief du barrage de Poses, zone lenticule avec le développement de la végétation immergés et émergés) ne permettent pourtant pas de généraliser cet état à l'ensemble de la masse d'eau. Pour les stations plus aval, il n'est pas observé d'évolution notable par rapport aux années antérieures malgré l'augmentation de l'indice IBGA à Caudebec-en-Caux. Cette dernière est liée à l'apparition de taxons marginaux issus de la dérive [Figure 24 ; DREAL-HN, 2008 ; GIPSA, 2008c]. Dans la baie de Seine, des campagnes scientifiques régulières d'échantillonnage du macrozoobenthos (campagnes PECTOW) permettent d'obtenir une vision de l'état et de l'évolution de ces peuplements, à travers le calcul d'indices. C'est par exemple le cas du BOPA qui est basé sur le rapport entre les polychètes opportunistes (prolifèrent dans les zones en excès de matière organique) et les amphipodes (généralement absents des zones fortement polluées et forte sensibilité aux hydrocarbures) [Figure 25 ; Dauvin & Ruellet, 2007].

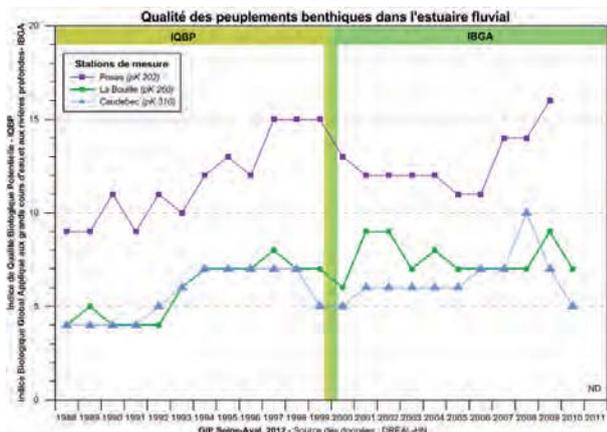


Figure 24 : État des peuplements benthiques dans l'estuaire fluvial.

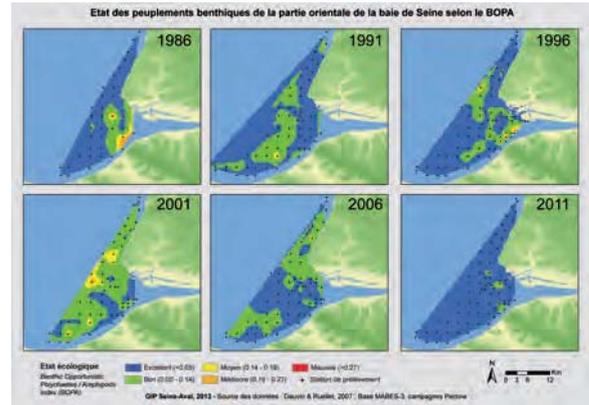


Figure 25 : État des peuplements benthiques dans la baie de Seine orientale.

L'analyse des prélèvements de macrofaune benthiques sur près de 30 ans (1988-2006) a permis de proposer une structuration de la communauté sur la base d'indices de richesse spécifique et d'abondance [Figure 26]. Le premier enseignement est la relative stabilité dans le temps de cette structuration, autour de spots d'abondance et de spots de diversité formant un front côtier délimité 1) à l'ouest par un axe entre Ouistreham et Antifer puis 2) à l'est par un axe entre le Havre et Deauville. A l'est de ce front (*i.e.* l'embouchure de la Seine), de faibles valeurs avec les fortes contraintes hydrodynamiques et anthropiques sur ces fonds et aux fortes variations de salinité. A l'ouest de ce front (*i.e.* en baie de Seine), malgré de forts courants de marée, des valeurs intermédiaires d'abondance et de diversité sont rencontrées, les espèces étant favorisées par une moindre variation de la salinité et des fonds hétérogènes (mélange de sables et de sédiments plus grossiers). Au sein de ce front, de nombreuses espèces cohabitent et peuvent présenter de fortes abondances, ce qui semble s'expliquer par la grande hétérogénéité sédimentaire de ces fonds, une source de nourriture suffisante et non limitant pour la faune, ainsi qu'un forçage global par les conditions hydrodynamiques. La structuration même de ce front montre des spots d'abondance et des spots de diversité, relativement stables dans le temps et formant deux fronts non superposés, bien qu'il existe des zones de chevauchement particulièrement riches en termes de richesse d'espèces et d'abondance [Figure 26 ; Alizier, 2011]. Cette structuration de la macrofaune benthique, stable sur les 30 dernières années, est à rapprocher de l'organisation hydromorpho-sédimentaire de secteur, avec par exemple une superposition des spots d'abondance avec les zones permanentes de dépôts de matériaux fins (vases). Les processus hydrodynamiques à l'œuvre à l'embouchure de la Seine et dans la proche baie de Seine semblent donc bien être les facteurs de structuration principaux régissant la distribution des fonds sédimentaires et d'une partie de la macrofaune benthique [Dauvin *et al.*, 2012 ; Alizier, 2011].

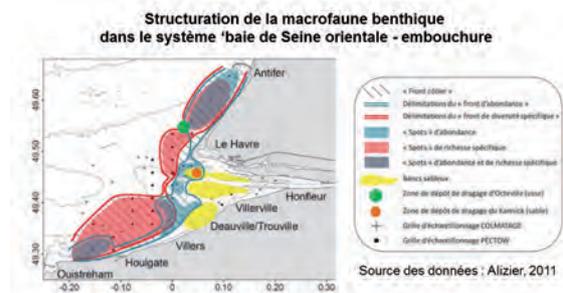


Figure 26 : Structuration commune (1988-1991-1966-2001-2006-2009) du système «baie de Seine orientale - embouchure» en termes de spots d'abondance et de richesse spécifique.

Malgré son importance dans les réseaux trophiques, le phytoplancton est mal connu en Seine et peu d'éléments sont disponibles pour apprécier son évolution. Le zooplancton a été beaucoup plus étudié, essentiellement dans la zone du gradient de salinité où de fortes abondances de copépodes sont observées (*Eurytemora affinis*, *Acartia spp* et *Temora longicornis*). Le suivi de ces organismes permet également de voir la réponse biologique à la variation des facteurs clés pour le fonctionnement de l'estuaire à moyen-long terme (salinité, température, contamination) et de donner des informations complémentaires à un suivi physico-chimique.

La structure des peuplements benthiques (organismes vivants en relation étroite avec les fonds subaquatiques) s'appuie sur une faible biodiversité dans la partie limnique de l'estuaire et les indices de qualité calculés pour ce compartiment biologique témoignent d'un état médiocre de la Seine. Cette banalisation faunistique et la quasi-absence d'espèces sensibles à la pollution sont à mettre en lien avec les fortes contraintes hydromorphologiques de l'estuaire (marnage, courants, MES,...) et la qualité de l'eau dégradée. En baie de Seine orientale, la structuration des peuplements benthiques présente également un lien fort avec les forçages hydrodynamiques et la nature des fonds. Cette structuration, basée sur la richesse spécifique et l'abondance des organismes, semble relativement stable depuis une trentaine d'années indiquant une adaptation du compartiment biologique à la forte fluctuation des paramètres hydro-morpho-sédimentaires à l'embouchure de la Seine.

## 2. Ichtyofaune

Les estuaires, zones de transition entre eau douce et eau salée, abritent divers habitats colonisés par de nombreuses espèces de poissons, durant une ou plusieurs phases de leur cycle biologique (reproduction, croissance, vie adulte, etc.). L'hétérogénéité et la variabilité spatio-temporelle des habitats et donc leur disponibilité pour les espèces qui fréquentent l'estuaire sont d'une importance majeure pour le maintien des populations. En effet, ces espèces possèdent des caractéristiques biologiques (traits d'histoire de vie sélectionnés au fil des générations) qui leur permettent d'optimiser leur probabilité de survie. Bien qu'il existe un certain niveau de plasticité phénotypique qui permette aux espèces de faire face à un certain nombre d'aléas de l'environnement, le maintien de certains types habitats clés au sein de l'estuaire conditionne fortement l'avenir des populations à moyen-long terme.

Les estuaires abritent de nombreuses espèces patrimoniales (pour l'estuaire de la Seine : Alose feinte, Lamproie fluviatile et marine, Saumon atlantique, Truite de mer, Anguille, Éperlan, Bar commun,...) et assurent notamment un grand nombre de fonctions écologiques pour l'ichtyofaune\* : zones de frayère et de refuge contre la prédation ; lieux de passage obligés pour les poissons amphihalins ; zones de nourricerie pour les juvéniles [Encart n°9 "Habitats fonctionnels pour les nourriceries de juvéniles marins."].

### a) Assemblages ichtyologiques

Les campagnes de prélèvement menées dans l'estuaire de la Seine par l'Ifremer depuis 1995 et par la Cellule de Suivi du Littoral Normand depuis 2000 ont permis de réaliser des inventaires ichtyologiques qui prennent en compte les variabilités hydro-climatiques saisonnières et interannuelles, ainsi que les différents types d'habitats (milieux profonds et petits fonds : bras morts, berges, filandres, etc.). Entre le barrage de Poses à l'amont et la baie de Seine orientale en aval, **105 espèces de poissons ont**

**été recensées**, dont 31 espèces d'eau douce (brème, sandre, perche commune, gardon, etc.), 10 espèces de migrateurs amphihalins (éperlan, anguille, flet, mulot porc, etc.), 9 espèces résidentes estuariennes (épineche, gobie buhotte, gobie tacheté, etc.) et 55 espèces marines (bar, sprat, hareng, sardine, sole, limande, etc.) [Morin *et al.*, 2010]. Bien que cette composition spécifique soit similaire aux autres grands estuaires nord-Atlantique [Nicolas *et al.*, 2010], les abondances observées restent faibles et certaines espèces sont quasi absentes (esturgeon,...). L'oxygénation de l'eau s'améliorant et la disponibilité des proies ne semblant pas encore limitante, l'hypothèse privilégiée pour expliquer cette situation paradoxale tient en la dégradation et la pauvreté des habitats estuariens (diminution des zones intertidales et compression latérale des habitats, déconnexion entre le lit mineur et les annexes hydrauliques, moindre capacité d'accueil et qualité dégradée des habitats de l'embouchure, etc.) [Duhamel *et al.*, 2012].

Sur la base de la fréquence d'occurrence des espèces de poissons observées entre 2002 et 2005 sur les différents habitats présents le long de l'estuaire et associant différentes techniques de pêche, une répartition des assemblages de poissons en quatre grands types a été proposée [Figure 27 ; Duhamel *et al.*, 2012] :

- l'assemblage B2 dans l'estuaire amont de Poses à la Bouille est caractérisé par des poissons d'eau douce, présents dans le chenal et dans les habitats de berge et des annexes (bassins portuaires, bras secondaires, bras morts et confluences) ;
- l'assemblage B1 qui prend la suite de l'assemblage B2 pour aller jusqu'à la limite de salinité est qualifié d'intermédiaire car il présente des espèces d'eaux douces, estuariennes, migratrices et dans une moindre mesure marines. Le chenal constitue l'essentiel de l'habitat, les berges de ce secteur étant moins propices pour l'ichtyofaune ;
- l'assemblage A2 positionné dans le gradient de salinité est remarquablement homogène sur le plan transversal, accueille les espèces euryhalines et amphihalines qui se déplacent avec la marée ;
- l'assemblage A1 de la baie de Seine orientale au pont de Normandie regroupe des espèces d'origine marine, retrouvées dans les chenaux et les fosses de flot.

