

Le programme Seine-Aval 3

Contexte, bilan et enjeux

Coordinateur
Jean-Claude Dauvin





Le programme Seine-Aval 3

Contexte, bilan et enjeux

Coordinateur : Jean-Claude Dauvin

Auteurs : Jean-Claude Dauvin⁽¹⁾, Thierry Ruellet⁽¹⁾ & Olivier Lozachmeur⁽²⁾

(1) Université de Lille 1, Station Marine de Wimereux

(2) Université de Nantes, Faculté de Droit

Remerciements

La rédaction de ce fascicule n'aurait pas été possible sans l'ensemble des résultats de la communauté scientifique Seine-Aval qui doit être remerciée ici dans sa totalité. Merci à tous ceux qui ont permis au Directeur Scientifique (Jean-Claude Dauvin de 2004 à 2006) d'accéder à la primeur de leurs résultats et à la confiance qui lui ont accordé pour les présenter dans différentes réunions internes, celles avec les partenaires Seine-Aval et dans les conférences internationales. Les auteurs remercient Nicolas Bacq, Antoine Delouis, Jérôme Dumont, Pascal Galichon, Loïc Guézennec, Stéphanie Moussard et Virginie Valence pour leurs contributions. Merci aussi à Monsieur Forcuit pour les informations sur la station d'épuration Emeraude. Enfin, un grand merci à Céline Dégremont et Loïc Guézennec pour la relecture de ce fascicule.

Sommaire

PRÉAMBULE	3	CHAPITRE 3. VERS UNE GESTION GLOBALE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ENJEUX, ÉCHÉANCES ET ORIENTATIONS POUR LES DEUX PROCHAINES DÉCENNIES	39
INTRODUCTION	4	Les acteurs de l'estuaire	39
CHAPITRE 1. QUALITÉ ET ÉTAT DE SANTÉ DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE AU DÉBUT DES ANNÉES 1990	6	Les acteurs publics	39
Un estuaire fortement anthropisé et contaminé	6	Les acteurs privés	39
Les derniers aménagements préludes d'une reconquête attendue	7	Les acteurs scientifiques	40
CHAPITRE 2. ETAT DU FONCTIONNEMENT DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE À LA FIN DE SEINE-AVAL 3 (2007)	10	Les instances de gestion spécifiques à l'estuaire de la Seine	41
Circulation, morpho-dynamique et dynamique des particules fines	10	Les outils de gestion et de protection de l'estuaire	41
Qualité chimique de l'environnement estuarien : état de contamination des habitats et des organismes	15	Les textes et les dispositifs à caractère contraignant	41
Les métaux	16	Les directives européennes	41
Les HAP	17	Les dispositifs de protection nationaux	42
Les PCB et les PBDE	18	Les directives territoriales d'aménagement et les schémas de cohérence territoriale	43
Les pesticides	18	Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux	44
Les organoétains	18	La Charte du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande	44
Les phtalates	18	Les documents et les mesures d'orientation et de financement	45
Les contaminants émergents	19	Les schémas régionaux d'aménagement et de développement du territoire	45
Qualité microbiologique : état de contamination de l'environnement estuarien	19	Les contrats de projets Etat-Région	45
Démarche	19	Le plan Seine et le contrat de projets interrégional Etat-Régions Seine	45
Bactériologie	21	Le plan de gestion globale de l'estuaire de la Seine	46
Parasitologie	22	L'avenir de l'estuaire	46
Virologie	22	La démarche prospective de 2004 et son prolongement en 2006	46
Modélisation	22	Les projets d'aménagement de l'estuaire à court et moyen terme	47
Cycle de la matière organique et eutrophisation du système estuarien	23	Vers un troisième franchissement de l'estuaire de la Seine ?	47
Cycle de la Matière Organique	23	Les projets du port du Havre et du port de Rouen	47
Eutrophisation du système estuarien	25	Une prochaine étape, Seine-Aval 4 (2007-2012)	48
Structure et fonctionnement de l'édifice biologique	27	CONCLUSIONS	50
Populations piscicoles	27	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	52
Richesse piscicole de l'estuaire amont fluvial	27	GLOSSAIRE	55
Habitats	28		
Identification d'espèces emblématiques de la reconquête	30		
Peuplements benthiques	31		
Réponses de la biodiversité benthique des vasières subtidales face à la dynamique sédimentaire	31		
Impact de Port 2000 et des mesures d'accompagnement sur le benthos	33		
Flux trophiques	34		
Perception économique et sociale des problématiques estuariennes	34		
Les études relatives à l'économie de l'estuaire de Seine	34		
Les études sociologiques	37		

Préambule

La première série des fascicules présentant l'ensemble des résultats scientifiques du programme Seine-Aval acquis au cours de la première phase du programme (1995-1999) devait être riche de 17 fascicules. Cette série a commencé en 1999 par la parution du premier fascicule 1 'Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes' et s'est achevée en 2002 par la publication du 16^{ème} volume sans que le dernier fascicule prévu (le 17^{ème}), 'La résistible dégradation d'un estuaire', ne soit paru. Entre temps, huit des 16 fascicules de la première série ont été traduits en anglais et publiés par les Editions de l'Ifremer (<http://www.seine-aval.fr> ; www.quae.com).

Ce fascicule 'Le programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux' tente de faire le lien entre la première et la deuxième série de fascicules. Il s'agit de présenter l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques acquises par le Programme pendant Seine-Aval 3 (2004-2007) tout en donnant des éléments de compréhension des résultats obtenus par le programme depuis sa création en 1995 de façon à restituer synthétiquement la compréhension actuelle des fonctionnalités estuariennes replacées dans leur contexte économique, naturel et social.

Introduction

L'estuaire de la Seine concerne le territoire compris entre le barrage de Poses (pk* 202) en amont (premier barrage sur la Seine et limite d'influence de la marée dynamique, situé à 160 km en amont du Havre) et la partie orientale de la baie de Seine (Figure 1). Trois zones ont été distinguées : l'estuaire amont ou estuaire fluvial (de Poses à Vieux-Port) ; l'estuaire moyen (de Vieux-Port à Honfleur, dans la zone de variation de la salinité) et l'estuaire aval ou estuaire marin (de Honfleur à la partie orientale de la baie de Seine limitée au Nord par le parallèle du Cap d'Antifer et à l'ouest par le méridien de l'Orne). Latéralement, il inclut le lit majeur du fleuve, notamment les berges et les zones humides connexes, et à l'aval la frange littorale et la zone maritime proche (Guézennec *et al.* 1999). Interface terre-fleuve-mer, ce périmètre présente la cohérence d'englober l'ensemble des problématiques spécifiquement estuariennes (lieu d'expression des fonctionnalités). C'est l'emprise géographique sur laquelle porte le programme Seine-Aval depuis l'origine.

L'estuaire tel qu'il est défini constitue la limite administrative entre les deux régions Haute et Basse-Normandie, et trois départements : Eure, Seine-Maritime et Calvados. Il se caractérise par sa situation à l'exutoire d'un bassin ver-

sant de 79 000 km² où se concentrent 16 millions d'habitants et 40 % de l'activité économique nationale. Outre la métropole parisienne qui contribue fortement aux apports amont en estuaire de Seine, on note la présence de deux agglomérations majeures riveraines : Rouen (400 000 habitants) et Le Havre (200 000 habitants).

La Seine et son estuaire représentent un territoire économique majeur pour la France notamment par ses deux ports maritimes : le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) et le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR). Récemment, l'extension Port 2000 (phase des travaux : 2000-2005) du GPMH a fortement contribué à l'évolution morphologique et sédimentaire dans l'estuaire aval. La construction de Port 2000 a été l'opportunité de mener une réflexion environnementale globale sur l'estuaire. L'organisation du projet a été marquée par l'importance du débat public (le premier en France) sur cette dimension. A peine Port 2000 achevé, de nouveaux projets d'aménagement de l'estuaire émergent liés au développement économique de ce territoire fortement convoité. Les nouveaux équipements prévus modifieront-ils irrémédiablement les fonctionnalités biologiques actuelles de l'estuaire ? Peut-on encore envisager de nouveaux aménage-

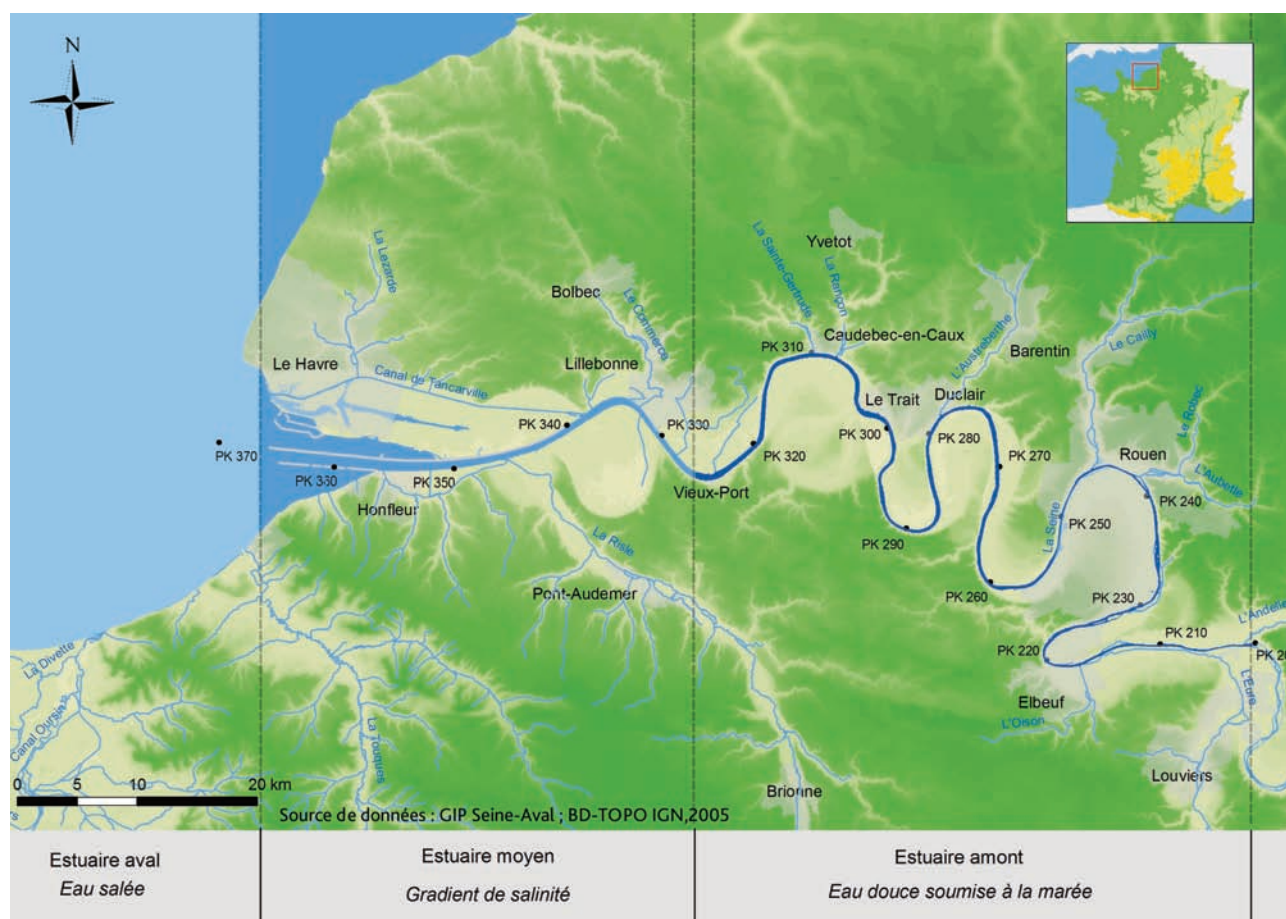


Figure 1. Découpage géographique de la Seine de Poses à la partie orientale de la baie de Seine.

ments dans un milieu aussi modifié sans perdre de façon irréversible le patrimoine naturel subsistant ? Comment gérer l'estuaire de façon intégrée et durable en tenant compte des développements économiques et sociaux et de la préservation de la biodiversité et des paysages ?

En dépit des diverses atteintes à l'environnement, l'estuaire de la Seine constitue un milieu très favorable aux juvéniles de nombreuses espèces de poissons et sa richesse ornithologique est un des atouts patrimoniaux majeurs de l'estuaire. Cette richesse patrimoniale se traduit par une accumulation de mesures réglementaires et d'inventaires dans l'estuaire de la Seine. Ceci traduit implicitement la richesse patrimoniale du milieu mais également le trop plein juridique qui lui correspond, d'où la nécessité d'une harmonisation (Alard *et al.* 2002).

Face au manque de connaissances scientifiques relatives au fonctionnement de l'estuaire de la Seine, les préoccupations environnementales sur cet espace à fort intérêt économique mais aussi patrimonial et sa lente dégradation ont conduit à la mise en place du Programme de recherche scientifique pluridisciplinaire Seine-Aval en 1995.

Seine-Aval 1 (1995-1999) a eu quatre objectifs : fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'estuaire de la Seine, établir des priorités pour optimiser les investissements en matière de restauration de la qualité des eaux, établir des bases scientifiques permettant d'estimer l'impact de projets d'aménagements hydrauliques et fournir des éléments permettant de concilier les différents usages, en particulier la pêche, l'industrie, le tourisme et les activités de loisirs. Il a été structuré en quatre thèmes disciplinaires (Hydrodynamique et transport sédimentaire, Microbiologie et oxygénation, Dynamique des contaminants* et Edifices biologiques).

Le succès de la première phase a conduit les partenaires financiers à souhaiter la poursuite du programme scientifique avec Seine-Aval 2 (2000-2003) en lui donnant un cadre plus tourné vers l'opérationnel et aussi structuré en quatre thèmes transversaux pluridisciplinaires (Analyse des risques chimiques et microbiens, Zones connexes, Halieutique*, Eutrophisation, Dégradation de la matière organique, Rétention des nutriments*).

C'est à la fin de Seine-Aval 2 que la notion de Gestion Globale de l'Estuaire de la Seine, initiée par le Conseil de l'Estuaire, a pris tout son sens pour répondre à la question : "Que voulons-nous aujourd'hui pour l'estuaire dans les deux prochaines décennies ?". Cette perspective a alors été considérée pour orienter les thèmes et actions entreprises dans Seine-Aval 3 (2004-2006) en y insérant des problématiques du domaine des Sciences Humaines et Sociales. En effet, des fonctions, problématiques et enjeux environnementaux de l'estuaire constatés dans les deux premières phases du programme découlent un important besoin de compréhension du système dans son ensemble pour pouvoir mieux le gérer. La phase 2 du Programme tentait de répondre à des questions scientifiques pluridisciplinaires contrairement à la phase 1 encore très académique. Seine-Aval 3 a dépassé la simple approche purement scientifique de l'estuaire, pour aider à

répondre concrètement aux grands problèmes actuels de préservation des fonctionnalités environnementales de l'estuaire (restauration, aménagements, prospective, perception sociale*), relayés par les politiques, les institutionnels et les professionnels locaux.

Les objectifs de la 3ème phase de Seine-Aval (2004-2006, en fait 2004-2007 puisque des rapports ou des opérations scientifiques ont été rendus ou réalisés sur quatre années) étaient i) de continuer à acquérir les connaissances nécessaires à une meilleure compréhension des problématiques précédentes, en réalisant un effort de recherche particulier sur la compréhension et la modélisation d'une dynamique forte qui influe sur l'ensemble des fonctionnalités estuariennes notamment l'évolution géomorphologique de l'estuaire, et ii) de développer des outils et de s'attacher à appliquer véritablement les résultats de la recherche. Seine-Aval 3 s'est également organisé en quatre thèmes transversaux (Morphodynamique, cycle des vases et contaminants associés ; Halieutique et restauration des fonctionnalités biologiques ; Tableau de bord et indicateurs opérationnels et Prospective environnementale, économie et sociologie).

La partie opérationnelle de Seine-Aval a été renforcée par la création du Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIP Seine-Aval) né du besoin de disposer sur l'estuaire de Seine d'une structure de coordination et d'interface, à caractère pérenne, entre les acteurs de la recherche et les décideurs - aménageurs de l'estuaire de Seine. Créée le 17 octobre 2003, la structure GIP Seine-Aval ne s'est réellement mise en place qu'en avril 2004. Neuf partenaires en sont membres fondateurs : la région Haute-Normandie, l'Etat (DIREN), l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), les trois départements Seine-Maritime, Eure et Calvados, le Grand Port Maritime du Havre et deux associations d'industriels : UIC (Union des Industries Chimiques) et ASICEN (Association Syndicale de l'Industrie et du Commerce pour l'Environnement Normand); au 1er janvier 2007, deux autres partenaires, la région Basse-Normandie et le Grand Port Maritime de Rouen ont rejoint le GIP Seine-Aval. Les missions du GIP Seine-Aval s'organisent en unités opérationnelles dont : la maîtrise d'ouvrage du programme scientifique ; le développement de l'application et de la valorisation des résultats de la recherche ; le système d'information et d'administration de données et la communication vers tous les publics.

C'est donc tout un ensemble d'observations, de mesures, d'expérimentations, d'analyses et de modèles qui a été conduit par le programme scientifique Seine-Aval qui est analysé pour sa phase 3 dans ce fascicule. Au développement de cette recherche finalisée, s'est ajoutée la création du GIP Seine-Aval qui a structuré les démarches de recherche, de transfert de la recherche afin de rendre utilisables les outils développés pour l'ensemble des partenaires du GIP Seine-Aval mais aussi au-delà, pour l'ensemble des acteurs de l'estuaire de la Seine.

Chapitre 1. Qualité et état de santé de l'estuaire de la Seine au début des années 90

Un estuaire fortement anthropisé et contaminé

L'anthropisation* de l'estuaire de la Seine commence très tôt ; en effet, à partir de 1848, l'aménagement du fleuve va s'effectuer par phases successives avec la construction de digues en rives sud et nord afin de permettre aux navires de haute mer dont le tirant d'eau est de plus en plus important de continuer à desservir le port de Rouen. Le principe général retenu est d'obtenir un phénomène de chasse afin d'évacuer le surplus d'apport de matériaux en provenance de la mer. Des aménagements seront également réalisés pendant plus d'un siècle pour ne s'achever que dans les années 1975 (Lesueur & Lesourd 1999). Aujourd'hui, malgré tous ces travaux, environ 3 millions de mètres cubes de matériaux en provenance de la mer, essentiellement sableux, se déposent chaque année dans l'estuaire, principalement dans le chenal, et doivent être dragués. Parallèlement à ces travaux sur le fleuve, d'autres réalisations sont effectuées sur la partie terrestre. A partir de 1876, en rive nord, le creusement du canal de Tancarville est entrepris afin de faciliter, à partir du port du Havre, la connexion port/fleuve en amont de l'estuaire marin. La construction du grand canal maritime, de la route de l'estuaire, de la voie ferrée de désenclavement du port, la pose de canalisations diverses pour des raisons de desserte industrielle, l'aménagement des diverses voies rapides et autoroutes, dont celle d'accès au Pont de Normandie vont progressivement découper l'espace et rompre un certain nombre d'échanges hydrauliques et biologiques. Les aménagements ont eu cinq conséquences majeures : (i) le rétrécissement progressif de l'estuaire avec une diminution des surfaces en eau et par voie de conséquence des surfaces de contact, d'échanges et de submersion ; (ii) la stabilisation des rives avec l'enrobage des terrains qui, de vasières, vont passer en roselières puis en prairies humides ; (iii) la dégradation de la qualité biologique des vases et eaux de l'estuaire à cause d'une augmentation continue, jusqu'à une période récente des pollutions provenant de l'ensemble du bassin versant de la Seine, dont une majeure partie de la région parisienne ; (iv) le remblaiement volontaire de plusieurs milliers d'hectares de zones humides pour y implanter des activités industrielles dont certaines dangereuses et/ou polluantes et (v) la compartimentation des milieux naturels. Ainsi, les surfaces intertidales* sont passées de plus de 130 km² en 1850 à moins de 30 km² au début des années 1990 (Avoine 1994). Ce colmatage, d'origine principalement humaine et secondairement naturelle, provient d'un déplacement par charriage des sables marins vers l'embouchure de la Seine et par des apports de particules fines dont les débits solides annuels varient largement, entre 130 000 t (1973) et 1 730 000 t (1996) sur la période comprise entre 1960 et 1993 (Avoine 1994 ; Lesueur *et al.* 1999).

Outre le colmatage estuarien, la Seine dans sa partie fluviale et estuarienne, en situation estivale et de faible débit, présentait deux zones de désoxygénation chronique

(moins de 3 mg.l⁻¹ d'oxygène), l'une immédiatement à l'aval des rejets de la station d'épuration d'Achères (traitement des eaux usées de l'agglomération parisienne), l'autre plus étendue, dans la partie aval de l'estuaire de Rouen à Caudebec (Billen *et al.* 1999). Or, la plupart des organismes aquatiques, comme les poissons, ne peuvent vivre normalement que dans des eaux bien oxygénées. Cette zone d'anoxie presque complète, s'étendant sur près de 50 km les étés les plus chauds, constituait dans les années 1950-1990 le dysfonctionnement estuarien le plus grave. Elle constituait une barrière infranchissable pendant plusieurs mois de l'année par les poissons amphihalins*, comme le saumon ou l'anguille, et il était courant d'assister à la mortalité de quantités importantes de poissons. Cette désoxygénation était liée aux rejets d'eaux usées qui contiennent des bactéries et des virus d'origine fécale qui sont parmi les principaux microorganismes altérant la qualité sanitaire des eaux de surface de la Seine. Les niveaux de contamination dans les années 1990 étaient relativement élevés puisque les abondances en bactéries d'origine fécale étaient quasiment toujours supérieures à celles fixées par les normes européennes comme valeurs guides pour les eaux de baignade. Les maxima étaient observés dans l'estuaire amont entre Rouen et La Bouille ; plus en aval, la zone du bouchon vaseux était aussi une zone d'accumulation de bactéries fécales. Pendant longtemps (de 1977 à 1996), aucune évolution temporelle marquée n'a pu être mise en évidence. En revanche, une diminution significative de l'abondance des bactéries fécales en aval de Rouen a été constatée à la fin des années 1990, entre 1997 et 1998 (Figure 2). Elle s'explique par l'amélioration générale de l'assainissement en région rouennaise avec la mise en place de la nouvelle station d'épuration Emeraude. Les virus qui n'ont pas d'autonomie de multiplication (parasites intracellulaires des organismes vivants) sont éliminés dans les selles et sont présents dans les eaux usées. Une grande quantité de ces virus (de 90 à 98 %) sont retenus en station d'épuration mais les eaux épurées en contiennent encore des quantités importantes.

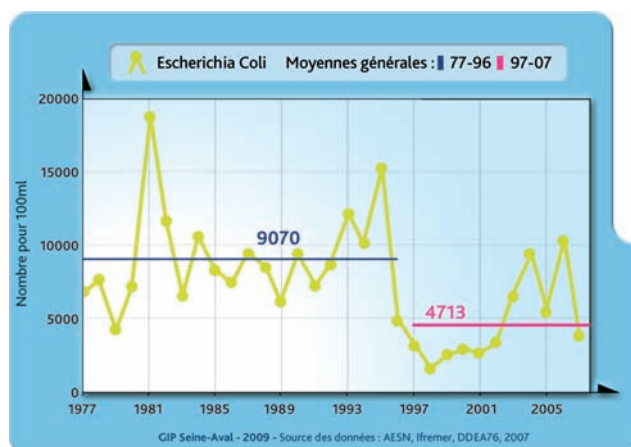


Figure 2. Evolution de la concentration en *Escherichia coli* dans l'eau de la Seine à La Bouille (moyennes annuelles).

Outre une contamination microbiologique, l'estuaire de la

Seine se caractérisait par une forte contamination métallique pour certains métaux comme l'argent, le cadmium et le plomb. Bien que les métaux soient souvent indispensables au métabolisme des être vivants (oligo-éléments), nombre d'entre eux sont toxiques lorsque leur concentration dépasse un seuil lui-même fonction de l'élément considéré. Ainsi, les métaux traces sont naturellement présents dans l'écosystème* en de très faibles quantités. Les utilisations anthropiques des métaux sont nombreuses et génèrent de nombreuses sources industrielles ou urbaines plus ou moins diffuses de contamination métallique. Les concentrations en métaux traces dans les années 1980 étaient très élevées aussi bien dans l'eau que dans les matières en suspension. Même après une forte décroissance des apports, suivie de celles des niveaux de contamination, l'estuaire se situait toujours au milieu des années 1990 parmi les estuaires les plus contaminés au monde (Chiffolleau 2001).

Comme dans le cas de la contamination métallique, les niveaux de contamination en composés organiques notamment en polychlorobiphényles (PCB), en pesticides organochlorés, en herbicides du groupe des triazines, en Hydrocarbures Aliphatiques Polycycliques (HAP) étaient élevés. L'évaluation de la contamination de l'estuaire en substances chimiques de synthèse a confirmé que la Seine est un des grands estuaires européens les plus contaminés, au même titre que l'Escaut ou le Rhin. Même si les niveaux de contamination présentent une tendance à la baisse, ils étaient au début des années 1990 encore trop élevés, ce qui imposait par exemple l'interdiction de la consommation de moules provenant de la proximité immédiate de l'estuaire. De plus, il a été montré que les PCB entrent dans le réseau trophique* par les particules détritiques ou phytoplanctoniques* et s'accumulent dans les espèces prédatrices comme le bar (Abarnou *et al.* 2000).

La qualité physico-chimique des eaux et celle des substrats et la morphologie des espaces sont déterminants pour expliquer la structure de l'édifice biologique en estuaire. Cependant, pour la Seine, il convient de distinguer l'estuaire amont où le déficit en oxygène a conduit à une réduction et une sélection de l'ichtyofaune* dans les zones anoxiques comme en aval de la ville de Rouen où seules subsistent des espèces ubiquistes tolérantes comme la carpe ou le gardon (Dauvin *et al.* 2002). La pauvreté des habitats* et des espèces benthiques* en aval de Rouen dans la zone canalisée était notable ; la faune était essentiellement composée d'espèces peu exigeantes en termes de qualité environnementale (oxygène dissous) comme les oligochètes (Tubificidae), les chironomides ou les sangsues, connus pour tolérer les environnements extrêmement dégradés et pollués. La faune est plus diversifiée en amont de Rouen en relation avec la diversité des habitats (Costil 1998). Dans l'estuaire moyen, la macrofaune* benthique subtidale* du chenal de navigation est très pauvre en raison des dragages ne permettant pas à une faune permanente de s'installer ; en revanche, dans cette zone et dans les secteurs les moins salés (< 18 ‰), le copépode planctonique *Eurytemora affinis* montre de très fortes abondances (> 1 million d'individus par m³) suggérant une utilisation privilégiée par cette espèce de la matière organique et du phytoplancton provenant essentiellement de la colonne d'eau. Plus en aval, dans le secteur marin, la macrofaune benthique est riche dans les

zones de sédiments sablo-vaseux et moindre dans les zones plus envasées et peu sensibles à la contamination du milieu (Dauvin *et al.* 2002). Il existe donc un paradoxe entre la richesse des premiers niveaux trophiques qui sont luxuriants et les niveaux trophiques supérieurs, en particulier les espèces de poissons et de crevettes d'intérêt commercial, qui sont peu abondants (Dauvin & Desroy 2005).

Les derniers aménagements préludes d'une reconquête attendue

Trois aménagements majeurs ont eu des conséquences importantes sur la qualité physico-chimique ou la géomorphologie de l'estuaire de la Seine depuis le début des années 1990 : la station d'épuration Emeraude, la construction du Pont de Normandie et la construction de Port 2000 et ses mesures d'accompagnement. La station d'épuration Emeraude d'une capacité de 550 000 équivalents habitant assure le traitement des eaux usées domestiques de 36 communes raccordées (33 de l'agglomération rouennaise, soit 350 000 habitants) dont Rouen, des eaux issues de certains sites industriels et des premières eaux de pluie. Située sur la commune de Petit-Quevilly, elle a été inaugurée en 1997 et construite pour répondre aux normes européennes les plus exigeantes en matière de qualité des eaux ; elle est gérée par la Direction Assainissement de la Communauté de l'Agglomération Rouennaise. La station Emeraude traite 85 000 m³.j⁻¹ ; les eaux usées font l'objet d'un dégrillage grossier, d'une décantation primaire, d'un traitement secondaire dont biologique : traitement du phosphore, dénitrification*, traitement de la pollution carbonée et nitrification*, traitement des boues puis de déshydratation et stockage avant incinération avec traitement de l'air dont la désodorisation. Dès sa mise en service, de nettes améliorations de la qualité biologique, chimique et microbiologique des eaux en aval de Rouen ont été observées.

C'est dès 1972 que la chambre de commerce et d'industrie du Havre proposa le projet du Pont de Normandie (Figure 3) permettant de passer l'estuaire de la Seine à 15 km en aval du Pont de Tancarville (Figure 4). Il fut inauguré le 20 janvier 1995 après sept ans de construction. À la date de son inauguration, il constituait le record du monde des ponts à haubans pour ne pas entraver la navigation ; il franchit d'un seul tenant les 856 m du chenal de navigation du Grand Port Maritime de Rouen. Les deux pylônes d'une hauteur équivalente à la Tour Montparnasse (214 m) sont les plus hautes tours de pont en béton précontraint du monde et pèsent chacune 2 000 t. Son tablier est à 52 m au-dessus des plus hautes eaux ; les pieux de fondation sont enfoncés à plus de 50 m. Sa longueur totale est de 2 141 m. Des mesures partielles de conservation des vasières ont été prises afin de compenser les dégâts commis par l'enrochement et le bétonnage nécessaire au passage du pont (Bessineton 1998), puisque l'option de pont sur pilotis sur toute la longueur du pont qui aurait permis la libre circulation des eaux sur la grande vasière Nord a été abandonnée au profit d'une route reposant sur une estacade imperméable à la circulation. Une vasière artificielle de 24 ha a été aménagée en amont du Pont de Normandie sur la rive droite de l'estuaire (Figure 3). Son suivi a montré que ce milieu était instable et

rapidement très productif, mais que sa pérennité n'était pas assurée du fait de la tendance à son comblement.



Figure 3. Le Pont de Normandie.



Figure 4. Le Pont de Tancarville.

Afin d'accueillir, opérer et alimenter les plus grands porte-conteneurs dans les meilleures conditions de compétitivité, le GPMH a lancé le projet Port 2000 qui consiste à développer un ensemble d'équipements portuaires destinés à traiter les plus grands porte-conteneurs des opérateurs afin d'améliorer la position de la France dans la logistique européenne. L'Etat a décidé, en date du 5 décembre 1998, de prendre en considération le projet, celui-ci étant un aménagement majeur pour l'économie française comme créateur d'emploi, tout en reconnaissant la nécessité de préserver l'intérêt écologique du site. L'importance de la recherche d'un équilibre entre les objectifs de développement économique liés au projet Port 2000 et la protection des milieux aquatiques marins et naturels par une gestion intégrée* exemplaire de l'estuaire a donc été clairement soulignée (voir le numéro 828 de la revue Travaux publié en 2006). Les nouvelles installations portuaires, au Sud des limites du port du Havre, se sont caractérisées par des aménagements en mer (fosse nord) et à terre (zone humide) touchant donc à la fois des habitats aquatiques marins et dulcicoles*. Les travaux de construction des infrastructures de Port 2000 ont démarré à l'automne 2001 et ont duré environ quatre ans. Les digues de Port 2000 sont constituées de deux types d'ouvrages : les digues extérieures (5 790 m) qui protègent le port des houles et des courants et une digue d'enclosure à l'intérieur du port (3 200 m) qui délimite les terre-pleins. Un nouveau chenal relie Port 2000 au chenal actuel du Port

du Havre. Le premier quai d'une longueur de 1 602 m a été terminé en 2004 ; les portiques ont été livrés fin 2005. Les premiers porte-conteneurs ont pu accoster au Terminal de France fin avril 2006 (Figure 5).

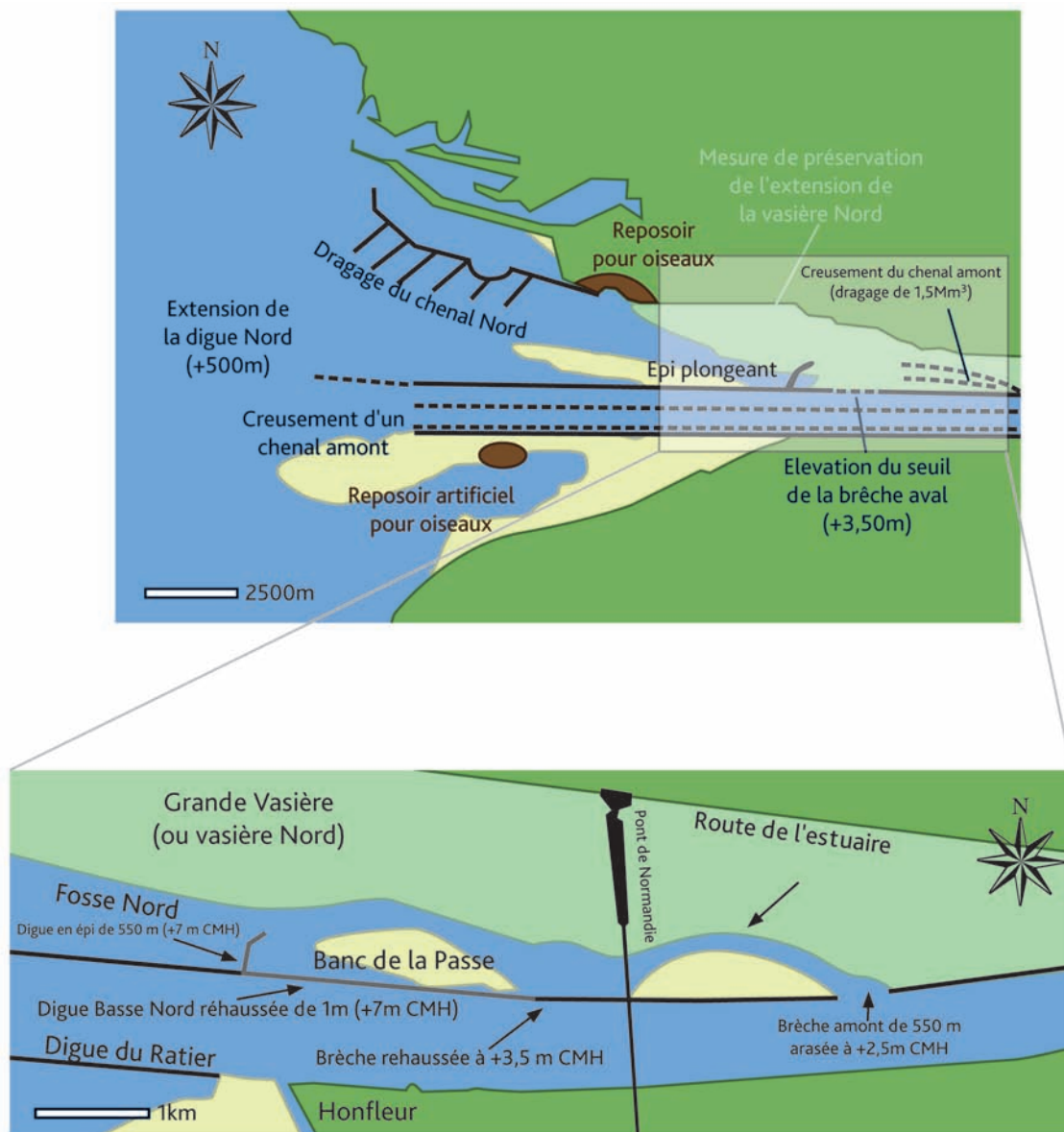


Figure 5. Le Terminal de France (Grand Port Maritime du Havre).

Afin de minimiser ou compenser l'impact écologique de Port 2000, a été constitué en février 1999, sous la présidence du Préfet de la région Haute-Normandie, un Comité d'experts scientifiques chargé de faire des propositions en termes de mesures d'accompagnement de Port 2000. En tenant compte des fonctionnalités estuariennes reconnues, différents scénarios d'évolution de la fosse nord suite aux aménagements ont été simulés ; ensuite, des recommandations pour une gestion globale de l'estuaire ont été proposées. Les mesures d'accompagnement destinées à minimiser l'impact hydro-sédimentaire et préserver durablement les vasières, notamment la grande vasière intertidale Nord ont été choisies après modélisation (Hamm & Viguier 1998 ; Hamm *et al.* 2001 ; Dauvin *et al.* 2006) (Figure 6). Elles ont consisté à ouvrir une nouvelle brèche en amont du Pont de Normandie et à aménager un chenal amont pour relier cette brèche à la fosse nord (Figure 6), à rehausser la brèche existant en 2001 à la cote +3,5m (cote marine du Havre) pour forcer le flot à emprunter le nouveau méandre, à construire un épi plongeant et rehausser localement la digue basse nord pour maintenir le banc de la passe et prolonger la digue basse nord vers le large (Figure 6), à draguer plus de 3,5 millions de tonnes en accompagnement des différents aménagements et à construire, à terre à l'est de Port 2000 un reposoir sur dune (Figure 7) et dans la fosse sud un îlot reposoir pour les oiseaux (Figure 8). Outre ces aménagements, les mesures d'accompagnement concernent l'évolution topographique et sédimentologique des plages du Calvados entre Honfleur et Deauville, des suivis au moins jusqu'en 2010 du benthos intertidal et subtidal, du suprabenthos, d'une espèce cible (la crevette grise), des suivis ornithologiques et halieutiques, ainsi qu'un suivi de l'activité de la flottille de pêche crevette et la mise en place d'un dispositif d'alerte Port 2000 chargé de détecter le plus tôt possible toute baisse éventuelle des apports liée à l'exécution de l'extension du port du Havre. A été mis en place parallèlement à ces deux dernières mesures concernant la pêche, un Observatoire des Pêches de la baie de Seine. Il s'agit donc de

tout un ensemble de suivis et d'observations concernant non seulement la fosse nord et la vasière nord mais toute la partie aval de l'estuaire voire la baie de Seine pour l'é-

conomie des pêches qui a été programmé pour étudier l'impact de Port 2000.



