



REPERE

COMPRENDRE - PARTAGER - RESTAURER

*Référentiel partagE sur les
Priorités de restauration des
fonctionnalitEs des milieux estuaRiEns
de la vallée de Seine-Aval*

Manuel MUNTONI

Décembre 2020



GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

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

MUNTONI Manuel. 2020. REPERE : Référentiel partagE sur les Priorités de restauration des fonctionnalitEs des milieux estuaRiEns de la vallée de Seine-Aval. Rapport réalisé par le GIP Seine-Aval. 94 pp.

Contributeurs :

Nicolas BACQ, Éric L'EBRELLEC, Cédric FISSON, Elise AVENAS, Jean- Philippe LEMOINE, Pascale VINCENT, Maud BERLINCOURT, Jérôme MORELLE (GIP Seine-Aval)

Arnaud DIARRA, Hélène REGNOUARD (DREAL Normandie)

Géraud RANVIER (PNRBSN)

Structures ayant participé à la révision du document (en ordre alphabétique) : Agence de l'Eau Seine Normandie, CEREMA, Conservatoire des Espaces Naturels Haute-Normandie, Conservatoire du Littoral, DREAL, HAROPA, Maison de l'Estuaire, Office Français de la Biodiversité, Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine, Syndicat des Bassins Versants Cailly-Aubette-Robec

Le projet REPERE a été réalisé sous le pilotage et en concertation avec la
DREAL Normandie



En collaboration avec le **Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine**



Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS	4
SYNTHESE	7
1. CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL	9
1.1 Problématique générale	9
1.2 Le projet REPERE	10
2. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE	12
2.1 La démarche scientifique et technique du projet REPERE	12
2.2 Définition de l'emprise d'étude	14
2.3 Méthodologie et fonctions ciblées dans le diagnostic	15
2.3.1 Sélection des fonctions à prendre en compte	16
2.3.2 Identification des altérations du fonctionnement écologique	19
2.3.3 Formalisation du diagnostic global	20
2.4 Mise en place du référentiel partagé des orientations prioritaires de restauration	20
3. QUELLES ALTERATIONS ECOLOGIQUES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE CONSTATE-T-ON ?	21
3.1 Diagnostic écologique par fonction	21
3.1.1 Fonctions biogéochimiques et de productivité primaire	21
3.1.2 Fonction de soutien au cycle de vie des espèces	27
3.2 Quelle est l'évolution des surfaces des milieux estuariens ?	34
3.3 Quelles sont les pressions à l'origine des principales altérations écologiques de l'estuaire de la Seine ?	37
A. Aménagements à l'échelle du lit mineur	40
B. Aménagement à l'échelle de la plaine alluviale	50
C. Usages et pratiques à l'échelle du bassin versant	51

4. ORIENTATIONS POUR AMELIORER LE FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE	57
4.1 Les grandes orientations préconisées pour la restauration de l'estuaire	57
O.1. Diversification des habitats aquatiques du lit mineur	59
O.2. Préservation, récréation et réhabilitation des vasières et de leur accessibilité	62
O.3. Réhabilitation de la continuité latérale entre lit mineur et les zones humides du lit majeur	64
O.4. Préservation et réhabilitation des zones humides de la plaine alluviale	68
O.5. Maitrise des apports en contaminants chimiques et en macro/microplastiques	69
4.2 Synthèse graphique des orientations de restauration prioritaires par grandes secteurs	72
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	76
LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79
ANNEXES	83

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Degré d'anthropisation de la portion terrestre de l'estuaire de la Seine (source : Theobald <i>et al.</i> , 2020)	10
Figure 2 : Intégration de la démarche REPERE dans le cadre de la planification de la restauration écologique	13
Figure 3 : Estuaire de la Seine	15
Figure 4 : Schéma résumant les étapes menées pour la formalisation du diagnostic	15
Figure 5 : Fonctionnement écologique estuarien et principales fonctions qui le composent	16
Figure 6 : Production primaire moyenne nette de différents biomes	18
Figure 7 : Evolution spatio-temporelle des concentrations en chlorophylle de Paris (pk 0) à Honfleur (pk 350) (source : Garnier <i>et al.</i> 2018, Projet Seine-Aval 5 RESET)	21
Figure 8 : Evolution temporelle des concentrations en nitrates (NO ₃ ; mgN- NO ₃ /L) mesurées à Poses (en haut) et spatiale (en bas), de Paris (pk 0) à Honfleur (pk 350).	23
Figure 9 : Potentiel de séquestration du carbone organique dans les sols (modifiés depuis Chen <i>et al.</i> , 2018)	26
Figure 10. Représentation schématique des fonctions ciblées et espèces retenues pour le diagnostic des fonctions associées à l'ichtyofaune	28

Figure 11 : Configuration spatiale des principales unités fonctionnelles de l'estuaire de la Seine entre les années 1970 (occupation du sol 1973, bathymétrie 1975) et 2009.	35
Figure 12 : Evolution surfacique entre 1973 et 2009 des principales unités fonctionnelles de l'estuaire de la Seine (en haut) et changement d'affectation (en bas). Les variations surfaciques concernant les zones subtidales se réfèrent exclusivement à la portion aval de l'estuaire (aval du pk 345).	36
Figure 13 : Cartographie des secteurs identifiés dans le Tableau 3	37
Figure 14. Evolutions spatiales des zones subtidales et intertidales dans le secteur aval de l'estuaire de la Seine. Les pourcentages se réfèrent au temps d'émersion.	41
Figure 15. Nature des berges sur le linéaire de l'estuaire	43
Figure 16. Classification des berges sur la base de leur pente sur le linéaire de l'estuaire	44
Figure 17. Représentation de différents types de berge (naturelle - en haut - et artificialisée - en bas) et du gradient latéral constituant les zones riveraines	45
Figure 18. Variation du nombre d'îles dans les différents secteurs de l'estuaire à partir de 1750. Les surfaces relatives à chaque secteur sont reportées en format texte sur la barre correspondante (à gauche). Evolution de l'indice de tressage calculé pour les différents secteurs de l'estuaire de la Seine (à droite) d'après Fisson <i>et al.</i> (2014)	46
Figure 19. Volume des sédiments dragués lors des dragages d'entretien (source : Observatoire environnemental de l'estuaire de la Seine)	48
Figure 20. Bilan sédimentaire annuel des relations entre les dragages et les dynamiques hydro-morpho-sédimentaires (d'après Lemoine, 2020)	49
Figure 21. Détection et concentration moyenne des principaux pesticides et de leurs métabolites dans l'estuaire de la Seine entre 2013 et 2018	52
Figure 22. Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine.	53
Figure 23. Niveau de qualité de la matrice sédimentaire	54
Figure 24. Zones d'accumulation des macrodéchets en estuaire de Seine	55
Figure 25. Evolution de l'utilisation des engrais minéraux de 1960 à 2007 pour les 5 départements de Normandie (source : Garnier <i>et al.</i> 2018, Projet Seine-Aval 5 RESET)	56
Figure 26. A gauche. Trou de Seine directement connecté au fleuve. A droite. Trou de Seine déconnecté du fleuve. Schéma modifié depuis SAFEGE, HORIZONS, ECOSPHERE (2001)	60
Figure 27. Exemple de reconnexion d'une annexe hydraulique dans la Loire (source : http://zones-humides.org)	60
Figure 28. Travaux de restauration des annexes hydrauliques (lônes dans le secteur de Donzere) dans le cadre du plan de restauration du Rhône (crédit photo CNR)	61
Figure 29. Illustration conceptuelle de l'intérêt écologique de la structuration spatiale des zones intertidales à l'échelle de l'estuaire et locale (10-100m) (source Teichert <i>et al.</i> , 2018)	64
Figure 30. Exemple de gradient d'une mosaïque latérale dans le secteur de Petiville	66