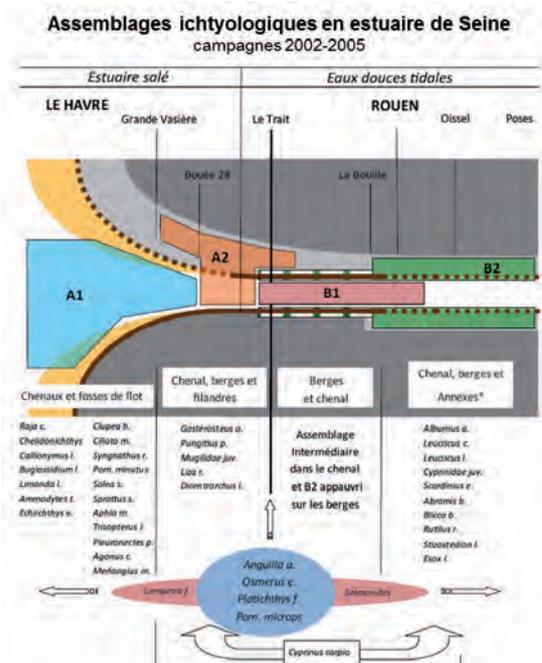


Figure 27 : Assemblages ichtyologiques en estuaire de Seine.

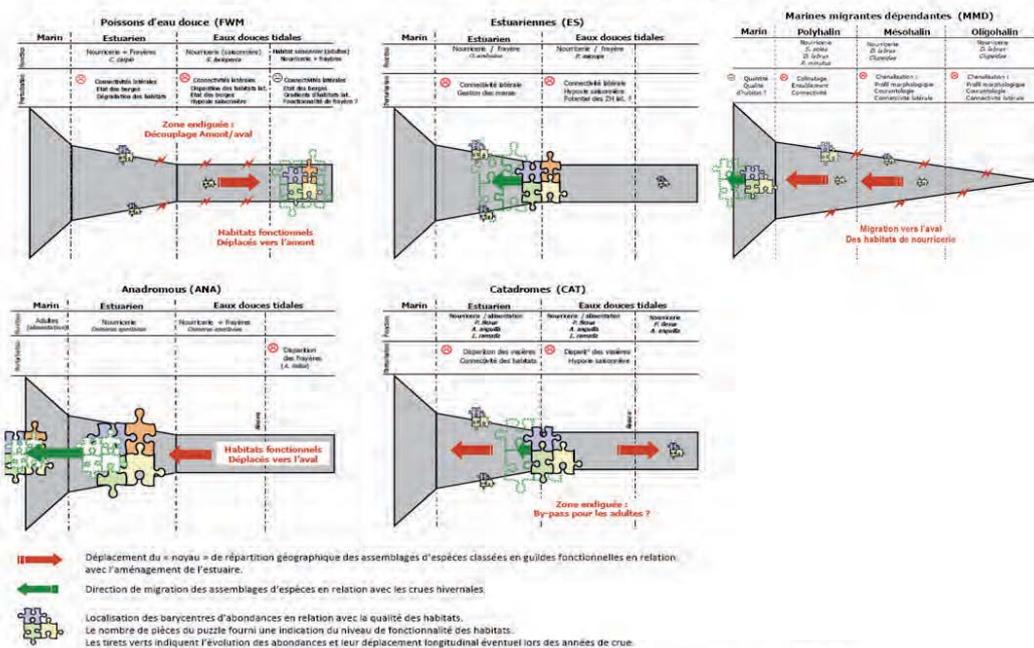
Cette organisation spatiale des assemblages ichthyologiques témoigne de la compartimentation estuarienne et rend compte de l'évolution des habitats, comparativement à d'autres estuaires moins aménagés (essentiellement la Loire) et aux données locales anciennes [Figure 28 ; Duhamel *et al.*, 2012]. Ainsi, les habitats fonctionnels pour les **poissons d'eau douce** ont glissé vers l'amont de Rouen, où les habitats latéraux dominant et les conditions sont beaucoup plus propices pour l'ichtyofaune (meilleure oxygénation de l'eau, courants - turbidité et influence de la marée moins importants, naturalité plus importante des berges). Le manque d'attractivité du secteur à l'aval de Rouen lié à la disparition de nombreux habitats latéraux, à la perte de connectivité latérale et à la récurrence d'anoxies saisonnières, renforce la déconnexion amont/aval de l'estuaire et limite les migrations saisonnières vers les eaux riches en nourriture des eaux salées. Cette disparition des zones intertidales en aval de Rouen a également pour conséquence une simplification du réseau trophique avec une chute des abondances des poissons benthiques au profit des poissons pélagiques. Pour les **migrateurs anadromes\*** (poissons qui vivent en eau de mer et se reproduisent en eau douce), la perte de nurricerie à l'amont de Rouen a conduit à un glissement des habitats fonctionnels de cette guildes\* vers l'aval de l'estuaire et à l'absence d'espèces telles que l'aloise feinte et l'éperlan dans la région rouennaise, où elles étaient autrefois observées. Le même glissement vers l'aval des habitats de nurricerie est observé pour les **espèces marines migrantes dépendantes de l'estuaire**. Il est à relier aux profondes modifications des habitats des zones oligo-mésot et polyhaline\*, dont la quantité, la qualité et la diversité ont fortement chuté suite à la chenalisation de la Seine et au comblement de son embouchure. Concernant les **espèces estuariennes** et les **migrateurs catadromes\*** (poissons qui vivent en eaux douces et qui se reproduisent en mer) présents dans l'estuaire moyen, une compression des habitats fonctionnels

est observée, respectivement et principalement liée à la perte de connectivité latérale et à la réduction des surfaces de vasières [Duhamel *et al.*, 2012].

L'utilisation des différents habitats par les migrateurs catadromes a fait l'objet d'un suivi dans l'estuaire fluvial, à l'amont de Rouen et a permis de mettre en évidence des comportements propres à chaque espèce suivie (Anguille, Mulet porc, Brème) et l'importance de différents milieux. Le domaine vital des **anguilles** comprend plutôt les berges profondes avec des enrochements grossiers, qui correspondent à leur zone de repos/refuge. Bien qu'elles passent beaucoup de temps en mouvement, l'ampleur des déplacements reste faible (250m à 2km par jour) et ils sont essentiellement nocturnes, vers des zones profondes à la recherche de leurs proies. Les zones d'activité des **mulets porcs** se situent principalement au niveau des vasières intertidales et notamment des bras morts qu'ils fréquentent à marée haute. Les individus rejoignent généralement les zones plus profondes à marée basse à proximité directe de ces vasières émergées. Cette espèce effectue des mouvements rapides et de grande ampleur, avec au total peu de temps passé en mouvement. Les **brèmes**, espèces d'eau douce euryhaline, affectionnent également les vasières intertidales à marée haute et se replient à marée basse à proximité des vasières ou au niveau du chenal de navigation. Des différences ont été observées entre les individus matures et non matures ; ces derniers restant dans le chenal principal. Leurs mouvements et leurs domaines vitaux sont de faible ampleur [Rochard *et al.*, 2012].

Un inventaire des espèces fréquentant la passe à poissons de Poses est également mené depuis 2008 et permet d'estimer la variabilité interannuelle des effectifs, avec une vingtaine d'espèces observée, dont des espèces migratrices (saumon atlantique, truite de mer, lamproie marine et fluviatile, alose, mulot, anguille,...) et des espèces sédentaires (brème, barbeau fluviatile, carpe, gardon, silure,...) [Ciolfi & Paplorey, 2012].

**Noyaux d'abondance des guildes fonctionnelles de poissons en estuaire de Seine**  
*comparativement à d'autres estuaires moins aménagés et aux données locales anciennes*



Source des données : Projet ICHTYO (Duhamel *et al.*, 2012)

Figure 28 : Évolution des noyaux d'abondance pour les principales guildes fonctionnelles de poissons dans l'estuaire de la Seine.

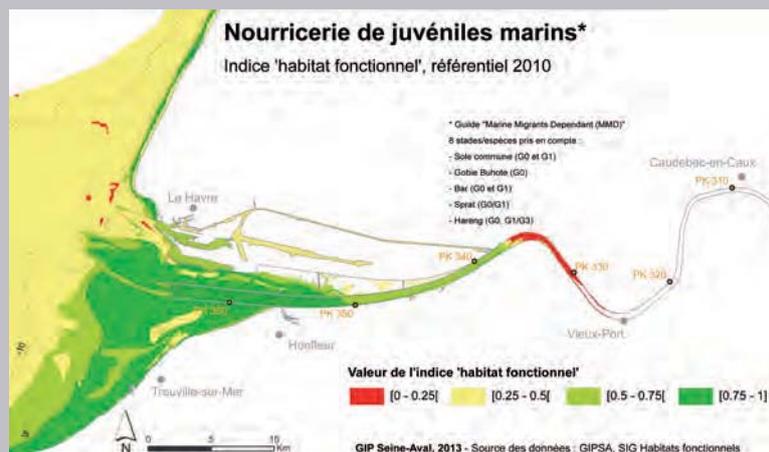
## Encart n°9 - Habitats fonctionnels pour les nurseries de juvéniles marins

Pour appréhender l'aspect fonctionnel des habitats de l'estuaire de la Seine, un outil a été développé : le SIG-Habitat Fonctionnel. Il repose sur l'analyse des relations spatiales entre les facteurs structurants les milieux (facteurs physiques et hydrologiques) et les fonctions écologiques du système [Bacq *et al.*, 2011]. La mise en œuvre de cet outil repose sur 3 étapes :

1. Définition des préférendums d'habitat pour une sélection d'espèces via la caractérisation de leurs exigences écologiques au regard des principaux facteurs structurants le milieu (bathymétrie, salinité, faciès sédimentaires, milieu) ;
2. Cartographie des habitats potentiels (optimum ou toléré) pour chaque espèce, à travers l'analyse spatiale de la concordance entre les exigences écologiques de l'espèce et les caractéristiques du milieu ;
3. Construction d'un indice représentant l'habitat fonctionnel (ensemble des secteurs de l'estuaire jouant un rôle dans la réalisation d'une fonction donnée) pour un ensemble d'espèces.

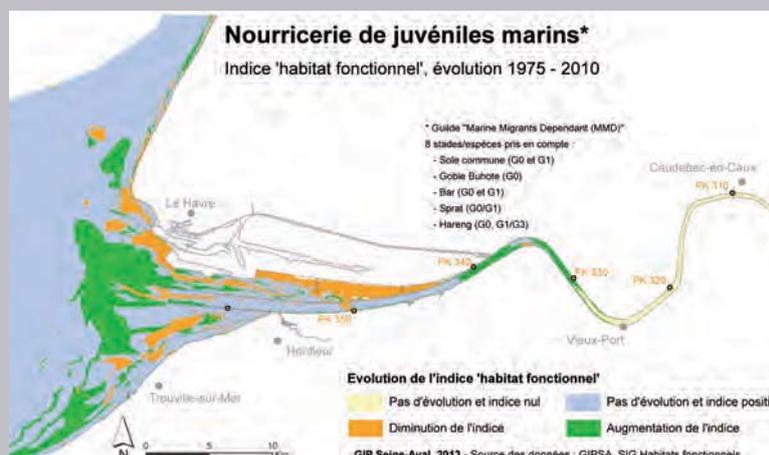
Cette approche a notamment été mise en œuvre pour représenter les habitats de la fonction de nurserie des poissons marins (croissance et survie des jeunes stades de vie, par l'alliance des fonctions d'alimentation et de refuge) pour les cinq espèces suivantes : Hareng (*Clupea harengus*) ; Bar (*Dicentrarchus labrax*) ; Gobie buhotte (*Pomatoschistus minutus*) ; Sole (*Solea solea*) ; Sprat (*Sprattus sprattus*) [Bacq *et al.*, 2013]. Cet exemple d'application est ici repris pour montrer l'intérêt de la démarche et le potentiel d'utilisation de cet outil. La Figure I représente l'indice "habitat fonctionnel" pour la fonction de nurserie de poissons marins en estuaire de Seine (référentiel 2010). Cet indice montre l'importance des habitats présents à l'embouchure de la Seine pour la bonne réalisation de cette fonction. Ce résultat est directement lié à la combinaison des préférendums d'habitat des juvéniles marins, dont l'optimum (ou la zone de tolérance) commun(e) fait ressortir comme habitats potentiels le croisement entre 1) les zones subtidales peu profondes et intertidales ; 2) les zones méso et polyhaline ; 3) les faciès à dominante sableuse et vaseuse ; 4) le chenal et les filandres. Cette application n'est qu'une première étape vers une évaluation plus complète de la fonction de nurserie. Il est en effet nécessaire de la compléter par l'ajout d'une estimation de la productivité des milieux en cohérence avec les stratégies alimentaires des espèces pour intégrer l'abondance de nourriture, élément essentiel à la bonne définition de la nurserie.