GIP Seine-Aval - 2009 - Source de données : Desroy et al. 2004; Cuvilliez d'après SOGREAH

Figure 6. Mesures d'accompagnement de Port 2000.



Figure 7. Le reposoir sur dune.



Figure 8. L'île aux oiseaux.

Chapitre 2. Etat du fonctionnement de l'estuaire de la Seine à la fin de Seine-Aval 3 (2007)

Circulation, morpho-dynamique et dynamique des particules fines

Avant Seine-Aval 3, seuls les apports du bassin versant amont de la Seine, évalués à Poses, étaient pris en considération dans les bilans et modélisations des transferts des apports continentaux dans l'estuaire. Mais avec plus de 12 000 km², le bassin versant situé à l'aval de Poses représente près de 20 % du bassin versant total de la Seine. Compte tenu du fait que les bilans de précipitations annuelles sont en moyenne plus élevés dans le bassin versant aval que dans le bassin versant amont, il est apparu nécessaire de prendre en considération ces apports latéraux en eau et de mesurer leurs fluctuations au minimum au cours d'un cycle hydrologique. Au Nord, les plateaux sont fortement disséqués par les huit affluents : Lézarde, Commerce, Sainte Gertrude, Rançon, Austreberthe, Cailly, Robec et Andelle. Ils présentent un manteau d'argile à silex peu épais, surmonté par une couverture de loess épaisse. Au Sud, les plateaux sont peu disséqués (seulement deux affluents : Risle et Eure) et présentent un manteau d'argiles à silex épais, recouvert par des loess peu épais. Les travaux menés ont montré que les apports en eau des affluents sont conséquents en période d'étiage* et peuvent alors représenter jusqu'à 30 % du débit à Poses. La contribution des eaux souterraines au débit de la Seine a été démontrée avec un apport significatif en périodes d'étiage et de marée basse. L'analyse spectrale* des chroniques de mesure sur les affluents de la Seine aval a permis de quantifier la réponse pulsionnelle aux épisodes pluvieux et de fournir les paramètres de modélisation des transferts.

L'étude de la couverture sédimentaire des fonds de l'estuaire de la Seine (Lesourd 2000) montre un fond de chenal constitué de cailloutis, graviers, sables et débris de tufs. Les vases y sont rarement observées en tant que dépôts à part entière. Néanmoins, elles sont présentes au niveau de la vasière nord située aux pieds du Pont de Normandie (la plus grande vasière de l'estuaire) et sur les rives de l'estuaire : la vase s'accumule le plus souvent sur les berges internes (convexes) des méandres, constituant de véritables vasières, comme par exemple à Oissel (plus grande vasière de l'estuaire amont), mais aussi près des berges non endiguées, comme par exemple à Jumièges. La surface des vasières intertidales internes à l'estuaire est au total en diminution suite à la succession des endiguements (Deloffre *et al.* 2006). A côté de cette constatation et à l'opposé, les études comparatives de la couverture sédimentaire des fonds subtidiaux de la baie de Seine sud-orientale ont montré une augmentation du taux d'envasement moyen à l'échelle des dernières décennies, avec des périodes d'accroissement marqué comme par exemple de 1995 et 2001, où le taux d'envasement est passé de 3 à 35 % (Figure 9).

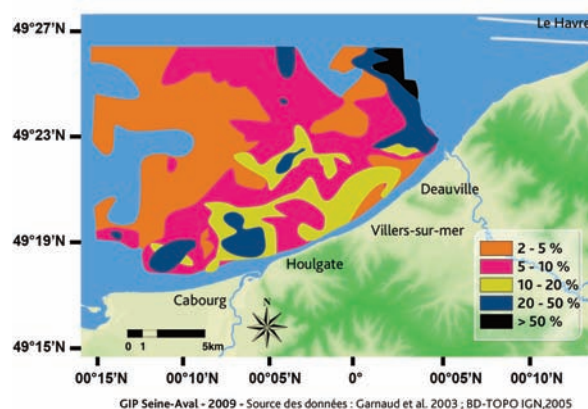


Figure 9. Teneur en particules fines (< 50 µm) de la couverture sédimentaire en 2000.

Dans le chenal nord, la quasi-permanence des dépôts vaseux observés depuis vingt ans a été largement perturbée par les travaux de Port 2000. Dans le chenal sud, la couverture sédimentaire varie beaucoup, marquée par des dépôts temporaires de vases, de sable homogène ou des mélanges sablo-vaseux. La zone de la Carosse est quant à elle une zone de décantation de sédiments fins, soumise à des phases de dépôt massif de vase en crue* (vase non bioturbée), suivie de phases de remaniement physique et biologique en étiage. Cette tendance à l'envasement se situe dans le prolongement d'une augmentation significative de l'envasement de la baie de Seine orientale depuis les études pionnières de la fin des années 1960. Au sein de cette tendance générale à l'envasement de cette zone, certaines périodes se détachent, comme la « crue estuarienne » de mars 1999, durant laquelle se sont mis en place, en quelques semaines, de vastes placages pluri-centimétriques de vase fluide en recouvrement de la couverture sédimentaire sableuse de la baie de Seine sud-orientale. Cette déstabilisation de matériel stocké au cours de plusieurs années de débits faibles (1995-1999) sans crues importantes est due à un effet de chasse avec la première crue importante (> 1 500 m³ s⁻¹).

Les études des sédiments envasés des plages ont permis de distinguer le matériel récent (vases des plages) du matériel fossile (Dubrulle *et al.* 2007). Aucune variation saisonnière, aucune variation géographique (Est-Ouest) et aucune distinction de constitution n'ont pu être faites entre le matériel récent et le matériel d'âge holocène affleurant en domaine subtidal ou sur certaines plages de l'Est du Calvados. Sur les plages de Cabourg et de Franceville (les plus éloignées de la Seine sur ce secteur), les éléments chimiques et les radionucléides tracent la même origine de matériel fin que ceux de l'embouchure de la Seine (Figure 10).



Figure 10. Dépôts de vase récente sur une plage du Calvados : plage de Blonville-sur-mer (février 2003).

Les particules fines constituent, on le sait, un élément clef dans l'estuaire. C'est pourquoi, dès le début de Seine-Aval, une modélisation mathématique des processus d'érosion, transport, dépôt et consolidation des sédiments vaseux a été entreprise à l'aide du modèle SiAM-3D par l'Ifremer. La capacité de ce modèle à reconstituer des fonds vaseux a d'abord été testée, partant d'un fond uniformément sableux. Ainsi la vasière nord se forme dès la première crue (le stock de vase est placé initialement dans le chenal de la Seine, en amont de Tancarville), tandis que le Port du Havre et son chenal d'accès piègent rapidement de la vase. Des « carottes numériques » montrent la capacité du modèle à simuler des litages fins de sable et de

Le modèle SiAM-3D

Le modèle SiAM-3D (Simulation d'Advection Multivariable tri-dimensionnel) est un code de calcul développé par l'Ifremer et utilisé pour les besoins de la recherche dans le cadre d'études sur le transport sédimentaire en estuaire de Seine (Figure A). Il est couplé à d'autres modules pour étudier également le cycle de l'oxygène et de la matière organique, et le cycle des contaminants chimiques. Le modèle SiAM-3D est développé depuis plusieurs années en suivant cinq étapes :

- 1/ le modèle hydrodynamique seul, qui permet de décrire la propagation de la marée dans l'estuaire, l'effet du vent et du mélange des eaux fluviales et des eaux marines.
- 2/ le modèle hydrosédimentaire, dans lequel ont été ajoutés les processus de chute/dépôt/érosion pour simuler le matériel particulaire vaseux qui constitue la masse du bouchon vaseux dans l'estuaire (Le Hir *et al.* 2001).
- 3/ le modèle de biogéochimie SiAM+RIVE, qui traite des cycles de la matière organique, des sels nutritifs, de la production primaire et de l'oxygène dissous (Even *et al.* 2006). Une version simplifiée qui ne tient compte que de la dynamique de la matière organique (SiAM+MOSES) a également été développée (Even *et al.* 2007).
- 4/ le modèle de contaminants SiAM+MET&OR, qui traite de la dynamique des contaminants chimiques en intégrant les processus, différents selon les contaminants, qui affectent leur comportement dans l'estuaire (Thouvenin *et al.* 2007).
- 5/ le modèle hydrosédimentaire sable+vase, qui traite du mélange des sables et des vases pour mieux décrire l'évolution morphologique de l'estuaire (Waeles *et al.* 2007).

L'échelle de temps est l'année pour les quatre premières étapes et elle est pluriannuelle pour la dernière afin de tenir compte de l'évolution bathymétrique de l'estuaire en fonction des dépôts et des érosions de sable.

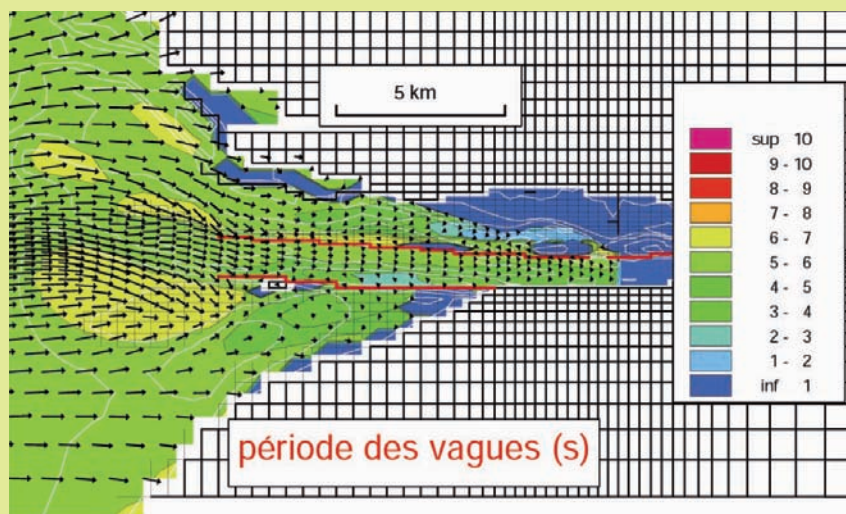


Figure A. Simulation des vagues à l'embouchure de la Seine avec le modèle SiAM-3D (Le Hir *et al.*).

La société Prolexia a développé un outil, SimuSA, qui vise à rendre accessible à un plus grand nombre le modèle SiAM. C'est une version simplifiée de SiAM-3D, ne comprenant qu'une partie des fonctionnalités du modèle, qui est intégrée dans cette interface qui est avant tout un outil pédagogique, afin de simplifier son utilisation par des non initiés.

vase qui se produisent au gré des variations de forçage. Les évolutions morphologiques simulées sur un an atteignent 1 m : un envasement significatif du Port du Havre est reproduit, ainsi qu'un ensablement du chenal d'accès à Rouen en amont du Pont de Normandie, zones qui font toutes deux l'objet actuellement de dragages intensifs. De même, une sédimentation est simulée à l'engainement*, où des dragages d'entretien sont également pratiqués. Le modèle prédit une évolution notable du banc d'Amfard, avec une érosion de son flanc Sud-Ouest et une accrétion au Nord-Est. Ce modèle morphodynamique de l'embouchure a permis de hiérarchiser les facteurs responsables du bouchon vaseux (GIP Seine-Aval 2004) : le pompage tidal* en détermine le positionnement, tandis que la position de la zone de neutralisation des courants de densité près du fond en détermine le maintien et l'extension (Figure 11). Ce modèle a été appliqué pour rechercher l'impact de certains aménagements du chenal Nord sur le bouchon vaseux et les dépôts de vase, en liaison avec le projet Port 2000.

Le système du bouchon vaseux

La déformation de l'onde de marée est à l'origine de l'accumulation de matériel sédimentaire fin désigné par le terme de « bouchon vaseux ». Il inclut les échanges entre la zone du maximum de turbidité (ZMT) du chenal et les zones de dépôt de particules fines adjacentes, les vasières (Figure B).

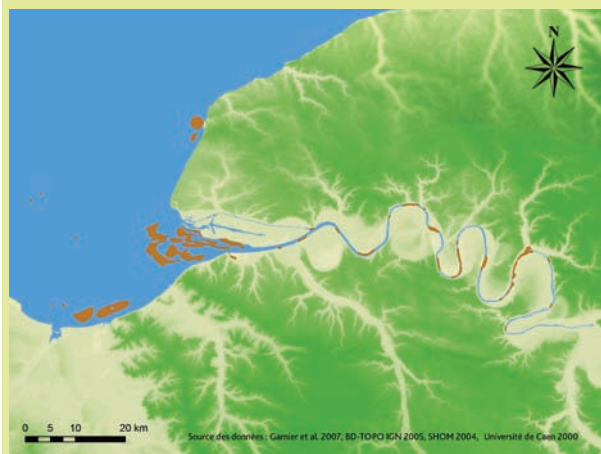
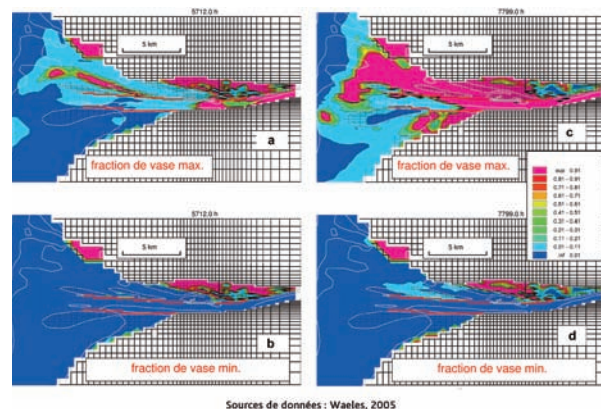


Figure B. Localisation des dépôts vaseux.

Le bouchon vaseux est caractérisé par des concentrations en matières en suspension (MES) supérieures à 150 mg.l^{-1} en surface. Il est favorisé par les courants de densité. Son positionnement varie en fonction du débit de la Seine. La ZMT va de Caudebec à Honfleur, voire Tancarville en été (250 millions de m^3 répartis sur $31,5 \text{ km}^2$) et de Caudebec à la limite aval de l'engainement lors des crues hivernales (530 millions de m^3 répartis sur 73 km^2).

Ce stock de matériel vaseux explique les fortes turbidités rencontrées en milieu estuarien, de 100 à 500 fois supérieures à celles trouvables dans le fleuve ou en baie de Seine. Les flux de matières organiques (MO) qui entrent dans la ZMT, à Caudebec, sont 3-4 fois plus élevés à fort débit (2001 : 280 t.j^{-1}) qu'à faible débit (2003 : 73 t.j^{-1}). Le stock de MO s'accumule dans le chenal à bas débit durant la « période de maturation » du bouchon vaseux. La MO dissoute traverse le bouchon vaseux et le gradient de



Sources de données : Waelles, 2005

Figure 11. Valeurs max. et min., pendant une période de marée, de la fraction massique de vase dans les 2 mm de sédiment superficiel pour des conditions de marée de vive eau (~coef. 100). a) et b) : en période d'étiage, c) et d) : en période de crue.

salinité quasiment inchangée. En revanche, la fraction biodégradable de la MO particulaire diminue dans la ZMT à cause d'une activité bactérienne hétérotrophe importante (Servais *et al.* 2006). En effet, elle passe d'au moins 20 % à l'entrée du bouchon vaseux (parfois plus de 50 % en période de bloom phytoplanctonique), à 10 % à la sortie (25% lors d'un bloom). Le métabolisme du carbone dans la ZMT est fortement contrôlé par la MO apportée de l'amont, tout comme dans d'autres estuaires macrotidaux. Mais contrairement à ce qui est observé dans d'autres estuaires, les sources de carbone sont ici plus liées aux effluents domestiques et à l'eutrophisation dans la rivière, qu'à l'érosion (Meybeck *et al.* 2003). L'activité microbienne est de 20 à 50 fois supérieure dans la ZMT (28 à 35 tC.j^{-1}) que dans les vasières ($0,9$ à $1,5 \text{ tC.j}^{-1}$). La MO qui s'accumule dans le bouchon vaseux alimente les chaînes trophiques supérieures faisant de l'estuaire de Seine un système productif. La production secondaire est en effet du même ordre de grandeur que la production primaire et microbienne : environ 26 tC.j^{-1} (Rybarczyk *et al.* 2003).

Les vasières jouent aussi un rôle important de source et de puits de bactéries et dans le stockage et le relargage des contaminants associés aux particules fines, dont les HAP. Elles sont soumises aux dépôts de particules venant du fleuve et/ou du compartiment atmosphérique et, lors des processus érosifs, les particules contaminées par les HAP sont remises en suspension dans l'estuaire. La vasière de Oissel, qui se situe dans une zone fortement industrialisée mais qui est aussi la plus grande vasière de la partie amont de l'estuaire de Seine, présente des teneurs en HAP très élevées (entre $3,9$ et $10,9 \text{ mg.g}^{-1}$ de sédiment sec). Ces composés (principalement du fluoranthène, du pyrène, du chrysène et de l'anthracène) s'y dégradent peu, mais le transit est important (entre $2,4$ et 64 kg.j^{-1} selon le débit). La vasière Nord, la plus grande vasière de l'estuaire, beaucoup plus bioperturbée, est moins fortement contaminée (entre $1,3$ et $3,3 \text{ mg.g}^{-1}$ de sédiment sec), mais les concentrations sont suffisamment importantes pour être supérieures au PNEC proposé par l'INERIS (mêmes composés qu'à Oissel hormis l'anthracène qui n'y est pas détecté).

Les modélisateurs ont également cherché à décrire la construction récente du prisme d'embouchure. Ce travail de synthèse sur l'architecture (sismique) et la nature sédimentaire (carottage) montre que le prisme d'embouchure peut être divisé en deux principaux secteurs (Figure 12) : le secteur sud datant de plusieurs milliers d'années et dû au comblement transgressif, plus ou moins régulier, d'un système adjacent à l'incision estuarienne principale, et le secteur centre-nord, situé à l'aplomb de l'incision majeure de la Seine et se caractérisant par un remplissage sédimentaire dont l'essentiel de l'épaisseur prospectée, correspond à l'histoire très récente du prisme (derniers siècles à dernières décennies).

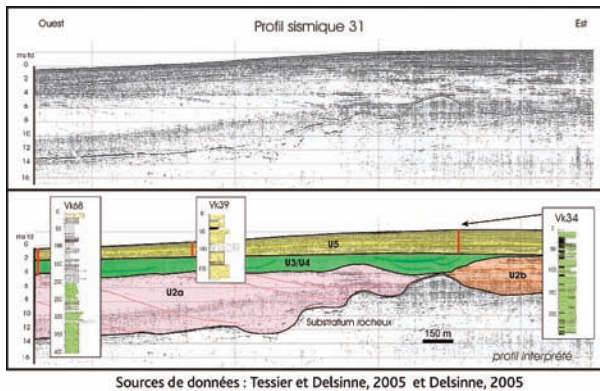


Figure 12. Architecture sismique et sédimentaire du prisme d'embouchure.

Cette double modélisation a servi à étudier la progradation* de l'estuaire vers le large qui est constatée depuis les années 1960 mais a aussi permis de proposer des stratégies de dragages les moins perturbantes possibles pour l'environnement marin. Elle pourrait également servir à étudier l'impact qu'aurait une élévation du niveau de la mer ou certains aménagements sur les évolutions morphologiques de l'estuaire.

Le projet MEDIUM (étude du MElange et de la Dispersion des sédiments par l'Utilisation de Marqueurs particuliers) a permis de déterminer les sources des particules fines superficielles circulant dans la baie et l'estuaire de la Seine. La teneur en pélites (particules de taille inférieure à 50 microns) varie en surface de 5 à 75 % sur le banc du Ratier (au niveau de la Vasière Nord) et dépasse les 75 % à l'entrée du port du Havre et au Nord du banc d'Amfard (Lesueur *et al.* 1999 ; Lesourd 2000). Le cortège minéralogique argileux est composé dans l'ensemble de l'estuaire de la Seine de 50 % de smectite, 15 à 20 % d'illite, 25 à 30 % de kaolinite et 5 % de minéraux interstratifiés. Des variations existent toutefois à l'échelle plus locale dans le système.

Le domaine marin a été caractérisé par des radionucléides originaires de l'usine de retraitement des déchets radioactifs de La Hague, tandis que le domaine fluviatile a été caractérisé par des éléments majeurs-mineurs-traces (dont Sb, Pb, Bi, Cd, Zn, Cu et Sn) et les sédiments fossiles (d'âges mésozoïque et cénozoïque) par leur contenu en argiles et certains éléments chimiques (As). Chaque marqueur particulier choisi apporte un renseignement sur l'origine des sédiments fins dans le système estuarien de la Seine. L'investigation des fonds et du littoral de la baie de Seine montre que la zone de

mélange va de la longitude de Courseulles-sur-Mer et de la latitude du Cap d'Antifer jusqu'à la Bouille. Les marquages de sédiment fin montrent que la sédimentation fine actuelle dans le continuum Seine-baie de Seine est le résultat d'un mélange de matériel originaire de quatre pôles (Figure 13) (Dubrulle-Brunaud 2007) : une source marine (la Manche), une source fluviatile (principalement la Seine), une source fossile d'extension limitée (les falaises jurassiques du Calvados et les falaises crétacées de Haute-Normandie) et une source complexe estuarienne (l'estuaire de la Seine).

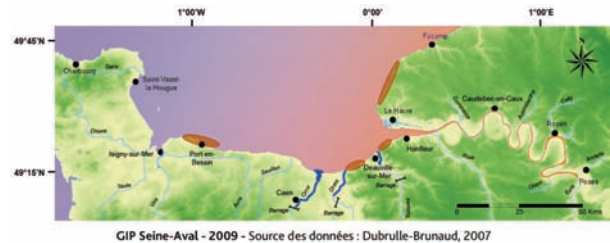


Figure 13. Représentation schématique du mélange des sédiments fins (Dubrulle-Brunaud *et al.* 2008) d'origine fluviatile (rouge), marine (bleu) et fossile (marron).

Le rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ a été utilisé comme indicateur de la source marine dans les stocks sédimentaires. La pénétration des particules fines d'origine marine est ainsi détectée jusqu'à l'île Lacroix, à 120 km à l'intérieur de l'estuaire de la Seine (Figure 14) (Guézennec *et al.* 1999 ; Boust *et al.* 2002).

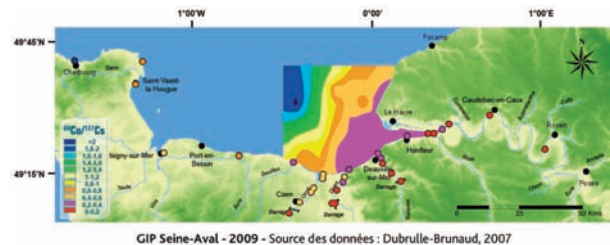


Figure 14. Rapport $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments superficiels.

Les éléments majeurs-mineurs-traces ont été utilisés comme marqueurs du domaine fluviatile global, et de la Seine en particulier. Les dosages effectués dans les sédiments ont montré que tous les estuaires, celui de la Seine en particulier, contribuent à l'apport en matériel fin en baie de Seine. Les flux de particules fines apportées depuis le bassin versant vers l'estuaire de la Seine représentent environ 5 % des quantités de matières en suspension (MES) transitant au niveau du barrage de Poses.

La source fossile est issue de l'érosion des falaises du littoral, surtout bas-normand d'âge mésozoïque-cénozoïque, et de l'érosion des fonds fossiles tardi-holocènes qui affleurent dans les petits fonds de la baie de Seine et au plafond du chenal de l'estuaire de la Seine. Le matériel fossile est surtout apporté au système de manière très locale et très ponctuelle, notamment lors de périodes de tempêtes et de fortes pluies (ravinement des falaises argileuses).

La source estuarienne correspond à un stock sédimentaire plus ou moins âgé (de quelques jours à plusieurs années) qui peut former des placages d'étendues variables dans la baie de Seine. Ces placages sont remis en suspension, remaniés par les courants de marée et de houle et réintègrent le système en fonction des conditions hydrodynamiques*, mais également hydrologiques de la Seine. Ce stock, résultant du remaniement de sédiments plus anciens, est impossible à quantifier du fait de ses variations temporelles et parce qu'il est composé du mélange complexe des trois stocks précédents. A ce modèle à quatre pôles se surimpose une combinaison de contributions de sources secondaires plus ou moins importantes et localisées géographiquement et dans le temps (les estuaires bas-normands, par exemple). Toute évaluation faite, les stocks marin, fluvial et fossile n'expliquent au maximum que 80 % de la sédimentation fine actuelle.

Un modèle conceptuel de représentation des contributions de chacune des sources, valable à l'échelle de temps de quelques décennies et une autre plus courte, pendant laquelle l'une des sources peut être amplifiée (tempête, saison), a été proposé.

Les analyses géochimiques montrent que les apports de métaux associés aux sédiments fins vers la baie de Seine proviennent pour une grande part de la région industrielle de Rouen et pour une moindre part de la Seine fluviale en amont de Poses (Dubrulle-Brunaud *et al.* 2008). Elles indiquent aussi que le prisme d'embouchure a tendance à avoir un caractère de plus en plus marin depuis les années 1980.

Les apports latéraux des affluents intra-estuariens de la Seine doivent être pris en compte dans le bilan global du système. L'apport annuel en MES de la Risle, par exemple, correspond à 5 % du flux mesuré à Poses (32 000 t pour 650 000 t), alors que son bassin versant ne représente que 3 % du bassin versant amont de la Seine. Actuellement, les scientifiques ne disposent pas de mesures équivalentes pour le plus grand affluent du bassin aval, l'Eure, qui représente à lui seul pourtant environ 50% des apports en eau des affluents du bassin aval.

Les sédiments fins, déposés ou en suspension, constituent un support privilégié et hautement réactif pour la matière organique et les contaminants chimiques et microbiens. Il était donc important de préciser le rôle des vasières en termes de fonctions d'épuration et de transformation (contaminants chimiques, sels nutritifs) et de fonctions écologiques (nourricerie, abondance de faune et de flore benthiques). L'étude simultanée des processus sédimentaires, chimiques et biologiques au cours du projet DYVA (Dynamique du fonctionnement des Vasières) a permis de comprendre les mécanismes diagénétiques* de la vasière intertidale d'Oissel, de la vasière Nord et d'une vasière subtidale de l'embouchure face au Banc du Ratier. La sédimentation sur la vasière d'Oissel est contrôlée par le débit fluvial (Deloffre *et al.* 2005). Il existe en effet une phase de recouvrement continu de la vasière en période de crue amenant des dépôts prolongés de plusieurs centimètres, et une phase d'émersion de la vasière en période d'étiage conduisant à son érosion et son tassement (Fi-

gure 15). La vase est peu structurée, grumeleuse. La bioturbation* par les oligochètes est significative. La base des carottes de sédiment, qui est antérieure au dépôt de l'année, est systématiquement enrichie en métaux lourds (Cd, Hg, Pb, Zn) souvent sous forme biodisponible. L'analyse des sulfures montre que leur recyclage est très actif. La modulation saisonnière de la diagenèse semble fortement liée aux variations de température (Leloup *et al.* 2005), qui apparaissent alors comme le paramètre forçant, avec le taux de sulfates, dans cette zone amont.



Figure 15. Opération DYVA, sédimentation sur la vasière de Oissel.

Les enregistrements altimétriques en une station visitée au long d'une année sur la vasière Nord ont mis en évidence des variations annuelles de l'ordre de 15 cm mais sans changement résiduel net. Les dépôts se produiraient préférentiellement en vive eau pour un débit de la Seine faible à moyen, lorsque le bouchon vaseux est localisé dans la zone de la vasière, tandis que les érosions seraient principalement provoquées par les tempêtes. Mais des mesures effectuées en des secteurs voisins révèlent la non uniformité des processus à l'échelle de la vasière, ce que retrouve qualitativement le modèle de transport des vases en érodant en vive eau le bas estran pour alimenter les secteurs plus élevés. Ces vasières sont soumises à des cycles érosion-tassement / dépôt. Les événements sont brusques, en pulses contraints par les cycles de marée et les débits, en relation avec la dynamique du bouchon vaseux (Figure 16).

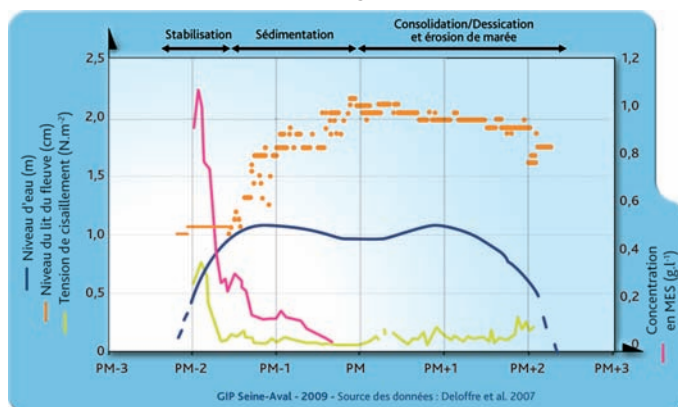


Figure 16. Dynamique des érosions et des sédimentations à l'échelle de la marée sur la vasière Nord le 15 mai 2003.

Une forte activité photosynthétique* (microphytobenthos*) a été mesurée en fin de printemps sur la vasière Nord, ainsi que des variations de la respiration témoignant d'une forte activité hétérotrophe* de la vasière. Les marqueurs de l'état d'oxydo-réduction* du sédiment (profils d'oxygène, pH, redox) montrent que le sédiment est davantage réduit en été qu'en hiver : dégradation de matière organique autochtone* issue de la production primaire ou allochtone* (matériel sédimentaire du bouchon vaseux, du chenal, du bassin versant...). Le matériel sédimentaire frais semble relativement et rapidement colonisé ou propice au développement des microorganismes sulfurogènes. Tous les éléments acquis dans DYVA montrent une diagenèse de fonctionnement classique, contrôlée par des contraintes saisonnières et par les conditions hydrosédimentaires estuariennes.

La validation du modèle unidimensionnel vertical SiAM-1DV, mis au point lors des phases précédentes de Seine-Aval, a été poursuivie dans le cadre du projet MEDIANs (Modélisation de l'Evolution DIAGénétique des vasières en régime Non Stationnaire ; c'est-à-dire tenant compte des variations du débit du fleuve). Sur la base de ce modèle, il semble que la bioturbation n'ait qu'un impact modeste sur la diagenèse précoce dans les sédiments superficiels. Le coefficient de bioturbation est faible sur la vasière Nord puisqu'il y a peu de macrofaune. En revanche, le cycle du fer est fortement influencé par l'activité de bioturbation alors que les profils d'oxygène et des composés azotés montrent peu de variations. La dynamique dépôt-érosion prédomine donc. Plus en profondeur, les activités de biodiffusion ont des répercussions très nettes sur l'intensité du transfert vertical de la matière organique. De la matière organique globalement plus labile est apportée plus en profondeur. La salinité détermine la quantité de sulfates présente dans la colonne d'eau. La paramétrisation des réactions primaires et secondaires a été considérablement améliorée et a conduit à un schéma de fonctionnement diagénétique, à des profils des variables dissoutes et particulières, et à des flux d'échange de matière conformes aux observations. Les bilans d'échange de matière résultant des cinq réactions primaires de dégradation de la matière organique et des huit réactions secondaires (Oxydation* de Fe^{2+} par O_2 , Oxydation de Mn^{2+} par O_2 , Oxydation de H_2S par O_2 , Nitrification, Oxydation de Fe^{2+} par MnO_2 , Réduction* de MnO_2 par H_2S , Oxydation de H_2S par $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Précipitation dissolution de FeS) ont permis d'identifier la contribution de chaque réaction à la valeur finale portée sur les profils. La respiration aérobie est le processus dominant de dégradation de la MOP* dans le premier centimètre. Elle est relayée par la dénitrification, dont l'efficacité est bien moindre mais qui s'étend un peu plus en profondeur (environ 4 cm). La réduction du MnO_2 joue un rôle plus modeste et limité en profondeur. La réduction de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ est également modeste mais intéresse la majeure partie de la colonne sédimentaire (15 cm) générée au cours de la simulation. La sulfato-réduction apparaît comme la réaction prépondérante responsable de la dégradation de la MOP notamment en profondeur. Les flux générés par le modèle sont compatibles avec les profils de NH_4 et les taux de sulfato-réduction mesurés au cours des campagnes DYVA. Les taux de dénitrification sont conformes à ceux publiés dans d'autres sites intertidaux (entre 0,2 et 0,7 nmole.m⁻².j⁻¹).

Qualité chimique de l'environnement estuarien : état de contamination des habitats et des organismes

Les sources de contamination de l'estuaire par des substances chimiques peuvent être directes (apports fluviaux, apports marins, apports intra-estuariens, apports atmosphériques) ou indirectes (produits dans le système par des processus de transformation, dépôts de dragage). Les recherches menées sur le cycle des contaminants (évaluation de leur concentration, de leur devenir, de leur possible accumulation et de leurs flux à travers les différents réservoirs biogéochimiques présents dans le système) visent à déterminer leurs effets potentiels sur les écosystèmes et les organismes marins.

Au cours de Seine-Aval 1, la contamination chimique dans l'estuaire de la Seine avait été identifiée à travers la mesure d'un grand nombre de contaminants organiques et inorganiques. Les travaux se sont poursuivis pendant les phases 2 et 3 tant du point de vue de l'identification des substances chimiques, de la caractérisation des sources, que de l'étude de leur devenir (en passant par la spéciation et la connaissance du transport et des flux exportés vers la mer). Le choix des contaminants chimiques étudiés a été guidé soit par leur appartenance à la liste de la Directive Cadre sur l'Eau (Cd, Pb, Hg, Ni, HAP, TBT*), soit du fait de leur fortes concentrations rencontrées dans les organismes vivants de l'estuaire et de la baie de Seine (Ag, PCB), soit à titre exploratoire dans un but de comparaison et/ou de modélisation par rapport aux contaminants déjà documentés comme les PCB ou les HAP. Outre les principaux contaminants (HAP, PCB, métaux lourds, dioxines...), des substances telles que divers médicaments ainsi que de nombreux produits détergents se retrouvent aussi dans l'environnement. Ces différentes molécules, qui sont susceptibles d'avoir de graves effets toxiques, sont consommées en grande quantité dans notre société et rejetées *in fine* de façon diffuse dans le milieu aquatique via les STEP* où leur destruction est incomplète. Seine-Aval 3 a été l'occasion d'étudier pour la première fois la contamination de l'estuaire de la Seine par ces substances pharmaceutiques et par les agents nettoyants non ioniques que sont les AP (alkylphénol-polyéthoxylates) et qui sont appelés les contaminants émergents. Une analyse du risque* environnemental a été conduite de manière rétrospective par l'Ifremer dans le compartiment sédimentaire et dans le compartiment aqueux sur plusieurs contaminants prioritaires présents dans l'estuaire de la Seine : herbicides, métaux et HAP. Cette analyse de risque a été conduite en suivant la méthodologie européenne du Technical Guidance Document (TGD) et en utilisant les mesures (PEC) enregistrées par le passé en estuaire de la Seine. Un prototype d'analyse de risque (SARisque) qui analyse les PEC en fonction des PNEC (concentrations sans effet prévisible) a été développé à partir de SimuSA. Les travaux ont permis de valider le modèle hydrodynamique SiAM-3D comme outil de mesure de la dispersion des contaminants hydrophiles* dans l'estuaire de la Seine et ont montré la faisabilité de l'analyse du risque environnemental sur les substances hydrophiles. En revanche, la procédure du TGD nécessiterait d'acquies de nouvelles données d'écotoxicité pour les substances hydrophobes* adaptées aux espèces

endémiques de l'estuaire de Seine afin de disposer de PNEC locales issues d'un même compartiment que les PEC (Guérit *et al.* 2008).

Parallèlement, des travaux relatifs à l'identification et/ou à la mesure de biomarqueurs* en tant qu'indicateurs des effets biologiques des contaminants présents en Seine ont été entrepris (Minier *et al.* 1998 ; Minier *et al.* 2006 ; Masson *et al.* 2007). Deux espèces de bivalves, l'une représentative de l'estuaire dulcicole (la dreissène *Dreissena polymorpha* ; Figure 17A) et l'autre inféodée au milieu marin (la moule bleue *Mytilus edulis* ; Figure 17B), et une espèce de copépode estuarien (*Eurytemora affinis* ; Figure 17C) ont servi de modèle biologique pour ces études. Des études ont également été menées chez l'un des poissons les plus communs de la partie marine de l'estuaire et dont les juvéniles remontent dans la partie fluviale jusqu'au barrage de Poses : le flet *Platichthys flesus* (Figure 17D). Cette approche multimarqueurs, développée dans le cadre de Seine-Aval, apporte une méthodologie nouvelle de diagnostic du milieu estuarien mais reste à mettre en œuvre dans le cadre d'une comparaison inter-sites.

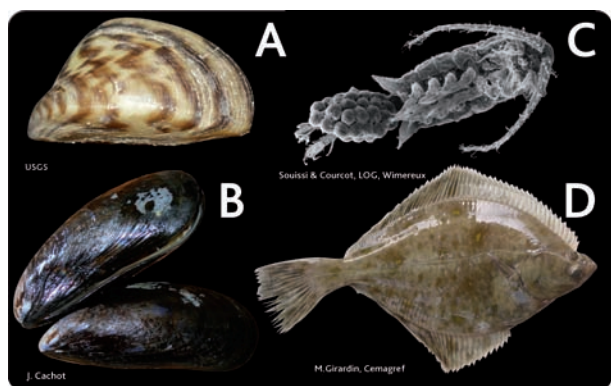


Figure 17. Les modèles biologiques utilisés pour l'étude de la contamination chimique : *Dreissena polymorpha* (A), *Mytilus edulis* (B), *Eurytemora affinis* (C) et *Platichthys flesus* (D).

