

Programme scientifique Seine-Aval 5

Contexte et principaux acquis 2013 - 2018

Mai 2019



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

PREAMBULE

Le présent rapport vise à partager avec la communauté scientifique et technique de l'estuaire de la Seine les principaux résultats scientifiques acquis dans le cadre de l'activité du GIP Seine-Aval sur la période 2013-2018.

Depuis la création du programme de recherche Seine-Aval (1995) et du GIP Seine-Aval (2003), la prise de conscience des enjeux environnementaux liés à la conservation et la préservation des milieux aquatiques et de la ressource en eau n'a cessé de croître. Elle s'est accompagnée d'une modification de la législation avec de nouvelles exigences de mise en application. De manière concomitante, la progression des connaissances sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire et écologique de cet écosystème complexe, à l'interface entre milieu fluvial et milieu marin, a conduit le GIP Seine-Aval à s'investir dans une démarche de capitalisation de la connaissance disponible et de réflexion autour de la problématique de réhabilitation de ses fonctionnalités écologiques.

C'est dans cette dynamique que les projets de recherche menés par l'équipe du GIP, en collaboration avec les acteurs de l'estuaire, mais également avec les équipes scientifiques impliquées dans les recherches sur l'axe Seine, ont été définis et financés. Les enjeux liés à la conservation, la protection et la réhabilitation de l'estuaire sont très importants. La mise en œuvre d'une stratégie de restauration écologique qui s'inscrit sur le long terme, qui place l'estuaire au sein du *continuum* fleuve-mer, et qui repose sur des méthodes robustes constitue un véritable challenge. Les travaux de synthèse destinés à dresser un bilan à l'échelle internationale des opérations de restauration écologique en milieu estuarien ont montré la complexité de mise en œuvre de cette problématique (Capderrey *et al.*, 2016). Les difficultés sont essentiellement dues à la nécessité de coupler des connaissances et des méthodes (outils de modélisation par exemple) acquises et développées dans des champs thématiques différents et complémentaires. La prise en compte de la complexité des processus physiques et écologiques à l'origine de la fonctionnalité des estuaires (milieux très productifs) nécessite encore des acquisitions de connaissances fondamentales afin de pouvoir coupler des modèles de fonctionnement physique (courants, érosion, transport et dépôt de sédiments) et des modèles de fonctionnement biologique (cycle de la matière organique, dynamique des nutriments, caractérisation du fonctionnement microbiologique, modélisation des réseaux trophiques à différentes échelles spatiales et temporelles...). L'altération physique et chimique de l'estuaire et ses impacts sur les processus naturels rend la tâche encore plus difficile.

Les projets de recherche Seine-Aval 5 et Seine-Aval 6 s'inscrivent dans cet objectif avec des problématiques fortement ciblées sur une amélioration des connaissances du fonctionnement écologique de l'estuaire et articulées autour du développement de modèles devant permettre, *in fine*, de tester des scénarios de réhabilitation écologique. Cette démarche doit permettre de formuler et de tester des hypothèses d'évolution des habitats restaurés et des améliorations écologiques consécutives lors de la réalisation d'opérations de restauration sur des sites ateliers bien choisis. Dans ce contexte, le GIP Seine-Aval doit

procéder à des choix judicieux en matière de sélection des sujets de recherche et doit réaliser un effort permanent de mobilisation et de synthèse des acquis afin de tenter de formuler des solutions concrètes pour aider à définir et améliorer la gestion environnementale de l'estuaire.

La période 2013-2018 couvre la 5^{ème} Phase du programme scientifique Seine-Aval (Seine-Aval 5). Les travaux ont été menés dans différents contextes :

- ⇒ Projets retenus au titre de l'appel à projets Seine-Aval 5.
- ⇒ Projets dits complémentaires à cet appel à projets, co-construits avec des équipes scientifiques pour appréhender des questionnements restés orphelins.
- ⇒ Etudes menées en régie par l'équipe du GIP.

Le programme Seine-Aval 5 s'est structuré autour de 21 projets, portés par 36 laboratoires de recherche et l'équipe du GIP Seine-Aval

Afin de mettre en évidence la continuité des travaux, les objectifs des projets engagés pendant cette période sont présentés sous forme d'encart. En effet, pour répondre à des impératifs de calendrier de fonctionnement du GIP Seine-Aval, la 6^{ème} Phase du programme scientifique Seine-Aval (Seine-Aval 6) a été initiée avant la fin de Seine-Aval 5.

Les objectifs des travaux menés sont remis dans le contexte des attentes des acteurs de l'estuaire de la Seine en termes de progrès des connaissances au service de l'aménagement et de la gestion environnementale.

Coordination et rédaction : Nicolas Bacq¹, Jean-Michel Olivier²

Co-auteurs : Maud Berlincourt¹, Gilles Billen², Jérôme Cachot², Pascal Claquin², Cédric Fisson¹, Jean-Philippe Lemoine¹, Jérémy Lobry², Manuel Muntoni¹, Edith Parlanti², Romaric Verney².

¹ GIP Seine-Aval

² Membre du comité scientifique du GIP Seine-Aval

Les résultats présentés dans le document sont issus des projets de recherche Seine-Aval 5 cités dans le texte.

La liste des projets et les références des rapports associés sont reprises en annexe.

Les figures du présent document sont extraites des rapports de recherche.

TABLE DES MATIERES

UNE CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE NECESSAIRE POUR RESTAURER LES FONCTIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE	7
1 La spécificité et la complexité estuarienne	7
2 Le contexte de la Seine	8
3 Orientations des travaux de recherche	10
FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE : MIEUX ANTICIPER LES EVOLUTIONS PHYSIQUES DE L'ESTUAIRE	12
1 Hydrodynamisme et salinité : dynamique et évolution long terme	13
1.1 Evaluation des échanges hydrologiques nappe-estuaire	13
1.2 Comparaison des situations de 1960, 1975 et 2010.	14
1.3 Influence de l'élévation du niveau marin en contexte de changement climatique sur les niveaux d'eau estuariens	15
2 Les matières en suspension : dynamique et évolution long terme	17
2.1 Influence des apports sédimentaires des affluents estuariens	17
2.2 Influence des facteurs hydrométéorologiques	18
2.3 Comparaison des situations 1960, 1975 et 2010	21
3 Morphologie et habitats benthiques	23
3.1 Vers une meilleure compréhension des évolutions morpho-sédimentaires	23
3.2 Influence de la flore et de la faune sur la stabilité des habitats sédimentaires	25
FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE : VERS UN DIAGNOSTIC GLOBAL DES FONCTIONS ESTUARIENNES	28
1 Filtre des nutriments	30
1.1 Dynamique des nutriments de Paris à la mer	31
1.2 Influence des caractéristiques des habitats sur le cycle des nutriments	33
1.2.1 Temps de transit des eaux	33
1.2.2 Dynamique spatiale et temporelle de la matière organique	33
1.2.3 Dynamique de l'azote dans les habitats pélagiques de la zone de maximum de turbidité	35
1.2.4 Dynamique de l'azote dans les habitats benthiques subtidiaux	36
1.3 Evaluation du rôle filtre de l'estuaire	37
2 Productivité biologique de l'estuaire	39
2.1 Production primaire de l'estuaire	39
2.1.1 Phytoplancton	40
2.1.2 Phytobenthos	42
2.1.3 Schématisation globale du diagnostic à l'échelle de l'estuaire	44
2.2 Propriétés du réseau trophique et « état de santé »	46

3	Cycle de vie des espèces colonisant l'estuaire	48
3.1	Macrofaune benthique en baie de Seine Orientale	49
3.1.1	Influence des facteurs physiques à l'échelle de la baie de Seine	49
3.1.2	Influence des facteurs physiques à l'échelle de carottes sédimentaires	51
3.2	Zooplancton dans le secteur aval de l'estuaire	52
3.2.1	Influence des facteurs physiques sur les densités	52
3.3	Nourricerie de poissons marin	54
3.3.1	Influence des caractéristiques physiques des habitats	54
3.3.2	Influence de la disponibilité et de l'accessibilité des habitats physiques	55
3.3.3	Influence des facteurs trophiques	57
3.4	Migration de reproduction des poissons salmonidés	60
MULTI-CONTAMINATION DE L'EAU : MIEUX GERER LES RISQUES POUR L'ECOSYSTEME		63
1	Hierarchisation des sources de contamination	64
1.1	Contaminants historiques.	65
1.2	Apports du bassin versant et des rejets directs	67
2	Dynamique de la contamination chimique et microbienne et niveau d'exposition pour les espèces et les usages	69
2.1	Dynamique des microorganismes pathogènes	69
2.2	Dissémination de gènes de résistances aux antibiotiques	70
2.3	Dynamique spatiale et temporelle des HAP	70
2.4	Dynamique spatiale et temporelle des substances pharmaceutiques et pesticides	72
2.5	Modalités de contamination des oiseaux.	73
3	Molécules problématiques et évaluation des effets de la contamination	75
3.1	Substances pharmaceutiques et pesticides identifiés comme problématiques	75
3.2	Les différents types d'effets observés sur la faune aquatique.	78
3.3	Intégration de l'analyse des effets et préconisations pour une biosurveillance pertinente	80
TRAJECTOIRE SOCIO-ECOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE		83
1	Régimes socio-écologiques du début du XX ^{ème} siècle à nos jours	84
1.1	L'estuaire de la première moitié du XX ^{ème} siècle	84
1.2	Nouveau régime avec les trente glorieuses	86
1.3	Le début d'une transition écologique	89
2	Jeux d'avenir pour la restauration de l'estuaire	94
2.1	Système agro-alimentaire : des scénarios contrastés pour l'avenir du bassin de la Seine	94
2.2	L'association du public à un programme de restauration de l'estuaire de la Seine	97
CONCLUSION GENERALE		100

LISTE DES PROJETS SCIENTIFIQUES 2013-2018	101
BIBLIOGRAPHIE – REFERENCES DU DOCUMENT	103
REFERENCES DES RAPPORTS SEINE-AVAL 5	103
VALORISATION SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX SEINE-AVAL5	105

UNE CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE NECESSAIRE POUR RESTAURER LES FONCTIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

1 La spécificité et la complexité estuarienne

Les estuaires sont des zones de transition entre la terre et la mer. Ils sont parmi les systèmes côtiers les plus importants, à la fois sur le plan écologique et économique, du fait des nombreux services rendus à l'homme et des divers usages anthropiques (Elliott et Wolanski, 2016).

La forte dynamique spatiale et temporelle des caractéristiques hydrologiques et physico-chimiques est une particularité inhérente à ces écosystèmes. Elle est en grande partie conditionnée par l'énergie hydraulique (débit du fleuve, amplitude des marées, événements climatiques), les flux solides (apports sédimentaires), de nutriments ou de contaminants, ainsi que les gradients d'inondabilité, de température, de matière en suspension et de salinité. Il en résulte qu'un estuaire se caractérise par une mosaïque d'habitats (colonne d'eau, vasière, roselière, prairie humide...) structurée par ces gradients spatiaux et temporels.

Cette mosaïque d'habitats est le siège de nombreux processus. Ils sont à l'origine de fonctions hydrologiques, sédimentaires, biogéochimiques et biologiques spécifiques aux estuaires :

1. Ils constituent des zones tampons, réceptacles de l'énergie hydraulique de la marée et du fleuve, qui influent sur les niveaux d'eau et les courants. La dynamique des matières en suspension tend à favoriser l'accumulation de particules fines et des éléments organiques, chimiques et microbiologiques qui leur sont associés. Cette dynamique structure les caractéristiques physiques des habitats.
2. D'un point de vue biogéochimique, les conditions estuariennes influent sur le cycle des nutriments et de la matière organique de manière à fournir en énergie un important réseau trophique. Les estuaires sont classés parmi les écosystèmes les plus productifs, au même titre que les forêts tropicales humides et les récifs coralliens. Ils jouent également un important rôle « filtre » pour les nutriments venant du bassin versant, réduisant les flux vers la mer.
3. Ils offrent un éventail de conditions très favorables pour de nombreuses espèces qui vont réaliser tout ou partie de leur cycle de vie dans l'estuaire. Ainsi, les estuaires constituent des environnements essentiels au maintien de la biodiversité.
4. Les conditions estuariennes favorisent également la transformation et le stockage de contaminants chimiques et microbiologiques dans les habitats estuariens, impactant les flux à la mer. La présence de ces contaminants peut cependant impacter l'état de santé des organismes et constituer un facteur limitant pour le fonctionnement écologique des estuaires.

La notion de service rendu sous-entend l'usage actuel ou futur de certaines caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques des écosystèmes. Les systèmes estuariens sont notamment reconnus pour assurer les services liés au transport par voie d'eau, à l'atténuation des risques liés aux inondations et ou aux submersions marines, à la fourniture d'eau de qualité nécessaire aux usages (pêche aux coquillages, industrie...) et ceux liés à la biodiversité (stock halieutique, tourisme écologique...).

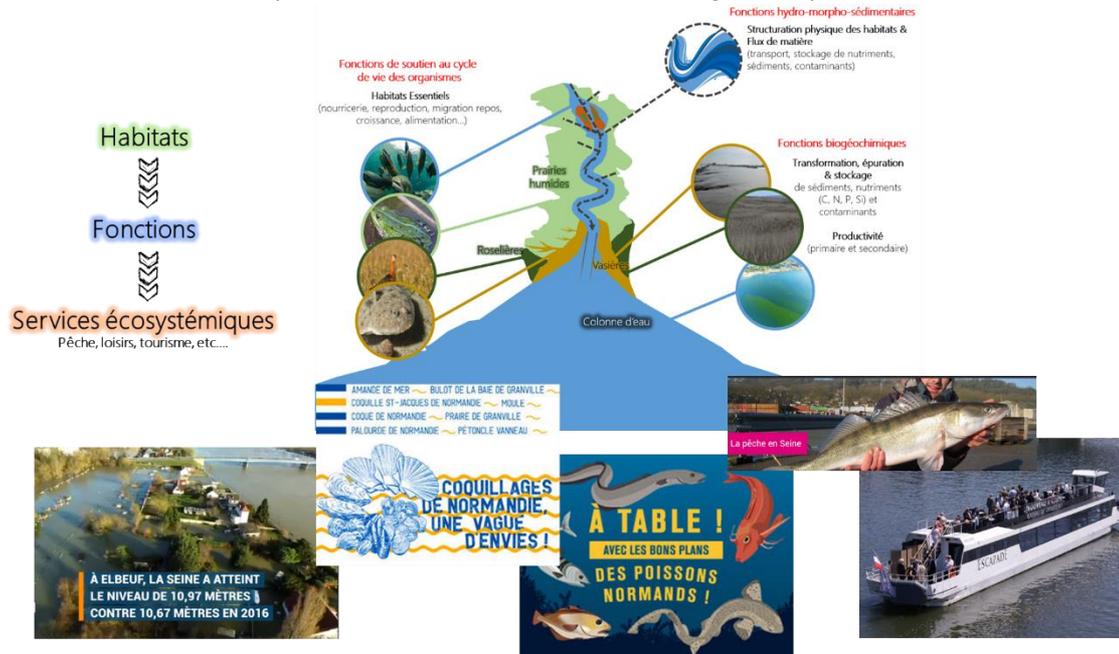


Figure 1 : Illustration des relations « habitats-fonctions - services écosystémiques » d'un estuaire.

Les estuaires évoluent sous l'influence des forçages marins, fluviaux, météorologiques, ainsi que des pratiques en termes d'aménagement du fleuve et de développement de l'ensemble du bassin versant. Il en résulte des trajectoires d'évolution socio-écologiques propres à chaque estuaire (Levêque, 2011).

Les estuaires constituent donc des milieux particuliers, où le fonctionnement naturel des milieux aquatiques et l'activité humaine interagissent fortement. Il en résulte un système complexe aux multiples dynamiques.

2 Le contexte de la Seine

En Seine, le territoire estuarien de Poses à la mer s'est structuré autour d'une voie de navigation d'importance internationale, et ce grâce à des stratégies d'aménagement des berges et du lit de la Seine mises en œuvre depuis près de 200 ans. Le lit mineur a été réduit et la plaine alluviale s'est comblée, ce qui a conduit à une division par deux des surfaces en eau et par 5 des surfaces intertidales depuis 1750 (Foussard *et al.*, 2010). Le développement de la basse vallée a renforcé la vulnérabilité du territoire face au risque inondation. La mise en place d'un système de protection contre les débordements estuariens s'est avérée nécessaire (Fisson et Lemoine, 2016).

La morphologie et le fonctionnement hydro-sédimentaire sont fortement marqués par cet héritage. Un entretien important du chenal est incontournable pour le maintien de la navigation. Le bilan sédimentaire de l'estuaire indique que les volumes dragués

annuellement sont comparables aux apports sédimentaires naturels marins et continentaux à l'estuaire (Lemoine *et al.*, 2015). Ce constat d'anthropisation de la Seine et des conséquences sur la structure actuelle de l'estuaire est bien documenté. La diminution des surfaces d'habitats et les ruptures dans les gradients naturels qui constituent la spécificité des estuaires ont influencé directement l'efficacité des fonctions estuariennes. Le fonctionnement écologique et l'état de santé environnemental sont aussi fortement influencés par le poids des pressions liées à l'industrialisation, l'urbanisation et l'activité agricole du bassin de la Seine (Fisson *et al.*, 2014).

Depuis, une quarantaine d'années, améliorer la qualité de l'eau et promouvoir le maintien de la biodiversité constituent un enjeu majeur pour l'estuaire de la Seine. Les politiques mises en œuvre ont débouché sur des améliorations notables comme par exemple : la baisse de la contamination métallique, l'amélioration de l'oxygénation, la baisse des flux de phosphore et d'ammonium, le retour d'espèces de poissons migrateurs emblématiques... La réduction des rejets polluants, l'amélioration des capacités de traitements des effluents et l'évolution des pratiques liées aux pressions urbaines, agricoles et industrielles constituent les principaux leviers d'action qui ont conduit à cette amélioration. Ces efforts se poursuivent dans un contexte réglementaire qui se renforce depuis le début des années 2000. En particulier, des objectifs de résultats sont fixés par les directives et lois cadrant la gestion des milieux aquatiques (D. Habitat, DCE, DCSMM, Loi sur la réforme Portuaire, Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, ...). L'évolution récente de la réglementation en matière de gouvernance de la gestion des milieux aquatiques et de protection contre les inondations (DI, GEMAPI) cherche à promouvoir la gestion intégrée des milieux aquatiques.

Les procédures de restauration apparaissent comme un levier d'action identifié par les structures porteuses des politiques de gestion des milieux aquatiques. **La restauration écologique est définie ici au sens large comme la mise en œuvre d'actions de gestion des milieux aquatiques et d'aménagement visant à améliorer le fonctionnement écologique de l'estuaire.** Dans un contexte où la prise en compte des activités humaines et de leurs impacts sur le fonctionnement estuarien est incontournable, les mesures portent sur des actions de réhabilitation écologique qui font référence à des objectifs d'amélioration du fonctionnement actuel.

Le besoin de définir des objectifs de restauration écologique clairs, partagés et réalistes visant l'amélioration des fonctions écologiques estuariennes identifiées comme prioritaires, dans le contexte du maintien des usages économiques et de loisirs ainsi que de la gestion des risques liés aux inondations/submersions, se retrouve au cœur de ce contexte réglementaire et des enjeux de territoire.

3 Orientations des travaux de recherche

Depuis 1995, le programme de recherche Seine-Aval est dédié à l'acquisition de connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème estuarien. L'objectif de ces recherches est de fournir un ensemble de connaissances et d'outils mobilisables pour la gestion environnementale.

L'objectif de la restauration doit, dans la mesure du possible, être précis, qualifiable et si possible quantifiable. Outre les conséquences écologiques à long terme, la non-atteinte d'un objectif peut avoir des répercussions négatives quand les activités de restauration sont conduites dans un cadre législatif, ou quand les enjeux financiers ou en termes d'image des territoires sont importants (Capderrey et al., 2016).

La formulation de tels objectifs nécessite, au-delà d'une bonne connaissance du fonctionnement estuarien, d'**identifier les facteurs clés qui permettront le maintien ou la restauration de tout ou partie des habitats estuariens et des fonctions écologiques associées**. La recherche de politiques d'aménagement efficaces d'un point de vue environnemental, implique de pouvoir **mobiliser des outils qui permettent d'anticiper la réponse du système à la modification de ces facteurs clés** (Capderrey, 2019).

Ainsi, les principaux défis pour le programme Seine-Aval, relèvent d'une utilisation des connaissances et des outils issus des travaux de recherche pour formuler des hypothèses robustes relatives à la restauration écologique de l'estuaire de la Seine. La dynamique d'acquisition de connaissances de la période 2013-2018 du programme Seine-Aval s'inscrit dans ce contexte.

Les travaux s'intéressent en priorité aux fonctions écologiques essentielles supportées par les habitats estuariens : **le rôle filtre, la productivité biologique à travers la structuration des réseaux trophiques, le support du cycle de vie de nombreuses espèces**. Ils ciblent la mosaïque d'habitats benthiques et pélagiques ainsi que les forçages naturels et anthropiques qui influencent leurs caractéristiques. Les travaux s'inscrivent dans un schéma général du fonctionnement de l'estuaire dans lequel interagissent les processus bio-physico-chimiques dont l'intensité est contrôlée par les facteurs caractérisant la mosaïque d'habitats (Figure 2).

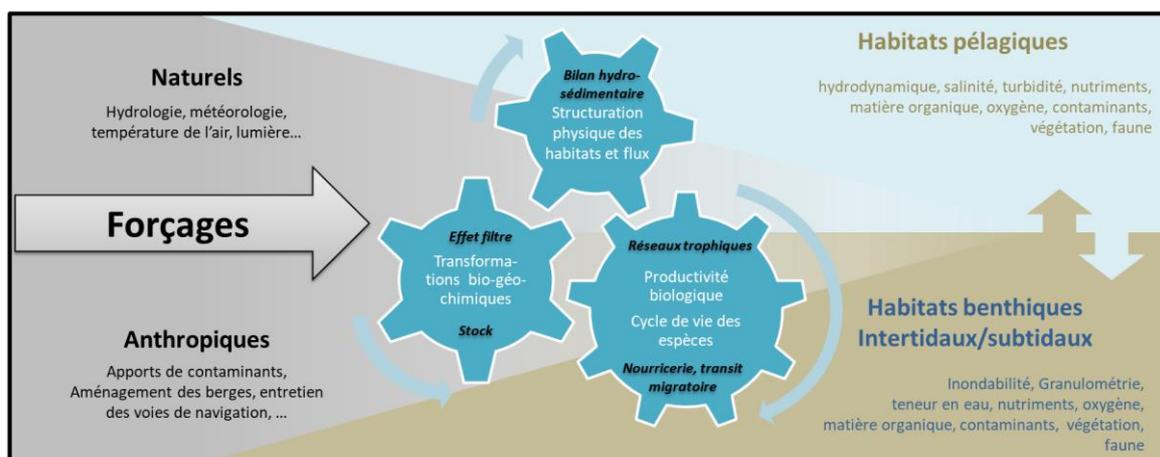


Figure 2 : schéma général du système étudié.

Le développement d'analyses quantitatives reposant sur des outils de modélisation permettra à moyen terme de proposer des scénarios de restauration de l'estuaire. Argumentés sur une base scientifique, ils permettront de définir des objectifs réalistes et dont la réussite pourra être évaluée avec des suivis appropriés.

Le diagnostic du système écologique s'inscrit dans une analyse plus globale d'un système territorial organisé qui comprend la plaine alluviale de l'estuaire et l'ensemble du bassin versant. L'étude historique de l'influence des processus socio-économiques sur la trajectoire d'évolution environnementale de l'estuaire est à prendre en compte. En effet, les enjeux d'aménagement actuels sont fortement dépendants des héritages du passé. La formalisation progressive de scénarios de restauration doit s'inscrire dans des visions prospectives de développement du territoire et de changement climatique. L'ambition est ici de mieux intégrer les objectifs de gestion environnementale dans un contexte de changement global.

Les travaux de la période 2013-2018 de la 5^{ème} Phase du programme scientifique Seine-Aval (Seine-Aval 5) s'inscrivent dans une problématique de restauration écologique d'un système complexe et dynamique tel que l'estuaire de la Seine.

Ils permettent d'apporter des éléments de connaissances, des méthodes et des outils utiles pour :

- **anticiper les évolutions du moteur de l'estuaire** : niveau d'eau, morphologie, dynamique des habitats.
- **identifier les leviers de restauration écologique** de l'estuaire en vue de limiter les problèmes liés à l'eutrophisation côtière, favoriser les rôles trophique et épurateur de l'estuaire, maintenir ou restaurer les populations.
- **évaluer les risques pour l'écosystème liés à la multi-contamination** et hiérarchiser les enjeux actuels ou émergents en termes de qualité de l'eau.
- **fournir des éléments de contexte sur les enjeux actuels de la restauration** au regard de certaines dynamiques socio-économiques.
- **améliorer les stratégies de suivi** de la dynamique estuarienne et de l'état de santé environnementale.



FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE : MIEUX ANTICIPER LES EVOLUTIONS PHYSIQUES DE L'ESTUAIRE

SYNTHESE

Les fluctuations des forçages météo-océaniques à l'échelle du système Seine, de sa source à la baie, conditionnent le fonctionnement environnemental de l'estuaire. En effet, elles contrôlent les apports en eau, en sédiments et leurs dynamiques dans l'estuaire. Anticiper les évolutions physiques de l'estuaire par une approche prédictive, et ainsi mieux anticiper l'effet d'aménagements et procédures de gestion environnementales, implique de quantifier l'influence des différents forçages sur ces dynamiques dans le but de construire des scénarios réalistes pour l'avenir de l'estuaire.

L'imbrication de nombreux processus agissant à différentes échelles spatiales et temporelles est à l'origine de la complexité de ces dynamiques. Les activités anthropiques, en modifiant les processus naturels, amplifient cette complexité. Le bilan hydrique et sédimentaire de l'estuaire (Lemoine, 2015), réalisé à partir des connaissances disponibles avant Seine-Aval 5, a permis de hiérarchiser les différents apports et transferts, mais aussi d'identifier des manques de connaissances.

Dans Seine-Aval 5, un effort a été entrepris pour mieux caractériser les capacités et la complémentarité des moyens de mesure et des outils de modélisation existants pour améliorer la compréhension des processus hydro-morpho-sédimentaires. Ces acquis méthodologiques ont permis une caractérisation robuste de l'influence des forçages hydro-climatiques (débit de la Seine, apports latéraux de surface et souterrains, marée, houles) sur les caractéristiques des habitats physiques de la colonne d'eau (hydrodynamique, salinité, matière en suspension). L'analyse de l'influence des évolutions morphologiques (situations bathymétriques de 1960, 1975 et 2010) sur ces caractéristiques a également été menée. La caractérisation des dynamiques hydro-sédimentaires a ainsi pu être enrichie de manière significative, améliorant notre compréhension des phénomènes en particulier pendant les périodes hydro-climatiques structurantes (crue et tempête). Concernant les habitats benthiques, de nouvelles connaissances sur les processus bio-sédimentaires (stabilité des habitats sédimentaires en lien avec l'action de la faune et de la flore) permettent de mieux appréhender la dynamique morpho-sédimentaire de ces habitats. Ces connaissances ont notamment permis d'enrichir la compréhension des facteurs qui influencent les milieux intertidaux du secteur à fort enjeu de la « fosse nord » de l'estuaire. La prédiction de l'évolution de la morphologie de l'estuaire (bathymétrie) et des caractéristiques sédimentaires des habitats benthiques reste cependant un défi. L'adaptation des outils d'étude pour répondre à ce défi a été engagée.

Les travaux se poursuivent dans Seine-Aval 6 par l'étude de l'influence de l'entretien des voies de navigation sur ces dynamiques hydro-morpho-sédimentaires. Cette nouvelle étape permettra de caractériser l'influence d'un forçage anthropique majeur sur le fonctionnement du système. Le défi concerne également l'analyse des évolutions physiques de l'estuaire sur le long terme afin d'initier la réflexion sur le devenir de l'estuaire dans l'actuel contexte de changement climatique.



Les enjeux d'avenir seront de poursuivre ces études sur les évolutions long terme mais aussi de caractériser l'influence des évolutions du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire sur l'évolution des caractéristiques physiques locales, c'est-à-dire à une échelle compatible avec la mise en place de mesures de restauration locales. Cette étape, qui implique des simulations sur des étendues spatiales restreintes, pourrait être engagée de manière cohérente avec des scénarios de restauration concertés avec les acteurs.

1 Hydrodynamisme et salinité : dynamique et évolution long terme

Dans un contexte morphologique établi, l'hydrodynamisme est régi par les interactions entre les dynamiques de la marée et les apports hydriques de surface et souterrains influencés par les forçages météorologiques. Le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire est à la base du fonctionnement hydro-sédimentaire conditionnant la structure physique des habitats estuariens. Il conditionne les nombreux usages et les événements d'inondation/submersion. Suite aux études de ces dynamiques dans les programmes précédents, les travaux menés avaient pour objectif principal de hiérarchiser le rôle des différents forçages sur l'hydrodynamisme et les niveaux d'eau à l'échelle de l'estuaire.

1.1 Evaluation des échanges hydrologiques nappe-estuaire

A l'issu du 4^{ème} programme Seine-Aval, la variabilité spatio-temporelle des échanges nappes-estuariens était mal connue. Le projet [ECHANGES](#) a permis de progresser dans la quantification et la spatialisation des échanges hydrologiques nappe-estuaire. Un modèle hydrogéologique du bassin de la Seine a été adapté au contexte de la Seine Normande et mis en œuvre afin de quantifier ces flux à l'échelle de l'estuaire sur une période de 20 ans.

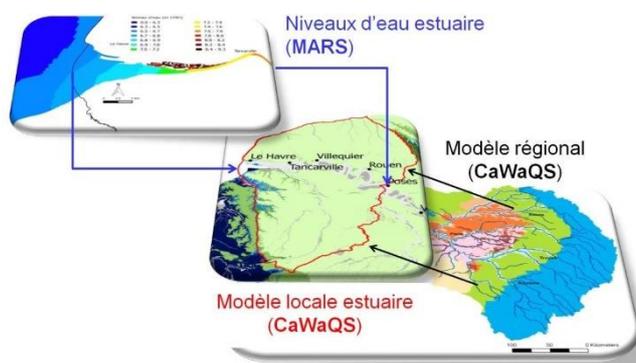


Figure 3 : Illustration du modèle mobilisé dans le projet ECHANGES.

Les résultats indiquent un flux résiduel annuel d'échange positif vers l'estuaire (apport de la nappe) relativement stable et de l'ordre de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'ensemble du secteur de Poses à la mer. Cela représente environ 1/6^e des apports d'eau douce moyens annuels à l'estuaire. Cette contribution, globalement stable à l'échelle annuelle, peut représenter jusqu'à 50% des apports hydriques à l'estuaire durant les périodes d'étiages. Cet apport constitue un flux non négligeable, à prendre en compte dans l'étude de certains processus du fonctionnement estuarien (niveaux d'eau, qualité de l'eau...). Cet effort de modélisation constitue un pas en avant pour appréhender ces interactions surface-souterrain et les facteurs qui l'influencent. Toutefois, cette quantification par modélisation

s'est heurtée à un déficit de données piézométriques dans la vallée de Seine, ne permettant pas une validation optimale de l'outil. Des acquisitions de connaissances devront être engagées pour étudier les échanges à l'échelle de la marée non prise en compte dans la modélisation actuelle. La problématique complexe des flux karstiques devrait, à terme, également être intégrée à la modélisation estuarienne afin d'affiner l'évaluation de la variabilité temporelle de ces échanges.

1.2 Comparaison des situations de 1960, 1975 et 2010.

Les dynamiques hydrauliques, de salinité (et hydro-sédimentaire - voir § 2.3) ont été comparées entre 1960, 1975 et 2010. Cette comparaison avait pour objectifs d'une part de caractériser les évolutions, et d'autre part de discuter de l'importance des changements morphologiques dans l'explication des évolutions depuis 1960 ([ANPHYECO](#)). Ce travail a pu être réalisé grâce aux progrès de la modélisation hydro-sédimentaire ([HYMOSED](#)).

La largeur à l'embouchure a fortement diminué entre 1960 et 2010, et tout particulièrement avant 1975 (Figure 4). En parallèle, la position du chenal principal a évolué et la profondeur a augmenté, en particulier en aval de Rouen.

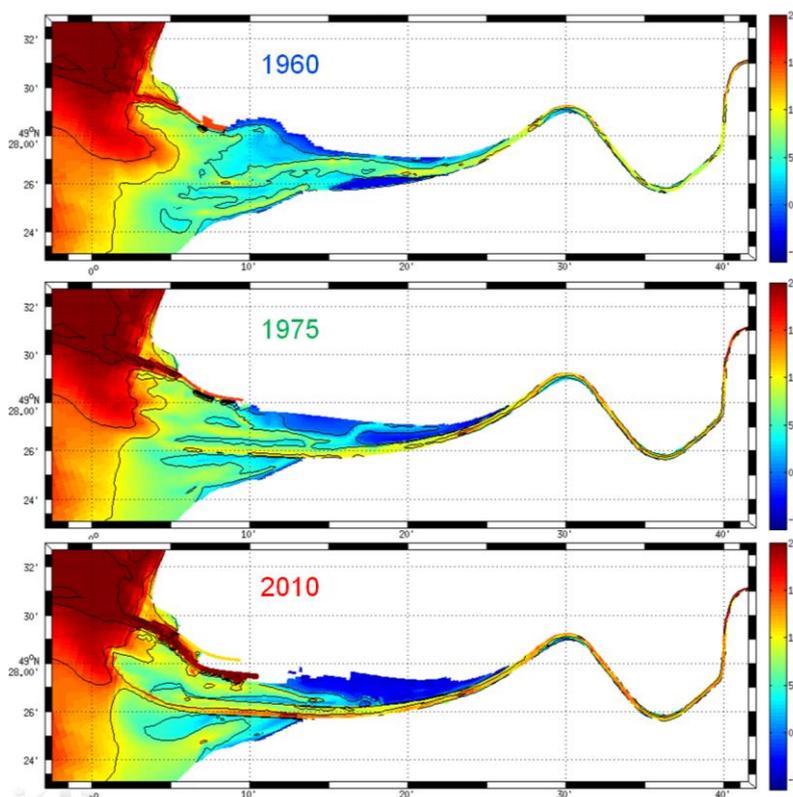


Figure 4 : bathymétries des 3 configurations de l'estuaire de la Seine telle que perçues par le modèle Sédimars. Les cotes sont données par rapport au niveau moyen.

Les simulations ont permis de décrire l'influence de ces modifications sur la dynamique de la marée, les courants, le gradient de salinité (et la dynamique sédimentaire, voir §2.3).



Les principaux résultats sont :

- la marée dans l'estuaire s'est considérablement amplifiée, du fait d'un accroissement des profondeurs : la basse mer intervient plus tôt, et son niveau est plus bas (de l'ordre de 60 cm à Tancarville et jusqu'à 2 m à Rouen (2,50 m en crue)). Tandis que le niveau de pleine mer a peu évolué pendant ces 50 années ;
- les courants de marée ont très largement augmenté entre 1960 et 1975, entre Caudebec et Rouen, surtout en situation d'étiage, en lien avec l'accroissement du marnage ;
- une remontée vers l'amont des salinités, de l'ordre de 5 km, est constatée entre 1960 et 2010, la situation en 1975 étant intermédiaire. Cette augmentation de la salinité dans l'embouchure est en accord avec l'amplification de la marée dans l'estuaire jusqu'à Rouen. D'autre part, une forte augmentation de la salinité en zone intertidale est simulée autour de Honfleur, dans le secteur de la vasière Nord du Havre ;
- l'examen des histogrammes de salinité moyenne (Figure 8) montre que la distribution des salinités comprises entre 1 et 25 PSU est beaucoup plus étendue en 1960 qu'en 1975. En 2010, la distribution des salinités 6-15 PSU était à peu près rétablie, mais la gamme 16-25 PSU reste peu représentée.

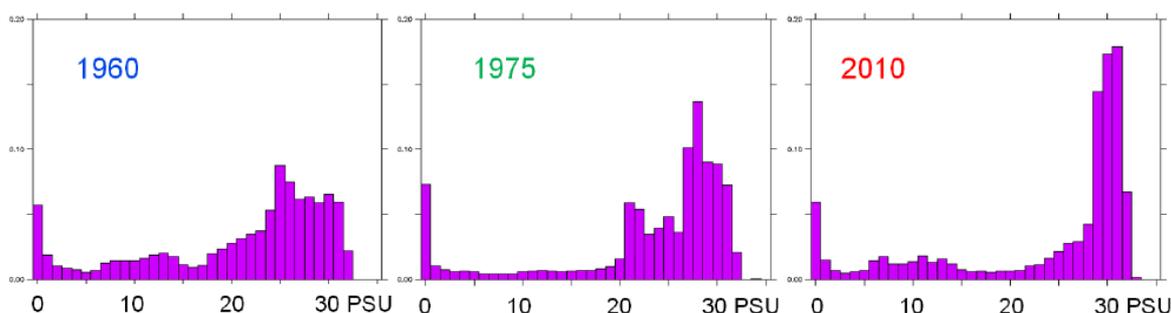


Figure 5 : histogramme des salinités (moyennes surface/fond) entre Le Havre et Caudebec, calculé en étiage (de morte eau à vive eau).

1.3 Influence de l'élévation du niveau marin en contexte de changement climatique sur les niveaux d'eau estuariens

L'élévation du niveau marin et l'accroissement des températures sont identifiés comme les principales conséquences du changement climatique. Cette élévation de la ligne d'eau, déjà visible à l'embouchure de l'estuaire, aura des répercussions sur l'hydrodynamisme du système. Le modèle hydrodynamique 2D (TELEMAC), développé pour étudier les niveaux d'eau en contexte d'inondation, a été exploité pour simuler l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer en estuaire de Seine ([NIVEAU](#)).

Ces évolutions sont caractérisées pour des gammes de variations du débit comprises entre 400 et 2000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et des élévations du niveau marin de 0.2 à 1.2 m dans le cas d'un coefficient de marée moyen (78) et fort (106).

Les principaux résultats issus des simulations montrent que :

- l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est principalement régi par le débit de la Seine : plus le débit de la Seine est important, moins l'élévation du niveau marin se propage dans l'estuaire de la Seine (voir pour exemple Figure 6) ;
- pour les débits proches du débit moyen de la Seine ($400\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), l'élévation du niveau marin est retranscrite intégralement, voir amplifiée, sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire ;
- l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est légèrement plus important pour un coefficient de marée élevé ;
- la prise en compte des murets anti-inondation ne modifie pas, à l'échelle de l'estuaire, les niveaux de pleine mer obtenus dans le lit mineur de l'estuaire.

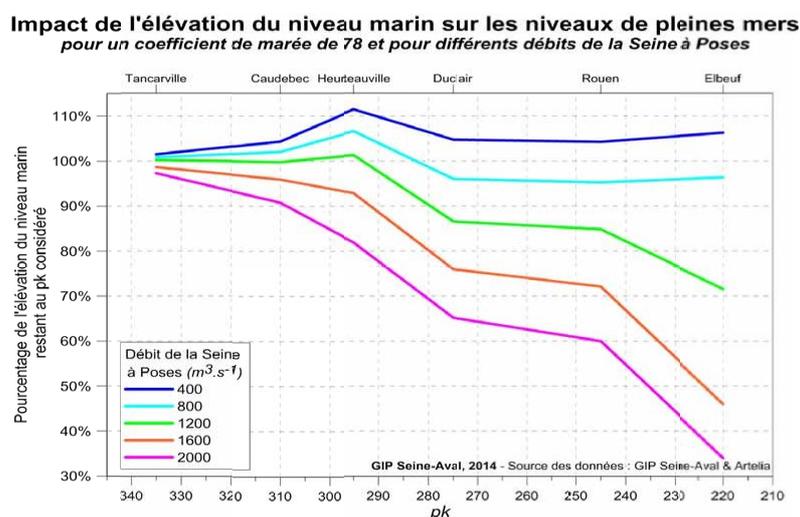


Figure 6 : Evolution du coefficient d'amortissement/amplification de l'élévation du niveau marin dans l'estuaire de la Seine pour différents débits pour un coefficient de marée de 78.

Ces résultats reposent sur des simulations considérant la morphologie actuelle de l'estuaire. Ceci constitue la principale limite de l'étude et souligne l'importance des travaux menés en modélisation hydro-morpho-sédimentaire pour mieux comprendre les évolutions morphologiques à long terme de l'estuaire.

2 Les matières en suspension : dynamique et évolution long terme

La turbidité constitue un des facteurs majeurs du fonctionnement écologique des estuaires. La description de l'influence des différents forçages sur la dynamique des MES en Seine, à l'échelle de temps d'une marée ou d'une saison, était jusqu'à présent principalement qualitative. La caractérisation des dynamiques de MES, en mobilisant de manière intégrée le suivi *in situ*, les images satellites et la modélisation, a permis de mettre à jour ces connaissances et de hiérarchiser de manière quantitative l'influence des différents facteurs hydro-météorologiques en tenant compte des incertitudes.