Figure I : Indice "habitat fonctionnel" pour les nurseries de juvéniles marins.



En appliquant la même méthodologie, il est possible d'analyser l'effet de l'évolution des différents facteurs structurants sur l'évolution des habitats fonctionnels, à partir d'un référentiel plus ancien ou prenant en compte une évolution future d'un facteur structurant. La Figure J illustre une telle évolution entre 1975 et 2010 pour la fonction de nurserie de poissons marins et montre 1) une contraction latérale de l'indice depuis la rive nord (entre les Pk 342 et 370) en lien avec la diminution des zones de vasières intertidales en domaine polyhalin ; 2) une amélioration de l'indice en aval du Pk 365 (en lien avec une élévation des fonds) ; 3) une amélioration de l'indice en amont du Pk 341 (en lien avec une remontée de la salinité).

Figure J : Évolution de l'indice "habitat fonctionnel" pour les nurseries de juvéniles marins entre 1975 et 2010.



### b) Accueil des poissons migrateurs

De nombreux poissons migrateurs transitent par l'estuaire de la Seine, que ce soit des espèces anadromes comme l'éperlan ou la lamproie fluviatile (vivent en eau de mer et reproduction en eau douce) ou catadromes comme l'anguille et le flet (vivent en eaux douces et reproduction en mer). Ces populations ont été fortement fragilisées par la dégradation des habitats, les difficultés d'accès aux zones de reproduction ou de nurserie et la mauvaise qualité de l'eau. Depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, les populations de migrateurs ont ainsi fortement chuté dans la Seine et l'extinction d'espèces a été observée. L'esturgeon, le saumon et la grande alose ont ainsi disparu du bassin de la Seine au début du XX<sup>ème</sup> siècle ; alors que des espèces comme l'aloise feinte ou l'éperlan dont les zones de frayères traditionnelles sont situées dans l'estuaire ont maintenu des populations plus tardivement (disparition à la fin des années 1960, en lien avec la pollution maximale de la Seine). Sur les 10 espèces migratrices originellement présentes en Seine, 7 étaient considérées disparues au début des années 1990, bien que quelques individus isolés puissent avoir été observés [Belliard *et al.*, 2009].

Des mesures telles la construction de passes à poissons sur les seuils infranchissables, les restaurations d'habitats ou la réduction des rejets pour améliorer la qualité de l'eau ont été engagées depuis plusieurs années. Ceci amène à s'interroger sur une reconquête possible des habitats par les migrateurs et la durabilité des retours observés depuis quelques années (éperlan, truite de mer, grande alose, lamproie marine). Une étude du potentiel de colonisation d'espèces migratrices sur quatre sites du bassin de la Seine par le croisement des exigences écologiques des espèces avec les caractéristiques des habitats (débit, température, oxygène, faciès hydrodynamique, granulométrie, métaux lourds, nitrites...) et l'accessibilité aux différentes zones (présence ou non de passes à poissons, d'obstacles...) a permis d'apporter des éléments de réponse à ce questionnement [Figure 29 ; Rochard *et al.*, 2007] :

- La **Seine amont** (à proximité de l'agglomération parisienne) semble rassembler les conditions d'habitat nécessaires pour la migration des deux espèces de lamproies et la phase d'enfouissement des juvéniles, ainsi que pour la migration et la fraie des deux espèces d'aloses, et plus particulièrement de la grande alose (*Alosa alosa*) qui se reproduit dans les cours moyens et amonts des grands bassins fluviaux.
- L'**estuaire de la Seine** paraît avoir actuellement les conditions minimales requises (qualité du milieu, habitats de reproduction) pour voir s'établir l'éperlan (*Osmerus eperlanus*). Cette zone apparaît également comme largement colonisée par le flet, le mulot porc et l'anguille ainsi que plus modestement par les lamproies marine et fluviatile, les salmonidés et l'aloise feinte. Parmi les sites étudiés, l'estuaire de la Seine apparaît comme la zone d'étude où la diversité de la communauté de poissons migrateurs est la plus élevée, même si les abondances restent parfois faibles. Par ailleurs, cette partie de la Seine semble pouvoir jouer son rôle de zone de transition entre la mer et les frayères pour les salmonidés ou les aloses. Ce secteur comporte également être considéré des habitats favorables à la reproduction de l'aloise feinte.
- L'**Andelle** présente un grand intérêt du fait de sa confluence en aval du barrage de Poses et de la présence de surfaces productives de meilleure qualité. Ces caractéristiques sont favorables particulièrement à la remontée des salmonidés et plus particulièrement de la truite de mer (*Salmo trutta*). Même si de nombreux aménagements sont encore nécessaires, la restauration de ce cours d'eau est déjà engagée et donne des premiers résultats encourageant le retour de la truite de mer et des lamproies ces dernières années.

- Si les potentialités de migration et de colonisation sont réelles sur l'**Epte**, la présence de barrages infranchissables à sa confluence limite les possibilités actuelles. La seule espèce migratrice actuellement présente est l'anguille (mise à part une truite de mer recensée). Si des aménagements étaient effectués, l'Epte pourrait accueillir des salmonidés à l'image de l'Andelle. Ce constat peut être étendu aux affluents de l'estuaire comme l'**Eure**, la **Risle** ou l'**Austreberthe**.



Figure 29 : Localisation potentielle des espèces migratrices.

Les populations de poissons sont également impactées par l'évolution des conditions environnementales, en lien avec les **changements climatiques**. Pour illustrer ces modifications, la probabilité de présence de 11 espèces migratrices dans le bassin de la Seine a été calculée pour un scénario de réchauffement climatique des eaux de +2,4°C, sans prendre en compte d'autres facteurs comme la modification de courants, de salinité, la disponibilité et l'accessibilité d'habitats, ... Dans le scénario de réchauffement des eaux, l'estuaire resterait favorable pour la majorité des migrateurs aujourd'hui ou historiquement présents. Pour les poissons migrateurs en limite d'aire de répartition, l'estuaire de la Seine deviendrait soit plus favorable (mulot porc), soit défavorable (éperlan) [Figure 30 ; Rochard *et al.*, 2007].

### Probabilité de présence des poissons migrateurs

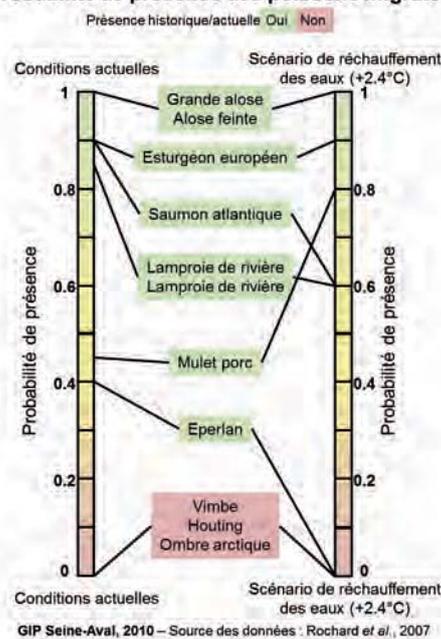


Figure 30 : Probabilité de présence de 11 espèces de poissons dans le bassin versant de la Seine selon deux scénarios.

La composition spécifique des peuplements ichthyologiques présents dans l'estuaire de la Seine (105 espèces de poissons) est comparable aux autres grands estuaires nord-Atlantique mais les abondances observées restent faibles et certaines espèces sont quasi absentes.

Cette situation est liée au manque de disponibilité (faible surface et accessibilité réduite) des habitats nécessaires au bon déroulement du cycle biologique des espèces (reproduction, croissance, etc.) et peut mettre en péril le maintien ou le développement des populations dont un ou plusieurs habitats sont menacés. Cette dégradation des habitats estuariens (diminution des surfaces de zones intertidales et compression latérale des habitats, perte de connectivité latérale, qualité dégradée des habitats de l'embouchure, etc.) s'est en outre accompagnée d'une compartimentation marquée de l'estuaire, avec une déconnexion amont/aval cantonnant le peuplement dulçaquicole à l'amont de Rouen.

La qualité des eaux a également joué un rôle dans la raréfaction ou la disparition de certaines espèces, notamment de migrateurs, mais les améliorations observées depuis plusieurs années (notamment l'oxygène) ont permis d'initier le retour de ces espèces.

### 3. Avifaune

L'estuaire de la Seine représente un site d'intérêt majeur pour l'avifaune\*, que ce soit en tant qu'**halte migratoire** lors des déplacements internuptiaux des oiseaux ou par la présence de milieux variés (vasières, roselières, prairies humides, plans d'eau, marais, bois, falaises,...) pour la **nidification** et l'**alimentation** des oiseaux, qu'ils soient côtiers, estuariens ou terrestres. Sur l'ensemble du territoire d'étude, 200 espèces régulières appartenant à des groupes diversifiés comme les anatidés, les limicoles, les rapaces, les passereaux ou les échassiers sont observées. La présence de trois espèces mondialement menacées (Phragmite aquatique, Barge à queue noire et Courlis cendré) et d'une quinzaine d'espèces inscrites sur la liste rouge nationale (Busard des roseaux, Locustelle luscinoïde, Pipit farlouse, Râle des genêts,...) est également notée [Observatoire avifaune, 2013]. La présence d'oiseaux de l'annexe I de la Directive Oiseau et la présence d'oiseaux migrateurs a justifié la mise en place de la Zone de Protection Spéciale (ZPS) "Estuaire et marais de la basse Seine", dont la zonation actuelle (délimitée en 2002 après différentes négociations et procédures) couvre 18840 hectares [Encart n°10 "État de conservation des oiseaux nicheurs de la ZPS"].

Au-delà du renseignement de l'état de santé des populations, le suivi des oiseaux permet, selon leur mode de vie, d'apporter des éléments intégrateurs sur l'évolution de l'estuaire. C'est par exemple le cas des oiseaux dits de vasière comme le Bécasseau variable, le Canard pilet, le Chevalier gambette, l'Huîtrier pie (en hivernage) ou l'Avocette élégante qui se nourrissent de vers marins et/ou de gastéropodes sur les vasières intertidales à marée basse. À marée haute, et en attendant que les zones de nurricerie soient de nouveau accessibles, ils sont présents sur des reposoirs de pleine mer. La présence de ces espèces est ainsi localement liée à ces deux paramètres clés témoignant d'une évolution de l'estuaire : 1) surface et productivité des vasières ; 2) disponibilité de surface de reposoir. L'évolution des effectifs des oiseaux de vasières montre une chute depuis le début

des suivis, avec un point d'inflexion dans la tendance d'évolution autour des années 2000 [Figure 31]. La diminution de la surface des vasières associée à la fonctionnalité d'alimentation sous-tend cette perte d'effectif, mais ne peut seule expliquer leur variation. La fonctionnalité de repos doit également être considérée, avec les modifications (destruction, nouvelle construction, problèmes de fonctionnement) des reposoirs à l'embouchure [Observatoire avifaune, 2013]. Les écosystèmes prairiaux sont d'importance pour un certain nombre d'espèces comme la Barge à queue noire, le Pipit farlouse, le Râle des genêts, le Tarier des prés ou le Vanneau huppé qui y nidifient et dont le suivi des effectifs témoigne de l'évolution de ces systèmes (degré d'humidité) et de leur mode de gestion (fauche, pâturage). Par exemple, une date de fauche tardive est utile à la reproduction des oiseaux prairiaux et une faible pression de pâturage favorise l'installation de limicoles nicheurs (vanneaux, courlis cendrés) [Observatoire avifaune, 2013].