Toutes ces connaissances ont permis au GIP Seine-Aval de réaliser en 2007, sous le pilotage du Pôle Environnement et Développement Durable de Haute-Normandie, une synthèse sur les risques liés à la contamination chimique de l'estuaire de Seine (Lachambre & Fisson 2007). Deux atlas ont été réalisés : l'un présentant les schémas bilans des sources et l'autre les cartes de contamination pour chacune des substances étudiées. Neuf métaux (argent, arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc), neuf hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP : Ace, Ant, BaP, BbF, BghiP, BkF, Flu, IcdP et Naph), sept polychlorobiphényles (PCB : composés 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180), trois diphenyléthers bromés (PBDE : penta, octo et decaDBE), douze pesticides (aldrine, atrazine, dieldrine, DDT, diuron, endosulfan, endrine, HCB, HCH, isodrine, isoproturon et simazine), trois organoétains (TBT, DBT et MBT), trois phtalates (DEHP, DEP, DBP), deux sous familles d'alkylphénols (nonylphénols et octylphénols) et quelques substances pharmaceutiques (dont des hormones stéroïdiennes) ont ainsi été étudiés. La plupart de ces substances ne peuvent être que d'origine anthropique. Seuls les métaux et les HAP peuvent avoir une origine naturelle.

Les métaux

En ce qui concerne les métaux, l'accent a été mis sur l'argent pour deux raisons. D'une part, sa concentration sous forme particulaire à Poses variait sans que l'on puisse l'expliquer. D'autre part, sa concentration sous forme dissoute est encore très élevée à de grandes distances de l'estuaire. Les travaux menés ont montré que la MO* fluviale ne fixe pas l'Ag et qu'un enlèvement de l'Ag dissous est observé en milieu non salé par adsorption sur les MES dès que la turbidité devient importante. Une solubilisation de l'Ag est observée en milieu salé, probablement due à la formation de complexes dissous. Plus au large, sur la zone proche de l'influence du panache de la Seine et des rejets de dragage, la distribution des concentrations en Ag, mais aussi en Cd, Pb, Hg et Cr, a été étudiée dans deux espèces d'invertébrés d'intérêt commercial : le bulot et la coquille St Jacques (Metian *et al.* 2008). Les concentrations en Cr, Hg et Pb sont relativement faibles ; en revanche, les concentrations en Cd et Ag sont élevées chez les deux espèces avec une forte variabilité géographique. Les fortes concentrations en Ag et en Cd trouvées dans les tissus des coquilles St Jacques reflètent leur statut d'hyper bioaccumulateur. Mais les concentrations les plus importantes sont relevées dans la poche noire, qui n'est pas consommée. Un modèle de bioaccumulation dynamique a été construit par les équipes du CRELA, de l'AIEA et d'IsoMer à partir d'expériences de radio traçage. Il montre la prépondérance de la voie alimentaire pour la contamination par le Cd (84 %) et le Hg (65 %) mais aussi pour l'Ag avec certaines sources de nourriture. La principale voie d'accumulation de l'Ag est la voie dissoute. Pour le Pb, la principale voie d'accumulation est la voie sédimentaire (64 à 90 %). L'importante hétérogénéité des concentrations dans les tissus de stockage (glande digestive) et d'incorporation (branchies) a été démontrée. L'incorporation des métaux semble être principalement due à la voie trophique chez les coquilles St Jacques. Mais les événements paroxysmiques de type crues ou tempêtes peuvent entraîner une accumulation accrue mais ponctuelle de certains métaux par voie dissoute comme l'Ag. Dans les bulots, les concentrations en Ag et Cd sont très dépendantes de la taille des individus. L'analyse de risque a révélé un risque induit par le Cd en phase dissoute dès la mise en place du suivi en 1976 jusqu'au début des années 1990 sur les sites de Honfleur et La Bouille ainsi que par le Ni en phase dissoute sur Honfleur, La Bouille et Poses sur l'ensemble des données récoltées (période 1976 – 2005). Aucun risque n'a été mis en évidence pour l'exposition liée au Pb en phase aqueuse. Les concentrations totales des métaux mesurées dans la noix et le corail des coquilles St Jacques sont inférieures aux normes européennes qui sont de 5, 2,5 et 7,5 mg.kg⁻¹ PF* pour le Cd, le Hg et le Pb, respectivement. Des expériences de digestion *in vitro* ont été menées pour estimer la biodisponibilité* des métaux dans les aliments ingérés par le consommateur. Les faibles concentrations de métaux mesurées dans la noix et le corail des coquilles St Jacques d'une part (Tableau 1), et la fraction biodisponible généralement réduite des différents métaux dans ces tissus (exception : le Cd dans le corail) d'autre part, suggèrent que le risque toxique est relativement faible pour les consommateurs, même dans le cas où les coquillages seraient consommés de manière très régulière. Les quantités de chair comestible nécessaires pour atteindre la

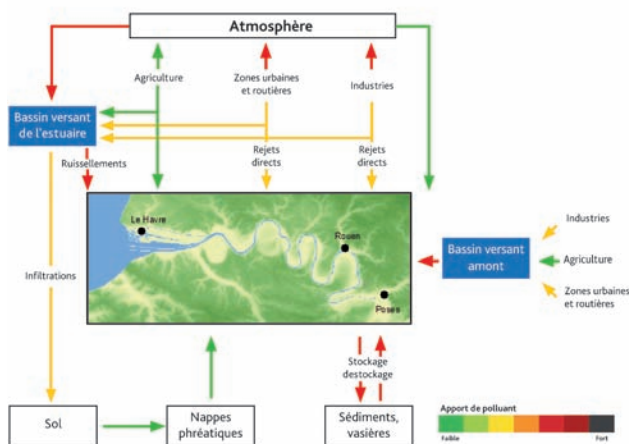
Dose Hebdomadaire Tolérable sont en effet toutes supérieures à 3 kg par semaine pour un Homme de 70 kg.

Tableau 1. Concentration et biodisponibilité de métaux dans les tissus de coquille St-Jacques consommés par l'Homme (Bustamante et al. 2007).

Métaux	Tissu	Concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ PS)	Biodisponibilité
Ag	Noix	0,02 à 0,10	12 à 19 %
	Corail	0,35 à 1,80	11 à 34 %
Cd	Noix	0,48 à 1,08	9 à 25 %
	Corail	0,24 à 1,12	57 à 88 %
Pb	Noix	0,02 à 0,15	9 à 60 %

Les HAP

Pour doser les métabolites des HAP chez les organismes marins, il a fallu développer de nouveaux protocoles. Cela s'est fait avec succès chez le flet. Ces travaux ont montré que la concentration de ces métabolites suivait celle de la contamination du milieu (Figure 18) et qu'elle reflétait le type de contamination.



GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : Lachambre et Fisson, 2007

Figure 18. Bilan annuel des sources et des flux de HAP arrivant dans l'estuaire de Seine.

L'estimation du risque lié aux HAP n'a pu aboutir car les calculs menés selon la procédure du TGD n'ont pu être validés par les mesures *in situ*. Néanmoins, une évaluation des effets biologiques d'un mélange de HAP dans le sédiment résultants d'une exposition chronique expérimentale a été réalisée par le LEMA (Université du Havre) sur un poisson modèle, le medaka japonais *Oryzias latipes* (Figure 19).



Figure 19. *Oryzias latipes*.

L'extrait organique de sédiment aux concentrations environnementales augmente significativement la mortalité et les mutations induites chez les juvéniles et augmente sensiblement la mortalité des embryons ainsi que l'incidence des malformations squelettiques (Cachot et al. 2006). Mais il n'entraîne pas ou peu d'effets biologiques délétères en termes de mortalité et de dommages génétiques si l'exposition intervient au stade juvénile ou au stade adulte. Ce même extrait organique, à une concentration deux fois supérieure, augmente significativement la mortalité embryonnaire et post-embryonnaire, la durée de développement embryonnaire et le taux de mutations dans le foie des juvéniles. Le transfert trophique de ces HAP a été étudié au moyen d'une chaîne trophique simplifiée reconstituée en laboratoire et comprenant des microcrustacés *Artemia salina* (contaminés par différentes doses de B[a]P ou d'extrait organique de sédiment de Seine prélevé à Oissel, tous deux cancérigènes pour les poissons) qui ne sont pas présents en Seine mais qui s'élèvent facilement, et le medaka japonais. Les nauplii d'artémies exposés au B[a]P en accumulent des quantités très élevées : plus de $250 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ PS. Les doses mesurées dans les medakas sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les artémies. Il n'y a donc pas de biomagnification. A titre de comparaison, les concentrations en HAP totaux dans la partie aval de l'estuaire de Seine s'échelonnent de 2 à $4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ pour la matière particulaire et de moins de 1 à $4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ pour le microcrustacé *Eurytemora affinis* (Cailleaud et al. 2007) qui, lui, est présent en Seine. Les traitements aux doses les plus élevées, qui conduisent au développement de tumeurs bénignes et malignes à des fréquences élevées (jusqu'à 22% de poissons atteints), ne correspondent donc pas aux concentrations environnementales. Les niveaux de HAP relevés dans les tissus de medaka sont faibles voire nuls à ces concentrations. Mais il y a un risque écologique de toxicité réel associé à ces HAP présents dans les sédiments de l'estuaire de Seine vis-à-vis notamment des espèces piscicoles dont tout ou partie du développement embryonnaire se déroule au contact du sédiment (Figure 20). Les données recueillies confortent l'implication des HAP dans l'étiologie* des tumeurs hépatiques sporadiques constatées dans la population de flet de baie de Seine (Cachot & Dégremont 2009).

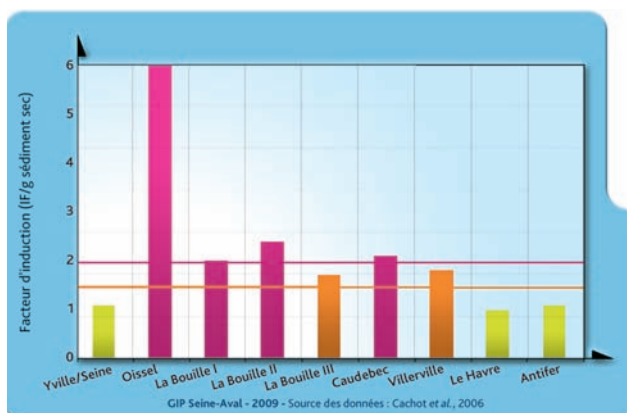


Figure 20. Risque de génotoxicité des sédiments prélevés en juin 2003 dans la baie et dans l'estuaire de Seine : en rose, le risque est important, en orange, il est modéré et en vert, il n'y a pas de risque.

Les PCB et les PBDE

Le modèle de la bioaccumulation des PCB (Abarnou *et al.* 2000) a été amélioré pour permettre une utilisation plus générale à d'autres contaminants organiques : dioxines et PCB apparentés dont les niveaux de présence sont préoccupants. De nouvelles données sur la contamination des organismes par les PCB de type dioxine et les PBDE ont été acquises pour les moules, les coquilles St Jacques et les soles. Il a été montré que l'alimentation constitue leur principale voie de contamination.

Les pesticides

D'importantes quantités d'atrazine transitent dans l'estuaire : environ $2,8 \text{ t.an}^{-1}$ (Tronczynski *et al.* 1999). L'analyse de risque a révélé un risque induit par cet herbicide (Figure 21A) sur les parties estuaire amont et estuaire moyen pendant les périodes printanières de 1993 et 1996 ($\text{PEC} > \text{PNEC} = 0,6 \mu\text{g.l}^{-1}$). Le diuron, lui, se retrouve majoritairement dans l'eau et est faiblement adsorbé par les matières en suspension et le sédiment (Figure 21B) (Tissier *et al.* 2005).

L'analyse de risque a révélé un risque induit par le diuron sur les parties estuaire amont et estuaire moyen durant les périodes printanières de 1993 à 2005 ($\text{PEC} > \text{PNEC} = 0,2 \mu\text{g.l}^{-1}$) (FHI 2005).

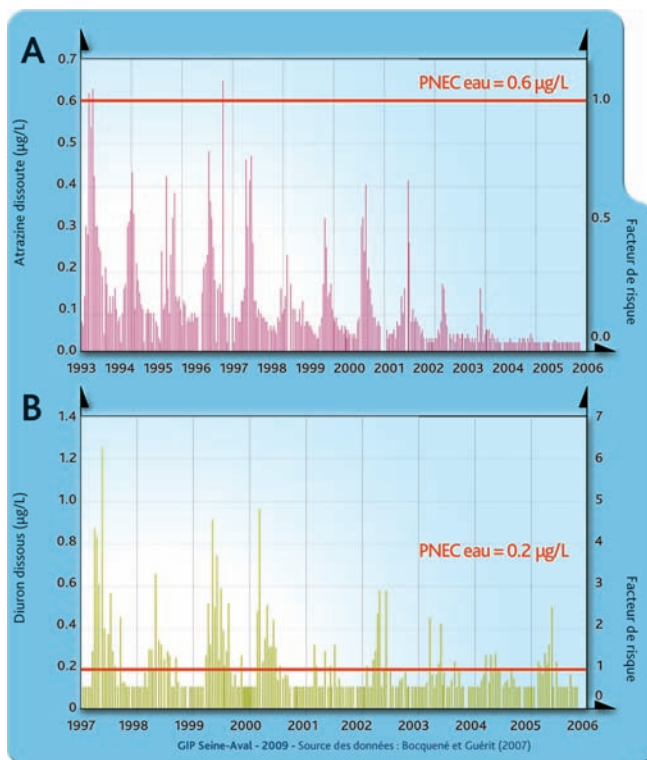


Figure 21. Concentrations dans l'eau de Seine en atrazine à Poses de 1993 à 2005 (A) et en diuron à La Bouille de 1997 à 2005 (B).

Le diuron et l'atrazine ont le même mode d'action sur les végétaux. Compte tenu de leur utilisation concomitante, les risques liés à leur mélange ont également été évalués. Cette analyse a révélé un risque à chaque période printanière et estivale de 1997 à 2005.

Les organoétains

Le TBT, principal organoétain aux effets indésirables (immunotoxique) rencontré en estuaire de Seine, provient des peintures antisalissures utilisées pour traiter les coques des navires et de son utilisation pour le traitement du bois. La contamination de l'estuaire par le TBT diminue et devrait continuer à diminuer puisqu'il est interdit depuis de nombreuses années en France et que les revêtements de coques qui en contiennent doivent être nettoyés d'ici 2008. Le MBT et le DBT sont utilisés dans l'industrie plastique. Le flux intra estuarien est actuellement très faible ($1,6 \text{ kg.an}^{-1}$). Mais le sédiment contaminé constitue un réservoir d'organoétains susceptibles d'être relargués bien que les concentrations mesurées soient faibles dans l'estuaire (Figure 22).

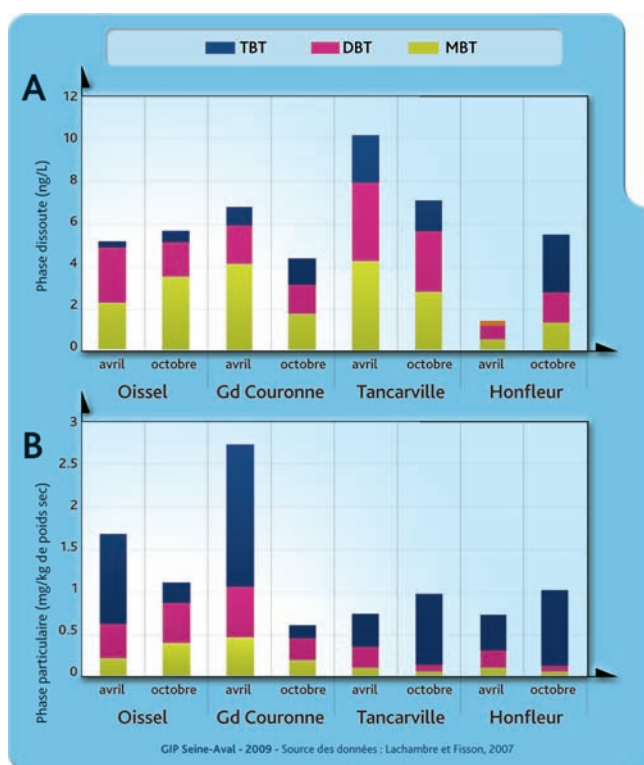


Figure 22. Concentrations en organoétains en phase dissoute (A) et en phase particulaire (B) dans l'estuaire de Seine en avril et octobre 2001.

Les phtalates

Les phtalates sont des perturbateurs endocriniens carcinogènes et mutagènes (Sultan *et al.* 2001; Kavlock *et al.* 2002) utilisés par l'industrie des plastiques présente en Haute-Normandie (50 % de la production nationale). Mais le niveau de contamination de la Seine, quasi constant tout le long de l'estuaire ($0,2$ à $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ à Poses selon le débit du fleuve) hormis au niveau du bouchon vaseux, reste du même ordre de grandeur que les observations menées au niveau européen. Le laboratoire Hydrologie Environnement (EPHE / UPMC) a identifié les origines et le comportement des phtalates en estuaire de Seine et dans huit de ses affluents. Le DEHP et le DnBP sont les principaux composés rencontrés en estuaire de Seine. Ils sont diffusés vers le milieu aquatique par les effluents ur-

bains, les précipitations et les boues urbaines épandues dans les zones agricoles. L'estimation de la contribution de l'ensemble des affluents à l'estuaire présente un impact relativement mineur du fait de leur faible débit en regard de celui de la Seine. Leur niveau de contamination est comparable à celui de la Seine, excepté pour le Robec et le Cailly qui drainent des zones fortement industrialisées (Figure 23). Les apports atmosphériques sont de 2 à 4 fois supérieurs à ceux de la Seine pour l'ensemble des phthalates.

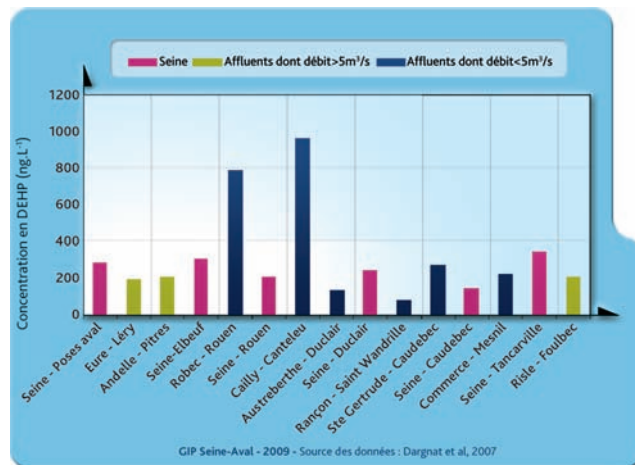


Figure 23. Evolution spatiale amont/aval des concentrations en DEHP dans la Seine et neuf de ses affluents.

Les contaminants émergents

Les travaux récents ont permis de mettre en évidence la réelle contamination de l'estuaire et de ses tributaires (plus ou moins selon l'anthropisation de leurs bassins versants) par les contaminants émergents (substances pharmaceutiques et agents nettoyants non ioniques) présents tant dans le compartiment particulaire que dans le compartiment dissous. De plus, ils ont montré qu'il n'y a pas de phénomène de dilution dans l'estuaire pour ces substances. Un pic de contamination est souvent remarqué à Rouen, dû en particulier à sa STEP. Le bassin amont joue également un rôle important dans cette contamination. Les substances ne nécessitant pas de prescription (l'aspirine par exemple) sont majoritaires (Figure 24), de même que les molécules les plus persistantes (carbamazépine, kétoprofène). En revanche, la contamination du réseau trophique paraît faible, même si plusieurs substances, comme le nonylphénol par exemple, présentent des concentrations supérieures à 100 ng.g⁻¹.

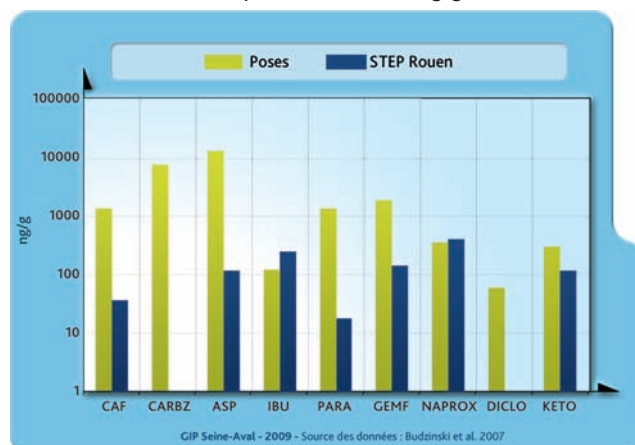


Figure 24. Apports journaliers en substances pharmaceutiques par la Seine à Poses et par la STEP de Rouen en février 2006.

Les connaissances des risques associés à toutes ces substances sont résumées dans le Tableau 2. (voir page suivante)

Qualité microbiologique : état de contamination de l'environnement estuarien

La contamination microbiologique de l'estuaire de Seine peut se faire par trois voies principales d'apports : (i) les apports de la partie fluviale amont de la Seine, (ii) les rejets des effluents des stations d'épuration situées le long de l'estuaire, (iii) les apports par les affluents de l'estuaire de Seine. En effet, les eaux de l'estuaire de Seine demeurent l'exutoire de rejets d'eaux usées. Elles sont responsables d'une contamination importante en bactéries d'origine fécale, dont les coliformes fécaux, souvent associée à la présence de micro-organismes pathogènes*, d'autant que les stations d'épuration ne sont pas équipées pour réduire ce type de contamination. Ainsi, les rejets des stations d'épuration de l'agglomération parisienne (plus de 10 millions d'habitants au total) ont une influence déterminante sur l'altération de la qualité sanitaire du milieu estuarien (Garcia-Armisen *et al.* 2005 ; Garcia-Armisen & Servais 2007). Les résultats montrent aussi que l'occurrence en bactéries et protozoaires parasites dans la zone de l'agglomération rouennaise est fortement influencée par les rejets de la STEP de Rouen et de la rivière le Robec. Mais les suivis ont également montré le rôle important que joue la Risle dans la qualité microbiologique des eaux de l'embouchure de la Seine. Elle dépend du rejet de la STEP de Pont-Audemer mais aussi d'autres sources qu'il conviendrait d'identifier à l'avenir (ruissellements de zones agricoles, rejets directs, ... ?).

Démarche

Une surveillance régulière de la qualité microbiologique des eaux de l'estuaire est assurée depuis de nombreuses années par le SNS (Service Navigation de la Seine). Il y mesure l'abondance des flores indicatrices de contamination fécale et y recherche les *Salmonelles* lors de campagnes longitudinales bimensuelles. Seine-Aval 3 s'est intéressé à la dynamique des coliformes fécaux (ou coliformes thermotolérants*) dans la perspective d'une modélisation de leur abondance le long de l'axe du fleuve de Poses à la mer, en complément à une recherche des entérovirus et de *Salmonella* (y compris sous sa forme non cultivable). Une démarche novatrice d'analyse du risque microbiologique a également été entreprise où le danger* correspond à la présence d'agents pathogènes dans le milieu et le risque au passage éventuel à l'homme, via la consommation de coquillages ou l'usage des eaux à des fins récréatives. La démarche mise en place (Figure 25) est l'une des premières études en Europe où tous les aspects de la microbiologie sanitaire sont étudiés (bactériologie, parasitologie et virologie). Ces travaux sont aussi effectués en relation étroite avec les hydro-sédimentologues afin de définir une stratégie pertinente pour les campagnes d'échantillonnage.

Tableau 2. Zones et compartiments à risque de contamination chimique en estuaire de Seine (Lachambre et Fisson 2007).

Famille	Substance	Estuaire fluvial						Baie orientale
		Amont		Moyen		Aval		Sédiment fin
		Eau	Sédiment fin	Eau	Sédiment fin	Eau	Sédiment fin	
Métaux	As		NDvs		NDvs	NDpec	NDvs	NDvs
	Ag	NDvs	NDvs	NDvs	NDvs	NDvs	NDvs	NDvs
	Cd	*		*		*		
	Cr							
	Cu							
	Hg	*		*		*		
	Ni							
	Pb							
	Zn							
HAP	Ace	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	
	Ant	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	
	BaP		*		*		*	*
	BbF + BkF							
	BghiP + IcdP							
	Flu							
	Naph	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	NDpec	
PCB	Σ 7PCB							
Pesticides	Σ DDT							
	Drines							NDpec
	Endosulfan				NDpec			NDpec
	HCB							NDpec
	HCH		NDpec		NDpec		NDpec	NDpec
	Atrazine							
	Simazine							
	Diuron							
	Isoproturon							
Phtalates	DBP		NDpec		NDpec		NDpec	NDpec
	DEHP		NDpec		NDpec		NDpec	NDpec
	DEP		NDpec		NDpec		NDpec	NDpec
Organoétains	TBT	NDpec		NDpec		NDpec	NDpec	NDpec
	DBT	NDpec		NDpec		NDpec	NDpec	NDpec
	MBT	ND	NDvs	ND	NDvs	ND	ND	ND

	Absence de risque
	Risque potentiel
	Risque avéré
	Risque non déterminé (NDvs : absence de valeur seuil, NDpec : absence de PEC)
	Non Pertinent
*	incertitudes importantes

Méthodologie :

Découpage en 4 zones géographiques :
 estuaire de Seine amont
 estuaire de Seine moyen
 estuaire de Seine aval
 partie orientale de la Baie de Seine

Concentration environnementales (PEC) :
 données 2003 du RNO (baie) et 2003 à 2005
 du SNS (estuaire fluvial) Calcul des centiles P10,
 P50 et P90 par zone

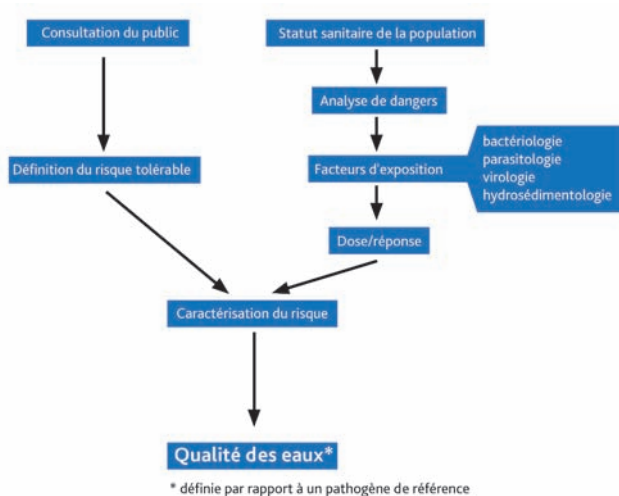
Origine des valeurs seuils :
 NQE de la proposition de directive fille DCE COM
 (2006)397 final, PNEC INERIS, NQ de l'arrêté du
 30 juin 2005 (PCB)

Evaluation des risques :

Comparaison PEC et valeur seuil
 P90 ≥ valeur seuil =>risque avéré
 P10 < valeur seuil =>absence de risque
 P90 ≤ valeur seuil < P90 =>risque potentiel

Substances non présentées :

Aucune PEC n'est disponible pour les polybromés,
 alkylphénols et substances pharmaceutiques, qui ne
 sont donc présentées dans le tableau



GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : Petit et al., 2005

Figure 25. La démarche d'analyse de risque microbiologique.

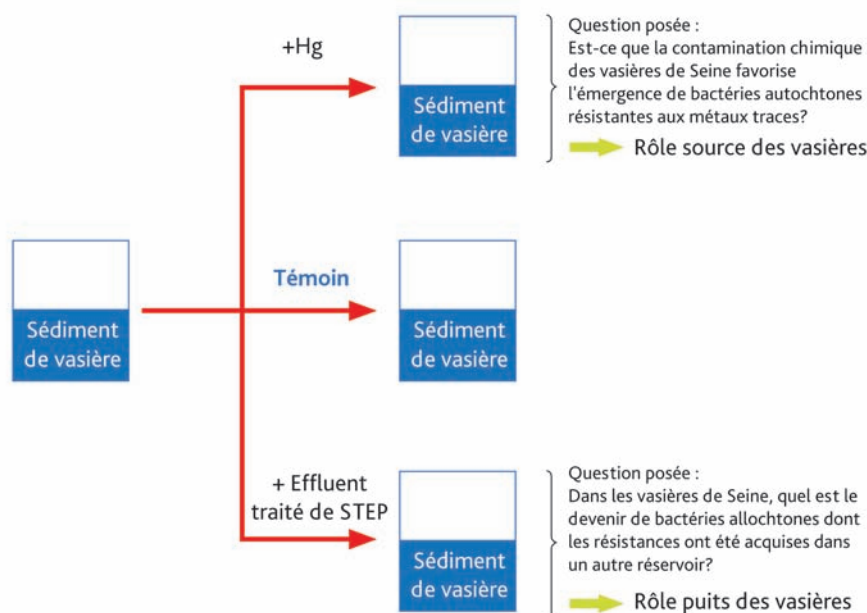
Bactériologie

La Seine est l'exutoire de souches multirésistantes aux antibiotiques d'origine humaine (via les effluents traités de STEP) ou animale (eaux de ruissellements). Des souches

d'*Escherichia coli* présentant jusqu'à 13 résistances sur les sites du bouchon vaseux ou dans les eaux de ruissellement ont été isolées. A défaut de constituer un risque sanitaire patent, en l'absence d'un passage à l'homme démontré, ces résultats montrent que l'environnement estuarien peut constituer un réservoir de gènes de résistance susceptibles d'être transférés à des bactéries potentiellement résistantes pour l'homme.

Cette résistance aux antibiotiques peut d'ailleurs être associée à des résistances au cadmium (gène *cadA*) ou au mercure (gène *merA*). Les vasières de l'estuaire sont des environnements favorables à l'émergence de telles bactéries résistantes qui peuvent être, selon les travaux menés par le Laboratoire de Microbiologie du Froid de Rouen et l'UMR Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires de Lille, des lieux de dépôt de bactéries allochtones résistantes associées aux particules qui se déposent sur ces vasières (rôle puits) et/ou un environnement contaminé en métaux favorable à la sélection de résistance chez les bactéries autochtones (rôle source) (Figure 26). La proportion de la population d'*Aeromonas* qui porte le gène *merA* est 10 fois plus faible que chez *E. coli*, ce qui laisse supposer que cette résistance n'est pas en relation avec la contamination chimique de l'environnement estuarien.

Présentation schématique de l'expérimentation en microcosmes



Microcosmes en conditions anoxiques

GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : Ouddane et al, 2007

Figure 26. Protocole expérimental pour déterminer le rôle puits ou sources des vasières en bactéries résistantes au mercure.

Parasitologie

Cryptosporidium parvum et *Giardia duodenalis* sont les protozoaires parasites de l'Homme les plus fréquemment impliqués dans les infections gastro-intestinales en Haute-Normandie. Leurs formes infestantes sont produites en grande quantité dans l'environnement hydrique et se concentrent dans des mollusques bivalves qui fournissent un bon indicateur de la contamination. Les profils longitudinaux réalisés par le Laboratoire de Parasitologie Expérimentale de Rouen indiquent que l'estuaire est impacté de manière permanente par *C. parvum*, dont le réservoir prédominant est bovin, avec des variations saisonnières importantes au niveau de l'estuaire amont et de l'estuaire moyen. La contamination est maximale en hiver et faible en été. Au niveau de la zone du gradient de salinité, ces variations saisonnières sont beaucoup plus limitées. Pour *G. duodenalis*, parasite dont le plus important réservoir est l'homme, la contamination de l'estuaire est principalement détectée au niveau de la zone de Rouen et en période hivernale alors que la contamination au niveau de l'estuaire marin n'est pas constante tout au long de l'année. L'étude des apports latéraux montre une contamination de tous les affluents étudiés en été, en particulier le Cailly et le Robec. Les données sur la contamination des bivalves en baie de Seine indiquent que la présence de parasites est sous l'influence conjuguée du débit du fleuve, des précipitations au niveau du bassin versant de l'estuaire et de l'excrétion saisonnière des oocystes par les bovins.

Virologie

Les travaux menés à l'INRS au Québec montrent que les eaux de l'estuaire de Seine ont en général une activité antivirale très élevée (98% des virus sont inactivés en ¼ h) et que ces eaux sont peu contaminées par des virus d'origine humaine, ce qui suggère que les risques sanitaires viraux sont relativement faibles.

Modélisation

Les connaissances acquises aux cours de Seine-Aval sur les sources et les processus de survie et de mortalité des bactéries indicatrices de contamination fécale (Servais *et al.* 2007 ; Servais *et al.* 2007) ont servi à établir un module décrivant la dynamique de ce type de bactéries dans l'ensemble de l'estuaire. Ce module a été couplé avec le modèle écologique de l'estuaire, le modèle SiAM-3D (Cugier & Le Hir 2002), afin de pouvoir servir d'outil de prédiction du niveau de la contamination microbienne (exprimée en teneur en coliformes fécaux – CF) de l'estuaire dénommé modèle CF-SiAM-3D. Ce modèle prend en compte les différentes sources possibles de bactéries fécales. Le modèle a été validé par comparaison avec des données de terrain. Cette comparaison montre que le modèle CF-SiAM-3D est capable de simuler correctement la distribution longitudinale des bactéries fécales le long de l'estuaire dans diverses conditions hydrologiques, ainsi que la dynamique des CF attachés et libres dans la zone aval de l'estuaire.

Le modèle CF-SENEQUE, développé dans le cadre du PIREN Seine*, est utilisé pour simuler la teneur en CF à Poses et aux affluents de l'estuaire. Ces paramètres sont

entrés dans le modèle CF-SiAM-3D. Cela permet de tester l'impact de modifications de la gestion des eaux usées dans le bassin amont sur la qualité microbiologique des eaux de l'estuaire de Seine.

La modélisation du risque de présence de pathogènes le long de l'estuaire de Seine dans différentes conditions hydrologiques a été entreprise à partir des relations entre l'abondance des CF et la présence de pathogènes et du modèle développé (Figure 27). La prédiction par modèle de l'abondance des bactéries indicatrices permet ainsi de déduire un risque de présence de divers pathogènes et donc le risque sanitaire associé aux diverses utilisations de l'eau. Les scientifiques disposent d'un modèle prédictif de l'estimation de la présence de *Salmonella* sous sa forme cultivable et espèrent en faire de même à moyen terme pour *C. parvum*, au moins pour la zone d'eaux douces de l'estuaire.

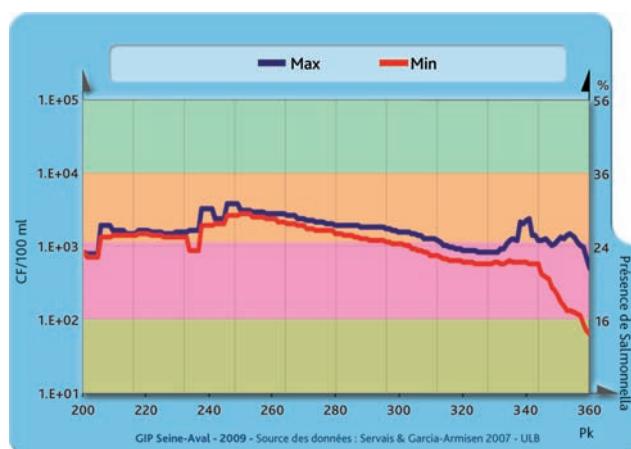


Figure 27. Profil longitudinal de la teneur en CF dans l'estuaire de Seine calculé par le modèle CF-SiAM-3D et teneur de *Salmonella* associée, pour un débit à Poses de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les travaux devront se poursuivre pour affiner la relation entre l'abondance des flores indicatrices (CF/*E.coli* et/ou entérocoques) pour la zone du bouchon vaseux et pour estimer la présence des autres pathogènes notamment virus et parasites (Touren *et al.* 2005 ; Touren *et al.* 2007). Mais l'utilisation conjointe des modèles CF-SiAM-3D et CF-SENEQUE représente déjà un véritable outil de gestion qui a permis par exemple de savoir que la mise en conformité des STEPs du bassin amont par rapport à la DCE permettra d'améliorer d'un facteur 5 à 10, selon les périodes de l'année, la teneur en CF à Poses et qu'une mise en conformité de l'ensemble des STEPS du bassin (amont et aval) apportera une nette amélioration de la qualité microbiologique sur l'ensemble de l'estuaire, à l'exception du bouchon vaseux (Figure 28). Dans ces conditions, et en bas débit, la teneur en CF sera inférieure à la norme actuellement en vigueur pour les eaux de baignade sur l'ensemble de l'estuaire alors qu'elle est aujourd'hui de qualité insuffisante.

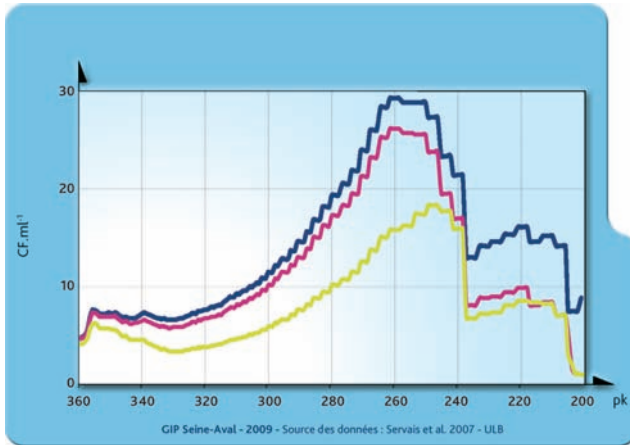


Figure 28. Profil longitudinal de la teneur en CF dans l'estuaire de Seine calculé par le modèle CF-SIAM-3D pour un débit à Poses de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En bleu, la situation en 2003. En rose, la situation prévisible en 2012 après la mise en conformité des STEP du bassin amont. En vert, la situation prévisible en 2012 après la mise en conformité des STEP du bassin amont et aval.