Les travaux menés ont permis d'exploiter la complémentarité des différentes stratégies de mesures disponibles notamment afin de préciser les incertitudes. Les incertitudes associées aux mesures du réseau SYNAPSES ont ainsi été caractérisées ([SUSPENSE](#)). Une méthode permettant l'exploitation de ces données pour mesurer la dynamique des MES en estuaire a été proposée. Un algorithme permettant l'utilisation des images satellites pour suivre et caractériser la turbidité à l'embouchure a été réalisé ([HYMOSED](#)). La variabilité des apports sédimentaires intra-estuariens de surface a pu être affinée et caractérisée ([AFFLUSEINE](#)).

L'amélioration conjointe des données et de la modélisation a ainsi permis un progrès important dans la caractérisation de la dynamique hydro-sédimentaire spatiale et temporelle. Ce travail permet de disposer d'une bonne confiance sur la capacité du modèle à simuler et quantifier de manière satisfaisante le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire.

L'outil a ainsi été utilisé pour mieux comprendre comment les différents forçages naturels (apports sédimentaires, facteurs hydro-météorologiques) influencent le fonctionnement de l'estuaire.

2.1 Influence des apports sédimentaires des affluents estuariens

Les travaux réalisés précédemment dans Seine-Aval ont permis d'apporter une première évaluation des apports sédimentaires des affluents et du bassin amont, mais les incertitudes associées à cette évaluation étaient méconnues. Elles étaient toutefois supposées importantes au regard de la faible fréquence des mesures de MES sur les affluents et de la réactivité hydro-sédimentaire des bassins versants crayeux. Un objectif était donc d'affiner l'évaluation de l'influence de ces apports sur la dynamique sédimentaire de l'estuaire, et d'estimer les incertitudes liées à cette évaluation ([AFFLUSEINE](#)).

L'analyse des méthodes d'interpolation et d'extrapolation utilisées dans la littérature (12 algorithmes testés) a montré qu'elles n'étaient pas satisfaisantes et mal adaptées à notre contexte. **Un nouveau modèle de quantification des flux sédimentaires a été proposé** et appliqué aux affluents ainsi qu'au bassin amont. Les résultats fournissent une meilleure connaissance de ces apports et des incertitudes associées.

Le flux sédimentaire moyen annuel de la Seine au barrage de Poses est ainsi évalué à 494 000 t.an⁻¹ (\pm 288 000 t.an⁻¹). Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 t.an⁻¹ (\pm 46 600 t.an⁻¹). Ils représentent ainsi 10% de l'ensemble des apports sédimentaires à l'estuaire de Seine.



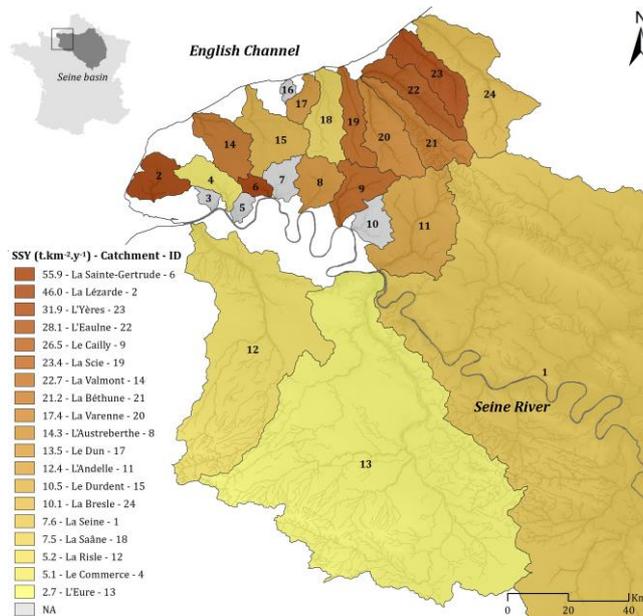


Figure 7 : Flux sédimentaire spécifique des bassins versants Seine Aval-Manche. Les valeurs correspondent à des flux sédimentaires spécifiques moyens calculés pour la période 1990-2012.

Cette nouvelle quantification a été utilisée pour évaluer l'influence des apports sédimentaires sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire ([HYMOSED](#)). Le modèle Mars 3D a été mobilisé pour comparer les résultats de différents scénarios incluant ou non les apports hydriques et sédimentaires latéraux de surface. **Les résultats montrent que la prise en compte des apports liquides et solides des tributaires de la Seine aval ne modifie pas significativement le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire aval.** La prise en compte des tributaires permet cependant d'augmenter le réalisme de la modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine.

2.2 Influence des facteurs hydrométéorologiques

Le bouchon vaseux est une accumulation de sédiments en suspension caractéristique des estuaires, pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de tonnes. La caractérisation du bouchon vaseux constitue ainsi une étape incontournable dans l'étude des flux sédimentaires en estuaire mais aussi dans la caractérisation des habitats estuariens. Les travaux menés ont enrichi notre connaissance de la dynamique du bouchon vaseux dans la Seine ([HYMOSED](#)). Les modélisations montrent que cette masse est clairement corrélée au marnage (TR – Tidal Range) (Figure 8). Cette dernière atteint 250 000 t durant les fortes VE pendant lesquelles le pompage tidal est le plus fort. On observe une forte non-linéarité avec une augmentation plus forte de la masse au-delà d'un marnage de 6 m. Du fait de l'inertie du système pour remettre en suspension le sédiment, la masse du BV en période de déchet (diminution des coefficients de marée) est plus importante qu'en période de revif (augmentation des coefficients de marée) (Figure 8b).

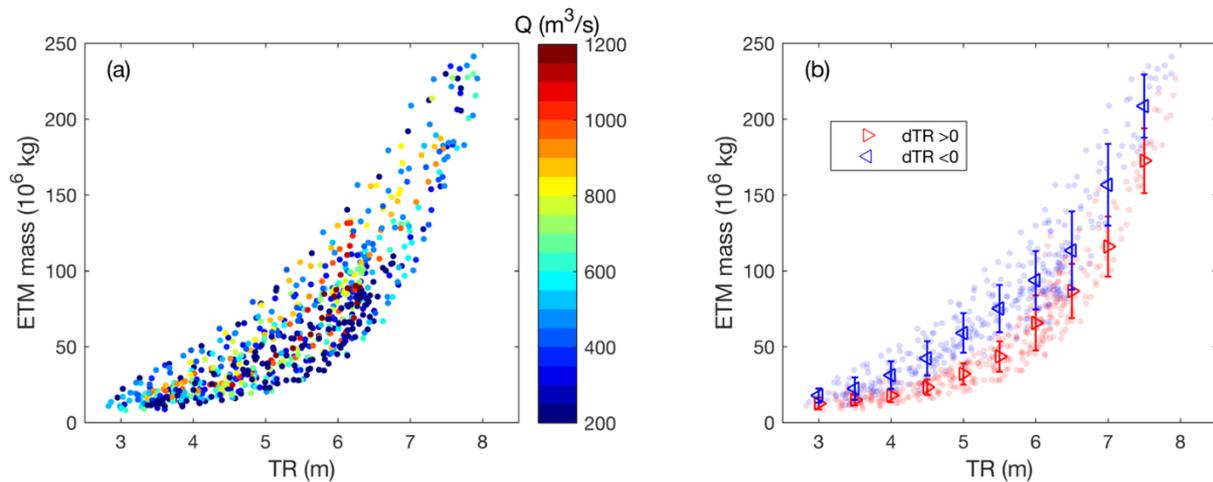


Figure 8 : Masse du bouchon vaseux maximum par marée en fonction du marnage TR et (a) du débit de la Seine Q (couleur), (b) des périodes de revif ($dTR > 0$, points rouges) et de déchet ($dTR < 0$, points bleus). En (b), les triangles et crochets verticaux représentent la moyenne et l'écart type des données associés aux classes de TR pour les périodes de revif (triangles rouges vers la droite) et de déchet (triangles bleus vers la gauche). Simulations d'août 2014 à août 2015.

Bien que **le débit influence fortement le positionnement du bouchon vaseux, il n'influence pas significativement sa masse** (Figure 8a). Celle-ci semble répondre à une « capacité » du système à mettre en suspension les sédiments (cette capacité serait principalement dépendante du pompage tidal).

Il est possible d'estimer très simplement la masse du BV seulement en fonction du marnage (\pm déchet/revif) (Figure 8b). Les résultats acquis permettent également d'estimer simplement la position du BV en fonction du débit et du marnage (\pm déchet/revif).

L'influence des vagues sur la masse du BV a été étudiée en comparant des situations calmes et énergétiques. Selon les hypothèses retenues en termes de hauteurs de vague, les résultats indiquent une augmentation de la masse en période énergétique de l'ordre de 10 à 50%, en particulier par fort débit lorsque que le BV se situe plus près de l'embouchure où les resuspensions sur les bancs peuvent venir alimenter plus facilement le BV.

Une quantification des flux sédimentaires transitant dans l'estuaire aval de la Seine (de Tancarville au large de l'embouchure), à des échelles de temps saisonnière à annuelle, a été réalisée pour différents scénarios hydrométéorologiques. Les scénarios sont construits afin d'étudier de manière indépendante l'influence des débits (année sèche/humide) et tempêtes (calme/tempétueuse) sur ces flux. L'analyse des flux et bilans sédimentaires met en évidence une influence variée des forçages en fonction des zones considérées : (1) les vagues favorisent une remise en suspension des sédiments à l'embouchure et un export vers le large dont la direction est déterminée par le vent, (2) le pompage tidal génère un flux sédimentaire vers l'amont, de l'embouchure à Tancarville et, (3) le débit favorise un export de sédiments, mais seulement pour les sections en amont d'Honfleur. **En revanche, de manière contre-intuitive, les périodes de fort débit favorisent l'apport de sédiments à l'embouchure de l'estuaire.** Cela s'explique par un renforcement de la circulation barocline à l'embouchure (générée par le gradient de salinité plus marqué en crue), renforçant le courant de fond dirigé vers l'amont. En conséquence, **lors des années très humides (et peu tempétueuses) les débits importants ont tendance à engraisser l'estuaire aval, comme observé dans les années 2008 et 2013.**

Le bilan sédimentaire de l'estuaire aval est relativement à l'équilibre pendant une année hydrométéorologique moyenne, ce qui est en accord avec les bilans sédimentaires résultant des relevés hydrographiques des dix dernières années. **Lors d'une année tempétueuse, un important export vers le large provoque une perte significative de sédiments.** L'étude du panache de la Seine, grâce aux nouvelles méthodes d'interprétation des images satellite, illustre bien ce phénomène (Figure 9). Ces images ont permis de mettre en relation la dynamique du panache turbide avec les forçages hydrodynamiques (marée, vagues, débit) notamment *via* des métriques intégratrices, comme les surfaces cumulées pour des seuils de concentrations en MES et les masses de sédiments en suspension en surface.

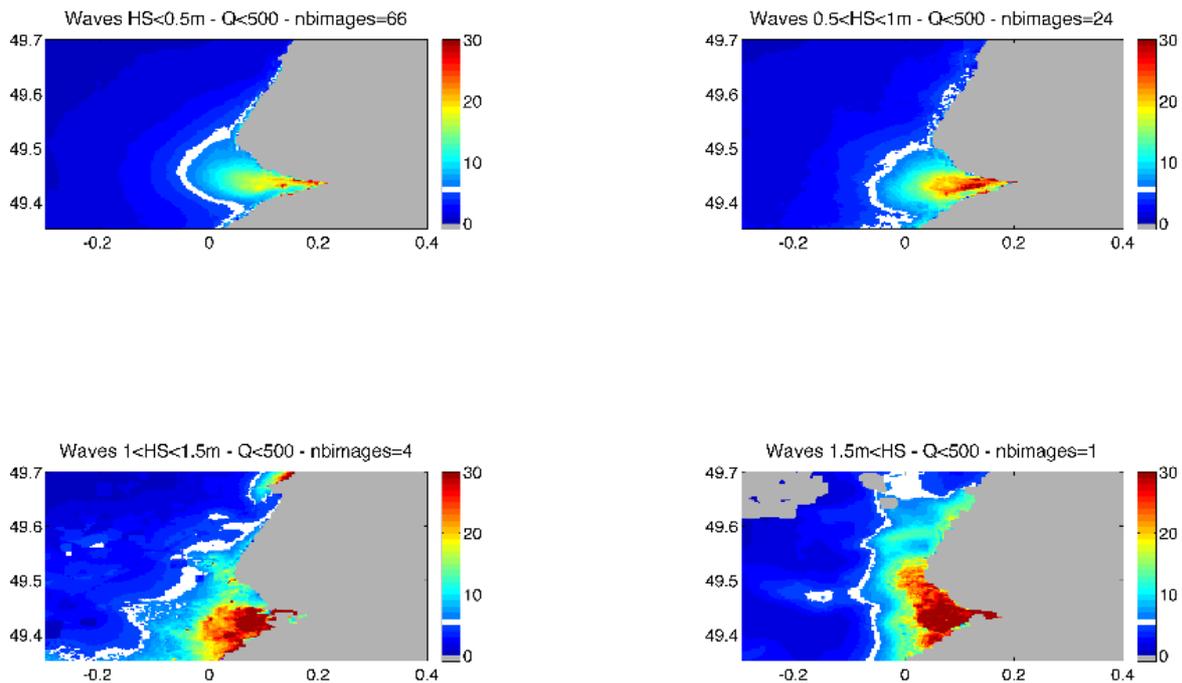


Figure 9 : Influence des vagues sur les turbidités à l'embouchure.

L'ensemble des résultats acquis souligne la nécessité de considérer le forçage des vagues de manière précise afin de modéliser correctement la dynamique du bouchon vaseux et les évolutions de l'estuaire sur le long terme.

2.3 Comparaison des situations 1960, 1975 et 2010

La comparaison des 3 situations historiques avait pour objectifs de caractériser les évolutions en termes de dynamique sédimentaire et d'interpréter les phénomènes qui ont conduit à ces évolutions. La moyenne annuelle de la masse du bouchon vaseux, dont l'ordre de grandeur est de 80 000 t, aurait légèrement diminué (de 2%) entre 1960 et 1975, puis nettement augmenté (de 10%) entre 1975 et 2010. En marée de vives-eaux, la masse en suspension variait beaucoup plus en 1960 qu'aujourd'hui. Ce phénomène s'explique par la largeur de l'estuaire plus importante en 1960 qui induisait un dépôt plus important au moment des étales. A contrario, La bathymétrie actuelle, avec un chenal profond et des rives élevées dans le secteur du bouchon vaseux (de part et d'autre de Honfleur), limite les périodes de décantation.

Dans les conditions simulées, l'expulsion/translation du bouchon vaseux vers le large en période de crue n'est pas spectaculaire. La remontée vers l'amont était très marquée en étiage, au-delà de Caudebec, déjà en 1960 mais encore plus en 1975 et en 2010. La concentration de la masse turbide dans le chenal central était également très visible en 2010 (Figure 10).

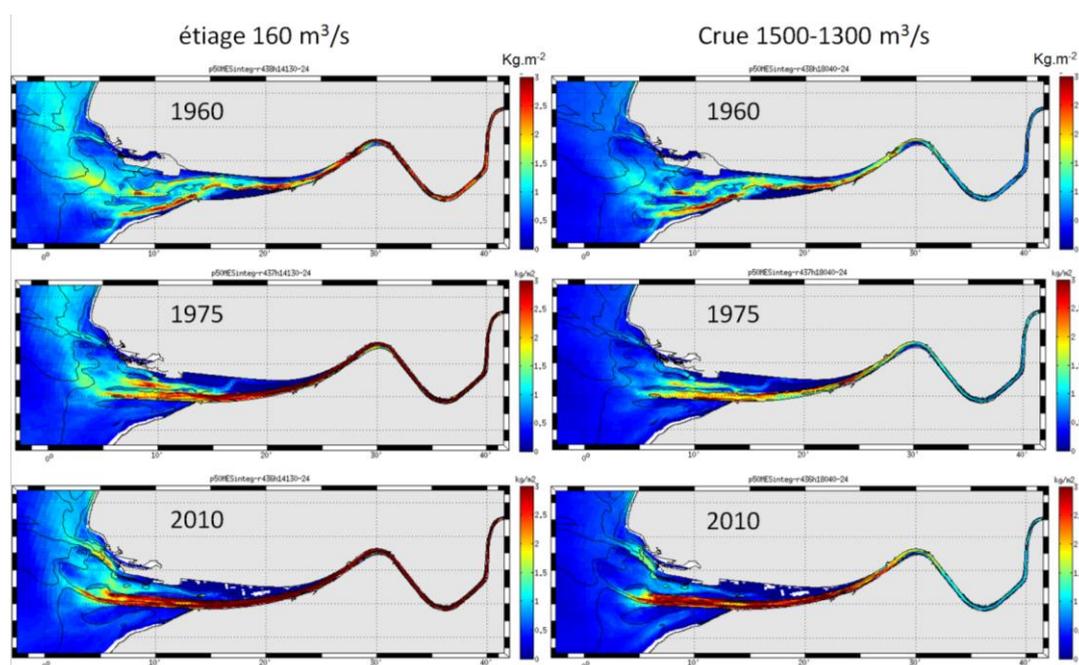


Figure 10 : Localisation du bouchon vaseux représenté par la masse en suspension par m2 : vive eau d'étiage et de crue.

Le bouchon vaseux remontait vers l'amont entre 1960 et 1975 (Figure 11). Une augmentation des concentrations de MES a également été observée entre 1960 et 1975, puis entre 1975 et 2010.

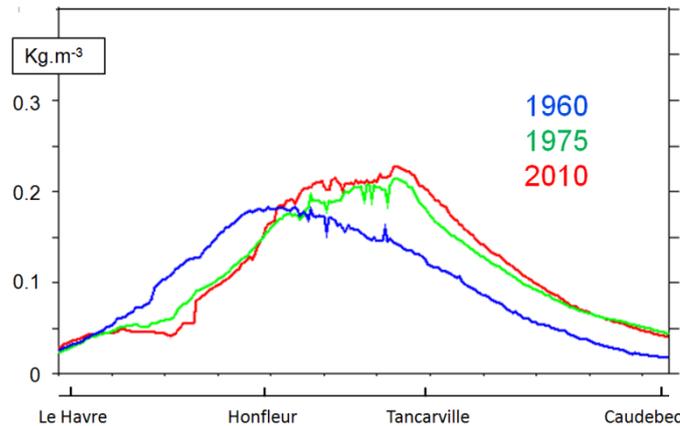


Figure 11 : Moyenne annuelle de la concentration de Matières En Suspension.

Les flux sédimentaires et en particulier les flux sableux étaient très différents en 1960 et en 1975. En 1960, les tendances au transport étaient divergentes de part et d'autre de Honfleur (ce qui limitait l'ensablement de l'embouchure). En 1975, elle était homogène longitudinalement entre les digues favorisant le maintien du chenal. Par contre, une tendance à la remontée des sables vers l'amont était marquée dans le chenal nord. En 2010, le schéma était analogue à celui de 1975, mais nettement atténué.

L'importance relative des principaux phénomènes à l'origine des flux sédimentaires et de la mise en place du bouchon vaseux (gradient de densité des eaux, asymétrie des courants de marée) a évolué dans le temps en réponse aux changements morphologiques.

Création d'un référentiel de données de modélisation des variables hydro-sédimentaires de l'estuaire

Les travaux des programmes précédents ont permis la calibration de l'outil Sédimars 3D pour la simulation des dynamiques hydro-sédimentaires de l'estuaire de la Seine. Ces projets ont mis en évidence les capacités de l'outil à décrire la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques hydrodynamiques, de salinité et des matières en suspension dans les conditions morphologiques actuelles. Cette modélisation prend en compte de manière détaillée la variabilité des facteurs hydrodynamiques, hydrométéorologiques et anthropiques qui influencent la dynamique hydro-sédimentaire de l'échelle tidale à l'échelle annuelle. L'outil a pu être mobilisé pour simuler deux scénarios historiques sur la base des données bathymétriques de 1960 et 1975. Ce travail n'a pas nécessité de modification majeure des hypothèses de modélisation pour obtenir un résultat cohérent avec les données de fonctionnement hydro-sédimentaire disponibles sur ces périodes antérieures.

Ces résultats permettent aujourd'hui d'envisager la mise en place d'un référentiel de données de modélisation sur des périodes anciennes et pour des situations contrastées d'un point de vue morphologique et hydrométéorologique ([ARES](#)).

Il est donc prévu dans Seine-Aval 6 de : 1) produire un référentiel de données validées de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de 1990 à 2018 et 2) mettre en place une stratégie d'actualisation annuelle de ce référentiel.

3 Morphologie et habitats benthiques

En réponse à l'actuel contexte, de changement climatique et d'aménagement de l'estuaire, la morphologie évolue rapidement. La connaissance, le suivi, l'anticipation de ces évolutions est ainsi une étape préalable et prioritaire à la compréhension des évolutions du fonctionnement global de l'estuaire. La dynamique et la stabilité morphologique des habitats estuariens résultent des différents processus hydrosédimentaires induits par les forçages. La complexité de ces processus induit une forte variabilité temporelle et spatiale des évolutions morphologiques. Dans le cadre de Seine-Aval, l'objectif était d'améliorer le suivi et la modélisation de ces évolutions ([HYMOSED](#)). L'influence des processus biologiques sur la stabilité sédimentaire a également été étudiée afin de mieux caractériser les interactions bio-sédimentaires ([BARBES](#) et [H20](#)).

3.1 Vers une meilleure compréhension des évolutions morpho-sédimentaires

Les vasières intertidales ont été identifiées comme un habitat essentiel soutenant les principales fonctions écologiques de l'estuaire. En conséquence, leur évolution doit être surveillée. Or, les caractéristiques morpho-sédimentaires qui les composent varient fortement dans le temps et dans l'espace en lien avec les dynamiques hydro-sédimentaires de l'estuaire. Les précédents programmes de recherche Seine-Aval ont permis d'acquérir des connaissances sur la dynamique des vasières à différentes échelles. Les études ont été menées avec des instruments permettant des analyses à des échelles spatiales et temporelles contrastées (du cm au km et de la seconde à l'année), mais n'ont pas permis d'examiner les emboitements d'échelles et les relations entre les observations à ces différentes échelles morpho-sédimentaires.

Ainsi, trois outils complémentaires ont été mis en œuvre sur 3 sites (Vasière Nord, Pointe de la Roque et Tancarville) pour évaluer leur pertinence vis-à-vis des besoins de surveillance des évolutions morphodynamiques de ces zones latérales (Figure 12) ([HYMOSED](#)).

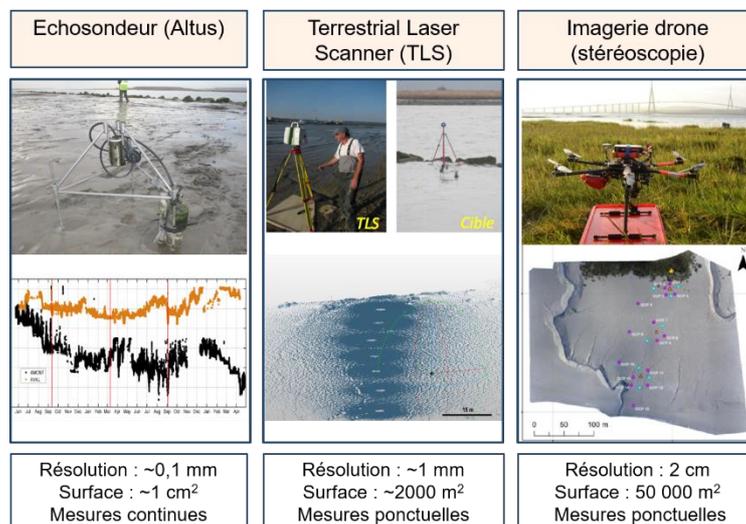


Figure 12 : Illustration des méthodes mises en œuvre.

Les différentes acquisitions ALTUS ont permis d'observer la dynamique haute fréquence des vasières latérales à une échelle ponctuelle. Les mesures de topographie par drone et *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) constituent des acquisitions à plus basses fréquences mais à des échelles spatiales plus grandes (TLS : 2000 m² / Drone : 50 000 m²). Les campagnes réalisées avec ces deux instruments ont permis l'acquisition de modèles numériques de terrain (MNT) sur les différentes stations. Ces données permettent de mettre en évidence des dynamiques non visibles avec l'ALTUS, de la présence de rides à l'organisation du réseau de drainage de la vasière avec la formation et l'évolution des filandres.

L'évaluation des différentes méthodes a permis de quantifier les avantages et inconvénients de chaque instrument (Figure 12Figure 9). **La conclusion principale de ce travail porte sur la complémentarité des données collectées à une petite échelle spatiale (ALTUS) et à une grande échelle spatiale (Drone ou TLS), qui apporte une compréhension globale de l'évolution du système.** Au-delà des aspects méthodologiques, l'ensemble des mesures réalisées dans ce cadre a permis de préciser et de relativiser la résolution spatiale des connaissances existantes au sujet des évolutions morphologiques et de leurs variabilités.

En parallèle, la capacité du modèle hydro-sédimentaire SédiMARS3D à reproduire les évolutions morphologiques et sédimentaires de l'estuaire sur des périodes relativement courtes (de l'ordre de l'année) a été étudiée ([HYMOSED](#)). L'outil a été adapté et de nombreuses simulations ont été réalisées.

Le principe d'un modèle morphodynamique est de respecter les couplages qui se produisent entre l'hydrodynamique et les transports sédimentaires qui en résultent *via* une évolution de la bathymétrie que ces transports provoquent, et dont dépendent la propagation des vagues et de la marée, ainsi que les courants associés. Dans les modèles "basés sur les processus" comme le modèle SediMARS3D, ce couplage est réalisé en réactualisant la cote du fond à chaque pas de temps de calcul sédimentaire (de l'ordre de 10-30 secondes pour l'application Seine).

Les résultats ont été comparés aux évolutions bathymétriques mesurées par les Grands Ports Maritimes, ainsi qu'aux bilans des quantités draguées par ces mêmes acteurs. **Le modèle permet de reconstituer la plupart des tendances d'érosion/dépôt de sédiments que l'estuaire a connues pendant la période étudiée (autour de 2010). Toutefois, quantitativement, les évolutions de masses sédimentaires modélisées diffèrent de manière significative avec les mesures observées *in situ* sur certains secteurs.** La capacité de l'outil à reproduire les faciès sédimentaires a par ailleurs été testée. En effet, le modèle considérant 5 types de sédiments (1 gravier / 3 sables / 1 vases), il est à même de reproduire certains faciès et/ou gradients granulométriques observés en estuaire.

Au regard de la complexité des phénomènes en jeu, ces résultats (capacité à reproduire les évolutions morphologiques et les faciès sédimentaires) sont très encourageants et aideront à une meilleure compréhension et une meilleure anticipation des évolutions morphologiques de l'estuaire.



3.2 Influence de la flore et de la faune sur la stabilité des habitats sédimentaires

La littérature a montré que les organismes présents dans ou sur le substrat sédimentaire contribuent à stabiliser ou déstabiliser ce sédiment (resp. biostabilisation ou bioturbation). Néanmoins, la contribution de ces processus d'origine biologique dans la dynamique sédimentaire n'est pas connue. Afin d'évaluer l'importance de ce phénomène au regard des populations benthiques de l'estuaire, et pour comparer à l'influence des forçages hydrométéorologiques sur la dynamique sédimentaire, deux approches ont été mises en œuvre :

1. En milieu subtidal en baie de Seine orientale

En zone subtidale (baie de Seine orientale), les résultats expérimentaux acquis dans le cadre du projet [H20](#) ont permis de décrire le rôle bioturbateur de 6 espèces. **Il ressort l'important potentiel bioturbateur du ver *Lagis Koreni*, qui peut modifier de manière significative la structure du sédiment.** La conséquence de son activité bioturbatrice est une homogénéisation de la couche sédimentaire sur les 5 premiers centimètres. Les cinq autres espèces peuvent être considérées comme très faiblement bioturbatrices voire non bioturbatrices dans le cadre des expérimentations réalisées.

2. En milieu intertidal dans l'embouchure de l'estuaire

En zone intertidale, le rôle bioturbateur des principales espèces de la faune benthique a pu être décrit et quantifié ([BARBES](#)) grâce à des données acquises *in situ*, des expérimentations en laboratoire et au développement de modèles de bioturbation.

Un résultat important et inattendu concerne le rôle biostabilisateur des effets synergiques du comportement du ver *Hediste Diversicolor* (espèce majeure des vasières de l'estuaire) et de la présence de microphytobenthos. En effet, le développement de terrier par ce ver aurait pu constituer un facteur destabilisateur.

Ces nouvelles connaissances sur les processus bioturbateurs et biostabilisateurs des communautés benthiques des zones intertidales de substrat fin ont été mobilisées pour étudier l'influence de ces phénomènes sur le bilan sédimentaire de la rive nord de l'embouchure de l'estuaire. Pour cela, une modélisation numérique (modèle hydro-sédimentaire cross-shore) intégrant ces processus, les contraintes hydrodynamiques (vagues), mais aussi des échanges réalistes de sédiments avec le reste de l'estuaire a été adapté au secteur d'étude.



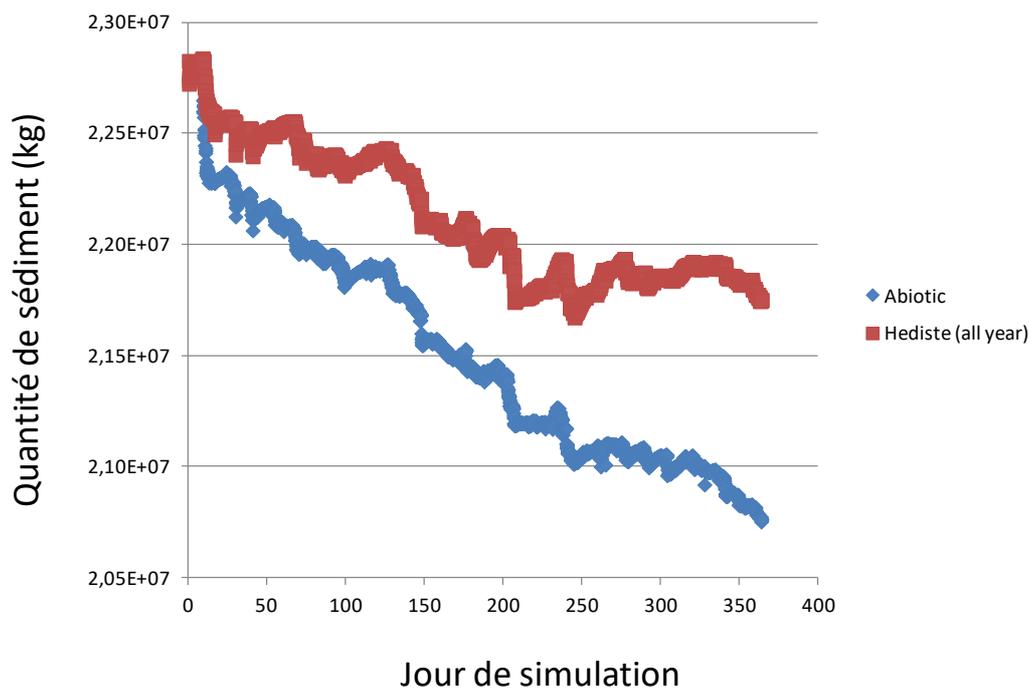


Figure 13 : Exemple de résultat de simulation permettant de réaliser un diagnostic de l'influence de la faune benthique sur le bilan sédimentaire d'une zone intertidale. Variation de la quantité de vase (bilan sédimentaire) pour les mêmes conditions morphologiques et sédimentaires mais avec une influence biostabilisatrice constante au long de l'année (et égale à son maximum estival jusqu'en hiver).

Les effets prononcés des vagues restent dominants par rapport aux processus biologiques. Ils conduisent à un bilan favorable à l'érosion dans les résultats des simulations. Dans ce secteur, les communautés benthiques sont dominées par les populations de l'annélide *Hediste diversicolor*. Les populations du bivalve *Scrobicularia plana* sont présentes mais ne dominent pas la communauté macrozoobenthique. Ce sont donc les effets stabilisateurs exercés par l'annélide, en synergie avec l'action du microphytobenthos, qui freinent l'érosion des sédiments fins.

Ainsi, **en aval du pont de Normandie, l'effet biologique peut freiner ces phénomènes érosifs mais ne suffisent pas à compenser complètement l'effet destructif des vagues.**

Dans la zone amont, à l'est du pont de Normandie et en particulier dans la grande vasière à proximité du chenal environnemental, les sédiments fins sont moins susceptibles d'être érodés (atténuation de l'effet des vagues). **Les effets biostabilisateurs en haute slikke, doivent donc s'exercer de manière plus significative et peuvent contribuer à accélérer l'accrétion de la vasière en amont du pont de Normandie.**

Ces nouveaux résultats permettent d'envisager des études intégrées du fonctionnement écologique des zones intertidales (voir projet [PHARESEE](#)).

Mieux anticiper des dynamiques d'évolution morphologiques sur le long terme en tenant compte des pratiques d'entretien des voies de navigation.

Le travail d'analyse de la capacité de simulation des évolutions morphologiques de l'estuaire initié dans Siene-Aval 5 se poursuit dans le cadre du projet [MORPHOSEINE](#) (Seine-Aval 6).

Le projet de recherche [MEANDRES](#) (Seine-Aval 6) a pour objectif d'étudier l'effet des flux sédimentaires induits par le dragage sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. La période 2016-2017 a permis de préparer les outils numériques nécessaires à cette étude. Le modèle hydro-morpho-sédimentaire Mars3D permet maintenant de suivre le devenir de différentes sources de sédiments au sein de l'estuaire. Le traçage permet d'étudier l'effet de différentes stratégies de gestion des sédiments sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire.

La finalité est de pouvoir étudier les évolutions possibles de la morphologie de l'estuaire sur le long terme, en tenant compte des processus inhérents aux pratiques d'entretien des voies de navigation.



FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE : VERS UN DIAGNOSTIC GLOBAL DES FONCTIONS ESTUARIENNES

SYNTHESE

Les conséquences de l'anthropisation de l'estuaire sont aujourd'hui bien documentées : réduction accélérée des surfaces en eaux, homogénéisation des habitats, augmentation des discontinuités écologiques... La raréfaction et l'altération générale des habitats naturels a réduit l'efficacité des fonctions écologiques essentielles de l'estuaire de la Seine.

L'objectif des travaux menés dans Seine-Aval 5 est de comprendre l'influence des différents facteurs structurant la mosaïque d'habitats sur les principales fonctions estuariennes. Il s'agit ici en particulier d'analyser les interactions entre les processus physiques (dynamique sédimentaire, température, salinité...), biogéochimiques (cycle des nutriments...) et biologiques (alimentation, croissance, reproduction...). Le but est, à terme, de pouvoir définir des mesures de restauration pertinentes en identifiant les facteurs sur lesquels il serait possible d'intervenir pour augmenter l'efficacité des processus. Les bases de cette connaissance sur certains processus, groupes faunistiques et dans certains secteurs de l'estuaire ont d'ores et déjà été alimentées par les programmes de recherche antérieurs.

Cycle des nutriments et productivité biologique

La dynamique estuarienne crée des conditions favorables à la transformation des nutriments et leur assimilation par les producteurs primaires, ces derniers constituant une source d'énergie de qualité pour la structuration du réseau trophique. Les connaissances acquises dans les projets Seine-Aval 5 viennent enrichir le diagnostic des facteurs qui contrôlent l'efficacité de ces fonctions.

Évalué grâce au progrès de la modélisation des processus biogéochimiques à l'échelle de l'estuaire, le rôle filtre de l'estuaire pour les nutriments apparaît limité. Des interactions étroites entre dynamique et caractéristiques de la matière organique, dissoute et particulaire, des contaminants et des nutriments dans la colonne d'eau et le sédiment ont été démontrées ainsi que leurs fortes variabilités saisonnières. Le rôle des habitats sédimentaires subtidiaux et du bouchon vaseux dans la transformation de l'azote, a été caractérisé en lien avec l'activité microbiologique et les caractéristiques organiques des sédiments. Cette étape permet de progresser dans la caractérisation des processus à l'échelle locale.

Les variations spatiales de la production primaire pendant une année dans l'estuaire aval ont été caractérisées. Ces résultats, complétés par des données de surveillance et des informations provenant d'autres estuaires, ont permis de fournir des éléments de diagnostic et d'identifier les principaux facteurs limitant la production primaire de l'estuaire. La productivité des habitats sédimentaires intertidaux (développement du microphytobenthos) a été quantifiée et son efficacité mise en relation avec les caractéristiques physiques de ces habitats.

La complexité des processus bio-physico-sédimentaires et la variabilité spatiale et temporelle des facteurs qui les contrôlent au sein de la mosaïque d'habitats, notamment sédimentaires, ne permettent pas aujourd'hui une évaluation robuste de l'influence des différents forçages. Pour atteindre cet objectif, le développement des outils doit se poursuivre. Les nouvelles données acquises sur les compartiments phytoplanctoniques, benthiques et le zooplancton, ainsi que sur leurs interactions pourront enrichir les hypothèses de modélisation dynamique des processus biogéochimiques.



D'ores et déjà, pour combler des lacunes identifiées, deux nouvelles démarches sont engagées dans Seine-Aval 6 pour caractériser de manière robuste l'influence des différents facteurs sur la productivité 1/ des vasières intertidales et, 2/ de la colonne d'eau entre Poses et Tancarville.

A court terme, l'étude du fonctionnement des mosaïques d'habitats latéraux (filandres, roselières, prairies) devra être engagée, notamment en quantifiant l'intensité des processus qui s'y déroulent en particulier en fonction du degré de connectivité hydraulique latérale. Ces études pourraient être conduites sur des sites expérimentaux de restauration permettant d'évaluer l'effet de mesures de gestion sur l'intensité des processus bio-physico-chimiques sur les fonctions estuariennes.

L'évaluation de l'état de santé du système « estuaire de Seine aval » par l'analyse du fonctionnement du réseau trophique a permis dans Seine-Aval 5 une synthèse importante de connaissances sur les flux énergétiques entre les différents compartiments écologiques. L'interprétation des résultats fournis par les descripteurs de fonctionnement de réseau trophique s'est avérée complexe dans le contexte du fonctionnement estuarien en raison des nombreux forçages à prendre en compte.

Cycles de vie des espèces

Le maintien des populations des espèces colonisant la mosaïque d'habitats dépend avant tout de la capacité de l'estuaire à offrir des conditions physiques et trophiques en adéquation avec les exigences écologiques des espèces. La caractérisation de l'influence relative des principaux facteurs physiques et trophiques, contrôlant les abondances et la biomasse des individus constituant les populations observées, constitue une étape préalable au diagnostic. Le développement de méthodes d'analyses quantitatives doit permettre de proposer des scénarios d'évolution probable des peuplements (« prédiction ») selon des hypothèses de modification des habitats (en lien avec des mesures de gestion ou d'aménagement).

Les acquis de Seine-Aval 5 concernent différents groupes zoologiques : la macrofaune benthique, le zooplancton, les juvéniles de poissons marins et les salmonidés en migration.

Concernant la macrofaune benthique, les travaux ont concerné les assemblages et espèces dominantes de la baie de Seine orientale. Malgré les longues séries de données disponibles, les analyses statistiques ne permettent d'expliquer que partiellement la répartition de la faune au regard des caractéristiques physiques des habitats. La variabilité des facteurs abiotiques dans ces environnements constitue une des difficultés principales pour mettre en évidence des patterns de distribution. Dans Seine-Aval 6, l'effort sera porté sur les communautés des vasières intertidales de l'estuaire étant donné l'enjeu majeur que constitue la restauration de cet habitat.

Les prédictions des densités des principales espèces du zooplancton du secteur aval de l'estuaire, selon les variations de température et de salinité sont maintenant robustes grâce aux modèles mis en œuvre dans Seine-Aval 5. La prise en compte de des variations de l'hydrodynamisme et des MES (quantité et qualité de la ressource trophique) devient maintenant incontournable pour envisager d'évaluer l'efficacité de mesures de restauration. Ces travaux se poursuivent dans Seine-Aval 6 dans le secteur Poses-Tancarville, moins étudié antérieurement, où la production primaire pourrait être limitante pour le zooplancton.



Concernant les poissons marins, un bilan relatif aux capacités de prédiction des abondances de juvéniles a été mené, en tenant compte des facteurs physiques de l'environnement. Les résultats varient en fonction des espèces et doivent être relativisés au regard de la qualité des prédictions statistiques. L'analyse des données de suivi a permis de poser l'hypothèse d'une potentielle limite liée aux facteurs trophiques, c'est-à-dire à un éventuel déficit de disponibilité ou d'accessibilité des proies pendant la période de colonisation de l'estuaire. Ce dernier point a conduit à engager des démarches dans Seine-Aval 6 pour acquérir les données *in situ* qui permettent de mieux caractériser l'évolution temporelle de la capacité trophique de l'estuaire.

Concernant les salmonidés, des scénarios de restauration des continuités écologiques sur la Risle et Le Cailly ont été étudiés pour évaluer leur intérêt pour soutenir le retour des populations de grands migrateurs. Cette démarche de modélisation sera poursuivie à l'échelle de l'ensemble de la vallée de la Seine dans le cadre d'un projet conduit à l'échelle du bassin.