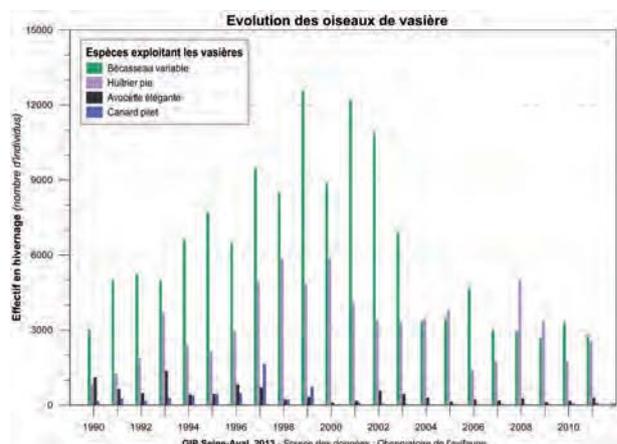


Figure 31 : Évolution des effectifs d'espèces exploitant les vasières de l'embouchure de la Seine.

L'estuaire de la Seine présente un intérêt fort pour l'avifaune (200 espèces régulières) et abrite divers habitats permettant d'assurer des fonctions biologiques primordiales pour ce compartiment biologique. De nombreuses espèces sont ainsi observées dans l'estuaire de la Seine, utilisé comme halte migratoire, zone de nidification et d'alimentation. Le suivi des populations d'oiseaux rend compte du lien fort entre les exigences écologiques des espèces, la disponibilité des habitats et la gestion du milieu. Ce suivi témoigne également de l'évolution du milieu et montre la continentalisation des terrains à l'embouchure de la Seine (diminution des surfaces de vasières, perte de zones humides, indisponibilité de reposoirs de pleine mer, etc.).

## Encart n°10 – État de conservation des oiseaux nicheurs de la ZPS

Pour évaluer l'état de conservation de la Zone de Protection Spéciale (ZPS) "Estuaire et marais de la basse Seine" et l'état de santé des populations d'oiseaux sur ce territoire, l'Observatoire de l'Avifaune (créé en 2003 et sous maîtrise d'ouvrage de la Maison de l'Estuaire et du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande) mène de nombreux suivis et études [Maison de l'Estuaire, 2009 ; Observatoire avifaune, 2013]. Le suivi des espèces d'oiseaux nicheuses sur la ZPS entre 2003 et 2011 a ainsi permis d'estimer l'état de conservation et l'évolution de l'avifaune en nidification sur ce territoire [Figure K].

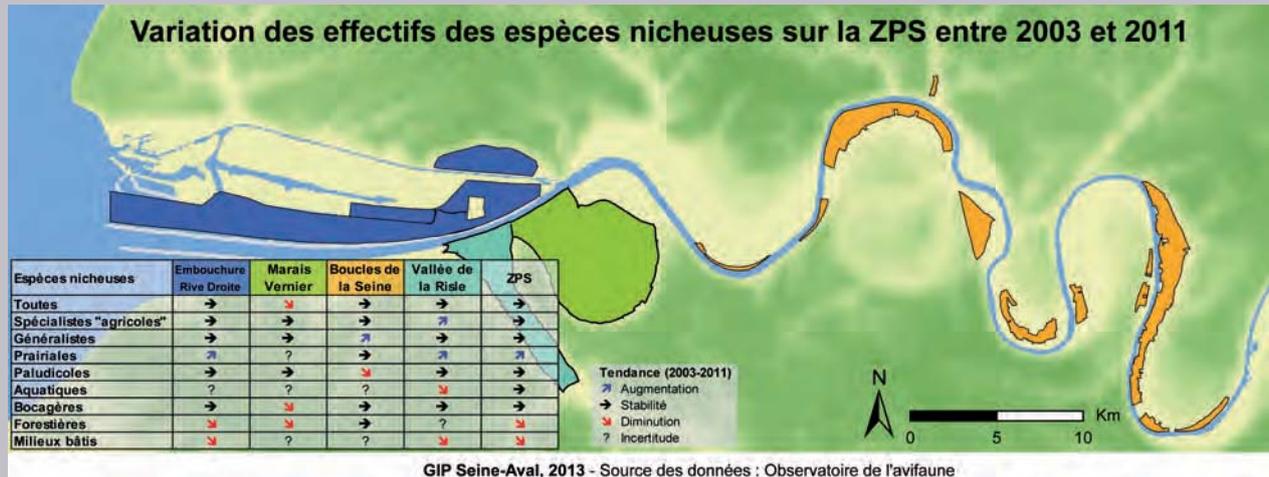


Figure K : Tendances d'évolution des populations d'oiseaux nicheurs par secteur géographique de la ZPS.

La tendance générale montre une stabilité globale des espèces nicheuses, à l'exception du marais Vernier qui enregistrerait une baisse de près de 20% des effectifs. En s'intéressant aux espèces nicheuses selon leur habitat principal, les résultats suivants peuvent être mis en avant [Observatoire avifaune, 2013] :

- **stabilité globale des espèces spécialistes des milieux agricoles** (Fauvette grisette, Alouette des champs, Pipit farlouse, linotte mélodieuse, Faisan de colchide, Bergeronnette flavéole, etc.), avec une hausse dans la vallée de la Risle à relier à l'achat de terrain par le conservatoire du littoral et à une contractualisation agricole importante ;
- **stabilité globale des espèces généralistes** (i.e. espèces non spécialisées sur un habitat, opportunistes : Merle noir, Corneille noire, Fauvette à tête noire, Coucou gris, Pigeon ramier, Pigeon des arbres, etc.), avec une hausse enregistrée dans les boucles de la Seine pouvant s'expliquer par une banalisation des milieux ;
- **augmentation des espèces prairiales** (Alouette des champs, Pipit farlouse, Vanneau huppé, Bergeronnette flavéole, etc.), surtout dans la vallée de la Risle et à l'embouchure de la Seine ;
- **stabilité globale des espèces paludicoles** (i.e. espèces qui exploitent les végétations herbacées hautes originales et typiques des zones humides, principalement des roselières et des mégaphorbiaies : Bouscarle de Cetti, Bruant des roseaux, Phragmite des joncs, Rousserolle effarvate, etc.) essentiellement présentes à l'embouchure de la Seine ;
- **incertitude pour les espèces aquatiques** (Canard colvert, Gallinule poule-d'eau, Foulque macroule, Mouette rieuse, Héron cendré, etc.) dont les variations d'effectifs suivent celles des niveaux d'eau dans les mares et plans d'eau, par nature irréguliers ;
- **stabilité globale pour les espèces bocagères** (Merle noir, Fauvette à tête noire, Troglodyte mignon, Pouillot véloce, Pigeon ramier, etc.) qui utilisent les haies dans un contexte de prairie humide ;
- **baisse des espèces forestières** (Grive musicienne, Grive Draine, Grimpereau des jardins, Pic épeiche, Lorient d'Europe, etc.), notamment à l'embouchure de la Seine et dans le Marais Vernier ;
- **baisse des espèces des milieux bâtis** (Hirondelle rustique, Chardonneret élégant, Pie bavarde, Verdier d'Europe, Tourterelle turque, etc.) montrant une moindre attractivité des espaces artificialisés.

#### 4. Mammifères marins

Le terme de mammifères marins regroupe les Cétacés (dauphins, baleines) et les Pinnipèdes (phoques), soit des animaux passant toute ou majeure partie de leur vie en mer et dépendant de ce milieu pour assurer leurs besoins vitaux. En estuaire et baie de Seine, diverses espèces sont observées bien que ne faisant pas l'objet de suivis spécifiques, de manière récurrente pour quelques-unes d'entre elles ou de façon occasionnelle, voire exceptionnelle, pour une majorité d'autres [GMM, 2004].

Pour ce qui est des Cétacés à dents (sous-ordre des Odontocètes), seul le **Marsouin** (*Phocoena phocoena*) peut être vraiment considéré comme sédentaire dans les eaux littorales de part et d'autre de l'embouchure de la Seine. Autrefois abondant – et exploité par la pêche dès le Moyen-Âge – aux abords des côtes de la Manche, ce petit Cétacé s'est fortement raréfié dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle pour progressivement redevenir fréquent dans la période récente [Figure 32]. Cette recrudescence du Marsouin a globalement coïncidé avec le retour de l'éperlan en estuaire de Seine, sans toutefois qu'une interrelation ait jusqu'à présent été établie entre ces deux événements. Bien que le retour rapide de l'espèce en Manche ait été mis au compte de l'accroissement, suivi d'une expansion, des populations du sud de la Mer du Nord, les observations de juvéniles et les échouages de femelles gestantes suggèrent fortement que le Marsouin se reproduit dorénavant en baie de Seine, où les captures accidentelles par les filets de pêche représentent, comme partout ailleurs, une cause importante de mortalité pour cette espèce littorale.

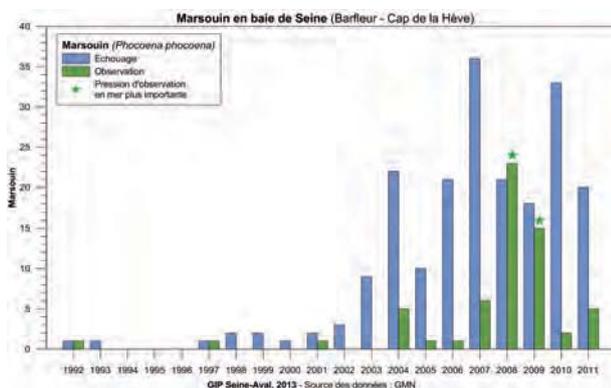


Figure 32 : Observation et échouage de Marsouins en baie de Seine (Barfleur - Cap de la Hève).

Le **Grand dauphin** (*Tursiops truncatus*) est le second Odontocète le plus fréquemment observé en Manche orientale, sans toutefois que des preuves formelles de sa sédentarité aient encore pu être apportées. Il s'agit en effet de petits groupes ou d'individus isolés, fréquentant principalement la côte est du Cotentin, mais observés aussi tout au long du littoral de Baie de Seine. L'augmentation des données dans ce secteur depuis la toute fin du XX<sup>e</sup> siècle a été mise au compte de l'accroissement de la population résidente du golfe normano-breton, forte d'au moins une centaine d'individus.

D'autres Delphinidés, d'affinités atlantiques et/ou méditerranéennes, comme le **Dauphin commun** (*Delphinus delphis*) ou, plus rarement, le **Dauphin bleu et blanc** (*Stenella coeruleoalba*), entrent occasionnellement en baie de Seine, pour y connaître parfois une fin tragique à l'image des trois dauphins bleus et

blancs ayant remonté la Seine en avril 1993, dont un jusqu'à La Bouille. Le **Globicéphale noir** (*Globicephala melas*), dont une partie de la population de cette espèce grégaire passait régulièrement en Manche en fin d'été-début d'automne semble avoir récemment modifié sa route de migration vers l'ouest des côtes britanniques, même si de rares observations et échouages au cours des quinze dernières années attestent encore de passages occasionnels de petits groupes, voire d'individus isolés.

Enfin, de grands Cétacés à fanons (sous-ordre des Mysticètes), tels le **Rorqual commun** (*Balaenoptera physalus*) ou le **Petit Rorqual** (*Balaenoptera acutorostrata*), pour ne citer que les moins exceptionnels, viennent s'échouer à intervalles très irréguliers sur les côtes du Calvados ou de Seine-Maritime.