Cycle de la matière organique et eutrophication du système estuarien

Des ruisseaux de têtes de bassin jusqu'aux eaux côtières de la baie de Seine, le réseau hydrographique de la Seine forme un continuum de systèmes aquatiques interdépendants à travers lesquels circulent, en cascade, les éléments biogènes*. L'estuaire et les zones marines côtières sont ainsi le réceptacle de tous les nutriments apportés aux eaux de surface de manière diffuse ou ponctuelle par les activités industrielles, agricoles ou urbaines, sur le bassin versant. La matière organique joue un rôle important dans le fonctionnement de l'estuaire de la Seine. Elle est impliquée dans un grand nombre de problématiques environnementales telles que la dynamique des contaminants, l'eutrophication et les désoxygénations. C'est afin de mieux connaître son cycle que le projet CYMES (Cycle de la Matière Organique en Estuaire) a été élaboré par l'UMR Sisyphe (CNRS/UPMC) et par l'Université Libre de Bruxelles.

Cycle de la Matière Organique

La matière organique est constituée d'un complexe de composés variés dont les proportions varient dans le temps et dans l'espace. Seule une faible partie de la matière organique est en général assimilable par les micro-organismes hétérotrophes, c'est la fraction biodégradable qui est mesurée grâce à la DBO_5^* ; le reste de la matière organique est réfractaire à la biodégradation. Les apports en DBO_5 dans l'estuaire se font par le bassin en amont de Poses (encore plus de 80 %, même si cette valeur est en baisse depuis des années ; de 54 000 à 100 000 $\text{tO}_2 \cdot \text{an}^{-1}$, essentiellement du phytoplancton), le bassin versant interne à l'estuaire (12 à 18 % ; de 4 000 à 8 000 $\text{tO}_2 \cdot \text{an}^{-1}$) et les STEP, les RUTP (Rejets Urbains de Temps de Pluies) et des industries (5 % à 10 %). Les MES et le COP* (sources de MO) venant de Poses étant majoritaires, leurs dynamiques conditionnent celle de l'estuaire. Les apports en MES ont essentiellement lieu

en période de crue (60 à 90 % des apports annuels) tandis que les apports en COP sont surtout (60 %) printaniers (blooms phytoplanctoniques) et estivaux (croissance). Le rapport COP/MES dans le bouchon vaseux est conditionné par la quantité de MO apportée par le bassin amont. Il varie de 3,1 à 4,1 %. Ce contenu en carbone du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine est très élevé par rapport à celui de la Gironde (1,5 %) à cause des apports importants en MO d'origine domestique et en phytoplancton, mais il est du même ordre que celui de la Loire (3,3 %), rivière eutrophe* comme la Seine (Etcheber *et al.* 2007). Le temps de séjour des particules est également important car il permet ou ne permet pas la biodégradation complète de la MO.

Parmi toutes les activités microbiologiques qui interviennent dans la dynamique de la MO du bouchon vaseux, c'est la dégradation qui l'emporte sur la production ; la production primaire étant très limitée par le climat lumineux (Servais & Garnier 2006). La production nette de carbone, tant dans la ZMT que sur les vasières, est faible. Les flux de carbone entrant dans le bouchon vaseux en période estivale - d'avril à octobre - fluctuent selon les années : entre 70 et 280 t/jour de carbone à l'entrée du bouchon vaseux à Caudebec, 50 % en moyenne étant sous forme de carbone dissous, 45 % sous forme biodégradable (Figure 29). Les apports d'amont sont dominants par rapport aux apports intra-estuariens, qui ne dépassent probablement pas les 10 $\text{tC} \cdot \text{j}^{-1}$ (en doublant les apports de la rive droite pour tenir compte de la Risle, rive gauche). Les travaux menés sur les vasières conduisent à une estimation de la matière organique stockée comprise entre 240 et 1400 tC (compte tenu des 3 à 4 % du contenu en COP des MES) pour un cycle lunaire et qu'à une échelle annuelle, le stockage maximal de la vasière en post-crue serait de 3600-4800 tC. La biomasse phytoplanctonique représenterait en moyenne 5 tC sur les vasières ; la fraction du carbone biodégradable est donc plus faible que dans le maximum de turbidité.

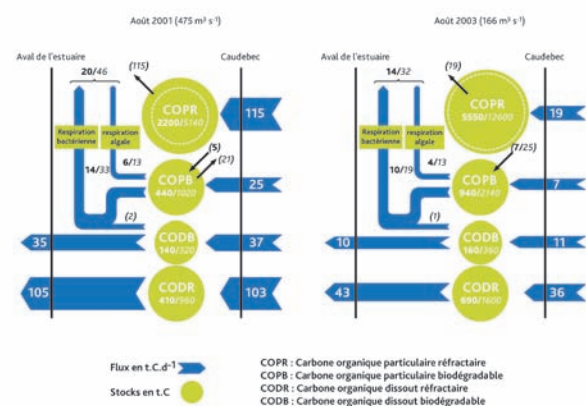


Figure 29. Bilan du carbone dans le bouchon vaseux.

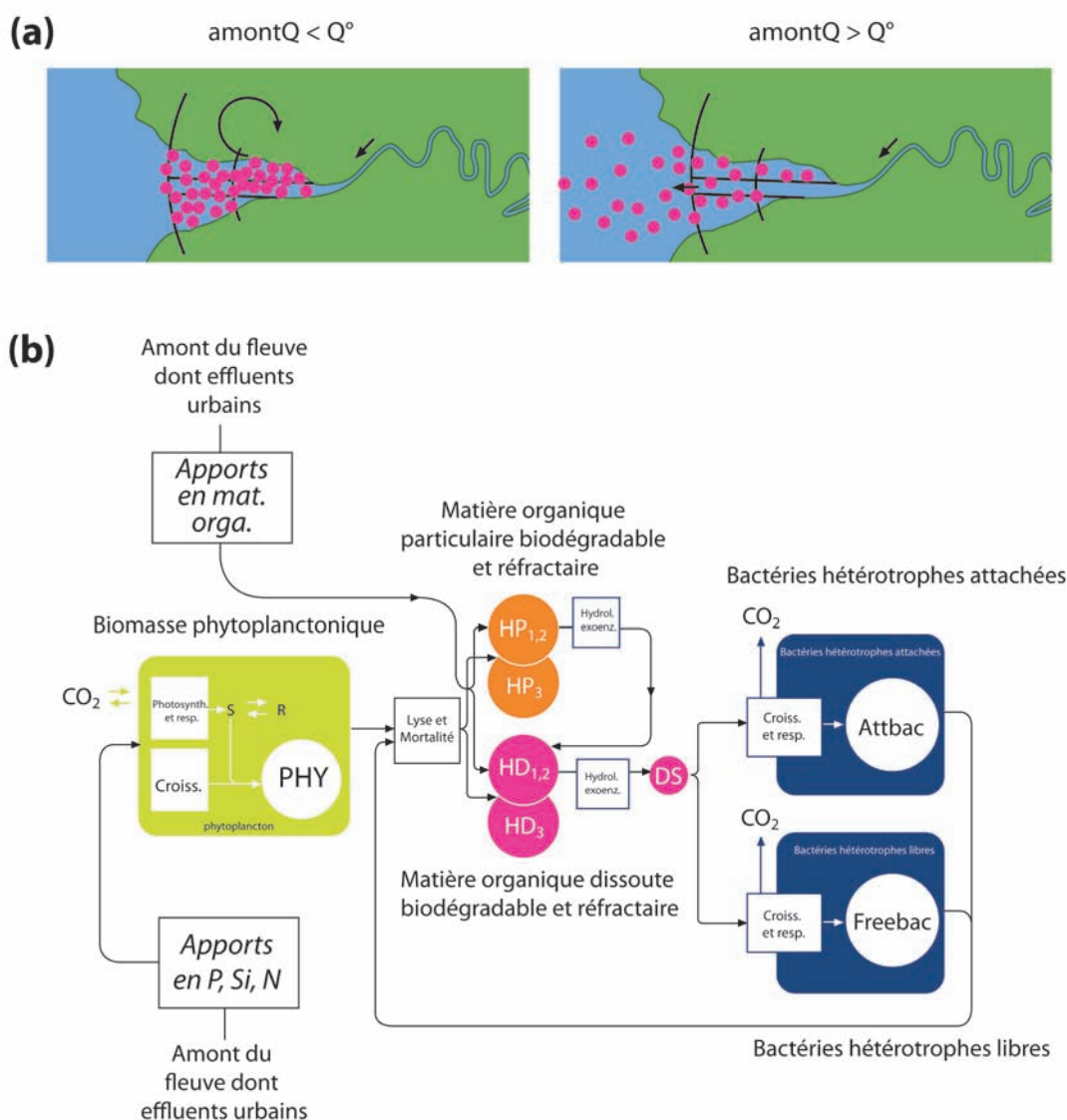
Les bilans du carbone tant pour la zone maximale de turbidité (ZMT) du chenal que pour les vasières, permettent - sur la base des mesures sur le terrain - de mieux comprendre la dynamique du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine. Les valeurs doivent toutefois être considérées avec une gamme de variations (un facteur de 1 à 2 semblant raisonnable). Les estimations des flux dissous sont de toute évidence mieux connus que celles des flux particu-

lares. Les limitations à l'établissement de flux à partir de mesures sont d'ordres variés, liés à la complexité du fonctionnement hydrosédimentaire, chimique et écologique d'un système estuarien.

Les flux de carbone, sous ses formes particulières et dissoutes, biodégradables et réfractaires, ont été établis dans la ZMT de l'estuaire de Seine, et ont été analysés d'un point de vue dynamique. Les analyses ont montré que la fraction biodégradable du carbone particulaire y est fortement conditionnée par la production phytoplanctonique de la Basse Seine. Dans la Seine, le rapport Carbone/Chlorophylle a, qui sert à déterminer la biomasse carbonée, est de l'ordre de 35 (Garnier *et al.* 1998). Puisque les travaux réalisés dans le projet DYVA avaient montré que la production benthique pouvait être importante au niveau des vasières, le projet CYMES a cherché à quantifier la frac-

tion biodégradable de la surface des vasières. L'objectif du projet CYMES était de comprendre et de quantifier le rôle du bouchon vaseux et des vasières dans la production et la dégradation de la matière organique.

La fraction biodégradable du carbone est d'environ 4 à 10 % dans les vasières, 20 % dans la ZMT et de 30 % à Caudebec (Servais *et al.* 2006; Etcheber *et al.* 2007). Les particules en suspension dans la zone du bouchon vaseux sont plus riches en MO que celles qui s'accumulent pour former des vasières. Les différences entre MES du chenal et vasières sont liées aux temps de séjour des vases dans l'estuaire, plus élevés que ceux des particules restant en suspension dans le chenal qui se mélangent avec des apports constants d'amont ; la biodégradation même lente du COP dans les vases se réalise au cours d'un temps plus long (Figure 30).



Source de données : Garnier *et al.* 2008

Figure 30. Description du fonctionnement de la ZMT. (a) à gauche: expansion et homogénéité de la phase particulaire quand Q (débit amont) $< Q^*$ (débit critique restant à déterminer) et à droite: la phase particulaire n'est plus retenue quand $Q > Q^*$; et (b) les processus microbiologiques pris en compte.

Le matériel particulaire du maximum de turbidité du chenal est alimenté par un flux continu de biomasse phytoplanctonique d'amont. Sur les vasières, la biomasse algale qui se dépose est déjà fortement dégradée et dispose d'un temps plus long pour que la biodégradation se poursuive. La production primaire des algues benthiques autochtones, sur les vases, est en outre relativement faible, par rapport aux apports d'amont (en moyenne de 25 tC.j⁻¹ en période estivale) (Garnier *et al.* 2008). En considérant que les vasières sont émergées 8 h par jour et que l'irradiance y est optimale, la production microphytobenthique brute sur les vasières est estimée à environ 370 mgC.m⁻².j⁻¹ (Cuvilliez 2008). En considérant une surface de vasière de 3,175 km² (Cuvilliez 2008), cette production est donc estimée à 1175 kgC.j⁻¹, alors que la respiration (considérée sur 24 h) est du même ordre. La production nette de carbone tant dans le maximum de turbidité que sur les vasières est donc faible. Si l'on examine la sulfato-réduction des vasières en considérant une vitesse de sulfato-réduction de 0,1-0,4 gC.m⁻².j⁻¹, environ 150 à 600 kgC.j⁻¹ sont consommés, ce qui est peu par rapport à toutes les autres activités mesurées. Dans les vasières, se produit un flux de carbone organique dissous estimé à 700 kgC.j⁻¹, de l'ordre de 1 % du flux d'amont, probablement lié à l'hydrolyse de la matière organique particulaire. La production secondaire est du même ordre de grandeur que la production primaire et microbienne (Rybarczyk & Elkaïm 2003) : environ 26 tC.j⁻¹.

Les apports directs en COP provenant des STEP, et plus particulièrement les rejets de l'agglomération parisienne, ont un rôle dominant, même si celui du phytoplancton est important surtout en termes de biodégradation et du métabolisme estuarien. L'hydrologie, qui influence le développement phytoplanctonique, explique plus de 80 % des différences de teneur en carbone dans le matériel particulaire, différences particulièrement notables au printemps. Les apports amont sont surtout représentés par la fraction plutôt réfractaire et donc conservative. Les rejets intra-estuariens comprennent en revanche une fraction biodégradable, qui disparaît peu à peu. À Honfleur, la fraction réfractaire des rejets intra-estuariens qui subsiste est inférieure à celle provenant de l'agglomération parisienne (Garnier *et al.* 2009).

Le modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine) a été développé pour étudier le couplage de la matière organique avec des contaminants. Il est dérivé des modèles RIVE et ELISE mais ne comprend plus que six variables carbonées, deux variables représentant la biomasse phytoplanctonique fluviale et marine, six équations pour décrire le cycle de la matière organique et une seule variable forçante : la température. Ce modèle reste néanmoins satisfaisant dans le cadre de son objectif ; les écarts entre simulation et réalité restant dans la marge de variation des mesures. L'importance du phytoplancton marin pour le fonctionnement du bouchon vaseux a été mise en évidence grâce à ce modèle (Even *et al.* 2007). Le modèle SiAM-3D/MOSES/MET&OR, appliqué aux contaminants métalliques et organiques, permet d'évaluer l'importance relative des processus d'échange et de transformation en décrivant le partage des contaminants entre différentes phases dissoutes et particulaires.

Les études menées ont montré que la distinction de la MO selon son origine (produite ou non dans le milieu) et surtout selon sa maturité est plus pertinente que le critère de biodégradabilité pour ce type de modélisation. La MO naturelle dissoute joue par exemple un rôle dans la spéciation du cadmium en contrôlant ses concentrations à l'état libre et sous forme de complexes organiques. La modélisation a permis de mettre en évidence qu'elle contribue fortement à sa solubilisation dans la ZMT et que son rôle est accru lorsque la salinité et les concentrations en MES sont faibles. Cette cinétique de solubilisation est lente et constante à Poses alors qu'elle est d'abord rapide et intense au début puis lente sur les vasières (Tableau 3).

Tableau 3. Quantité moyenne de métaux solubilisés en moles de métal par mole de carbone dégradé (Garnier *et al.* 2009).

	Vasière	Poses
Cd	1.43.10 ⁻⁵	5.71.10 ⁻⁸
Zn	9.84.10 ⁻⁴	1.08.10 ⁻⁵
Cu	7.53.10 ⁻⁸	-
Ni	2.71.10 ⁻⁸	-

Les contaminants qui ont le plus d'affinité avec les particules ont tendance à être retenus dans l'estuaire en plus grande proportion. Certains, comme les PCB par exemple, sont plus facilement assimilés par les cellules phytoplanctoniques puis bioaccumulés dans les organismes de rang trophique supérieur. La présence de la MO vivante et détritique, particulaire et dissoute, joue un rôle fondamental dans ces comportements puisqu'elle constitue un sorbant privilégié. Plus il y a de MOP et MOD* dans le milieu, moins le contaminant est biodisponible ; en effet, les espèces dissoutes sont plus biodisponibles que les espèces particulaires et l'espèce libre est plus biodisponible que les espèces colloïdales.

Eutrophisation du système estuarien

Les apports fluviaux de nutriments contrôlent très étroitement le fonctionnement des zones marines côtières (Billen & Garnier 1997). Les apports en eau des rivières, riches en silice, dans les eaux marines, généralement beaucoup plus pauvres en cet élément, expliquent la forte productivité diatomique des eaux côtières, et par là même leur intérêt halieutique. Par contre, l'accroissement des apports de phosphore et d'azote dans les eaux de rivières, lorsque les flux de ces éléments viennent en surplus des apports de silice, provoquent la croissance dans le milieu marin de groupes d'algues planctoniques non siliceuses, souvent indésirables à l'origine de divers dysfonctionnements du milieu marin côtier. Le phosphore est désormais l'élément limitant à la zone côtière (Billen & Garnier 2007). A travers la grande diversité des manifestations locales que peuvent revêtir les phénomènes d'eutrophisation marine côtière – blooms d'algues toxiques, prolifération d'algues mucilagineuses*, désoxygénation

des eaux profondes ... – ce sont toujours ces apports terrigènes d'azote et/ou de phosphore, en excès par rapport aux apports de silice, qui en sont la cause première (Cugier *et al.* 2005 ; Billen *et al.* 2007 ; Even *et al.* 2007). Dans le cas de la baie de Seine, les manifestations d'eutrophisation consistent essentiellement dans des épisodes estivaux d'apparition de dinoflagellés toxiques, imposant l'interdiction de la consommation des coquillages. Pour n'avoir pas reconnu en temps voulu la baie de Seine comme une zone sensible à l'eutrophisation, l'Etat Français s'est vu condamné par la Cour Européenne de Justice (Billen & Garnier 2005).

Le modèle SENEQUE, développé dans le cadre du PIREN Seine, a été utilisé pour calculer les flux de nutriments à l'exutoire des quatre principaux cours d'eau affluents de la Seine dans son secteur estuarien : l'Eure, la Risle, l'Andelle et l'Austreberthe. Le recours à la modélisation permet de fournir des chroniques plus fines de leurs apports que les mesures disponibles. Ces dernières servent à valider le modèle. Ces quatre cours d'eau totalisent 81 % de la surface de bassin versant propre de l'estuaire (9290 km² sur un total de 11430 km² ; Figure 31)



Source de données : Billen & Garnier 2007 ; BD-TOPO IGN, 2005 ; Piren-Seine

Figure 31. Découpage de l'espace des bassins versants intra estuariens concernés par le modèle SENEQUE.

SENEQUE est en fait une interface-SIG permettant à l'utilisateur d'implémenter le modèle Riverstrahler sur n'importe quel découpage en axes et bassins (Ruelland 2003 ; Ruelland *et al.* 2007). Le modèle Riverstrahler calcule la composition de l'eau qui rejoint le réseau hydrographique depuis le bassin versant et ses variations saisonnières à partir des contributions relatives des écoulements superficiels et phréatiques. Il est tenu compte également de l'effet d'un filtre lié aux zones humides riveraines, susceptibles de retenir une partie des flux de nutriments transférés. SENEQUE a permis de prouver que les flux enregistrés à l'aval du bassin versant ne dépendent pas de la localisation spatiale précise des rejets ponctuels et

diffus à l'intérieur de ce bassin (Ruelland *et al.* 2007), ce qui justifie *a posteriori* l'usage de découpages assez grossiers du réseau hydrographique lorsqu'on cherche seulement à définir les charges en nutriments délivrées au milieu marin.

L'effet de l'hydrologie sur l'importance des flux annuels est extrêmement marqué, particulièrement pour les flux d'azote et de silice, dont l'origine diffuse est prédominante, ce qui conduit à des apports proportionnels aux débits. Il se marque aussi sur les flux de phosphore, indiquant une origine diffuse non négligeable de ce nutriment. Selon les scénarii testés, la part des apports en nutriments de ces cours d'eau ne varieront pas très significativement d'ici 2012 en réponse aux améliorations programmées du traitement des eaux usées urbaines. Ils dépendent par contre très fortement des conditions hydro-climatiques. Le bassin versant propre de l'estuaire contribue, selon les conditions hydrologiques, pour 11 à 14 % de l'azote, pour 5 à 10 % du phosphore et pour 18 à 26 % de la silice.

L'étude proposée sous le titre DIAPASON (Diagnostic du fonctionnement biogéochimique du continuum Estuaire-PAnache de la Seine) visait à répondre à trois questions (Billen *et al.* 2005) :

- i) Par quels indicateurs relatifs aux transferts de nutriments terrigènes peut-on caractériser les risques d'eutrophisation de la baie de Seine ?
- ii) Comment ont varié les flux de nutriments terrigènes apportés en baie de Seine au cours des précédentes décennies et quelles sont leurs tendances évolutives prospectives ?
- iii) Quel est le rôle du fonctionnement de l'estuaire aval dans cette dynamique ?

Sur la base des travaux de (Cugier *et al.* 2005), un indicateur de risque d'eutrophisation (ICEP), représentant le flux de nutriment limitant (N ou P) en excès de la silice, amené en été par le débit amont de la Seine, a été proposé (Billen *et al.* 2007). Cet indicateur constitue en quelque sorte une mesure du potentiel de croissance des algues non siliceuses si les conditions météorologiques et hydrodynamiques sont favorables à leur développement. L'analyse des mesures effectuées par le Service de Navigation de la Seine à Caudebec a permis de calculer cet indicateur et ses variations sur une dizaine d'années. Un basculement d'une situation où l'azote était l'élément limitant principal de la croissance algale estivale non di-

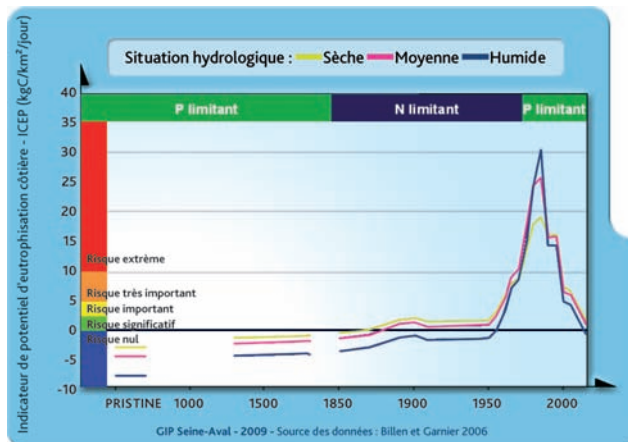


Figure 32. Evolution de l'ICEP au cours du temps.

atomique en été, à une situation où le phosphore joue de plus en plus ce rôle apparaît clairement sur ces données, ainsi qu'une tendance à la baisse de l'ICEP sur cette période (Figure 32). Cela est loin, néanmoins, des valeurs nulles ou négatives qui devraient être prises comme objectif de bon 'état écologique' au sens de la Directive Cadre sur l'Eau.

L'analyse des profils expérimentaux de concentrations en nutriments en fonction de la salinité montre que l'estuaire moyen pourrait avoir un rôle significatif sur les flux estivaux de nutriments qui lui parviennent d'amont avant qu'ils ne soient transmis effectivement en baie de Seine. En particulier, l'estuaire aval est le siège d'une dénitrification non négligeable, d'un relargage du phosphore inorganique adsorbé sur les particules inorganiques qui contrebalance partiellement la rétention du phosphore particulaire, et d'un piégeage de silice dissoute.

Un modèle simplifié de la dynamique biogéochimique de l'estuaire aval (LIFT ; Lit Fluidisé dans le maximum de Turbidité des estuaires), assimilant le bouchon vaseux à un réacteur à lit fluidisé homogène, a été développé et validé sur les observations acquises en 2003 (Garnier *et al.* 2008). Ce modèle permet de calculer la modification des flux de nutriments apportés depuis le bassin amont de la Seine pendant leur transit dans l'estuaire aval. Il confirme que les phénomènes ayant cours dans l'estuaire moyen peuvent retarder l'effet de basculement, observé sur les flux à Caudebec, vers la limitation par le phosphore plutôt que par l'azote de la croissance algale non diatomique (Billen *et al.* 2005 ; Even *et al.* 2007). Il considère qu'en dessous d'un débit critique, le matériel particulaire en suspension résulte d'un équilibre entre un flux entrant et les processus biologiques. Le flux sortant est nul. Au dessus de ce débit critique, les particules sont expulsées et mélangées avec les eaux marines. Les espèces dissoutes sont diluées tout au long du gradient de salinité et subissent les réactions biologiques jusqu'à une salinité de 10.

Les recherches sur l'eutrophisation se sont aussi focalisées dans la zone du bouchon vaseux pour aboutir à un bilan du cycle du carbone tant particulaire que dissous et l'analyser d'un point de vue fonctionnel, afin d'interpréter les teneurs élevées en carbone dans les MES du bouchon vaseux (Billen *et al.* 2005).

Structure et fonctionnement de l'édifice biologique

L'estuaire de la Seine se caractérise par un paradoxe : la ressource piscicole est dégradée alors que les premiers niveaux du réseau trophique sont en bon état écologique. En effet, les nombres d'espèces et d'individus de poissons sont faibles, surtout dans la partie fluviale en aval de Rouen, alors que la population du copépode *Eurytemora affinis* présente en Seine des abondances dix fois supérieures à celles rencontrées dans d'autres estuaires européens comme l'Escaut ou la Gironde (Dauvin *et al.* 2002). Cette pauvreté du maillon trophique supérieur est sans doute le résultat d'une dégradation générale des habitats liée à la qualité physico-chimique déficiente des eaux, mais aussi aux aménagements successifs depuis plus de 150 ans.

Trois compartiments biologiques clés ont donc été particulièrement étudiés : les populations piscicoles, les peuplements benthiques et *Eurytemora affinis*, la principale espèce zooplanctonique de l'estuaire. Un des enjeux de Seine-Aval 3 était aussi d'identifier et de quantifier les flux trophiques entre ces compartiments écologiques.

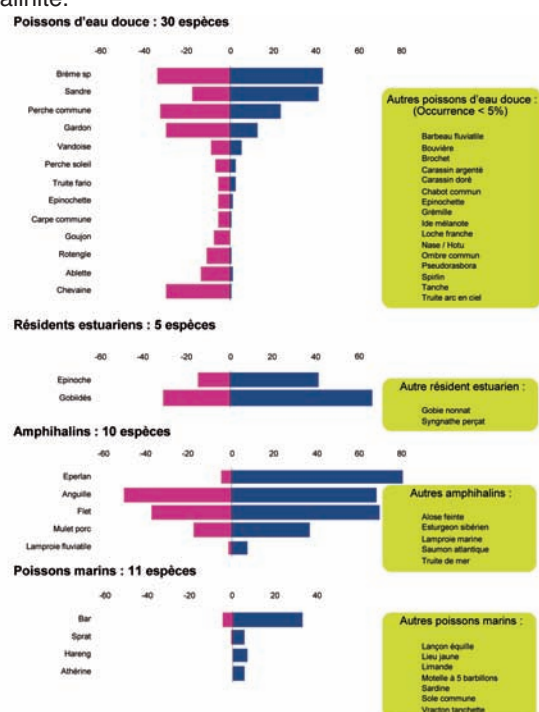
Populations piscicoles

L'estuaire de Seine est une zone de transition entre eau douce et eau salée qui est colonisée par des espèces de poissons marins, migrateurs et d'eau douce. Il participe au renouvellement des stocks de poissons marins. La connaissance des populations piscicoles de l'estuaire marin et moyen reposait sur des bases solides avant le début de Seine-Aval 3, mais celle de l'estuaire amont fluvial reposait sur une seule campagne scientifique réalisée en 1996 par le CEMAGREF. Des actions de recherches ont donc été entreprises pour mieux appréhender l'état des populations piscicoles et de leurs habitats dans cette partie de l'estuaire afin de proposer des actions concrètes de réhabilitation et pour identifier des espèces migratrices emblématiques de la reconquête de l'estuaire de Seine.

➤ Richesse piscicole de l'estuaire amont fluvial

La richesse globale d'un peuplement fournit une indication relative sur l'état piscicole. La Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN) a recensé, en collaboration avec l'Université de la Rochelle, les espèces présentes dans la partie dulcicole de l'estuaire de la Seine de 2002 à 2005 grâce à une grande variété d'engins de pêche (Duhamel *et al.* 2005).

Parmi les 56 espèces recensées (Figure 33), 30 sont dulcicoles, soit environ 80 % de la liste établie pour l'ensemble du bassin de la Seine, ce qui est satisfaisant compte tenu des contraintes naturelles liées à la marée ou à la salinité.



Source de données : Morin et Duhamel 2009

Figure 33. Les poissons de l'estuaire de Seine.

Huit espèces typiques d'eau douce se trouvent dans l'estuaire en dehors de leur zone préférentielle de répartition : le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), le spirin (*Alburnoides bipunctatus*), le chabot commun (*Cottus gobio*), le goujon (*Gobio gobio*), la grémille (*Gymnocephalus cernuus*), la loche franche (*Nemacheilus barbatulus*), l'ombre (*Thymallus thymallus*) et le vairon (*Phoxinus phoxinus*). Leur recensement montre l'intérêt de la diversification des habitats sur la richesse spécifique piscicole. Cependant, les habitats propices à ces espèces restent très localisés, notamment aux confluences. La richesse moyenne en espèces est toujours inférieure à dix espèces, quelque soit la technique de pêche. Le maximum provient des pêches au guideau (huit espèces) et le minimum des pêches aux trémails (pas plus de deux espèces).

Ces données sont difficilement comparables à celles provenant d'autres estuaires car les études n'y englobent généralement pas la partie eau douce ; de plus, les techniques de pêche ne sont pas toujours les mêmes. Les résultats obtenus peuvent toutefois être comparés avec ceux obtenus dans l'estuaire de l'Elbe, en Allemagne, à partir de pêches au guideau où 25 espèces ont été recensées en milieu oligohalin* dont 15 dulcicoles. A gamme de salinité égale, seulement 15 espèces sont recensées dans la Seine, dont 5 dulcicoles. Si la comparaison se limite uniquement aux espèces communes entre les deux sites, les niveaux d'occurrence semblent alors similaires pour le sandre (*Stizostedion lucioperca*, 33 %) et la perche (*Perca fluviatilis*, 9 %), mais nettement plus faibles pour les brèmes commune (*Abramis brama*) et bordelière (*Blicca bjoerkna*) avec 24 % dans l'Elbe, pour seulement 4 % dans la Seine (mais il n'y a eu qu'une seule observation). Parmi les migrateurs anadromes*, seule la grande alose (*Alosa alosa*) n'a pas été recensée lors de cette étude. L'estuaire se singularise toutefois par la rareté de l'aloise feinte (*Alosa fallax*). La présence du saumon *Salmo salar* reste exceptionnelle, mais il est crédible d'espérer une amélioration de la situation dans les années à venir à condition de continuer les efforts entrepris sur la qualité de l'eau (oxygénation) et d'assurer la libre circulation de ces potamotoques* anadromes vers les frayères potentielles. Dans les milieux rivulaires* étudiés par pêche électrique, les niveaux moyens d'abondance sont médiocres en aval de Rouen, en secteur endigué. Entre Quillebeuf sur Seine et Rouen, le chenal est colonisé par un peuplement dominé par l'éperlan (*Osmerus eperlanus*). Dans la zone oligohaline, la prépondérance de l'éperlan (Figure 34) en termes d'abondance est encore plus marquée. Bien que la qualité de l'eau, notamment la teneur en oxygène dissous, se soit améliorée au cours des dernières décennies, la majeure partie de la zone endiguée reste très peu propice à l'ichtyofaune durant certaines périodes de l'année avec des valeurs avoisinant encore parfois des conditions anoxiques (<1mg/l). Les progrès effectués semblent pourtant porter leurs fruits car le retour de l'éperlan peut être associé à une amélioration de la qualité de l'eau.



Figure 34. L'éperlan, *Osmerus eperlanus*.

➤ Habitats

En amont, les fonctionnalités écologiques de la Seine peuvent aussi être appréhendées au travers de quatre habitats nécessaires à l'accomplissement du cycle de vie des poissons (Duhamel *et al.* 2005) : habitat de croissance des juvéniles (nourricerie), habitat d'abris, habitat de reproduction et habitat de nutrition.

La fonction de nourricerie de l'estuaire amont est réelle au vu des abondances saisonnières de certaines espèces benthiques (flet) et pélagiques* (éperlan, mulets). Les vasières en amont de Rouen constituent des sites d'accueil abondamment colonisés par les jeunes flets. En aval de Rouen, dans le secteur endigué, l'abondance de la ressource alimentaire pélagique ne semble pas être un facteur limitant pour les juvéniles d'éperlan et de sandre. Il n'en est pas de même pour les poissons dulcicoles dont les stratégies d'alimentation sont différentes, basées sur la présence d'hydrophytes, d'insectes ou d'invertébrés. Dans la zone endiguée, soumise au marnage et à des courants importants, ce type de ressource est le plus souvent totalement absent, rendant ainsi peu attractives les berges au sein desquelles les abris sont également rares.

La fonction de refuge est déterminante pour les poissons d'eau calme, pour lesquels la vitesse du courant constitue un facteur limitant : cette vitesse doit être inférieure à 0,6m.s⁻¹ pour les cyprinidés tels que l'ablette (*Alburnus alburnus*), la brème, la tanche (*Tinca tinca*), la carpe (*Cyprinus carpio*) ou encore le brochet (*Esox lucius*). Ces conditions sont largement dépassées en aval de Rouen. Les contraintes liées aux courants dans le lit du fleuve renforcent ici le rôle déterminant des annexes hydrauliques plus calmes, et la nécessité de connexions fonctionnelles entre la Seine et les zones humides adjacentes pour l'amélioration de la biodiversité du peuplement. Le brochet, par son absence totale en aval de Rouen, est un exemple flagrant du niveau de dégradation des habitats de l'estuaire de la Seine.

La fonction de frayère présente un bilan moins négatif, à l'exemple de l'éperlan dont les zones de reproduction se trouvent localisées entre Duclair et Caudebec en Caux. Cette fonction semble toutefois fortement dégradée et peut être totalement absente pour de nombreuses espèces du cortège dulcicole. Certains bras morts présents en amont font l'objet de fortes concentrations de brochets en période de reproduction, mais les pontes n'ont quasiment aucune chance de survie à cause du niveau de comblement des bras morts associé au marnage (vidange souvent totale à chaque marée) et au calibrage des débits pour les besoins de la navigation. Ce problème est récurrent pour les autres poissons phytophiles qui fraient sur les berges en milieu peu profond (brèmes, carpes, tanches, gardons ...).

La notion de réversibilité d'une situation médiocre est donc tangible et se rapporte avant tout aux progrès réalisés sur la qualité de l'eau. Cette notion est également valable pour les habitats, à l'exemple des rares milieux connexes néoformés suite à la rupture de digues, et qui jouent un véritable rôle de refuge et de nourricerie (Morin *et al.* 2007).

En aval de l'estuaire, une étude de la qualité des habitats

de nurserie de poissons a permis d'identifier un ensemble d'indicateurs de performances biologiques des juvéniles de poissons pouvant être considérées comme pertinents pour effectuer un diagnostic (Gilliers *et al.* 2006). D'autres indicateurs basés sur les populations piscicoles et leurs habitats ont également été développés. Les analyses mettent en évidence des relations entre la présence/abondance de juvéniles de poissons, dont les juvéniles de soles (Figure 35), et la faible bathymétrie, ainsi que la présence de sédiments fins. Les abondances de soles de l'année apparaissent liées à celles des peuplements associés (toutes espèces dont le macro-épibenthos) ainsi qu'à celles de certains groupes trophiques (détritivores, suspensivores et dépositivores) de la macrofaune pouvant servir de proies.



Figure 35. La sole commune, *Solea solea*.

Les travaux menés dans le cadre des études préalables à 'Port 2000' ont montré le rôle de nurserie joué par l'estuaire de Seine pour les juvéniles de poissons, mais un faible rôle pour les stocks de sole et de plie de la Manche Est, malgré une disponibilité suffisante en nourriture. Les perturbations d'origine anthropique pourraient expliquer ce dysfonctionnement. Les travaux récents ont donc eu pour objectif d'évaluer : i) la qualité de l'estuaire de Seine en tant que nurserie de poissons et ii) l'impact des perturbations anthropiques y compris le dosage des contaminants chez la sole. En effet, la qualité d'un habitat de nurserie pour les juvéniles de poissons résulte d'interactions complexes et ne peut être mesurée directement. Les analyses se sont aussi basées sur des comparaisons de sites de nurseries, à différentes échelles géo-

graphiques : Golfe de Gascogne et Manche Est (incluant l'estuaire de Seine), baie de Seine (trois sites dont l'estuaire de Seine) et estuaire de Seine (trois secteurs). Elles reposent sur la mesure d'indicateurs de performances biologiques, mesurés sur les juvéniles de soles, et ayant des temps de réponse et des niveaux d'intégration différents : i) indices morphométriques et de croissance récente (accroissements journaliers des otolithes) ayant des temps de réponse de quelques jours, et ii) taille et densité des individus nés dans l'année et l'année précédente, ayant des temps de réponse allant du mois à l'année.

Les résultats des dosages de contaminants effectués sur les jeunes soles confirment ceux réalisés sur les coquillages par le Réseau National d'Observation. En estuaire de Seine, la contamination des soles en PCB et Σ DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane), est dix fois supérieure à la moyenne observée sur les autres sites étudiés. Ce constat justifie les interrogations sur le bon développement des juvéniles de poissons au sein de cet estuaire. Les analyses menées à large échelle géographique font ressortir deux secteurs aux performances écologiques faibles en termes de croissance et de densité des juvéniles de soles : la Seine et la Gironde où les niveaux de contamination sont les plus élevés. Sur l'ensemble des sites étudiés, une corrélation négative a été mise en évidence entre les niveaux de contamination et la plupart des bioindicateurs* mesurés sur les juvéniles de soles (Gilliers *et al.* 2004 ; Gilliers *et al.* 2006 ; Le Pape *et al.* 2007).

À échelle géographique plus fine (estuaire et baie de Seine), les analyses révèlent également des disparités de performances biologiques des juvéniles de soles. En amont de l'embouchure de la Seine les indicateurs de croissance et de condition des jeunes soles sont significativement plus faibles qu'à l'aval et plus faibles que sur les deux autres sites de la baie (baie de l'Orne et baie des Veys). Ces différences de performances sont à mettre en relation avec les gradients locaux de qualité du milieu et notamment de contamination. Ces résultats montrent que les indicateurs de croissance des juvéniles sont pertinents à petite échelle géographique (Gilliers *et al.* 2006).