1 Filtre des nutriments

Le rôle de filtre d'un estuaire est défini comme l'ensemble des processus qui contribuent à transformer et à stocker les nutriments (carbone, azote, phosphore et silice) qui lui parviennent du bassin versant et ainsi réduire les flux vers la mer. En déséquilibre ou en excès, ils peuvent conduire à des proliférations excessives d'algues, pouvant engendrer des événements d'eutrophisation. Face à la problématique d'eutrophisation rencontrée en baie de Seine, améliorer le rôle de filtre de l'estuaire par des mesures de restauration apparaît comme un enjeu prioritaire. L'étude des facteurs influençant l'intensité des processus biogéochimiques sous-jacents reste un défi en raison des interactions multiples entre processus physiques, chimiques, sédimentologiques et biologiques dans un milieu très dynamique.

L'étude de la dynamique des nutriments de Paris à la mer, depuis le début des mesures, a permis de mettre à jour les tendances d'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau et de relier cette évolution aux mesures de gestion réalisées sur le bassin versant ([RESET](#)).

Dans la perspective de caractériser les potentialités d'amélioration de l'effet filtre de l'estuaire, la caractérisation des facteurs influant sur les concentrations et flux de nutriments dans l'estuaire a été enrichie par de nouvelles connaissances.

La comparaison du fonctionnement physique de la Seine avec celui d'un autre grand estuaire aménagé, l'Escaut, a permis d'apporter un éclairage sur les facteurs naturels et anthropiques qui influencent la dynamique des nutriments ([ANPHYECO](#)).

En parallèle, l'objectif était de fournir des informations sur la variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques de la matière organique¹ (MO) à l'échelle de l'estuaire, et en particulier dans le secteur du bouchon vaseux ([MOSAIC](#)). En effet, l'action des bactéries transforme les matières organiques conduisant au recyclage des nutriments. Hors, ces

¹ MO = ensemble de macromolécules issues de la dégradation de matériel biologique animal ou végétal, d'origine terrestre ou aquatique

mécanismes impliqués dans le transport et la transformation des nutriments dans les estuaires, dépendent fortement de la taille, de la structure et de la dégradabilité de la MO.

Les caractéristiques des habitats estuariens influencent les flux de nutriments. Ainsi, l'évaluation des taux de production ou de consommation des différentes formes de nutriments dans des conditions environnementales différentes permet de mieux comprendre l'influence des différents facteurs. La colonne d'eau à forte turbidité et les habitats benthiques en zone subtidale ont été étudiés ([MOSAIC](#)), complétant les travaux menés en zones intertidales dans les programmes précédents. Une attention particulière a été portée sur les cycles de transformation de l'azote. En effet, l'excès de flux d'azote vers la mer engendre des dysfonctionnements sur le développement phytoplanctonique.

Enfin, l'objectif était de fournir une évaluation du rôle filtre de l'estuaire en s'appuyant sur une modélisation explicite des processus biogéochimiques, couplée à la modélisation de la dynamique des matières en suspension à l'échelle de l'estuaire ([RESET](#)).

1.1 Dynamique des nutriments de Paris à la mer

L'ensemble des données de suivis de la qualité physico-chimique de l'eau depuis 1970 a été analysé afin de mettre à jour l'analyse des tendances d'évolution ([RESET](#)). (Figure 14)

Les tendances post-2000 ont été particulièrement étudiées afin de compléter les acquis des études antérieures. Un changement est observé après 2007 en aval d'Achères pour l'ammonium (NH_4^+), dont les concentrations ont chuté à des valeurs très faibles (en moyenne 0,3 et 1 mg.L^{-1} près de la station d'épuration). **Après une forte augmentation, les teneurs en nitrates semblent se stabiliser, voire diminuer depuis 2012, et ce en lien avec l'augmentation de l'efficacité de la dénitrification au niveau de la station d'épuration d'Achères.**

L'oxygène dissous et la chlorophylle a (indicateur de la biomasse du phytoplancton) renseignent de manière complémentaire l'influence de ces évolutions sur le fonctionnement écologique de l'estuaire. Le premier est principalement contrôlé par la dégradation de la matière organique et la nitrification du NH_4^+ , tandis que le second dépend fondamentalement de l'assimilation algale. L'oxygène a augmenté de façon constante après les années 1980, et notamment au cours de la dernière décennie, alors que **la biomasse du phytoplancton a progressivement diminué tout au long du fleuve et très nettement dans la zone estuarienne après 2007** (voir §2.1.1).



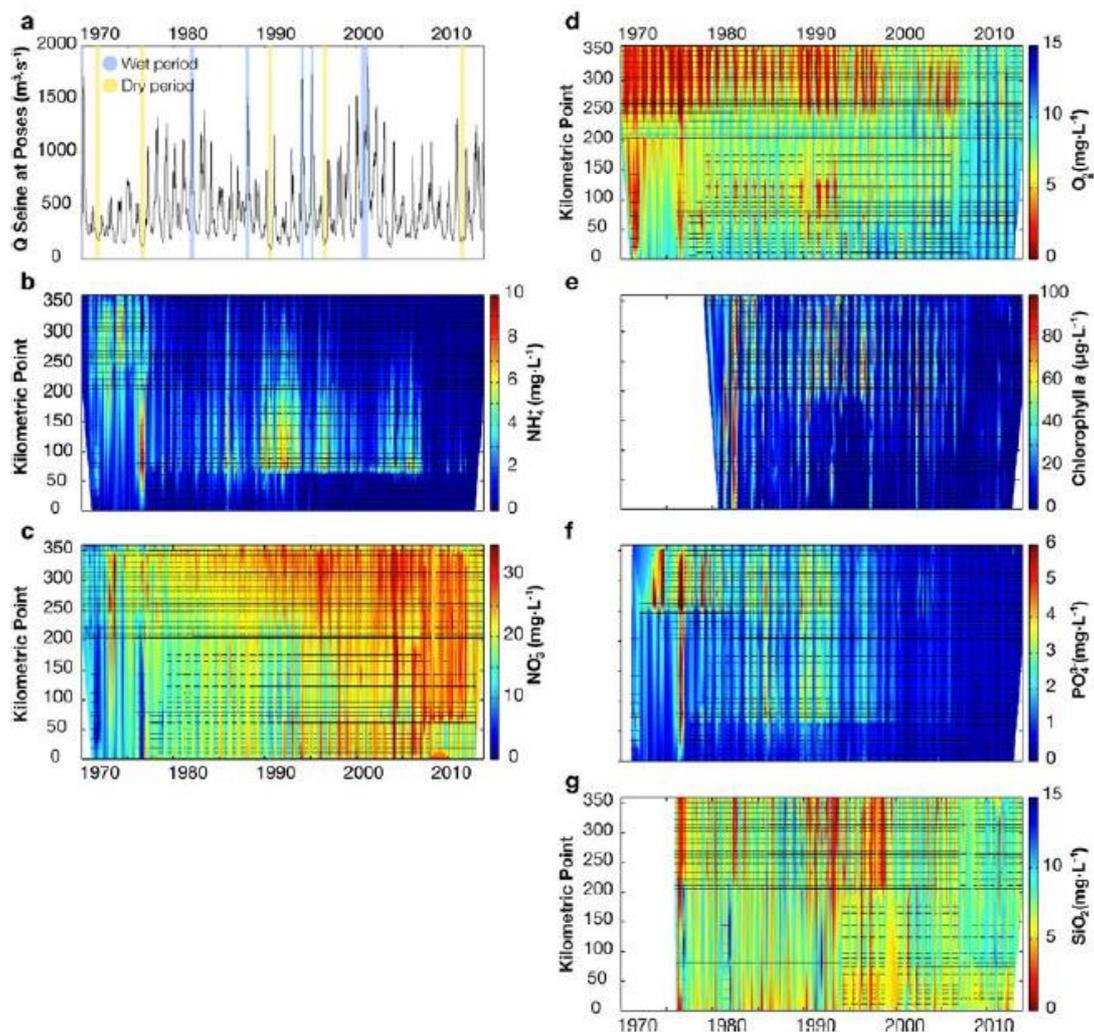


Figure 14 : profils (1970-2013) d'ammonium (b), nitrate (c), phosphate (f), silice(g), oxygène dissous (d) et chlorophylle a (e) dans les 45 stations d'échantillonnage, de Paris (point kilométrique 0) à Honfleur (point kilométrique 355). La série chronologique de débit à Poses pendant la même période est montrée en haut à gauche.

La prise en compte des données provenant de stations fluviales et estuariennes, avait pour objectif de mettre en évidence un éventuel découplage des évolutions selon les secteurs influencés ou non par la marée. Les résultats montrent toutefois que leur évolution est assez semblable. Bien que les nutriments et l'oxygénation soient clairement différents entre les stations en amont et en aval jusqu'aux années 1990, une évolution synchrone vers des valeurs communes a été observée pour ces paramètres pendant les dernières décennies. Les points d'inflexion et les tendances d'évolution coïncident tout au long du tronçon. Cela signifie que, **bien que les processus intra-estuariens (adsorption sur les sédiments, consommation biologique, dilution et mélange avec les masses d'eau marine) puissent altérer le flux de nutriments vers la mer, ces processus ne sont pas assez intenses pour dissocier la dynamique de l'estuaire de celle du fleuve.** Du point de vue de la gestion, principalement axée sur le contrôle des eaux douces, cela implique que les politiques environnementales ont influencé positivement la qualité des eaux dans l'estuaire. Cependant, l'intensité des processus responsables de l'épuration au sein de l'estuaire n'est pas encore suffisante pour épurer significativement l'eau avant qu'elle n'atteigne la zone côtière.

1.2 Influence des caractéristiques des habitats sur le cycle des nutriments

1.2.1 Temps de transit des eaux

L'efficacité de l'assimilation des nutriments par les organismes autotrophes est fortement dépendante du temps de résidence des masses d'eau. Plus celui-ci est long plus les organismes ont le temps de se développer. **Le temps de résidence de l'eau dans l'estuaire de la Seine est beaucoup plus court que dans d'autres estuaires et apparaît très faible en amont de Tancarville et en particulier en amont de Rouen ([ANPHYECO](#))** (Figure 15).

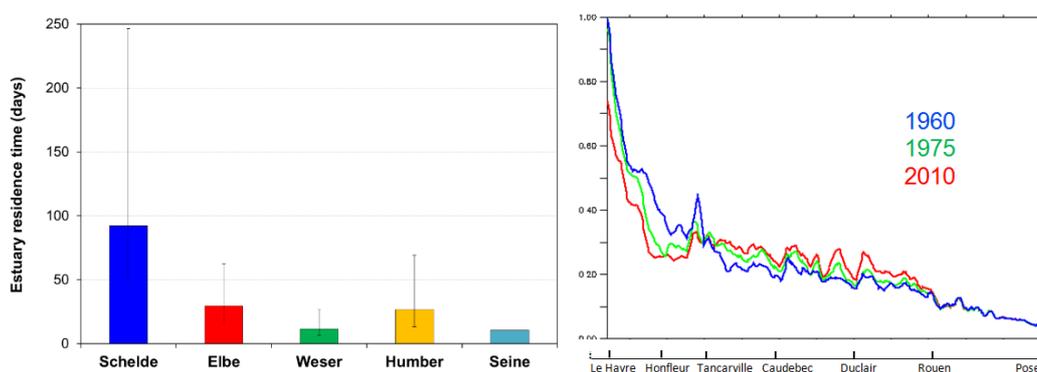


Figure 15: Gauche : Temps de résidence pour les estuaires entiers dans des conditions de débit moyen, crue et étiage (P95 and P5) ; Droite : Temps de résidence (en jours) par biefs de 1000 m de long, moyennés sur la section transversale de l'estuaire. Calcul en condition d'étiage encadrant un cycle vive eau / morte eau.

Ainsi, le déplacement rapide des masses d'eau vers l'aval limite les processus d'assimilation pour le développement du phytoplancton. Il résulte un transfert conséquent des nutriments vers l'aval de l'estuaire.

Depuis 1960, le temps de séjour s'est légèrement allongé dans l'estuaire amont, mais s'est raccourci dans l'estuaire aval. La connaissance des temps de séjour avant les grands aménagements serait une information utile pour l'analyse des facteurs limitant le fonctionnement écologique.

1.2.2 Dynamique spatiale et temporelle de la matière organique

Les sources de MO dans les estuaires sont multiples : autochtone naturelle (algues, bactéries, macrophytes), allochtone naturelle (issue des sols) et allochtone anthropique (rejets urbains domestiques et industriels). Ces sources conditionnent fortement les caractéristiques de la MO. La forte variation des paramètres environnementaux en milieu estuarien (e.g. lumière, salinité) sous l'effet des marées et en fonction des saisons peut profondément modifier les caractéristiques de la MO, rendant l'étude de ce matériel et de ses interactions avec les nutriments compliquée. Ceci est particulièrement le cas dans le bouchon vaseux (BV), soumis à des cycles de sédimentation/remise en suspension et à des migrations longitudinales liées au débit du fleuve et à la marée.

Les analyses ont été effectuées sur l'ensemble des compartiments (**MOSAIC**) : la MO sédimentaire d'une part ; la MO aquatique d'autre part, au sein de laquelle on peut distinguer (i) la MO particulaire (MOP), retenue par filtration des échantillons, et (ii) la MO dissoute/colloïdale (MOD) non retenue au moment de la filtration.

Un grand nombre de descripteurs de la MO a été mobilisé pour caractériser ses propriétés dans les compartiments sédimentaires et la colonne d'eau (forme dissoute – MOD et particulaire MOP).

Les grands traits de la dynamique de cette matière dans l'estuaire sont :

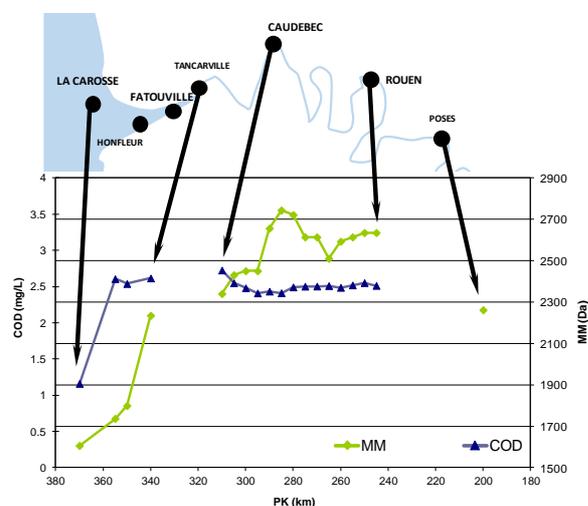
✓ La MO est principalement d'origine autochtone dans l'estuaire (exemple Tableau 1) ;

Site / date de prélèvement	Compartiment	MO autochtone (%)
Caudebec avril 2015	MOD	80.1
Caudebec avril 2015	MOP	76.5
Tancarville janvier 2015	MOD	78.7
Tancarville avril 2015	MOD	79.9
Tancarville avril 2015	MOP	75.8
Tancarville avril 2015	Sédiment 0-1 cm	75.8
Tancarville avril 2015	Sédiment 9-10 cm	75.9
Fatouville avril 2015	MOP	75.3
Fatouville avril 2015	Sédiment 0-1 cm	76.0
Fatouville avril 2015	Sédiment 9-10 cm	75.3

Tableau 1 : Proportion de MO produite in situ par rapport à l'ensemble de la MO (autochtone et terrigène).

✓ la proportion de MO allochtone (érosion/lessivage des sols) diminue de l'amont vers l'aval de l'estuaire ;

✓ le mélange des masses d'eaux douces et marines contrôle la teneur et la composition de la MO estuarienne.



Par exemple, la MO, en particulier dissoute, subit des transformations non-linéaires (taille, nature, niveau de dégradation) le long de l'estuaire (voir exemple Figure 16 du descripteur masse moléculaire de la MOD qui évolue alors que la teneur en carbone est globalement stable).

Ceci traduit une production et/ou la transformation de MOD dans l'estuaire.

Figure 16 : Evolution de la masse moléculaire moyenne (MM) de la MOD et du COD le long de l'estuaire pour les échantillons d'avril 2016 prélevés en surface et à basse mer.



L'ensemble des résultats des données optiques (absorbance et fluorescence 3D) et de masse moléculaire suggèrent que la MOD dans la Seine en période estivale est fortement influencée par la production autochtone, les apports des eaux marines et les processus de transformation ; alors que les apports terrigènes, associés aux forts débits, sont prépondérants en hiver/début de printemps. De potentiels apports anthropiques (effluents) ont été mis en évidence pendant la période estivale. Ils sont également présents en période hivernale mais masqués par les apports fluviaux de MOD.

✓ Dans le bouchon vaseux, l'âge et la composition de la MO sédimentaire sont fortement dépendants des conditions hydrodynamiques. En présence de marées de faibles amplitudes, la MO particulaire, récente, se dépose au fond de la colonne d'eau. A l'inverse, de forts coefficients de marée conduisent à une remise en suspension du sédiment fraîchement déposé, composé d'une MO peu dégradée, dans la colonne d'eau et laissent en surface un matériel plus dégradé et ancien.

1.2.3 Dynamique de l'azote dans les habitats pélagiques de la zone de maximum de turbidité

Le secteur du bouchon vaseux est considéré comme un bio-réacteur jouant un rôle majeur dans le cycle des nutriments. L'étude dans la colonne d'eau des taux de transformation des différentes formes de l'azote minéral et des abondances microbiennes impliquées dans les processus associés a été menée ([MOSAIC](#)). Les taux de consommation des nitrates et de l'ammonium ont pu être évalués (Figure 17).

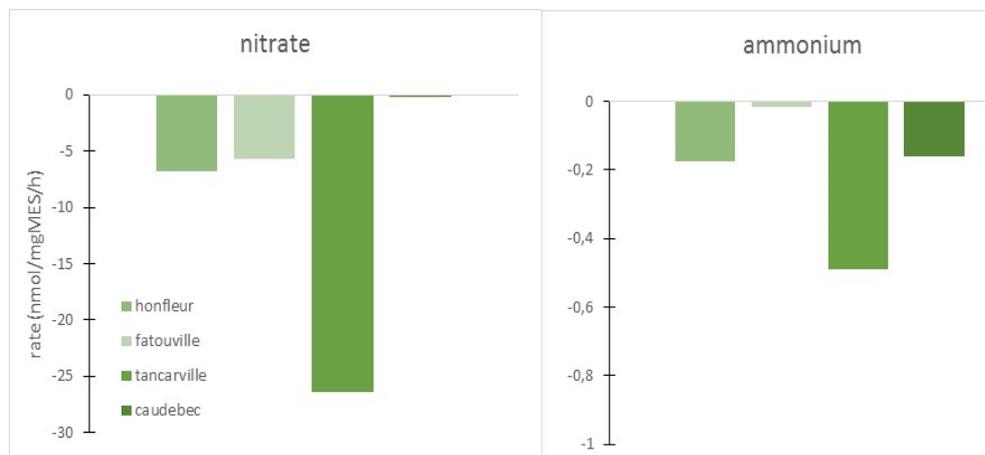


Figure 17 : Taux de consommation de nitrates et ammonium dans la colonne d'eau des 4 stations suivies en conditions oxiques (septembre 2015).

La dénitrification, processus majeur du cycle de l'azote, est un processus respiratoire anaérobie, réalisé par les bactéries dénitrifiantes. Il permet de dégrader les nitrates en produisant deux gaz soit le N_2 soit le N_2O .

La dominance des densités de bactéries dénitrifiantes (> 99%) dans cet environnement semble indiquer que cette diminution de concentration en nitrates est vraisemblablement due à la dénitrification (plutôt qu'à une assimilation par les

organismes autotrophes). Cela suggère la présence de conditions anoxiques dans la masse turbide permettant à ce processus d'avoir lieu.

L'étude synchrone des caractéristiques de la matière organique (MO) dissoute ([MOSAIC](#)) (voir § 1.2.2) a mis en évidence que **la présence de matière organique dissoute peu dégradée et d'origine autochtone** (c'est-à-dire produite dans le milieu ; ex : lyse ou excrétion/sécrétion du phytoplancton...) favorise **les processus de dégradation des nitrates**. Comme précédemment observé dans d'autres estuaires, la matière organique d'origine autochtone, enrichie en sucres et composés azotés est facilement dégradable. Ce type de matière organique entraîne une hausse de l'activité microbienne, à l'inverse de la MO terrigène, moins directement biodégradable.

1.2.4 Dynamique de l'azote dans les habitats benthiques subtidaux

Concernant les habitats benthiques, quatre sites entre Rouen et La Carosse ont été étudiés ([MOSAIC](#)). De même que dans la colonne d'eau à forte turbidité, ce sont les micro-organismes capables de réaliser la dénitrification qui dominent. Les taux de réduction de nitrate et la production d'ammonium dans les sédiments des 4 sites diffèrent, avec une intensité maximale des processus sur le site de Rouen (Figure 18)

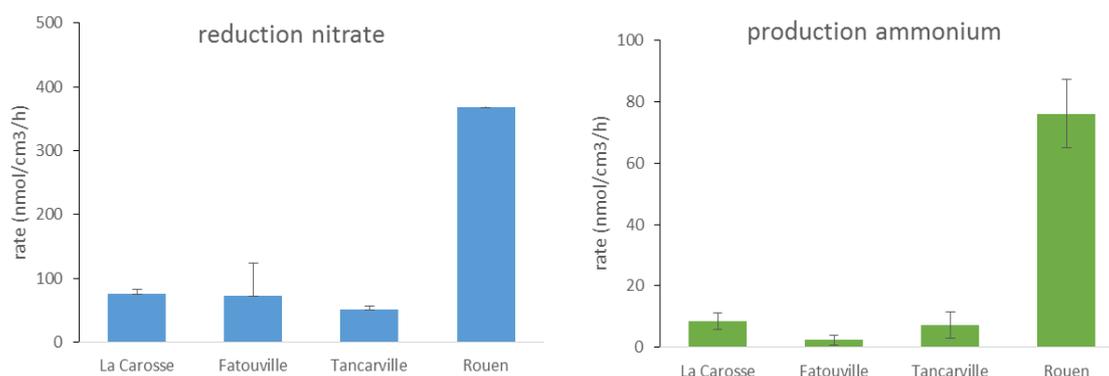


Figure 18 : Taux de réduction de nitrates (gauche) et production d'ammonium (droite) dans les sédiments (0-2 cm) des 4 sites de prélèvements en avril 2016.

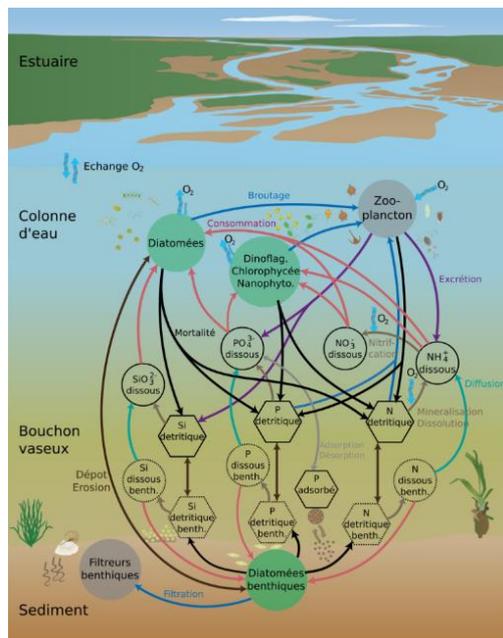
Par rapport à la colonne d'eau turbide, les taux de réduction de nitrates sont beaucoup plus élevés (facteur 1000) dans les sédiments en raison de conditions plus favorables, i.e. l'absence d'oxygène et la présence de matière organique. D'un point de vue quantitatif, des teneurs en carbone organique élevées entraînent de plus forts taux de réduction de nitrates, de production de nitrites et d'ammonium. Comme dans la colonne d'eau à forte turbidité, un lien direct entre le nombre de bactéries responsables de la dénitrification et la fraîcheur de la matière organique est observé.

Les sédiments se comportent donc comme des puits de NO₃. La dégradation de la matière organique dans les sédiments entraîne un flux de NH₄ émis par les sédiments. Le bilan en termes d'azote pour un site d'étude peut être évalué. Des premiers résultats indiquent que les sédiments à Fatouville et La Carosse constitueraient une source d'azote. Le travail se poursuit sur les autres sites.



1.3 Evaluation du rôle filtre de l'estuaire

Le modèle ECO-MARS 3D permet de modéliser les concentrations de nutriments et de phytoplancton dans l'estuaire. Pour cela il simule de manière dynamique les principaux processus hydro-sédimentaires (principalement la dynamique des matières en suspension) et biogéochimiques (cycles des nutriments, oxygène, développement algal).



La représentation numérique des processus biogéochimiques dans l'outil de modélisation ECO-MARS (Figure 19) a été améliorée ([RESET](#)) par l'intégration :

- (1) du cycle de l'oxygène (dans l'estuaire comme à la zone marine) ;
- (2) des groupes de phytoplancton et zooplancton d'eau douce et de leur cycle de vie ;
- (3) de la prise en compte des apports latéraux majeurs au sein de l'estuaire.

D'autre part, cette représentation a été mise en cohérence avec les modèles de bassin versant (Piren-Seine), permettant ainsi de consolider la chaîne de modélisation continue terre-mer

Figure 19 : Diagramme synthétique des processus biogéochimiques modélisés dans la zone estuarienne par le modèle ECOMARS 3D.

La modélisation des processus devra être enrichie par la prise en compte explicite des caractéristiques des habitats latéraux (vasières intertidales, filandres, roselières, prairies connectées). En effet, étant donné leur rôle majeur dans les processus biogéochimiques, l'importance relative des différents forçages dans l'équilibre des nutriments, calculés par le biais de la modélisation, pourra ainsi être démontrée et interprétée.

L'exploitation de l'outil, en l'état de son développement, permet de mettre en évidence que **le rôle filtre apparaît significatif, mais assez limité et variable d'une année sur l'autre en fonction de l'hydraulique.** Trois années contrastées d'un point de vue hydrologique ont été utilisées pour les simulations. **A l'échelle de l'estuaire (Poses-Le Havre), on observe une réduction notable des flux d'azote et de silice (-13% et -11%, respectivement en moyenne sur 3 années hydrologiques contrastées) et de phosphore total (-27%).**

La Figure 20 illustre les résultats du bilan de rétention/relargage pour l'azote, le phosphore et la silice, dans différentes sections de l'estuaire de la Seine. C'est le tronçon Poses-Caudebec qui apparaît le plus épurateur pour les 3 nutriments, plus que les secteurs Tancarville-Honfleur et Honfleur-Le Havre où se situe le bouchon vaseux. Au sein du secteur

Caudebec-Tancarville à l'interface de l'estuaire fluvial et salin, une légère exportation du phosphore total est constatée, le bilan apparaît neutre pour l'azote et la silice.

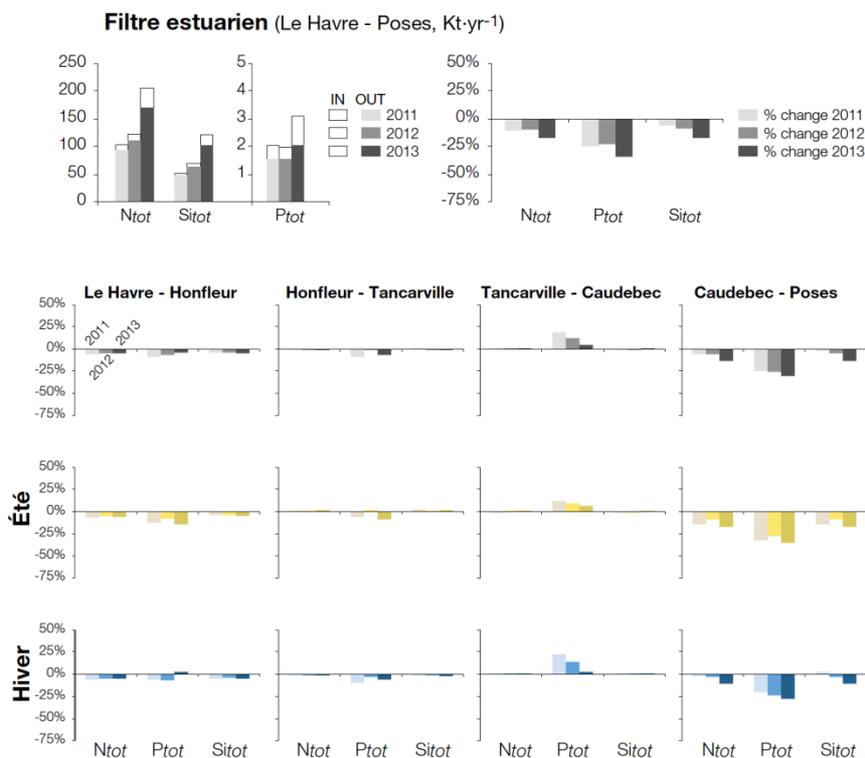


Figure 20 : Bilan de transformation pour l'azote total (Ntot), le phosphore total (Ptot) et la silice (Sitot) dans l'estuaire de Poses au Havre pour les 3 années caractéristiques. Les pourcentages de rétention sont également montrés par secteur estuarien et par saison (hiver de novembre à mars, et été d'avril à octobre, correspondant à la saison hydrologique).

Le fait que le secteur amont de Tancarville apparaisse le plus filtrant peut paraître étonnant du fait que :

- ✓ le secteur du bouchon vaseux (Tancarville-Le Havre) est considéré comme un bio-réacteur important et favorable à la transformation des nutriments
- ✓ le temps de transit des masses d'eau dans le secteur amont de Tancarville est plus faible qu'à l'aval, ce qui est défavorable à l'assimilation des nutriments à l'amont.

Les premières interprétations ont pu être formulées au regard des hypothèses de modélisation. Les résultats peuvent s'expliquer par la longueur (108 km) du tronçon Poses-Caudebec où la surface d'interface (échange eau-sédiments) est plus élevée et favorable à la transformation des nutriments, par rapport aux tronçons Caudebec-Tancarville, Tancarville-Honfleur et Honfleur-Le Havre (20 à 30 km chacun).

2 Productivité biologique de l'estuaire

Les réseaux trophiques estuariens sont contrôlés par la disponibilité de sources d'énergie issues de la production primaire et de matières organiques (MO). Les producteurs primaires représentent une source de carbone et d'azote organique de qualité. L'efficacité du transfert vers les niveaux trophiques supérieurs et le devenir de la MO dépend de sa qualité en termes de digestibilité ou de dégradabilité. Les propriétés de cette matière fraîche autochtone sont en effet différentes de celles de la matière organique détritique également présente dans l'estuaire. Par ailleurs, la MO joue un rôle clef sur la production bactérienne, en servant plus particulièrement de substrat aux microorganismes.

Un des objectifs des travaux menés était de caractériser la production primaire aquatique (phytoplancton et le phytobenthos) et identifier les facteurs qui peuvent la limiter ([PROUESSE](#), [ANPHYECO](#)). Les principaux résultats acquis sur la variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques de la MO ([MOSAIC](#)) sont présentés au § 1.2.2.

Par ailleurs, une description de la topologie des flux trophiques et leur quantification visait à évaluer les composantes de l'état de santé de l'écosystème estuarien englobant les notions de stabilité et de résilience du système. Ces travaux se sont appuyés sur l'étude de l'organisation et du fonctionnement du réseau trophique ([ANTROPOSEINE](#)). Parmi les outils de l'écologie des réseaux trophiques, l'analyse des réseaux (Ecological Network Analysis - ENA) permet d'accéder à différentes variables et indices pouvant être utilisés pour résumer les propriétés de ces réseaux trophiques. Nombre d'auteurs ont mis en lien ce cadre d'analyse des réseaux trophiques avec la dynamique des écosystèmes et leur résilience.

2.1 Production primaire de l'estuaire

Une caractérisation de la production primaire de l'estuaire de la Seine a pu être réalisée en mobilisant plusieurs sources de données : 1/ les données sur la production mesurée dans les habitats benthiques et la colonne d'eau de l'embouchure ([PROUESSE](#)) 2/ les données de suivi en routine de qualité de l'eau (chlorophylle *a*) disponibles *via* les réseaux de surveillance. La comparaison du fonctionnement physique et biogéochimique de la Seine avec celui d'un autre grand estuaire aménagé, l'Escaut, a permis d'apporter des éléments complémentaires pour la formalisation d'un diagnostic de Poses à la mer ([ANPHYECO](#)).



2.1.1 Phytoplancton

Des différences de concentrations en chlorophylle a dans la colonne d'eau sont observées entre les secteurs d'eau douce de l'estuaire de la Seine et celui de l'Escaut. (Figure 21).

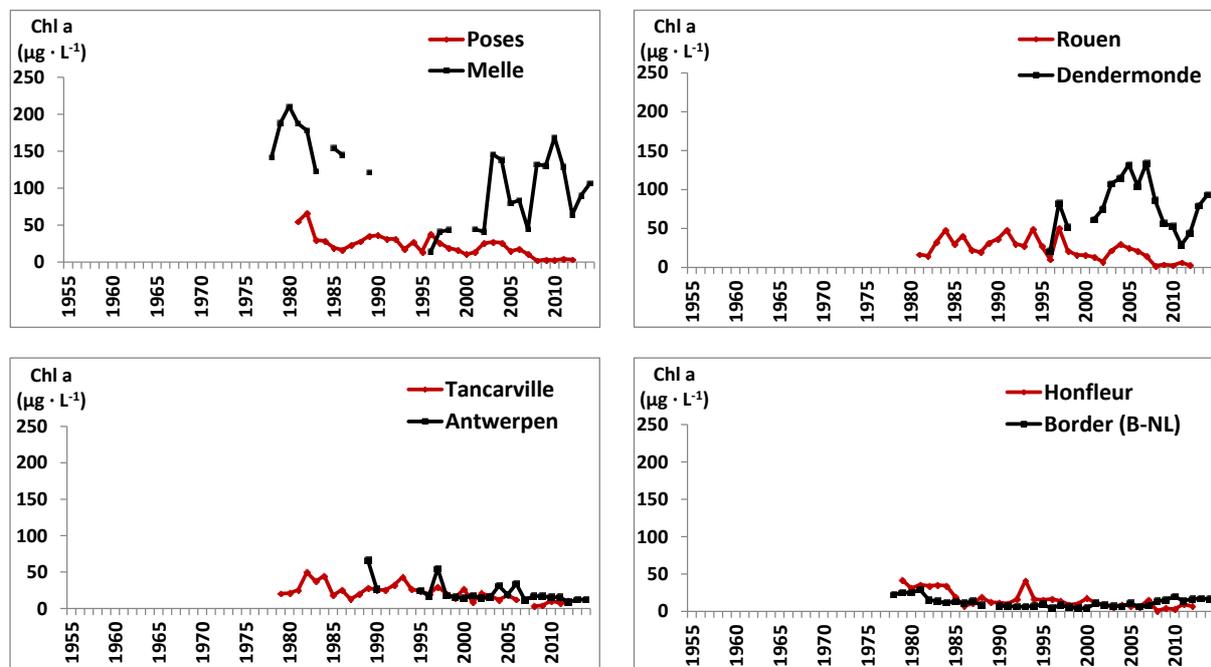


Figure 21: Evolution de la concentration en chlorophylle a sur des sites comparables de la Seine (rouge) et de l'Escaut (noir).

Ce constat semble indiquer une production non optimale dans le secteur amont de l'estuaire de la Seine

L'analyse des dynamiques spatiales et temporelles des concentrations en nutriments en Seine d'une part, et des trajectoires d'évolution sur le long terme (depuis 1970) en Seine et en Escaut d'autre part ([ANPHYECO](#)), montre que **les nutriments ne semblent pas limitants dans le secteur amont de Tancarville**. Ce constat pourrait être nuancé par l'étude des tendances plus récentes, qui indiquent une baisse de chlorophylle a dans ce secteur depuis 2007 (voir § 1.1, [RESET](#)), concomitante à une diminution des concentrations d'azote et de phosphore.

En général, la production primaire est surtout favorisée par des temps de résidence longs (principalement en été), lorsque les débits sont plus faibles. Par conséquent, **le faible temps de résidence de l'eau dans le secteur amont de l'estuaire semble le principal facteur limitant la production primaire**. Cette observation est en accord avec l'analyse des facteurs influençant la dynamique des nutriments (voir §1.2.1).

Plus en aval, les campagnes de mesures réalisées mensuellement en 2015 dans l'embouchure de l'estuaire ont mis en évidence un **rôle important des gradients de**

turbidité et de salinité sur la production primaire phytoplanctonique (Figure 22). L'étude de l'état physiologique des cellules du phytoplancton ([PROUESSE](#)) a permis de préciser ce résultat. Dans la zone la plus amont du bouchon vaseux, l'indicateur d'état physiologique présente des valeurs faibles, traduisant un stress auquel est soumis le phytoplancton d'eau douce en condition de forte turbidité, de faible disponibilité en lumière et avec un fort gradient de salinité. A l'opposé, le secteur aval du bouchon vaseux est caractérisé par des cellules en bonne état physiologique, malgré les concentrations en MES élevées et la très faible pénétration de la lumière, notamment en profondeur. **Ainsi, le phytoplancton d'origine marine peut survivre dans ces conditions et maintenir un bon état physiologique, constituant ainsi un pool de matière nutritive de qualité disponible pour les maillons supérieurs du réseau trophique.**

A l'échelle de la zone étudiée, avec une moyenne de production primaire annuelle de 64.75 gC.m^{-2} , il a été estimé un total de 6032 tC fixé pour l'année 2015, pour le compartiment phytoplanctonique. **Ce niveau est caractéristique d'un système plutôt oligotrophe dont la production est limitée par la faible pénétration de la lumière directement dépendante de la turbidité.**

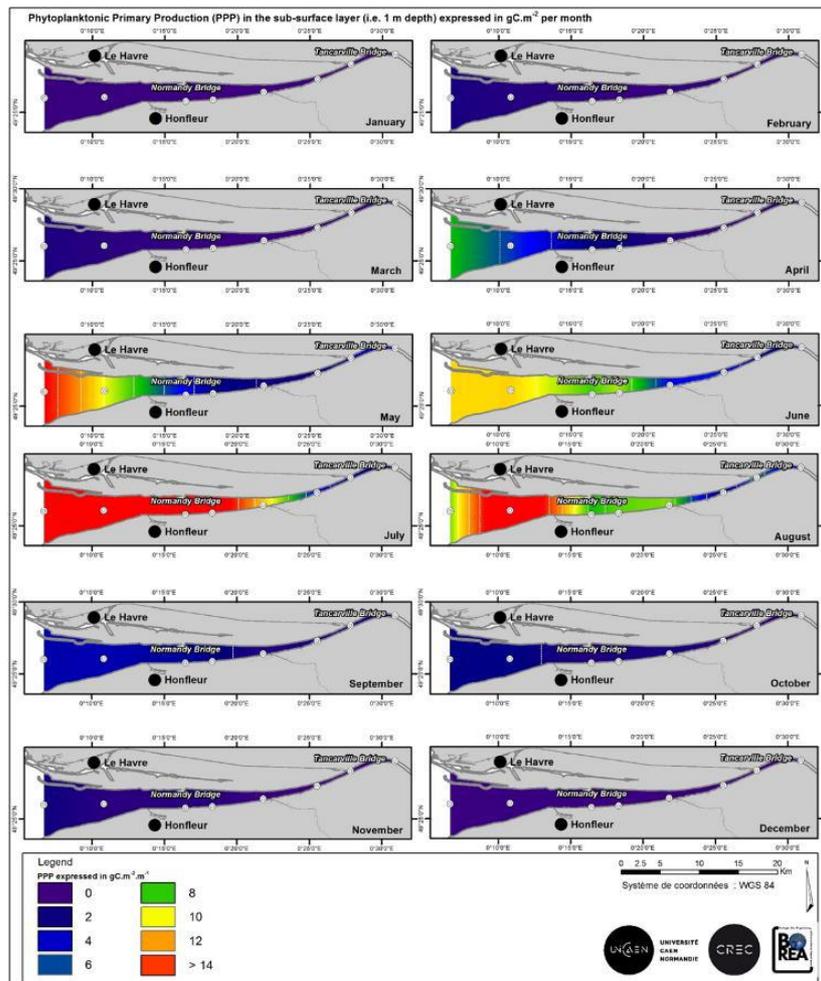


Figure 22 : Variations de la production primaire (gC.m^{-2}) pour chaque mois de l'année 2015. Les points blancs sur les cartes représentent les stations d'échantillonnage.

La mesure des excréments de carbone par le phytoplancton permet d'évaluer la contribution à la formation de MO autochtone dissoute (exopolysaccharides – EPS) et particulaire (agrégat d'EPS formant les TEP = Transparent Exopolymer Particles). **Le pool de TEP, varie saisonnièrement** entre 1.55 et 68.74 mgC.L⁻¹ en 2015 dans l'embouchure de l'estuaire. Ce pool **constitue une ressource trophique potentielle pour le zooplancton**.

En proche baie de Seine, les conditions physiques et physico-chimiques sont propices au développement du phytoplancton, faisant de ce secteur le plus favorable pour la production primaire pélagique. A l'exception de la silice, dont le taux peut être réduit pendant l'été, entraînant des limitations du développement des diatomées qui la consomment, les autres nutriments ne sont pas limitants. Pendant ces périodes de limitation de silice, le développement de dinoflagellés est favorisé, pouvant provoquer des nuisances par leur toxicité (ex. *Dinophysis*). ([RESET](#)). Le développement des dinoflagellés à cette période est également favorisé par la stratification thermo-haline.