Figure 31. Exemple de restauration du gradient latérale par suppression de digue dans l'estuaire de la Seine à Lillebonne 67

Figure 32. Exemple de restauration d'une zone humide d'un ancien méandre du Couesnon, l'anse de Moidrey, anciennement poldérisé 68

Figure 33. Etapes de l'identification des sites ateliers de restauration et modalités d'accompagnement scientifique 77

SYNTHESE

L'anthropisation de l'estuaire de la Seine a conduit à une profonde modification des milieux estuariens, altérant la capacité de l'écosystème à supporter ses propres fonctions écologiques. Cependant, la restauration des habitats estuariens est confrontée au déficit de vision globale sur le degré d'altération des fonctions écologiques. Ceci représente un obstacle pour la définition d'objectifs écologiques clairs et rigoureux et donc pour l'élaboration d'une stratégie partagée de restauration à l'échelle de l'estuaire.

Le projet REPERE, piloté par la DREAL Normandie, vise à construire un cadre de réflexion partagé pour la mise en œuvre de mesures de préservation et de restauration de la fonctionnalité écologique de l'estuaire de la Seine. Le GIP Seine-Aval est missionné pour réaliser un diagnostic écologique support à la mise en place d'un référentiel d'orientations prioritaires de restauration écologique. Pour faciliter la mise en application de ce référentiel, la DREAL Normandie mène, en lien avec le volet scientifique, des réflexions destinées à clarifier les points complexes de la réglementation relative à la restauration écologique des milieux estuariens.

La disponibilité de données à une échelle cohérente avec les objectifs de l'étude et leur représentativité pour l'analyse des différents habitats a orienté les choix méthodologiques du volet scientifique. Cette partie du travail s'est ainsi focalisée sur : i) le rôle épuratoire de l'estuaire, notamment les cycles biogéochimiques (N, P, C) et leur interaction avec la productivité primaire, et ii) la capacité d'accueil de l'estuaire vis-à-vis de l'ichtyofaune et de l'avifaune. En parallèle, un travail visant à déterminer l'évolution des surfaces des principales unités fonctionnelles (typologie de milieux naturels) de l'estuaire a été mené. La synthèse des diagnostics des différentes fonctions permet d'identifier les principales pressions à l'origine des altérations écologiques constatées.

Une liste d'orientations de restauration par grand secteur géographique a été proposée. Ces orientations ont pour but de résorber les altérations écologiques induites par les pressions identifiées. Elles constituent un socle pour formaliser le référentiel partagé de priorités de restauration. Elles sont regroupées en 5 thématiques principales et concernent plus précisément : i) la diversification des habitats aquatiques du lit mineur, ii) la préservation et la réhabilitation des vasières et de leur accessibilité, iii) la restauration des gradients d'habitats intertidaux et l'amélioration de la continuité latérale, iv) la préservation et la restauration des milieux humides de la plaine alluviale et v) la limitation des pressions polluantes

Sur la base des altérations affectant les différents secteurs de l'estuaire, une spatialisation des priorités est proposée. Ainsi, les maîtres d'ouvrage peuvent définir la ou les mesure(s) adaptée(s) aux caractéristiques des sites à réhabiliter/restaurer en s'inscrivant dans les priorités de restauration de l'estuaire.

La mise en place d'expérimentations de restauration apparaît comme une étape nécessaire dans la mise en œuvre de ces orientations. Ces expérimentations doivent permettre l'analyse

scientifique de l'efficacité des types de mesures de restauration mises en œuvre. L'analyse permettra de minimiser les incertitudes et les potentiels échecs et *in fine*, préciser les objectifs de restauration pour l'estuaire. En lien avec ces orientations, des sites ateliers de restauration ont été identifiés en accord avec les porteurs de projet.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL

1.1 Problématique générale

Les estuaires sont des milieux de transition extrêmement productifs d'un point de vue biologique (Beck *et al.*, 2001). Ils présentent des dynamiques physico-chimiques et écologiques très spécifiques et complexes résultant de la rencontre entre forçages terrestres et marins. Ces milieux se caractérisent par des gradients (salinité, marée etc.), qui donnent lieu à une mosaïque de physiotopes et d'habitats très diversifiés, aussi bien longitudinalement que transversalement (Elliott and Hemingway, 2008). La fonctionnalité estuarienne s'exprime à travers l'hétérogénéité et la complémentarité de ces mosaïques d'habitats. Plusieurs fonctions écologiques sont associées à chaque habitat (ex. fonction épuratrice, fonction de nourricerie ou de reproduction pour les espèces) et aux processus qui s'y déroulent (cycles biogéochimiques, productivité, etc.). Ces fonctions rendent des services écosystémiques essentiels (ex. bonne qualité des eaux, reconstitution des stocks des poissons, diminution des risques d'inondation etc.).

Or, de par leur emplacement stratégique et en raison de leur productivité, les estuaires ont été fortement anthropisés au cours des deux derniers siècles (Sheaves *et al.*, 2015). D'intenses modifications ont été apportées à la structure des habitats, afin de tisser les trames socio-économiques des territoires (Teichert *et al.*, 2016). Un cas particulièrement intéressant dans le contexte français est l'estuaire de la Seine. Malgré un niveau d'altération anthropique parmi les plus élevés d'Europe (Theobald *et al.*, 2020, Figure 1), cet estuaire présente des enjeux écologiques considérables (Dauvin and Desroy, 2005). L'anthropisation de l'estuaire de la Seine, démarrée dès le 19^{ème} siècle, a conduit à une profonde modification des milieux estuariens, altérant ainsi la capacité de l'écosystème à supporter ses propres fonctions écologiques. Restaurer ces fonctions fait partie des priorités stratégiques pour le développement de ce territoire. Cependant, la restauration des habitats estuariens est toutefois confrontée au manque d'une vision globale sur le degré d'altération des fonctions écologiques. Ceci représente un obstacle pour la définition d'objectifs écologiques clairs et rigoureux et donc pour l'élaboration d'une stratégie partagée de restauration à l'échelle de l'estuaire.