Pour ce qui est des Pinnipèdes, le **Phoque veau-marin** (*Phoca vitulina*) est de loin l'espèce la plus régulièrement observée en estuaire de Seine, avec une augmentation progressive du nombre d'individus vus simultanément (2-3 jusqu'en 2009, jusqu'à 9 ces dernières années). L'absence de preuve de mise-bas indique qu'il s'agit pour le moment, comme en baie d'Orne, de stationnements temporaires d'animaux en transit entre les colonies plus importantes de baie de Somme, baie des Veys et baie du Mont-Saint-Michel, dans lesquelles la reproduction est avérée de longue date. À l'embouchure de la Seine, le Phoque veau-marin est observé à basse-mer sur divers reposoirs, tels les épis plongeurs, l'îlot artificiel et les vasières [Lecarpentier, com. pers.]. Habitant des côtes rocheuses, le **Phoque gris** (*Halichoerus grypus*) est surtout présent, en effectifs modestes, à l'ouest du Cotentin (îlots des Ecrehous et des Mainquiers) mais il est néanmoins régulièrement observé sur tout le littoral de baie de Seine, voire exceptionnellement en Seine, parfois au sein des colonies de Phoque veau-marin (Baie des Veys par exemple). Les observations d'autres espèces de phoques (marbré, annelé, du Groenland) en Manche orientale sont exceptionnelles.

Un accroissement des colonies de marsouins et de phoques veau-marin est observé en baie de Seine. Il serait à relier à l'amélioration de la qualité des eaux et à la présence d'habitats encore fonctionnels pour ces mammifères marins.

### III. RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE

Le chapitre précédent dresse le constat d'un état de santé dégradé de l'estuaire de la Seine impactant des services écosystémiques rendus par ce système, qu'ils soient en lien avec la qualité de l'eau (contamination) ou les habitats (dégradation). Certaines améliorations sont néanmoins remarquables et rendent compte des efforts menés pour réduire les rejets de polluants dans le milieu et pour améliorer les processus à la base du fonctionnement estuarien. Cette démarche regroupe différentes notions (renaturation, préservation, réhabilitation, restauration,...) qui seront reprises dans ce chapitre sous le terme générique de restauration. Bien qu'encore récente et s'appuyant sur des projets locaux sans coordination globale, cette démarche de restauration offre un potentiel pour améliorer les fonctions écologiques à l'échelle de l'estuaire et permettre un large choix d'usages. Elle doit en outre s'appuyer sur une vision globale du fonctionnement de l'estuaire et sur des objectifs cohérents avec son état de santé.

#### A. De nombreux projets locaux

La restauration écologique de l'estuaire de la Seine est aujourd'hui plurielle et portée par de nombreux projets de restauration ou préservation, de gestion de milieux et de mesures de réduction des apports en contaminants. Ces projets et mesures sont principalement initiés pour répondre aux réglementations françaises ou européennes et aux pressions environnementales parfois fortes (associations de protection de la nature, riverains, pêcheurs,...). Cependant, ces actions ou mesures de restauration ont un caractère ponctuel et leur inscription dans un programme global (à l'échelle de l'estuaire de la Seine ou au-delà, bassin versant ou baie de Seine) reste un objectif encore mal défini.

Afin d'avoir une vision d'ensemble des projets de restauration de milieux menés à l'échelle de l'estuaire, un inventaire a été mené [Encart n°11 "Inventaire des sites et projets d'aménagements de milieux naturels sur l'estuaire de la Seine."] montrant des motivations initiales portant sur différents enjeux [Bacchi & Moussard, 2012 ; Morandi & Piegay, 2011] :

- La **recherche d'un bon fonctionnement écologique** ou la **compensation d'une perte écologique** engendrée par un aménagement portuaire, urbain... Les cibles sont environnementales et déclenchées, pour les compensations, par une motivation économique et juridique. C'est par exemple le cas du reposoir sur dune réalisé dans le cadre du projet Port 2000.
- La **protection ou la restauration de ressources naturelles** locales, emblématiques ou patrimoniales. La cible est écologique et orientée vers une espèce ou un groupe d'espèces. C'est par exemple le cas de l'îlot du Ratier ou du réaménagement de la ballastière de Berville-sur-Seine qui visent l'accueil d'oiseaux, de l'espace protégé à Liparis de Loesel pour la protection de cette orchidée en déclin, ou de la frayère de Saint-Aubin-lès-Elbeuf pour la reproduction du brochet.
- La **protection contre l'érosion et les inondations** par l'aménagement du lit mineur, du lit majeur ou des berges. La cible première est sécuritaire et économique, la cible paysagère et environnementale étant secondaire. C'est par exemple le cas de la restauration de la Fontenelle qui a été remise dans son lit fossile pour réduire les risques d'inondation et améliorer son fonctionnement écologique.
- L'**amélioration du cadre de vie** liée à la qualité paysagère et à la diversité du milieu naturel, avec une cible sociale. C'est le cas des étangs de Pont-Audemer (anciennes ballastières réaffectées) qui visent le développement d'une offre d'espaces récréatifs (ballade, repos, jogging, pêche, jeux...) liée à l'attractivité du paysage, à de la pédagogie environnementale et de l'attractivité urbaine. Cet enjeu de cadre de vie peut être renforcé par la volonté de communiquer sur une « image verte » du lieu ou du porteur de projet (exemple du Marais de l'Aulnay).
- L'**acquisition de connaissances**, qu'elles soient écologiques, économiques ou sociales. Cette cible expérimentale s'appuie sur une motivation scientifique et écologique qui n'apparaît que rarement de manière explicite, ou alors secondairement. La création de la vasière artificielle au pied du pont de Normandie [Encart n°12 "Création de la vasière artificielle."] ou la création de la Réserve Naturelle Nationale des Manneville sont deux exemples de projets répondant à cet enjeu.

En complément de ces motivations scientifiques, écologiques ou sociales affichées pour un projet de « restauration », d'autres leviers président au choix d'une mesure de restauration : 1) le **pragmatisme** (compromis entre visibilité de l'action, coût financier, facilité de mise en œuvre) ; 2) le **bon sens écologique** (recréer de la diversité d'habitats source de richesses paysagères et écologiques) ; 3) les **opportunités** (foncière, financière...) ; 4) la **nécessité**, pour chaque type de structure, **de satisfaire** un ou des publics particuliers (administrés, État, Agence de l'Eau, écologistes). Ainsi, les cibles (ou enjeux) et leurs objectifs de réalisation se diluent souvent dans ces diverses exigences et la difficulté à les identifier clairement se fait alors majoritairement ressentir par la suite. Au manque de clarté dans les objectifs s'ajoute souvent le manque d'analyse sur leurs conséquences sur les fonctions écologiques et les usages. La stratégie de suivi et d'évaluation d'une action de restauration écologique est rarement identifiée lors de la réflexion de départ et renvoie le porteur de projet à trois questions : 1) la motivation réelle quant au résultat du projet (et donc à l'objectif de départ) ; 2) les incertitudes inhérentes au déroulement du projet (limites des connaissances et des outils mobilisés) ; 3) le coût du suivi et les moyens nécessaires à l'évaluation. Au-delà de l'évaluation projet par projet, la question de l'évaluation de leur efficacité à l'échelle globale est posée en réponse à la volonté d'une restauration écologique d'un système à moyen-long terme. Pour cela, le suivi d'une trajectoire écologique, en discriminant la part de la restauration locale dans l'évolution observée, est indispensable [Bessineton & Moussard, 2013].

## B. Vers des priorités de restauration à l'échelle de l'estuaire

Il n'existe pas aujourd'hui de document unique, auquel se référer en termes de restauration, préservation et gestion écologiques des habitats et de la qualité de l'eau, à l'échelle de l'estuaire. Les objectifs opérationnels des principaux acteurs dans ces domaines sont décrits dans des documents sectoriels ou territoriaux à portées ou visées différentes (Directive Territoriale d'Aménagement, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion et des Eaux, Schéma de Cohérence et d'Orientation Territoriale, plans stratégiques des ports, Schéma Régional de Cohérence Ecologique, schéma grande Seine, documents d'orientation agricole ou foncier, schéma des carrières, charte du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande,...) qui trouvent leur cohérence dans un paysage politique, administratif, écologique et socio-économique qui leur est propre [Bessineton & Moussard, 2013].

Les enjeux de la « restauration écologique » de l'estuaire de la Seine nécessitent pourtant une **vision long terme et systémique à l'échelle globale**, ouverte sur des systèmes emboîtés (bassin versant de la Seine, baie de Seine, tronçon intra-estuarien...) dont l'estuaire constitue la zone de transition. Le GIP Seine-Aval s'engage aujourd'hui, avec ses partenaires, dans une réflexion pour apporter les éléments nécessaires à la construction d'une telle cohérence, à travers la mise en place de différents modes d'intervention complémentaires, dont :

- proposition d'**outils de compréhension et d'analyse** du fonctionnement écologique global de l'estuaire (SIG Habitat Fonctionnel [Bacq *et al.*, 2013]) ;
- animation d'une **discussion prospective**, autour de scénarios futurs du système estuarien, sur des leviers potentiels d'actions en faveur de la restauration et de la préservation de l'écosystème [Coreau, 2013] ;
- participation à un **observatoire de la trajectoire** de l'estuaire qui permet entre autres d'évaluer l'impact des restaurations écologiques (projet SOLT) ;
- proposition d'outils pour optimiser la mise en œuvre et le **suivi de projets** de restauration écologique (retours d'expérience de restauration en estuaire [Moussard & Bas, 2013]).

### Encart n°11 – Inventaire de sites et projets d'aménagement de milieux naturels sur l'estuaire de la Seine

Un inventaire des sites de l'estuaire de la Seine ayant fait ou pouvant faire l'objet de projets d'aménagements de milieux naturels à vocation (cibles) uniquement écologique ou également, socio-économiques a été réalisé. Il permet d'en avoir une vision détaillée (fiche) ou d'ensemble (cartes, synthèses) [<http://restauration.seine-aval.fr>]. Il comprend :

- Une quarantaine de projets qui ont fait l'objet de travaux d'ingénierie écologique sur divers milieux écologiques (prairies humides et zones intertidales associées, amont de confluence avec la Seine, zones riveraines, marais, refuges en eau permanente,...), apportent leur lot d'enseignements techniques ou scientifiques [Figure L].
- Une quarantaine de sites en bon état de fonctionnement apparent ou, au contraire, méritant de faire l'objet de réhabilitation ou de réaffectation écologique. Pour ces derniers, des réflexions, issues de premiers constats de dysfonctionnement locaux ou à l'échelle de l'estuaire, permettent de proposer des pistes de restauration de fonctions écologiques (diversification des écoulements, épuration, refuge pour l'avifaune, reproduction pour l'ichtyofaune,...)
- Une quinzaine de projets en cours, à différents stades d'avancement (études préalables, conception, travaux).