2.1.2 Phytobenthos

Concernant le micro-phytobenthos, deux campagnes (septembre 2014 et avril 2015) ont permis l'analyse des dynamiques de sa biomasse et de sa production en lien avec les paramètres physiques pour 3 grands secteurs de l'embouchure : le chenal environnemental (rive nord amont du pont de Normandie), la vasière nord (aval du pont de Normandie) et la rive sud ([BARBES](#)). La production microphytobenthique mesurée aux différentes stations est très variable selon les environnements et la saison ([PROUESSE](#)).

Il ressort qu'en été, la biomasse de phyto-benthos est plus importante dans le chenal environnemental (nord-est), alors qu'au printemps c'est dans la vasière Nord (nord-ouest) (voir ex du printemps Figure 23). La biomasse de phyto-benthos la moins importante est mesurée dans le secteur sud pour les deux saisons.

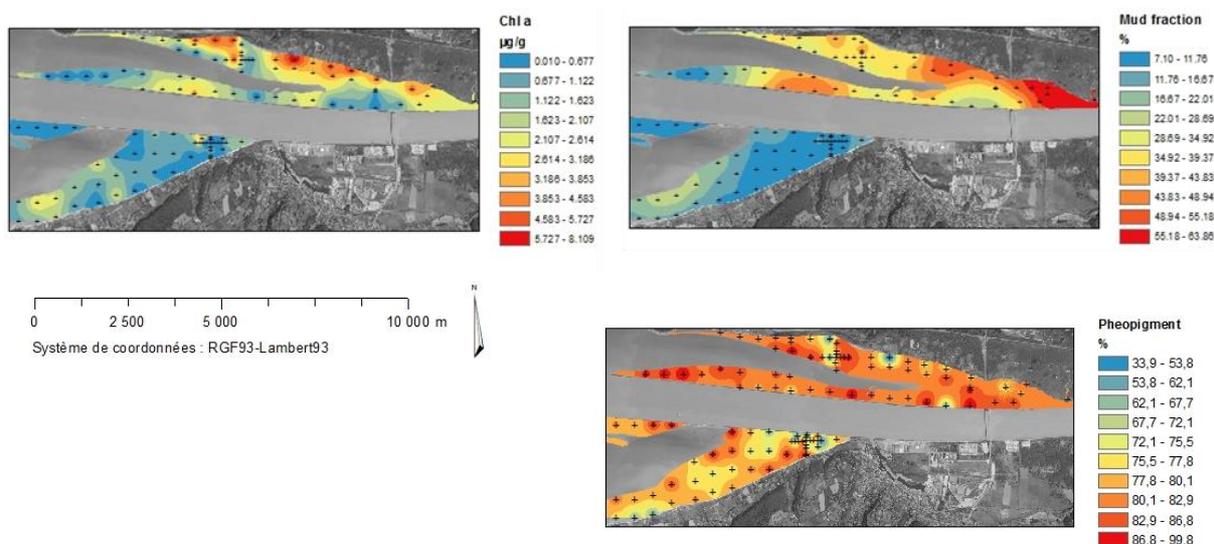


Figure 23 : Cartes des biomasses chlorophylliennes (en µg.g⁻¹ de sédiment sec), de la granulométrie (fractions de particules fines >63 µm ; %) et du % de phéopigment dans le 1^{er} cm superficiel-Avril 2015. Les croix noires correspondent aux points d'échantillonnage.

Les communautés microphytobenthiques se développent favorablement sur les vasières supérieures, zones dans lesquelles les conditions d'éclairement et les teneurs en eau sont les plus favorables.

En complément des campagnes de terrain, la mobilisation des images satellitaires ([BARBES](#)) a permis d'apporter une information complémentaire quant à la variabilité spatiale du microphytobenthos (Figure 24). **La forte biomasse présente dans les chenaux à marée (filandres) est bien visible, en lien avec le drainage des eaux riches en nutriments provenant des milieux rivulaires (prairies, roselières).**

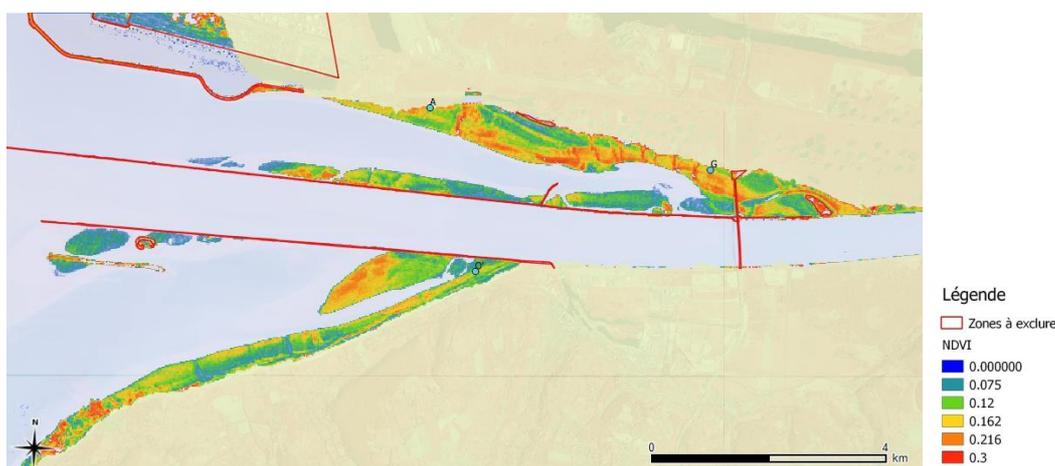


Figure 24: Image SPOT montrant la répartition spatiale du microphytobenthos (NDVI) le 23 avril 2010.

Les phéopigments sont issus de la dégradation de la chlorophylle a et de la lyse cellulaire des diatomées. Cette mortalité micro-algale peut être provoquée soit par sénescence de la population, soit par la consommation par des espèces déposivores (et/ou phytophages). Ainsi, le pourcentage de phéopigments total (Figure 23) peut ici refléter le taux de broutage par la faune déposivore. La vasière Nord est particulièrement riche en macrofaune benthique et surtout en déposivore. **La forte quantité de phéopigments y est exceptionnelle par rapport à d'autres systèmes estuariens. Ce constat reflète une forte productivité primaire associée à une consommation immédiate de la biomasse, faisant diminuer très significativement le stock microphytobenthique disponible ([BARBES](#)).** En effet, les valeurs de chlorophylle a sont très faibles en Seine par rapport à d'autres systèmes comparables.

La production primaire a pu être évaluée aux deux saisons en chaque point de mesures. Ces valeurs ont été extrapolées afin de fournir une estimation de la production à l'échelle annuelle, pour chaque secteur d'étude. (Tableau 25) ([PROUESSE](#)).

	Chenal Env.	Vasière Nord	Vasière Sud
Max PP (gC.m⁻².d⁻¹)	0.46	1.04	0.52
Min PP (gC.m⁻².d⁻¹)	0.24	0.21	0.35
Annual PP (gC.m⁻².y⁻¹)	159.68	189.84	122.36
Surface (km²)	1.29	4.65	0.08

Tableau 2 : Estimation de la production annuelle moyenne pour chaque vasière (en gC.m⁻² et en tC). La production journalière moyenne minimale et maximale (gC.m⁻².d⁻¹) pour chaque vasière est également donnée. La production en tC.y⁻¹ a été estimée en fonction de la surface de chaque zone intertidale.

La vasière Nord présentait la plus forte production aux deux saisons. Les valeurs plus faibles de production ont été observées sur le secteur sud au printemps et dans le chenal environnemental en été. **Les mélanges sable-vase se sont avérés être le meilleur habitat pour la performance photosynthétique, avec un optimum d'environ 40% de vase fine.**

Ainsi, **en comparaison avec les résultats de la production primaire phytoplanctonique aux mêmes périodes, le microphytobenthos semble être plus productif.** Cependant, si l'on considère les surfaces productives, la production primaire totale de l'embouchure estimée pour le microphytobenthos (variant entre 62,07 tC en septembre 2014 et 52,48 tC en avril 2015), était faible comparée à celle du phytoplancton (variant entre 281 tC en septembre 2014 et 500 tC en avril 2015). **La contribution relative du microphytobenthos à la production primaire autochtone totale de l'embouchure serait donc de 18% en septembre et de 10% en avril.** Ce pourcentage apparaît faible par rapport à d'autres estimations réalisées sur d'autres systèmes estuariens. La disponibilité de surface pour le microphytobenthos en estuaire de Seine, essentiellement les zones intertidales, est relativement réduite comparée à l'Escaut ([ANPHYECO](#)). **Avec un bassin versant qui est presque 4 fois plus grand et un débit qui est 4 fois supérieur, la Seine ne dispose que d'un 1/3 de surfaces favorables à la production primaire par rapport à celles de l'Escaut (2500 ha vs 8894 ha).**

2.1.3 Schématisation globale du diagnostic à l'échelle de l'estuaire

L'analyse des différents facteurs influant cette production a permis de poser les bases d'un diagnostic des facteurs limitants à l'échelle globale de l'estuaire ([ANPHYECO](#)). La Figure 25 illustre cette analyse.

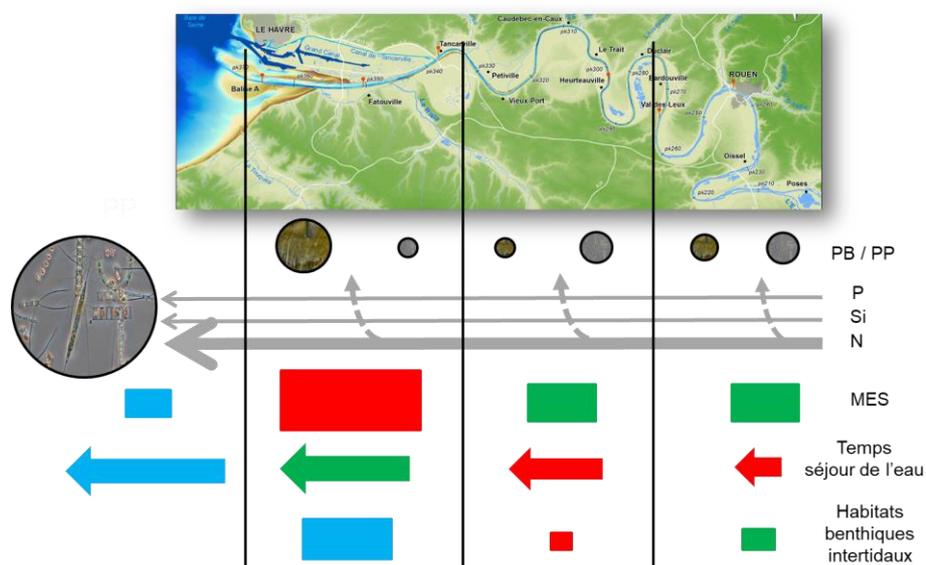


Figure 25: Schéma général des facteurs de contrôle de la production d'algues planctonique et benthique, base de la production primaire des réseaux trophiques. La taille des symboles donne une indication relative de l'intensité du phénomène. Le rouge indique une tendance à limiter la production alors que le bleu indique une tendance à la favoriser. Le vert est une situation intermédiaire. PP = production planctonique, PB : production benthique, P = phosphore, Si = silice, N = azote, MES = matières en suspension, Temps de séjour de l'eau, surfaces des habitats benthiques favorables au développement du microphytobenthos.



Trois facteurs limitants importants ressortent : le temps de résidence de l'eau, la turbidité, et la surface de zones intertidales. Le déficit ponctuel de silice est également un facteur à prendre en compte car il pourrait jouer un rôle essentiel dans les problématiques de développement d'algues toxiques en baie de Seine. Pour être complet, l'étude de l'influence de la baisse drastique du phosphore lors des deux dernières décennies devrait être analysée de manière plus détaillée pour caractériser l'impact sur la production primaire.

Ces résultats permettent de mieux orienter la réflexion liée à la restauration de l'estuaire, fournissant des indications essentielles pour la recherche des leviers d'action nécessaires à l'amélioration la productivité de l'estuaire. Afin de pouvoir disposer d'outils et de connaissances plus détaillées permettant de fixer des objectifs de restauration, des travaux complémentaires sont d'ores et déjà engagés.

Vers une quantification de l'Influence relative des différents processus bio-physico-chimiques et trophiques sur la productivité de l'estuaire

Au regard des éléments de diagnostics précités, deux types d'acquisition de connaissances ont été engagées dans Seine-Aval 6 :

1. **la productivité des vasières intertidales** diffère selon leurs caractéristiques. L'objectif est de développer une approche pluridisciplinaire permettant de comparer le développement du microphytobenthos en réponse à différents forçages tels que courant, vagues, température, lumière et substrat sédimentaire (les flux diffusifs de nutriments variant en fonction du mélange sablo-vaseux et de l'intensité de la bioturbation par la méiofaune/macrofaune benthique) ([PHARESEE](#)) ;
2. l'évolution récente de la qualité physico-chimique de l'eau a probablement modifié la structuration des communautés biologiques dans le secteur fluvial (Poses-Tancarville). En effet la productivité du système semble évoluer en lien avec l'évolution des apports en nutriments du bassin versant. Or, ce secteur a été moins étudié dans les programmes de recherche précédents par rapport à l'embouchure. L'objectif dans Seine-Aval 6 ([SARTRE](#)) est d'étudier de manière pluridisciplinaire les communautés phytoplanctoniques, zoo-planctoniques et le suprabenthos et d'analyser **comment les différents processus bio-géochimiques et trophiques contrôlent la productivité biologique de la colonne d'eau.**



2.2 Propriétés du réseau trophique et « état de santé »

L'étude des propriétés de fonctionnement du réseau trophique a été abordée grâce à une approche de modélisation ([ANTROPOSEINE](#)) et de méthodes d'analyses du fonctionnement des réseaux trophiques (*Ecological Network Analyses* ENA). Les modèles d'équilibre de masses (dont le modèle ECOPATH) permettent de quantifier l'ensemble des flux trophiques, en caractérisant les liens trophiques entre les différents maillons du réseau.

La modélisation repose sur un important travail de synthèse et de mise en relation des données relatives aux différents compartiments écologiques (Tableau 3). L'application de cette approche a permis d'évaluer l'intérêt des descripteurs de fonctionnement pour diagnostiquer l'état écologique de l'estuaire. **En raison de données parcellaires sur les différents compartiments du réseau trophique en amont de Tancarville, cette approche a été développée uniquement dans le secteur de l'embouchure et de la proche baie de Seine.**

Group	Compartment	Biomass data
1	Seabirds	-
2	Fish, piscivores	Ifremer, CSLN, Le Havre port authority sampling programs
3	Fish, planktivores	(Liteau, Port2000, Grand Canal, COLMATAGE 2008-2009-2010), and GIP Seine-Aval
4	Fish, benthos feeders	
5	Benthic predators	PECTOW, BENTHOSEINE, and COLMATAGE projects, Le Havre port authority, and GIP Seine-Aval
6	Benthic filter feeders	
7	Benthic deposit feeders	
8	Suprabenthos	National Natural History Museum Paris, Wimereux marine station, Caen University, Le Havre port authority, and GIP Seine-Aval sampling programs
9	Zooplankton	From Rybarczyk and Elkaïm (2003)
10	Meiofauna	Le Guellec and Bodin (1992); Ratsimbazafy (1998); Spilmont (2004)
11	Bacteria	Chardy (1987); Chardy and Dauvin (1992)
12	Microphytobenthos	Spilmont (2004), Napoléon et al. (2012)
13	Phytoplankton	SURVAL database (http://envlit.ifremer.fr/resultats/surval)
14	Detritus	Seine-Aval sampling program

Tableau 3 : Origine des données de biomasses utilisées dans les différentes étapes de modélisation.

Dans un premier temps, les propriétés trophiques de grands secteurs de l'estuaire aval ont été évaluées pour la période 1996-2002 (Figure 26).

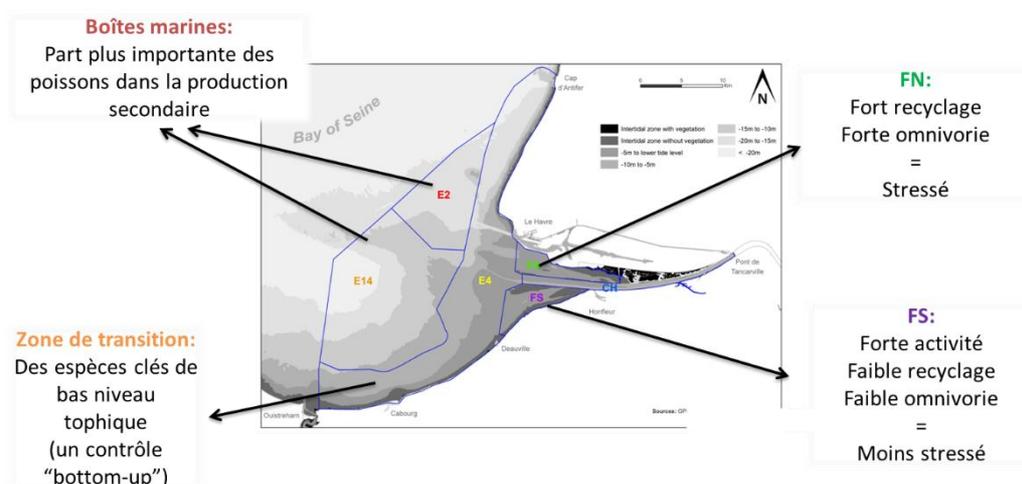


Figure 26 : Délimitation des 6 boîtes spatiales étudiées. Un modèle a été développé pour chacun des secteurs. FN = Fosse Nord, FS = Fosse Sud, CH = chenal ou zone endiguée, E4 = zone de transition, E2 et E14 = zones marines. Résumé des principales conclusions.

La combinaison des descripteurs « ENA » a permis d'évaluer le niveau de stress des 6 boîtes spatiales étudiées. **Une différence marquée dans le fonctionnement trophique entre les boîtes estuariennes la baie a été observée.** Dans le domaine estuarien on remarque un fonctionnement particulier des zones FN (Fosse Nord) et CH (zone endiguée) où se concentrent la majeure partie des pressions physiques subies par l'écosystème.

Les espèces clé-de-voûte structurant le réseau trophique comprennent à la fois des espèces prédatrices (ex. oiseaux, merlan...) et des espèces intermédiaires. Cela suggère, d'une part, un contrôle de type « top-down » sur la production biologique (i.e. les prédateurs semblent contrôler les effectifs des populations des proies) et, d'autre part, un contrôle de type « bottom-up », où la production secondaire benthique tient un rôle clé dans le contrôle des populations des prédateurs (notamment des poissons). Parmi les compartiments les moins bien connus et documentés, la méiofaune joue un rôle essentiel dans le fonctionnement du réseau trophique, ce qui devrait inciter à approfondir les recherches sur cette communauté.

Dans un second temps, une comparaison de cette situation avec la situation représentative des données disponibles sur la période 2005-2012, après l'aménagement majeur du port du Havre, a été produite. Bien que l'écosystème soit « naturellement stressé », par les variations fortes de variables physico-chimiques et qu'il **est donc possible de confondre « fonctionnement typique d'un estuaire » et « fonctionnement caractéristique d'un état de stress »**, plusieurs indicateurs ENA montrent que, du fait des modifications de biodiversité, **le fonctionnement du réseau trophique est significativement plus stressé à différents niveaux aujourd'hui qu'il ne l'était sur la période précédente.**

La variabilité hydrodynamique naturelle maintient l'estuaire dans un état d'instabilité, qui de fait est une composante intrinsèque du fonctionnement du système. Cela constitue l'origine d'une forme de résilience de l'écosystème face aux perturbations naturelles voire anthropiques, le recyclage (proportion de la matière organique qui circule dans des voies revenant à leur point de départ du réseau) **et l'omnivorie** (capacité d'un consommateur à se nourrir sur plusieurs niveaux trophiques) **jouant un rôle tampon face aux perturbations.** Cette étude a permis d'enrichir la discussion sur l'applicabilité du cadre conceptuel des descripteurs d'état de santé des réseaux trophiques (ENA) pour l'évaluation du niveau de stress des milieux estuariens.

En parallèle, l'analyse de la diversité spécifique des échantillons intégrés dans les modèles a pu mettre en évidence des évolutions liées à la marinisation du secteur d'étude pendant la période considérée. **La marinisation se traduit par un changement des communautés présentes, avec une remontée des espèces marines dans la zone estuarienne.**

Finalement, il apparaît que l'anthropisation et la marinisation semblent affecter significativement le fonctionnement global du réseau trophique.



3 Cycle de vie des espèces colonisant l'estuaire

La mosaïque d'habitats estuariens joue un rôle essentiel dans le cycle de vie de nombreuses espèces en lien avec leurs préférences et tolérances écologiques. Les estuaires remplissent trois rôles fondamentaux : ils fournissent un espace physique pour s'abriter, la nourriture, et des conditions pour la reproduction. Lorsque l'un de ceux-ci vient à être limitant alors la concurrence interspécifique se développe. Il est donc nécessaire de comprendre et hiérarchiser les facteurs pouvant influencer l'abondance des populations observées.

Pour certains groupes taxonomiques, de longues séries de données biologiques sont disponibles sur l'estuaire et la proche Baie de Seine. L'étude des facteurs de l'environnement expliquant les observations biologiques a été menée pour trois compartiments biologiques :

- la **macrofaune benthique** caractéristique des fonds meubles de baie de Seine orientale joue un rôle important dans le fonctionnement écologique de l'interface estuaire-mer. Or, le développement des populations benthiques dans les environnements sédimentaires dynamiques est complexe à analyser en raison de la diversité des facteurs structurants et de leurs interactions. Les travaux menés dans Seine-Aval 5 avaient pour objectif d'apporter un éclairage sur les modalités d'analyse de ces interactions depuis l'échelle de la carotte sédimentaire à l'échelle de la baie de Seine orientale ;
- au niveau de la zone de gradient de salinité, naturellement chargée en MES, le **mésozooplancton** (dominé par des copépodes) ayant une position trophique intermédiaire, joue un rôle crucial dans le fonctionnement de l'écosystème estuarien. Les travaux avaient pour objectif d'évaluer la dynamique spatiale et temporelle des biomasses des principales espèces selon les variations des facteurs physiques. L'influence de la composition des MES sur les comportements alimentaires a également été abordée ;
- l'importance du rôle de l'estuaire de la Seine en tant que **nourricerie de poissons** marins est caractérisée par sa capacité à fournir les habitats de croissance pour les juvéniles des espèces concernées. Les travaux menés ont cherché à hiérarchiser l'influence des différents facteurs physiques sur l'occupation des habitats par les poissons et à analyser si la capacité d'accueil trophique était limitante pour ces populations.

La restauration des continuités écologiques sur les affluents estuariens est un enjeu majeur en particulier pour favoriser le développement des **poissons salmonidés**. En effet, ces affluents constituent les premiers axes de migration vers les zones de reproduction avant les barrages. Il est apparu nécessaire de développer des outils d'évaluation de l'efficacité de la suppression d'obstacles à la migration, utiles pour appuyer les politiques de gestion de la continuité écologique.

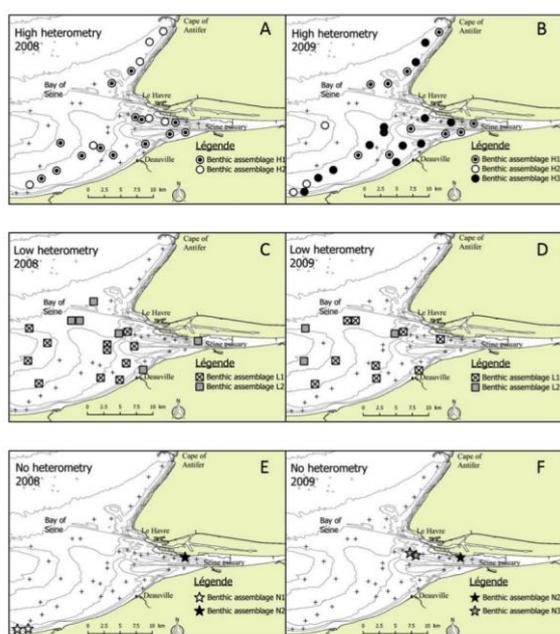


3.1 Macrofaune benthique en baie de Seine Orientale

3.1.1 Influence des facteurs physiques à l'échelle de la baie de Seine

Le suivi à long terme de la macrofaune benthique de la baie de Seine orientale (tous les 5 ans depuis 1998) a été poursuivi par la réalisation de la campagne PECTOW 2016 ([PECTOW](#)). D'une manière générale, les résultats confirment une stabilité dans les espèces dominantes et les principales caractéristiques de la communauté benthique. Toutefois, en termes d'organisation spatiale de la communauté, les campagnes PECTOW 2011 et 2016 semblent montrer **une structuration spatiale du peuplement moins prononcée que par le passé et une tendance à l'homogénéisation de la communauté.**

A partir des données obtenues en septembre 2008 et 2009 (Programme Seine-Aval 4 - COLMATAGE), la relation entre la répartition spatiale des espèces benthiques, la structure des communautés et des variables environnementales sélectionnées a été examinée ([H20](#)). L'objectif était d'expliquer la contribution de facteurs abiotiques dans la structuration spatio-temporelle de la faune benthique dans ce secteur sous l'influence estuarienne.



Huit assemblages ont été identifiés. Une certaine cohérence avec l'hétérométrie des sédiments a été observée (Figure 27). Toutefois, **la vitesse de courant, la bathymétrie et la salinité ont été les facteurs environnementaux les plus importants pour expliquer la structuration des principaux assemblages benthiques dans la partie orientale de la baie de Seine.** Les modèles statistiques montrent que ces paramètres expliquent entre 30 et 89 % des observations biologiques.

Figure 27 : Carte des huit assemblages benthiques identifiés (A) en 2008 et (B) 2009 selon les faciès de sédiments hétérométriques.

L'analyse a également été réalisée pour chaque espèce. De manière générale, la capacité à prédire la distribution spatiale des abondances de chaque espèce varie selon leur préférendum sédimentaire. En effet, **la distribution spatiale des espèces ayant une préférence pour un environnement sédimentaire très particulier est prédite de manière satisfaisante.** A l'inverse, la distribution spatiale des espèces ayant une tolérance plus importante à la variabilité du contexte sédimentaire sont plus difficilement prédictibles.

Ainsi, la répartition des assemblages et des espèces dominantes n'a pu être expliquée que partiellement. La difficulté est due d'une part à la complexité du milieu étudié avec en particulier la texture extrêmement complexe du sédiment et son hétérométrie,

et d'autre part, à la variabilité intrinsèque des principaux facteurs abiotiques (salinité, profondeur, vitesse de courant) caractérisant les écosystèmes estuariens mégatidaux.

A noter que suite à la **crue exceptionnelle de juin 2016**, une campagne d'échantillonnage spécifique a été réalisée afin de décrire l'environnement bio-sédimentaire de ce contexte hydrologique particulier ([PECTOW](#)). L'analyse des données sédimentaires acquises à l'issue de la campagne de juillet 2016 indique une tendance à l'envasement de la baie qui est particulièrement prononcée sur quelques stations situées face à l'estuaire de la Seine. La comparaison des données collectées en février et en juillet 2016 met en évidence une augmentation des abondances et de la richesse spécifique de la macrofaune sur presque l'ensemble des stations. Cette augmentation est liée au recrutement printanier et estival de la majorité des espèces d'invertébrés benthiques. Ainsi, aucun bouleversement majeur de la structure de la communauté n'a pas été détecté et **il est difficile de différencier l'effet 'recrutement' de l'effet 'envasement' sur les changements temporels d'abondance observés.**

Les difficultés rencontrées pour prédire les abondances de la macrofaune benthique à partir des facteurs d'environnement sur la base des données disponibles invitent à discuter des stratégies d'échantillonnage. Une réflexion engagée sur ce point ([H20](#)) semble mettre en évidence qu'il pourrait être préférable d'organiser une campagne avec un nombre dense de stations au lieu de privilégier un nombre limité de stations avec trois ou cinq répliques de macrofaune.

Influence des caractéristiques des habitats benthiques intertidaux sur le développement des populations de la macrofaune benthique.

Afin de pouvoir évaluer l'effet de scénarios de restauration sur la faune benthique des zones intertidales, des travaux sont engagés dans Seine-Aval 6 pour à la fois mieux comprendre les dynamiques de population et évaluer les capacités à prédire ces dynamiques. Le développement de modèle statistique reliant les observations biologiques à l'évolution des caractéristiques physiques et trophiques est envisagé. L'étude des variations annuelles des abondances et biomasses, en lien avec la dynamique des populations de ces espèces, est engagée. En effet, souvent étudiées en seulement deux périodes (printemps, automne), cette variabilité est méconnue. Pourtant, elle influe sur la stabilité morphologique des vasières et sur la disponibilité de la ressource trophique pour les poissons et les oiseaux. ([SENTINELLES](#))



3.1.2 Influence des facteurs physiques à l'échelle de carottes sédimentaires

L'étude de l'influence de l'hétérométrie des sédiments à l'échelle de la carotte sédimentaire a été conduite (H20). L'apport de la tomographie a permis la détermination de la structuration de ces faciès sédimentaires, non identifiables par les analyses faciologiques et granulométriques.

Cette méthode d'imagerie a ainsi permis de caractériser trois faciès types pour le secteur d'étude et d'évaluer la présence de phénomènes de bioturbation (Figure 28) :

1. faciès graviers envasés avec des particules sédimentaires grossières mélangées à une matrice sédimentaire fine (a) et (b), sans structuration régulière sur la profondeur ;
2. faciès lités sans litage sur la partie supérieure (c) ;
3. faciès lités avec litage sur la partie supérieure (d).

Une absence de bioturbation dans les carottes litées a été constatée. A ce sujet, les hypothèses formulées reposent sur l'instabilité de cet habitat et un renouvellement sédimentaire fréquent par dépôt-érosion. Ainsi les organismes en place subiraient ce dynamisme sédimentaire. Le recouvrement sédimentaire, les obligeant à remonter. L'érosion effacerait les traces biogènes, voire déplacerait les organismes eux-mêmes.

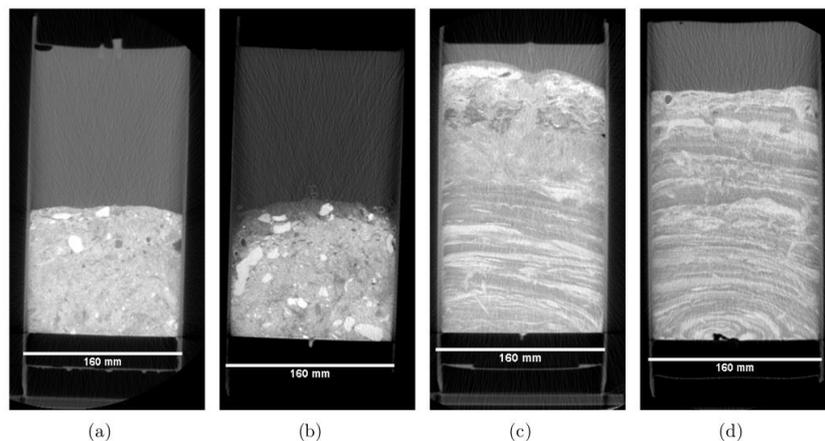


Figure 28 : Résultats des CAT-Scan de 4 carottes types des secteurs d'étude

Le maximum des volumes de vie (basé sur la quantification des volumes vides) se situe en partie supérieure (2 cm) de la colonne sédimentaire, avec des valeurs plus élevées en termes d'abondance et de richesse spécifique de macrofaune. Un deuxième maximum d'abondance entre 5 et 7 cm supporté par *Kurtiella bidentata* et *Chaetozone spp*, mis en évidence au sein des trois faciès, n'avait pas été identifié auparavant. L'étude conjointe sédimentaire et biologique a mis en évidence des relations entre faciès sédimentaires et espèces. L'analyse du caractère oxygène ou anoxique et des volumes de vie a permis de compléter l'interprétation des interactions en dynamique sédimentaire et présence de la faune. **Il est ainsi possible que le faciès fortement lité, situé dans l'embouchure de la Seine représente un habitat remanié en permanence ne permettant pas à ces organismes de s'installer.**

3.2 Zooplancton dans le secteur aval de l'estuaire

3.2.1 Influence des facteurs physiques sur les densités

Les nombreuses données acquises sur le zooplancton dans le secteur aval de l'estuaire ont permis de modéliser la dynamique spatiale et temporelle des densités pour les espèces colonisant ce secteur en fonction des variations de salinité et de température ([ZOOGLOBAL](#)). Deux taxons, *Eurytemora affinis* et *Acartia sp.*, ont été retenus au regard des données disponibles, et 3 groupes de stades de vie (N1-N6 ; C1-C4 et C5-Adulte) (Figure 29) ont été considérés. **Les résultats permettent également d'évaluer la variabilité temporelle des biomasses, informations essentielles pour l'analyse du fonctionnement du réseau trophique estuarien.**

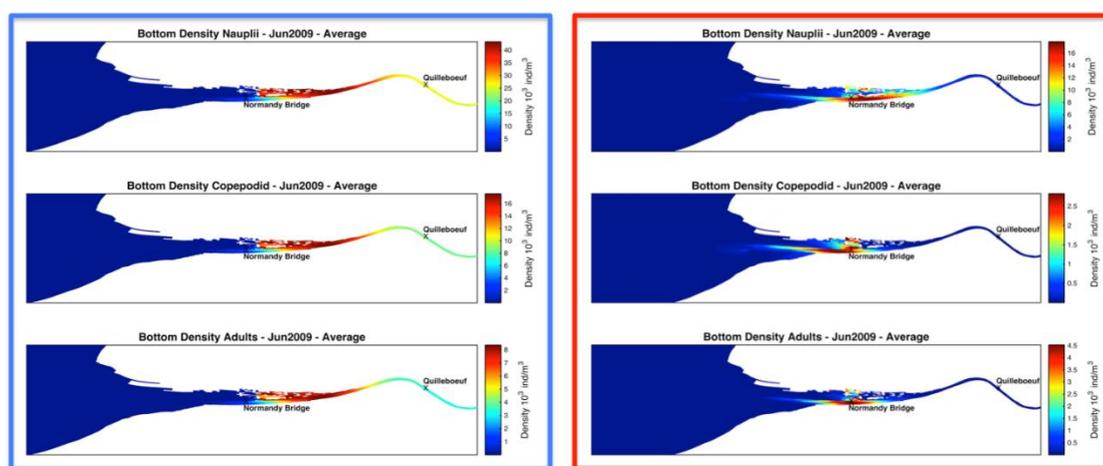


Figure 29 : Comparaison de la distribution de trois groupes de stades d'*Eurytemora affinis* (encadré bleu) et d'*Acartia sp.* (encadré rouge) dans la couche profonde de l'estuaire de la Seine en Juillet 2009.

Ces travaux confirment par exemple qu'une année humide (fort débit) est favorable au développement d'*E. affinis*. Au contraire, une année sèche (débit faible) était plus favorable aux espèces *Acartia sp.* Des fortes abondances d'*E. affinis* pourraient être propices au recrutement de juvéniles de poissons, alors que les conditions favorisant *Acartia sp.* favoriseraient l'apparition du plancton gélatineux avec des conséquences négatives sur le recrutement de poissons.

Au-delà de la température et de la salinité, **les travaux menés ont souligné l'importance de l'hydrodynamisme dans la définition des habitats des copépodes** ([ZOOGLOBAL](#)).

Le couplage du modèle de niche écologique avec les sorties du modèle hydrodynamique (tous deux développés dans le programme Seine-Aval) constitue un pas important vers l'étude rétrospective et prospective des habitats fonctionnels d'espèces clé de l'estuaire de Seine. Des projections à plus long terme (par exemple intégrant les changements climatiques) devront être analysées en prenant en compte les capacités d'adaptation des espèces. Il est très difficile à ce jour d'intégrer avec fiabilité les capacités adaptatives et/ou la plasticité des organismes aquatiques (notamment les copépodes) dans des scénarios prospectifs. Les résultats expérimentaux ([ZOOGLOBAL](#)) acquis pourront aider à progresser dans les analyses prospectives.

Le mesozooplancton s'alimente de préférence sur le microplancton, c'est-à-dire le phytoplancton ou le microzooplancton. Il peut également utiliser d'autres sources nutritives telles que les bactéries associées à la matière organique détritique. La plupart des organismes zooplanctoniques adaptent leur comportement alimentaire selon la composition des MES. Par conséquent, bien que la quantité et la composition des MES sont supposées affecter les performances des organismes mesozooplanctoniques, leur comportement nutritif selon les conditions du milieu n'est actuellement pas connu. En d'autres termes, comment la composition des MES influence-t-elle le comportement de prédation, particulièrement sur la sélection des proies ?

Un premier bilan (situation d'avril 2015) des flux de transfert trophique vers le compartiment zooplancton a été produit ([ZOOGLOBAL](#)) en couplant les données de production primaire ([PROUESSE](#)) et l'étude des modes d'alimentation du zooplancton (Figure 30). L'étude repose sur la modélisation du rôle trophique de l'espèce *E. affinis*, dominante le compartiment zooplanctonique dans ce type d'habitat.

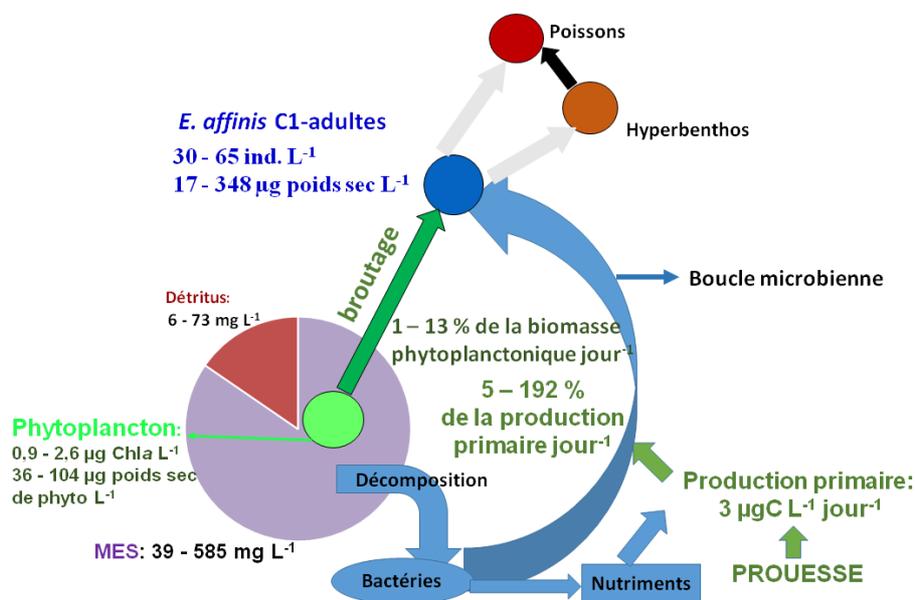


Figure 30 : Bilan indicatif du rôle trophique de la population d'*E. affinis* (C1-adultes) à Tancarville en avril 2015. Les concentrations en MES et en détritits, ainsi que la biomasse du zooplancton sont exprimées en poids sec, la biomasse du phytoplancton en µg de Chl a. L'importance de la biomasse phytoplanctonique est agrandie par rapport à sa contribution à la MES en termes de poids sec. Les compartiments/processus en relation directe ou indirecte avec le zooplancton qui n'ont pas été quantifiés sont représentés en bleu et gris.

L'étude identifie les concentrations en MES comme potentiellement limitantes pour l'alimentation en phytoplancton. **L'ingestion de phytoplancton par les adultes d'*E. affinis* s'avère être limitée par des concentrations en MES supérieures à 300 mg.L⁻¹.** Avec des concentrations en phytoplancton faibles (< 1 à 12 µg.Chl a.L⁻¹) et des concentrations en MES élevées (30 – 2200 mg.L⁻¹) caractéristiques des situations de printemps en aval de l'estuaire, **seule une faible part du phytoplancton serait consommée par *E.affinis*.**

3.3 Nourricerie de poissons marin

La capacité d'accueil des nourriceries estuariennes correspond à un potentiel d'accueil défini par plusieurs facteurs. Des facteurs qui sont considérés assez « stables » à courte échelle temporelle comme la morphologie. Des facteurs sont considérés comme variables comme la température, les apports terrigènes influant sur la quantité de nutriments et la salinité, la nourriture disponible ainsi que la présence de prédateurs. Cette capacité d'accueil est donc dynamique dans le temps. L'étude du fonctionnement de ces habitats vise à mieux comprendre les phénomènes de régulation du recrutement des espèces nourricerie-dépendantes, et donc du renouvellement des populations et de leur maintien.

3.3.1 Influence des caractéristiques physiques des habitats

La détermination des habitats favorables (*i.e.* suitability habitat) pour les espèces s'appuie sur l'analyse de la relation entre l'abondance des poissons ou des différents stades de développement et les caractéristiques de ces habitats. Les modèles d'habitat (Species Distribution Models, SDM) permettent de comprendre les mécanismes de distribution des espèces et d'identifier quantitativement les caractéristiques constituant un bon habitat utilisable par les poissons.