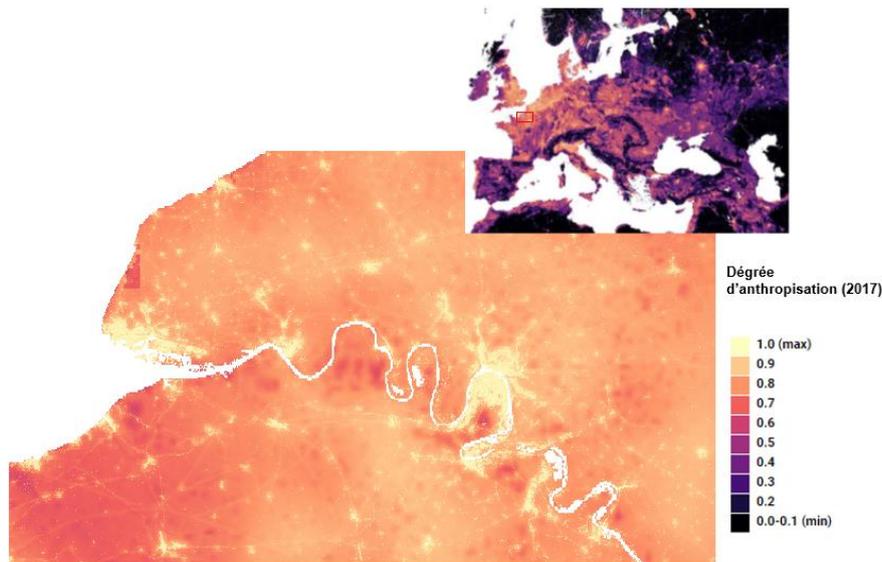


Figure 1 : Degré d'anthropisation de la portion terrestre de l'estuaire de la Seine (source : Theobald *et al.*, 2020)

1.2 Le projet REPERE

Afin de répondre à cette problématique, le projet REPERE aspire à fournir un cadre clair pour favoriser la réalisation et la gestion de projets de restauration des milieux estuariens de la Seine. Sur la base des informations actuellement disponibles, la finalité de ce travail est de **fournir une vision globale et partagée de l'altération des fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine afin d'établir une priorisation des actions de préservation et de restauration à mener.**

La création d'un référentiel partagé des priorités de restauration représente le premier pas pour mettre en place une stratégie de préservation et de restauration écologique globale du territoire estuarien, en cohérence avec les spécificités de ce socio-écosystème.

La DREAL Normandie assure le pilotage général de ce projet, réalisé en large concertation avec de nombreux partenaires afin de **formaliser, organiser et partager les connaissances et les outils utiles à la mise en œuvre d'une stratégie globale de restauration.** Pour répondre à ces objectifs le projet a été articulé en deux démarches complémentaires :

- Une **démarche réglementaire** pilotée par la DREAL Normandie. Elle concerne l'établissement de lignes directrices adaptées aux particularités estuariennes pour l'application du cadre réglementaire de la restauration dans le cadre des politiques de protection des milieux naturels terrestres, aquatiques et marins. La vocation de la démarche réglementaire est également **d'apporter des réponses aux questions récurrentes des maîtres d'ouvrage de projets de restauration écologique** dans

l'estuaire de la Seine. Elle doit ainsi **faciliter la réalisation des projets** au regard des orientations mises en avant par la démarche scientifique. Pour cela, la DREAL Normandie et ses partenaires entendent communiquer sur i) les réglementations et doctrines existantes applicables sur le territoire de l'estuaire de la Seine, ii) sur les outils mobilisables en matière d'évaluation de gains et de pertes écologiques, iii) sur les particularités des procédures à respecter dans le cas de travaux destinés à répondre aux priorités de restauration des fonctions écologiques de l'estuaire de la Seine établies par le projet REPERE.

- Une **démarche scientifique et technique** pilotée par le GIP Seine-Aval. Elle accompagne la démarche réglementaire. Sa finalité est de **fournir des orientations en matière de préservation et de restauration de la fonctionnalité écologique estuarienne** et **d'obtenir des retours d'expérience sur l'efficacité des mesures de restauration des habitats estuariens**.

La démarche scientifique et technique du projet REPERE prévoit :

- i) Le **partage d'un référentiel sur les priorités de préservation et restauration des habitats estuariens** afin de répondre aux altérations constatées (**diagnostic de la fonctionnalité estuarienne basé sur les informations actuellement disponibles**)
- ii) La réalisation de retours d'expérience d'ordre scientifique à propos de la restauration au travers de **sites ateliers expérimentaux** en estuaire de Seine.



2. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

2.1 La démarche scientifique et technique du projet REPERE

L'objectif de cette démarche est de **fournir les connaissances scientifiques pour la définition d'objectifs de restauration** et de méthodes de suivis et d'évaluation des mesures mises en œuvre. L'approche fonctionnelle des habitats estuariens sera prioritairement privilégiée dans la définition des orientations de restauration, permettant une amélioration globale de la fonctionnalité estuarienne. Afin de répondre aux objectifs du projet REPERE, la démarche scientifique et technique s'articule en deux volets ([Figure 2](#)) :

- **Volet 1. Création du référentiel partagé** : la définition d'orientations prioritaires de préservation et de restauration des fonctions écologiques. Ce travail repose sur un diagnostic écologique intégrant **l'analyse des relations entre les facteurs structurant les habitats estuariens et les fonctions écologiques associées**. Sur la base du niveau d'altération des fonctions écologiques étudiées, un référentiel des priorités en matière de préservation et restauration écologique est formalisé et partagé.
- **Volet 2. Organisation des sites atelier** : Ce volet prévoit la mise en place et l'organisation de sites ateliers expérimentaux de la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine, dans une logique de recherche-action. Les objectifs sont i) d'identifier des pratiques de mise en œuvre de mesures de restauration pertinentes par rapport aux altérations constatées du fonctionnement écologique ii) de mettre en œuvre des méthodologies de suivi et d'évaluation des mesures de restauration qui permettront *in fine* de mieux calibrer les objectifs de restauration pour l'estuaire. Cette partie du projet se déroule à une échelle plus locale, tout en visant des retours d'expérience mobilisables à des échelles plus larges. D'un point de vue scientifique, ce volet prévoit i) le test des hypothèses d'amélioration du fonctionnement écologique (ex. quelles sont les caractéristiques du milieu à rechercher pour augmenter la productivité des vasières ?), ii) l'évaluation de l'efficacité des mesures (court, moyen, long terme) et iii) la formalisation et le partage des retours d'expérience adaptés au contexte de l'estuaire de Seine.