Les indicateurs poissons

En raison de leur position dans le réseau trophique, les poissons peuvent être utilisés comme indicateurs biologiques de la qualité des milieux. Trois indices ont été développés à partir des données recueillies dans les estuaires français et notamment en Seine :

- un indicateur multi-métrique développé par le CEMAGREF, qui tient compte :
 - des pressions anthropiques : rejets polluants (métaux lourds, polluants organiques, nitrates et phosphates), altération directe des poissons et de leurs habitats et environnement terrestre rivulaire sont intégrés dans un Indice Global de Pression. Cette démarche adaptée aux conditions françaises avec ses propres références et seuils est en cours de développement car la masse d'eau Seine aval est qualifiée de « en très bon état écologique » selon les indicateurs basque et britannique, ce qui paraît être en décalage avec la réalité selon les dires d'expert.
 - des paramètres hydro-morphologiques : débit, mélange, marnage, salinité surface de l'estuaire, du bassin versant, et de la zone intertidale.
 - des peuplements de poissons : richesse spécifique,

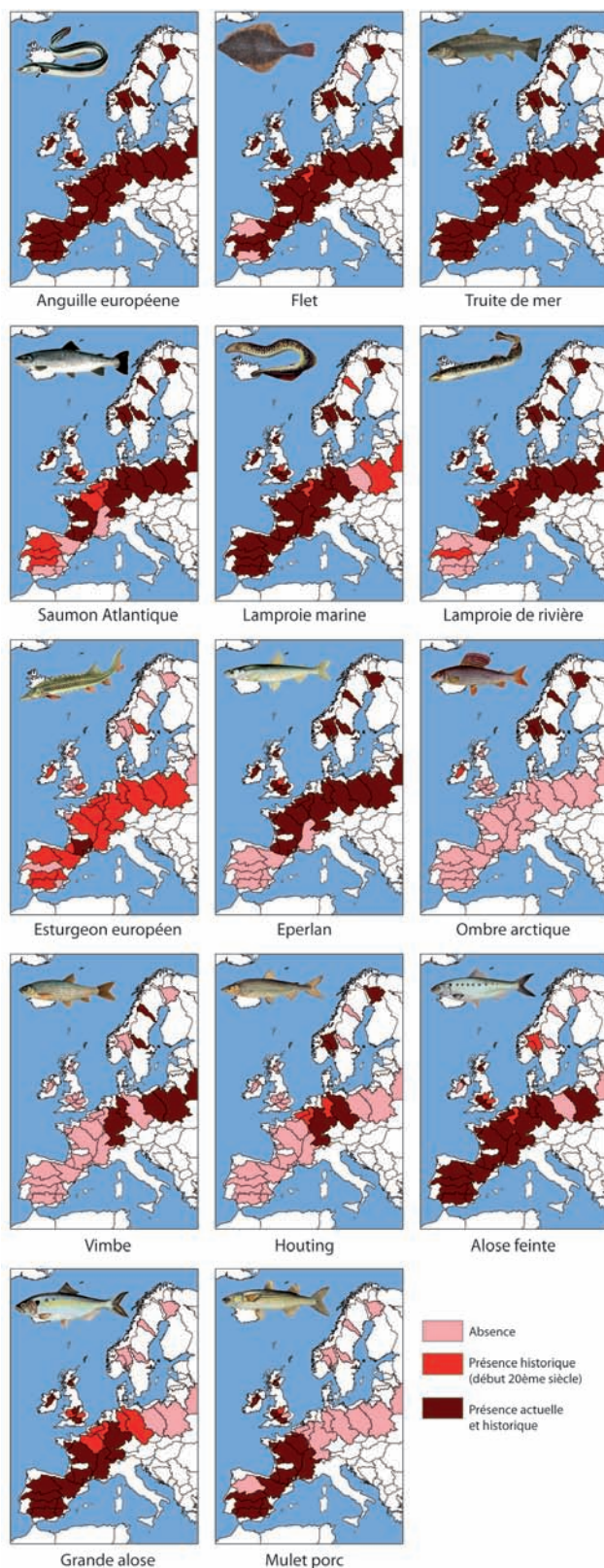
nombre d'espèces exotiques, migrants amphihalins, résidentes estuariennes, estuariennes dépendantes (phase juvénile dans l'estuaire ou migration estuarienne saisonnière), piscivores et invertivores.

L'Indice Global de Pression caractérise la Seine aval et la Seine amont comme des masses d'eau subissant de fortes pressions, contrairement à la Seine centrale, sensiblement moins affectée. Les trois masses d'eaux de l'estuaire de Seine appartiennent à un seul type hydro-morphologique. La richesse spécifique est plus élevée en aval en raison de l'importance du groupe des espèces d'origine marine.

- un indicateur de stress basé sur cinq descripteurs pathologiques (déformations, tumeurs, érosions, ulcères et nécroses révélant des traumatismes liés à l'environnement) et deux biologiques (lymphocystose et macro-parasitisme externe) réunis dans une grille de description développée par l'Association Santé Poissons Sauvages.
- un indicateur de stress environnemental basé sur l'éco-toxicologie, prenant pour modèle le medaka japonais.

➤ Identification d'espèces emblématiques de la reconquête

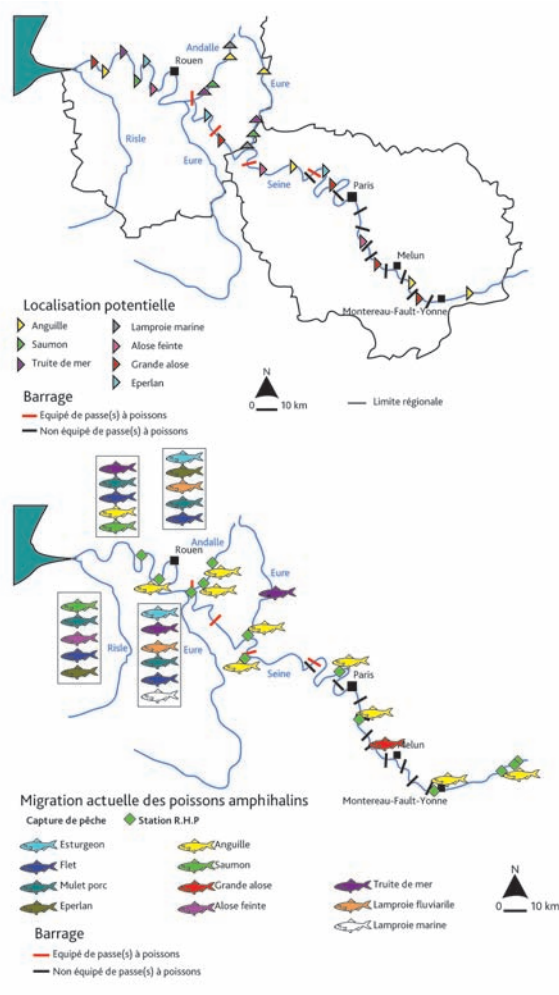
Les travaux menés par le CEMAGREF, l'INRA et le MNHN pour identifier des espèces de poissons migrateurs em-



Source de données : Rochard et al. 2007

Figure 36. Distribution observée et historique des migrateurs en Europe.

blématiques de la reconquête de la qualité de l'estuaire de Seine reposaient sur le croisement d'une approche écologique et d'une approche anthropologique. Pour cela, les scientifiques ont d'abord identifié, à l'aide de modèles, quelles sont les variables environnementales (essentiellement la température, mais aussi la superficie du bassin versant, la puissance du cours d'eau principal et la productivité continentale nette terrestre) expliquant la distribution historique des 14 espèces de poissons migrateurs en Europe occidentale (Figure 36), dont 11 ont fréquenté la Seine. Cette distribution est considérée comme étant leur distribution potentielle en cas de bonnes conditions écologiques (Figure 37).



Source de données : Rochard et al. 2007

Figure 37. Localisation potentielle et actuelle des migrateurs en Seine.

Pour certaines espèces, les sites favorables de la Seine dans les conditions actuelles concordent avec la présence historique des espèces : alose feinte, grande alose, esturgeon européen, saumon atlantique (Figure 37). Pour l'éperlan et le mulot porc, le modèle indique des probabilités de présence plus faibles alors que les espèces sont présentes. Avec le scénario de réchauffement climatique la Seine constituerait un environnement favorable pour les deux espèces d'aloses, l'esturgeon européen et le mulot porc; il serait sans doute encore acceptable pour le saumon atlantique et les deux espèces de lamproies mais risquerait de ne pas permettre le maintien de l'éperlan.

L'analyse des conditions d'habitats (débit, température, oxygène, faciès hydrodynamique, granulométrie, métaux lourds, nitrites) et leur accessibilité (connectivité longitudinale) rencontrés dans quatre secteurs sélectionnés du bassin (Estuaire, Andelle, Epte, Seine amont) a permis grâce à l'outil SIG de localiser dans ces secteurs les habitats existants et fonctionnels pour les différentes espèces de poissons migrateurs. A l'issue de cette phase d'analyse écologique, trois espèces peuvent être considérées comme espèce phare d'un secteur particulier du bassin : l'éperlan (malgré une incertitude sur la pérennité de sa présence en Seine) en aval, la grande alose en amont et la truite de mer pour les affluents. Les zones fortement soumises aux rejets industriels (agglomération rouennaise), même si elles ne font que quelques dizaines de kilomètres, représentent un frein à la colonisation de la Seine par ces migrateurs. Mais chaque zone présente les conditions minimales requises pour l'établissement de populations de ces espèces. Les captures récentes de grands migrateurs, disparus pour certains de la Seine il y a plus d'un siècle, convergent dans ce sens. Le retour de ces espèces met en évidence une sensible amélioration de la qualité du milieu. Le retour durable de ces poissons migrateurs en Seine passe par la poursuite de l'amélioration de la qualité du milieu, particulièrement dans le secteur aval, mais aussi par une gestion de la libre circulation, notamment à Poses, adaptée à un retour de la communauté de poissons migrateurs amphihalins. L'analyse anthropologique n'a pas pu identifier d'espèce emblématique, faute de perception forte des poissons par la société.

Peuplements benthiques

Les peuplements benthiques ont été étudiés au cours de Seine-Aval 3 essentiellement pour deux raisons. Tout d'abord, l'estuaire se comble naturellement dans sa partie aval via des apports marins, et il était donc opportun d'y étudier les réponses de l'environnement en terme de biodiversité benthique face à cette dynamique sédimentaire, en particulier au niveau des vasières subtidales. D'autre part, les aménagements successifs de Rouen à la mer ont eux aussi contribué à modifier, morceler voire isoler les entités écologiques pour aboutir à la compartimentation de l'écosystème estuarien (Dauvin *et al.* 2002). Le compartiment benthique a donc été particulièrement suivi pour tenter de mesurer l'impact du dernier aménagement majeur en date, Port 2000 (extension du Grand Port Maritime du Havre), et de ses mesures d'accompagnement censées en limiter les effets.

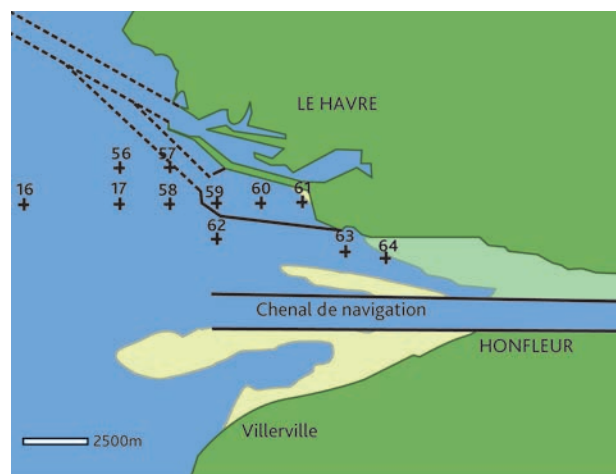
➤ Réponses de la biodiversité benthique des vasières subtidales face à la dynamique sédimentaire

Les connaissances sur la dynamique des sédiments superficiels de la baie de Seine orientale et les variations des paramètres chimiques associés (ammonium, oxygène) ont été largement améliorées. Ces travaux, menés dans le cadre d'une thèse (Janson 2007), permettent désormais de juger de l'état et de l'évolution à différentes échelles de temps du compartiment benthique au sein de plusieurs zones soumises à des dynamiques sédimentaires contrastées (Figure 38).

Ainsi la perturbation du réseau trophique de zones soumises à l'influence d'une sédimentation fine a été

recherchée à travers l'évolution saisonnière des peuplements macrobenthiques subtidaux. A un pas de temps plus resserré, ce sont les variations du compartiment benthique des fosses nord et sud et des fonds situés face à l'estuaire qui ont été recherchées.

Quelle que soit la saison considérée, au moins 60 % des stations échantillonnées à l'embouchure de la Seine, présentent des sédiments vaseux à vaso-sableux. Les sédiments sableux, plus rares, se localisent dans la partie externe de l'estuaire. L'évolution saisonnière des types sédimentaires ne met en évidence aucun gradient dans l'estuaire. Seule une tendance à l'envasement, remarquée au printemps dans la fosse sud, peut être observée. Parmi les 23 stations étudiées, seulement 8 conservent un type sédimentaire identique entre les mois de mars, mai et septembre. Les autres évoluent indépendamment. Les analyses effectuées ne permettent pas d'isoler d'ensembles aux frontières bien définies dans l'estuaire. Les résultats illustrent plutôt une juxtaposition de secteurs au sein desquels l'environnement sédimentaire évolue de façon asynchrone. Malgré la complexité de la sédimentologie dans l'estuaire de la Seine, les richesses spécifiques, les abondances et les structures des assemblages benthiques restent comparables à celles rencontrées au sein des communautés distribuées dans d'autres estuaires de zones tempérées. Les assemblages faunistiques identifiés se réfèrent dans leur grande majorité à la communauté des sables fins plus ou moins envasés à *Abra alba* et dans une moindre mesure à la communauté à *Macoma balthica* (Janson 2007).



Source de données : Desroy *et al.* 2007 ; BD-TOPO IGN, 2005

Figure 38. Localisation des stations benthiques suivies dans le cadre de la thèse d'A.-L. Janson.

L'évolution à petite échelle de temps met en avant des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques très différentes entre les stations étudiées. Soumises aux dépôts de dragage de nature sableuse en provenance du port de Rouen, la zone du Kannick se caractérise par la régularité des caractéristiques physiques de son substrat (Desroy *et al.* 2007). Si la richesse spécifique totale cumulée à l'issue de l'ensemble du suivi semble élevée, le nombre d'espèces recensées au cours des différentes campagnes de prélèvement est toutefois faible. Face au débouché en mer de la Seine, la sédimentation est car-

Les peuplements benthiques amont

Les organismes benthiques de l'estuaire de Seine vivant en eau douce n'ont été identifiés pour la première fois au niveau spécifique qu'en 2005-2006 par le bureau d'étude EcoConsult. Plus d'une centaine de taxa ont été échantillonnés, dont 85 n'avaient jamais été recensés en estuaire de Seine. Dix d'entre eux seulement sont des espèces sensibles aux perturbations, ce qui traduit le déséquilibre du milieu. La zone en amont de Rouen s'est révélée être la plus diversifiée (124 taxa) avec notamment des espèces sensibles à la pollution. Celles-ci disparaissent en aval de l'agglomération rouennaise alors que la diversité diminue également (26 taxa en aval de La Bouille). 70 % des individus collectés appartiennent à huit espèces. Le crustacé *Gammarus salinus* (Figure C) est le plus abondant ($\frac{1}{4}$ des individus collectés) et l'un des plus fréquents ($\frac{1}{2}$ des stations visitées). Les sept autres sont l'annélide *Psammoryctides barbatus*, les insectes *Glyptotendipes* (*Glyptotendipes*) *pallens*, *Dicrotendipes nervosus* et *Polypedilum* (*Tripodura*) *scalaenum* (ces deux derniers étant les plus fréquents), les mollusques *Bithynia* (*Bithynia*) *tentaculata* et *Sphaerium solidum* et le crustacé *Asellus* (*Asellus*) *aquaticus*.



Figure C. *Gammarus salinus*.

Dix espèces non-indigènes ont été trouvées, au premier rang desquels l'annélide invasif *Hypania invalida* (Figure D-B), qui provient de la zone Ponto-Caspienne. Il a pour la première fois été signalé à Rouen en 2001 mais son extension géographique est déjà importante (dans 1/4 des stations entre Poses et La Bouille). Se trouvent aussi en provenance de cette région, l'annélide *Branchiura sowerbyi*, le crustacé *Dikerogammarus villosus* et le bivalve *Dreissena polymorpha* (signalement dès 1867 pour ce dernier ; Figure D-A). L'estuaire de Seine abrite également un mollusque venu d'Europe de l'Est (*Lithoglyphus naticoides*), deux mollusques venus d'Asie (*Corbicula fluminea* et *C. fluminalis*) et deux crustacés et un plathelminthe venus d'Amérique (*Crangonyx pseudogracilis*, *Orconectes limosus* et *Dugesia tigrina*). Le principal vecteur de dissémination de ces espèces, qui puisse expliquer leur présence en estuaire de Seine, reste l'Homme, au travers de la navigation et des interconnexions qu'il crée entre les rivières européennes.

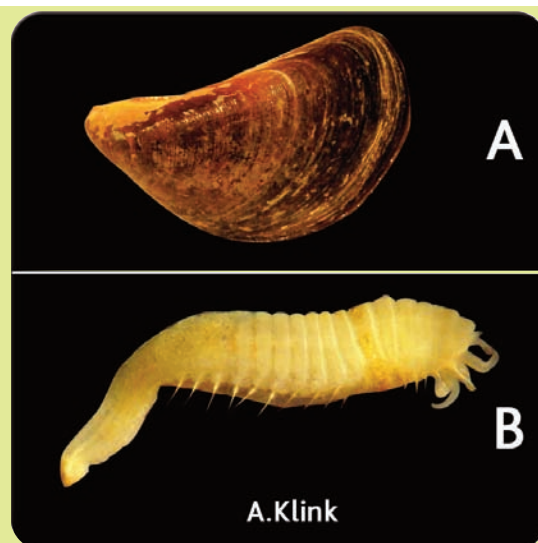


Figure D. Des espèces non-indigènes en estuaire de Seine. A : *Dreissena polymorpha* ; B : *Hypania invalida*.

Le cas de la Dreissène :

Faute d'identification génotypique, les dreissènes de l'estuaire de Seine sont regroupées sous le nom scientifique de *D. polymorpha*. Il est pourtant vraisemblable, qu'une autre espèce soit présente : *D. bugensis* (Garnier *et al.* 2009). Plusieurs colonies distinctes coexistent dans le fleuve et ses affluents. Les colonies sont plus denses dans l'estuaire que dans les rivières situées en amont (Akopian *et al.* 2001) et ont un potentiel de renouvellement très important. Ces organismes, plus communément appelés « moules zébrées », vivent fixés sur le substrat. Ils posent de véritables problèmes écologiques, économiques et industriels en Europe et aux Etats-Unis. Ils facilitent l'installation d'autres espèces exotiques. Ils entrent en compétition pour la nourriture avec de nombreux autres organismes et modifient par leur activité de filtration la turbidité des eaux, ce qui a des conséquences sur les peuplements végétaux et piscicoles. Mais bien qu'invasive, la moule zébrée a parfois des effets positifs sur l'environnement, notamment dans les milieux déjà fortement perturbés, en créant par exemple de nouveaux habitats et en représentant une nouvelle source de nourriture pour d'autres espèces. Bien que très tolérante à de nombreux facteurs, la moule zébrée n'en reste pas moins un organisme sensible à certaines pressions. C'est ce qui explique sa quasi-disparition lors de l'été 2003 dans l'estuaire. En estuaire de Seine, la maturité sexuelle intervient au moment où la température dépasse les 13-15 °C, généralement fin avril, et la ponte fin mai. La période de reprise de la gamétogenèse est en revanche mal définie et peut intervenir à l'automne ou en hiver et se prolonger durant les mois froids. La dynamique de population de cette espèce a été modélisée. Son taux de fixation est d'environ 0,1 j⁻¹, son taux de croissance de 11 μm.j⁻¹ et son taux de mortalité de 0,4 j⁻¹. Les scientifiques se servent de cette moule d'eau douce comme d'une espèce sentinelle pour mesurer les niveaux de contamination chimique de l'environnement par exemple en PCB ou en HAP et les comparer avec ceux obtenus dans d'autres fleuves de part le monde et en baie de Seine chez la moule marine *Mytilus edulis*.

actérisée par des apports diffus et continus mais limités, issus de processus de remaniements. Les bancs d'Amfard et des Ratelets sont caractérisés par des fonds alternativement constitués de sable et de vase. La fosse sud est caractérisée par des dépôts temporaires vaseux très variables. Les variations de faciès observées impliquent l'existence de mécanismes de dépôts temporaires, caractérisés par des périodes ponctuelles successives d'érosion puis de dépôt de sédiments d'origine diverses. Les résultats biologiques reflètent la compartimentation de l'estuaire en distinguant les assemblages macrobenthiques situés dans son croissant externe (rade de la Carosse et ouest du Banc des Ratelets) de ceux localisés dans la fosse nord d'une part, et dans la fosse sud d'autre part. En domaine marin, les assemblages évoluent de façon comparable, sans présenter de modification brusque au cours du suivi. Tel n'est pas le cas des assemblages situés dans les fosses dont les dynamiques, beaucoup plus chaotiques, présentent plusieurs points de rupture au cours du suivi. L'évolution de la richesse en espèces et celle des abondances de la macrofaune sont très peu corrélées aux paramètres physiques et chimiques, vraisemblablement en raison de temps de réponse différents. La dynamique bio-sédimentaire s'articule autour de deux phases : une première phase printanière, durant laquelle la faune est sous l'influence de dépôts fins et une seconde phase, entre juin et décembre, au cours de laquelle les dépôts sableux deviennent plus importants. La sédimentation reste, quelque soit la période considérée, caractérisée par d'intenses épisodes de transport de sédiment. Les dépôts, souvent temporaires et principalement observés lors de la période d'étiage ont des conséquences sur la structure et le fonctionnement des communautés benthiques. Cependant, il est difficile de dégager une règle générale puisqu'aucune corrélation ne se dessine entre l'amplitude de la fluctuation observée au sein de la faune et l'intensité/la nature du dépôt sédimentaire. En dépit de cette absence de corrélation, les épisodes de transport sédimentaire et de dépôts sont un facteur structurant des communautés benthiques. Les effets du vent et de la houle sur l'évolution spatio-temporelle de la faune benthique pourraient être plus importants que pressentis jusqu'alors. Bien que les milieux estuariens soient reconnus pour être des systèmes naturellement variables, cette situation est exacerbée dans l'estuaire de la Seine notamment du fait de l'endiguement de la Seine et de la réduction de la surface totale de l'estuaire (Janson 2007).

La résistance des organismes benthiques à un envasement de quelques centimètres pendant des durées variables de la semaine au mois a été testée expérimentalement afin de mesurer l'influence d'un événement sédimentaire sur la survie de la macrofaune en période hivernale et en période printanière, lors du recrutement. Paradoxalement, les adultes semblent moins bien adaptés que les juvéniles à des ensevelissements sédimentaires brusques (Janson 2007).

➤ Impact de Port 2000 et des mesures d'accompagnement sur le benthos

L'évolution des peuplements benthiques intertidaux a été suivie par la Maison de l'Estuaire et la Cellule de Suivi du Littoral Normand de 2000 à 2005 dans les parties polyha-

line* et mésohaline* de l'estuaire. Chaque automne, 42 stations réparties sur cinq radiales dans la fosse nord et deux dans la fosse sud ont été prospectées. Ce suivi a révélé que la richesse spécifique décroît fortement de l'aval vers l'amont et du Sud vers le Nord et que cette tendance s'accroît au cours du temps. Les abondances dépendent en revanche principalement de la topographie et de la granulométrie.

En vasière nord, y compris dans le méandre, l'abondance de la polychète *Hediste diversicolor* se réduit progressivement et sa biomasse devient faible (< 1 g PSLC.m² en 2004 en certaines stations).

Le suivi réalisé en huit stations à l'intérieur du reposoir sur dune a permis de constater l'installation progressive d'espèces de la haute slikke caractéristiques du peuplement macrobenthique à *Macoma balthica* auxquelles s'ajoutent quelques espèces de la limite de la slikke et du schorre* (hydrobiidés). Cette colonisation rapide des vasières avait déjà été constatée lors de la création de la vasière artificielle en compensation de la construction du Pont de Normandie (Bessineton 1998).

Le suivi de la macrofaune benthique subtidale et des paramètres sédimentologiques associés comprend deux campagnes annuelles (mars et septembre). Le réseau de référence comprenait 54 stations en septembre 2000. Depuis septembre 2002, il en compte un peu moins de 30 (Figure 39). À l'échelle de l'ensemble de l'estuaire les peuplements benthiques demeurent sensiblement identiques à ceux décrits dans la référence mais les limites de pénétration des zones occupées par les coques (*Cerastoderma edule*) et les pectinaires (*Pectinaria (Lagis) koreni*) ont sensiblement migré vers l'aval en fosse nord. Dans le contexte particulier de moindres débits de la Seine, depuis 2001, il est observé une tendance globale à la diminution des teneurs en particules fines et à la progression des sables dans les sédiments de l'estuaire. Il est donc difficile d'imputer un effet des travaux Port 2000 sur la macrofaune benthique à l'échelle de l'estuaire entier. En analysant les résultats, zone par zone, il a été constaté une réduction de la macrofaune benthique en fosse nord dans la zone située au Sud immédiat des nouvelles digues de Port 2000 où ont eu lieu les dragages d'accompagnement et le rétrécissement de l'embouchure de la fosse de flot. Cet impact est détectable dès la campagne de mars 2004 alors que les dragages d'accompagnement se sont poursuivis jusqu'à la fin de 2003. Dans les zones médiane et amont de la fosse nord, il est plutôt observé une légère tendance à l'augmentation de la richesse spécifique (Janson 2007). Les dragages du chenal environnemental s'étant achevés en juillet 2005, il est encore trop tôt pour apprécier les effets de son creusement sur la faune benthique. Dans les autres parties de l'estuaire, notamment dans la fosse sud, les peuplements montrent une tendance croissante avec une installation soutenue du ver tubicole *Owenia fusiformis* qui progresse par rapport à la situation de référence en septembre 2000.

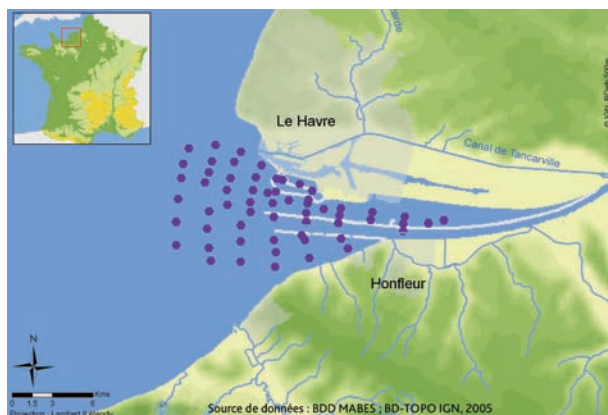


Figure 39. Carte des stations de suivi benthique dans le cadre du suivi Port 2000.

Puisqu'il représente une ressource notable pour l'ichtyofaune, au même titre que la macrofaune, le compartiment suprabenthique* a été également suivi dans la fosse nord de l'estuaire de la Seine d'octobre 2002 à mars 2005 (six campagnes semestrielles et cinq stations selon un gradient aval-amont) puis comparé avec un état antérieur établi en 2001. Le peuplement est diversifié : 100 taxa recensés, dominance des crustacés amphipodes (31 taxons) et des mysidacés (14 taxons) ; il est noté une diversification plus importante du peuplement à l'aval de la fosse nord au niveau de l'embouchure de la Seine. Un seul peuplement marin caractéristique de celui rencontré ailleurs dans la zone subtidale peu profonde de la Manche a été identifié dans la fosse nord, ce qui confirme la faible connexion de la fosse nord avec le chenal de navigation où un peuplement estuarien moins diversifié mais avec des abondances plus fortes a été identifié (Mouny *et al.* 2000). Le peuplement montre une structuration temporelle saisonnière nette entre les prélèvements réalisés en hiver (mars) et ceux de la fin d'été (septembre-octobre), à laquelle s'ajoute une faible variabilité inter-annuelle. Aucun impact des travaux Port 2000 ne peut être identifié par rapport à la situation de référence de 2001.

Les résultats acquis à la fin de l'année 2006 montrent qu'il n'est pas constaté de dommages importants sur l'écosystème pour les compartiments benthiques et suprabenthiques. Mais, il n'y a pas encore assez de recul et les conditions météorologiques particulières caractérisées depuis 2001 par l'absence de crues, ne permettent pas de tirer des conclusions définitives. Du fait de ces conditions climatiques et du peu de recul, les résultats sont loin d'être définitifs, notamment en ce qui concerne l'engraissement des vasières et le maintien nécessaire d'une circulation hydraulique suffisante dans les vasières et les filandres.

Flux trophiques

Les bases mathématiques de l'analyse du fonctionnement et de la structure d'un système ont été posées par les économistes. Les écologues ont ensuite développé, sur la base de ces équations, une méthode d'analyse du réseau trophique (Network Analysis) capable de produire des indices synthétiques informatifs sur l'état d'un écosystème (Rybarczyk *et al.* 2003). Le logiciel ECOPATH (Christensen & Pauly 1992) a permis de valider, d'un point

de vue bioénergétique (production, consommation et respiration notamment), les biomasses connues dans les compartiments biologiques qui ont ensuite été introduites dans l'analyse.

C'est dans ce contexte scientifique qu'une approche intégrée a été entreprise, fondée sur la modélisation et l'analyse des réseaux trophiques, afin de déterminer des indices qualifiant et quantifiant au mieux le fonctionnement écologique de l'estuaire moyen. Les résultats de l'analyse ont montré que l'estuaire de la Seine présente une maturité structurelle de 19 % soit plus que la Gironde (4 %) et la baie de Somme (12 %) mais moins que la baie de Dublin (32 %) (Rybarczyk *et al.* 2003). Son niveau d'organisation est à seulement 33 % de son potentiel maximal, ce qui le place à un niveau faible par rapport aux autres systèmes européens. Cette première analyse n'a pas pris en compte l'hétérogénéité fonctionnelle de la Seine caractérisée par un grand nombre d'unités écologiques. Sept unités fonctionnelles ont donc ensuite été identifiées : chenal polyhalin, chenal oligo-mésohalin, vasière intertidale nord, fosse nord, vasière intertidale sud, fosse sud et embouchure. Les trois premières unités jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement de l'estuaire ; leurs flux exportés sont très élevés. Ceci met en évidence les apports énergétiques allochtones (surtout dans le chenal) et autochtone (production microphyto-benthique de la vasière Nord). Le rôle joué par les deux vasières, et la vasière Nord en particulier, est primordial dans les flux de carbone. La simulation de la disparition d'une unité fonctionnelle a permis de mettre en évidence les changements de relation entre les différents groupes fonctionnels ou espèces constituant le réseau trophique de l'estuaire de la Seine.

Perception économique et sociale des problématiques estuariennes

C'est au cours de Seine-Aval 3 que deux équipes de Sciences Humaines et Sociales (SHS) ont intégré le programme, l'une en économie (Université de Rouen) et l'autre en sociologie (Université de la Méditerranée).

Les études relatives à l'économie de l'estuaire de Seine

La première étude (Rybarczyk *et al.* 2003) concerne l'usage des ressources en eau dans les processus productifs comme facteur de production à part entière, qui est une des spécificités de l'estuaire de la Seine. Fondée sur un travail de thèse (Laroutis 2006), l'étude a permis d'explicitier les termes d'un arbitrage constant, souvent implicite, entre fonctionnalités productives et fonctionnalités écologiques de l'estuaire de la Seine. Elle a plus particulièrement souligné :

- les spécificités territoriales et les facteurs de localisation des firmes sur le territoire (en particulier, le rôle joué par la présence de la Seine dans ces spécificités territoriales), grâce notamment aux notions d'externalités* pécuniaires ou encore d'externalités technologiques ;
- le type d'organisation interne des secteurs industriels : l'identification des relations de sous-traitance, de dominance éventuelle qu'entretiennent les acteurs du secteur industriel permet de mieux comprendre les facteurs de dif-

Eurytemora affinis

Eurytemora affinis est l'espèce de copépode (Crustacé planctonique) dominante en estuaire de Seine et dans tous ceux de l'hémisphère nord en général, même si ses populations ont tendance à se distinguer de plus en plus génétiquement les unes des autres. Il a été montré le lien qui existe entre sa fécondité et l'état de l'environnement, ainsi que sa capacité à bioconcentrer certains polluants (>300 pour le 4-NP par exemple), notamment les PCB, les HAP, les alkylphénols et les hormones stéroïdiennes (Cailleaud *et al.* 2007). De plus, elle est capable d'éliminer rapidement les polluants accumulés lorsqu'elle est placée dans un milieu non contaminé. Elle a donc été pressentie pour servir d'indicateur de la qualité du milieu. Trois équipes ont étudié ce copépode en combinant les approches expérimentales (in situ et en laboratoire) et la modélisation : le LOG à Wimereux, le LEMA au Havre et le LPTC à Bordeaux.

Les principaux mécanismes opérant à l'échelle de la marée ont été élucidés (Figure E). Ainsi, les faibles densités de copépodes sont associées aux faibles vitesses du courant pendant les flots et les jusants. Au fond, les copépodes sont plus abondants pendant le jusan que pendant le flot et inversement en surface. La proportion des différents stades de développement, le sex-ratio et la proportion de femelles ovigères / non ovigères sont dépendantes des cycles de marée et de la profondeur (Devreker *et al.* 2008). Leur production, ainsi que le positionnement de leur maximum de population, dépendent de l'intensité du débit de la Seine à Poses. La température influe à l'échelle inter-saisonnière en agissant sur le taux de développement et la reproduction. Mais la salinité influe plus que la température sur la longévité d'*E. affinis*. Une stratégie d'échantillonnage fiable et reproductible a donc pu être mise au point à partir de ces connaissances pour suivre cette population à différentes échelles spatio-temporelles.

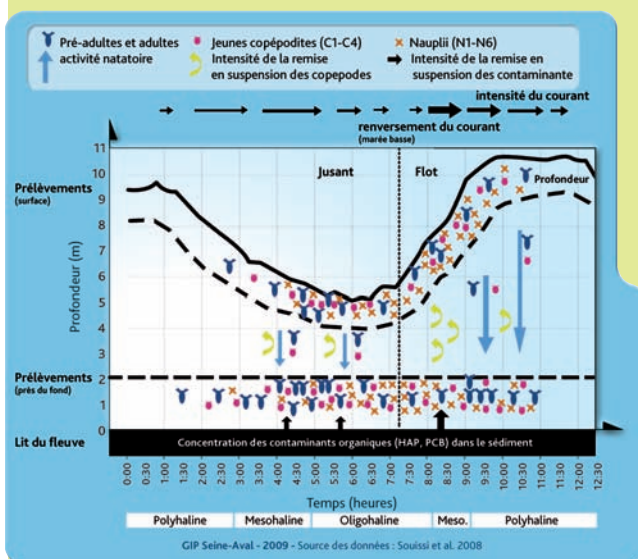


Figure E. Schéma conceptuel de la dynamique de population d'*Eurytemora affinis* dans l'estuaire de Seine d'après les hypothèses de Morgan *et al.* 1997 et Schmitt *et al.* 2008.

Des expériences réalisées en laboratoire ont mis en évidence une relation entre la taille des femelles et leur fécondité optimale, permettant ainsi de disposer d'un premier indicateur de l'état physiologique de la population. De plus, leur comportement natatoire pourrait également servir d'indicateur des effets de polluants. En effet, il a été montré que des contaminants organiques, même à de faibles concentrations, induisaient des modifications spécifiques de leur expression protéique et donc modulaient certains processus cellulaires et par la même leur comportement. Ainsi, la vitesse de déplacement augmente nettement après exposition aux alkylphénols et les directions empruntées sont plus nombreuses, suggérant donc une désorganisation des déplacements, ce qui pourrait entraîner des perturbations dans les rencontres mâles / femelles lors de l'accouplement. La survie des nauplii, qui héritent d'une partie du passé environnemental de leur mère, pourrait également être un bon indicateur de l'état de stress des larves (Devreker *et al.* 2004).

Un modèle individu-centré d'*E. affinis* a été développé, permettant ainsi de prendre en compte la variabilité individuelle des traits de son cycle de vie (temps de latence entre deux pontes, temps de développement embryonnaire, longévité, taille de la ponte ; Figure F). Cet outil permet de simuler les effets de différents facteurs sur la reproduction de ce copépode (Dur *et al.* 2009). La température, en sus de la nourriture, est le principal facteur qui affecte les processus démographiques de cette espèce, ce qui n'est pas sans intérêt dans le contexte général de réchauffement climatique. Il semble que son optimum serait à une température de 15°C et une salinité de 5 à 15, lui permettant ainsi de vivre environ 60 j et de produire environ 600 œufs.

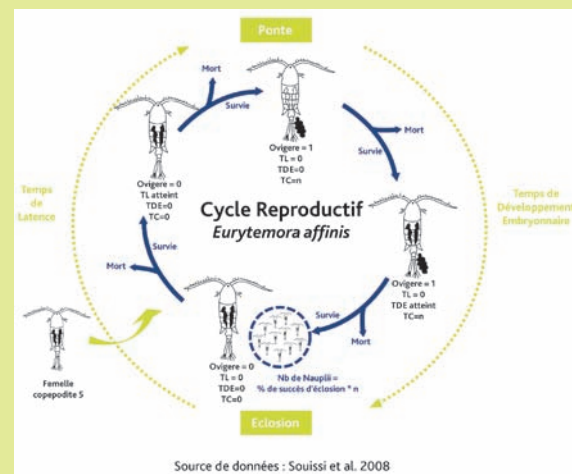


Figure F. Développement du modèle de reproduction d'*Eurytemora affinis*.