Dans le cadre des travaux réalisés ([MODHANOUR](#)) deux bases de données biologiques produites par Ifremer et la CSLN ont été standardisées et mobilisées pour tenter de prédire les distributions de poissons selon les principaux facteurs environnementaux (Figure 31). Les variables environnementales ponctuelles associées aux acquisitions biologiques exploitables sont la température (°C), la salinité, la turbidité (concentration de matières en suspension, mg.L⁻¹), la profondeur (m) et le faciès sédimentaire.



Figure 31 : Emprise géographique de l'échantillonnage de l'Ifremer et de la CSLN couvrant la période 1995-2004

Les approches statistiques utilisées ont permis l'étude de 12 espèces marines à 3 stades de vie différents. La répartition spatiale de la présence des différentes espèces s'explique essentiellement par la bathymétrie et les faciès. La variabilité spatiale des densités observées est quant à elle principalement expliquée par la température, les faciès sédimentaires et la salinité.

Les résultats varient en fonction des espèces et doivent être relativisés au regard de la qualité des prédictions statistiques. En effet, différentes hypothèses n'ont

pas pu être testées et la prédiction des présences ainsi que des densités des différentes espèces n'a pas pu être menée de manière suffisamment robuste. Ce constat est probablement à associer au manque d'acquisition de variables environnementales importantes pour alimenter les modèles statistiques à la base de ces études.

La recherche de variables explicatives complémentaires à différentes échelles d'intégration semble une priorité pour améliorer ces prédictions.

Cela concerne des variables à des échelles de temps différentes (pour intégrer un effet environnemental différé sur la biologie), comme par exemple la température minimale hivernale ou maximum estivale pouvant agir sur les densités de juvéniles.

Cela concerne également des variables intégrées à des échelles spatiales différentes. Par exemple à l'échelle régionale, des indices climatiques régionaux ou des variables intégrées pour estimer l'effet de modifications de régimes de vents qui influencent le comportement des poissons sur le littoral.

D'autre part, la mise en place d'une stratégie de modélisation mobilisant des jeux de données sur différents estuaires permettrait de renforcer la qualité des prédictions.

3.3.2 Influence de la disponibilité et de l'accessibilité des habitats physiques

Au regard du caractère très dynamique et de l'hétérogénéité spatiale des milieux estuariens, la recherche de variables associées à l'organisation spatiale des habitats et à l'évolution temporelle de leur accessibilité est apparue comme un axe de travail important. **En effet, dans ces milieux très dynamiques, les organismes procèdent à des changements d'habitats au cours de leur ontogénie en lien avec les exigences des différents stades de développement.**

Une modélisation spatialement explicite de la connectivité fonctionnelle des milieux aquatiques selon diverses conditions hydrodynamiques a été réalisée ([ANACONDHA](#)). Le cas des bars dans leur première année de vie (G0), qui s'alimentent préférentiellement dans les eaux peu profondes recouvrant des substrats meubles souvent riches en nourriture dans les estuaires, a servi de support à l'étude.

Les résultats indiquent que la disponibilité spatiale des habitats de nourricerie au cours du flot varie fortement (Figure 32). On observe un déplacement des habitats de nourricerie de l'embouchure vers les secteurs latéraux et les filandres. Ainsi, le secteur Nord de l'estuaire, grâce à la présence des vasières et filandres non seulement à l'embouchure mais aussi plus amont le long du chenal, offre une disponibilité d'habitats pendant l'ensemble du cycle de marée. En rive sud, le déficit de surface d'habitat à marée haute constitue un facteur limitant.

Concernant **les habitats de refuge, leur surface totale augmente au cours du jusant**, en particulier dans le secteur Sud de l'embouchure. Dans le secteur Nord, les surfaces varient moins et diffèrent peu selon le coefficient de marée.



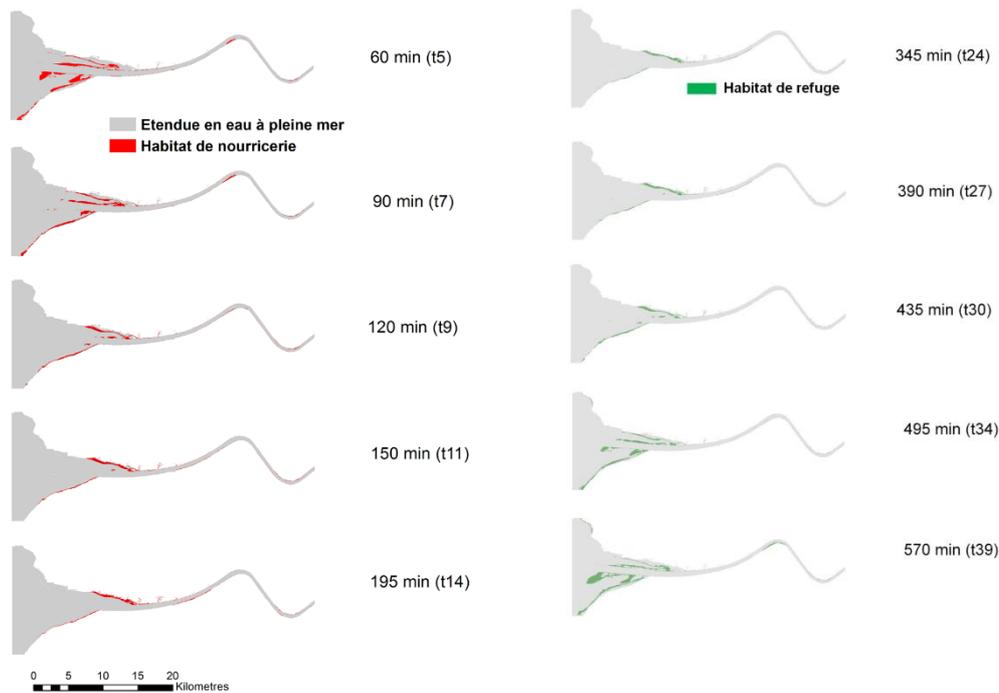


Figure 32 : Disponibilité spatiale des habitats de nurricerie au cours du flot et des habitats de refuge au cours du jusant (Exemple coefficient 85) pour le bar G0. Temps depuis le début du flot au Havre.

L'étude de l'accessibilité est très sensible aux hypothèses sur les capacités de nage des espèces. Les cartes des habitats de nurriceries connectés en flot et celles des habitats de repos en jusant permettent de calculer une surface totale connectée, le nombre de zones favorables et leur surface moyenne (exemple Figure 33).

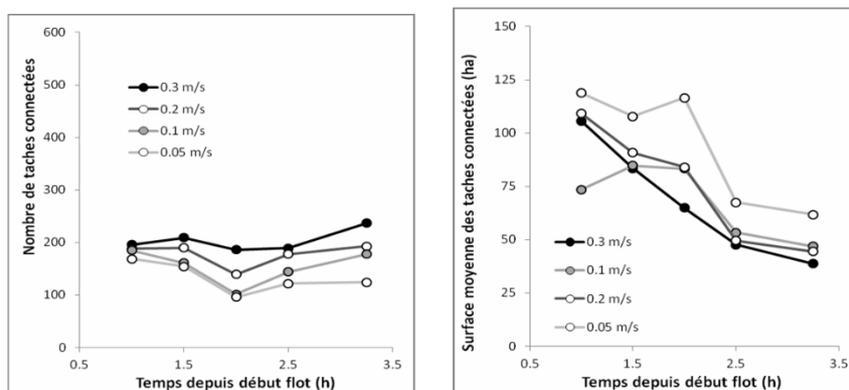


Figure 33 : Métriques de structure des habitats de nurriceries connectés au cours du flot selon les hypothèses de capacité de nage (exemple pour un coefficient de marée 52).

Les surfaces moyennes de zones favorables diminuent globalement au cours du flot. Les surfaces correspondant aux habitats de nurricerie couvrent de grandes zones peu nombreuses au début du flot, puis l'habitat devient plus morcelé avec des zones plus petites. De plus, la taille des habitats le long du chenal et dans les filandres est significativement plus restreinte en amont de l'estuaire qu'au niveau de l'embouchure. Ces métriques (Figure 33) donnent des informations complémentaires qui permettent d'évaluer la structure spatiale des habitats, notamment leur disponibilité et leur degré de fragmentation. Elles sont utiles pour tester les effets de modifications anthropiques ou de conditions hydrodynamiques différentes sur la structure spatiale des habitats.

3.3.3 Influence des facteurs trophiques

La question est ici de savoir si les ressources alimentaires sont limitantes et jouent un rôle de régulation des abondances de juvéniles de poissons et donc de la capacité d'accueil de la nurricerie. Plusieurs méthodes, à des échelles temporelles différentes, ont été mobilisées pour évaluer si le potentiel d'accueil trophique de la Seine peut être limitant et identifier les facteurs explicatifs.

Afin de mieux comprendre l'influence des différents types d'habitats (Figure 34) dans le fonctionnement trophique global du secteur d'étude, la modélisation des réseaux trophiques a été utilisée ([ANTROPOSEINE](#)). Cette approche permet de mieux comprendre les relations entre différents maillons trophiques en estimant la part de la production d'un niveau trophique consommée par les niveaux supérieurs. Les résultats issus de l'analyse des données disponibles pour 2 périodes (1996-2002 et 2005-2012) ont pu être comparés.

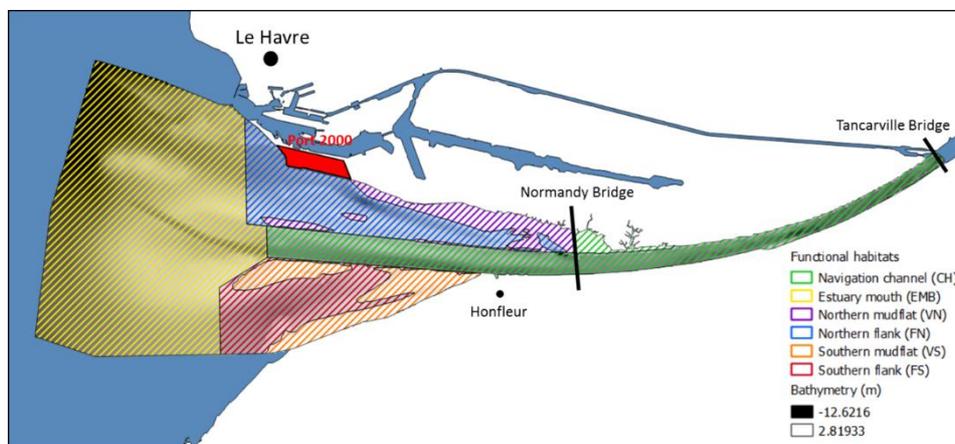


Figure 34 : Carte des habitats utilisés pour la modélisation

Les communautés benthiques occupent une place importante en termes de biomasses, de flux et d'impacts trophiques dans le système. Les prédateurs supérieurs, en particulier le merlan (*Merlangius merlangus*), jouent un rôle structurant important dans l'écosystème. **Concernant les différents habitats, les zones Nord et Sud ont une contribution importante à la nurricerie proportionnellement à leurs faibles surfaces.**

La comparaison des deux périodes met en évidence une augmentation des biomasses benthiques qui entraînent une hausse de la prédation au sein des différents habitats. La comparaison des deux périodes a également mis en évidence un changement de contribution des habitats de l'embouchure vers le chenal de navigation ainsi que des domaines subtidiaux vers les domaines intertidaux. **Les résultats obtenus suggèrent que la capacité d'accueil de l'estuaire pour les poissons n'est globalement pas limitante. Toutefois, ce résultat s'appuie sur les modèles construits avec des jeux de données sur plusieurs années et sera discuté ci-après.**

L'analyse basée sur les modèles de réseaux trophiques a été enrichie par une analyse de densité-dépendance à l'échelle annuelle pour les 3 espèces principales de poissons plats ([MODHANOUR](#)) (Figure 35). Les données de suivi de poissons (2000-2014 – CSLN) mensuelles d'abondance et de poids individuel moyen par classe d'âges ont été mobilisées. Cette méthode est utilisée pour statuer sur l'existence de phénomènes de

mortalité densité-dépendante afin de déterminer si la capacité d'accueil de l'estuaire de Seine pour cette classe d'âge est atteinte.

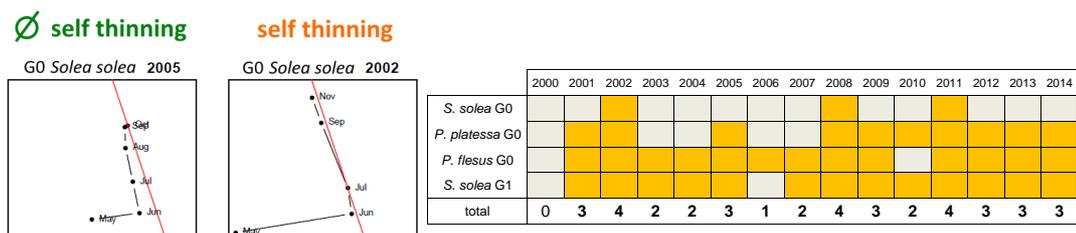


Figure 35 : A gauche : Deux exemples de trajectoires des classes d'âge 0 (G0) de la sole. La ligne rouge a une pente de $-4/3$ et permet de conclure si oui ou non la trajectoire est tangente à une pente de $-4/3$ qui traduit un phénomène de mortalité densité-dépendante, ou "self-thinning". (abscisse : abondance de sole; ordonnée : poids individuel moyen). A Droite : Résultats des analyses de trajectoire pour 4 groupes de poissons; en orange, la trajectoire atteint la tangente du self-thinning. Le total indique le nombre d'années pour lesquelles au moins une espèce atteint la capacité d'accueil.

Les premiers résultats semblent indiquer **que la capacité d'accueil de l'estuaire de Seine serait atteinte régulièrement**. La capacité d'accueil est ici abordée par des variations de densités engendrées par une mortalité d'individus. Toutefois, les diminutions de densité observées peuvent-être générées par des processus autres que celui de la mortalité. Des migrations en réponse à des changements dans les paramètres environnementaux ou trophiques peuvent en effet avoir lieu, ce qui aurait comme conséquence de diminuer les densités observées.

L'étude des dynamiques spatiales à l'échelle saisonnière de la population de chaque cohorte vient toutefois conforter l'hypothèse que la ressource trophique pourrait être limitante pour la fonction de nurricerie. (Figure 36 et Figure 37).

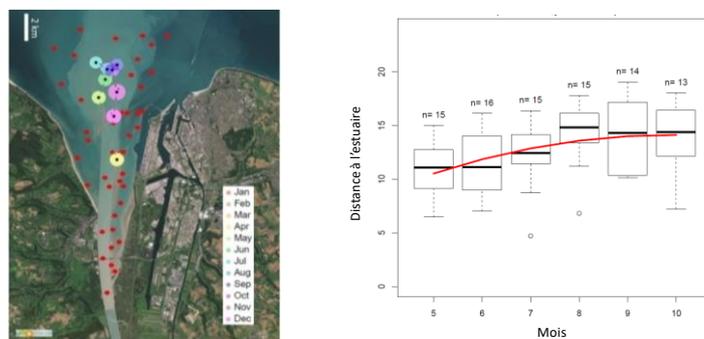


Figure 36 : Exemple de l'évolution du centre de gravité de la position de la plie G0 en 2002 à gauche. Projection de la distance à l'estuaire (en km) toutes années confondues en fonction du mois pour la plie G0 à droite.

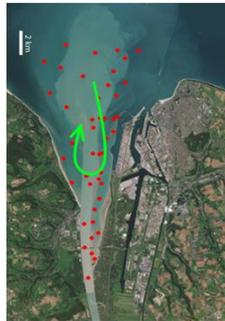
Sortant	Stable ou données insuffisantes	Migrant externe	Migrant interne
			
<p>Marin G0 <i>Buglossidium luteum</i> G0 <i>Chelidonichthys lucerna</i></p> <p>Estuarien G0 <i>Osmerus eperlanus</i> G0 <i>Platichthys flesus</i></p>	<p>Marin G0 <i>Callionymus lyra</i> G0 <i>Ciliata mustela</i> G0 <i>Clupeidae</i> sp. G1 <i>Limanda limanda</i> G1 <i>Merlangius merlangus</i> G1 <i>Pleuronectes platessa</i> G1 <i>Solea solea</i></p> <p>Estuarien G0 <i>Dicentrarchus labrax</i> G0 <i>Pomatoschistus</i> sp.</p>	<p>Marin G0 <i>Trisopterus luscus</i> G0 <i>Limanda limanda</i> G0 <i>Merlangius merlangus</i> G0 <i>Pleuronectes platessa</i> G0 <i>Solea solea</i> G0 <i>Sprattus sprattus</i> G1 <i>Callionymus lyra</i></p> <p>Estuarien G1 <i>Osmerus eperlanus</i> G1 <i>Platichthys flesus</i></p>	<p>Marin G2 <i>Solea solea</i></p>

Figure 37 : Typologie d'utilisation du gradient estuaire-baie par différentes espèces et cohortes d'espèces.

Quatre patrons de migration ont été observés (Figure 37). Ces migrations sembleraient liées à l'évolution saisonnière de la disponibilité alimentaire. La migration progressive vers le large est une tendance cohérente avec la littérature mais le retour vers une position plus en amont en fin d'été pour certaines espèces est un résultat original qui reste à interpréter.

La diminution de l'accessibilité des proies benthiques durant l'été pourrait être une des causes de ce patron de migration. Selon certains auteurs, l'activité physiologique du macrozoobenthos en zone estuarienne diminuerait après les blooms printaniers, réduisant ainsi son accessibilité et sa disponibilité pendant l'été.

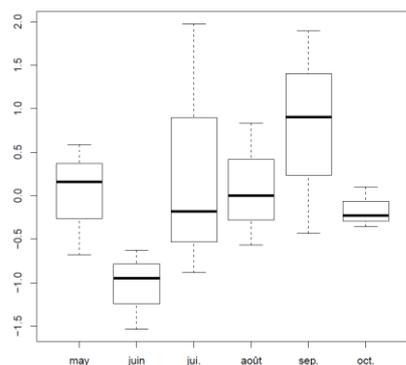


Figure 38 : Facteur de condition moyen (axe des Y) pour l'ensemble des poissons plats en fonction du mois

L'étude des variations mensuelles de la condition des poissons a permis de conforter cette hypothèse (Figure 38). Il semble se dessiner une tendance à des valeurs de condition plus faibles en juin et/ou juillet (au moins pour certaines années) pour les poissons plats et pour le bar. Ce point vient donc conforter l'hypothèse d'une diminution de la disponibilité alimentaire en été.

Ces résultats renvoient à la **nécessité de mieux appréhender la variabilité temporelle des processus trophiques**, en particulier à l'échelle saisonnière, afin de préciser les facteurs limitant le renouvellement des populations de poissons marins.

Influence de la variabilité spatiale et temporelle de la capacité trophique de l'estuaire de la Baie de Seine sur le maintien des populations de poissons marins.

Un travail de description et quantification de la capacité trophique de la Baie de Seine et de ses effets sur l'état physique (croissance et condition physique) des juvéniles de poissons a été engagée dans Seine-Aval 6 ([CAPES](#)). Quatre espèces nourriceries-dépendantes (sole, plie, merlan, bar) ont été retenues pour cette étude. Un focus particulier est fait sur deux périodes critiques dans la vie d'un juvénile de poissons : l'installation sur la nourricerie (mai) et la fin de la période de croissance juvénile, (septembre-octobre). Dans un premier temps, l'étude vise à quantifier spatio-temporellement l'ensemble des proies potentielles des poissons, incluant les organismes benthiques, suprabenthiques et la méiofaune. Dans un second temps, la relation entre la variabilité interannuelle de la capacité trophique de la baie, le débit de la Seine et les indices de recrutement estimés par le Conseil international pour l'exploration de la mer sera étudiée.

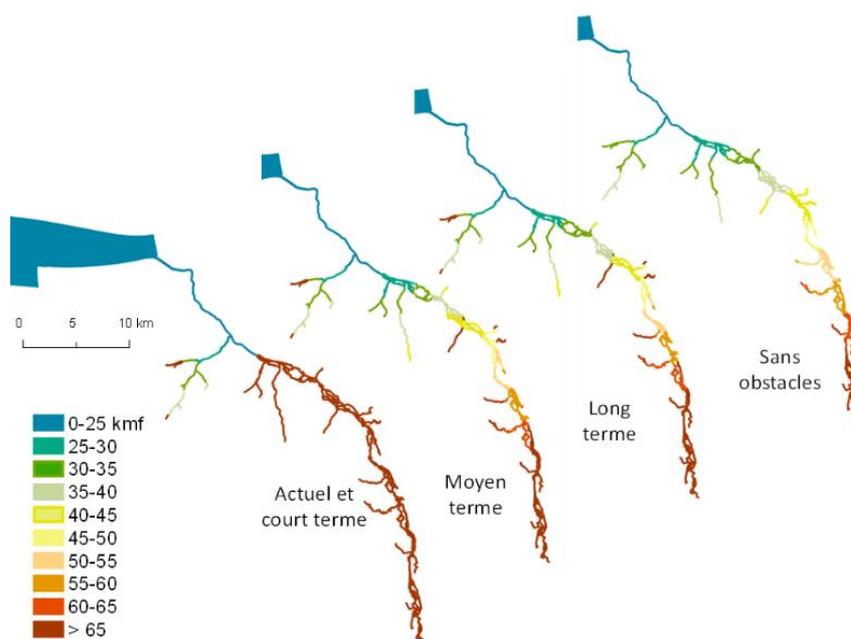
3.4 Migration de reproduction des poissons salmonidés

Pour être efficaces et permettre de retrouver des habitats fonctionnels, les mesures de restauration doivent considérer l'arrangement spatial et la connectivité des différents habitats complémentaires nécessaires à la réalisation du cycle de vie des espèces. La continuité longitudinale de la Seine est affectée par un premier barrage au niveau de Poses et de nombreux ouvrages limitent la connectivité dans les affluents. Afin d'appuyer les acteurs dans la restauration des continuités, l'analyse de la connectivité fonctionnelle de deux affluents estuariens (La Risle et le Cailly) a été réalisée ([ANACONDHA](#)). Les cas d'étude concernent la migration vers les frayères des adultes de truite de mer. Sur la Seine, l'espèce est présente en faible densité, elle s'engage principalement sur les premiers affluents estuariens où quelques zones de fraie et de grossissement sont accessibles. Malgré les efforts engagés pour améliorer le franchissement des grands barrages de gestion de la navigation fluviale, seulement quelques individus remontent plus haut sur le bassin de la Seine.

L'étude du cas de la truite de mer dans la Risle (Figure 39) a permis de tester une approche de modélisation prenant en compte les éléments caractérisant la migration estuarienne (ex. vitesses de courant dans la zone d'influence de la marée située à Pont-Audemer), et ceux liés à la Risle (types de faciès et aux obstacles au-delà de Pont-Audemer).

Le cas de la modélisation dans le Cailly a permis d'aborder la question de la connectivité de la confluence avec la Seine. Celle-ci étant busée sur une longue distance, elle est difficilement accessible pour des truites de mer en migration et dépendante du coefficient de marée.

Dans les deux cas, l'effet facilitant des vitesses de flot sur la migration en Seine vers l'amont est mis en évidence. Dans le cas du Cailly, les bénéfices sont plus importants lorsque le coefficient de marée est fort.



La modélisation de divers scénarios d'aménagement, soit de la confluence pour le Cailly, soit des obstacles pour la Risle, a apporté des éléments à vocation opérationnelle en termes de gains de mobilité. **Ces éléments sont essentiels pour alimenter les scénarios de restauration des continuités, fournissant un outil utile pour accompagner les gestionnaires dans l'aménagement des milieux aquatiques.** Elle permet d'identifier les obstacles dont l'amélioration de l'accessibilité s'avère nécessaire mais aussi de hiérarchiser les bras du cours principal qui pourraient être les voies de migrations les plus accessibles.

Proposition d'orientations pour la restauration des habitats essentiels au cycle de vie des poissons.

Le projet [PROPOSE](#) s'intéresse aux potentialités de restauration écologique de la fonctionnalité des habitats de l'estuaire de la Seine vis-à-vis du cycle de vie des poissons. L'objectif est de réaliser un diagnostic global de cette fonctionnalité et de proposer aux maîtres d'ouvrage des orientations en matière de restauration afin de favoriser la mise en cohérence des projets de restauration à l'échelle de l'estuaire.

Plusieurs catégories de zones fonctionnelles, ainsi que leurs fonctions associées, ont été intégrées dans le diagnostic :

- Nourriceries
 - pour les espèces marines
 - pour les espèces dulçaquicoles typiques des zones à brèmes
- Frayères
 - dans le lit mineur pour les espèces migratrices anadromes
 - dans la plaine
- Zone fonctionnelle de croissance sur le plan transversal (continuité latérale)

En 2017, le GIP a engagé l'étape de diagnostic en se basant sur l'état des connaissances actuelles. Ce dernier s'appuie sur une analyse scientifique des données d'observation de poissons et de caractérisation de leurs habitats.

Une approche de modélisation géo-spatiale a été retenue afin d'identifier les conditions environnementales qui favorisent l'occupation de ces habitats par les poissons. Une période conséquente de collecte et de structuration de données a été nécessaire. L'analyse de la qualité de ces données a permis de construire la méthodologie de réalisation du diagnostic.

Sur la base de ce diagnostic, un cadre fixant des orientations en termes de restauration des milieux sera proposé aux acteurs en 2019.



MULTI-CONTAMINATION DE L'EAU : MIEUX GERER LES RISQUES POUR L'ECOSYSTEME

SYNTHESE

Exutoire d'un grand bassin versant fortement anthropisé, l'estuaire de la Seine est soumis à une contamination multiple des eaux et des sédiments. De nombreux efforts ont permis de réduire significativement les sources polluantes (matière oxydable, phosphore, métaux...) et l'imprégnation chimique des matrices 'eau' et 'sédiment de surface'. Toutefois, l'héritage des pratiques anciennes peu soucieuses de l'environnement, avec la présence de sols pollués en bord de Seine et de stocks de contaminants dans certains sédiments profonds de la Seine, constituent un héritage à prendre en compte dans les stratégies actuelles d'aménagement et d'atteinte d'objectifs réglementaires (DCE). En parallèle, des problématiques de qualité de l'eau persistent ou deviennent préoccupantes, en lien avec de nouveaux usages et des techniques d'épuration parfois limitées. Les prises de conscience naissent également grâce aux meilleures capacités de mesures des concentrations dans le milieu et d'analyses des risques environnementaux associées.

Quelles soient d'origine historique ou d'intérêt émergent, les contaminations de l'estuaire constituent encore à l'heure actuelle un verrou pour la gestion écologique, malgré les améliorations observées depuis une vingtaine d'années.

Les travaux scientifiques menés dans Seine-Aval 5 ont permis de capitaliser les connaissances sur les stocks de sédiments potentiellement contaminés dans l'estuaire afin d'en dresser une cartographie. Remobilisables en cas d'aménagement, ces stocks pourraient constituer un flux supérieur aux apports du bassin versant pour les substances dont les sources actuelles ont été réduites.

Concernant les substances d'intérêt émergent (pesticides, substances pharmaceutiques, protections contre UV) le diagnostic réalisé confirme la prédominance des flux provenant du bassin versant amont par rapport aux rejets directs des agglomérations. Une analyse multicritère (toxicité, persistance dans le milieu) a permis de mettre en lumière certaines substances à surveiller en priorité, la présence de produits de dégradation et l'intérêt des conditions inhérentes au bouchon vaseux pour la dégradation de certaines substances.

Pour la première fois, une étude concernant l'imprégnation chimique des oiseaux marins colonisant l'embouchure de la Seine a été menée. Elle met en évidence une imprégnation dont l'importance est contrôlée par les stratégies alimentaires et les secteurs colonisés.

L'effort de veille sur la dangerosité des contaminants se poursuit dans Seine-Aval 6 par une étude intégrée de Paris à la mer sur le niveau de contamination en microplastiques et leurs effets potentiels sur quelques espèces estuariennes. La



Face à la présence de ce cocktail de contaminants, la recherche d'outils d'évaluation des effets sur la faune aquatique applicable dans un contexte de surveillance opérationnelle de l'estuaire devient un enjeu majeur. Les travaux engagés sur différents compartiments biologiques pour différents types d'effet ont montré de nombreux signaux de perturbation à tous les niveaux d'organisation et chez l'ensemble des organismes suivis. Une méthodologie permettant d'intégrer les valeurs des différents biomarqueurs dans un indice de niveau d'impact a également été proposée et testée sur une dizaine d'outils suffisamment avancés dans leur développement pour fournir une évaluation du niveau d'impact. Il en ressort ainsi des préconisations pour les acteurs de la surveillance qui seront valorisés dans le cadre de nouveaux projets à l'échelle de l'axe Seine et sur différents estuaires.

Caractériser l'impact de la contamination sur le développement et le maintien d'une population entière de poisson reste un défi majeur. Des travaux exploratoires sont engagés sur le la sole et le flet dans Seine-Aval 6.

1 Hiérarchisation des sources de contamination

Les contaminants chimiques auxquels sont exposées les espèces estuariennes proviennent du bassin versant amont *via* le réseau hydrographique, des affluents, des rejets directs (STEU et industrie) ou d'une remobilisation de stocks anciens.

Parmi les pollutions dites historiques, de nombreuses sources ont été largement réduites depuis une trentaine d'années (métaux, PCB, matières oxydables,...). Certaines persistent néanmoins dans les milieux et peuvent être stockées dans le lit majeur ou dans les sédiments du fleuve. Si les programmes de recherche précédents ont permis de caractériser certains de ces stocks, la connaissance de stocks potentiels sur l'ensemble du territoire estuarien est une nécessité pour aider à limiter les risques de remobilisation de ces contaminants.

Concernant les contaminants organiques dits d'intérêt émergent, les travaux de recherche précédents ont mis en évidence un apport majoritaire issu du bassin versant. De manière secondaire la STEU de Rouen (Petit-Quevilly – EMERAUDE) est une source importante représentative des pressions urbaines ponctuelles. Ces deux sources ont donc fait l'objet d'un suivi dédié pour enrichir notre diagnostic sur l'imprégnation et les apports au milieu en substances pharmaceutiques, pesticides/biocides et filtres UV.



1.1 Contaminants historiques.

Du fait de son passé industriel, la vallée de la Seine abrite de nombreux sites et sols pollués et friches d'activité. **Pour l'ensemble de la plaine alluviale estuarienne, cela concerne plus de 200 sites (COMHETES).** Ce recensement (Figure 40) témoigne d'une forte pression industrielle, notamment dans les boucles rouennaise et elbeuvienne, à Port-Jérôme et dans la région havraise. Il témoigne également de la diversité du tissu industriel, notamment historique, avec une forte proportion de sites liés à une activité de pétrochimie, chimie, métallurgie et traitement de surface, gestion des déchets ou production d'énergie. En cas d'absence d'un traitement spécifique, ces sites sont aujourd'hui une source potentielle d'apports polluants au réseau hydrographique.

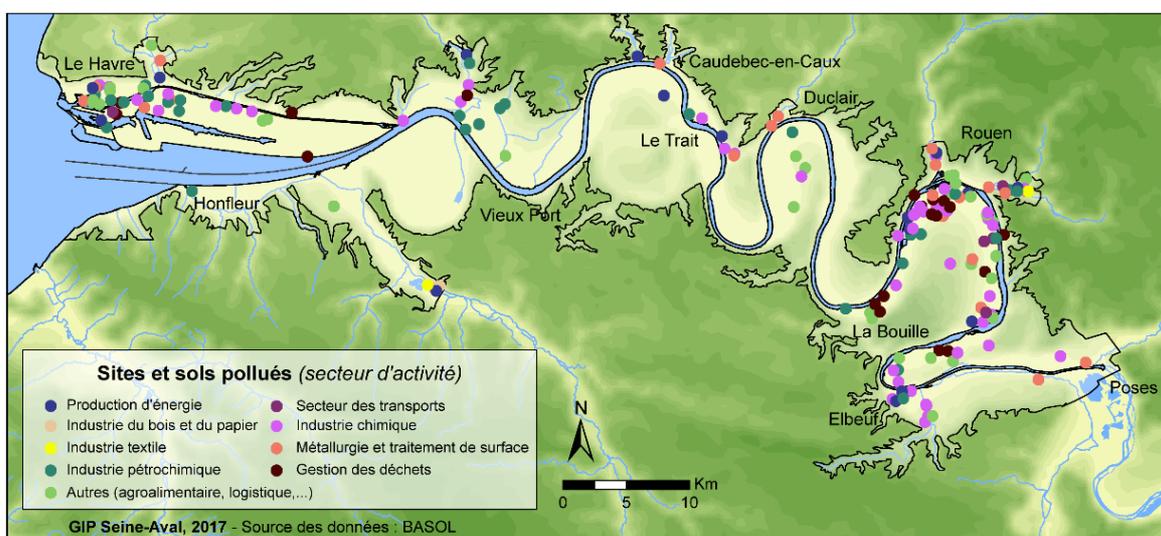


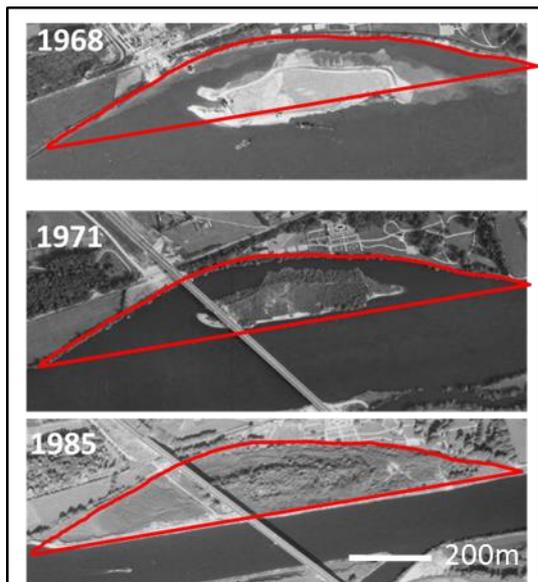
Figure 40 : Sites et sols pollués identifiés dans la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine.

Maximale dans les 1950 à 1980, du fait de nombreux rejets industriels dans le réseau hydrographique, la pollution chimique de l'estuaire de la Seine a laissé son empreinte dans les sédiments déposés dans le lit mineur de la Seine durant cette époque. **Une vingtaine de sites présentant potentiellement un stock de contaminants formés par les sédiments apportés par la Seine pendant cette période ont été identifiés (COMHETES).** Trois configurations intéressent particulièrement la problématique de ces stocks de contaminants dans le lit mineur :

- 1) Les sites d'accumulation de sédiments fins aujourd'hui en zone intertidale ou subtidale ;

Ex : les darses qui n'ont pas fait l'objet d'entretien par dragage depuis cette époque et des vasières intertidales ou subtidales pour lesquelles les sédiments déposés avant les années 1980 sont encore présents en profondeur.

- 2) Les sites d'accumulation de sédiments fins historiquement dans le lit mineur, mais aujourd'hui déconnectés de la Seine ;



Ex : un exemple caractéristique est celui de la zone située au pied du viaduc de l'A13 à Oissel, avec une zone de 16ha déconnectée du lit mineur de la Seine dans les années 1970 (Figure 41).

Figure 41 : Analyse diachronique du site au pied du viaduc d'Oissel (pk 227-228).

3) Les sites remblayés par des sédiments anciens prélevés dans le lit mineur de la Seine.

Ex : Le rattachement des îles Durant et Sainte-Catherine (pk 227) à la fin des années 1960 en est un exemple, engendrant une zone de 4ha remblayée avec des sédiments transitant en Seine à cette période (Figure 42)

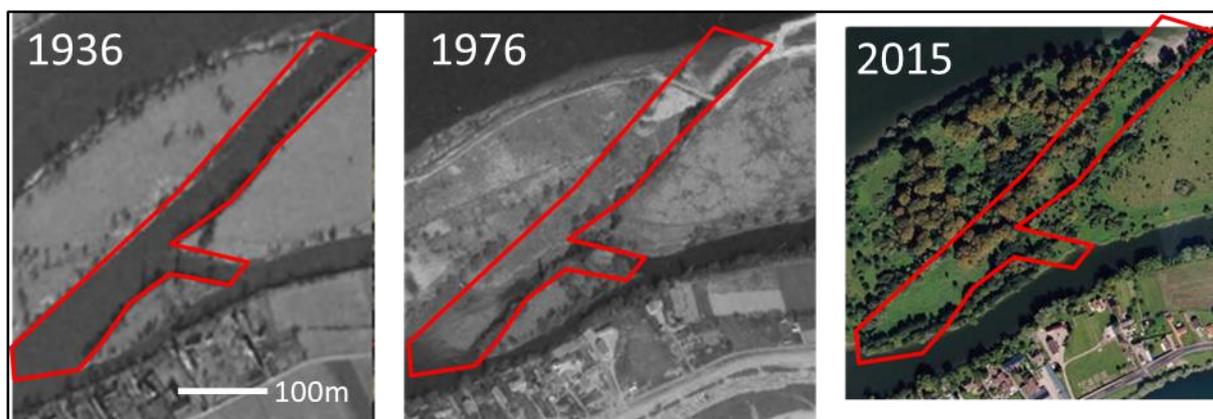


Figure 42 : Analyse diachronique des îles Durant et Saint-Catherine (pk 227).

Ainsi, dans un contexte de pression foncière engendrant une volonté de réutilisation des friches industrielles et de mise en œuvre de mesures de restauration écologique, l'inventaire et la caractérisation de ces stocks potentiels de contaminants revêtent un enjeu capital pour éviter ou maîtriser une éventuelle remobilisation dans le milieu. A titre d'illustration, le Tableau 4 compare l'estimation des stocks de contaminants dans la darse de docks avec les flux actuels apportés à l'estuaire au niveau du barrage de Poses.

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

Tableau 4 : Estimation des stocks de polluants dans la darse des Docks et comparaisons aux flux actuels apportés par la Seine.

1.2 Apports du bassin versant et des rejets directs

Afin d'enrichir le diagnostic des sources actuelles de contamination à l'estuaire, deux types de sources ont été étudiés : la STEU de Rouen et les apports du bassin versant via la Seine à Poses ([CRAPPSE](#)). Les contaminants polaires (plutôt présents sous forme dissoute) ont été particulièrement ciblés, avec la recherche d'environ 200 molécules de pesticides-biocides, de substances pharmaceutiques et de filtres UV, que ce soient des molécules mères mais aussi certains de leurs produits de dégradation (*i.e.* métabolites). Un grand nombre des molécules ciblées fait partie des composés d'intérêt décrits au niveau européen comme prioritaires, d'intérêt émergent ou encore pertinents à surveiller dans les eaux de surface.

Une grande diversité de molécules est apportée en Seine, majoritairement par le bassin versant (*i.e.* la Seine au barrage de Poses). **On constate que la Seine apporte à l'estuaire en moyenne 38 fois plus de composés pharmaceutiques, 100 fois plus de filtres UV et 300 fois plus de pesticides que la STEU de Rouen (Figure 43).**



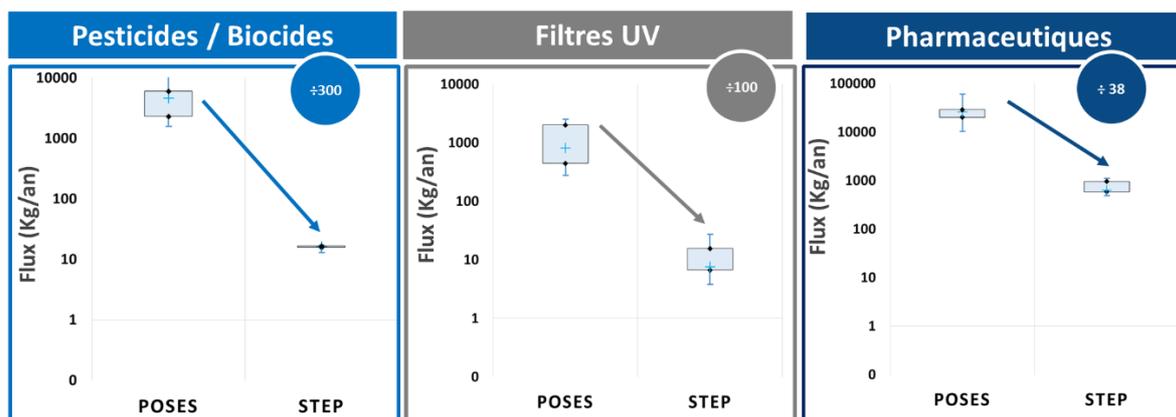


Figure 43 : Flux extrapolés annuels (en kg/an) de pesticides, filtres UV et composés pharmaceutiques entrants dans l'estuaire de Seine par le barrage de Poses et apportés par la sortie de la STEU de Rouen.