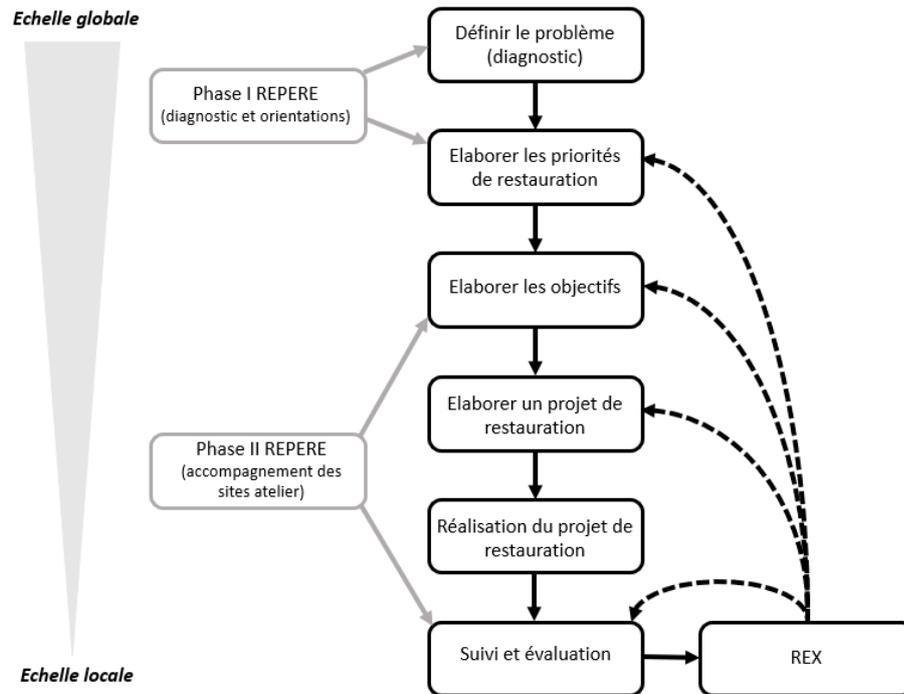


Figure 2 : Intégration de la démarche REPERE dans le cadre de la planification de la restauration écologique

Dans ce contexte, il paraît nécessaire de rappeler que dans le présent document, **le terme restauration écologique sera employé au sens large pour indiquer toute mesure visant à améliorer l'état écologique des milieux estuariens afin d'augmenter leur contribution au fonctionnement estuarien global** (cf [Encart 1 en annexe](#)). En accord avec la littérature récente ([Palmer *et al.*, 2016](#)) et l'avis du Conseil Scientifique de l'Estuaire ([CSES, avis rédigé le 21/11/2018](#)) « **le choix d'un référentiel passé de l'estuaire de la Seine n'est pas adapté pour la définition des objectifs de restauration, le système ayant connu des changements brutaux (« shifts »), qui rendent l'approche par un unique modèle inapplicable** ». Les objectifs de la restauration ne sont pas de retrouver l'état d'origine pré-perturbation et les références passées seront seulement utilisées afin de comprendre la trajectoire d'évolution de l'estuaire. L'analyse de périodes de référence permettra d'obtenir des informations sur les fonctions de l'écosystème que l'on souhaite restaurer, permettant de mieux mesurer l'adéquation entre les propositions formulées et le diagnostic de l'état actuel ([Higgs *et al.*, 2014](#)). Le terme **altération du fonctionnement écologique** sera employé ici pour définir la modification, la dégradation, ou la régression des habitats et des fonctions engendrés par des impacts anthropiques (ex. réduction d'effectifs dans les peuplements estuariens, changement dans la distribution des espèces, réduction ou fragmentation de l'aire de répartition, augmentation de certains contaminants ou nutriments, etc.).

Cependant, la détermination des facteurs limitant le bon déroulement du fonctionnement estuarien et l'identification des leviers d'action pour répondre à la dégradation de ces fonctions, se révèlent être un exercice extrêmement complexe. L'une des principales limites est la disponibilité de connaissances détaillées pour décrire le fonctionnement d'un système si complexe et vaste. A la complexité intrinsèque de ce système, s'ajoutent les effets des pressions anthropiques qui impactent le niveau d'expression de la fonctionnalité estuarienne (cf Encart 1).

Ce travail constitue une étape de synthèse et de formalisation des connaissances qui sera améliorée en continue par intégration des nouvelles connaissances au fur et à mesure de leur disponibilité. Ceci permettra d'étendre le diagnostic à un spectre de fonctions et d'habitats pour lesquels le déficit de connaissances ne permet pas aujourd'hui de fournir des informations robustes à l'échelle de l'estuaire.

Les informations fournies ici sont établies dans une perspective de vision globale de l'estuaire. Les orientations en matière de restauration qui sont proposées sont des principes dont l'application est valable sur de grands secteurs. Elles sont établies dans un objectif strictement écologique. Les contraintes liées aux risques (ex. inondations) et aux usages ne sont pas prises en compte et devront être intégrées à l'échelle des différents projets de restauration.

2.2 Définition de l'emprise d'étude

En suivant la définition de [Dyer \(1997\)](#), un estuaire se définit comme « *une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte, se prolongeant dans la rivière jusqu'à la limite de l'influence tidale, à l'intérieur de laquelle l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant* ». Ainsi, l'estuaire de la Seine représente les 170 derniers kilomètres du fleuve allant du barrage de Poses en amont à la partie orientale de la baie de Seine en aval (limite nord : latitude du Cap de la Hève ; limite ouest : méridien de Ouireham). L'estuaire intègre transversalement les milieux adjacents correspondant aux zones intertidales et humides, ainsi que les nappes phréatiques. **Dans le cadre du projet REPERE, le travail s'est focalisé principalement sur les habitats du lit mineur et de la plaine alluviale de l'estuaire de la Seine (Figure 3).**