Ce travail peut être mobilisé par de futurs maîtres d'ouvrage ou prestataires de projets de gestion ou de restauration afin de :

- Donner des idées pour des compensations écologiques ou des initiatives d'aménagement de milieux naturels (projets potentiels)
- Conserver une mémoire souvent utile aux maîtres d'ouvrage eux-mêmes ou à de nouveaux porteurs de projet (projets finalisés)
- Assurer son propre suivi des opérations en cours, éventuellement utile à des partenaires institutionnels (État, Agence de l'Eau...) à l'échelle de l'estuaire (projets en cours)
- Faire connaître et valoriser les efforts mis en œuvre sur chaque projet de restauration (projets en cours ou finalisés)
- Partager l'information utile sous forme d'exemple ou d'enseignements pour les futurs projets entrepris sur le territoire. (projets finalisés)
- Permettre des méta-analyses de la restauration à l'échelle de l'estuaire

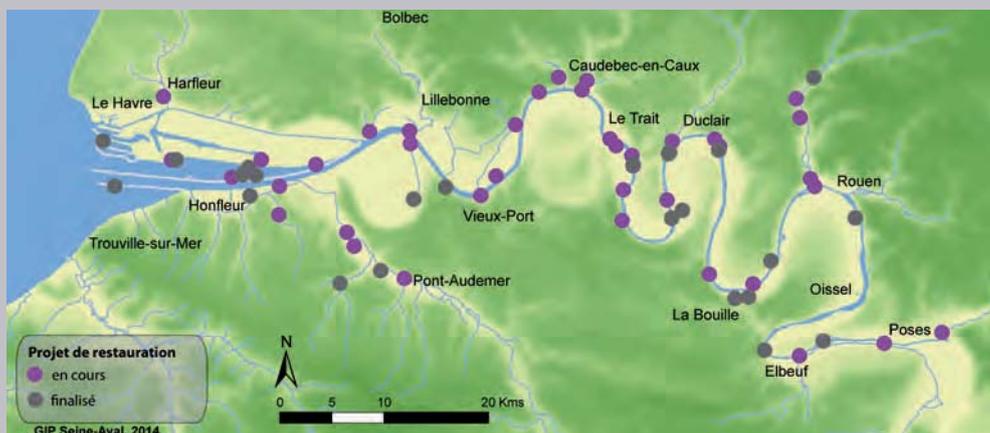


Figure L : Projets de restauration dans l'estuaire de la Seine.

## Encart n°12 – Création de la vasière artificielle

### HISTORIQUE

La construction et le raccordement du pont de Normandie ont nécessité la destruction d'une grande partie de la principale vasière de l'embouchure de l'estuaire, dans un contexte historique de diminution des surfaces des milieux intertidaux (endiguements). L'intérêt écologique de ces milieux est pourtant marqué : pouvoir épurateur et tampon vis-à-vis des polluants, forte productivité biologique permettant l'accueil de limicoles à marée basse et de juvéniles de poissons à marée haute,...

Lors de l'initiation du projet, une forte mobilisation associative a permis d'ouvrir les discussions sur les dommages environnementaux engendrés par ce projet et d'obtenir l'établissement de mesures compensatoires. Dans ce cadre, il a été décidé de maintenir et amplifier le système de criques (filandres) en place à l'est du pont et pour cela de reconstituer une vasière intertidale (+ 24 Ha) à partir d'une filandre à maintenir en équilibre hydro-sédimentaire avec la Seine et son bassin versant.

### Travaux du pont de Normandie et création de la vasière artificielle



Figure M : Création de la vasière artificielle.

Ce projet a été réalisé sous maîtrise d'ouvrage de la Chambre de Commerce et d'Industrie du Havre, sur un terrain propriété du port de Rouen, géré par ce dernier et par la Maison de l'Estuaire. Il s'est accompagné d'une forte mobilisation associative (SOS Estuaire, GONm, Robin des Bois,...) débouchant sur un intérêt du public pour l'intérêt écologique du secteur et sur des propositions de mesures compensatoires au projet. Aucune communication et concertation directe n'a cependant été organisée par le maître d'ouvrage pour sensibiliser le public à l'intérêt des vasières dans la mesure où ce type de milieu est, à l'époque, peu valorisé.

### SITUATION

La vasière artificielle se situe à environ 2 kilomètres en amont du pont de Normandie en rive droite de la Seine (pk 350-351).

### BILANS

Cet aménagement au caractère expérimental affirmé constitue une première en Europe. Il a nécessité la mise en place d'un suivi détaillé du point de vue hydrologique, granulométrique, benthique et botanique, pour permettre une meilleure compréhension des évolutions constatées et de son fonctionnement. Ces suivis ont été interrompus et repris par des équipes différentes.

### CONCEPTION DU PROJET.

Bien que ce projet ait permis d'acquérir beaucoup de connaissance écologique sur le fonctionnement d'une filandre, l'objectif expérimental avait été très peu mis en avant lors de du montage du projet de telle sorte que la conception des suivis aurait pu être encore mieux structurée et surtout les résultats mieux valorisés. Les nombreux enseignements tirés de ces suivis ont fait l'objet de très peu de communication technique ou de publication scientifique [Bessineton, 1997]. Il faudra attendre 2012, le projet scientifique DEFH-FIS pour capitaliser ces connaissances acquises et poser de nouvelles hypothèses.

L'expérience confirme qu'il est souvent nécessaire, au vu des suivis, de prévoir la possibilité de devoir intervenir sur les aménagements après travaux pour corriger des évolutions compromettant leur pérennité ou empêchant d'atteindre les objectifs initiaux.

### ÉCOLOGIE

Quantitativement, l'objectif écologique basé initialement sur 24 hectares de vasière créée ne s'est pas maintenu très longtemps (13 ha en 2012). En effet, les sédiments dragués pour la création du réseau de chenaux, servant à l'alimentation hydraulique de la filandre, ont été déposés en merlon de part et d'autre de ces chenaux. En rive est, des brèches y ont été créées et du pâturage a permis de maintenir le milieu ouvert, facilitant la circulation des eaux. En rive ouest, le milieu a sédimenté et les roseaux se sont installés limitant les phénomènes de remplissage-vidanges, à l'origine de l'auto-entretien de ce type de système à marée. Néanmoins, le système filandre se maintient encore 20 ans après sa construction dans un équilibre fragile (auto-curage) dont la pérennité peut être « facilement » mise à mal. Qualitativement la production biologique attendue est bien présente avec des équilibres entre communautés qui ont mis du temps à se stabiliser entre les parties amont et aval de la filandre.

Le principal enseignement de la cible expérimentale (rive ouest/rive est) est l'importance de la circulation hydraulique et du maintien d'un volume oscillant conséquent au sein du système (liés au mode d'occupation du sol et aux types de connexions) dans le fonctionnement et l'équilibre d'une filandre.

### SOCIAL ET POLITIQUE

Sans le poids des pressions associatives, ce projet de compensation n'aurait pas vu le jour malgré les constats alarmants de l'étude d'impact.

### CONCERTATION

Les chasseurs, principaux intéressés, n'ont pas été associés au déplacement et à la fermeture de mare à gabions. Ce manque de concertation pèsera à l'avenir sur les relations de confiance entre chasseurs et naturalistes. De nombreux partenaires techniques (bureau d'étude, ports, naturalistes, scientifiques...) ont par contre collaboré à cet aménagement expérimental relativement bien conçu.



## CONCLUSION

Le constat d'anthropisation de l'estuaire de la Seine est aujourd'hui bien documenté et montre 1) le rôle des aménagements industrialo-portuaires dans les dynamiques héritées des XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles (accélération du comblement naturel de l'estuaire, aménagement des berges, diminution de la surface en eau et des zones intertidales, déconnexion et assèchement de zones humides,...) et 2) le poids des pressions industrielles, urbaines et agricoles sur la qualité des eaux et la contamination des sédiments et du biote. Depuis une vingtaine d'années, la prise en compte de la dimension environnementale dans les projets d'aménagements se traduit par la mise en place 1) de mesures de réduction des rejets pour améliorer la qualité des eaux et 2) de mesure compensatoires et d'accompagnement pour réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables des projets sur l'environnement, avec une priorité donnée à la circulation et aux échanges d'eau, ainsi qu'à la sauvegarde ou la reconstitution de vasières et de chenaux pour leur richesse écologique.

La qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine est le reflet des pressions qui s'exercent sur son bassin versant et porte l'empreinte de son histoire. De nombreuses améliorations sont à noter (baisse de la contamination métallique, amélioration de l'oxygénation, réduction des flux de phosphore et d'ammoniac, etc.) et sont à mettre en lien avec la réduction des rejets, l'amélioration des capacités de traitement des effluents et l'évolution des pratiques. Néanmoins, des préoccupations persistent sur les effets liés à la contamination chimique (HAP, PCB, pesticides, etc.) et des questions se posent sur les contaminants dits émergents (PBDE, phtalates, résidus médicamenteux, etc.). Au-delà des effets visibles à divers niveaux des réseaux trophiques, la qualité dégradée de l'eau de l'estuaire de la Seine justifie la réglementation de l'activité de pêche pour des raisons sanitaires, notamment en lien avec les PCB. Les enjeux de reconquête de la qualité des eaux sont aujourd'hui multiples : 1) gérer la multicontamination héritée du passé ; 2) développer le suivi des contaminants d'intérêt émergent (produits pharmaceutiques, retardateurs de flamme, détergents,...) ; 3) réduire les sources industrielles, urbaines, agricoles,... ponctuelles et diffuses, à l'échelle de l'estuaire et du bassin versant de la Seine ; 4) assurer un suivi pérenne et pertinent de l'état de santé de l'estuaire ; 5) optimiser l'analyse du risque pour protéger l'homme et l'environnement.

Le suivi des différents compartiments biologiques permet d'apporter des éléments complémentaires et englobant l'état de santé général de l'estuaire. En effet, la présence (ou l'absence) d'espèces et l'état de santé des organismes et des populations intègrent un grand nombre de facteurs, notamment la disponibilité et la qualité des habitats et la qualité de l'eau. Leur suivi est donc un bon proxy à l'évaluation du milieu. Par exemple, les suivis de l'ichtyofaune montrent que le nombre d'espèces de poissons présents en Seine est relativement important (105 espèces ont été recensées entre le barrage de Poses et la baie de Seine orientale) et des passages de grands migrateurs (salmonidés, lamproie, alose, anguille) sont observés au barrage de Poses. Ces signaux positifs sont à relier avec l'amélioration de la qualité de l'eau (essentiellement l'oxygénation), mais sont atténués par un état de santé non optimal des individus et par la perte ou la dégradation d'habitats clés (appauvrissement des nourriceries en mésosalin, cantonnement du peuplement dulçaquicole à l'amont de Rouen, perte d'attractivité entre Tancarville et Rouen,...). Des connaissances approfondies concernant la structure et la dynamique de populations dont le caractère indicateur est avéré seraient nécessaires pour affiner les diagnostics. La disponibilité des habitats est également un des éléments clés pour l'avifaune. Ainsi, les effectifs des espèces fréquentant les zones humides ou les vasières intertidales sont en diminution (avocette, canard pilet, etc.), alors que ceux des espèces fréquentant des milieux plus continentaux croissent (oie cendrée, butor étoilé, etc.), témoignant de l'évolution du milieu. La baie de Seine alterne côtes basses et estuaires, zones d'eaux peu profondes et d'estrans favorables au Marsouin et au Phoque veau-marin. Ces deux espèces de mammifères marins, dont la première fréquentait plus assidument ce secteur aux siècles passés et dont les colonies de la seconde montrent un fort accroissement en Manche, semblent (re)coloniser cet espace depuis plusieurs années, sans pour autant s'y établir de manière claire. Cette tendance pourrait être l'indice d'une réduction de la pollution et de l'existence d'habitats encore fonctionnels. Cependant, la présence de contaminants organiques persistants à des teneurs parfois élevées (PCB notamment) et la capacité de ces organismes à fortement les accumuler du fait de leur statut écologique de super-prédateurs, pose la question de la pérennité à long terme de l'occupation de l'embouchure et de l'estuaire de la Seine par ces mammifères marins.

Fort du constat de dégradation du système estuarien, de l'intérêt écologique de ce système et des projets de restauration (au sens large), préservation ou gestion de certains habitats, fonctions, paysages ou usages de l'estuaire menés par des acteurs du territoire, une réflexion globale de cohérence écologique à l'échelle de l'estuaire est aujourd'hui initiée. Elle s'inscrit dans la volonté d'assurer un « bon » fonctionnement écologique de l'estuaire, c'est-à-dire de permettre à l'écosystème de se maintenir, de s'adapter et d'offrir à la société le choix de ses usages, en écho à la question « Quel estuaire voulons-nous ? ».