Des produits de transformation ont également été retrouvés pour les deux sources. Leur niveau de concentration est parfois bien supérieur à celui de la molécule mère, montrant leur transformation en sous-produits. Ceci souligne **l'importance de prendre en compte les produits de transformation dans l'évaluation du risque mais aussi le besoin d'identifier de nouveaux produits de transformation pour mettre en place leur suivi.**

- Concernant les substances pharmaceutiques, les données de quelques molécules « traceurs » ont été comparées aux résultats antérieurs obtenus en 2006 et en 2011 (GIP Seine-Aval, 2014). Globalement, dans la Seine à Poses les concentrations de ces molécules « traceurs » ont peu évolué. En revanche, dans l'effluent de la STEU de Rouen, certaines molécules ont des concentrations 10 fois supérieures aux campagnes précédentes. C'est notamment le cas de **l'ibuprofène** qui a présenté d'importantes variations de concentrations en fonction des campagnes allant de 13 à 1082 ng.L⁻¹.
- Concernant la famille des pesticides/biocides, que ce soit dans la Seine à Poses ou dans l'effluent de la STEU de Rouen, **le glyphosate et l'AMPA sont les composés majoritairement retrouvés.** Toutefois, les profils globaux de contamination des deux sources à l'échelle d'une année sont différents. En effet, les apports de la Seine à Poses illustrent bien l'apport diffus lié à l'activité agricole (présence majeure du métolachlore et ses métabolites) ; alors qu'au niveau de l'effluent de la STEU de Rouen, ce sont principalement des molécules connues comme traceurs de rejets urbains (diuron, imidaclopride...) qui sont retrouvées.
- Pour la famille des filtres UV, les concentrations les plus importantes ont été mises en évidence pendant les périodes estivales et en particulier pour **l'octocrylène.**

Au-delà de la recherche des molécules d'intérêt émergent dans les sources de contaminants à l'estuaire, la mesure de bioessais a permis d'évaluer la toxicité des apports de la Seine à Poses et des effluents de la STEU de Rouen. Diverses activités toxiques ont été mises en évidence (potentiel génotoxique et activités de type œstrogénique, glucocorticoïdes et HAP-like), avec un niveau d'activité moindre dans la Seine à Poses que dans l'effluent de la STEU.

2 Dynamique de la contamination chimique et microbienne et niveau d'exposition pour les espèces et les usages

Au-delà de leur concentration dans le milieu, la dynamique spatiale et temporelle des contaminants est importante à considérer. En effet, elle peut induire en erreur les diagnostics réalisés par des suivis ponctuels dans l'espace et dans le temps. Or cette dynamique est complexe en raison de la variabilité des comportements des contaminants, de la variabilité des apports dans le temps (ex : apports des affluents en période de bas débit de la Seine, apports de temps de pluie...) et dans l'espace (proximité des rejets des stations d'épuration, usage des bassins versants...). Ainsi, les travaux de recherche menés dans Seine-Aval 5 avaient pour objectifs de renforcer notre connaissance sur les dynamiques de quelques familles de contaminants pertinents pour l'estuaire de Seine, à des échelles spatiales et temporelles non abordées dans les travaux précédents. Selon l'exposition et les voies de transmissions, ces contaminants peuvent être bioaccumulés dans le réseau trophique estuarien.

Cette compréhension fine de la dynamique de la contamination doit pouvoir permettre une meilleure évaluation de la qualité du milieu et donner des pistes pour affiner les outils de diagnostic.

La dynamique a été étudiée pour diverses problématiques :

- les bactéries et parasites d'origine fécale du fait de leur présence à des niveaux parfois incompatibles avec les usages récréatifs de l'eau (baignade et pêche à pied) ;
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui forment actuellement l'une des familles de molécules les plus problématiques pour l'atteinte des objectifs réglementaires de qualité des eaux en Seine ;
- les substances pharmaceutiques et pesticides du fait de leur intérêt émergent et de la méconnaissance de leur comportement en estuaire ;
- les métaux et les contaminants organiques chez les oiseaux marins, du fait de l'absence de données sur l'imprégnation chimique de ce compartiment en estuaire de Seine et de leur position élevée dans la pyramide trophique qui en font de bons intégrateurs de la contamination du système dont ils dépendent.

2.1 Dynamique des microorganismes pathogènes

Les travaux Seine-Aval 5 ([DYNAPAT](#)) ont permis de progresser dans la compréhension des paramètres hydro-sédimentaires qui influencent la dynamique des populations de micro-organismes et leur diversité. Il ressort que sur le site d'étude (la Seine à Tancarville), il n'existe pas de différence de structure de la population bactérienne entre le fond et la surface, ni entre les différentes fractions de tailles de particules, en raison du brassage des matières en suspension gouverné par l'hydrodynamisme de l'estuaire. **Toutefois, la structure de la population *Escherichia coli* (indicateur de contamination fécale) présente dans l'eau de surface en présence du bouchon vaseux, à basse mer et en étiage, est différente de celle observée en période de crue, hors bouchon vaseux.** La période de crue se caractérise par un apport plus important de souches d'origine humaine (effluent de STEU), alors qu'en période d'étiage la structure des populations évoque un apport majoritairement d'origine animale (affluents intra-estuariens).



Les études *in situ* et les expérimentations en laboratoire ont permis de préciser le rôle des vasières dans la contamination de la colonne d'eau. Il ressort que l'érosion des vasières intertidales est responsable d'un apport en bactéries *Escherichia coli* et en *Vibrio* pathogènes dans la colonne d'eau. **Ainsi, les vasières de l'estuaire sont une zone dynamique où les *E. coli* et les bactéries pathogènes se déposent à pleine mer et au jusant, et sont remises en suspension dans la colonne d'eau au flot.** A l'échelle d'un site d'étude (vasière de Tancarville), le flux correspondant de bactéries pour un événement de flot a pu être évalué.

Ces nouvelles connaissances pourraient être intégrées dans une modélisation hydro-sédimentaire afin d'enrichir le diagnostic de la dynamique des contaminants microbiologiques à l'échelle de l'estuaire.

2.2 Dissémination de gènes de résistances aux antibiotiques

L'étude de la présence et du devenir de gènes de résistance dans le milieu aquatique a été menée ([DYNAPAT](#)). Ces travaux s'appuient sur le suivi d'indicateurs caractérisant d'une part, la présence d'une adaptation à la contamination environnementale globale (intégrons environnementaux) et d'autre part, l'exposition humaine et animale aux antibiotiques (intégrons cliniques).

Dans cette étude, l'analyse d'archives sédimentaires (carottes de sédiment prélevées dans la Darse des Dock en 2008 et 2010 – Rouen) montre une diversité importante des intégrons environnementaux au sein des génomes des communautés microbiennes autochtones. Cela suggère une réponse adaptative de ces communautés au cours du temps, en réponse à une exposition chronique aux différents épisodes de contamination chimique lors de ces 4 dernières décennies.

Dans ce secteur situé à proximité de la STEU de la métropole rouennaise, les intégrons cliniques sont détectables dans les horizons de surface, et semblent se maintenir sur une période de quelques mois à quelques années. Ces mêmes intégrons ne persistent pas dans l'environnement aquatique dans les autres situations étudiées : les vasières de l'embouchure de la Seine et les sédiments de la Risle.

Des études complémentaires, sous forme d'expérimentations en laboratoire, permettraient d'évaluer les temps de persistance dans les milieux aquatiques de gènes de résistance.

2.3 Dynamique spatiale et temporelle des HAP

Les données acquises ont permis ([MOSAIC](#)) de préciser la dynamique spatiale et temporelle de la contamination en HAP. Ils se retrouvent tout le long de l'estuaire de Seine dans les matrices eau dissoute, phase particulaire et sédiment mais avec des profils de contamination différents (Figure 44). **En zones fortement turbides, la charge en HAP portée par les matières en suspension peut atteindre 80 %.**

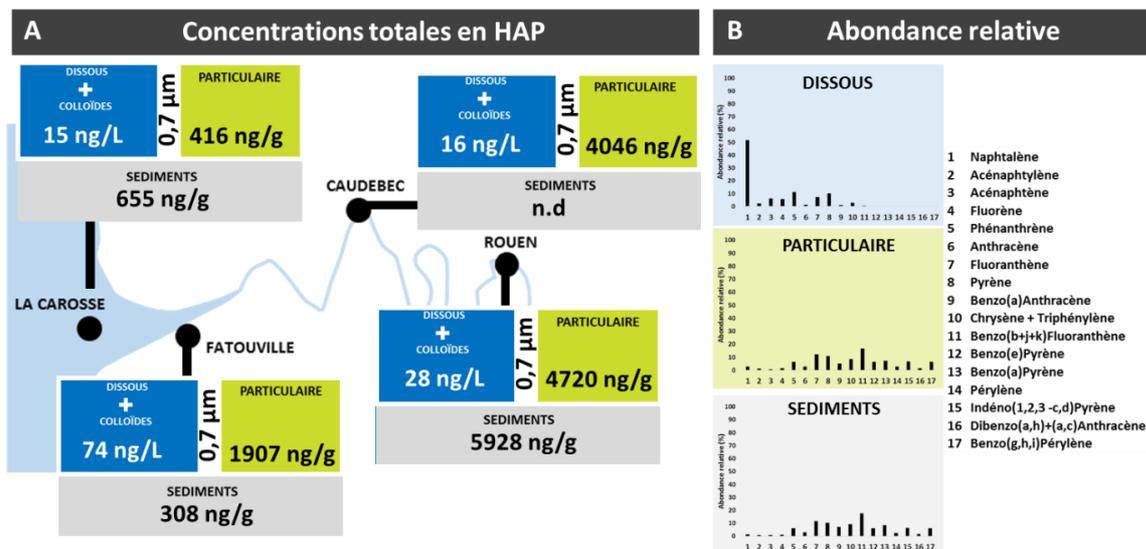


Figure 44: Synthèse des concentrations (A) et abondance relative (B) en HAP recherchés dans le sédiment et dans les phases dissoute et particulaire. (<LQ : inférieur à la limite de quantification, nd : non déterminé). Les résultats synthétisent les données obtenues durant la campagne d'avril 2016.

D'un point de vue temporel, la contamination de la phase particulaire en HAP est relativement constante. Par contre, de fortes variations de la phase dissoute des concentrations en HAP ont été observées, avec des facteurs pouvant atteindre 4 au cours d'un cycle de marée (Figure 45). Les variations les plus importantes ont été observées au niveau du site de Fatouville. **Ces résultats apportent une nouvelle connaissance utile à l'interprétation des données de surveillance, selon le moment du prélèvement par rapport à la phase de la marée.**

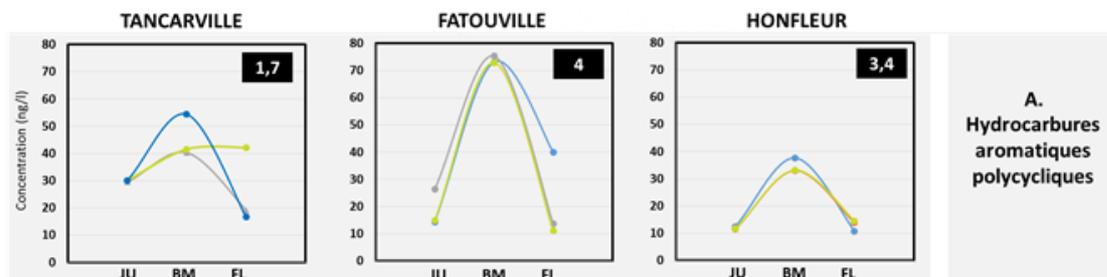


Figure 45: Dynamique de la contamination des HAP dissous au cours d'un cycle de marée au niveau des sites de Tancarville, Fatouville, Honfleur. Les résultats concernent uniquement la phase dissoute et sont exprimés en ng/l. Les échantillons ont été prélevés durant le courant de jusant (JU), l'étape de basse mer (BM) et le courant de flot (FL).

D'autre part, l'étude conjointe des dynamiques des HAP et de la matière organique ([MOSAIC](#)) a permis d'apporter des éléments d'interprétation de la répartition des contaminants dans les différentes matrices. La diminution de la concentration en HAP dans les phases particulaire et dissoute le long de l'estuaire serait à mettre en parallèle de l'augmentation de cette dernière dans le sédiment. **Les résultats montrent un transfert des HAP depuis les compartiments dissous et particulaire vers le sédiment, conduisant à une accumulation de ces composés dans le sédiment à l'embouchure de l'estuaire.** C'est ici un rôle de stockage qui est caractérisé. Ce phénomène d'accumulation des HAP dans les sédiments a précédemment été observé dans d'autres écosystèmes.

2.4 Dynamique spatiale et temporelle des substances pharmaceutiques et pesticides

La dynamique des contaminants émergents a été étudiée pour 22 molécules « traceurs » (substances pharmaceutiques et pesticides), sur trois sites (Oissel, La Bouille, Caudebec-en-Caux) pendant deux ans (2016-2017). Des échantillonneurs passifs (POCIS) ont été mobilisés, permettant d'intégrer sur plusieurs jours la contamination dans le milieu et pallier aux limites de la représentativité de l'échantillonnage ponctuel ([CRAPPSE](#)).

Alors que les concentrations entre Oissel et La Bouille ne sont pas significativement différentes, une diminution significative des concentrations à Caudebec a pu être constatée (Figure 46). Globalement, **une diminution des concentrations de l'amont vers l'aval a pu être mise en évidence.**

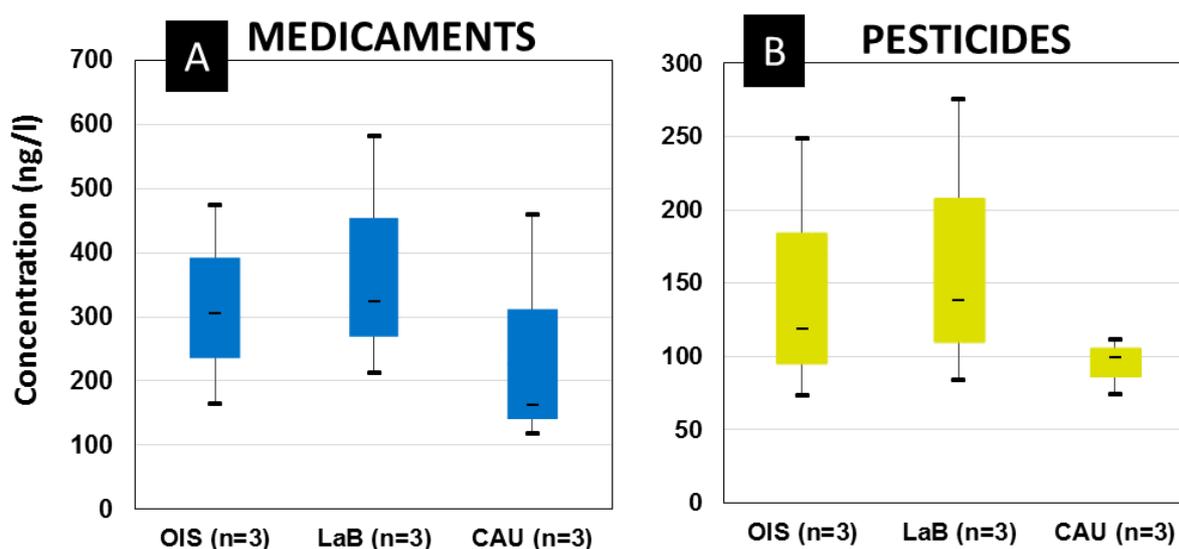


Figure 46 : Evolution de la concentration des composés pharmaceutiques (A) et des pesticides (B) dans l'estuaire de Seine. Les concentrations ont été évaluées à partir des POCIS sur les périodes de décembre 2016, février 2017, avril 2017. OIS : Oissel, LaB : La Bouille, CAU : Caudebec.

D'un point de vue temporel, l'étude des concentrations en composés pharmaceutiques ([MOSAIC](#)) a montré des différences en fonction de la saison. En période de bas débits, des concentrations moyennes deux fois plus importantes ont été constatées au niveau des points les plus amont. La prise en compte du secteur aval de l'estuaire dans ce volet d'étude a permis de mettre en évidence que les différences saisonnières y sont moins marquées. Ceci est le résultat des fortes variations qui s'opèrent dans les zones de forts marnages. C'est le cas, **au niveau d'Honfleur et de Fatouville** où les oscillations des concentrations sont les plus importantes. Ce phénomène est amplifié en période de bas débit (à Poses) et de fort coefficient de marée où **les concentrations peuvent varier jusqu'à 80 % en quelques heures.**



2.5 Modalités de contamination des oiseaux.

Des échantillons de plasma et de plumes ont été collectés sur des poussins de 3 espèces de goélands (*i.e. Larus marinus*, *L. argentatus* et *L. fuscus*), ainsi que chez le cormoran huppé (*i.e. Phalacrocorax aristotelis*) ([ECOTONES](#)). Plus de 70 contaminants différents ont été recherchés, incluant des éléments traces, des polluants organiques persistants, des alkylphénols ainsi que des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Le régime alimentaire joue un rôle majeur dans la bioaccumulation des contaminants chez les oiseaux marins. Dès lors, il convient de connaître leurs modes d'alimentation à la fois en termes de position trophique et d'habitat utilisé. L'utilisation d'indicateurs isotopiques a permis de relier l'imprégnation chimique des oiseaux à leur position trophique (isotopes stables de l'azote) et leur l'habitat d'alimentation (isotopes stables du carbone et du soufre).

Les résultats confirment que les oiseaux nichant dans et autour de l'estuaire sont fortement exposés aux polluants organiques persistants (Figure 47 et Figure 48), en lien avec la composition et l'origine de leur alimentation.

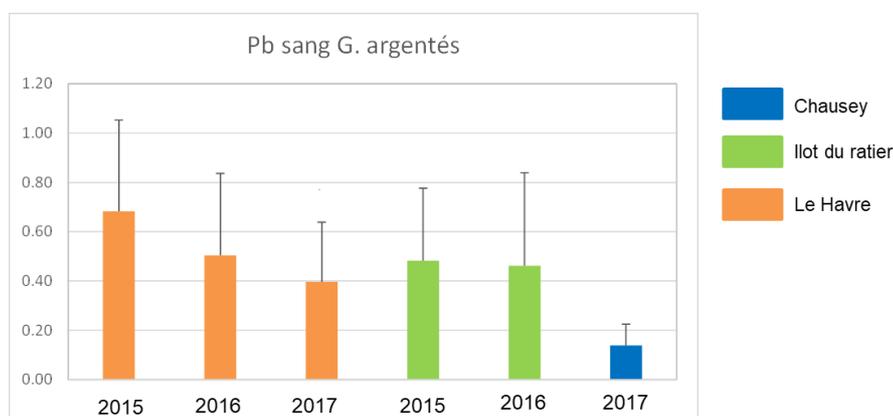


Figure 47 : Concentrations de plomb ($\mu\text{g g}^{-1}$ poids sec) chez le goéland argenté, sur les sites d'études sites, échantillonnés en 2015 ($n = 18$), 2016 ($n = 26$) et 2017 ($n = 28$)

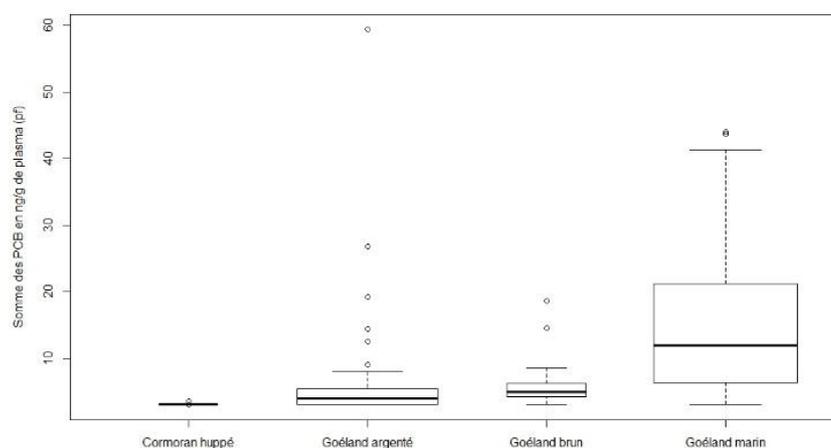


Figure 48 : Concentration totale de PCB, OCP, PBDE et PFAS en ng g^{-1} de poids frais de plasma, chez les espèces de cormoran huppé ($n=12$), goéland argenté ($n=69$), goéland brun ($n=23$) et goéland marin ($n=74$) tous sites et années de prélèvement confondus.

Les résultats montrent des variations liées :

- 1) à **l'habitat d'alimentation** : que cela soit au niveau de la Seine ou au niveau du site témoin, la zone d'alimentation influence l'exposition. Ainsi, les oiseaux s'alimentant le plus en mer (Goéland marin) sont plus exposés aux contaminants s'accumulant et se bioamplifiant dans les réseaux trophiques marins tels que le mercure.
- 2) au **régime alimentaire** : les plus fortes concentrations de mercure, de PCBs, de PBDE et d'OCPs sont retrouvées chez les espèces ayant le niveau trophique le plus élevé (goélands marins, cormorans huppés) aussi bien en Seine que sur le site témoin. Au contraire, les concentrations de plomb et de HAPs (et ses métabolites) sont supérieures lorsque la position trophique est moins élevée (goélands argentés) ;
- 3) à la **situation géographique de l'habitat** : les plus fortes concentrations de plomb et la composition en HAPs légers et ses métabolites dans le sang des goélands nichant dans la ville du Havre suggèrent une exposition des poussins par voie atmosphérique.

Ces résultats soulignent le rôle majeur de la voie trophique comme voie d'exposition et de la composition du régime alimentaire dans les apports des contaminants aux oiseaux marins étudiés.

L'imprégnation mesurée sur les oiseaux de la baie de Seine a également été comparée avec des mesures réalisées dans d'autres secteurs géographiques. Cette comparaison montre notamment que les concentrations de composés perfluorés sont particulièrement élevées en comparaison d'autres zones impactées comme l'Arctique (Figure 49), même si cela ne semble pas spécifiquement lié aux apports par la Seine puisque les concentrations les plus fortes se rencontrent chez le cormoran huppé de l'archipel de Chausey.

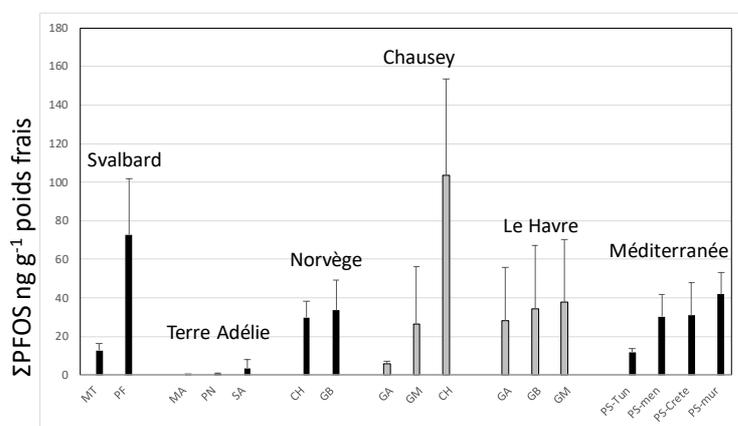


Figure 49 : Comparaison des concentrations de ΣPFOS (ng g⁻¹ de poids frais) dans le sang des poussins (en gris) et des adultes (en noir) pour différentes zones géographiques. MT : mouette tridactyle ; PF : pétrel fulmar ; MA : manchot Adélie ; PN : pétrel des neiges ; SA : skua antarctique ; CH : cormoran huppé ; GB : goéland brun ; GA : goéland argenté ; GM : goéland marin ; PS-Tun : Puffin de Scopoli de Tunisie, men : Menorca, mur : Murcie



Evaluer le transfert des contaminants dans la chaîne trophique des poissons d'intérêt commercial.

Les perturbations écologiques liées à la présence de contaminants dans l'environnement dépendent en partie du niveau de transfert des substances depuis la matrice d'exposition abiotique ou biotique (ingestion via les proies) vers l'organisme. Mieux comprendre ces mécanismes de transfert doit permettre de hiérarchiser les différentes sources d'exposition et *in fine* mieux caractériser le danger pour les espèces.

Initié en 2017, le projet [CHOPIN](#) (Seine-Aval 6, 2017-2020) s'intéresse au transfert trophique de deux grandes familles de contaminants. La première concerne des composés organohalogénés (COH) d'intérêt récemment inclus (ou en cours d'évaluation) dans la convention de Stockholm sur les Polluants Organiques Persistants, ainsi que des composés alternatifs aux composés organohalogénés réglementés, susceptibles d'intégrer à court ou moyen terme les listes de composés prioritaires. La seconde concerne les PCB, COH historiques identifiés comme problématiques dans le contexte de l'estuaire de la Seine. Les travaux permettront l'acquisition de connaissances nouvelles sur la dynamique environnementale et l'impact de ces composés grâce tout d'abord à une évaluation de l'état de contamination du sédiment et du réseau trophique puis par la modélisation du transfert de ces contaminants (1) dans le réseau trophique de la sole commune *Solea solea* (via les principales proies) et (2) au cours du cycle de vie depuis le stade G0 jusqu'au stade sub-adulte G2.

3 Molécules problématiques et évaluation des effets de la contamination

L'estuaire de la Seine est imprégné d'un cocktail de contaminants auquel les espèces sont exposées. Il apparaît important d'identifier les molécules problématiques afin de cerner de possibles leviers d'action pour améliorer la qualité des eaux. L'évaluation des effets de cette exposition sur la santé de l'écosystème permet quant à elle d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion dans le temps. Ainsi dans Seine-Aval 5, une méthodologie a été mise en œuvre pour hiérarchiser les molécules problématiques en s'appuyant à la fois sur l'analyse de leur présence à des niveaux pouvant entraîner des effets sur la vie aquatique et sur leur aptitude à persister dans le milieu estuarien. En parallèle, la recherche d'outils de suivi des effets de la contamination sur la faune aquatique et une première évaluation de ces effets ont été proposées aux opérateurs de la surveillance.

3.1 Substances pharmaceutiques et pesticides identifiés comme problématiques

Un diagnostic a été produit afin de mettre en lumière les molécules problématiques parmi les substances pharmaceutiques et les pesticides présents dans la matrice « eau » en estuaire de la Seine (projet [CRAPPSE](#)). Le caractère problématique se définit ici selon deux critères : **la toxicité et la persistance dans le milieu.**

Le risque est évalué en comparant les concentrations observées avec des concentrations prédites sans effet (PNEC = Predicted Non Effect Concentration) issues de la littérature.

Pour caractériser la persistance de ces molécules dans le milieu, des expérimentations ont été conduites afin d'évaluer comment les conditions estuariennes (gradients de matières en suspension et de salinité) influencent cette dégradation. Les expérimentations ont permis de décrire des cinétiques de dégradation selon différentes conditions. Il en ressort par exemple que **plus la concentration en matières en suspension est importante plus la concentration en molécules traceurs diminue, confirmant le rôle épurateur des conditions de forte turbidité estuarienne**. Il est important de considérer que le fait qu'une molécule se dégrade ne diminue pas forcément le risque associé, du fait de l'apparition de métabolites qui peuvent être à la fois persistants et toxiques.

En croisant ces deux critères, différentes catégories de molécules peuvent être ainsi identifiées (Figure 50) :

- **Des molécules non préoccupantes** comprenant des composés au niveau de contamination inférieur au PNEC et une persistance en phase dissoute faible [Groupe 4]. Cette catégorie rassemble l'ensemble des bêtabloquants et certains pesticides comme le glyphosate et l'azoxystrobine.
- **Des molécules préoccupantes en estuaire de Seine** au regard de leur persistance et leurs concentrations supérieures à leur PNEC [Groupe 1]. Cette catégorie regroupe des pesticides majoritairement retrouvés en Seine comme l'isoproturon et le diuron, mais aussi certains composés pharmaceutiques comme le diclofénac et l'ibuprofène. Parmi ces molécules, certaines sont d'ores-et-déjà prises en compte dans le cadre de la DCE (diuron et isoproturon) et d'autres ont été ajoutées à la liste de surveillance parallèle « Watch list », notamment le diclofénac.
- **Des molécules à surveiller** en raison :
 - De leur persistance en phase dissoute (indice supérieur à 50) [Groupe 3] : ces molécules pourraient devenir préoccupantes si leur niveau de concentration tend à augmenter (exemple : carbendazime, oxazépam, métolachlore),
 - De leur degré de dépassement de la PNEC [Groupe 2]. Cette catégorie regroupe deux molécules : le fipronil et la terbutryne.



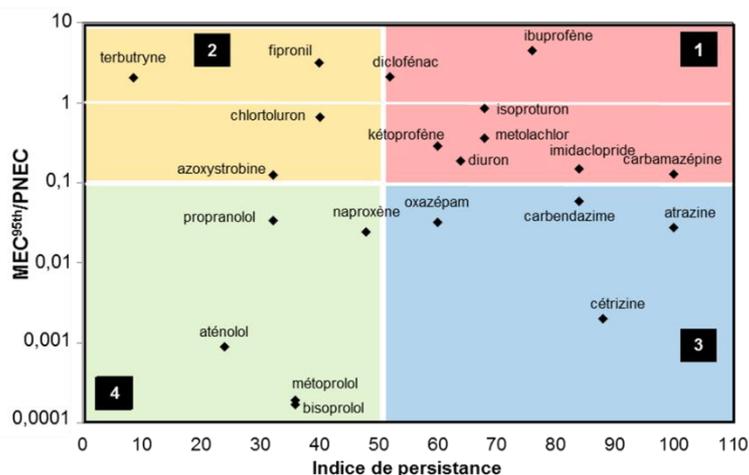


Figure 50 : Mise en évidence des composés problématiques en Seine en fonction de leur toxicité associée mais également de leur niveau de persistance en Seine.

MEC₉₅ = concentration au niveau du barrage de Poses (apport majoritaire) de mai 2014 à mars 2015 a été représenté par le 95^{ème} percentile des concentrations maximales - PNEC (Predicted Non Effect Concentration)

L'identification des molécules prioritaires doit tenir compte des cinétiques de dégradation dans le milieu afin de mieux prendre en compte le danger associé. L'étude des phénomènes de dégradation a montré qu'ils sont régis par les concentrations en matières en suspension, la salinité, et la présence de micro-organismes. En ce sens, la zone de turbidité maximale de l'estuaire de Seine possède un rôle épurateur en accélérant les cinétiques de dégradation.

Enjeux des micro-déchets plastiques sur l'estuaire de la Seine

En vieillissant et au contact des eaux marines, les déchets plastiques se fragmentent successivement en particules de plus en plus petites. Ainsi transformés, ils se mélangent au zooplancton et au phytoplancton et sont ingérés par la faune marine. Le projet [PLASTIC-Seine](#) (Seine-Aval 6, 2017-2020) a pour objectif d'étudier de manière intégrée l'occurrence et les niveaux d'imprégnation de l'estuaire de la Seine par les microplastiques (colonne d'eau, sédiment et réseau trophique). L'objectif est également d'évaluer leur devenir et leur impact sur différents niveaux du réseau trophique. Il permettra de dresser un premier état des lieux de la contamination en microplastiques de l'estuaire et leur impact potentiel sur différents maillons de la chaîne trophique.

Initiée en 2017, la première étape du projet a consisté à préciser les stratégies d'échantillonnage et développer les méthodes de comptages des microparticules présentes dans les espèces étudiées.

3.2 Les différents types d'effets observés sur la faune aquatique.

Afin de fournir une évaluation globale des effets de la contamination, un suivi de 3 ans a été mis en place, avec pour objectif de mesurer les effets à différents niveaux d'organisation biologique (*i.e.* sub-individuelles, individuelles et populationnelles) et sur un panel d'espèces représentatif des compartiments benthique et pélagique (Annélides, Mollusques, Crustacés, Poissons) de l'embouchure de l'estuaire de la Seine ([ECOTONES](#)). Plus d'une trentaine de réponses biologiques ont été mesurées pour un total de 82 couples réponse/espèce.

L'analyse brute des résultats (Tableau 5) montre que **26 %** ($n = 21$) des paramètres mesurés ont présenté des fluctuations **ininterprétables** du fait notamment de l'absence d'un référentiel auquel les comparer.

Parmi les **74 %** d'outils en mesure d'être **interprétés** ($n=61$) :

- 67 % ont transmis des signaux de perturbations au moins une fois au cours du projet
- 41 % ont traduit une perturbation à l'issue de chaque prélèvement.
- 33 % n'ont montré aucun signe de perturbation.



	<i>H. diversicolor</i>			<i>S. plana</i>			<i>E. affinis</i>			<i>P. longirostris</i>			<i>M. edulis</i>			<i>D. labrax</i>			<i>P. flesus</i>			<i>S. solea</i>			<i>O. perlanus</i>			
Potentils toxiques	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	
(anti)-oestrogénique (test (anti)-Yes)	Anti	Anti	N.D	Anti	Anti	N.D						N.D	Anti	Anti	N.D				Anti	Anti	Anti	Anti	Anti	Anti			N.D	N.D
(anti)-androgénique (test (anti)-Yas)		Anti	N.D			N.D						N.D	Anti	Anti	N.D				Anti	Anti	Anti	Anti	Anti	Anti			N.D	N.D
Test SOS		?	N.D			N.D						N.D			N.D						N.D			N.D			N.D	N.D
Biomarqueurs de référence																												
Activité SOD																												
Activité GST							Mai																					
Activité catalase																												
Activité EROD																												
Biomarqueurs de dommages																												
Péroxydation lipidique (TBARS)																												
Activité AChE		Mars																										
Biomarqueurs d'immunotoxicité																												
Viabilité													N.D			N.D												
Numération													N.D			N.D	N.D	N.D										
Formule hématocytaire													N.D			N.D												
Phagocytose													N.D			N.D												
Bouffée oxydative																N.D												
Biomarqueurs de génotoxicité																												
Intégrité de l'ADN (Comet)																												
Micronoyaux																												
Biomarqueurs de reproduction																												
Qualité des spermatozoïdes																												
Vitellogénine																												
Intersexe																												
Biomarqueurs de condition																												
Glycogène																												
Lipides		Mars	Mars																									
ARN/ADN																												
Stabilité lysosomale																												
Histopathologies hépatiques																												
Indice de condition																												
Traçage de l'histoire de vie																												
Comportement																												
Indice de maturité sexuelle																												
Descripteurs populationnels																												
Densité de biomasse																												
Structure de stade de développement																												
Sexe-ratio							Mars																					

Tableau 5 : Analyse brute des différents couples marqueurs/espèces analysés dans le cadre des 3 années de suivi du projet ECOTONES. Case verte : situation normale ; Case rouge : situation perturbée ; Case grise : non-interprétable ; N.D. : non-déterminé.

AChE : activité de l'acétylcholinestérase ; EROD : activité de l'éthoxyrésorufine-o-dééthylase ; GST : activité de la glutathion-S-transférase ; SOD : activité de la superoxyde dismutase; YAS : yeast androgen screen ; YES : yeast estrogen screen

Quelques effets marquants peuvent être cités :

- Observation **d'activités anti-oestrogéniques et anti-androgéniques (perturbation du système hormonal, en lien avec le caractère sexuel des organismes)**, respectivement, dans 5 et 4 des 7 espèces qui ont été étudiées à cet effet, malgré des différences de positionnement trophique, taxinomique et d'habitat
- Inhibitions significatives de l'activité de l'acétylcholinestérase, marqueur reconnu de **perturbation de la transmission nerveuse** chez le copépode *E. affinis*, le mollusque *S. plana* et l'annélide *H. diversicolor*
- Dommages très importants de l'ADN : des spermatozoïdes de crevettes, montrant une pression génotoxique et un risque pour les **performances de reproduction** chez ces organismes
- Niveaux de marqueurs de conditions montrant un **état perturbé** chez le copépode *E. affinis*, l'annélide *H. diversicolor* et la moule *M. edulis*
- **Perturbations des traits de vie** (*i.e.* comportement d'enfouissement et indice de maturité sexuelle) chez les 2 invertébrés endobenthiques *H. diversicolor* et *S. plana*

Globalement, **des signaux de perturbation ont été enregistrés à tous les niveaux d'organisation biologique**, ainsi que chez l'ensemble des organismes quelle que soit leur position taxinomique ou trophique. Pour autant, la corrélation des différentes réponses chez les espèces étudiées du niveau sub-individuel au niveau populationnel reste encore inaccessible.

Une sélection d'outils présentant un niveau d'opérationnalité compatible avec le rendu d'un diagnostic clair et précis de l'état de qualité écotoxicologique de l'estuaire a été réalisée pour proposer une évaluation intégrée de l'état de santé de la faune aquatique.

3.3 Intégration de l'analyse des effets et préconisations pour une biosurveillance pertinente

L'une des principales difficultés rencontrées en biosurveillance repose sur la comparaison et l'interprétation conjointes des données acquises sur différents compartiments/modèles biologiques afin de proposer un diagnostic global et intégré de la qualité du milieu. Cela se traduit généralement par une notation sur une échelle à 5 niveaux de gravité (de « très bon état » à « très mauvais état ») qui rend l'interprétation complètement abordable pour tout tiers non expert dans les techniques analytiques.

Une telle approche a été mise en œuvre sur la base des données acquises dans le cadre du projet ECOTONES. **Seulement 10 des métriques acquises ont présenté un niveau d'opérationnalité permettant (i) d'interpréter de façon claire le niveau de gravité des effets mesurés et (ii) intégrer leur réponse dans un indice global** (*i.e.* selon l'approche *Weight of evidence*). L'approche intégrée a confirmé les premières observations, à savoir un **niveau majeur d'effets biologiques durant les 3 années de suivi** (voir Tableau 6). L'année 2016 se distingue néanmoins par des intensités d'effets plus marquées en comparaison des deux autres années. Des observations similaires sont également rapportées pour d'autres réponses non-intégrées dans l'indice. Les cinétiques de plusieurs réponses laissent penser qu'un événement survenu en 2016, peut-être la crue exceptionnelle de cette année-là, aurait engendré un pic de toxicité chez les organismes de

l'estuaire. Ce pic de toxicité s'atténuerait en 2017 pour les réponses les plus labiles, alors que d'autres réponses à plus forte inertie restent à un niveau préoccupant en 2017. Bien que basé sur un nombre restreint de marqueurs, cette intégration parvient à retracer les tendances générales tant en termes d'intensité que de temporalité des réponses de l'ensemble des couples espèces/réponses analysés dans le cadre [d'ECOTONES](#). Ainsi, **la pertinence et la justesse du diagnostic ne semblent pas tant reposer sur un nombre maximisé d'espèces et de réponses biologiques étudiées que sur le choix judicieux et éclairé de celles-ci, sur la base de leur sensibilité, de leur représentativité écologique/socio-économique et de la robustesse de leur référentiel associé.** Cependant, l'analyse gagnerait en pertinence écologique si plus d'espèces représentatives d'autres taxons (e.g. poissons, mollusques bivalves) étaient associées dans la procédure pour renforcer le diagnostic et sa pertinence/valeur aux yeux des gestionnaires.

Famille	Biomarqueurs.	Espèce	Sens de l'effet considéré	Poids	Classe de risque des Effets E(i)		
					2015	2016	2017
Stress oxydant	TBARS	<i>H. diversicolor</i>	Induc.	0.75	Sévère	Sévère	Léger
Stress oxydant	GST	<i>H. diversicolor</i>	Induc.	0.50	Absent	Absent	Absent
Stress oxydant	CAT	<i>H. diversicolor</i>	Induc.	0.50	Absent	Absent	Absent
Neurotoxicité	AChE	<i>H. diversicolor</i>	Inhib.	0.75	Absent	Absent	Absent
Métabolisme énergétique	Lipides	<i>H. diversicolor</i>	Inhib.	1.20	Absent	Absent	Modéré
Métabolisme énergétique	Glycogène	<i>H. diversicolor</i>	Inhib.	1.20	Modéré	Majeur	Majeur
Effets populationnels	Densité	<i>H. diversicolor</i>	Inhib.	2.80	Modéré	Majeur	Majeur
Neurotoxicité	AChE	<i>E. affinis</i>	Inhib.	0.75	Sévère	Sévère	Sévère
Métabolisme énergétique	Rapport ARN/ADN	<i>E. affinis</i>	Inhib.	1.20	Absent	Absent	Absent
Reproduction	Domages ADN (spermatozoïdes)	<i>P. serratus</i>	Induc.	1.70	Sévère	Sévère	Sévère

Tableau 6 : Classes de risque associées aux valeurs d'effet E(i) calculées pour chaque biomarqueur lors de l'intégration globale annuelle.

Ce constat d'effets écotoxiques s'est révélé très cohérent avec les niveaux de qualité obtenus par l'intégration des données de bioaccumulation dans les bivalves en embouchure d'estuaire (i.e. Réseau d'Observation de la Contamination Chimique ; IFREMER). En revanche, les indices d'intégration des données de contamination des matrices eau et sédiment, mobilisées par ailleurs, n'ont révélé qu'un état de dégradation léger à modéré.

Globalement, ces résultats soulignent une nouvelle fois l'importance de considérer la réponse biologique dans le diagnostic de la qualité des masses d'eau estuariennes et l'importance de disposer de référentiels d'interprétation des effets robustes et formalisés sous forme de guide pour les opérateurs de la surveillance.

Vers l'étude de l'influence de la contamination sur le maintien d'une population de poisson.

Evaluer l'état de santé d'une population de poisson et son évolution, au regard de l'évolution de la qualité des habitats qu'elle utilise, reste un défi scientifique majeur. La diversité des facteurs influents (plus ou moins impactant selon les stades de vie) et leur grande variabilité spatiale et temporelle rendent la tâche complexe.