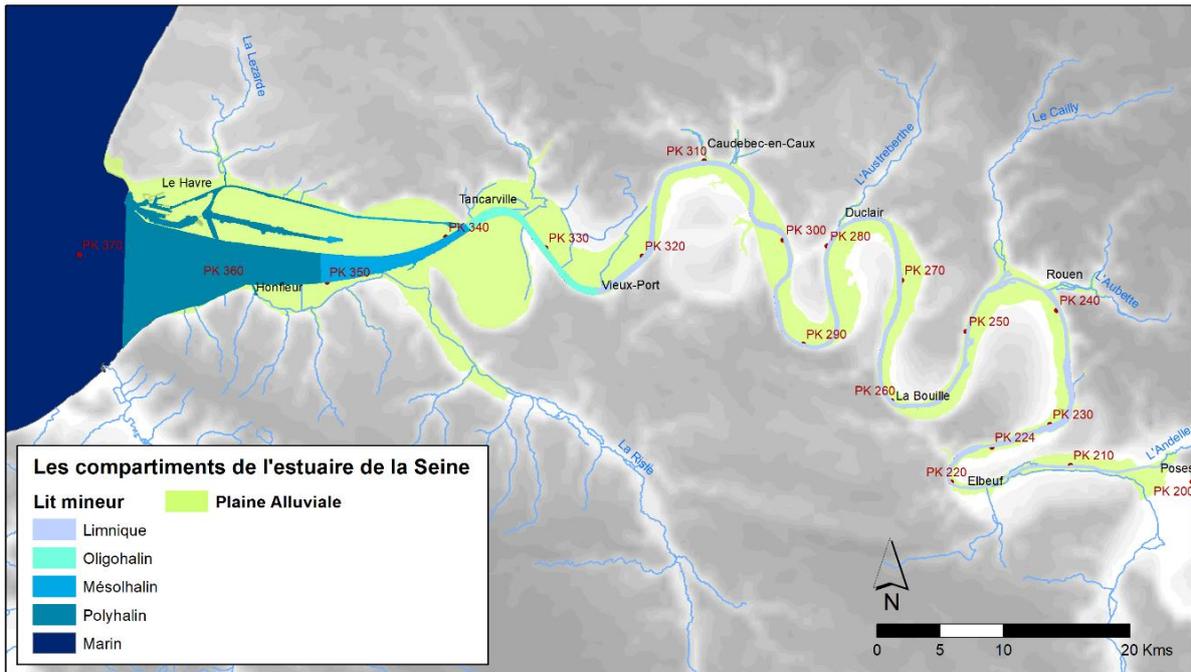


Figure 3 : Estuaire de la Seine

2.3 Méthodologie et fonctions ciblées dans le diagnostic

La formalisation du diagnostic a été articulée en plusieurs étapes (Figure 4).

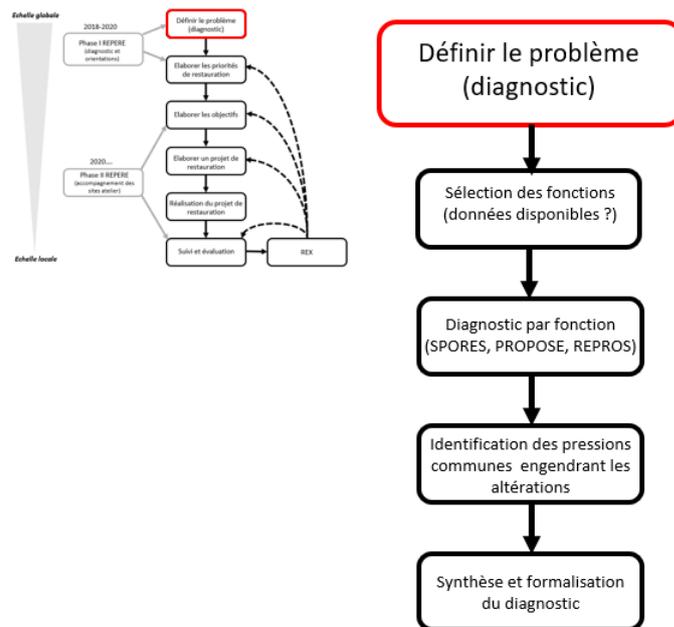


Figure 4 : Schéma résumant les étapes menées pour la formalisation du diagnostic

2.3.1 Sélection des fonctions à prendre en compte

Les estuaires, de par les gradients qui les caractérisent, sont le support d'une grande diversité de **physiotopes** (structures physico-chimiques de l'habitat) et d'**écotones** (zones de transition entre deux écosystèmes ou, sur une plus petite échelle, entre deux physiotopes). Ces gradients se structurent sur le plan longitudinal (de l'aval vers l'amont et les confluences), latéral (du lit mineur au lit majeur) et vertical de l'estuaire (du fond jusqu'à la surface de l'eau). Le principe du fonctionnement de ces milieux réside dans les liens entre les différents attributs physico-chimiques caractérisant ces physiotopes, les habitats et les communautés biologiques (Wolanski and Elliott, 2016). Le grand nombre et l'intensité des interactions et réactions (processus) qui existent entre les compartiments biotiques et abiotiques assurent donc la réalisation des fonctions écologiques de l'estuaire et en déterminent sa fonctionnalité écologique globale (Figure 5).

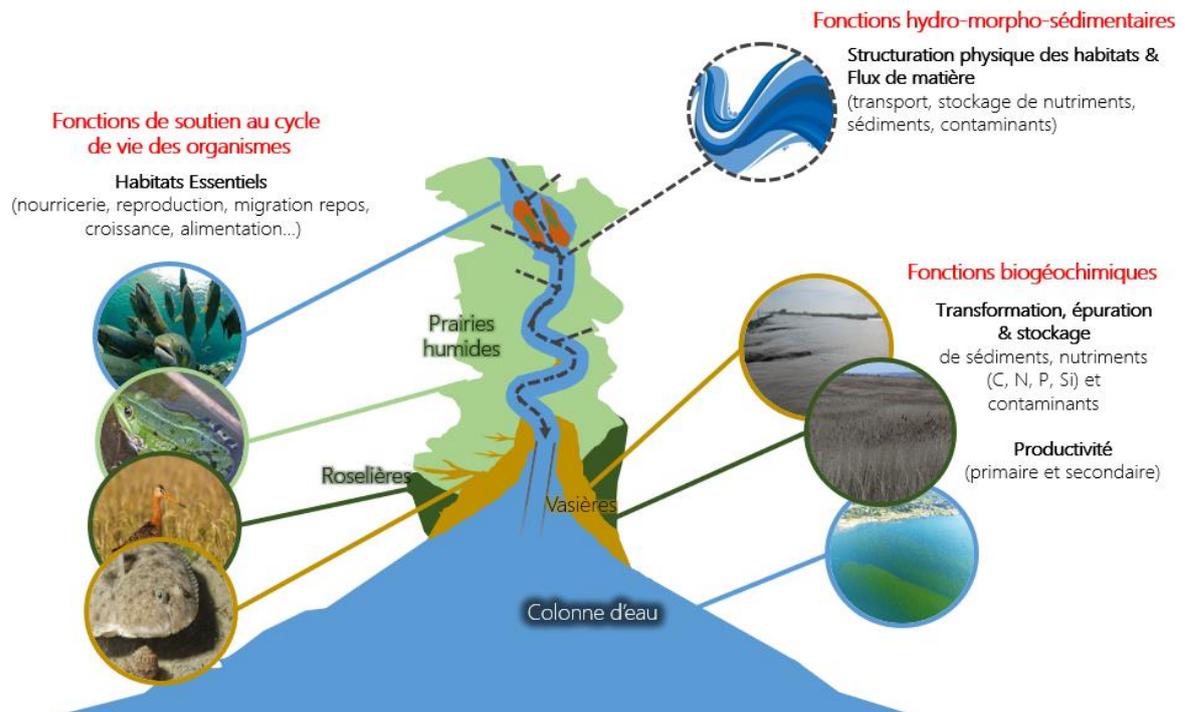


Figure 5 : Fonctionnement écologique estuarien et principales fonctions qui le composent