## ABRÉVIATIONS

<b>ADN</b>	Acide DésoxyriboNucléique	<b>MES</b>	Matières En Suspension
<b>AESN</b>	Agence de l'Eau Seine-Normandie	<b>MOS</b>	Mode d'Occupation du Sol
<b>ASP</b>	Amnesic Shelfish Poisoning	<b>MTES</b>	Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé
<b>BOPA</b>	Benthic Opportunistic Polychaetes / Amphipods	<b>PBDE</b>	PolyBromoDiphénylEthers
<b>CMH</b>	Cote Marine du Havre	<b>PCB</b>	PolyChloroBiphényles
<b>CORINE</b>	COordination et Recherche de l'INformation en Environnement	<b>Pk</b>	Point kilométrique
<b>CSLN</b>	Cellule de Suivi du Littoral Normand	<b>PNRBSN</b>	Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande
<b>DCE</b>	Directive Cadre sur l'Eau	<b>PSP</b>	Paralytic Shelfish Poisoning
<b>DCSMM</b>	Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin	<b>SAUM</b>	Schéma d'Aptitude et d'Utilisation de la Mer
<b>DDT</b>	DichloroDiphenylTrichloroethane	<b>SDAGE</b>	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
<b>DDTM</b>	Direction Départementale des Territoires et du Littoral	<b>SIAAP</b>	Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
<b>DREAL-HN</b>	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – Haute-Normandie	<b>SIG-HF</b>	Système d'Information Géographique – Habitat Fonctionnel
<b>DSP</b>	Diarrheic Shelfish Poisoning	<b>SPPPI</b>	Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles
<b>EUNIS</b>	EUropean Nature Information System	<b>ZNIEFF</b>	Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique
<b>GEMEL</b>	Groupe d'Étude des Milieux Estuariens et Littoraux	<b>ZICO</b>	Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux
<b>GIPSA</b>	Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval	<b>ZPS</b>	Zone de Protection Spéciale
<b>GMN</b>	Groupe Mammalogique Normand		
<b>GPMH</b>	Grand Port Maritime du Havre		
<b>GPMR</b>	Grand Port Maritime de Rouen		
<b>HAP</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques		
<b>IBGA</b>	Indice Biologique Global Adapté		
<b>IFREMER</b>	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER		
<b>IGN</b>	Institut Géographique National		
<b>INPN</b>	Inventaire National du Patrimoine Naturel		
<b>IPCHN</b>	Inventaire du Patrimoine Culturel région Haute-Normandie		
<b>IQBP</b>	Indice de la Qualité Bactériologique et Physico-chimique		
<b>LERN</b>	Laboratoire Environnement Ressources de Normandie		
<b>MDE</b>	Maison De l'Estuaire		
<b>MEDE</b>	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie		
<b>MEDTL</b>	Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement		

## GLOSSAIRE

**Abiotique** : se dit d'un facteur lié au milieu physique et chimique. (vs Biotique)

**Anadrome** (ou espèce potamotoque) : Se dit des poissons qui remontent les fleuves pour se reproduire. (vs Catadrome)

**Anthropique** : Relatif à l'activité humaine.

**Avifaune** : Ensemble des oiseaux.

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

**Biotique** : Se dit d'un facteur lié aux être-vivants dans l'écosystème. (vs abiotique)

**Bouchon vaseux** : Zone d'accumulation de sédiments fins, particulière aux estuaires et induisant une forte turbidité.

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

**Catadrome** (ou espèce thalassotoque) : Se dit des poissons vivant en rivière et se reproduisant en mer. (vs Anadrome)

**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.

**Communauté** : Groupement d'êtres vivants qui se maintiennent et se reproduisent dans un certain espace, de façon permanente.

**Contaminant** : Composé chimique présent dans l'environnement à une concentration sans effet toxique identifié pour la faune ou la flore. (vs Polluant\*)

**Crue** : Augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois son débit moyen. (vs Étiage)

**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.

**Étiage** : Qualifie la période de l'année où un cours d'eau atteint son débit le plus bas. (vs Crue)

**Flot** : Moment de la marée montante (courants dirigés vers l'amont). (vs Jusant)

**Guilde** : Ensemble d'espèces appartenant à un même groupe taxonomique ou fonctionnel.

**Habitat** : Ensemble des conditions environnementales (biotiques\* et abiotiques\*) dans lequel un organisme, une population ou une communauté peut survivre et se développer.

**Ichtyofaune** : Ensemble des poissons.

**Intertidale** : Qualifie la zone comprise entre la plus haute mer et la plus basse mer de vive-eau (zone de balancement des marées).

**Jusant** : Moment de la marée descendante (courants dirigés vers l'aval). (vs Flot)

**Juvenile** : Pour les poissons, caractérise un individu immature et généralement de moins de 2 ans, fréquentant les nourriceries.

**Limnique (ou dulcicole)** : De salinité nulle.

**Liposoluble** : Se dit d'une substance chimique ayant une affinité pour les graisses.

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

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

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

**Mésohalin** : De salinité comprise entre 5 et 18.

**Micropolluant** : Substance inexistante 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,...).

**Morte-eau** : Se dit d'une marée de faible amplitude, avec un coefficient inférieur à 50 (premier et dernier quartier de lune). (vs Vive-eau)

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

**Oligohalin** : De salinité comprise entre 0.5 et 5.

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

**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** : Composé chimique présent dans l'environnement à une concentration exerçant un effet toxique sur tout ou partie de l'écosystème. (vs Contaminant)

**Polyhalin** : De salinité comprise entre 18 et 30.

**Population** : Ensemble des individus de même espèce, occupant un même écosystème.

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

**Ripisylve** : Formation végétale ligneuse et herbacée en bordure de rivière qui joue le rôle de transition entre le milieu aquatique et le milieu terrestre.

**Saumâtre** : caractérise un milieu de salinité non nulle.

**Schorre** : Étendue de vases salées végétalisées soumises à la marée. Le schorre, plus élevé topographiquement que la slikke\*, n'est recouvert par la mer que lors des grandes marées et des tempêtes. [Lévy, 2013]

**Slikke** : Étendue de vases salées, soumises à la marée et non végétalisées. [Lévy, 2013]

**Subtidale** : Qualifie la zone toujours en eau, située sous la zone intertidale.

**Tirant d'eau** : Hauteur de la partie immergée de la coque d'un navire.

**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),...

**Vive-eau** : Se dit d'une marée de forte amplitude, avec un coefficient supérieur à 90 (périodes de pleine et nouvelle lune). (vs Morteau\*)

## BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) & Direction Départementale des Territoires et du Littoral 76 (DDTM76), 2011. **Suivi de la qualité des eaux de la Seine à l'aval de Poses** – Année 2010. Rapport d'étude, 178p.
- Alard D., Bourcier A., Bureau F., Lefebvre D., Mesnage V., Poudevigne I., 2002. **Zones humides de la basse vallée de la Seine**. Fascicule Seine-Aval n°1.15, 36p. ISBN 2-84433-077-0
- Alizier S., 2011. **Echelles spatio-temporelles d'observation des relations macrobenthos – sédiments : organisation et changements à long terme (1988-2009) des communautés benthiques subtidales de la partie orientale de la baie de Seine**. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 206 p. et annexes.
- ARTELIA, 2012. **Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la Seine – Synthèse finale**. Étude réalisée pour le Grand Port Maritime du Havre, 54p. et annexes.
- Avoine J., 1981. **L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamiques sédimentaires**. Thèse de doctorat – Université de Caen, 223p. et annexes
- Bacchi M. & Moussard, 2012. **Enseignements tirés de projets de restauration écologique en estuaire de Seine**. 56p.
- Bacq N., Moussard S., Lobry J., 2011. **Cartographier les fonctionnalités pour spatialiser le potentiel écologique – Mise en place d'un outil SIG "Habitats Fonctionnels" sur les estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde**. Projet BEEST – Vers une approche multicritère du Bon État écologique des grands ESTuaires. 26p.
- Bacq N., Lemoine J.P., Moussard S., Le Hir P., Lobry J., 2013. **Projet MESSCEN : Modélisation des fonctions écologiques de l'Estuaire de la Seine et ScENarios d'Évolution – rapport final**. Rapport du GIP Seine-Aval, projet financé par la fondation de France, 69p.
- 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.
- Belliard J., Gorges G., Le Pichon C., Tales E., 2009. **Le peuplement de poissons du bassin de la Seine – Comprendre son évolution sous l'impact des changements générés par l'homme ou la nature**. Fascicule PIREN-SEINE #4, 43p. ISBN 978-2-918251-03-3
- Ben Radhia-Souissi A., 2010. **Étude de la plasticité reproductive et de la morphologie d'un copépode estuarien : comparaison intercontinentale**. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies Lille1. 224 p.
- Bessineton C., 1997. **La création de vasières artificielles dans l'estuaire de la Seine**. in : Les estuaires français, Ed. Ifremer, Actes Colloque, 22; 111-121.
- Bessineton C. & Moussard S., 2013. **Vers des priorités en matière de préservation et de restauration des fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine - Partie 1 : Présentation**. 12p.
- Billen G., Silvestre M., Barles S., Mouchel J.M., Garnier J., Curie F., Boët P., 2009. **Le bassin de la Seine – Découvrir les fonctions et les services rendus par le système Seine**. Programme PIREN-Seine, Fascicule 1. 51p.
- 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
- 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
- Bocquené G. (coord.), 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'Historique des Apports Particulaires a la Seine par l'Observation De leur Intégration Sédimentaire**. Projet Seine-Aval 4, 163 p.
- Budzinski H. (coord.), Forget-Leray J., Ait-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., Winn R., Norris M., Budzinski H., Menach K.L., Law M., Lacroix S., 2005. **Thème 3 : 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*. Phase I. contamination par voie directe des embryons de medaka**. Seine-Aval 3, p1-19.
- Cachot J., Winn R., Sundberg S., Norris M., André V., Pottier D., Budzinski H., Le Du M., Le Menach K. et al., 2006. **Thème 3 : Évaluation des effets biologiques résultant d'une exposition chronique à des mélanges d'hydrocarbures aromatiques polycycliques**. Seine-Aval 3, p119.
- Cailleaud K., Budzinski H., Souissi S., Forget-Leray J., 2006. **Bioaccumulation et effets de contaminants organiques sur le comportement natatoire et le potentiel reproducteur d'*Eurytemora affinis***. Seine-Aval 3, 16p.
- Ciolfi C. & Paporey 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.
- Coreau A., 2013. **Quels futurs possibles pour la restauration de l'estuaire de la Seine – Construire des scénarios contrastés pour mettre en débat les enjeux de restauration**. Projet de recherche Fondation de France 2014-2015.
- Creze J.Y., 1980. **Étude géographique des pêches dans l'estuaire de la Seine et ses parages immédiats**. Étude réalisée dans le cadre du SAUM de l'estuaire de la Seine, 183p. et annexes