Afin d'engager ce type d'étude, deux approches complémentaires ont été engagées dans Seine-Aval 6.

La population de flets, espèce colonisant l'estuaire pour l'ensemble de son cycle de vie, est étudiée dans le projet [HQFISH](#). Une stratégie reposant sur un panel d'indicateurs écotoxicologiques et génétiques mesurés chez les juvéniles et les adultes reproducteurs est mise en œuvre. L'objectif est de proposer un indice d'état de santé de la population intégrant de manière pondérée les indicateurs mesurés en s'appuyant sur une méthodologie similaire à celle développée dans le projet SA5 [ECOTONES](#).

Les populations de soles sont étudiées dans le projet [CHOPIN](#). Afin de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie (habitats de la Manche pour la reproduction et habitats estuariens pour la nourricerie), c'est une démarche de modélisation de ce cycle qui est mise en œuvre. Après une phase d'étude bibliographique relative aux effets de la contamination sur les différentes fonctions biologiques de cette espèce et à différents stades de vie, la modélisation sera adaptée pour prendre en compte ces effets. Des scénarios contrastés de qualité des habitats estuariens seront testés avec le modèle afin de mieux appréhender l'influence de la contamination sur le maintien de la population de cette espèce d'intérêt commercial.

SYNTHESE

L'étude des trajectoires socio-écologiques renvoie à l'analyse des relations spécifiques qu'entretiennent les sociétés et la biosphère et leurs évolutions. Elle fournit un cadre pertinent pour appréhender les modifications possibles des forçages anthropiques du fonctionnement écologique de l'estuaire (entretien et aménagement de fleuve, gestion des débits, apport en matière organique, en nutriments et en contaminants...). Elle permet également d'envisager comment l'évolution de l'estuaire peut être bénéfique pour les services rendus à la société.

Le poids des facteurs sociétaux et économiques dans la structuration de l'espace et de l'aménagement du fleuve à travers l'expansion industrielle et portuaire depuis le milieu du XIX^{ème} siècle n'est plus à démontrer. L'aménagement progressif de l'espace estuarien a conduit à une fragmentation du paysage au sein duquel la nature et l'agencement des structures se sont organisés relativement localement en fonction des différents types d'enjeux. On s'aperçoit qu'il abrite une multitude de microcosmes qui favorisent des appropriations avec un segment limité du territoire. L'engagement des collectivités riveraines de l'estuaire qui souhaitent profiter de la présence du fleuve pour offrir des espaces de nature à ses habitants conduit depuis quelques années vers une dynamique de réappropriation, sur laquelle il est possible de s'appuyer pour porter une restauration écologique de l'estuaire. Ainsi, l'étude des relations entre l'évolution de la société et l'environnement estuarien permet de recontextualiser les éléments de diagnostic du fonctionnement écologique de l'estuaire. Elle fournit des explications sur les facteurs socio-économiques qui ont conduit aux évolutions passées et aide ainsi à formaliser des scénarios possibles pour l'avenir.

Dans le cadre de Seine-Aval 5, les acquis concernent essentiellement la caractérisation de l'évolution du système agro-alimentaire de la Normandie, le développement industriel de la basse vallée de la Seine et de leur influence sur la qualité de la qualité des eaux. L'analyse de la perception de ces évolutions par les personnes qui ont les ont vécues contribue à définir ce que revêt la notion d'identité estuarienne. Le récit de ces éléments de trajectoire permet de partager les dynamiques socioéconomiques qui ont conduit aux améliorations récentes de la qualité de l'eau, dynamique qui sont bien perçues par les différents acteurs.

Des scénarios contrastés de développement du territoire à l'échelle du bassin de la Seine ont été proposés et leurs conséquences sur la qualité physico-chimique de l'eau évaluées.

L'étude de l'association des publics aux projets de restauration sur l'estuaire a permis de formaliser un retour d'expérience et de fournir des préconisations pour l'association des publics à un programme de restauration à l'échelle de l'estuaire.

L'analyse de la trajectoire socio-écologique de l'estuaire se poursuit dans Seine-Aval 6 en axant l'analyse sur des territoires constituant la plaine alluviale de l'estuaire.

Les principaux acquis de Seine-Aval 5 sont repris ici sous forme d'un récit décrivant certains aspects de la trajectoire socio-écologique l'estuaire.



1 Régimes socio-écologiques du début du XX^{ème} siècle à nos jours

L'objectif était de retracer des éléments de **trajectoires socio-écologiques** des territoires en tentant d'identifier les relations entre l'évolution de l'écosystème estuarien et les choix économiques et techniques qui ont guidé le développement de la **Normandie**. L'importance des apports amont sur le fonctionnement de l'estuaire et les échanges socio-économiques à l'œuvre sur l'axe Seine conduisent naturellement à considérer **l'influence de l'Île de France**.

Un des axes majeurs de l'étude de ces trajectoires concerne la caractérisation de l'évolution du **système hydro-agro-alimentaire** (agriculture, élevage, industrie agroalimentaire, gestion des eaux usées, qualité des eaux souterraines et de surface). L'étude repose sur une analyse des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement du territoire afin de caractériser le **métabolisme territorial**. Les flux d'azote sont ici ciblés comme support. ([RESET](#)).

En parallèle, l'histoire du développement industriel de principaux secteurs d'activité implantés le long de l'estuaire, en lien avec les pressions exercées sur les milieux aquatiques, a été retracée ([COMHETES](#)). L'analyse repose sur un travail de compilation d'archives et des entretiens avec des gestionnaires qui ont connu l'évolution des pratiques et des pressions associées.

Afin de compléter les éléments de description de la trajectoire, un travail rétrospectif centré sur la manière dont les évolutions passées de l'estuaire ont été perçues par des personnes ayant vécu l'estuaire « au quotidien » (pêcheurs, agriculteurs, pilotes, chasseurs, etc.) a été mené ([PERCEES](#)).

1.1 L'estuaire de la première moitié du XX^{ème} siècle

La fin du XIX^{ème} siècle est marquée par un déclin de la population de la Normandie et c'est dans l'entre-deux-guerres qu'elle atteint son niveau le plus bas. La population se maintient essentiellement en Seine-Maritime grâce à la mise en place des premières grandes zones d'activité industrielle de l'estuaire de la Seine au début du XX^{ème} siècle. Les **activités de production d'énergie (centrales thermiques), de construction navale, de distillation d'hydrocarbures, de production chimique, d'artillerie sont les premières à s'implanter** autour des centres urbains rouennais et havrais. **La ville attire les ruraux**. Durant l'entre-deux-guerres, ces zones s'étendent avec le développement d'activités métallurgiques, de raffineries et de papeteries. C'est à cette période que le site industriel de Port-Jérôme se met en place.



Figure 51 : Centrale thermique de Dieppedalle.

La plupart des exploitations normandes sont caractérisées par une activité associant **agriculture et élevage**. Les bilans des transferts d'azote à travers le système agroalimentaire en 1929 pour les différents départements de la Normandie permet d'illustrer la situation (exemple de la Seine-Maritime - Figure 55). **Le système agro-alimentaire se caractérise par une faible utilisation d'engrais de synthèse** au profit de la fixation biologique par les légumineuses, et par une connexion assez étroite entre la culture et l'élevage. **Les prairies, sauf en Seine-Maritime, occupent une proportion majeure de la surface agricole.**

Les déversements d'égouts sont nombreux. Paris traite une partie de ses eaux usées grâce à des champs d'épandage, mais la charge polluante reste très importante. La banlieue procède au rejet direct, de même que les villes riveraines de la Seine et de ses affluents, en particulier Rouen. **Elles rejettent ainsi à la rivière ce que la Normandie et d'autres régions du bassin leur ont fourni sous forme d'aliments.** La mise en service de la première tranche de la station d'épuration d'Achères en 1940 ne modifie pas significativement la situation, la population, la consommation d'eau et le raccordement à l'égout augmentant plus vite que la capacité d'épuration.

Dans le secteur aval de l'estuaire, **la gestion de l'eau est au cœur du fonctionnement des vastes plaines alluviales dédiées à l'élevage bovin extensif.** La disposition en « lames de parquet » est adaptée au fonctionnement des marais : la topographie de chaque parcelle est variable et l'hydrométrie est réglée par le gradient d'éloignement de la Seine. Ainsi, chaque agriculteur avait sur son lot une petite bande de roselière, là où les terrains étaient les plus humides, mais également de vastes espaces fournissant des prairies de qualité. A la fin des années 1940, le port du Havre a fait creuser le « creux de 2000 », fossé traversant toutes les parcelles et qui permettait d'alimenter en eau les bêtes sans remonter l'ensemble de la parcelle. Cette gestion de l'eau autorisait le pâturage « au maximum » les terres au nord de l'actuelle route de l'estuaire : « ça respirait, c'était vivant pour le gibier et la nidification ». Cette organisation des acteurs sur les marais favorisait donc l'élevage de nombreux bœufs (pour la viande) qui étaient ensuite vendus sur les marchés du Havre et de Rouen.

La baignade en Seine était une activité de loisirs pratiquée dans les années 1950 et jusque dans les années 1970. Au Trait, « beaucoup de monde se baignait ». Une plage était aménagée en arrière des chantiers navals, un ponton traversait le marais pour aller jusqu'à la plage où se trouvait un bar restaurant, un grand filet était tendu dans l'eau pour délimiter la zone de baignade, en dehors du chenal.

La pêche était une activité largement pratiquée dans l'estuaire de la Seine, particulièrement de Poses jusqu'à Caudebec-en-Caux (limite de salure des eaux). Dans les années 1960, **l'association de pêche de Rouen comptait entre 7 et 8 000 adhérents** ce qui témoigne de l'engouement pour cette pratique.

Par les ressources qu'il abritait, souvent de manière saisonnière, **le marais était un lieu attractif pour des activités mêlant cueillette, subsistance et détente.** Mais c'était aussi « l'endroit où on faisait tout ce qu'on ne faisait pas sur le plateau » : on s'en servait de « poubelle », de « décharge », on y « apprenait à conduire », voire on y procédait à des « règlements de comptes ». « Au marais, on s'y permet tout. Le plateau est propre, beau, civilisé tandis que le marais est une zone de non-droit, la nature à l'état sauvage ».

Un régime hybride s'est mis en place à cette période, associant circularité (polyculture-élevage, autonomie alimentaire) et linéarité (exportation vers Paris, transit par les ports, abandon du recyclage des excreta urbains). La qualité de l'eau générée par ce régime socio-écologique restait parfaitement compatible avec les usages les plus exigeants (ex baignade), comme le montrent les témoignages.

1.2 Nouveau régime avec les trente glorieuses

À partir des années 1950, plusieurs facteurs vont provoquer une transition majeure, conduisant à l'émergence d'un nouveau régime qui atteindra son point culminant dans les années 1980.

Après la guerre, la population normande reprend son essor, et dépasse son niveau de 1851 en 1968 (2 758 000 habitants). Cette population est de plus en plus urbaine et de plus en plus étalée (Figure 52).

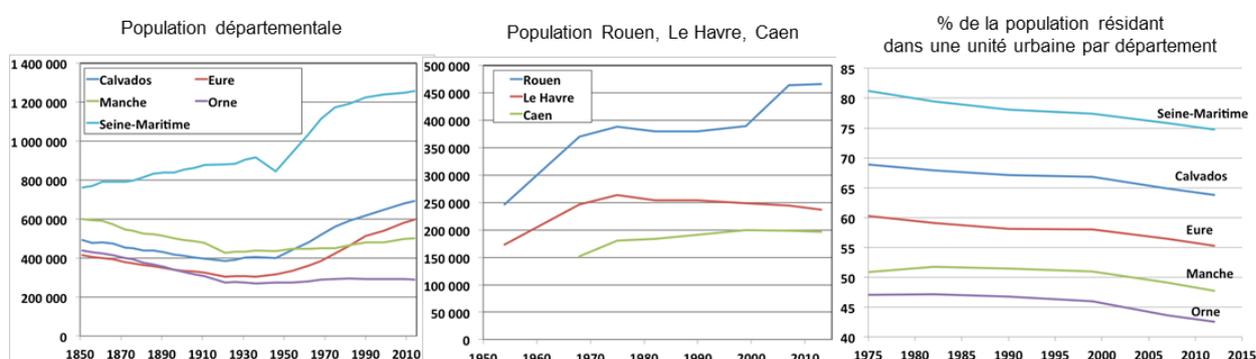


Figure 52 : Evolution de la population dans les cinq départements de Normandie de 1859 à 2014 (gauche). Evolution de 1954 à 2013 de la population des unités urbaines de Rouen, Le Havre et Caen (au centre). Part en % de la population départementale résidant dans une unité urbaine, Normandie, 1975-2012 (à droite).

Le développement industriel s'est renforcé après la seconde guerre mondiale avec l'arrivée de l'industrie pétrochimique et automobile. Dans le même temps, les complexes céréaliers et logistiques prenaient de l'ampleur au sein des ports de Rouen et du Havre. **L'industrie du bois et du papier** qui poursuivait sa croissance (jusque dans les années 1970) devenait une pression majeure à cette période (Figure 53).

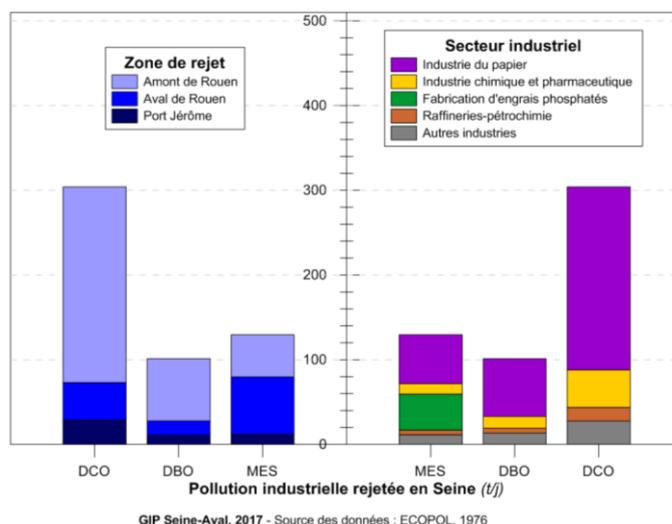


Figure 53 : Rejets industriels pour les variables DCO, DBO et MES dans l'estuaire de la Seine en 1975.
A gauche : répartition des rejets par secteur géographique. A droite : répartition par type d'industrie

L'activité de **production des engrais chimiques** s'est renforcée et diversifiée au cours du XX^{ème} siècle, accompagnant l'intensification de l'agriculture. Les usines installées en bord de Seine étaient alors à l'origine d'une pression importante sous forme de résidus de production (phosphogypses) qui étaient directement rejetés en Seine. En 1970, l'importance des rejets influait la qualité de l'eau de telle manière qu'elle ne permettait plus le pompage pour une utilisation industrielle.

Sous l'effet de la loi d'orientation agricole de 1960, de la première version, en 1962, de la politique agricole commune (PAC), mais aussi de la transformation du monde agricole, **l'agriculture est entrée dans une phase d'industrialisation massive**. Sous l'influence de la PAC, **les surfaces toujours en herbe, qui avaient connu un pic en 1967-68, entraient dans une phase de déclin durable**, de même que les vergers. Les cultures de subsistance et destinées aux pôles urbains normands (maraîchage et polyculture) s'amenuisaient. L'utilisation des **engrais industriels multipliée par un facteur dix à plus de vingt**, aux détriments de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses, est révélatrice du développement de l'industrialisation. Les exportations (végétales et animales) n'ont pas augmenté dans ces proportions, ce qui s'est inévitablement traduit par une augmentation des surplus azotés et par conséquent des **pertes vers l'environnement** (exemple de la Seine-Maritime Figure 55).

Parallèlement, une **internationalisation des ports Haut-normands** s'est opérée ; Rouen est alors devenu le port régional préférentiel pour le commerce alimentaire.

Le fonctionnement agricole du secteur aval de l'estuaire a également été largement remis en question dès les années 1960, avec l'essor de l'industrialisation. Les usines ont été implantées sur d'anciens marais qui ont vu leur vocation agricole remise en question pour plusieurs raisons : des terres se sont artificialisées pour installer les usines et leurs voies de desserte et sont donc devenues impropres à la pâture ou à la fauche.

L'utilisation des terres encore en herbe est également comprise à cause des pollutions diverses (air, eau, etc.). A cette époque, « les paysans, il fallait qu'ils se taisent et qu'ils dégagent ». Ainsi, en parallèle d'une restructuration de l'offre alimentaire (plus de surgelés, de plats préparés...) **les transformations du territoire ont contribué à éloigner producteurs et consommateurs** : les normands ne vivaient plus de l'agriculture locale et ils ne s'en nourrissaient plus.

L'estuaire de la Seine était **perçu comme sauvage jusque dans les années 1950**. Ensuite l'aménagement a été perçu comme catastrophique pour la ressource. «Les bords se sont remplis d'alluvions et de sable alors que c'était une frayère dans laquelle il y avait beaucoup de poissons : on y relevait les chaluts avec 60-70 kilos de poissons de toutes sortes, dont plein de juvéniles, au nord comme au sud de l'estuaire. Avec le comblement, la ressource s'est raréfiée. Aujourd'hui, il n'y a plus grand chose ». **La suppression des îles a été vécue comme « un grand malheur »** car les îles étaient des lieux où se fixaient et se reproduisaient les poissons, à l'abri des marées. La baisse du nombre d'îles a entraîné une diminution de l'abondance des poissons. Ces îles étaient aussi identifiées comme les endroits « où il y a le plus de végétation (nénuphars, roseaux) » car, ailleurs, elle était souvent « arrachée par la navigation ».

La dégradation de la qualité de l'eau est rapportée dans les récits dès les années 1960 (en particulier sur l'amont de l'estuaire). **La pollution est qualifiée d' « énorme », de « fantastique »**. **Il y avait régulièrement de la « mousse sur l'eau à cause des détergents », du « gasoil flottant à la surface » ce qui donnait à l'eau « une odeur particulière »**. Plus généralement, « les bords de Seine étaient putrides », la végétation rare et on constatait de « fortes mortalités de poissons ». Quand les poissons ne disparaissaient pas, ils étaient devenus de « mauvaise qualité », « ils sentaient le gasoil », ils étaient « difficilement consommables ». Les grosses mortalités de poissons ont ainsi marqué les esprits : c'était un « spectacle de désolation, des tonnes de poissons qui flottaient à la surface juste en amont de Rouen, des tapis de poissons morts, assez impressionnants, surtout qu'ils restaient là plusieurs jours avant d'être emportés vraiment par la marée ».

Le lien avec les pollutions industrielles était alors évident. Cette « mauvaise réputation » de la Seine à la fin des années 1970 n'a pas eu des conséquences uniquement pour les pêcheurs mais aussi pour les activités de loisirs et de promenade à proximité. **C'est tout l'attrait du fleuve qui a été remis en question**.

Ainsi, le second régime socio-écologique, qui est monté en puissance à partir des années 1950, est marqué par l'industrialisation, la spécialisation et l'internationalisation de l'agriculture normande, la sectorisation des activités, l'essor de la grande distribution qui accroît la distance entre consommateurs et producteurs et favorise la déterritorialisation de l'alimentation. À l'impact des villes sur la qualité de l'eau, s'est ajouté celui de l'agriculture et de l'industrie. La pression industrielle de la plaine alluviale est devenue prépondérante par rapport aux pollutions provenant du bassin versant (Tableau 7).

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

Tableau 7 : Pressions sur la qualité des eaux de l'estuaire de la Seine des principaux secteurs industriels entre 1950 et 1980.

1.3 Le début d'une transition écologique

A partir des années 1970, une prise de conscience des impacts environnementaux des activités humaines et la volonté d'un développement économique soucieux de préserver les ressources et la qualité des milieux aquatiques ont débouché sur la mise en place de mesures pour limiter les pollutions (réduction des rejets les plus polluants, construction d'unités de traitement des effluents, gestion des déchets).

Toutefois, au début des années 1990, **des tendances structurelles ont confirmé le maintien du régime engagé au début des années 1960** : baisse du nombre d'exploitants agricoles, régression des surfaces toujours en herbes, légère régression de la surface agricole utile face à la pression foncière liée à l'urbanisation, renforcement du secteur agro-industriel en Haute-Normandie. Si la désindustrialisation et la concurrence internationale ont impacté l'activité portuaire, **le développement du secteur du transport et en particulier le Port de Rouen a soutenu la mondialisation du système alimentaire** (Figure 54).

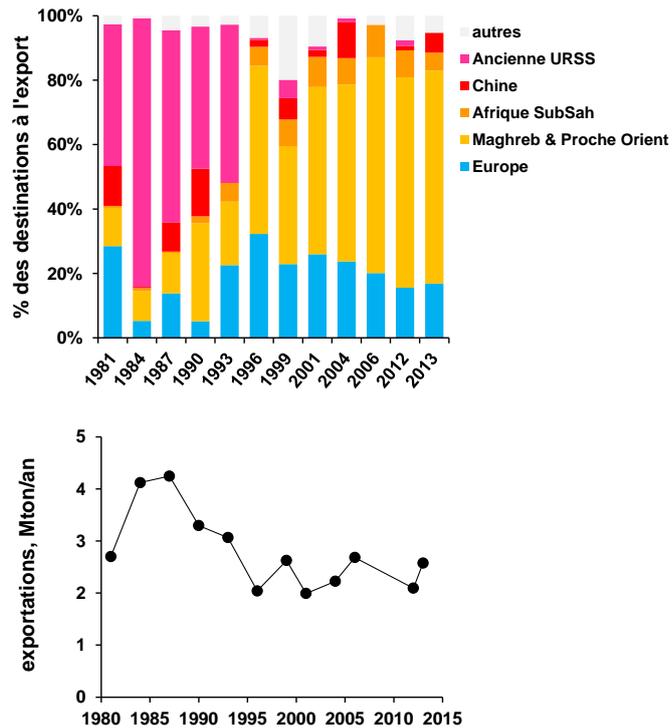


Figure 54 : Exportations de céréales (Blé + Orge) depuis la Seine Maritime (graphique inférieur) et part relative des différentes régions du monde dans ces exportations (graphique supérieur) (données SiTraM).

Les années 1990 ont marqué le **renforcement de la législation à caractère environnemental** (Directive Nitrates et Eaux résiduaires urbaines), qui est venu compléter plusieurs modifications de la Politique Agricole Commune.

Pourtant, **dans les années 2000 l'utilisation des engrais minéraux est restée relativement stable par rapport à la période précédente**. L'exportation des produits agricoles a encore augmenté, indiquant de meilleures performances agronomiques. La régression des surfaces de prairies s'est poursuivie. Les bilans sous forme d'azote ont pu être quantifiés par département pour l'année 2006 et comparés aux périodes précédentes (Figure 55).

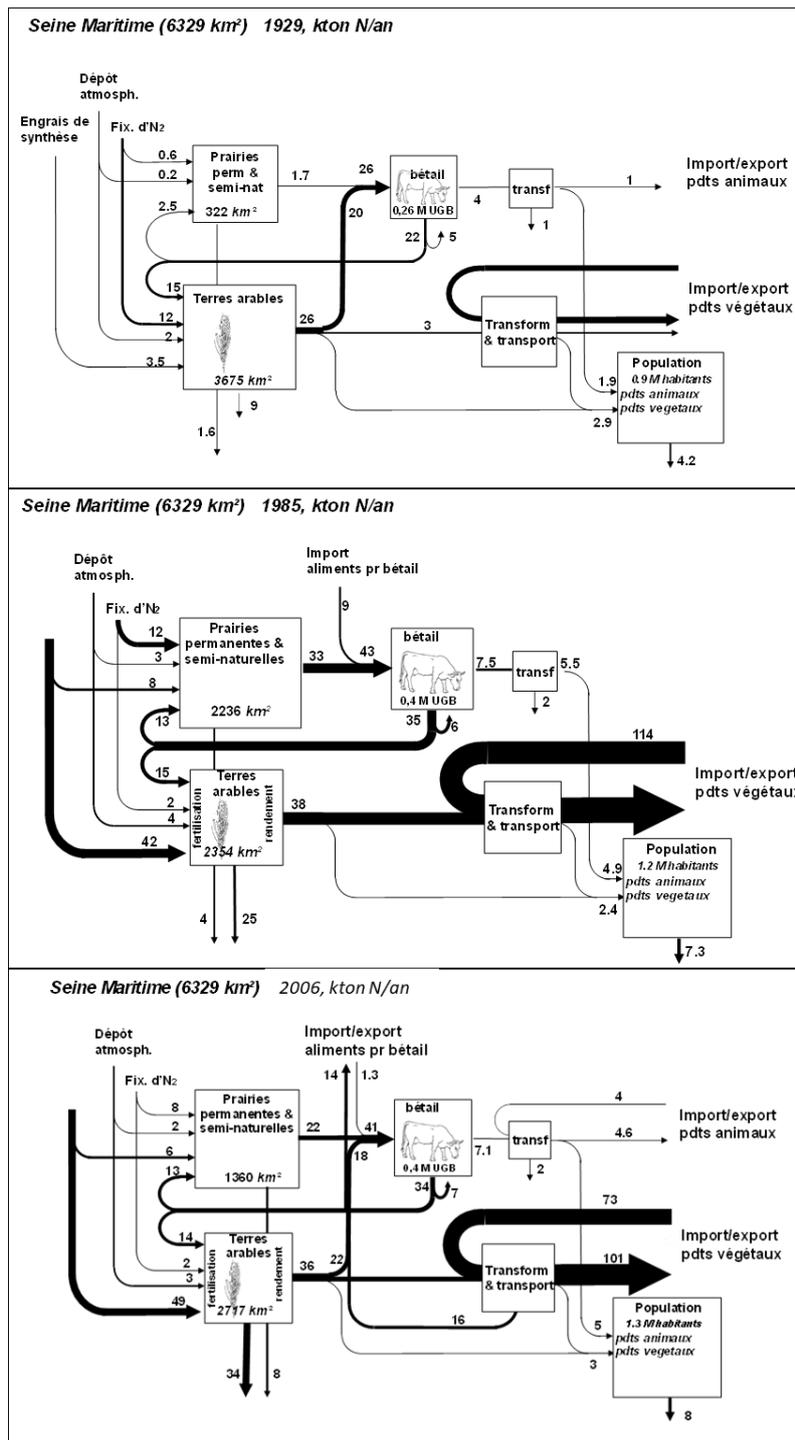
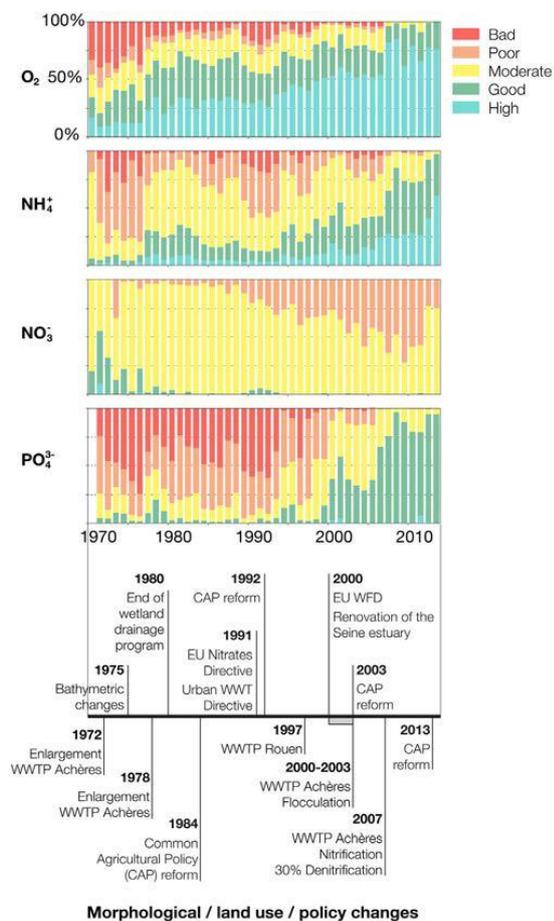


Figure 55 : Métabolisme territorial du département de Seine-Maritime en 1929, 1985 et 2006, figuré par les flux d'azote à travers le système agro-alimentaire

Ainsi les améliorations concernent essentiellement les apports ponctuels urbains et les apports industriels soumis à une réglementation plus stricte.

Si un ralentissement des projets d'aménagement et d'industrialisation s'est amorcé au cours des années 70, il ne s'agit cependant pas du tout d'un coup d'arrêt. Les nombreuses mobilisations et luttes pour préserver l'estuaire, en particulier dans sa partie aval, au cours des années 1980, 1990 et 2000 témoignent ainsi de la persistance des tensions entre ceux qui souhaitent préserver l'estuaire, son fonctionnement « naturel », ses vastes espaces non urbanisés, etc. et les tenants d'un développement économique de

premier plan, tiré par les activités industrielles et portuaires qui nécessitent de vastes espaces pour s'implanter mais aussi des infrastructures majeures.



Ainsi, après les « années noires », la qualité de l'environnement de l'estuaire de la Seine recouvre progressivement un aspect plus positif. La législation environnementale permet de réduire la pression polluante sur la qualité de l'eau. Elle s'avère par ailleurs peu efficace dans sa déclinaison agricole comme le montre l'évolution des concentrations de nitrates dans le fleuve de Paris à la mer (Figure 56).

Figure 56 : Pourcentage d'échantillonnages entre Paris et Honfleur par année (1970-2013) par classe de qualité de l'eau, telle qu'établie dans les règlements européens et français. La chronologie en bas montre quelques changements morphologiques et socio-écologiques importants.

[\(RESET\)](#)

Les personnes interviewées sont très nombreuses à avoir constaté une **amélioration de la qualité de l'eau**. Un des pêcheurs rencontrés, installé à l'amont de l'estuaire, constate ainsi une amélioration constante depuis 1975 environ : « le poisson redevient consommable, il a perdu son goût de phénol, de savon. La végétation revient, même dans les bras morts, alors qu'elle avait disparu à cause de la pollution ». Le retour des éperlans a été constaté vers 1985 tandis que l'alose « est revenue plus tard, dans les années 2000 ». « Aujourd'hui, il y a beaucoup de gardons, de même que la brème, la carpe, l'alose, l'éperlan ». Malgré tout, le poisson ne reste « pas encore très goûteux ». On évoque ainsi souvent son « goût de Seine ». Les stations d'épurations sont identifiées pour leur rôle dans cette amélioration de la qualité de l'eau.

Au tournant des années 2010, du point de vue du système agro-alimentaire, on constate l'expansion toute relative des productions certifiées par l'origine et pour leur caractère respectueux de l'environnement. **La production en agriculture biologique concerne peu de surface en Normandie, avec une proportion en dessous de la moyenne nationale (3.3 % de la Surface Agricole Utile, la moyenne nationale étant de 4.9%).** Le rapprochement spatial entre producteurs et consommateurs est valorisé par **l'essor de circuits courts** et leur succès dans les pôles de consommations. La conquête de canaux classiques de distribution (MIN et grande distribution) par les producteurs de proximité apparaît comme une aubaine commerciale à développer. **D'une manière**

générale, de nombreuses actions favorables à cette dynamique vertueuse sont menées par les institutions régionales, par les collectivités locales et les acteurs parapublics et privés. Ainsi, par certains aspects, ces signaux semblent témoigner d'une tendance à la transition écologique. Il est difficile de savoir si ces démarches se renforceront de manière à modifier drastiquement le régime en place au début des années 2000.

Les territoires qui composent la plaine alluviale de l'estuaire : histoire de trajectoires contrastées.

Le projet [TRAESSI](#) cherche à mettre en relation l'évolution de l'état environnemental de l'estuaire et de différents territoires le constituant avec les événements sociétaux passés (évolution des pressions, des usages et perceptions, des actions menées par les gestionnaires), qui ont pu provoquer de telles évolutions. Cette démarche pluridisciplinaire doit nourrir la réflexion des acteurs de l'estuaire en favorisant la compréhension des processus socio-écologiques, qui ont conduit à la situation actuelle.

Initiés en 2017, les travaux préliminaires s'intéressent à 3 cas d'étude :

- des impacts du barrage de Martot sur le paysage et les activités fluviales depuis les années 1860 jusqu'à son démantèlement définitif en 2017,
- de la modification de la géographie locale et l'impact socio-économique du Pont de Normandie,
- de la structuration réglementaire et administrative de l'estuaire et ses implications en matière de gestion des territoires fluviaux et humides depuis la fin du XVIIIe siècle.

2 Enjeux d'avenir pour la restauration de l'estuaire

Parmi, les nombreux enjeux d'avenir deux volets ont été abordés.

Les relations entre de grandes trajectoires d'évolution possibles à l'horizon 2050 du bassin de la Seine et les problématiques de qualité d'eau liées aux apports en nutriments à l'estuaire ont été étudiées ([RESET](#)). L'analyse prospective peut permettre de susciter la réflexion et une meilleure compréhension des tendances, parfois antagonistes, visibles actuellement dans le territoire.

La question de l'association des publics à l'aménagement des milieux naturels a été abordée sous un angle plus large que celui de la concertation ([PUBLIC](#)). L'objectif était de produire une analyse des pratiques actuelles qui prenne en compte tous les modes d'action susceptibles d'élargir le cercle des personnes intéressées à la préservation des milieux naturels et de développer des motivations à agir en ce sens (sensibilisation du public et éducation à l'environnement, ouverture d'espaces protégés au public, implication du public dans la gestion d'espaces protégés...). Cette question a été envisagée à des échelles variées, du niveau local jusqu'à celui de l'estuaire de la Seine.

Les récits historiques des acteurs ayant vécu les évolutions de l'estuaire ont été analysés afin de dégager des éléments de perception qui pourraient contribuer à faciliter le partage d'objectifs de restauration avec un public diversifié ([PERCEES](#)).

2.1 Système agro-alimentaire : des scénarios contrastés pour l'avenir du bassin de la Seine

L'analyse prospective a été conduite à l'échelle du bassin afin de traduire différents scénarios d'évolution du territoire en pression de nutriments sur le réseau hydrographique. Ainsi, 4 scénarios d'évolution à long terme du système agro-alimentaire ont été proposés (voir aussi Tableau 8) :

- Le futur radieux du Grand Paris et l'hyper-spécialisation des territoires agricoles.

Le développement volontariste du Grand Paris se fait le long de l'Axe Seine, avec un accroissement sensible de population dans ce secteur (au détriment des villes plus amont du bassin). Les technologies les plus pointues de l'épuration urbaine centralisée sont mises en œuvre.

Les régions de grandes cultures intensifient dès lors leur spécialisation et leur production de céréales et d'oléo-protéagineux selon les techniques les plus rigoureuses de l'agriculture chimique raisonnée (chimie verte, agro-carburants). L'élevage est exclu des zones de grande culture, mais s'intensifie, en mode industriel, dans les régions du Grand Ouest, y compris la Manche.

Ce scénario est très présent dans les discours officiels, et s'accompagne d'une profonde ouverture structurelle de la chaîne agro-alimentaire. Il s'accompagne de l'accroissement de la spécialisation territoriale, de la poursuite de l'intensification agricole, de la concentration de la population le long de l'axe Seine au détriment du bassin amont.



- Un futur bio-autonome-démocratique, sobre et écologiquement.

La transition écologique prend corps avec des actions volontaristes de l'Etat (énergies renouvelables, politique foncière limitant l'extension urbaine), qui se poursuit autour des petites et moyennes agglomérations existantes, y compris à l'amont du bassin.

Les pratiques d'assainissement urbain évoluent vers des filières de valorisation des urines collectées à la source, ainsi que la méthanisation des déchets et excréments solides.

L'approvisionnement local est de plus en plus privilégié, ainsi que les produits biologiques. La consommation de viande et de produits laitiers diminue de moitié au profit des protéines végétales. Des campagnes de sensibilisation réduisent considérablement le gaspillage alimentaire.

Les pratiques de l'agriculture biologique se généralisent avec, en ce qui concerne le bilan azoté, une généralisation du recours aux légumineuses, ce qui permet de s'affranchir des engrais chimiques et des pesticides, et s'accompagne d'une reconnexion avec l'élevage qui est réintroduit dans les régions de grandes cultures.

Ce scénario radical implique à moyen et long terme une profonde modification structurelle de la chaîne agro-alimentaire.

- Une agriculture duale.

Les deux tendances antagonistes à l'œuvre respectivement dans les scénarios précédents, s'affrontent entre un courant libéral privilégiant la croissance et la compétitivité dans la mondialisation, et un courant de sensibilité écologiste prônant la défense de l'environnement et l'autonomie circulaire locale. La situation aboutit à un compromis consistant dans un partage du territoire entre espaces de développement économique spécialisé et espaces de protection (aires d'alimentation de captage d'eau potable, Parcs Naturels Régionaux...), dans lesquels sont expérimentés à des échelles territoriales divers modes alternatifs de produire et de consommer. Ces espaces concernent plus d'un tiers du territoire du bassin de la Seine, ce qui rend l'impact des pratiques qui y sont développées non négligeable sur le fonctionnement à l'échelle du bassin.

Ce scénario propose la coexistence de deux modèles d'agriculture aux développements diamétralement opposés

- Et si rien n'avait été fait en matière de réglementation depuis 40 ans ? Ou le retour aux années 80...

Un tel scénario vise à reconstituer les bassins dans l'hypothèse où aucune politique publique n'aurait été mise en œuvre depuis 30 ans, ni dans le domaine de l'épuration des eaux usées, ni dans celui des pratiques agricoles.

La population est celle que l'on dénombre actuellement, mais les rejets urbains sont traités comme ceux des années 1980 (traitement biologique par boues activées pour les agglomérations de plus de 2000 habitants, les autres étant laissées sans traitement).

Les pratiques agricoles ne sont pas soucieuses d'équilibre de fertilisation, et n'ont pas recours aux CIPAN. On retrouve les niveaux de surplus azotés des années 1980.

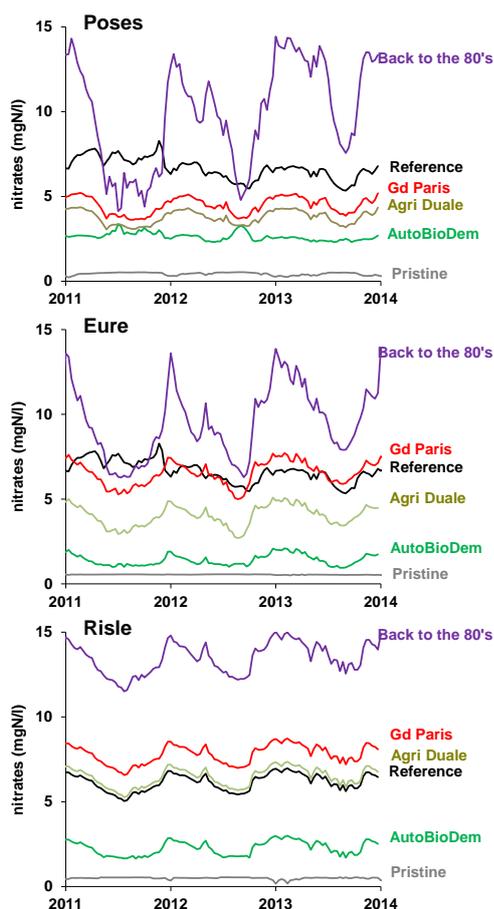
Ce scénario permet de mesurer les effets sur l'environnement obtenus grâce à l'application des directives nationales et européennes. Il met en garde contre tout désengagement d'une nation ou d'une Europe en crise, ne pouvant plus investir dans de nouvelles infrastructures

ou ayant peine à maintenir l'existant. Les réglementations environnementales seraient mal appliquées, ou ferait l'objet de nombreuses dérogations.

C'est le scénario du pire qui permet d'apprécier en creux les effets des politiques environnementales mises en œuvre depuis 40 ans

Scénarios	Population et step	Régime alimentaire	Agriculture
1. Gd Paris	INSEE: Hypothèse haute de la population Le surcroît de la population est réparti sur l'axe Seine Step aux normes	Scénario de la Chambre Agri Normandie: Régime : 7.5 kgN/cap/an, 70% animal	Spécialisation : Gde culture dans le bassin parisien Elevage spécialisé en Normandie Polycult-élevage intensif à l'Est
2. Auto-Bio-Dem	INSEE: Hypothèse haute de la population Le surcroît de population actuelle de l'axe est redistribuée à l'amont du bassin au pro rata des populations actuelles Step aux normes Recyclage de l'urine : logements neuf construits en séparatif et ceux du tertiaire mis	Réduction gaspillage, distribution & consommation Régime demitarien : 40% de protéines animales	Pas d'intrant chimique Autonomie maximum des exploitations, le bétail est limité par la capacité à le nourrir localement
3. Agricult Duale	INSEE : Hypothèse haute de la population, répartie selon 1 Step aux normes	Régime du scénario 1	Dans les AAC et les PNR: Agriculture du scénario 2 Ailleurs : Agriculture du scénario 1
4. Si on avait rien fait	Population actuelle Step traitement minimum (B0)	Régime actuel: 7.3 kgN/cap/an, 65 % animal	Agriculture des années 1980 (sans raisonnement de la fertilisation, sans CIPAN)

Tableau 8 : Contraintes prises en compte par la modélisation pour le calcul des flux de nutriments dans le bassin de la Seine et à l'exutoire à Poses. Les résultats à Poses alimentent le modèle Eco-Mars 3D de l'estuaire et de sa zone côtière.