Les phytocénoses fluviales

Les macrophytes aquatiques participent au fonctionnement de l'écosystème estuarien. Ils sont capables de coloniser de très grandes surfaces, essentiellement au niveau des rives et des zones peu profondes. Ils ont été étudiés dans la partie amont de l'estuaire, de Poses à Caudebec-en-Caux, par le Conservatoire Botanique National de Bailleul. L'estuaire de Seine, dont le taux de recouvrement végétal est d'environ 6,6 %, se caractérise par une faible diversité floristique et phytocénotique et par une forte biomasse (43 g de matière sèche par m²). Il est possible de distinguer :

Quatre tronçons homogènes :

- la confluence avec l'Eure, le plus riche avec 12 types de végétation,
- les îles en amont de Rouen, le deuxième en richesse avec sept types de végétation,
- les environs de La Bouille, le plus recouvert (12%) mais surtout par des algues,
- la partie en amont du Trait, avec six types de végétation très localisée en sus des algues.

Trois communautés algales :

- à *Vaucheria* dominants,
- à *Cladophora* dominants,
- à *Rhizoclonium* dominants.

Neuf communautés végétales dont les surfaces relatives sont connues :

- la communauté bryophytique à *Cinclidotus fontinaloides*,
- la végétation de plantes aquatiques flottantes non enracinées des eaux eutrophes à hypertrophes (*Lemnion minoris*),
- l'herbier aquatique enraciné, plus ou moins pionnier des eaux calmes mésotrophes à eutrophes (*Potamion pectinati*),
- la communauté à *Nuphar lutea* dominant (*Nymphaeion albae*),
- la communauté basale à *Ludwigia grandiflora* (*Glycero fluitantis* – *Sparganion neglecti*),
- la végétation pionnière des bordures perturbées à émergence estivale des eaux calmes eutrophes (*Oenanthion aquaticae*),
- la végétation pionnière annuelle et hygrophile des sols limoneux et argileux enrichis en azote, s'asséchant partiellement en été (*Bidention tripartitae*),
- les roselières des sols eutrophes à éléments grossiers dominants et des eaux stables (*Phragmition communis* ; Figure G)
- les mégaphorbiaies des sols eutrophes à hyper-eutrophes (*Convolvulion sepium*)

Une ou plusieurs strates de plantes vasculaires, puis une strate de bryophytes et une strate d'algues macrophytiques sont systématiquement rencontrées.

L'estuaire de Seine abrite des espèces rares et même parfois inscrites sur liste rouge, comme la Naiade commune (*Najas marina*). Mais la mauvaise qualité des eaux engendre l'élimination de nombreuses espèces végétales sensibles (certaines renoncles et potamots par exemple ; Figure H). Les bryophytes sont quasiment absentes de l'estuaire. Les eaux riches en nutriments favorisent le développement de certaines communautés végétales. En

aval de Rouen, les communautés algales représentent de 80 à 100 % des surfaces occupées par la végétation, ce qui témoigne de fortes perturbations. Et en amont, la part des peuplements dominés par la Jussie à grandes fleurs (*Ludwigia grandiflora* ; Figure I), espèce invasive, devient alarmante (31% de la biomasse). Les études montrent la nécessité de mettre en œuvre des mesures de gestion conservatoire des habitats riverains abritant des végétations fragiles ou des espèces menacées de disparition.



Figure G. Une communauté végétale caractéristique de l'estuaire de Seine : une roselière.



Figure H. Une espèce sensible : les potamots (*Potamogeton nodosus*).



Figure I. Une espèce invasive : la Jussie à grandes fleurs (*Ludwigia grandiflora*).

fusion de décisions d'aménagement de la ressource, ou encore de difficultés d'accès à la ressource, sur l'ensemble du tissu productif ;

- la dynamique d'évolution de la structure industrielle qui donne un panorama de l'évolution du tissu industriel dans les années à venir, identifie les secteurs en déclin et en expansion.

- le rôle des infrastructures de transports, comme facteur de croissance économique régionale, mais aussi comme sources d'externalités négatives, d'impacts négatifs sur l'environnement.

La seconde étude porte sur la valorisation monétaire des fonctionnalités des zones humides de l'estuaire de la Seine (Laroutis 2006). Le travail a porté sur la caractérisation des externalités environnementales liées aux usages productifs* de l'estuaire de la Seine. Ces usages productifs ont une contrepartie monétaire directe, tandis que les fonctionnalités écologiques sont appréciées en dehors de toute référence à un système de valeur. Afin de remédier à cette situation, les auteurs ont évalué monétairement les fonctionnalités des zones humides à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, en recourant à la méthode de l'évaluation contingente*. L'objectif était d'abord d'évaluer le consentement des ménages habitant dans l'estuaire de Seine à payer pour la mise en place d'un programme de préservation des zones humides. Derrière cette tentative d'évaluation monétaire, l'enquête s'est attachée à l'étude du comportement (fréquentation, usage...) des populations face aux zones humides et plus généralement face aux espaces naturels. Les résultats font apparaître que seuls 18 % des individus fréquentent les zones humides. Les fréquentations sont inégales selon les espaces. Ce sont des espaces à vocation récréative pour les visiteurs, dédiés à la promenade (69 %), à l'observation de la faune (13 %), à la pêche (7,3 %), à la chasse (3,6 %) et au sport (5,4 %). Un programme de préservation des zones humides relève d'une sensibilité écologique contemporaine, puisque 92 % des sondés y sont favorables. Cet engouement est renforcé par le public féminin et les plus âgés. Le consentement à payer pour un tel programme est évalué à 41,4 €. Toutefois, les habitants considèrent que ce n'est pas à eux de payer et qu'une telle action n'est pas prioritaire.

Les services rendus par les 140 000 ha de zones humides de l'estuaire sont valorisées par les habitants entre 7,25 et 21,89 millions d'euros par an. Les coûts de la disparition au fil du temps de 9 000 ha seraient donc compris entre 4,66 et 14,07 millions d'euros par an. La valeur de ces services se révèle ainsi très inférieure aux bénéfices de l'industrialisation de ces 9 000 ha de zones humides estimés à partir du nombre d'emplois générés (57 000 salariés) et des salaires versés, de l'ordre de 1,64 milliard d'euros par an.

Ces chiffres retranscrivent la situation délicate que connaissent les zones humides. En effet, la valeur accordée aux zones humides par les habitants (520 €/ha) est supérieure aux coûts de leur préservation (400 €/ha), ce qui justifierait leur sauvegarde. Cependant, la valeur estimée par les habitants est très nettement inférieure aux bénéfices de l'industrialisation de ces espaces naturels

(180 000 €/ha) ce qui inciterait à donner la priorité à l'industrialisation. Par ailleurs, la comparaison usage productif de type agricole et usage non-productif des zones humides met en évidence que les bénéfices d'une utilisation agricole face à une restauration des zones humides s'inscrivent dans un rapport de 1 à 24 (les bénéfices attendus de la restauration sont de 1,5 million sur six ans contre 36 millions d'euros de production pour un usage agricole).

Ainsi, l'utilisation productive des zones humides générerait des bénéfices bien plus élevés qu'une utilisation non-productive. Afin d'affiner les résultats obtenus, il conviendrait de tenir compte du coût des pollutions engendrées par les entreprises qui s'installeraient dans les zones humides, ce qui diminuerait les bénéfices.

Les études sociologiques

Dans le cadre de Seine-Aval 3, quatre études sociologiques ont été réalisées par l'équipe de sociologues et d'ethnologues de l'Université de la Méditerranée.

La première étude (Sirost *et al.* 2005) a porté sur les usages sociaux du littoral et les variations paysagères à travers l'exemple de la perception du phénomène de l'envasement des plages du Calvados par ceux qui en font un usage direct (Figure 10). La recherche a été menée à la fois par la constitution d'un corpus de données socio-historiques, d'observations *in situ*, de la passation de questionnaires sur trois plages sites (Deauville, Villers sur Mer, Blonville sur Mer) et enfin par la réalisation d'entretiens semi-directifs auprès d'usagers, d'institutionnels et de professionnels. Les résultats montrent qu'il existe un décalage entre la perception du phénomène d'envasement par les experts scientifiques et la perception de visu sur les plages puisque plus des deux tiers de la population interrogée ne constate aucune trace de vase sur les plages de la côte fleurie. Le phénomène d'envasement, et sa dangerosité, est ainsi largement méconnu de la population. Par ailleurs, la culture balnéaire, qui s'est construite sur l'aménagement et l'esthétisation des plages et de leur abord, 'refuse' la vase. *A contrario*, la culture naturaliste, qui est minoritaire, valorise la vase et regrette sa régression.

La seconde étude concerne les attentes et les perceptions de la population locale par rapport à la restauration environnementale de l'estuaire de la Seine. L'enquête se proposait d'évaluer la connaissance des processus de restauration de l'environnement et des mesures compensatoires liées à Port 2000. L'enquête ethno-sociologique a été menée entre juin et juillet 2005 à partir de 400 questionnaires et 35 entretiens semi-directifs enregistrés sur trois sites : Honfleur, Caudebec-en-Caux et Rouen (80 % des personnes interrogées habitent en Normandie). Il apparaît que l'image de l'estuaire reste focalisée sur les espaces verts (49 %), le bâti (52 %), l'industrie (42 %), les oiseaux (37 %), les zones humides (22 %) et les poissons (17 %). D'emblée, le lien avec les reposoirs, les vasières et nourricières, semble fort éloigné dans la vision homogène de l'habitant moyen de l'estuaire. Les préoccupations des individus envers leur lieu de vie confirment cette tendance. Ils avouent s'inquiéter davantage de la qualité paysagère et du patrimoine industriel que d'une

niche écologique dont ils semblent indifférents. Si les habitants affichent une inquiétude relative à la pollution industrielle, ils semblent ignorants de la biodiversité de leur milieu et notamment aux zones humides. En outre, les espaces concernés par des actions de restauration environnementale sont peu fréquentés : Marais Vernier (43 %), Parc naturel régional (41 %), vasières (16 %). Les quais aménagés (70 %) et les plages (80 %) sont préférés. C'est donc le côté récréatif des espaces qui mobilise et attire les populations. Près de 90 % de la population sondée déclare ne pas avoir connaissance des mesures compensatoires liées à Port 2000 et le nombre moyen de mesures connues n'est que de 1,7/5. C'est l'action la plus médiatisée et dont l'actualité est la plus proche qui est la mieux connue : l'île aux oiseaux au large d'Honfleur avec 31,3 % de réponses positives. Viennent ensuite l'aménagement des vasières (31 %), la réfection des digues du chenal de Rouen (21 %), l'aménagement hydraulique des zones humides du Hode (11 %) et le reposoir sur dunes (9 %). Il convient de noter que plus les personnes interrogées sont en prise directe avec les actions de restauration, plus elles les citent. Pour les habitants de l'estuaire, les actions de restauration environnementale s'apprécient selon une double logique : les usages loïsibles* et l'esthétique paysagère. Concernant un scénario futur de gestion de l'estuaire de Seine, les populations se prononcent majoritairement pour une conciliation réfléchie du développement industriel et de la préservation de l'environnement (74 %). Près d'un quart des sondés se prononce plus radicalement pour une cessation de toute activité industrielle afin de laisser la nature se régénérer.

La troisième étude concerne la perception du risque chimique chronique lié à la qualité de l'eau chez les acteurs et les usagers de l'estuaire de la Seine (Sirost *et al.* 2006). Une enquête socio-ethnographique a été menée en 2006 ; elle repose sur une collecte documentaire auprès de différents organismes de Haute-Normandie (DDASS, DIREN, AREHN, Agences de l'eau, DRIRE...), sur la passation de 500 questionnaires répartis sur quatre villes (Poses, Rouen, Quillebeuf sur Seine, Le Havre), la réalisation de 33 entretiens semi-directifs, et un journal de bord. L'enquête par questionnaire est réalisée par un échantillonnage spontané, et 88 % des personnes interrogées vivent depuis plus de 10 ans dans la région. Le rapport de la population à l'eau est certain : 15 % ont déjà pratiqué la baignade en Seine, 30 % les activités nautiques et 28 % consomment leurs produits (poissons, crustacés, coquillages) pris en Seine. Les plus jeunes ont un jugement plus sévère sur la pollution ; les plus âgés (+ 50 ans) ont une sensibilité plus grande à la qualité du paysage de Seine. Pour 61 % des sondés, la qualité de l'eau est mauvaise. 86 % de l'échantillon déclare être convaincu d'une pollution chimique ; 65 % impute cette pollution prioritairement à l'industrie et 50 % aux rejets urbains. Derrière les mythologies véhiculées (poissons mutants aux tumeurs inquiétantes, moutons noirs, féminisation de la faune aquatique, stérilisation des agriculteurs, mousses roses de 3 m de hauteur, égout à ciel ouvert), on découvre plusieurs contradictions qui scandent la gestion de l'eau au quotidien. D'un côté, un discours savant est tenu sans savoir toutefois quels sont les risques réels transférables aux populations civiles. D'un autre côté, des comportements de populations laissent apparaître une certaine insouciance : baignades rituelles chez les enfants du pays de Caux, consommation régulière et ancestrale des produits de pêche (crevettes, moules, poissons), manifestations sportives sur l'eau.

Au final, l'enquête sur les perceptions montre une fois de plus le fossé entre un sens commun et un savoir savant produits sur la chimie des eaux et ses risques. Il apparaît ainsi que les représentations de l'eau de Seine restent ancrées dans l'histoire : la Seine, c'est Paris, un égout à ciel ouvert. En outre, l'absence d'un point de référence ou de bon état pour qualifier l'eau de Seine rend opaque toute tentative de communication savante. Les savoirs savants produits par points de prélèvements, laboratoires d'analyses, services de l'Etat restant morcelés, fragmentés et sans connections, leur obscurantisme s'en trouve renforcé. Par ailleurs, la logique du visuel dans la perception des risques de contamination chimique l'emporte largement sur l'équation savante, notamment par les technocrates (sédiments et stations d'épuration). Ces derniers reconnaissent en outre que la législation sur l'eau reste méconnue, mal comprise et difficilement applicable. Enfin, l'estuaire reste focalisé prioritairement sur les problèmes d'emploi et d'exode rural, plaçant ainsi en arrière plan le souci de qualité de l'eau. Les industriels ressortent de ce fait comme les grands vainqueurs de gestion des perceptions liées au risque chimique. Ils sont en avance sur la législation, les analyses scientifiques et surtout ils ont su transposer par l'économie de marché la perception du risque du secteur industriel au secteur urbain.

La quatrième étude, qui a été menée sur la base d'une enquête menée auprès de 500 pratiquants en club, concerne les usages ludiques de l'eau sur l'estuaire. Les pratiques sportives sauvages restent marginales et se déroulent surtout dans la Seine des îles et les bras morts (Sirost *et al.* 2008). L'essentiel des activités sportives institutionnelles (une quinzaine de clubs + manifestations, représentant 75 % du volume d'activité) sur l'eau se déroule entre Poses et Rouen. Ici encore, nombre d'activités se déroulent sur les quatre bases de plein air et lacs artificiels. Les pratiquants réalisent leurs activités toute l'année (53 % sortent tous les mois) avec une pointe de fréquentation entre avril et juin. Plusieurs résultats méritent d'être mis en exergue : 56 % des pratiquants ne portent jamais de combinaison et 15 % ne prennent jamais de douche après leur activité ; 80 % sont fréquemment éclaboussés, 18 % chutent à l'eau, 15 % nagent, 4 % ingurgitent de l'eau ; 4,6 % développent des allergies, 3 % des diarrhées et 7,6 % des maux de gorge ou d'oreille. Toutefois, 54,6 % déclarent que la Seine aval est un lieu idéal pour les pratiques nautiques. Par ailleurs, 73,4 % des personnes interrogées estiment qu'il y a un risque à consommer les produits de la pêche en Seine.

Ces différentes enquêtes montrent un certain nombre de pistes prospectives qu'il faudrait étayer à l'avenir : il existe une supra rationalité* qui sépare les conduites ordinaires à l'égard de l'estuaire de la Seine. Comprendre que des comportements réflexes et enracinés dans une identité locale prévalent sur la raison sanitaire permet d'anticiper les aménagements fluviaux et industriels à venir. Il semble urgent d'entreprendre une rétrospective des usages ludiques de l'eau et des représentations pour mieux comprendre la logique dans laquelle s'enracinent les comportements citoyens et les savoirs savants et les avancées technologiques restent largement déconnectés les uns des autres, notamment en raison d'une comitologie très marquée. Entreprendre une réelle mise en réseau des acteurs qui interagissent autour des questions de l'eau et des risques chimiques s'avère plus que nécessaire.

Chapitre 3. Vers une gestion globale de l'estuaire de la Seine : enjeux, échéances et orientations pour les deux prochaines décennies

Les acteurs de l'estuaire

Comme celle des autres grands estuaires français, l'aménagement et la protection de l'estuaire de la Seine intéressent de très nombreux acteurs publics et privés et mobilisent de nombreux scientifiques. La diversité et la multiplicité de ces acteurs locaux, régionaux et nationaux compliquent évidemment la gestion quotidienne de l'estuaire et nécessitent une mise en cohérence des différentes approches et des différentes actions qui influencent l'évolution de l'estuaire. Pour ce faire, des instances de concertation et de coordination spécifiques ont été créées pour tenter de définir une politique de gestion globale de l'estuaire de la Seine (Valence 2006 ; Lozachmeur & Dauvin 2007).

Les acteurs publics

L'estuaire est l'objet d'une imbrication de responsabilités d'autorités publiques qui sont peu lisibles et dont le déchiffrement devient malaisé (Huet *et al.* 2004). Cette complexité s'explique notamment par le fait que l'estuaire de la Seine s'étend sur le territoire des deux régions normandes, ce qui multiplie à la fois le nombre des services de l'Etat et des autorités régionales et départementales concernés par sa gestion, son aménagement et sa protection.

Deux conseils régionaux (Haute et Basse Normandie) et trois conseils généraux (Calvados, Eure et Seine-Maritime), qui disposent chacun de différents services, interviennent ainsi sur l'estuaire. Il faut évidemment y ajouter les services déconcentrés de l'Etat, qui dans chaque domaine (environnement, équipement, agriculture, culture, industrie, santé, affaires maritimes...) sont deux à être compétents au niveau régional (comme les directions régionales de l'Environnement de Haute et de Basse Normandie) et trois au niveau départemental (comme les directions départementales de l'Équipement du Calvados, de l'Eure et de la Seine-Maritime). La gestion de l'estuaire intéresse bien évidemment également les Préfets de région de Haute et de Basse Normandie, qui sont également Préfets des départements de la Seine-Maritime et du Calvados, le Préfet de l'Eure, et le Préfet maritime de la façade Manche-Mer du Nord.

Cette diversité se retrouve au niveau des établissements publics de l'Etat puisque l'estuaire accueille les grands ports maritimes du Havre et de Rouen que le Conservatoire des Espaces Littoraux et des Rivages Lacustres (CELRL), l'Ifremer et l'Agence de l'eau Seine-Normandie jouent un rôle important sur le territoire estuarien. Il est important de préciser que bien que les grands ports maritimes du Havre et de Rouen soient des établissements publics placés sous la tutelle du secrétariat d'Etat aux Transports, ils sont deux acteurs économiques majeurs de l'estuaire et les deux principaux 'aménageurs' de l'estuaire.

Les communes et leurs groupements (communautés de communes, communautés d'agglomération, communautés urbaines, syndicats intercommunaux, syndicats mixtes, Pays), dont le nombre a fortement augmenté au cours des dernières années, sont évidemment eux aussi des acteurs majeurs de l'estuaire. Ils exercent notamment des compétences en matière d'urbanisme (élaboration et adoption des plans locaux d'urbanisme et des schémas de cohérence territoriaux notamment). Notons que la majorité des principaux élus des deux rives de la partie aval du territoire estuarien sont membres du Comité des élus de l'Estuaire qui est un lieu d'échanges, de promotion et de concertation sur des projets d'intérêt commun : aménagement du territoire, espaces d'activité et sites logistiques, tourisme, environnement...

Il convient évidemment d'ajouter à cette liste le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande (PNRBSN), dont le périmètre s'étend sur le territoire de 74 communes, et la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine, dont la gestion est assurée au nom de l'Etat par une association, la Maison de l'estuaire.

Les acteurs privés

Comme les acteurs publics, les acteurs privés (principaux acteurs économiques et associations d'usagers et de protection de la nature) sont particulièrement nombreux en estuaire de Seine. Cette multiplicité s'explique principalement par le fait que cet espace est situé à l'interface d'espaces terrestres et maritimes et d'un grand fleuve, le tout étant propice à l'installation ou à la pratique de nombreuses activités : industrie, tourisme, pêche, transport maritime et fluvial, agriculture...

Au niveau économique, les ports du Havre et de Rouen sont les deux 'poumons' de l'estuaire. En plus des activités liées au transport maritime (armateurs, chargeurs, entreprises de logistique, les zones portuaires accueillent d'importantes usines notamment dans les domaines de la construction automobile (usines de Cléon et de Sandouville), de la chimie et de la pétrochimie, ces dernières représentant plus du tiers de la capacité de raffinage nationale. Une trentaine d'établissements industriels comptant plus de 500 salariés est ainsi installée autour des villes de Rouen, de Caen et du Havre.

Grâce à son patrimoine naturel et culturel, l'estuaire dispose également d'un important potentiel touristique. Le PNRBSN, la réserve naturelle de l'estuaire, les stations littorales de Cabourg, Deauville-Trouville et Honfleur, les villes de Rouen, d'Étretat, de Fécamp et du Havre (ville classée au patrimoine mondial de l'humanité) attirent ainsi de nombreux visiteurs chaque année.

Si les acteurs du secteur industriel et du secteur du tourisme (restaurateurs, hôteliers, exploitants de campings, commerçants...) apparaissent incontournables, les activités traditionnelles sont également présentes dans

l'estuaire, notamment à travers la pêche et l'agriculture. Les pêcheurs professionnels, qui sont représentés par les comités régionaux des pêches maritimes et des élevages marins de Basse-Normandie et de Haute-Normandie, sont ainsi plus d'une centaine sur la rive gauche de l'estuaire et plus d'une trentaine au Havre. Les agriculteurs participent activement à l'économie et à l'aménagement du territoire estuarien puisque 60 % de l'estuaire est constitué de terres labourables. Une centaine d'agriculteurs est regroupée au sein du Groupement des Exploitants des Prairies Alluvionnaires de l'Estuaire de la Seine (GEPAES) et participe à la gestion des marais de l'estuaire en collaboration avec la Maison de l'Estuaire. Les coupeurs de roseaux de la baie de Seine sont eux aussi regroupés au sein d'une association qui a été créée en décembre 1993 pour sauvegarder ce produit particulier qui est récolté l'hiver dans le marais du Hode.

D'autres usagers de l'estuaire, comme les randonneurs, les chasseurs, les pêcheurs à pieds, les plaisanciers et les industriels (Association des Usagers de la Plaine Alluviale de l'Estuaire de la Seine) sont eux-aussi regroupés en association. Au Nord de l'estuaire, l'association des chasseurs du domaine public maritime gère ainsi les droits de chasse qui lui ont été confiés par le port du Havre. A ce titre, l'association sous loue les emplacements aux chasseurs (huttes de chasse) et perçoit les redevances.

A côté des associations qui regroupent des professionnels et des usagers, de nombreuses associations d'usagers et de citoyens interviennent sur l'estuaire, notamment dans le domaine de la protection de la nature. Parmi les plus représentatives figurent la Fédération Haute-Normandie Nature Environnement (qui regroupe 73 associations), SOS Estuaire (qui regroupe une quinzaine d'associations), Estuaire SUD (Site Unique à Défendre), la Ligue de Protection des Oiseaux, le Groupe Ornithologique Normand (GONm), et le Comité Régional d'Étude pour la Protection et l'Aménagement de la Nature en Basse-Normandie (CREPAN). Si ces associations interviennent en justice pour tenter de faire annuler des décisions ou des projets qu'elles jugent en contradiction avec le droit de l'environnement, elles mènent également des actions d'information, des études, contribuent à l'élaboration de projets portés par les pouvoirs publics et les acteurs privés et sont représentées au sein de nombreuses instances de concertation.

Il convient d'ajouter que la majorité de ces acteurs sont en concurrence constante, voire en conflit, chacun tentant de s'approprier une partie de l'estuaire : les ports et les industriels avec les associations de protection de la nature, les chasseurs avec le gestionnaire de la réserve naturelle et les associations ...

Les acteurs scientifiques

L'originalité de l'écosystème estuarien est un territoire privilégié pour les scientifiques, qui sont extrêmement nombreux à mener des recherches et à réaliser des études sur l'estuaire de la Seine. Ce territoire intéresse ainsi à la fois des sédimentologues, des géographes, des biologistes, des chimistes, des écologues, des hydrologues, des écotoxicologues, des ornithologues, des économistes, des sociologues, des juristes ... Le fait que les estuaires soient composés d'espaces terrestres,

marins et fluviaux conduit en outre plusieurs spécialistes d'une même discipline à se mobiliser, ce qui multiplie encore le nombre de scientifiques intéressés. Les scientifiques interviennent tout d'abord en réalisant des études, notamment dans le cadre du programme scientifique Seine-Aval, dont la maîtrise d'ouvrage est assurée par le Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIP Seine-Aval). A ce titre, le GIP Seine-Aval assure la gestion et la coordination des actions de recherche, développe les applications issues des connaissances de la recherche et s'occupe du transfert et de la valorisation des résultats vers les décideurs et les citoyens. Plus de 160 scientifiques, appartenant à près de 50 équipes de recherche, collaborent ainsi au sein du pôle scientifique du programme Seine-Aval. Leur travail est coordonné, analysé et encadré par un comité scientifique et par un comité international d'évaluation et d'orientation scientifique. De nombreux scientifiques travaillent également pour le compte ou en relation avec la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine et le Parc naturel régional des Boucles de la Seine Normande, à la fois à travers la réalisation d'études ou d'inventaires, mais aussi en siégeant au sein de leurs comités scientifiques respectifs. Trois ornithologues, trois écologues, un géographe, un agronome, un spécialiste des lépidoptères, deux spécialistes des invertébrés, un spécialiste des poissons, un botaniste, un spécialiste des mammifères, un phytosociologue, un sédimentologue, un biologiste animal, un biologiste marin siègent ainsi au comité scientifique de la réserve naturelle. Enfin, des scientifiques contribuent également à la réalisation d'inventaires nationaux et européens, qui sont dans certains cas utilisés dans le cadre de la mise en place de protections réglementaires. En France, un inventaire des Zones Naturelles d'Intérêt Faunistique et Floristique (ZNIEFF) a ainsi été réalisé à partir de 1982 pour le domaine terrestre, avant d'être étendu au domaine marin en 1991. L'objectif de cet inventaire, dont la conception et la coordination a été assurée par le MNHN, est d'identifier et de décrire des secteurs présentant de fortes capacités biologiques et un bon état de conservation. Effectué par des scientifiques selon une méthodologie nationale, cet inventaire comprend deux types ZNIEFF : celles de type I, qui correspondent à des secteurs de grand intérêt biologique ou écologique et celles de type II, qui correspondent à de grands ensembles naturels riches et peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes. Une importante partie de l'estuaire est classée en ZNIEFF, notamment le marais du Hode, les tourbières du marais Vernier, le valon du Vivier, le marais de la boucle de Brotonne, le marais d'Hénouville.

Dans les années 1980, la France a également initié un inventaire scientifique des Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) sur son territoire afin de mettre en oeuvre la directive européenne 'Oiseaux' du 2 avril 1979. Cet inventaire, basé sur la présence d'espèces d'intérêt communautaire répondant à des critères numériques précis, a été réalisé par la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO) et le MNHN pour le compte du ministère chargé de l'Environnement, avec l'aide de groupes ornithologiques régionaux. Deux ZICO ont été identifiées dans l'estuaire de la Seine, celle de la boucle de Poses (5 240 hectares) et celle de l'embouchure et de l'estuaire de la Seine (22 027 hectares). Cet inventaire constitue l'inventaire scientifique préliminaire à la désig-

nation des Zones de Protection Spéciale (ZPS), qui sont des zones protégées appartenant au réseau européen Natura 2000.

Les instances de gestion spécifiques à l'estuaire de la Seine

En estuaire de Seine, la nécessité d'adopter une approche globale, de définir une stratégie d'ensemble et de mettre en place des instances de concertation chargées d'accompagner cette démarche est apparue à la fin des années quatre-vingt-dix lors de la concrétisation du projet d'extension du port du Havre dénommée Port 2000. Le Contrat de Plan Etat-Région (CPER) signé le 20 mars 2000 par le Préfet et le président du Conseil régional a ainsi prévu l'élaboration d'un plan de gestion globale de l'estuaire de la Seine (PGGES), dont la mise en œuvre est justifiée par le fait que l'estuaire est 'occupé et géré par une multiplicité d'acteurs locaux' et par la nécessité d'organiser 'une mise en cohérence des différentes politiques, afin de concilier développement économique et préservation de l'environnement'.

Afin de piloter la mise en œuvre du plan de gestion global, le CPER a prévu la création de trois instances chargées d'initier une dynamique de concertation et de décisions partagées à l'échelle de l'estuaire, en tenant compte des divers intérêts qui y sont représentés. La première instance est un comité de pilotage, le Conseil de l'estuaire, qui regroupe les principaux financeurs publics, compétent pour les orientations et les décisions du plan. La seconde instance est un Conseil scientifique et technique chargé de l'évaluation du plan, avec également un pouvoir de propositions et qui est chargé de rendre des avis à la demande du Conseil de l'estuaire. La troisième instance est un Comité de suivi rassemblant l'ensemble des acteurs intéressés par la gestion du plan, chargé de donner un avis sur les orientations et les actions du plan, doté également d'un pouvoir de propositions.

Initialement, la composition du Conseil de l'estuaire était limitée aux préfets de Haute et de Basse-Normandie (qui est également Préfet du Calvados), au Préfet d'Ile de France, Préfet coordonnateur du bassin Seine-Normandie, et au Préfet de l'Eure; aux présidents des conseils régionaux de Haute-Normandie, de Basse-Normandie, et d'Ile de France, ainsi qu'aux présidents des conseils généraux de Seine-Maritime, de l'Eure et du Calvados et aux directeurs de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, et des grands ports maritimes du Havre et de Rouen. Par la suite, et en l'absence d'arrêté préfectoral fixant la composition du Conseil, les présidents des agglomérations du Havre, de Rouen, d'Elbeuf, de Seine-Eure ainsi que le directeur du CELRL et le président du Conseil scientifique et technique ont depuis été invités à participer à ses réunions. Le statut du Conseil de l'estuaire n'a jamais été officiellement fixé, aucun arrêté ministériel ou préfectoral n'ayant été publié pour préciser ses compétences, ses missions et sa composition ... Le Conseil est donc totalement informel et rien n'oblige les personnes qui y sont invitées à venir assister à ses réunions ... Cela explique en grande partie pourquoi le Conseil est d'abord et avant tout un lieu de débat et d'échange d'information où seules deux décisions ont été prises en six ans ...

Le Comité de suivi est l'instance qui rassemble le plus d'acteurs puisqu'il accueille l'ensemble des représentants de l'Etat concernés par la gestion de l'estuaire (soit une quinzaine de personnes), 21 représentants des collectivités locales, 10 des établissements publics, 17 des organismes consulaires, 7 des syndicats et des unions professionnelles, 23 des associations, ainsi que les 21 parlementaires élus sur le territoire de l'estuaire.

Les membres du Comité scientifique et technique (CST) sont également invités à participer aux réunions du Comité de suivi, qui sont organisées une à deux fois par an. En plus de l'évaluation du plan de gestion global de l'estuaire, le CST est également chargé de suivre l'état de l'environnement de l'estuaire de la Seine et de donner son avis sur les grands projets d'aménagements envisagés. Lors de ces huit réunions entre 2001 et 2005, le CST a ainsi principalement travaillé sur les mesures compensatoires liées à Port 2000, ainsi que sur la question de la gestion des matériaux de dragage.

Les membres du Conseil scientifique et technique ont été nommés par un arrêté du Préfet de la région Haute-Normandie en date du 20 juin 2001. Si la majorité des membres du CST sont des spécialistes de l'eau et du milieu marin (qualité des eaux, écotoxicologie, microbiologie, biologie marine, halieutique marine, spécialiste de la Manche, hydraulique maritime, eaux et agronomie et traitement des eaux), il accueille également depuis peu lors de son renouvellement en 2008 des représentants des sciences humaines (économie, droit, géographie).

Les outils de gestion et de protection de l'estuaire

Une des conséquences de la multiplicité et de la diversité des acteurs sur un territoire est qu'ils mettent en œuvre de nombreuses politiques de gestion, d'aménagement et de protection, notamment à travers des schémas, des chartes, des contrats, des plans ... Ces différents dispositifs reposent eux-mêmes sur de nombreux textes européens et nationaux qui concernent aussi bien la gestion de l'eau, la protection de l'environnement, l'aménagement du territoire, l'urbanisme, le tourisme ... Si certains de ces dispositifs sont juridiquement contraignants, d'autres sont des documents d'orientation ou des contrats et sont totalement dépourvus de telles contraintes.

Les textes et les dispositifs à caractère contraignant

> Les directives européennes

Comme tous les grands estuaires, l'estuaire de la Seine est particulièrement concerné par la mise en œuvre des directives européennes 'oiseaux' et 'habitats', qui prévoient la définition de zones protégées formant le réseau Natura 2000, et de la directive cadre sur l'eau (DCE). La Directive 79/409/CE du 2 avril 1979 concernant la conservation des oiseaux sauvages a pour objectif de conserver à long terme des espèces d'oiseaux sauvages de l'Union Européenne en ciblant 181 espèces et sous-espèces menacées qui nécessitent une attention particulière. A cette fin, elle prévoit notamment que les

territoires maritimes et terrestres les plus appropriés en nombre et en superficie à la conservation de ces espèces soient désignées comme Zones de Protection Spéciales (ZPS). Les Etats doivent également prendre des mesures réglementaires interdisant de tuer ces espèces, de les capturer intentionnellement, d'endommager intentionnellement leurs nids ou leurs œufs et d'enlever leurs nids, de ramasser leurs œufs, de les perturber notamment pendant la période de reproduction et de dépendance, de détenir les oiseaux dont la chasse et la capture ne sont pas permises.

La Directive 2/43/CEE du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages a pour objectif de contribuer à assurer la biodiversité par la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages sur le territoire européen des États membres. A cette fin, elle prévoit la constitution d'un réseau écologique européen cohérent de Zones Spéciales de Conservation, dénommé Natura 2000. Ce réseau, formé par des sites abritant des types d'habitats naturels et des habitats des espèces figurant aux annexes I et II de la directive, doit assurer le maintien ou, le cas échéant, le rétablissement, dans un état de conservation favorable, des types d'habitats naturels et des habitats d'espèces concernés dans leur aire de répartition naturelle. Le réseau Natura 2000 comprend également les zones de protection spéciale classées par les États membres en vertu des dispositions de la directive 'oiseaux'.

Une importante partie des espaces terrestres et fluviaux de l'estuaire de la Seine a été classée en ZPS et est en instance de classement en ZSC. En 2007, la France a engagé l'identification des sites Natura 2000 en mer, une ZSC étant en cours de validation en baie de Seine, une autre au large de Dieppe et deux ZPS au large de Fécamp et de l'ouest de Dieppe (Figure 40). Pour chacun des sites

Natura 2000, un document d'objectif (DOCOB) comprenant un inventaire écologique et socio-économique, des objectifs de développement durable et des mesures concrètes de gestion, est élaboré et approuvé par un comité de pilotage qui rassemble les principaux acteurs concernés par la gestion du site.

La Directive Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000 a pour principal objectif d'ici 2015 un bon état des différents milieux aquatiques sur tout le territoire européen. A cette fin, la DCE définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique et fixe des objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles (eaux douces et eaux côtières) et pour les eaux souterraines. Afin de donner les outils à l'administration, aux collectivités territoriales et aux acteurs de l'eau pour reconquérir la qualité des eaux et atteindre en 2015 les objectifs de bon état écologique fixés par la DCE, la France a adopté le 30 décembre 2006 la loi sur l'eau et les milieux aquatiques. Ce texte est venu compléter les dispositions de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 en application de laquelle les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), qui ont un caractère obligatoire, et les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), qui ne sont pas obligatoires, ont été mis en place à l'échelle de bassins hydrographiques et de bassins versants.