Pour réaliser le diagnostic écologique, les principaux acteurs du territoire susceptibles de fournir des informations pouvant l'alimenter ont été consultés (Tableau 6 en annexe). Le nombre de processus hydrologiques et écologiques soutenant le fonctionnement estuarien qu'il faudrait prendre en compte dans le diagnostic est important. L'état de l'art et la nature des informations mobilisables nous ont conduit à cibler certaines fonctions écologiques. Ainsi, sur la base des **informations disponibles et mobilisables**, le diagnostic écologique a été structuré autour des groupes de fonctions reportés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Liste des fonctions retenues pour la formalisation du diagnostic

Fonctions biogéochimiques et productivité primaire	<p>Effet filtre</p> <p>Productivité Primaire</p> <p>Stockage C</p>				
Fonction de soutien au cycle de vie des organismes	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Ichtyofaune</td> <td> <p>Migration et reproduction</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Avifaune</td> <td> <p>Nidification</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p> </td> </tr> </table>	Ichtyofaune	<p>Migration et reproduction</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p>	Avifaune	<p>Nidification</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p>
Ichtyofaune	<p>Migration et reproduction</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p>				
Avifaune	<p>Nidification</p> <p>Alimentation et croissance</p> <p>Refuge et repos</p>				

Les fonctions **biogéochimiques** comprennent tous les processus permettant la transformation de la matière et de l'énergie, voire des contaminants, en d'autres termes la « **capacité épuratrice** » de l'estuaire et son rôle de « filtre ». Ce groupe de fonctions inclut les processus cycliques d'absorption, de transformation, de transfert et de recyclage de la matière organique et minérale, sous forme dissoute ou particulaire. En créant un lien trophique entre les composantes abiotiques et biotiques, ces fonctions sont à la base des réseaux trophiques de l'estuaire. Les principaux nutriments (carbone, azote, phosphore, silice) sont assimilés par les organismes photosynthétiques (principalement via la production primaire). Ces organismes soutiennent l'ensemble des réseaux trophiques en produisant le stock de matière et d'énergie (production primaire) nécessaire au développement de l'ensemble des compartiments trophiques et à la boucle bactérienne (Kaiser *et al.*, 2011). En raison des apports terrestres en éléments nutritifs, les estuaires sont considérés parmi les biomes les plus productifs, bien qu'ils ne couvrent que 3% de la surface terrestre (Figure 6).

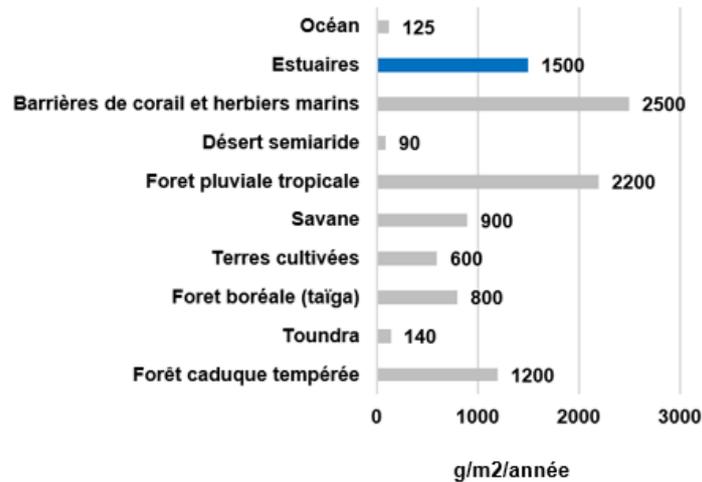


Figure 6 : Production primaire moyenne nette de différents biomes

De par leur mosaïque d'habitats et leur productivité, les estuaires jouent un rôle primordial dans le **cycle de vie de nombreux organismes**. Les milieux estuariens représentent des **habitats essentiels** fournissant les éléments nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques et trophiques, de repos et refuge, de reproduction et de migration de ces organismes. En raison de la complémentarité des habitats qu'ils utilisent et de leurs besoins écologiques, deux groupes taxonomiques complémentaires ont été retenus pour le diagnostic : l'ichtyofaune et l'avifaune.

Ainsi, l'étude des **peuplement piscicoles** a été abordée avec la prise en compte d'un panel d'espèces indicatrices qui utilisent l'estuaire pour tout ou partie de leur cycle de vie, notamment en tant qu'habitat de croissance et d'alimentation (nourricerie), de reproduction ou de migration. Différentes guildes (marines, résidentes estuariennes, dulçaquicoles et amphihalines) ont été prises en compte pour permettre l'étude des différents secteurs de l'estuaire. Ceci a permis de réaliser un diagnostic incluant l'évaluation de la qualité chimique (eaux et sédiments), de leur arrangement spatial, de la disponibilité surfacique et trophique, et de la continuité écologique (longitudinale et latérale) des habitats aquatiques.

De même, l'étude des **dynamiques ornithologiques** de l'estuaire a permis d'obtenir des informations sur plusieurs aspects de la fonctionnalité des habitats estuariens, notamment pour le lit majeur. En effet, les oiseaux se situent aux niveaux supérieurs des chaînes trophiques et leur cycle de vie est très dépendant du fonctionnement global des écosystèmes dans lesquels ils vivent. Les oiseaux sont des organismes à métabolisme coûteux en énergie et beaucoup d'espèces ont besoin d'exploiter des milieux productifs à un moment de leur cycle annuel. Les estuaires sont alors particulièrement recherchés. Grâce à la diversité spécifique des oiseaux utilisant l'estuaire pour tout ou partie de leur cycle de vie, il est possible d'obtenir des résultats sur l'ensemble des habitats d'intérêt.