- Dancie, C., 2012. **Évolution des structures biosédimentaires de la Fosse Nord de l'estuaire de la Seine. Synthèse et conclusion sur les évolutions biosédimentaires de la zone nord de l'estuaire de la Seine en relation avec la construction de port 2000 et des aménagements associés.** Bilan 2010. Mémo de la Cellule de suivi du Littoral Normand établi pour le compte de Sogreah. Version V3.
- Dargnat C. & Fisson C., 2010. **Les PCB dans le bassin de la Seine et son estuaire.** Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 134p.
- Dauvin J.C., Brind-Amour A., Cuvilliez A., Dancie C., Desroy N., Le Hir P., Lesourd S., Mear Y., Morin J., 2012. **Projet COLMATAGE: Couplages biomorpho-sédimentaires et dynamique à long terme des habitats et peuplements benthiques et ichtyologiques en Seine aval.** Projet Seine-Aval4, 209p.
- Dauvin J.C. & Pezy J.P., 2012. **Suivi des peuplements suprabenthiques dans l'estuaire de la Seine - campagnes d'octobre 2011 et mars 2012. Synthèse 2002-2012.** Rapport du 28 juin 2012 établi pour le compte du Grand Port Maritime du Havre, Service Qualité-Sécurité-Environnement.
- Dauvin J.C. & Ruellet T., 2007. **Polychaete/amphipod ratio revisited.** Marine Pollution Bulletin n°5, p215-224.
- De Roton, G., 2012. **Évolution halieutique de la Fosse Nord de l'estuaire de la Seine - Synthèse et conclusion sur les évolutions halieutiques de la zone nord de l'estuaire de la seine en relation avec la construction de port 2000 et des aménagements associés. Bilan sur la période 2000-10.** Mémo de la Cellule de suivi du Littoral Normand établi pour le compte de Sogreah. Version V2.
- Devreker D. (coord.), Forget-Leray J., Souissi S. (coord.), 2012. **Écologie du copépode Eurytemora affinis : une espèce au centre du réseau trophique estuarien.** Fascicule Seine-Aval n°2.8, 56p.
- Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de Haute-Normandie (DREAL-HN), 2008. **Suivi d'indicateurs biologiques en Seine en 2008.** 32p.
- 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.
- Evrard B., 2010. **La côte d'Albatre comme terrain de jeux ? Aménagements, activités physiques et paysages vécus.** Thèse de doctorat – Université de Rouen, 381p. et annexes
- 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, 2012b. **Imprégnation du compartiment aquatique de Haute-Normandie par les contaminants chimiques.** Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 30p. et annexes cartographiques.
- Forget-Leray J., 2007. **Bioaccumulation et effets de contaminants présents en estuaire de Seine sur le comportement natatoire et le potentiel reproducteur d'Eurytemora affinis (Copépode, Crustacé).** Rapport scientifique Seine-Aval 3, 30p.
- Forget-Leray J. (coord.), Petit F., Souissi S., Budzinski H., 2012. **Projet COBAC : Étude des processus adaptatifs susceptibles de se mettre en place au sein de population d'Eurytemora affinis exposées à diverses contaminations chimiques et/ou microbiologiques.** Projet Seine-Aval 4, 44p.
- Foussard V. (coord.), Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O., 2010. **Évolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours.** Fascicule Seine-Aval n°2.3, 43p. ISBN 2-84834-052-5
- Garnier J., Leporcq B., Akopian M., Philippon X., Ficht A., 1997. **Le phytoplancton et ses facteurs de contrôle dans l'estuaire de la Seine – Importance quantitative dans le bilan d'oxygénation.** Rapport Seine-Aval 1, 31p.
- 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 Eutrophisation : Indicators and model Scenarios.** Projet Seine-Aval 4, 46p.
- Grand Port Maritime de Rouen (GPMR), 2010. **Projet d'amélioration des accès maritimes du Port de Rouen – dossier d'enquête publique.** Étude réalisée par Egis Eau et SOGREAH pour le GPMR, 323p. et annexes
- Groupe Mammalogique Normand (GMN), 2004. **Les mammifères sauvages de Normandie : statut et répartition.** ISBN : 2-9503208-1-3, 306p.
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2008a. **Niveaux d'oxygénation dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2008b. **Contamination par les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2008c. **Peuplements d'invertébrés benthiques dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2008d. **Compilation des profils bathymétriques de la Seine (transversaux et longitudinaux) de 1824 à 2005.** 29p.
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2008e. **Mesures d'inventaires et de protection du patrimoine naturel du bassin de l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>

- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2009a. **Aménagement de l'estuaire de la Seine. Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution.** 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2009b. **Dynamique du zooplancton dans l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2010. **Évolution démographique des communes riveraines de l'estuaire de la Seine. Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution.** 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2011a. **L'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA), 2011b. **Évolution morphologique de l'estuaire de la Seine.** Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p. [en ligne] <http://fiches.seine-aval.fr>
- Guézennec L. (coord.), Romaña L.A., Goujon R., Meyer R., 1999. **Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes.** Fascicule Seine-Aval n°1, 29 p. Editions Ifremer, Plouzané (France). ISBN 2 84433 026-6
- 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 Géographique National (IGN), 2012. **RGC® - Le répertoire géographique des communes.**
- 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.
- Inventaire National du patrimoine naturel (INPN), 2010a. **ZNIEFF 230030833 – les îles Durant et Saint-Catherine.** [en ligne] <http://inpn.mnhn.fr/zone/znieff/230030833>
- Inventaire National du patrimoine naturel (INPN), 2010b. **ZNIEFF 230030834 – l'île Legarée.** [en ligne] <http://inpn.mnhn.fr/zone/znieff/230030834>
- Lachambre M. & Fisson C., 2007. **La contamination chimique : quel risque en estuaire de Seine ?** Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 110p., fiches substances, atlas des sources et atlas de la contamination.
- Lavabre J. & Fisson C., 2013. **Les habitats naturels de l'estuaire de la Seine – typologie et fonctions écologiques associées.** Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 76p.
- 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.
- Le Gall J., Dugué O., Rodet J., Bretel P., Lesueur P., 2003. **La Normandie physique.** pp. 9–104. in Guérin A., La Normandie – la géologie, les milieux, la faune, la flore, les hommes. Libris (Grenoble). 359 pages.
- Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans, 2004. **Les surfaces marnantes.** Fiche du cahier indicateur 2002 Loire estuaire. 8p.
- Lévy W. (coord.), Housset P., Duhamel F., Cornier T., 2013. **Les végétations de l'estuaire de la Seine.** Fascicules Seine-Aval 3.2, in press.
- Maison de l'estuaire (MDE), 2009. **Les oiseaux de la Zone de Protection Spéciale "Estuaire et marais de la basse Seine".** Les dossiers de la Maison de l'Estuaire, 25p.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDTL) & Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé (MTES), 2011. **Plan national sur les résidus de médicaments dans les eaux.** 26p. et annexes
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDE), 2013. **Banque HYDRO.** [en ligne] <http://www.hydro.eafrance.fr>
- Morandi B. & Piegay H., 2011. **Les restaurations de rivières sur internet : premier bilan.** Natures Sciences Sociétés n°19, pp.224-235
- 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
- Moussard S. & Bas J., 2013. **Enseignements méthodologiques et hypothèses thématiques provenant des restaurations écologiques en estuaire de Seine.**
- Nicolas D., Lobry J., Lepage M., Sautour B., Le Pape O., Cabral H., Uriarte A., Boët P., 2010. **Fish under influence: a macroecological analysis of relation between fish species richness and environmental gradients among European tidal estuaries.** Estuarine Coastal & Shelf Science 86: 137-174pp.
- Observatoire de l'avifaune, 2013. **Synthèse du suivi de la ZPS.** In press
- Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande (PNRBSN) & GIP Seine-Aval, 2012. **Mise en œuvre d'une base de données sur l'évolution de l'occupation du sol.**
- Petit F. (coord.), Denamur E., Budzinski H., Leclercq R., Favennec L., Chevé 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.
- Petit F. & Berthe T., 2007. **Analyse du risque microbiologique en estuaire de Seine.** Projet Seine-Aval 3, 26p.
- Poisson E. (coord.), 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
- Pons A., 2009. **Population et activités : 200 années d'évolution de l'estuaire de la Seine.** Rapport de stage Master TRIAD 2ème année - Université de Rouen, GIP Seine-Aval, 46p.

- Préfecture de Basse-Normandie & Préfecture de Haute-Normandie, 1977. **Arrêté préfectoral instituant le Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) en basse Seine.** 5p.
- Ranvier G & Dumais L., 2011. **Modalités de recolonisation de la basse vallée de la Seine par le Faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) et historique régional.** 10p. et annexes
- Rochard E. (coord.), Le Pichon C., Budzinski H., Cachot J., Duhamel S., 2012. **Projet THALASSOTOK : Colonisation et utilisation des habitats estuariens par les poissons migrateurs thalassotoques. Approche comparative Seine-Gironde.** Projet Seine-Aval 4, 117p.
- Rochard E., Croze O., Béguer M., Gazeau C., Lassalle G., Marchal J., Ombredane D., Baglinière J-L., Menvielle E., Pellegrini P., 2007. **Identification éco-anthropologique d'espèces migratrices, emblématiques de la reconquête d'un milieu fortement anthropisé : la Seine.** Action Seine-Aval 2005 : 143p.
- Ruellet T. & Breton G., 2012. **Projet VIP : Vie Introduite dans les Ports.** Projet Seine-Aval 4, 415p.
- Salvaudon C., 2008. **Études des impacts potentiels des changements climatiques sur la flore et la végétation dans l'estuaire de la Seine.** Rapport de stage, Agrocampus Ouest, 2008.
- Sirost O. (coord.), Melin H., Gilles S., Lecoœur M., Bouillon D., 2012. **Les enfants du fleuve. Paysages vécus et paysages perçus dans l'estuaire de la Seine.** Projet Seine-Aval 4, 223p.
- Sirost O., Féménias D., 2012. **Les usages récréatifs de l'estuaire de la Seine.** Projet Seine-Aval 4, 131p.
- Sirost O., Féménias D., L'Aoustet O., Niel A., 2008. **Activités nautiques formelles et informelles en Seine – Radiographie des usages ludiques de l'eau et des représentations liées au milieu.** Rapport scientifique Seine-Aval 3, 170p.
- 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.** Rapport scientifique Seine-Aval 3, 78 p.
- Souissi S. (coord.), Tackx M ; Forget-Leray J., 2011. **Projet ZOOSEINE : Rôle du zooplancton dans le fonctionnement de l'écosystème estuarien dans la zone de gradient de salinité : sentinelle du bon état écologique et des changements climatiques.** Projet Seine-Aval 4, 49p.
- Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), 2013. **Seine aval demain – la refonte.** [en ligne] <http://www.seineavaldein.siaap.fr>
- Togola A., 2006. **Présence et devenir des substances pharmaceutiques dans les écosystèmes aquatiques.** Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 315p.
- Touron A., Berthe T., Gargala G., Fournier M., Ratajczak M., Servais P., Petit F., 2007. **Assessment of faecal contamination and the relationship between pathogens and faecal bacterial indicators in an estuarine environment (Seine, France).** Mar. Poll. Bull. 54: 1441-1450.
- Viennot P., Ducharne A., Habets F., Lamy F., Ledoux E., 2009. **Hydrogéologie du bassin de la Seine.** Programme PIREN-Seine, Fascicule 2. 55p.





# L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution

## Fascicules Seine-aval

- 1.1 Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes
- 1.2 Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau
- 1.3 Sables, cheneaux et vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologiques
- 1.4 Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
- 1.5 L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiotique
- 1.6 Contaminations bactérienne et virale
- 1.7 Patrimoine biologique et chaînes alimentaires
- 1.8 La contamination métallique
- 1.9 Fer et manganèse : réactivités et recyclages
- 1.10 Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire
- 1.11 La dynamique du mercure
- 1.12 Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir
- 1.13 Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant ?
- 1.14 Des organismes sous stress
- 1.15 Zones humides de la basse vallée de la Seine
- 1.16 Les modèles : outils de connaissance et de gestion

- 2.1 Le programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux
- 2.2 La genotoxicité : quels risques 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
- 2.6 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

### 3.1 L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution

Réalisation :

GIP Seine-Aval  
Pôle régional des Savoirs  
115bd de l'Europe - 76100 Rouen  
[www.seine-aval.fr](http://www.seine-aval.fr)

Conception - Edition :

[www.medianconseil.fr](http://www.medianconseil.fr)

Impression sur papier recyclé

ISBN

Crédits photos (couverture) :

GIP Seine-Aval ; GPMH ; MDE

Date d'édition :

février 2014

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante : 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, 48p.  
Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'événements 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](mailto:gipsa@seine-aval.fr)  
Le GIP Seine-Aval est financé par :