➤ Les dispositifs de protection nationaux

En plus des directives européennes, de nombreuses lois concernent évidemment l'aménagement et la protection de l'estuaire de la Seine : loi du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, loi du 25 juin 1999 d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire et portant modification de la loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'amé-

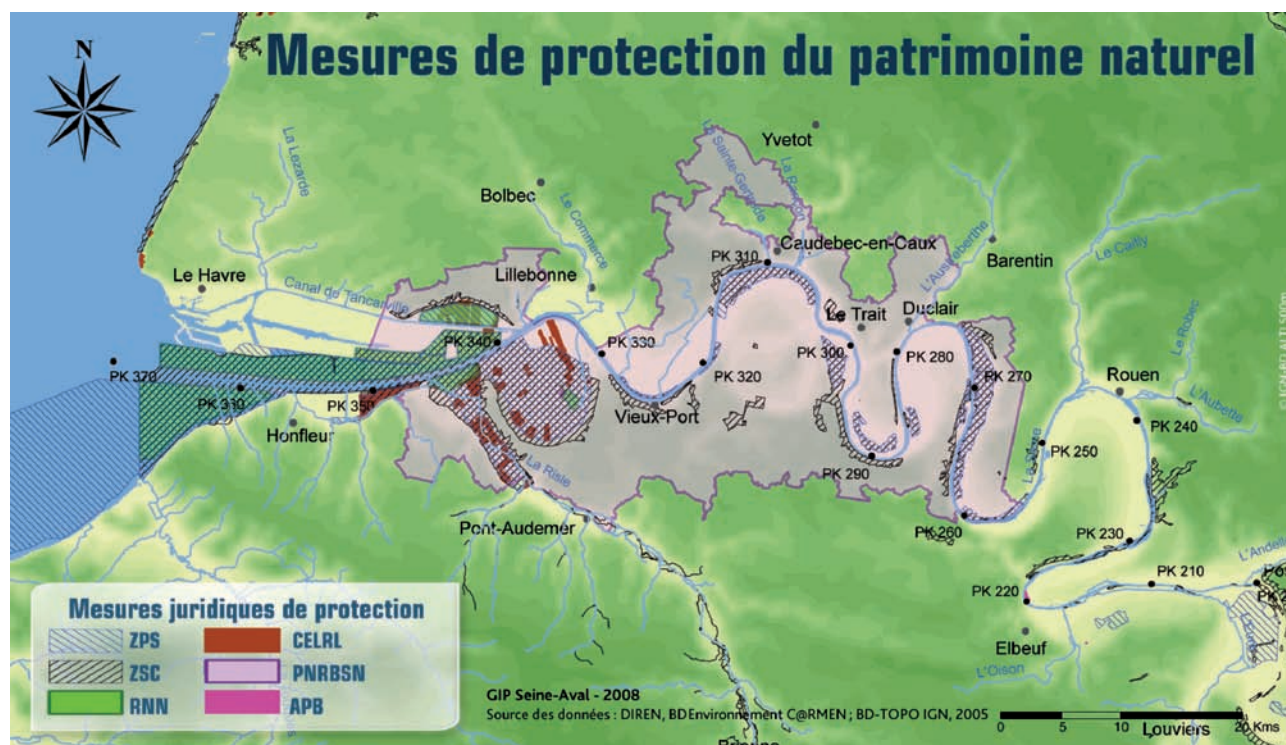


Figure 40. Carte des zones de protection.

nagement et le développement du territoire, loi du 12 juillet 1999 relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale, loi du 13 décembre 2000 re-lative à la solidarité et au renouvellement urbains (SRU) ... Plusieurs dispositifs de protection prévus par le code de l'environnement sont également mis en œuvre sur l'estuaire : sites inscrits et classés, réserves naturelles, arrêtés préfectoraux de biotope, terrains acquis par le CELRL, parc naturel régional.

Parmi ces protections, qui se superposent en grande partie, la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine occupe une place à part. Cette réserve, qui s'étend à la fois sur une partie terrestre cadastrée de 2 165 hectares et sur une partie maritime de 6 363 hectares, est en effet l'une des plus vastes de France et plus de 250 espèces d'oiseaux (dont deux espèces emblématiques : le butor étoilé et le râle de genêts) et 63 espèces de mammifères y ont déjà été observées. Suite à sa création par décret le 30 décembre 1997, son périmètre a été étendu le 9 novembre 2004 de 3 768 hectares à 8 528 hectares. Le territoire de la réserve, qui s'étend désormais sur les deux rives de la Seine (407 hectares dans l'Eure, 5 221 en Seine-Maritime, 2 894 dans le Calvados), ne peut être ni détruit ni modifié dans son état ou dans son aspect sauf autorisation spéciale du préfet. En outre, le plan de gestion de la réserve, qui s'appuie sur une évaluation scientifique du patrimoine naturel de la réserve et de son évolution, décrit les objectifs que le gestionnaire s'est assigné en vue de la protection des espaces naturels de la réserve. Trois instances établies par le préfet, un comité consultatif, un conseil scientifique et un organisme gestionnaire, la Maison de l'estuaire, assurent sous sa responsabilité la mise en œuvre du plan de gestion de la réserve (plan de restauration, de préservation et de suivi des milieux et des espèces) élaboré et évalué tous les cinq ans. Le plan de gestion est un outil qui permet de définir, programmer et contrôler la gestion de manière objective et transparente. Sa rédaction permet de tirer le plus grand profit de toutes expériences positives et négatives, dans un processus d'adaptation progressive, au fur et à mesure des évaluations. Pour préparer la mise en place du plan de gestion 2007-2011, la Maison de l'Estuaire a rédigé un document-projet qui n'a toujours pas été validé fin 2008.

➤ Les directives territoriales d'aménagement et les schémas de cohérence territoriale

La loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire a notamment prévu la possibilité pour l'Etat d'élaborer des directives territoriales d'aménagement. Bien qu'il ne s'agisse pas d'instruments spécifiques de gestion des zones côtières, les DTA intéressent directement le littoral et les estuaires. En effet, quatre des cinq projets lancés en 1996 concernent ces espaces : DTA estuaire de la Loire, DTA Bouches-du-Rhône, DTA Alpes-Maritimes et DTA estuaire de la Seine. L'objectif des DTA, qui sont élaborées et adoptées par l'Etat, est de fixer les orientations fondamentales de l'Etat en matière d'aménagement et d'équilibre entre les perspectives de développement, de protection et de mise en valeur des territoires. Elles doivent également fixer les principaux objectifs de l'Etat en matière de localisation des grandes infrastructures de transport et des grands

équipements, ainsi qu'en matière de préservation des espaces naturels, des sites et des paysages. Enfin, elles peuvent préciser les modalités d'application des dispositions particulières au littoral (articles L.146-1 et suivants du code de l'urbanisme).

La DTA de l'estuaire de la Seine, qui concerne 942 communes des départements du Calvados, de l'Eure et de la Seine-Maritime, a été approuvée le 10 juillet 2006. A la suite d'un diagnostic et d'une identification des enjeux, la DTA identifie et décline les trois grands objectifs que l'Etat souhaite poursuivre sur l'estuaire de la Seine à un horizon de 20/25 ans. Ces objectifs sont ensuite traduits sous forme d'orientations à caractère prescriptif qui s'imposent aux documents d'urbanisme locaux (SCOT et PLU) et sous forme de politiques d'accompagnement à caractère contractuel qui seront proposées aux collectivités territoriales et aux autres partenaires institutionnels. Les trois objectifs définis par la DTA sont de renforcer l'ensemble portuaire dans le respect du patrimoine écologique des estuaires, de préserver et mettre en valeur le patrimoine naturel et les paysages et de prendre en compte les risques et de renforcer les dynamiques de développement des différentes parties du territoire.

Enfin, pour conforter les objectifs et les orientations, des politiques d'accompagnement sont proposées et doivent servir de référence à l'action des collectivités publiques. Ces politiques visent à organiser la coopération entre les ports, développer l'activité logistique, améliorer le fonctionnement naturel et écologique de l'estuaire, promouvoir le développement durable des activités de la pêche, développer un programme éolien, mettre en valeur les éléments caractéristiques des paysages, prévenir les risques, renforcer la coopération entre collectivités territoriales, développer les nouvelles techniques de l'information et de la communication, organiser l'urbanisation et conduire une politique foncière.

Les dispositions des DTA s'imposent notamment aux schémas de cohérence territoriale (SCOT), qui ont été institués par la loi du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains. Ces schémas sont des documents de planification élaborés par des établissements publics de coopération intercommunale (communautés de communes et d'agglomération notamment). Ils ont pour objet de favoriser le développement équilibré et durable du territoire sur lequel il s'applique et constituent aussi, à horizon de 10 ans, le cadre de référence en termes d'aménagement, de déplacements, d'habitat, d'urbanisme, d'environnement. Plus concrètement, le SCOT précise les grandes options d'aménagement ayant trait à l'équilibre entre urbanisation, protection des paysages et des espaces naturels et agricoles, création de dessertes en transports collectifs, à l'équilibre social de l'habitat et à la construction de logements, au développement économique, à l'équipement commercial et artisanal, aux loisirs, ou encore à la prévention des risques. Sur l'estuaire de la Seine, plusieurs SCOT sont approuvés ou en cours d'élaboration : SCOT de Caen, SCOT du Nord-Pays d'Auge, SCOT du Pays des Hautes Falaises, SCOT du Havre-Pointe de Caux-Estuaire, SCOT de la vallée de la Basse-Risle, SCOT de Rouen-Elbeuf ...

➤ Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux et les schémas d'aménagement et de gestion des eaux

Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) fixent pour chaque bassin hydrographique (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse et Seine-Normandie) les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau dans le respect des principes de la loi sur l'eau de 1992. Le SDAGE est un document qui définit des orientations de portée réglementaire avec lesquelles les décisions de l'Etat en matière de police des eaux (autorisations, déclarations, rejets ...) et les décisions des collectivités et établissements publics, dans le domaine de l'eau doivent être compatibles. Il définit également des actions structurantes à mettre en œuvre pour améliorer la gestion de l'eau au niveau du bassin et des règles d'encadrement des SAGE qui doivent être compatibles ou rendus compatibles avec les SDAGE. Le SDAGE du bassin Seine-Normandie a été approuvé par le Préfet de la région d'Ile-de-France, Préfet coordonnateur du bassin Seine-Normandie, le 20 septembre 1996. Afin de respecter les dispositions de la DCE, le SDAGE est actuellement en révision, le nouveau schéma devant être adopté avant la fin de l'année 2009.

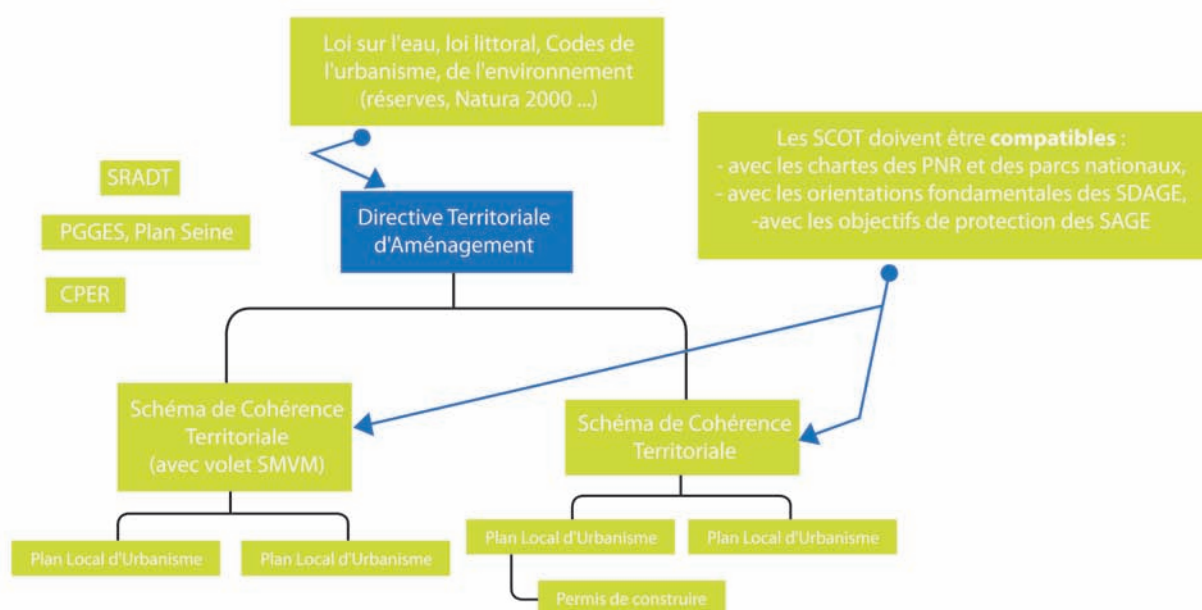
Les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) sont des documents de planification élaborés de manière collective à l'échelle d'un périmètre hydrographique cohérent. Ils fixent des objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur, de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau. Le SAGE est élaboré par une Commission Locale de l'Eau composée des différents acteurs du territoire et est approuvé par le préfet. Les décisions dans le domaine de l'eau et les SCOT doivent être compatibles ou rendus compatibles avec les

dispositions des SAGE, qui doivent eux-mêmes être compatibles avec les SDAGE (Figure 41). Leur élaboration n'étant pas obligatoire, deux SAGE sont approuvés sur le territoire de l'estuaire de la Seine (Commerce ainsi que Cailly, Aubette, Robec) et trois autres sont en cours d'élaboration sur le bassin de l'Eure (Avre, Iton, ainsi que Risle et Charentonne).

➤ La Charte du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande

La charte d'un Parc Naturel Régional détermine pour le territoire du parc les orientations de protection, de mise en valeur et de développement et les mesures permettant de les mettre en œuvre. Elle comporte un plan élaboré à partir d'un inventaire du patrimoine indiquant les différentes zones du parc et leur vocation. La charte détermine les orientations et les principes fondamentaux de protection des structures paysagères sur le territoire du parc. Le projet de charte constitutive est élaboré par la région avec l'ensemble des collectivités territoriales concernées, en concertation avec les partenaires locaux intéressés.

Le PNRBSN, qui s'étend sur le territoire de 72 communes de l'Eure et la Seine-Maritime, a été créé le 17 mai 1974 afin de favoriser le maintien d'une coupure verte entre les deux grands pôles urbains et industriels que sont Rouen et Le Havre. Les trois lignes directrices fixées par la charte adoptée en 2001 sont de faire de la vallée de la Seine un territoire de développement durable, de ménager le territoire par une gestion adaptée des milieux naturels et des paysages, et de placer l'homme au cœur du Parc et de positionner le Parc dans la région.



Source des données : O. Lozachmeur, 2009

Figure 41. Liens entre les DTA, SCOT, PLU, SDAGE, SAGE et les 'autorisations loi sur l'eau'.

Les documents et les mesures d'orientation et de financement

En plus des documents dotés d'effets juridiques contraignants que nous venons d'évoquer (DTA, SCOT, SDAGE, SAGE ...), les pouvoirs publics mettent également en œuvre des dispositifs contractuels et des documents d'orientation et de planification stratégique dépourvus d'effets juridiques vis-à-vis d'autres dispositifs. L'importance de ces instruments ne doit cependant pas être sous-estimée car ils favorisent la mise en cohérence et l'affichage des politiques publiques et permettent de coordonner différentes sources de financement. Sur l'estuaire de la Seine, les principaux dispositifs de ce type sont les schémas régionaux d'aménagement et de développement du territoire et les contrats de projets Etat-Région de Haute et de Basse Normandie, le plan Seine et le contrat de projets interrégional Etat-Régions Seine et le plan de gestion globale de l'estuaire de la Seine.

Les schémas régionaux d'aménagement et de développement du territoire

Les Schémas Régionaux d'Aménagement et de Développement du Territoire (SRADT) ont été créés par la loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire. Un SRADT fixe les orientations fondamentales, à moyen terme, du développement durable du territoire régional. Il comprend un document d'analyse prospective et une charte régionale, assortie de documents cartographiques. Le SRADT doit notamment définir les principaux objectifs relatifs à la localisation des grands équipements, des infrastructures, à la réhabilitation des territoires dégradés et à la protection et la mise en valeur de l'environnement, des sites, des paysages et du patrimoine naturels et urbains en prenant en compte les dimensions interrégionales.

Le SRADT est élaboré et approuvé par le conseil régional après avis des conseils généraux des départements concernés et du conseil économique et social régional. Les départements, les agglomérations, les pays, les parcs naturels régionaux, les communes de plus de 20 000 habitants et les groupements de communes compétents en matière d'aménagement ou d'urbanisme et les chambres consulaires sont associés à l'élaboration de ce schéma. S'ils n'ont pas de portée normative, et ne sont notamment pas opposables aux documents locaux d'urbanisme (SCOT et PLU), les SRADT ont vocation à nourrir la contractualisation Etat-Région à travers les contrats de projets.

En Haute-Normandie, le SRADT a été approuvé par le conseil régional en décembre 2006. Ses orientations se matérialisent à travers huit axes stratégiques, qui renvoient aux éléments déterminants du diagnostic et aux enjeux majeurs qu'il a fait émerger. Ils se déclinent à leur tour en priorités puis en objectifs opérationnels. Ainsi, dans le cadre de l'axe n°2, qui concerne 'l'affirmation de la fonction d'interface maritime et internationale', une des priorités du schéma est de favoriser l'irrigation de l'espace régional depuis ses 'portes'. Dans cette perspective, le SRADT entend favoriser l'affirmation de l'estuaire de la Seine comme grand espace de développement, par l'appui à la politique de développement durable mise en œuvre par l'ensemble

des partenaires, dans le cadre de la DTA et le renforcement de sa gestion globale.

Le SRADT de Basse-Normandie a été approuvé en décembre 2007 par le conseil régional. Si les enjeux liés à l'estuaire de la Seine ne sont pas abordés dans le diagnostic du SDRAT, plusieurs orientations du schéma concernent la gestion et l'avenir de l'estuaire. Le SRADT insiste ainsi sur la nécessité de conforter les politiques existantes de préservation de la biodiversité en milieu rural, urbain et périurbain, sur le littoral et en milieu maritime, ce qui impliquera notamment de contribuer à la protection et à la gestion durable du littoral et de ses zones emblématiques, dont l'estuaire de la Seine. Le SRADT prévoit également de continuer à renforcer les liens entre les deux régions en engageant notamment des projets communs dans les domaines concernant : qualité des eaux de l'estuaire de la Seine ; Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval, DTA et Conférence des Estuaires autour de la problématique de l'aménagement et du développement de l'estuaire.

Enfin, les deux SRADT contiennent un texte signé par les présidents des deux régions normandes dans lequel ils soulignent notamment qu'un nouveau franchissement reliant les deux rives de l'estuaire de la Seine devra constituer dans le futur un trait d'union supplémentaire entre leurs deux régions.

Les contrats de projets Etat-Région

Les CPER sont un mode de gestion publique par lequel l'Etat et une ou plusieurs régions s'engagent sur une programmation et un financement pluriannuels autour d'objectifs communs en matière d'aménagement du territoire. Pour la période 2007-2013, le CPER de Basse-Normandie prévoit notamment de financer des projets de recherche dans les domaines d'action du plan Seine, en particulier pour améliorer la qualité des milieux naturels et aquatiques, d'analyser les effets des aménagements des berges sur la qualité des milieux aquatiques, de mettre en réseau les structures de recherche du bassin et d'appuyer les opérations de prévention des inondations dans les bassins débouchant dans l'estuaire.

Quant au CPER de Haute-Normandie, il prévoit la poursuite et le renforcement du Plan de Gestion Globale de l'Estuaire de la Seine ainsi qu'une participation aux études et travaux de restauration et de gestion des milieux naturels (3,72 millions d'euros), la restauration des fonctionnalités des milieux aquatiques, la connaissance et le suivi de la qualité du milieu estuarien, ainsi que la renaturation et l'amélioration de la continuité des cours d'eau, dont l'estuaire (8 millions d'euros). Dans le cadre de la mise en œuvre du projet 'Rouen Port Maritime', le CPER a également prévu un financement de 90 millions d'euros pour la restauration des berges et des annexes de l'estuaire de la Seine (de Poses à la mer) en précisant qu'il s'agit d'un véritable enjeu pour la reconquête écologique de ce territoire.

Le plan Seine et le contrat de projets interrégional Etat-Régions Seine

A la suite du Comité interministériel d'aménagement et de

développement du territoire du 12 juillet 2005, la ministre de l'Ecologie a demandé au Préfet coordonnateur de bassin Seine-Normandie d'élaborer un Plan Seine. Ce dernier a désigné les directeurs de l'AESN et de la DIREN d'Ile-de-France comme pilotes afin de mener les discussions nécessaires avec les conseils régionaux, conseils généraux, Ententes interdépartementales, syndicats de rivière, communes, établissements publics de coopération intercommunale et associations identifiés comme maîtres d'ouvrage ou associés aux actions du plan.

Les quatre axes stratégiques du plan sont les inondations, la qualité de l'eau, la qualité des milieux, la mise en œuvre d'un projet de développement durable permettant de concilier les différents usages et fonctions du fleuve. Le document décline également les actions retenues sur chacun des quatre axes, l'une d'entre elles étant de redonner des espaces de liberté et de décroiser transversalement l'estuaire. Il est notamment proposé d'utiliser systématiquement les travaux d'entretien des berges existantes ou la création des nouvelles infrastructures portuaires ou de navigation pour étudier et remettre en état des connexions avec des zones humides, des plans d'eau, des bras morts et des filandres, régénérer des habitats par le biais de banquettes et planchers rivulaires.

La mise en œuvre du plan Seine repose notamment sur des financements prévus par le Contrat de projets inter-régional 'Seine' 2007-2013 signé entre l'Etat et les régions Haute-Normandie, Basse-Normandie, Ile-de-France, Champagne-Ardenne, Picardie et Bourgogne le 26 février 2008. Ce contrat est d'un montant de plus de 120 M€, dont 80 M€ de l'Etat, de l'AESN et du FEDER.

➤ Le plan de gestion globale de l'estuaire de la Seine

L'élaboration d'un plan de gestion globale de l'estuaire de la Seine (PGGES) a été prévue par le Contrat de Plan Etat-Région signé le 20 mars 2000, l'objectif étant notamment de disposer d'un instrument de la programmation des grandes interventions publiques pour la période 2000/2006 et l'accompagnement de la mise en service de Port 2000.

Le CPER a défini les trois orientations majeures du PGGES : créer les conditions d'un développement portuaire et logistique et diversifier l'économie estuarienne, préserver et valoriser les milieux naturels et les paysages, reconquérir le cadre de vie urbain; accompagner et organiser la gestion de l'estuaire. En 2006, la DTA a précisé qu'il convenait que le PGGES s'attache plus particulièrement au suivi du chantier Port 2000, aux démarches de gestion et de rénovation environnementales, au travail de connaissance scientifique, aux questions de sécurité industrielle et maritime et au développement touristique.

Bien que des orientations aient été définies, le Conseil de l'estuaire n'est jamais parvenu à élaborer un véritable plan de gestion globale. Seul un volet environnemental reposant lui-même sur cinq orientations a été rédigé par la DIREN Haute-Normandie en 2002 : définir l'état de référence de l'estuaire à atteindre d'ici 15 ans, décroiser l'estuaire en améliorant les échanges hydrauliques entre les différentes entités ; améliorer la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux ; restaurer les habi-

tats et les populations ; mieux connaître et surveiller l'estuaire.

Le CPER 2000-2006 étant désormais caduque, la DTA est aujourd'hui le seul document public approuvé qui fasse référence au PGGES. L'idée d'élaborer un document stratégique qui ferait office de plan de gestion globale n'a cependant pas été abandonnée, des discussions en ce sens ayant eu lieu lors de réunions du CST de 2007 et 2008.

L'avenir de l'estuaire

La démarche prospective de 2004 et son prolongement en 2006

A la demande du Conseil de l'Estuaire, l'AESN a financé en 2004 une démarche prospective qui a été menée dans une perspective de restauration des fonctions environnementales de l'estuaire de la Seine à l'horizon 2025. Cette étude, qui a été réalisée par deux cabinets privés, a été pilotée par un comité de 18 membres désignés notamment par les services de l'Etat, les ports, le PNR, des associations, les socio-professionnels de l'estuaire et par un comité technique (AESN, région Haute-Normandie, GIP Seine-Aval, DIREN, ministère de l'Ecologie ...).

Ce travail a tout d'abord permis de montrer qu'il existe une prise de conscience partagée de la dimension géographique de l'estuaire et que les relations entre l'amont et l'aval, le Nord et le Sud imposent des formes de solidarité qui méritent d'être traitées dans la réflexion et dans l'action. L'étude a également confirmé que les acteurs locaux dépendent de facteurs externes, qui sont déterminants pour l'état des fonctions estuariennes à long terme. Les acteurs du bassin versant de la Seine (notamment pour la qualité de l'eau entrante), du niveau national et européen (contexte économique, politiques sectorielles, financement de projets...), voire du niveau mondial (dynamique des transports internationaux, globalisation des échanges ...) conditionnent ainsi directement l'évolution de l'estuaire.

A partir de ce constat, quatre scénarios ont été étudiés :

- le scénario tendanciel de continuité des dynamiques en cours, qui ne permet pas d'améliorer la situation de l'estuaire et qui conduit à une dégradation progressive des fonctions environnementales et socio-économiques actuellement assurées par l'estuaire.

- le scénario volontariste de reconquête de l'état des fonctions environnementales telles qu'elles apparaissaient à la fin des années 1970. Il faudrait pour cela qu'un projet majeur d'ingénierie écologique collectif soit mené à bien grâce à un financement massif des acteurs du bassin, de l'Etat et de l'Union Européenne. Le premier objectif de ce scénario serait de restaurer les fonctionnalités environnementales directement liées aux surfaces de vasières intertidales (stockage et régulation des flux de contaminants, nourricerie et zone de repos pour l'avifaune). Le second serait de restaurer les biomasses (poissons, crevettes...) et les habitats sur la base des données connues à la fin des années soixante-dix. Le troisième objectif serait d'accélérer la tendance à l'amélioration enregistrée au cours de ces vingt dernières années en matière

de contaminants, d'anoxies chroniques et de flux de nutriments.

- le scénario de crise économique majeure dans la région, qui montre clairement les conséquences négatives sur l'état des fonctions environnementales et socio-économiques qu'entraînerait l'arrêt des actions d'entretien du système estuarien par les ports. De fait, si l'estuaire était rendu à sa dynamique naturelle, il s'ensuivrait inéluctablement et son comblement entraînerait la disparition d'un grand nombre de fonctions existantes.

- le scénario d'initiative locale, où l'ensemble des acteurs locaux (privés et publics) se concertent pour faire émerger un projet collectif global pour l'estuaire et met en commun les moyens nécessaires pour sa conduite. Ce scénario serait le seul à permettre une restauration, certes limitée mais notable, des fonctions environnementales. Il ne peut s'envisager que dans une démarche collective de gestion durable de l'estuaire, intégrant la préservation et la restauration de l'environnement dans une perspective de développement social et économique de la zone (notamment des ports).

L'objectif de ce scénario est d'engager des actions fortes et efficaces en faveur des fonctionnalités environnementales de l'estuaire afin d'aider à remonter le bouchon vaseux, d'améliorer sensiblement la qualité de l'eau et d'améliorer les conditions du milieu estuarien. Au-delà de l'élaboration de ces scénarios, l'étude a permis une meilleure compréhension du fonctionnement du système estuarien par les acteurs locaux et de dégager une vision partagée des futurs possibles pour les fonctions environnementales de l'estuaire à l'horizon 2025. Elle a également été l'occasion de réaffirmer la nécessité de poursuivre une réflexion concertée pour construire et suivre la mise en œuvre d'un projet de développement global et durable de l'estuaire.

En 2006, cette étude prospective a été complétée afin d'évaluer les coûts financiers de deux des quatre scénarios envisagés, le scénario de restauration volontariste et le scénario d'initiative locale. Le premier a été chiffré à 2150 millions d'euros, soit 107,5 millions d'euros par an sur 20 ans ; le second à 555 millions d'euros, soit 27,5 millions d'euros par an sur vingt ans. Dans un cas comme dans l'autre rien ne pourra être mis efficacement en œuvre sans un soutien fort de l'opinion publique et de la population sans une gouvernance spécifique et adaptée de l'estuaire et sans la poursuite des études scientifiques et techniques en matière de restauration.

Les projets d'aménagement de l'estuaire à court et moyen terme

➤ Vers un troisième franchissement de l'estuaire de la Seine ?

En décembre 2006, le conseil régional de Haute-Normandie a adopté un Plan de Déplacements Régional (PDR) dont l'objectif principal est de proposer un plan d'action visant à l'amélioration des transports collectifs régionaux et au développement de l'intermodalité. Un des quatre axes du plan, qui a également été adopté par les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime, est de

connecter la Haute-Normandie aux grands réseaux. Dans le cadre de cet axe et dans la perspective d'un rapprochement entre les deux rives de l'estuaire, le PDR souligne que s'il existe trois ponts routiers sur l'estuaire de la Seine, il n'existe aucun franchissement ferroviaire. Pour le PDR, la question d'un franchissement ferroviaire de l'estuaire permettrait, s'il était réalisé, de connecter à terme Le Havre au sud de la France aussi bien pour le transport de fret que de voyageurs.

Le SCOT Le Havre-Pointe de Caux-Estuaire, qui a été approuvé le 28 janvier 2008, souligne quant à lui que la pertinence d'un 3ème franchissement de l'estuaire doit être évaluée au regard de son positionnement européen, national et local pour ouvrir notamment l'hinterland du Havre sur l'Europe centrale et du Sud. Le SCOT ajoute que la possibilité de mettre en place une traversée ferroviaire de l'estuaire devra être mesurée avec les fonctions fret et voyageurs.

Si l'ensemble des élus de l'estuaire semble se retrouver sur le principe de la construction à terme d'un nouveau franchissement, la seule interrogation porte sur la nature de ce franchissement. Comme le président de la Chambre de commerce et d'industrie du Havre, le maire du Havre serait plutôt favorable au doublement des voies routières du Pont de Tancarville. A l'inverse, le maire de Deauville ne souhaite pas privilégier la route et les présidents des deux conseils régionaux normands sont clairement favorables au ferroviaire.

En 2007, la Direction Régionale de l'Équipement de Haute-Normandie a initié les premières études techniques sur la définition d'un nouvel ouvrage de franchissement de l'estuaire par voie ferroviaire. Il s'agit de vérifier la faisabilité d'un tel ouvrage, d'imaginer quel en serait le tracé afin de réserver le fuseau nécessaire à sa réalisation. Onze fuseaux de tracés ont été proposés, couplés à différentes techniques constructives (caissons immergés ou tunnel foré). Le coût total de l'ouvrage est estimé entre 1,2 milliard d'euros pour un ouvrage admettant les convois de fret uniquement, à 2 milliards pour un ouvrage mixte.

➤ Les projets du port du Havre et du port de Rouen

Depuis le début de l'année 2007, le port du Havre a lancé les études préalables au prolongement du Grand Canal du Havre vers le canal de Tancarville. Ce prolongement est prévu par la Directive Territoriale d'Aménagement de l'Estuaire de la Seine, qui précise que les études doivent permettre de définir le tracé du prolongement du grand canal du Havre et les mesures environnementales associées à ce projet et au développement économique induit. La DTA ajoute que ce tracé constituera alors la nouvelle limite entre les espaces inconstructibles au titre de la loi 'littoral' situés sur le territoire de la réserve naturelle (au sud et à l'est) et les espaces à urbaniser (au Nord et à l'Ouest). L'objectif de cet aménagement est de faciliter le trafic fluvial entre le port du Havre et le canal de Tancarville, ce trafic étant aujourd'hui rendu difficile du fait de la présence de plusieurs ponts mobiles au sein du port. En outre, en dépit de l'augmentation de la capacité des barges envisagée par les opérateurs fluviaux, leurs mouvements de plus en plus nombreux vont, dans les années à venir, impliquer des manœuvres de plus en plus fréquentes de ces ponts mobiles.

Les études ont débuté par la réalisation d'inventaires faune et flore et de l'état des lieux hydraulique et hydrogéologique. Ces travaux vont être complétés en 2008 par une étude de typologies des habitats estuariens, une étude des tracés possibles du canal, une étude des ouvrages de franchissement, une étude des effets socio-économiques du projet, une étude de l'impact hydraulique du projet et de la définition des mesures d'accompagnement environnemental.

En 2006, le port de Rouen a de son côté lancé les études préalables du projet d'amélioration de ses accès maritimes, qui consiste à draguer le chenal de navigation et à adapter les infrastructures portuaires (confortements de quais, infrastructures de sécurité). L'objectif du projet est de permettre au port d'accueillir les navires vraquiers de nouvelle génération dont le tirant d'eau et la taille vont sensiblement augmenté dans les années à venir. Le projet consiste à raser les points hauts du chenal de navigation de 40 cm en moyenne, de l'estuaire jusqu'à Rouen, afin d'augmenter le tirant d'eau d'un mètre, et à adapter les infrastructures portuaires au gabarit des nouveaux navires de transport en vrac. Le volume à draguer est de l'ordre de 3 millions de m³ entre Tancarville et Rouen, sur un linéaire total de 130 km, et de 3 millions de m³ en aval de Tancarville.

Dès le lancement des études, le port de Rouen a soumis son projet aux différents services de l'Etat, tant au niveau national que local, ainsi qu'à ses partenaires, dont certains ont contribué à son élaboration notamment sur le plan environnemental et de la valorisation des sédiments (GIP Seine-Aval, Agence de l'Eau Seine Normandie ...). Les principales collectivités et les groupements de communes concernées ont également été consultés et le projet a été présenté début 2007 aux maires et aux conseillers généraux puis à des associations de protection de l'environnement.

L'amélioration des accès maritimes du port de Rouen s'inscrit dans le cadre plus vaste du projet 'Rouen Port Maritime' qui englobe également la valorisation environnementale de la Seine et des berges et le classement des boucles de la Seine au titre de la législation sur les sites. L'action de valorisation environnementale vise, sur un périmètre allant du barrage de Poses à l'embouchure de la Seine, à restaurer certaines fonctions environnementales du fleuve (reconnexion de zones humides notamment). Une attention particulière sera de plus portée à la valorisation des berges, afin de conjuguer leur valeur environnementale avec la nécessité de protéger les riverains des crues et avec la navigation. Dans un premier temps, une étude globale est assurée sous maîtrise d'ouvrage du Conseil Général de Seine Maritime. Le classement des boucles de la Seine au titre des sites, mené par l'Etat via le Direction régionale de l'environnement de Haute-Normandie, vise à préserver les paysages remarquables de la vallée de la Seine, tout en prenant en compte les nécessités du développement économique, notamment portuaire, et urbain.

Une prochaine étape, Seine-Aval 4 (2007-2012)

Le Conseil d'Administration du GIP Seine-Aval s'est prononcé officiellement pour le renouvellement du GIP Seine-Aval pour la période 2007-2012 en séance plénière

du 14 avril 2006. Cependant la communauté scientifique Seine-Aval, les partenaires du GIP Seine-Aval et l'ensemble des acteurs du territoire Seine-Aval s'étaient réunis lors d'un séminaire de réflexion des 23 et 24 novembre 2005 pour dresser les grandes lignes du programme Seine-Aval 4 qui couvre la période 2007-2012. Dans cette quatrième phase, plus qu'auparavant, le programme Seine-Aval aura pour objectif d'apporter une réponse aux problématiques opérationnelles posées par la mise en œuvre des politiques, documents et programmes qui concernent l'estuaire (PGGES, DTA, CPER, SRADT, Plan Seine, DCE, SDAGE, projets des ports...). Il apparaît en outre nécessaire de se situer dans une continuité amont/aval (renforcement du lien avec le programme PIREN-Seine en amont, extériorisation vers la baie de Seine lorsque les problématiques le justifieront), et de s'intégrer à des démarches de coopération inter-estuariennes (aux échelles nationale avec les estuaires de la Loire et de la Garonne et européenne comme l'Elbe, l'Escaut ou l'Humber) ou de visions stratégiques plus larges (Arc-Manche). L'ensemble de ces projets, qu'ils soient portés de façon commune ou par l'un ou l'autre des acteurs, détermineront les problématiques fondamentales auxquelles le Programme Seine-Aval aura à apporter une compréhension et une vision globale du système estuarien ainsi que des réponses concrètes à visée opérationnelle.

Les réponses que le programme Seine-Aval 4 entend tenter d'apporter à ces différentes problématiques ont été structurées autour de trois axes de recherche : reconquête et restauration ; risques sanitaires et environnementaux et système d'observation. En matière de reconquête et de restauration, le premier objectif de Seine-Aval 4 est de répondre aux exigences des réglementations nationales et internationales en matière de protection environnementale (DCE, Directives habitats et oiseaux) notamment en conservant et restaurant le patrimoine biologique et les communautés typiques de ces milieux estuarien (biodiversité faunistique et floristique) et en participant à l'amélioration de la qualité de l'eau (conserver le rôle épurateur des vasières et du bouchon vaseux). Le second objectif est de déterminer et comprendre les attentes des usagers de l'estuaire en ce qui concerne les biens et les services rendus (ou pouvant l'être) par l'axe Seine notamment au travers de la restauration des paysages estuariens (qualité de vie et identité estuarienne).

En matière de risques sanitaires et environnementaux, l'enjeu est de caractériser le danger représenté par la présence d'un certain nombre de contaminants et micro-organismes dans l'estuaire et de disposer d'éléments d'évaluation du risque induit. Cela doit être réalisé à la fois sur un plan environnemental (impact sur la qualité du milieu et le potentiel écologique et biologique), sur un plan sanitaire (en particulier le risque sur la santé humaine) et sur un plan économique (activité de pêche notamment). Ces deux derniers domaines ne peuvent se concevoir sans une analyse de la perception qu'a l'ensemble des usagers de l'estuaire de ce risque induit. Trois grands types de risques, relevant chacun de sources et d'enjeux différents, ont été clairement identifiés : le risque chimique, le risque microbiologique et le risque lié à l'eutrophisation et aux blooms d'algues toxiques.

Concernant le troisième axe, l'objectif est de compléter les nombreux résultats scientifiques, bases de données, couches SIG issus du programme Seine-Aval et des différents réseaux de surveillance afin d'aboutir à terme au développement d'un véritable système d'observation de l'estuaire. Ce système d'observation dont le développement repose sur le GIP Seine-Aval dans le cadre de ses missions opérationnelles, nécessite un soutien et une expertise scientifique approfondie, pour constituer à terme un véritable outil d'aide à la recherche, de suivi d'expérimentations et de mémoire des problématiques passées, actuelles et à venir de l'estuaire. Il constituera surtout un outil intégré d'orientation des décisions pour les partenaires du GIP Seine-Aval notamment dans le cadre la gestion globale et intégrée de l'estuaire.

Sur cette base, le GIP Seine-Aval a lancé des appels à propositions en 2007 et en 2008 pour une première période 2007-2010 en définissant, au sein de ces trois axes, un certain nombre de priorités: effets du changement climatique et évolution à long-terme des anthroposystèmes* ; rétrospective et paysage ; approches expérimentales, suivi et évaluation de la restauration des fonctionnalités écologiques ; analyse du risque 'santé humaine' (chimie et microbiologie) ; modélisation ; éléments emblématiques (poisson, oiseaux, plantes, paysages ...). Une nouvelle étape s'engage donc pour les prochaines années pour l'ensemble des acteurs Seine-Aval et de ses partenaires.