Les fonctions biogéochimiques (effet filtre, stockage du carbone et productivité primaire) et la capacité d'accueil de l'estuaire vis-à-vis de l'ichtyofaune et de l'avifaune ont été utilisées pour alimenter le diagnostic de la fonctionnalité écologique de l'estuaire de la Seine. Cette sélection, principalement déterminée par la disponibilité et la couverture spatio-temporelle des données, renseigne sur le fonctionnement écologique des principales unités fonctionnelles estuariennes. Ce travail permet ainsi de fournir des indications sur les principales dynamiques écologiques associées aux milieux estuariens de la Seine. Cependant, des études complémentaires pourront permettre d'augmenter la robustesse du diagnostic et affiner les orientations, en intégrant de nouvelles fonctions à ce dernier. C'est par exemple les cas des études floristiques à l'échelle de l'estuaire. Actuellement, les informations concernant ce compartiment sont encore incomplètes, hétérogènes et fragmentaires, rendant difficile leur intégration dans le diagnostic.

2.3.2 Identification des altérations du fonctionnement écologique

Dans le but d'identifier les altérations du fonctionnement écologique de l'estuaire et de déterminer les facteurs qui les provoquent, l'étude des trajectoires d'évolution de l'estuaire a été conduite sur :

- l'évolution spatio-temporelle des principales unités fonctionnelles estuariennes (milieux naturels) ;
- les flux de nutriments et leur évolution spatio-temporelle ;
- les abondances, la présence et la répartition des espèces indicatrices ou des groupes fonctionnels.

La recherche des leviers d'action s'est appuyée sur une synthèse des liens entre les pressions, capables d'altérer les physiotopes au niveau structurel (physique) et qualitatif (chimique), et les altérations qu'ils induisent sur le fonctionnement écologique des habitats estuariens. Ainsi, les connaissances sur le **fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire** (dynamiques hydro-sédimentaires donc le transport d'eau et de sédiments et les structures spatiales d'habitat créées par ces patrons de transport) ont été intégrées dans l'étude afin de comprendre les causes structurelles déterminant l'altération des fonctions écologiques. Les caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sont en effet déterminantes dans le processus de structuration des différents **physiotopes**. Le physiotope représente l'ossature autour de laquelle les différentes niches écologiques et les habitats se répartissent, permettant ainsi l'installation de la composante biotique qui peut, à son tour, modifier la structure physique des habitats (ex. organismes bioingénieurs et bioturbateurs). A ce système d'interactions se cumulent les effets des pressions anthropiques et des changements induits sur les physiotopes. Ainsi, en accord avec le concept d'éco-hydrologie (Wolanski and Elliott, 2016), **l'identification des facteurs hydro-morpho-sédimentaires à l'origine des altérations structurelles du physiotope a permis de préconiser des orientations** intégrant ces leviers d'action.



2.3.3 Formalisation du diagnostic global

La formalisation du diagnostic global s'appuie sur trois démarches menées en parallèle :

- SPORES *Synthèse sur les nutriments et la PrOduction primaiRe dans l'Estuaire de la Seine* (resp. Jérôme MORELLE, GIP Seine-Aval)
- PROPOSE *Potentialités de RestauratiOn des habitats clés pour les POissons dans l'estuaire de la Seine* (resp. Manuel MUNTONI, GIP Seine-Aval)
- REPROS *RÉférentiel Partagé pour la Restauration des habitats essentiels pour les Oiseaux de l'estuaire de la Seine* (resp. Géraud RANVIER, Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande et Observatoire de l'avifaune)

L'analyse transversale des résultats des trois synthèses a permis de produire le diagnostic global répertoriant :

- Par secteur : les dysfonctionnements actuels, et les types d'habitat et fonction concernés.
- Les pressions, ainsi que les altérations induites par ces pressions

2.4 Mise en place du référentiel partagé des orientations prioritaires de restauration

Sur la base des informations issues du diagnostic, **les priorités de restauration ont été formalisées sous forme de grandes orientations thématiques**. Des échanges entre les différents collaborateurs du projet ont permis de définir ces grands axes d'orientations répondant aux dysfonctionnements principaux identifiés lors de la phase de diagnostic.

Afin de cibler précisément les différentes altérations du physiotope et diminuer les pressions sur les différents habitats, ces grandes orientations thématiques ont été déclinées sous forme de mesures plus spécifiques. **Cette structure hiérarchique des orientations a donc permis de définir les habitats types et les fonctions associées à préserver et restaurer**. Les grands secteurs de l'estuaire où ces mesures apparaissent prioritaires ont été identifiés.



3. QUELLES ALTERATIONS ECOLOGIQUES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE CONSTATE-T-ON ?

3.1 Diagnostic écologique par fonction

3.1.1 Fonctions biogéochimiques et de productivité primaire

Pour plus de détails, consulter le rapport SPORES (<https://www.seine-aval.fr/publication/etude-spores/>)

Les impacts des activités anthropiques sur les écosystèmes de l'estuaire de la Seine ont pris une ampleur considérable au cours du XX^{ème} siècle, en lien avec le développement industriel, de l'agriculture intensive auquel s'ajoute l'accroissement des populations et des aires urbaines sur l'ensemble du bassin versant. Face aux enjeux liés à la dégradation de la qualité des eaux, des stratégies de gestion telles que l'interdiction des triphosphates dans les lessives, le perfectionnement du traitement des eaux usées à la sortie de la mégalopole parisienne (station d'épuration Seine Aval) ou la maîtrise des rejets industriels ont été établies avec succès. Depuis les années 1980, une amélioration globale de la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine est ainsi observée.

Suite à ces mesures, la réduction considérable des apports en matière organique biodégradable et en sels nutritifs (en particulier des composés phosphorés) dans les eaux de la Seine a permis d'augmenter le taux d'oxygène dans l'eau. 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 des nutriments par les algues. La biomasse du phytoplancton a progressivement diminué tout au long du fleuve et très nettement dans la zone estuarienne après 2007 (Figure 7).

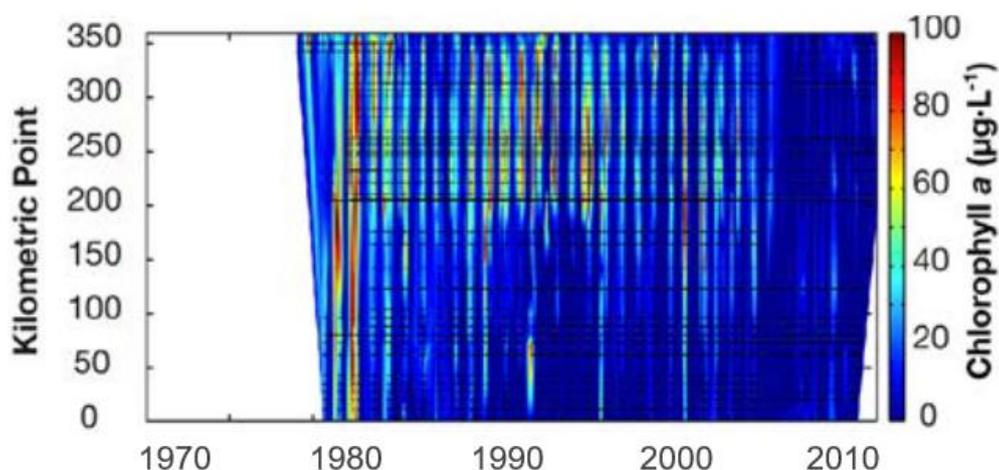


Figure 7 : Evolution spatio-temporelle des concentrations en chlorophylle de Paris (pk 0) à Honfleur (pk 350) (source : Garnier *et al.* 2018, Projet Seine-Aval 5 RESET)

Les tendances post-2000 sur l'évolution des composés azotés 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 (Figure 8). Ces évolutions sont à relier à l'augmentation de l'efficacité de la dénitrification au niveau de la station d'épuration d'Achères.