Grâce aux outils de modélisation, ces scénarios ont pu être testés vis-à-vis notamment des concentrations en nutriments dans le réseau hydrographique mais aussi en terme de dynamique d'eutrophisation en baie de Seine.

Les résultats de ces différents scénarios sont illustrés ici par les écarts de concentration en nitrates à Poses et à l'aval de deux affluents estuariens (différents types d'années hydrologiques sont simulées). (Figure 57).

Figure 57 : Evolution sur la période de 2011 à 2013 des concentrations en nitrates pour les conditions de référence actuelles, et pour les différents scénarios, à l'exutoire de la Seine à Poses, de l'Eure et de la Risle.

2.2 L'association du public à un programme de restauration de l'estuaire de la Seine

La bibliographie scientifique et les retours d'expériences montrent qu'il est important d'impliquer les personnes concernées (riverains, élus, individus motivés, associations locales, représentants de secteurs d'activités professionnels ou de loisirs...) dans les processus décisionnels d'aménagement des milieux naturels pour la réussite et l'intégration des projets dans la dynamique de leur territoire. La concertation devrait en effet permettre de :

- connaître leurs attentes et essayer d'y répondre ;
- bénéficier de leur expertise locale ;
- limiter les blocages, rechercher les meilleurs compromis et encourager les soutiens.

Un bilan des pratiques actuelles sur l'estuaire a pu être mené ([PUBLIC](#)), sur la base notamment d'une série d'entretiens auprès des porteurs de projet (35 personnes de 17 organismes différents), de quatre études de cas (68 entretiens) et de récits de vie de passeurs de nature (20 entretiens). Il débouche sur des propositions à destination des institutionnels gestionnaires (élaborées lors de 9 entretiens complémentaires et d'un atelier de travail).

1. Élargir les modes de communication et le public ciblé

La communication avec le grand public tend à être essentiellement envisagée sous l'angle pédagogique, en faisant appel au langage scientifique. Or celui-ci est sensible à des modes de communication très différents, souvent plus ludiques, et son premier lien à la nature passe en général par des lieux très éloignés de ceux des gestionnaires institutionnels (jardins, parcs zoologiques, bases de loisirs...). Plusieurs conseils pratiques ont pu être proposés.

2. Construire des offres touristiques et récréatives variées autour des milieux naturels en croisant les compétences

Il semblerait pertinent de ne pas dissocier offre touristique destinée à des visiteurs extérieurs et offre récréative pour les locaux. Rendre un territoire attractif sur le plan touristique et récréatif c'est aussi le rendre attractif en termes d'emploi. Il est ainsi recommandé notamment de davantage valoriser les milieux naturels dans les circuits de randonnée, et davantage ouvrir les sites à l'occasion d'évènements particuliers en s'appuyant en particulier sur les acteurs privés du tourisme.

3. Associer tous les « usagers » (chasseurs, agriculteurs, jardiniers...) à la valorisation du bien commun qu'est leur environnement afin d'aider à croiser tous les regards et toutes les initiatives, et chercher à en faire des partenaires ;

4. Constituer un réseau, orienté estuaire, de sites ouverts au grand public de Poses à la mer, selon tant une logique de continuité qu'une logique thématique (le site Ramsar Marais Vernier - Vallée de la Risle Maritime et la Réserve Nationale de l'Estuaire ; les îles de la Seine ; les interfaces « Ville-Fleuve-Port » ...).

Associer des publics à l'aménagement des milieux naturels à des échelles plus vastes que les sites (l'estuaire dans sa globalité ou des échelles intermédiaires comme les boucles de la Seine) permettrait de répondre à différents enjeux :

- un enjeu politique de compréhension de l'importance des milieux naturels par le grand public, pour pouvoir continuer à justifier des actions de restauration ;
- un enjeu socio-économique d'appropriation du cadre de vie par les habitants ;
- un enjeu sociotechnique de mise en résonance des différents projets de restauration.

Cela suppose en particulier de favoriser des cheminements libres en continuité dans les espaces estuariens et de montrer davantage le fleuve avec son caractère estuarien dans les aménagements.

D'autre, part, un certain nombre d'enseignements ressort de l'analyse de la perception des évolutions de l'estuaire par les personnes qui l'ont vécue ([PERCEES](#)). Le récit des pêcheurs professionnels identifie les transformations physiques et les pollutions qui impactent la ressource halieutique. L'estuaire est aussi le support de très nombreux usages de proximité, que ce soit pour les loisirs ou pour une activité économique. Ces usages participent fortement à la constitution de l'identité du territoire mais aussi à la vie des habitants et à leur bien-être.



Les récits s'appuient sur des éléments reliés au fonctionnement écologique de l'estuaire qui sont susceptibles d'être éclairés par l'expertise scientifique de manière assez évidente. C'est le cas, par exemple, de la productivité halieutique de l'estuaire prégnante dans le premier récit, ou de la biodiversité dans le dernier. Ces éléments constituent des thématiques scientifiques, renvoyant à certains compartiments du fonctionnement de l'écosystème, pointé d'ailleurs par les acteurs eux-mêmes (hydromorphologie, hydrologie, qualité de l'eau, sédiments, ...).

Au-delà des éléments politiques, scientifiques, professionnels ou militants qui ont pu être évoqués au cours des entretiens, **le registre du sensible est présent chez toutes les personnes rencontrées, selon une perception partagée et relativement homogène**. Les sens sont ainsi fréquemment mobilisés pour décrire l'estuaire, que le propos soit positif ou négatif. L'ambiance sonore des marais, le paysage spécifique de la vallée, la lumière et ses variations, le rythme fixé par les marées sont autant de références qui évoquent à un attachement particulier pour un environnement dit remarquable. Le côté « sauvage » de l'estuaire a été évoqué à plusieurs reprises, parfois pour regretter la disparition de cette caractéristique, parfois pour saluer sa préservation à quelques endroits. De manière générale, l'évocation des évolutions de l'estuaire de la Seine d'un point de vue sensible provoque un sentiment ambivalent. Les acteurs rencontrés ont à la fois l'impression d'assister à une dégradation générale et massive de cet espace, soumis aux pressions de l'industrie et du monde moderne en général, tout en continuant de considérer les qualités intrinsèques de l'estuaire comme encore bien vivantes.

CONCLUSION GENERALE

Le programme Seine-Aval 5 s'est structuré autour de 21 projets, portés par 36 laboratoires de recherche et l'équipe du GIP Seine-Aval. Les connaissances acquises sur le fonctionnement physique et écologique de l'estuaire de la Seine permettent de consolider les expertises et recommandations à destination des aménageurs et gestionnaires de l'environnement. Elles constituent un acquis fondamental pour orienter et définir des objectifs de gestion qui s'inscrivent dans un projet qui concilie activités économiques, contraintes de sécurité des populations riveraines et maintien, voire amélioration des conditions environnementales de cet écotone entre milieu dulçaquicole et milieu marin.

Les résultats mettent également de nouveau en lumière la complexité du système, les difficultés à définir précisément les facteurs clés qui permettront une amélioration efficace de la fonctionnalité estuarienne et la difficulté à en prédire les évolutions possibles. Les travaux de recherche engagés dans Seine-Aval 6 (2017-2020) ont pour objectif de préciser les connaissances par :

- La poursuite de l'étude des facteurs limitant la dynamique des populations de poissons. Ce groupe biologique est ciblé en priorité du fait que la restauration de certains habitats clefs, présents dans l'estuaire et nécessaire à l'accomplissement de leur cycle vital, implique l'étude des caractéristiques physiques, trophiques et de contamination des habitats à des échelles spatiales cohérentes avec l'écologie de leur population, renforçant ainsi notre compréhension générale du fonctionnement du système.
- La mise en place de travaux inter-disciplinaires sur certains types d'habitat afin d'appréhender les interactions entre les processus physiques, bio-chimiques et biologiques. En effet, ces interactions complexes gouvernent la qualité des habitats au regard des fonctions écologiques qu'ils supportent. Elles doivent être appréhendées pour cibler les mesures de gestion les plus efficaces.
- La poursuite de l'effort de modélisation des évolutions morphologiques de l'estuaire pour mieux anticiper l'évolution des différents types d'habitats sur le long terme en intégrant l'étude de l'influence de l'entretien des voies de navigation.
- L'analyse historique des relations entre les dynamiques socio-économiques locales et nationales et l'évolution de territoires qui composent l'estuaire. Cette analyse fournit un cadre pertinent pour caractériser le contexte socio-économique dans lequel s'inscrit le diagnostic du fonctionnement écologique de l'estuaire. Elle pourra ainsi aider à formaliser des scénarios possibles pour son avenir.

La finalité de l'approche interdisciplinaire coordonnée par le GIP Seine-Aval et du travail de synthèse et de communication est multiple. Cette approche permet de faciliter la mobilisation des informations, l'utilisation des méthodes et des modèles fournis par la communauté scientifique. Elle se réalise dans le cadre d'une réflexion concertée relative à la mise en œuvre d'une gestion environnementale raisonnée et qui s'inscrit sur le long terme. La démarche s'inscrit dans une vision globale de l'axe Seine du fait du renforcement de la cohérence des programmes de recherche à l'échelle du bassin de la Seine dans le cadre de la [Zone Atelier Seine](#). Le programme Seine-Aval constitue également une dynamique scientifique d'importance nationale et contribue ainsi aux réflexions menées par l'Agence Française de la Biodiversité ([Mission Inter-Estuaire](#)).

LISTE DES PROJETS SCIENTIFIQUES 2013-2018

Projets Seine-Aval 5 finalisés pendant la période 2013-2018			
Acronyme (période)	Titre	Coordonnateur	Résultats
AffluSeine 2013-2016	Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine : Quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants	Benoit Laignel UMR M2C Université de Rouen	web
ANACHONDA 2015-2017	Analyse spatiale de la connectivité des d'habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire	Céline Le Pichon Irstea	web
ANPHYECO-SEINE 2014-2018	Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique [en vue d'une recherche de pistes de restauration globale] de l'estuaire de la Seine	Stefan Van Damme ECOBE Antwerp University	web
ANTROPOSEINE 2013-2017	ANalyse de la structure TROPhique et cOntribution des habitats de l'estuaire de la SEINE	Nathalie Niquil UMR BOREA Université de Caen	web
BARBÈS 2013-2017	Associations biologiques en relation avec le transport sédimentaire : développement d'un modèle de bioturbation par les ingénieurs d'écosystèmes en estuaire de Seine	Francis Orvain UMR BOREA Université de Caen	web
CRAPPSE 2013-2017	Contamination et RéActivité de Pesticides et de Pharmaceutiques dans l'estuaire de SEine : bilan des contaminations, dégradation et impact toxique	Patrick Mazellier UMR EPOC Université de Bordeaux 1	web
COMHETES 2016-2017	Industrialisation de l'estuaire de la Seine : quel héritage pour la qualité des eaux ?	Cédric Fisson GIP Seine-Aval	web
DYNAPAT 2013-2017	Impact de la dynamique particulaire sur le devenir des bactéries pathogènes dans la zone du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine	Fabienne Petit UMR M2C Université de Rouen	web
ECHANGES 2014-2017	Interaction entre les différentes masses d'eau estuariennes et bilan hydrique de l'estuaire	J.P. Dupont UMR M2C Université de Rouen	web
ECOTONES 2014-2018	Effets de la COnTamination sur les OrgaNismes de l'Estuaire de la Seine	Benoît Xuereb UMR-I-02 SEBIO Université du Havre	web
H2O 2013-2017	Habitats Hétérométriques Originaux	Sandric Lesourd UMR M2C Université de Caen	web
HYMOSED 2013-2017	Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine	Florent Grasso IFREMER – DYNECO/PHYSED	web
MODHANOUR 2014-2016	MODélisation des HABitats de NOUrriceries en estuaire de Seine	AnikBrind'Amour IFREMER	web
MOSAIC 2013-2017	Dynamique de la Matière Organique dans le bouchon vaSeux de l'estuAire de Seine en lien avec les nutrIments et les Contaminants organiques	Arnaud Huguet UMR METIS Université Pierre et Marie Curie	web
NIVEAU 2015	Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine	J.P. Lemoine GIP Seine-Aval	web
PERCEES 2013-2016	Prospective Environnementale pour la Restauration de la Cohérence Ecologique de l'Estuaire de la Seine	Audrey COREAU Centre A. Koyré et Agro-ParisTech	web
PROUESSE 2013-2017	PROdUction primaire dans l'ESTuaire de SEINE	Pascal Claquin UMR BOREA Université de Caen	web
PUBLIC 2014-2016	Quelle association du public pour aménager les milieux naturels de l'estuaire de la Seine ?	Sophie Allain Consultante	web

RESET 2013-2017	Rôle de l'estuaire de Seine dans l'écologie territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires.	Josette Garnier UMR METIS Université Pierre et Marie Curie	web
SUSpEnSE 2014-2018	StUdy Sediment fluxEs in the Seine-Estuary	Robert Lafite UMR M2C Université de Rouen	web
ZOOGLOBAL 2013-2017	Etude du ZOOplancton et de ses habitats estuariens dans un contexte de changement GLOBAL : synthèse des acquis Seine-Aval et initiation d'une nouvelle approche intégrée	Sami Souissi UMR LOG Université Lille 1	web

Projets Seine-Aval 6 initiés pendant la période 2013-2018

Acronyme (période)	Titre	Coordonnateur	Résumés
ARES 2019-2020	Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine	Florent Grasso Ifremer	web
CAPES 2017-2020	CApacité trophique des nourriceries de Poissons de l'Estuaire de Seine	Anick Brind'Amour Ifremer	web
CHOPIN 2017-2020	Contaminants organoHalogénés histOriques et d'intérêt émergent : Présence et transfert vers la sole commune – Impact de la contamination sur la Nourricerie et conséquences sur la population	Pierre Labadie UMR EPOC Université de Bordeaux	web
HQFISH 2017-2020	Impact de la qualité des habitats estuariens de la Seine sur le fonctionnement d'une population de poisson (du recrutement des juvéniles, au processus de reproduction)	Rachid Amara UMR LOG Université Lille 1 Jean Laroche LEMAR Université Bretagne Occidentale	web
MEANDRES 2016-2020	Modélisation de l'Effet des déplaCements aNthropiques de séDiments sur l'estuaiRE de la Seine	Pierre Le Hir Ifremer	web
MORPHOSEINE 2017-2020	Modélisation de l'évolution morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine	Pierre Le Hir Ifremer	web
PHARE-SEE 2017-2020	Productivité microphytobenthique des HABitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire, biogéochimique et les ingénieurs d'écosystème de la faune benthique : implication pour des enjeux de modélisation et de REhabilitation des vasières de la SEine Estuarienne	Francis Orvain UMR BOREA Université de Caen Arnaud Huguet UMR METIS Université Pierre et Marie Curie	web
PLASTIC-Seine 2017-2020	Flux et impacts des micro-plastiques dans l'estuaire de la Seine	Jérôme Cachot, UMR EPOC Université de Bordeaux Johnny Gaspéri LEESU Université Paris-Est	web
SARTRE 2019-2021	Seine Aval : Réseaux Trophiques Estuariens	Michèle TACKX UMR ECOLAB Université de Toulouse	web
SENTINELLES 2017-2020	Fonctionnement des écosystèmes de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à travers une étude interdisciplinaire ciblant le zooplancton et le macro-zoobenthos	Sami Souissi UMR LOG Université Lille 1	web
TraEsSi 2017-2020	Trajectoires de l'Estuaire depuis la fin du XVIIIe Siècle. Approche géo-historique de l'évolution de l'état de l'estuaire en fonction de ses usages	Laurence Lestel UMR METIS Université Pierre et Marie Curie	web

BIBLIOGRAPHIE – REFERENCES DU DOCUMENT

Capderrey C., Olivier J.-M., Moussard S., Foussard V., Bacq N., 2016. Retours d'expérience de restauration écologique en milieu estuarien – Analyse de la littérature scientifique publiée. Rapport final pour l'ONEMA, 90p.

Capderrey C., 2019. Outils mobilisables pour la restauration écologique en milieu estuarien. Rapport final BRGM/RP-67498-FR, 203 p.

Elliott M. & Quintino V., 2007. The estuarine quality paradox, environmental homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin*, 54(6), 640-645.

Fisson C. (coord.), Leboulenger F., Lecarpentier T., Moussard S., Ranvier G., 2014. L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution. Fascicule Seine-Aval 3.1, 55p.

Lemoine J.P. (coord.) & Verney R., 2015. Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.3, 64p.

Lemoine J.P., 2015. Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.

Lévêque C. (resp. sc.), Barillé L., Boët P., Bocquéné G., Bouleau G., Devrecker D., Gramaglia C., Etcheber H., Foussard V., Just A., Lepage M., Lobry J., Loupsans D., Moussard S., Sirost O., Sottolichio A., Souissi S., 2011. Synthèse du projet BEEST. Projet LITEAU - BEEST, 100p.

REFERENCES DES RAPPORTS SEINE-AVAL 5

Allain S. (coord.), Bellenger M.C., Sirost O., 2014. Projet PUBLIC : Quelle association du public pour aménager les milieux naturels de l'estuaire de la Seine ? Projet Seine-Aval 5, 48 p.

Brind'Amour A. (coord.), Chaalali A., Tableau A. et Pinsivy L., 2018. Projet MODHANOUR « Modélisation des Habitats de Nourricerie en Baie de Seine ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 40 p.

Claquin P. (coord.), Morelle J., Schapira M, Orvain F., Lopez P., 2018. Projet PROUESSE : « Production primaire de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 76 p.

Coreau A. (coord.), Narcy J.B., Moussard S., 2014. Projet PERCEES – Rétrospective sur l'estuaire de la Seine : quelle "histoire écologique" vécue par les usagers ? Projet Seine-Aval 5, 34p.

Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R., Lemoine J.P., 2016. Projet SUSPENSE – Rapport technique sur la variabilité des coefficients de calibration NTU/mg.l-1 du réseau SYNAPSES. Projet Seine-Aval 5, 27p.

Druine F., Deloffre J., Verney R., Lemoine J.P., Lafite R., 2016. Projet SUSPENSE – Représentativité des sites de mesures SYNAPSES selon différentes conditions hydrodynamiques. Projet Seine-Aval 5, 49p.

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

Garnier J. (coord.), Barles S., Billen G., Bognon S., Romero E., Le Gendre R., Silvestre M., Ramarson A., Thieu V., Théry S., Castaings J, Riou. P., 2018. Projet RESET : « Rôle de l'Estuaire de Seine dans l'Ecologie Territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 73 p.

Grasso F. (coord.), Le Hir P., 2018. Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet Modélisation », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 78 p.

Grasso F. (coord.), Verney R., 2018. Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet « Mesures », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 57 p.

Huguet A. (coord.), Thibault A., Roose-Amsaleg C., Parlanti E., Laverman A., Fuster L., Budzinski H., Viollier E., 2018. Projet MOSAIC « Dynamique de la Matière Organique dans le bouchon vaseux de l'estuaire de Seine en lien avec les nutriments et les Contaminants organiques ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 84 p.

Laignel B. (coord.), Landemaine V., Cerdan O., 2017. Projet Affluseine : Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine : quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants. Projet Seine-Aval 5, 44 p.

Le Pichon C. (Coord.), Alp M. 2018. Projet ANACONDHA « Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 101 p.

Lemoine J.P., 2015. Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.

Lesourd S. (coord), Dauvin J-C, Mear Y., Navon M., 2018. Projet H2O « Habitats Hétérométriques Originaux». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 76 p.

Mazellier P. (coord.), Fuster L., Budzinski H., Garric J., Couteau J., Aït-Aïssa S., 2018. Projet CRAPPSE « Contamination et RéActivité de Pesticides et de Pharmaceutiques dans l'estuaire de Seine ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 71 p.

Niquil N. (coord.), Tecchio S., Dauvin J.C., Lassalle G., Lobry J., 2018. Projet ANTROPOSEINE : ANalyse de la structure TROPique et cONtribution des habitats de l'estuaire de la SEINE. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 46 p.

Orvain F. (coord.), Le Hir P., Méléder V., Lesourd S., Dancie C., Israël S., Morelle J., 2018. Projet BARBES « Associations Biologiques en relation avec le transport sédimentaire : développement d'un modèle de bioturbation par les ingénieurs d'écosystèmes en estuaire de Seine ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 123 p

Petit F. (Coord.), Berthe T., Barraud O., Cagnon C., Dagot C., Deloffre J., Duran R., Lafite R., Petit C., Ploy M.-C., 2018. Projet DYNAPAT : Impact de la dynamique particulière sur le devenir des bactéries pathogènes dans la zone du bouchon vaseux de l'estuaire de Seine. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 66 p.

Souissi S. (coord.), TACKX M., DUR G., MICHALEC F.G., SOUISSI A., 2018. Projet ZOOGLOBAL « Etude du ZOOplancton et de ses habitats estuariens dans un contexte de changement GLOBAL : synthèse des acquis Seine-Aval et initiation d'une nouvelle approche intégrée ». Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 68 p.

Van Damme S. (coord.), Le Hir P., Ducrottoy J.P. 2019. Projet ANHYECO « Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique [en vue d'une recherche de pistes de restauration globale] de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 48 p.

Xuereb B. (coord.), Barjhoux I., Bustamante P., 2019. Projet ECOTONES : « Effets de la contamination sur les organismes de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 42 p.

VALORISATION SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX SEINE-AVAL5

Aminot, Y., Fuster, L., Pardon, P., Le Menach, K., Budzinski, H., 2018. Suspended solids moderate the degradation and sorption of waste water-derived pharmaceuticals in estuarine waters. *Sci. Total Environ.* 612, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.162>

Baffreau, A., Pezy, J.-P., Dancie, C., Chouquet, B., Hacquebart, P., Poisson, E., Foveau, A., Joncourt, Y., Duhamel, S., Navon, M., Marmin, S., Dauvin, J.-C., 2017. Mapping benthic communities: An indispensable tool for the preservation and management of the eco-socio-system in the Bay of Seine. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 9, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.12.005>

Barrick, A., Châtel, A., Marion, J.-M., Perrein-Ettajani, H., Bruneau, M., Mouneyrac, C., 2016. A novel methodology for the determination of biomarker baseline levels in the marine polychaete *Hediste diversicolor*. *Mar. Pollut. Bull.* 108, 275–280. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.056>

Barrick, A., Marion, J.-M., Perrein-Ettajani, H., Châtel, A., Mouneyrac, C., 2018. Baseline levels of biochemical biomarkers in the endobenthic ragworm *Hediste diversicolor* as useful tools in biological monitoring of estuaries under anthropogenic pressure. *Mar. Pollut. Bull.* 129, 81–85. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.006>

Ben Cheikh, Y., Travers, M.-A., Le Foll, F., 2017. Infection dynamics of a *V. splendidus* strain pathogenic to *Mytilus edulis*: In vivo and in vitro interactions with hemocytes. *Fish Shellfish Immunol.* 70, 515–523. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.09.047>

Ben Cheikh, Y., Travers, M.-A., Morga, B., Godfrin, Y., Rioult, D., Le Foll, F., 2016. First evidence for a *Vibrio* strain pathogenic to *Mytilus edulis* altering hemocyte immune capacities. *Dev. Comp. Immunol.* 57, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2015.12.014>

Ben Cheikh, Y., Xuereb, B., Boulangé-Lecomte, C., Le Foll, F., 2018. Multixenobiotic resistance in *Mytilus edulis* : Molecular and functional characterization of an ABCG2- type transporter in hemocytes and gills. *Aquat. Toxicol.* 195, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.12.012>

Bertrand, C., Devin, S., Mouneyrac, C., Giambérini, L., 2017. Eco-physiological responses to salinity changes across the freshwater-marine continuum on two euryhaline bivalves: *Corbicula fluminea* and *Scrobicularia plana*. *Ecol. Indic.* 74, 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.029>

Billen, G., Le Noë, J., Garnier, J., 2018. Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *Sci. Total Environ.* 637–638, 695–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043>

Boulangé-Lecomte, C., Rocher, B., Cailleaud, K., Cosette, P., Legrand, E., Devreker, D., Budzinski, H., Souissi, S., Forget-Leray, J., 2016. Differential protein expression in the estuarine copepod *Eurytemora affinis* after diuron and alkylphenol exposures: Proteomics in the copepod after organic contaminant exposure. *Environ. Toxicol. Chem.* 35, 1860–1871. <https://doi.org/10.1002/etc.3343>

Boulangé-Lecomte, C., Xuereb, B., Trémolet, G., Duflot, A., Giusti, N., Olivier, S., Legrand, E., Forget-Leray, J., 2017. Controversial use of vitellogenin as a biomarker of endocrine disruption in crustaceans: New adverse pieces of evidence in the copepod *Eurytemora affinis*. *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.* 201, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.09.011>

Chaix, G., Roger, F., Berthe, T., Lamy, B., Jumas-Bilak, E., Lafite, R., Forget-Leray, J., Petit, F., 2017. Distinct *Aeromonas* Populations in Water Column and Associated with Copepods from

Estuarine Environment (Seine, France). *Front. Microbiol.* 8, 1259. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01259>

Chambord, S., Maris, T., Colas, F., Van Engeland, T., Sossou, A.-C., Azémar, F., Le Coz, M., Cox, T., Buisson, L., Souissi, S., Meire, P., Tackx, M., 2016. Mesozooplankton affinities in a recovering freshwater estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 177, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.04.016>

Châtel, A., Bruneau, M., Lièvre, C., Goupil, A., Mouneyrac, C., 2017. Spermatozoa: A relevant biological target for genotoxicity assessment of contaminants in the estuarine bivalve *Scrobicularia plana*. *Mar. Pollut. Bull.* 116, 488–490. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.062>

Châtel, A., Mouneyrac, C., 2017. Signaling pathways involved in metal-based nanomaterial toxicity towards aquatic organisms. *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.* 196, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2017.03.014>

Dauvin, J.-C., 2015. History of benthic research in the English Channel: From general patterns of communities to habitat mosaic description. *J. Sea Res.* 100, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2014.11.005>

Dauvin, J.-C., Lucas, S., Navon, M., Lesourd, S., Mear, Y., Poizot, E., Alizier, S., 2017. Does the hydrodynamic, morphometric and sedimentary environment explain the structure of soft-bottom benthic assemblages in the Eastern Bay of Seine (English Channel)? *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 189, 156–172. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.03.014>

David, V., Hartmann, H., Barnett, A., Bréret, M., Montanié, H., Orvain, F., Dupuy, C., 2016. Impact of biofilm resuspension on mesozooplankton in a shallow coastal ecosystem characterized by a bare intertidal mudflat. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 96, 1319–1329. <https://doi.org/10.1017/S0025315416000552>

Doxaran, D., Leymarie, E., Nechad, B., Dogliotti, A., Ruddick, K., Gernez, P., Knaeps, E., 2016. Improved correction methods for field measurements of particulate light backscattering in turbid waters. *Opt. Express* 24, 3615. <https://doi.org/10.1364/OE.24.003615>

Dur, G., Souissi, S., 2018. Ontogenetic optimal temperature and salinity envelopes of the copepod *Eurytemora affinis* in the Seine estuary (France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 200, 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.11.008>

Erraud, A., Bonnard, M., Chaumot, A., Geffard, O., Duflot, A., Forget-Leray, J., Le Foll, F., Geffard, A., Xuereb, B., 2018a. Use of sperm DNA integrity as a marker for exposure to contamination in *Palaemon serratus* (Pennant 1777): Intrinsic variability, baseline level and in situ deployment. *Water Res.* 132, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.057>

Erraud, A., Bonnard, M., Duflot, A., Geffard, A., Danger, J.-M., Forget-Leray, J., Xuereb, B., 2018b. Assessment of sperm quality in palaemonid prawns using Comet assay: methodological optimization. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 11226–11237. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8754-6>

Erraud, A., Bonnard, M., Geffard, O., Chaumot, A., Duflot, A., Geffard, A., Forget-Leray, J., Xuereb, B., 2019a. Assessment of sperm DNA integrity within the *Palaemon longirostris* (H.) population of the Seine estuary. *Environ. Pollut.* 245, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.006>

Erraud, A., Bonnard, M., Geffard, O., Coulaud, R., Poret, A., Duflot, A., Forget-Leray, J., Geffard, A., Xuereb, B., 2019b. Signification of DNA integrity in sperm of *Palaemon serratus* (Pennant 1777): Kinetic responses and reproduction impairment. *Mar. Environ. Res.* 144, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.01.005>

Gonzalez-Rey, M., Tapie, N., Le Menach, K., Dévier, M.-H., Budzinski, H., Bebianno, M.J., 2015. Occurrence of pharmaceutical compounds and pesticides in aquatic systems. *Mar. Pollut. Bull.* 96, 384–400. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.029>

Grasso, F., Le Hir, P., 2019. Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dyn.* 69, 83–100. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1233-x>

Grasso, F., Le Hir, P., Bassoullet, P., 2015. Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dyn.* 65, 607–616. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0818-x>

Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., Khojasteh Pour Fard, I., Lemoine, J.-P., Dumas, F., Garnier, V., 2018. Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics: Estuarine Turbidity Maximum Dynamics. *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 558–577. <https://doi.org/10.1002/2017JC013185>

Guesnet, V., Lassalle, G., Chaalali, A., Kearney, K., Saint-Béat, B., Karimi, B., Grami, B., Tecchio, S., Niquil, N., Lobry, J., 2015. Incorporating food-web parameter uncertainty into Ecopath-derived ecological network indicators. *Ecol. Model.* 313, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.05.036>

Huguet, A., Vacher, L., Saubusse, S., Etcheber, H., Abril, G., Relexans, S., Ibalot, F., Parlanti, E., 2010. New insights into the size distribution of fluorescent dissolved organic matter in estuarine waters. *Org. Geochem.* 41, 595–610. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.02.006>

Ibrahim, A., Souissi, A., Leray, A., Hélot, L., Vandebunder, B., Souissi, S., 2016. Myofibril Changes in the Copepod *Pseudodiaptomus marinus* Exposed to Haline and Thermal Stresses. *PLOS ONE* 11, e0164770. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164770>

Jaud, M., Grasso, F., Le Dantec, N., Verney, R., Delacourt, C., Ammann, J., Deloffre, J., Grandjean, P., 2016. Potential of UAVs for Monitoring Mudflat Morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France). *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 5, 50. <https://doi.org/10.3390/ijgi5040050>

Kadiene, E.U., Bialais, C., Ouddane, B., Hwang, J.-S., Souissi, S., 2017. Differences in lethal response between male and female calanoid copepods and life cycle traits to cadmium toxicity. *Ecotoxicology* 26, 1227–1239. <https://doi.org/10.1007/s10646-017-1848-6>

Le Coz, M., Chambord, S., Meire, P., Maris, T., Azémar, F., Ovaert, J., Buffan-Dubau, E., Kromkamp, J.C., Sossou, A.C., Prygiel, J., Spronk, G., Lamothe, S., Ouddane, B., Rabodonirina, S., Net, S., Dumoulin, D., Peene, J., Souissi, S., Tackx, M., 2017. Test of some ecological concepts on the longitudinal distribution of zooplankton along a lowland water course. *Hydrobiologia* 802, 175–198. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3256-6>

Le Noë, J., Billen, G., Esculier, F., Garnier, J., 2018. Long-term socioecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows in French regions from 1852 to 2014. *Agric. Ecosyst. Environ.* 265, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.006>

Legrand, E., Forget-Leray, J., Dufлот, A., Olivier, S., Thomé, J.-P., Danger, J.-M., Boulangé-Lecomte, C., 2016. Transcriptome analysis of the copepod *Eurytemora affinis* upon exposure to endocrine disruptor pesticides: Focus on reproduction and development. *Aquat. Toxicol.* 176, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.04.010>

Lesourd, S., Lesueur, P., Fisson, C., Dauvin, J.-C., 2016. Sediment evolution in the mouth of the Seine estuary (France): A long-term monitoring during the last 150years. *Comptes Rendus Geosci.* 348, 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.08.001>

Lesueur, T., Boulangé-Lecomte, C., Restoux, G., Deloffre, J., Xuereb, B., Le Menach, K., Budzinski, H., Petrucciani, N., Marie, S., Petit, F., Forget-Leray, J., 2015. Toxicity of sediment-bound pollutants in the Seine estuary, France, using a *Eurytemora affinis* larval bioassay. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 113, 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.033>

Mengual, B., Hir, P., Cayocca, F., Garlan, T., 2017. Modelling Fine Sediment Dynamics: Towards a Common Erosion Law for Fine Sand, Mud and Mixtures. *Water* 9, 564. <https://doi.org/10.3390/w9080564>

Michalec, F.-G., Fouxon, I., Souissi, S., Holzner, M., 2017. Zooplankton can actively adjust their motility to turbulent flow. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, E11199–E11207. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708888114>

Michalec, F.-G., Holzner, M., Barras, A., Lacoste, A.-S., Brunet, L., Lee, J.-S., Slomianny, C., Boukherroub, R., Souissi, S., 2017b. Short-term exposure to gold nanoparticle suspension impairs swimming behavior in a widespread calanoid copepod. *Environ. Pollut.* 228, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.084>

Morelle, J., Claquin, P., 2018. Electron requirements for carbon incorporation along a diel light cycle in three marine diatom species. *Photosynth. Res.* 137, 201–214. <https://doi.org/10.1007/s11120-018-0491-2>

Morelle, J., Orvain, F., Claquin, P., 2018a. A simple, user friendly tool to readjust raw PAM data from field measurements to avoid over- or underestimating of microphytobenthos photosynthetic parameters. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 503, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2018.02.007>

Morelle, J., Schapira, M., Claquin, P., 2017. Dynamics of phytoplankton productivity and exopolysaccharides (EPS and TEP) pools in the Seine Estuary (France, Normandy) over tidal cycles and over two contrasting seasons. *Mar. Environ. Res.* 131, 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.09.007>

Morelle, J., Schapira, M., Françoise, S., Courtay, G., Orvain, F., Claquin, P., 2018b. Dynamics of exopolymeric carbon pools in relation with phytoplankton succession along the salinity gradient of a temperate estuary (France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 209, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.05.008>

Morelle, J., Schapira, M., Orvain, F., Riou, P., Lopez, P.J., Pierre-Duplessix, O., Rabiller, E., Maheux, F., Simon, B., Claquin, P., 2018c. Annual Phytoplankton Primary Production Estimation in a Temperate Estuary by Coupling PAM and Carbon Incorporation Methods. *Estuaries Coasts* 41, 1337–1355. <https://doi.org/10.1007/s12237-018-0369-8>

Niquil, N., Baeta, A., Marques, J., Chaalali, A., Lobry, J., Patrício, J., 2014. Reaction of an estuarine food web to disturbance: Lindeman's perspective. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 512, 141–154. <https://doi.org/10.3354/meps10885>

Pan, Y.-J., Souissi, A., Hwang, J.-S., Souissi, S., 2017. Artificially cold-induced quiescent egg viability of the tropical copepod *Acartia bilobata* (Copepoda, Calanoida). *Aquac. Res.* 48, 1974–1979. <https://doi.org/10.1111/are.12968>

Petit, F., Clermont, O., Delannoy, S., Servais, P., Gourmelon, M., Fach, P., Oberlé, K., Fournier, M., Denamur, E., Berthe, T., 2017. Change in the Structure of *Escherichia coli* Population and the Pattern of Virulence Genes along a Rural Aquatic Continuum. *Front. Microbiol.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00609>

Pezy, J.-P., Baffreau, A., Dauvin, J.-C., 2017. What are the factors driving long-term changes of the suprabenthos in the Seine estuary? *Mar. Pollut. Bull.* 118, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.008>

Pezy, J.-P., Raoux, A., Timsit, O., Dauvin, J.-C., 2018. A rapidly established population of the invader mysid *Neomysis americana* (S.I. Smith, 1873) in the Seine estuary. *Mar. Biodivers.* <https://doi.org/10.1007/s12526-018-0914-5>

Romero, E., Garnier, J., Billen, G., Ramarson, A., Riou, P., Le Gendre, R., 2018. Modeling the biogeochemical functioning of the Seine estuary and its coastal zone: Export, retention, and transformations: Modeling export and retention in the Seine estuary. *Limnol. Oceanogr.* <https://doi.org/10.1002/lno.11082>

Romero, E., Garnier, J., Lassaletta, L., Billen, G., Le Gendre, R., Riou, P., Cugier, P., 2013. Large-scale patterns of river inputs in southwestern Europe: seasonal and interannual variations and

potential eutrophication effects at the coastal zone. *Biogeochemistry* 113, 481–505. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9778-0>

Romero, E., Le Gendre, R., Garnier, J., Billen, G., Fisson, C., Silvestre, M., Riou, P., 2016. Long-term water quality in the lower Seine: Lessons learned over 4 decades of monitoring. *Environ. Sci. Policy* 58, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.016>

Roy, M.L., Le Pichon, C., 2017. Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: A case study for prioritizing restoration actions targeting brown trout. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 27, 927–937. <https://doi.org/10.1002/aqc.2786>

Sahin, C., Verney, R., Sheremet, A., Voulgaris, G., 2017. Acoustic backscatter by suspended cohesive sediments: Field observations, Seine Estuary, France. *Cont. Shelf Res.* 134, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.003>

Schulz, E., Grasso, F., Le Hir, P., Verney, R., Thouvenin, B., 2018. Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 2. Numerical Modeling of Sediment Fluxes and Budgets Under Typical Hydrological and Meteorological Conditions: Estuarine sediment fluxes and budgets. *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 578–600. <https://doi.org/10.1002/2016JC012638>

Souissi, A., Souissi, S., Hansen, B.W., 2016a. Physiological improvement in the copepod *Eurytemora affinis* through thermal and multi-generational selection. *Aquac. Res.* 47, 2227–2242. <https://doi.org/10.1111/are.12675>

Souissi, A., Souissi, S., Hwang, J.-S., 2016b. Evaluation of the Copepod *Eurytemora affinis* Life History Response to Temperature and Salinity Increases. *Zool. Stud.* 9.

Sukhikh, N., Souissi, A., Souissi, S., Winkler, G., Castric, V., Holl, A.-C., Alekseev, V., 2016. Genetic and morphological heterogeneity among populations of *Eurytemora affinis* (Crustacea: Copepoda: Temoridae) in European waters. *C. R. Biol.* 339, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2016.03.004>

Tecchio, S., Chaalali, A., Raoux, A., Tous Rius, A., Lequesne, J., Girardin, V., Lassalle, G., Cachera, M., Riou, P., Lobry, J., Dauvin, J.-C., Niquil, N., 2016. Evaluating ecosystem-level anthropogenic impacts in a stressed transitional environment: The case of the Seine estuary. *Ecol. Indic.* 61, 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.036>

Tecchio, S., Rius, A.T., Dauvin, J.-C., Lobry, J., Lassalle, G., Morin, J., Bacq, N., Cachera, M., Chaalali, A., Villanueva, M.C., Niquil, N., 2015. The mosaic of habitats of the Seine estuary: Insights from food-web modelling and network analysis. *Ecol. Model.* 312, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.05.026>

Thibault, A., Derenne, S., Parlanti, E., Anquetil, C., Sourzac, M., Budzinski, H., Fuster, L., Laverman, A., Roose-Amsaleg, C., Viollier, E., Huguet, A., 2019. Dynamics of organic matter in the Seine Estuary (France): Bulk and structural approaches. *Mar. Chem.* 212, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2019.04.007>

Thorel, M., Claquin, P., Schapira, M., Le Gendre, R., Riou, P., Goux, D., Le Roy, B., Raimbault, V., Deton-Cabanillas, A.-F., Bazin, P., Kientz-Bouchart, V., Fauchot, J., 2017. Nutrient ratios influence variability in *Pseudo-nitzschia* species diversity and particulate domoic acid production in the Bay of Seine (France). *Harmful Algae* 68, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2017.07.005>

Yassine, M., Fuster, L., Dévier, M.-H., Geneste, E., Pardon, P., Grélard, A., Dufourc, E., Al Iskandarani, M., Aït-Aïssa, S., Garric, J., Budzinski, H., Mazellier, P., Trivella, A.S., 2018. Photodegradation of novel oral anticoagulants under sunlight irradiation in aqueous matrices. *Chemosphere* 193, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.036>

Zidour, M., Chevalier, M., Belguesmia, Y., Cudennec, B., Grard, T., Drider, D., Souissi, S., Flahaut, C., 2017. Isolation and Characterization of Bacteria Colonizing *Acartia tonsa* Copepod Eggs and Displaying Antagonist Effects against *Vibrio anguillarum*, *Vibrio alginolyticus* and Other Pathogenic Strains. *Front. Microbiol.* 8, 1919. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01919>

■ ■ ■ ■ ■ POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Hangar C – Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Bacq N., Olivier J.M. (Coord.), Berlincourt M., Billen G., Cachot J., Claquin P., Fisson C., Lemoine J.P., Lobry J., Muntoni M., Partanti E., Verney R., 2019, **Programme scientifique Seine-Aval 5. 2013-2018. Contexte et principaux acquis.** 110 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'événements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition. Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval : gipsa@seine-aval.fr

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