Conclusions

L'estuaire de la Seine concerne un large territoire compris entre le barrage de Poses en amont à la baie de Seine. C'est un territoire complexe à l'interface entre les systèmes continentaux et côtiers et dans lequel se concentre de très nombreux acteurs et de très nombreuses réglementations, visions et perspectives plus ou moins partagées selon les problématiques étudiées et les espaces considérés. Les apports amont sont tels que la plupart des questionnements sur le fonctionnement de cet anthroposystème se pose au niveau du bassin versant de la Seine soit un territoire de 79 000 km², près de 15 % de la surface de la France mais qui concentre plus du tiers de la population et des activités économiques et agricoles françaises. Son état environnemental et son image véhiculée par l'ensemble des acteurs à la fin des années 1980 étaient liés à la forte dégradation du milieu concentrant à lui seul une accumulation de contamination et dégradation de son fonctionnement. L'anthropisation de l'estuaire de la Seine a en fait commencé très tôt, dès le milieu du XIX^{ème} siècle et elle se poursuit encore aujourd'hui. L'estuaire connaît une fragilisation des écosystèmes liée aux usages anthropiques qui se traduisent par le morcellement extrême des unités biologiques. Parallèlement à ces aménagements, les conditions physico-chimiques du milieu estuarien se sont dégradées inexorablement pendant plus d'un siècle aboutissant à un milieu fortement contaminé à la fin des années 1980 : niveaux de contamination en métaux comme le cadmium (Cd) et le mercure (Hg), en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et en Polychlorobiphényles (PCB) parmi les plus élevés au niveau mondial, très fort déficit en oxygène en aval des agglomérations parisiennes et rouennaises en relation avec la déficience du traitement des eaux usées. Dans la partie aval, le dysfonctionnement biologique s'est traduit notamment par un effondrement des pêcheries de crevettes grises, alors que pour la partie fluviale les pêches professionnelles cessent totalement dans les années 1970 parallèlement à la quasi-disparition des poissons migrateurs.

Il a fallu attendre le début des années 1990 et l'émergence du programme Seine-Aval pour voir un accroissement significatif des connaissances sur l'estuaire de la Seine en dépit de son intérêt national majeur et de sa forte dégradation. Nous devons à Louis-Alexandre Romana, cadre à l'Ifremer La Seyne sur mer, la mobilisation dès 1993 de la communauté scientifique sur l'estuaire de la Seine et l'émergence en 1995 du Programme de recherche scientifique pluridisciplinaire Seine Aval. Coordonné par la Région Haute-Normandie, ce dernier associait alors différents partenaires dont l'Etat, l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN) et les associations d'industriels et focalisait son intérêt sur l'estuaire de la Seine. Seine-Aval a en fait été mis en place pour répondre à un double besoin : i) fournir les connaissances nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème estuarien et ii) développer des outils nécessaires aux prises de décision des acteurs locaux dans l'optique d'une restauration de la qualité des eaux de la Seine et d'une préservation des milieux naturels. Le programme s'est organisé de 1995 à 2006 en trois phases ; il a mobilisé une

communauté scientifique nationale et internationale forte de plus de 50 équipes et près de 200 participants et formé plus de cinquante étudiants dont près d'une vingtaine a bénéficié d'un support financier sous forme de bourse de thèse de la région Haute-Normandie. Le niveau de connaissances sur l'estuaire de la Seine s'est donc considérablement accru depuis une décennie dans toutes les disciplines. La production scientifique a atteint plus de 800 documents : rapports, mémoires, publications dans des revues scientifiques ; il s'ajoute une première série spéciale de 16 fascicules Seine-Aval parus dans une collection de l'Ifremer, un bon nombre de modèles mathématiques adaptés ou développés spécialement pour l'estuaire de la Seine et deux colloques internationaux qui ont été organisés respectivement en 1999 et 2004.

L'état de l'estuaire s'est notablement amélioré au cours des deux dernières décennies : anoxies plus réduites en durée et en extension, réduction des phosphores, des contaminations métalliques, amélioration de la qualité des eaux liées aux efficacités des stations d'épuration pour certains contaminants, pas pour d'autres. Aujourd'hui ce sont les dangers et risques chimiques et microbiologiques (présence d'hydrocarbures, de contaminants émergents comme les produits pharmaceutiques et de détection de bactéries résistantes aux antibiotiques dans les eaux) qui sont préoccupants pour la fonctionnalité à long terme de l'estuaire. Récemment, l'extension Port 2000 du Port du Havre a contribué à l'évolution morphologique et sédimentaire de la partie aval de l'estuaire. Les travaux et les mesures d'accompagnement liés à la construction de Port 2000 participent à l'évolution morpho-sédimentaire mais aussi à celles des habitats et peuplements estuariens. Il faudra sans doute attendre plusieurs années avant que le système retrouve un certain 'équilibre' dans ses nouvelles dimensions. L'évolution géomorphologique de la partie aval de l'estuaire dont son comblement et la progradation des bancs vers la baie demeure une des préoccupations majeures pour l'avenir de l'estuaire. A peine Port 2000 achevé, de nouveaux projets d'aménagement de l'estuaire émergent liés au développement économique de ce territoire fortement convoité.

Cependant, en dépit des diverses atteintes à l'environnement l'estuaire de la Seine constitue toujours un milieu favorable aux juvéniles de plusieurs espèces de poissons et sa richesse ornithologique est un des atouts patrimoniaux majeurs de l'estuaire. Cette richesse patrimoniale se mesure toutefois par une accumulation de mesures réglementaires et d'inventaires traduisant un trop plein juridique, d'où la nécessité d'une harmonisation. À côté de ce mitage des espaces d'intérêt patrimonial, les très nombreux acteurs sur ce territoire estuarien, le développement économique lié aux activités de transport autour des deux grands ports maritimes, mais aussi le développement touristique et la sauvegarde d'activité traditionnelle, chasse, pêche, agriculture, les diverses visions prospectives, la perception des citoyens sur ce territoire sont multiples et peu compatibles avec le concept de gestion intégrée. Il semble urgent de trouver un moyen de gérer et

de restaurer la complexité estuarienne dans sa globalité : un défi pour l'avenir de l'estuaire à l'horizon 2025.

Quelques signes encourageant peuvent être enfin signalés. En effet, la construction de Port 2000 a été marquée par l'importance du débat public (le premier en France) et peut être considérée *a posteriori* comme ayant été une opportunité d'initier une réflexion environnementale globale sur l'estuaire et à l'origine de l'émergence du Plan de Gestion Globale de l'Estuaire et du Conseil de l'Estuaire sur lesquels reposent l'essentiel des espoirs d'une meilleure prise en compte du développement durable de cet espace estuarien.

Le GIP Seine-Aval est reconduit pour six ans (2007-2012). Face aux enjeux qui se dressent pour reconquérir les fonctionnalités estuariennes dans le contexte de changement climatique et d'intégration dans la gestion durable de cet espace, il reste à mieux se faire connaître et reconnaître dans la communauté scientifique nationale et internationale. L'ouverture vers des partenaires extérieurs français et européens est indispensable. De même, le transfert des acquis scientifiques et leur transposition vers les gestionnaires des espaces et territoire estuariens est une tâche essentielle pour le pôle opérationnel de Seine-Aval. Autant de défis qui attendent les participants à Seine-Aval 4 pour les prochaines années.

Références bibliographiques

- Abarnou A., Burgeot T., Chevreuil M., Le Boulenger F., Loizeau V., Madoulet-Jaouen A., Minier C.**, 2000. Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant ? Fascicule Seine-Aval, 13, 35.
- Akopian M., Garnier J., Testard P., Ficht A.**, 2001. Estimating the benthic population of *Dreissena polymorpha* and its impact in the Lower Seine River, France. *Estuaries*, 24 (6), 1003-1014.
- 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, 15, 35.
- Avoine J.**, 1994. Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Sédimentologie. Ifremer, Port Autonome du Havre. 154.
- Beaumais O., Laroutis D.**, 2007. In search of natural resource-based economies: the case of the Seine estuary (France). *Hydrobiologia*, 588 (1), 3-11.
- Bessineton C.**, 1998. La création de vasières artificielles dans l'estuaire de la Seine. Actes de Colloque Ifremer, 22, 111-121.
- Billen G., Garnier J.**, 1997. The Phison River Plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aquatic Microbial Ecology*, 13 (1), 3-17.
- Billen G., Garnier J.**, 2005. Diagnostic du fonctionnement biogéochimique du continuum estuaire - panache de la Seine (DI-APASON). CNRS / UPMC. 31, Rapport Seine-Aval.
- Billen G., Garnier J.**, 2007. River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry*, 106 (1-2), 148-160.
- Billen G., Garnier J.**, 2007. Modélisation des apports de nutriments par les affluents intra-estuariens. Exercice 2006. UMR Sisyphe 7619, CNRS/UPMC. 17, Rapport Seine-Aval.
- Billen G., Poulin M., Garnier J., Servais P., Brion N., Ficht A., Even S., Berthe T.**, 1999. L'Oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique. Fascicule Seine-Aval, 5, 30.
- Boust D., Lesueur P., Rozet M., Solier L., Ficht A.**, 2002. The dynamics of ⁶⁰Co-labelled sediment particles in the Seine estuary. *Radioprotection*, 37 (C), 749-754.
- Budzinski H., Augagneur S., LeMenach K., Togola A., Lardy S.**, 2007. Compte rendu des travaux effectués dans le cadre du projet : nouvelles classes de contaminants de l'estuaire de la Seine : alkylphénols, hormones stéroïdiennes, antibiotiques, analgésiques et hypolipémiants. Université de Bordeaux 1/LPTC. 29, Rapport Seine-Aval.
- Bustamante P., Metian M., Guyot T., Oberhansli F., Teyssié J.-L., Cosson R. P., Miramand P., Warnau M.**, 2007. Etude de la bioaccumulation et de la biodisponibilité vis-à-vis du consommateur humain des métaux lourds (Ag, Cd, Hg, Pb) présents dans les tissus des coquilles *St Jacques* (*Pecten maximus*) pêchées en baie de Seine. Rapport final - Année 2006. UMR 6217 CNRS-Ifremer-Université de la Rochelle / CRELA, AIEA / Marine Environment Laboratory, Université de Nantes / UPRES 2663 ISOMer. 65, Rapport Seine-Aval.
- Cachot J., Dégremont C.**, 2009. Quel est le risque génotoxique en estuaire de Seine ? Fascicule Seine-Aval, 2.2, 70.
- Cachot J., Geffard O., Augagneur S., Lacroix S., Le Menach K., Peluhet L., Couteau J., Denier X., Devier M.H., Pottier D., Budzinski H.**, 2007. Evidence of genotoxicity related to high PAH content of sediments in the upper part of the Seine estuary (Normandy, France). *Aquatic Toxicology*, 79 (3), 257-267.
- Cailleaud K., Forget-Leray J., Souissi S., Hilde D., LeMenach K., Budzinski H.**, 2007. Seasonal variations of hydrophobic organic contaminant concentrations in the water-column of the Seine Estuary and their transfer to a planktonic species *Eurytemora affinis* (Calanoida, copepoda). Part 1: PCBs and PAHs. *Chemosphere*, 70 (2), 270-280.
- Chiffolleau J.-F.**, 2001. La contamination métallique. Fascicule Seine-Aval, 8, 39.
- Christensen V., Pauly D.**, 1992. ECOPATH II -- a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. *Ecological Modelling*, 61 (3-4), 169-185.
- Costil K.**, 1998. Le macrozoobenthos de la Seine fluviale dans la région rouennaise. 39.
- Cugier P., Billen G., Guillaud J. F., Garnier J., Ménesguen A.**, 2005. Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. *Journal of Hydrology*, 304 (1-4), 381-396.
- Cugier P., Le Hir P.**, 2002. Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55 (5), 673-695.
- Cuvilliez A.**, 2008. Dynamiques morphologique et sédimentaire d'une slikke et d'un schorre dans un estuaire macrotidal anthropisé (Seine-France). Université de Rouen, 263.
- Dargnat C., Blanchard M., Teil M.-J., Chevreuil M.**, 2007. Sources et voies de transfert des phtalates dans l'estuaire de Seine. Rapport des travaux de recherche concernant l'année 2006. EPHE / UMR 7619 Sisyphe / Laboratoire Hydrologie Environnement. 23, Rapport Seine-Aval.
- Dauvin J.-C., Costil K., Duhamel S., Hocdé S., Mouny P., de Roton G.**, 2002. Patrimoine biologique et chaînes alimentaires. Fascicule Seine-Aval, 7, 47.
- Dauvin J.-C., Desroy N.**, 2005. The food web in the lower part of the Seine estuary: a synthesis of existing knowledge. *Hydrobiologia*, 540, 13-27.
- Dauvin J.-C., Desroy N., Janson A.-L., Vallet C., Duhamel S.**, 2006. Recent changes in estuarine benthic and suprabenthic communities resulting from the development of harbour infrastructure. *Marine Pollution Bulletin*, 53 (1-4), 80-90.
- Dauvin J.-C., Fisson C., Garnier J., Lafite R., Ruellet T., Billen G., Deloffre J., Verney R.**, 2008. A report card and quality indicators for the Seine estuary: from scientific approach to operational tool. *Marine Pollution Bulletin*, 57 (1-5), 187-201.
- Deloffre J., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S., Verney R., Guézennec L.**, 2005. Sedimentary processes on an intertidal mudflat in the upper macrotidal Seine estuary, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64 (4), 710-720.
- Deloffre J., Lafite R., Lesueur P., Verney R., Lesourd S., Cuvilliez A., Taylor J.**, 2006. Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology*, 235 (1-4), 151-164.
- Deloffre J., Verney R., Lafite R., Lesueur P., Lesourd S., Cundy A. B.**, 2007. Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology*, 241 (1-4), 19-32.
- Desroy N., Baron M., Payen C., Dauvin J.-C.**, 2004. L'estuaire de la Seine : zone de conflit entre développement économique et préservation de l'environnement. *Océanis*, 30 (1), 71-93.
- Desroy N., Janson A.-L., Denis L., Charrier G., Lesourd S., Dauvin J.-C.**, 2007. The intra-annual variability of soft-bottom macrobenthos abundance patterns in the North Channel of the Seine estuary. *Hydrobiologia*, 588 (1), 173-188.
- Dubrulle C., Lesueur P., Boust D., Dugué O., Poupinet N., Lafite R.**, 2007. Source discrimination of fine-grained deposits occurring on marine beaches: the Calvados beaches (eastern Bay of the Seine, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72 (1-2), 138-154.
- Dubrulle C., Lesueur P., Poupinet N., Dugué O., Tessier B., Delsinne N., Lafite R., Laignel B., et al.**, 2007. Projet MEDIUM - Etude du mélange et de dispersion des sédiments par l'utilisation de marqueurs particuliers dans l'estuaire de Seine. Année 2006-2007. UMR CNRS 6143 M2C, IRSN / LRC. 125, Rapport Seine-Aval.
- Dubrulle-Brunaud C.**, 2007. Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (continuum Seine-Baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. Université de Rouen, 332.
- Dubrulle-Brunaud C., Lesueur P., Tessier B., Sorrel P., Dugué O., Poupinet N., Thouroude C., Lafite R., et al.**, 2008. Synthèse

MEDIUM 2007 - Etude du mélange et de dispersion des sédiments par l'utilisation de marqueurs particuliers dans l'estuaire de Seine. UMR CNRS 6143 M2C, IRSN / LRC. 74, Rapport Seine-Aval.

Duhamel S., Gouneau N., Lefrançois T., Mayot S., Perrot Y., Feunteun E., 2005. Le peuplement ichthyologique de l'estuaire amont. Rapport final. CSLN. 52.

Etcheber H., Tailleux A., Abriel G., Garnier J., Servais P., Moatar F., Commarieu M.-V., 2007. Particulate organic carbon in the estuarine turbidity maxima of the Gironde, Loire and Seine estuaries: origin and lability. *Hydrobiologia*, 588 (1), 245-259.

Even S., Bacq N., Thouvenin B., Garnier J., Servais P., Lafite R., Le Hir P., 2006. Validation de SiAM3D pour le cycle de la matière organique et bilans de carbone. Rapport d'activité 2005.

Even S., Thouvenin B., 2007. Modélisation et bilans de carbone en estuaire de Seine (synthèse CYMES). Le Modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine). Ecole des Mines de Paris / Centre de Géosciences, Ifremer / Département Biogéochimie et Ecotoxicologie. 18, Rapport Seine-Aval.

Even S., Thouvenin B., Bacq N., Billen G., Garnier J., Guezennec L., Blanc S., Ficht A., Le Hir P., 2007. An integrated modelling approach to forecast the impact of human pressure in the Seine estuary. *Hydrobiologia*, 588 (1), 13-29.

FHI, 2005. Common implementation strategy for the water framework directive. Environmental quality standards substance data sheet, Atrazine. Fraunhofer Institute. 21.

FHI, 2005. Common implementation strategy for the water framework directive. Environmental quality standards substance data sheet, diuron. Fraunhofer Institute. 17.

Garcia-Armisen T., Lebaron P., Servais P., 2005. β -D-glucuronidase activity assay to assess viable *Escherichia coli* abundance in freshwaters. *Letters in Applied Microbiology*, 40 (4), 278-282.

Garcia-Armisen T., Servais P., 2007. Respective contributions of point and non-point sources of *E. coli* and enterococci in a large urbanized watershed (the Seine river, France). *Journal of Environmental Management*, 82 (4), 512-518.

Garcia-Armisen T., Tournon A., Petit F., Servais P., 2005. Sources of faecal contamination in the Seine estuary (France). *Estuaries*, 28 (4), 627-633.

Garnaud S., Lesueur P., Clet M., Lesourd S., Garland T., Lafite R., Brun-Cottan J.-C., 2003. Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*, 202 (1-2), 33-54.

Garnier J., Billen G., Even S., Etcheber H., Servais P., 2008. Organic matter dynamics and budgets in the turbidity maximum zone of the Seine Estuary (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77 (1), 150-162.

Garnier J., Billen G., Hanset P., Testard P., Coste M., 1998. Chapitre 14. Développement algal et eutrophisation. Meybeck Michel, De Marsily Ghislain, Fustec Eliane, 593-626, Elsevier.

Garnier J., Even S., Bacq N., Servais P., Thouvenin B., 2007. CYMES - Cycle de la Matière Organique en Estuaire de Seine. Exercice 2006. UMR 7619 Sisyphe, Ecole des Mines de Paris / Centre de Géosciences, GIP Seine-Aval, Université Libre de Bruxelles / Ecologie des Systèmes Aquatiques, Ifremer / Département Biogéochimie et Ecotoxicologie. 46, Rapport Seine-Aval.

Garnier J., Even S., Bacq N., Servais P., Thouvenin B., Gonzales J.-L., 2009. Cycle de la Matière Organique en Estuaire de Seine. Fascicule Seine-Aval, 62.

Garnier J., Minier C., Akopian M., Testard P., Billen G., Dauvin J.-C., Abarnou A., Cachot J., Knigge T., 2009. La dreissène en Seine. Fascicule Seine-Aval, 50.

Gilliers C., Amara R., Bergeron J.-P., 2004. Comparison of growth and condition indices of juvenile flatfish in different coastal nursery grounds. *Environmental Biology of Fishes*, 71 (2), 189-198.

Gilliers C., Le Pape O., Désaunay Y., Morin J., Guérault D., Amara R., 2006. Are growth and density quantitative indicators of essential fish habitat quality? An application to the common sole

Solea solea nursery grounds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69 (1-2), 96-106.

GIP Seine-Aval, 2004. Résumé de la partie 1 du rapport "Programme Seine-Aval : synthèse des travaux scientifiques et opérationnels réalisés entre 2001 et 2004". GIP Seine-Aval. 25, Rapport Seine-Aval.

Guérit I., Bocquené G., 2007. Analyse du risque environnemental lié à la contamination chimique en estuaire de Seine. Synthèse des travaux. Ifremer / DC Nantes. 41, Rapport Seine-Aval.

Guérit I., Bocquené G., James A., Thybaud E., Minier C., 2008. Environmental risk assessment: a critical approach of the european TGD in an in situ application. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 71 (1), 291-300.

Guézennec L., Romana L.-A., Goujon R., Meyer R., 1999. Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes. Fascicule Seine-Aval, 1, 29.

Hamm L., Romana L.-A., Lerat F., 2001. Maintien des fonctionnalités biologiques de la vasière nord de l'estuaire de la Seine. Actes de Colloque Ifremer, 29, 157-167.

Hamm L., Viguié J., 1998. Les aménagements modifiant le fonctionnement des estuaires. Actes de Colloque Ifremer, 22, 20-28.

Huet P., Martin X., Allain Y. M., De Fleurieu A., Le Doré F., Zeisser N., 2004. L'estuaire de la Seine. Conseil Général des Ponts et Chaussées et Inspection générale de l'Environnement. 46.

Janson A.-L., 2007. Evolution de la biodiversité benthique des vasières de l'estuaire de la Seine en réponse à la dynamique sédimentaire. De l'approche descriptive à l'approche fonctionnelle. Université de Rouen, 282 + annexes.

Kavlock R., Boekelheide K., Chapin R., Cunningham M., Faustman E., Foster P., Golub M., Henderson R., et al., 2002. NTP Center for the Evaluation of Risks to Human Reproduction: phthalates expert panel report on the reproductive and developmental toxicity of butyl benzyl phthalate. *Reproductive Toxicology*, 16 (5), 453-487.

Lachambre M., Fisson C., 2007. La contamination chimique : quel risque en estuaire de Seine ? GIP Seine-Aval. 110.

Lachambre M., Fisson C., 2007. La contamination chimique : quel risque en estuaire de Seine ? Fiche substance : organoétoxiants. GIP Seine-Aval. 14, Rapport Seine-Aval.

Laroutis D., 2006. Les activités industrielles liées à l'estuaire de la Seine et leurs impacts environnementaux : analyse coûts-bénéfices pour une gestion prospective intégrée. Université de Rouen, 319.

Le Hir P., Ficht A., Silva Jacinto R., Lesueur P., Dupont J.-P., Lafite R., Brenon I., Thouvenin B., Cugier P., 2001. Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries*, 24 (6), 950-963.

Le Pape O., Gilliers C., Riou P., Morin J., Amara R., Désaunay Y., 2007. Convergent signs of degradation in both the capacity and the quality of an essential fish habitat: state of the Seine estuary (France) flatfish nurseries. *Hydrobiologia*, 588 (1), 225-229.

Leloup J., Petit F., Boust D., Deloffre J., Bally G., Clarisse O., Quillet L., 2005. Dynamics of sulfate-reducing microorganisms (*dsrAB* genes) in two contrasting mudflats of the Seine estuary (France). *Microbial Ecology*, 50 (3), 307-314.

Lesourd S., 2000. Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine. Université de Caen Basse-Normandie, 280.

Lesueur P., Lesourd S., 1999. Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique. Fascicule Seine-Aval, 3, 39.

Lozachmeur O., Dauvin J.-C., 2007. Réflexions sur la restauration et la gouvernance de l'estuaire de la Seine dans une perspective de gestion intégrée des zones côtières. Rapport d'étude réalisée dans le cadre de l'appel à projets pour un développement équilibré des territoires littoraux par une gestion intégrée des zones côtières de la Délégation Interministérielle à l'Aménagement et la Compétitivité des Territoires et le Secrétariat Général de la Mer. Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval. 62, Rapport Seine-Aval.

- Masson R., Loup B., Bultelle F., Siah A., Leboulenger F., Danger J. M.**, 2007. Identification of the gene encoding a Dnak-type molecular chaperone as potentially down regulated in blue mussels (*Mytilus edulis*) following acute exposure to atrazine. *Hydrobiologia*, 588 (1), 135-143.
- Metian M., Bustamante P., Cosson R. P., Hédouin L., Warnau M.**, 2008. Investigation of Ag in the king scallop *Pecten maximus* using field and laboratory approaches. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 367 (1), 53-60.
- Meybeck M., Laroche L., Durr H. H., Syvitski J. P. M.**, 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and Planetary Change*, 39 (1-2), 65-93.
- Minier C., Abarnou A., Jaouen-Madoulet A., Le Guellac A.-M., Tutundjian R., Bocquené G., Leboulenger F.**, 2006. A pollution-monitoring pilot study involving contaminant and biomarker measurements in the Seine estuary, France, using zebra mussels (*Dreissena polymorpha*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25 (1), 112-119.
- Minier C., Bocquené G., Jaouen A., Guyot T., Tutundjian R., Miramand P., Abarnou A., Leboulenger F.**, 1998. Mesure et suivi de biomarqueurs de pollution chez la moule *Dreissena polymorpha* en Seine fluviale aval. Université du Havre, Ifremer, Université de La Rochelle. SNS. 21, Rapport Seine-Aval.
- Morgan C. A., Cordell J. R., Simenstad C. A.**, 1997. Sink or swim? Copepod population maintenance in the Columbia River estuarine turbidity-maxima region. *Marine Biology*, 129 (2), 309-317.
- Morin J., Duhamel S.**, 2007. Fascicule halieutique. Rapport 2006. Ifremer, CSLN. 65, Rapport Seine-Aval.
- Mouny P., Dauvin J.-C., Zouhiri S.**, 2000. Benthic boundary layer fauna from the Seine estuary (eastern English Channel, France): spatial distribution and seasonal changes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 80, 959-968.
- Ouddane B., Billion G., Fischer J. C.**, 2007. Les vasières de l'estuaire de la Seine : puits ou sources de bactéries résistantes aux métaux traces ? USTL / UMR CNRS 8110. 11, Rapport Seine-Aval.
- Rochard E., Boët P., Castelnau G., Gauthiez F., Bigot J.-F., Ballion B.**, 1997. Premier inventaire ichtyologique de la partie basse de la Seine. 8-31.
- Rochard E., Croze O., Béguet 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 02/2005/03). CEMAGREF. 143, Rapport Seine-Aval.
- Ruelland D.**, 2003. Seneque 3: logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité des eaux de surface. *Géomatique Expert*, 27, 12-18.
- Ruelland D., Billen G., Brunstein D., Garnier J.**, 2007. SENEQUE: a multi-scaling GIS interface to the Riverstrahler model of the biogeochemical functioning of river systems. *Science of the Total Environment*, 375 (1-3), 257-273.
- Rybarczyk H., Elkaïm B.**, 2003. An analysis of the trophic network of a macrotidal estuary: the Seine Estuary (Eastern Channel, Normandy, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58 (4), 775-791.
- Schmitt F. G., Dur G., Souissi S., Brizard Zongo S.**, 2008. Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387 (26), 6613-6623.
- Servais P., Billen G., Goncalves A., Garcia-Armisen T.**, 2007. Modelling microbiological water quality in the Seine river drainage network: past, present and future situations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1581-1592.
- Servais P., Castignolles N., Petit F., George I., Buffet-Janvresse C., Ficht A.**, 1999. Contaminations bactérienne et virale. Fascicule Seine-Aval, 6, 26.
- Servais P., Garcia-Armisen T.**, 2007. Modélisation de la qualité microbiologique et du risque sanitaire associé en estuaire de Seine. Université Libre de Bruxelles. 24, Rapport Seine-Aval.
- Servais P., Garcia-Armisen T., George I., Billen G.**, 2007. Fecal bacteria in the rivers of the Seine drainage network (France): Sources, fate and modelling. *Science of The Total Environment*, 375 (1-3), 152-167.
- Servais P., Garnier J.**, 2006. Organic carbon and bacterial heterotrophic activity in the maximum turbidity zone of the Seine estuary (France). *Aquatic Sciences*, 68 (1), 78-85.
- Sirost O., Femenias 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 final. 170, Rapport Seine-Aval.
- 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. 78, Rapport Seine-Aval.
- Sirost O., L'Aoustet O., Niel A., Grandazzi G., Salomon J.-F., Claeys-Mekdade C.**, 2005. Usages sociaux du littoral et variations paysagères : le cas de l'envasement des plages du Calvados. Action 1-2004-11. Programme Seine-Aval III. Université de la Méditerranée. 69, Rapport Seine-Aval.
- Sirost O., Niel A., Mizoule E., Scotto F., Lorimier S.**, 2006. La restauration environnementale de l'estuaire de la Seine : attentes et perceptions de la population locale. Action IV-2004-2. Programme Seine-Aval III. Université de la Méditerranée. 65, Rapport Seine-Aval.
- Souissi S., Forget-Leray J., Budzinski H., Dauvin J.-C., Schmitt F. G., Hwang J.-S., Eunmi Lee C., Hilde D., et al.**, 2008. Synthèse des travaux réalisés sur le modèle biologique Eurytemora affinis dans Seine-Aval 3. UMR CNRS 8187 LOG. 49 + 45, Rapport Seine-Aval.
- Spilmont N.**, 2004. Métabolisme benthique intertidal en milieu marin et estuarien : mesures in situ de la production et de la respiration, variabilité spatio-temporelle et bilans. Université du Littoral Côte d'Opale, 322.
- Sultan C., Balaguer P., Terouanne B., Georget V., Paris F., Jéandel C., Lumbroso S., Nicolas J.-C.**, 2001. Environmental xenoestrogens, antiandrogens and disorders of male sexual differentiation. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 178 (1), 99-105.
- Tessier B., Delsinne N.**, 2005. Evolution morphodynamique du prisme tidal d'embouchure : facteurs naturels et d'origine anthropique. Rapport annuel 2004. 14, Rapport Seine-Aval.
- Thouvenin B., Gonzales J.-L., Chiffolleau J.-F., Boutier B., Le Hir P.**, 2007. Modelling Pb and Cd dynamics in the Seine estuary. *Hydrobiologia*, 588, 109-124.
- Tissier C., Morvan C., Bocquené G., Grossel H., James A., Marchand M.**, 2005. Les substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Fiches de synthèse. Ifremer. 92.
- 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). *Marine Pollution Bulletin*, 54 (9), 1441-1450.
- Touron A., Berthe T., Pawlak B., Petit F.**, 2005. Detection of *Salmonella* in environmental water and sediment by a nested-multiplex polymerase chain reaction assay. *Research in Microbiology*, 156 (4), 541-553.
- Tronczynski J., Munsch C., Moisan K.**, 1999. Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir. Fascicule Seine-Aval, 12, 39.
- Valence V.**, 2006. La gouvernance sur l'estuaire de la Seine. Université du Littoral Côte d'Opale. 107, Mémoire du Master 2 Droit des Zones Côtières, Aménagement et gestion du Littoral.
- Waeles B., Le Hir P., Lesueur P., Delsinne N.**, 2007. Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach. *Hydrobiologia*, 588 (1), 69-82.

Glossaire

Amphihalin : qui effectue une partie de son cycle de vie en mer et une autre en rivière.

Anadrome : qui vit en mer et se reproduit en rivière.

Analyse spectrale : méthode mathématique pour déterminer les caractéristiques d'un phénomène.

Anthropisation : modification du milieu par l'Homme et ses activités (agricoles, industrielles et urbaines).

Anthroposystème : écosystème modifié par l'Homme et où ce dernier joue un rôle central.

Autochtone : qui est issu du milieu où il se trouve.

Allochtone : qui n'est pas issu du milieu où il se trouve.

Benthique : qui est inféodé au fond.

Biodisponibilité : aptitude d'un élément chimique à être assimilé par un être vivant.

Biogène : qui provient d'êtres vivants ou de leurs activités.

Bioindicateur : indicateur biologique (espèce ou molécule d'origine biologique par exemple) lié à des conditions écologiques très précises (température ou niveau de pollution organique par exemple).

Biomarqueur : modification observable à n'importe quel niveau d'organisation biologique (de la molécule à la communauté d'individus) et créée par une substance étrangère.

Bioturbation : perturbation du sédiment induite par l'activité biologique.

Coliformes thermotolérants : coliformes fécaux capables de se développer à 44°C contrairement aux souches non fécales.

Contaminant : qui a été rajouté dans l'environnement. Un contaminant n'a pas forcément des effets toxiques pour l'écosystème.

COP : Carbone organique particulaire.

Crue : augmentation importante du débit d'un cours d'eau. En estuaire de Seine, les crues ont lieu essentiellement en hiver.

Danger : source de préjudice. A ne pas confondre avec un risque*.

DBO5 : la demande biochimique en oxygène est un des tests permettant d'évaluer la pollution organique des eaux. Ce test se base sur la capacité des microorganismes à oxyder la matière organique présente dans l'eau.

Dénitrification : réduction des nitrates en azote gazeux.

Diagénétique : relatif à l'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent au sein des sédiments.

Dulcicole : qui vit en eau douce (salinité nulle).

Ecosystème : système écologique de base comprenant un milieu naturel particulier et les organismes qui y vivent.

Engainement : secteur de l'embouchure de la Seine correspondant à l'extrémité du chenal de navigation, en aval des digues subsmersibles.

Etiage : période de l'année où le débit des cours d'eau est le plus faible. En estuaire de Seine, cette période se situe en été et en automne.

Etiologie : étude des causes et des facteurs d'une pathologie.

Eutrophe : qui a un excès de matières nutritives.

Externalité : qui a des conséquences sur l'extérieur. Une pollution est par exemple une externalité car elle va avoir des conséquences sur les organismes vivants dans l'estuaire.

Gestion intégrée : notion liée au développement durable selon laquelle les décideurs (publics et privés) et la société (dont les scientifiques et les usagers) préparent ensemble un plan de protection et de développement du milieu et de ses ressources.

Habitat : espace occupé par une espèce et caractérisé par des facteurs physico-chimiques.

Halieutique : relatif à la pêche.

Hétérotrophe : qui a besoin d'assimiler des substances organiques et ne peut produire de matière organique à partir de matière minérale.

Hydrodynamique : relatif à la dynamique des masses d'eaux (fluctuations dans le temps des courants).

Hydrophile : qui est soluble dans l'eau.

Hydrophobe : qui n'est pas soluble dans l'eau.

Ichtyofaune : ensemble des poissons vivants dans un lieu donné.

Intertidal : qui se situe dans la zone de balancement des marées (zone couverte à pleine mer et découverte à basse mer).

Macrofaune : ensemble des animaux dont la taille est supérieure à 1 mm.

Mésohalin : dont la salinité est comprise entre 5 et 18.

Méthode de l'évaluation contingente : technique mathématique servant au traitement de sondages dans lesquels il est demandé aux sondés combien ils sont disposés à payer pour éviter quelque chose.

Microphytobenthos : ensemble des algues microscopiques associées au sédiment.

MO : Matière Organique.

MOD : Matière Organique Dissoute.

MOP : Matière Organique Particulaire.

Mucilagineuse : algue qui sécrète une substance visqueuse.

Nitrification : oxydation de l'ammoniaque en nitrites et des nitrates en nitrites.

Nutriment : élément nutritif (organique ou minéral).

Oligohalin : dont la salinité est inférieure à 5 mais n'est pas nulle.

Oxydation : fixation d'oxygène par un corps (voir oxydo-réduction*).

Oxydo-réduction : action d'un corps oxydant sur un corps réducteur, avec réduction* de l'agent oxydant et oxydation* de l'agent réduit. Dans le sédiment, l'oxydo-réduction est contrôlée en partie par la quantité d'oxygène disponible.

Pathogène : microorganisme pouvant engendrer une maladie.

Pélagique : qui vit dans la colonne d'eau.

Perception sociale : jugement que les gens portent sur leur environnement par exemple.

PF : poids frais.

Photosynthétique : qui permet la fabrication de substances organiques à l'aide de l'énergie lumineuse solaire.

Phytoplanctonique : adjectif caractérisant les algues microscopiques se développant dans la colonne d'eau.

PIREN Seine : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (site web de ce groupement de recherche : www.piren-seine.fr).

pk : point kilométrique. Le pk sert de repère le long du cours d'eau (le pk 0 se situe au Pont Marie à Paris pour la Seine).

Polyhalin : dont la salinité est comprise entre 18 et 30.

Pompage tidal : pompage des particules en suspension vers l'amont qui résulte de l'asymétrie de la propagation de la marée.

Potamotouque : qui remonte le fleuve depuis la mer pour y pondre.

Progradation : processus selon lequel la sédimentation s'opère par déplacement depuis le continent vers la mer. Réduction : élimination de l'oxygène d'un corps (voir oxydo-réduction*).

Rivulaire : qui croît dans les cours d'eaux ou à proximité.

Risque : probabilité d'un préjudice. A ne pas confondre avec un danger*.

Schorre : zone des prés salés ou des herbues des estuaires et des petits havres côtiers.

Slikke : zone vaseuse comprise dans la zone de balancement des marées.

STEP : station d'épuration.

Subtidal : qui se situe sous la zone de balancement des marées (zone toujours recouverte par la mer).

Sulfato-réduction : transformation des sulfates en sulfures (par des bactéries).

Supra rationalité : notion qui est au-delà de la raison et de la réalité.

Suprabenthique : qui vit juste au-dessus du fond grâce à ses capacités natatoires.

TBT : tributylétain.

Trophique : qui concerne la nutrition des organismes.

Usage loisible : usage permis (récréatif ou productif). La navigation est, par exemple, un usage loisible en Seine.

Usage productif : usage qui contribue, directement ou indirectement, à engendrer une production. Le dragage du chenal de navigation est, par exemple, un usage productif de l'estuaire de Seine car il permet le bon fonctionnement de l'activité portuaire.

Le programme Seine-Aval 3

Contexte, bilan et enjeux

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, chenaux et vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique
- 1.4 Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
- 1.5 L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique
- 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 génotoxicité : quel risque pour les espèces aquatiques ?

Réalisation	: GIP Seine-Aval 12 Avenue Aristide Briand 76 000 Rouen www.seine-aval.fr
Conception - Edition	: AAZ Consultants
Infographie	: Quai 24
Impression sur papier recyclé	: IB4
ISBN	:
Crédits photos (couverture)	: C. Lévêque, C. Fisson, C. Dégremont, S. Moussard
Date d'édition	: Juin 2009