Cependant, les **apports de nitrates** (utilisés pour la fertilisation des zones agricoles, essentiellement NO_3 avec environ 81 500 tonnes/an transitant à Poses auxquels s'ajoutent les apports intra-estuariens) **restent à des niveaux trop élevés par rapport à la capacité d'épuration de l'estuaire. Il apparaît que l'estuaire a évolué d'un système limité par le silicium à un système caractérisé par un excès d'azote.** Les déséquilibres engendrés par l'excès d'azote sont potentiellement susceptibles de modifier l'état biologique de l'écosystème, en particulier la biomasse du phytoplancton, la composition des assemblages d'espèces et la dynamique du réseau trophique. Notamment, une partie des microalgues dont la croissance est favorisée par les apports en sels nutritifs, produisent des toxines qui contaminent les maillons supérieurs du réseau trophique et engendrent des interdictions de consommation des produits de la pêche. En baie de Seine, des manifestations d'une **eutrophisation côtière** sont régulièrement observées avec un fort **développement de la biomasse phytoplanctonique** (blooms) et des **efflorescences algales nuisibles**. Plusieurs épisodes de blooms sont ainsi observés tous les ans, généralement entre juin et septembre et majoritairement liés à des diatomées. Des efflorescences algales nuisibles sont également observées en baie de Seine. Elles sont le fait du développement de quelques espèces phytoplanctoniques qui émettent des phycotoxines qui s'accumulent dans les coquillages et qui peuvent être toxiques pour les consommateurs. Ces efflorescences algales nuisibles sont à relier à des paramètres environnementaux (température et salinité de l'eau, stratification des masses d'eau, ensoleillement, vent) et à des facteurs nutritionnels (apports excessifs en sels nutritifs, déséquilibres entre les apports en azote, phosphore et silice), même si leur origine et leur déterminisme précis ne sont pas clairement établis (Fisson, 2014).



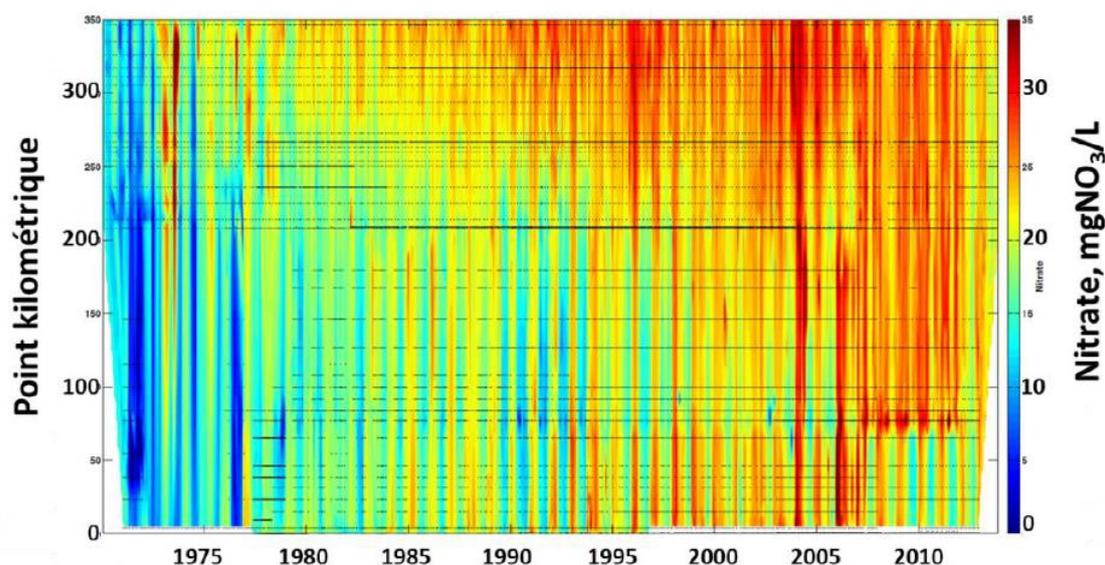


Figure 8 : Evolution temporelle des concentrations en nitrates (NO_3 ; $\text{mgN- NO}_3/\text{L}$) mesurées à Poses (en haut) et spatiale (en bas), de Paris (pk 0) à Honfleur (pk 350). Le km 48 correspond à l'arrivée des effluents de l'agglomération parisienne, et le pk 200 est l'entrée de l'estuaire à Poses (source : Garnier *et al.* 2018, Projet Seine-Aval 5 RESET)

Les processus intra-estuariens (adsorption sur les sédiments, consommation biologique, dilution et mélange avec les masses d'eau marine) réduisent le flux de nutriments vers la mer (rôle épurateur). Les données et les modélisations sur les nutriments de Paris à la mer ne montrent pas une baisse importante des concentrations de nutriments après le passage des masses d'eau dans l'estuaire. Cela indique que ces **processus estuariens ne sont pas assez intenses pour que l'estuaire joue pleinement son rôle épurateur**. L'estuaire de la Seine possède cependant un potentiel de dénitrification important par les surfaces de vasières et les zones humides dans sa plaine alluviale qui pourrait s'exprimer par la restauration.

Les processus de rétention et d'élimination de l'azote dépendent de la dénitrification bactérienne d'une part et de l'absorption par les végétaux et les micro-organismes d'autre part. Les conditions anaérobies du sol (favorisées par une importante teneur en eau et par la consommation de O_2 élevée), la présence de matière organique, de carbone minéral, de nitrates et la température, sont les principaux paramètres qui influencent la dénitrification bactérienne. Les processus d'absorption et de dénitrification sont plus ou moins efficaces selon le moment de l'année. Dans les milieux de la plaine alluviale par exemple, les pics d'activité dénitrifiante s'observent pendant les périodes hivernales, où les débordements sont plus fréquents et permettent d'engorger les sols. Au contraire, l'absorption par les organismes est minimale en hiver et devient maximale à la fin du printemps et au début de l'été, où les sols sont secs et donc peu favorables à la dénitrification. Toutefois, la végétation, et notamment sa richesse spécifique, a une influence directe sur la dénitrification en tant que source de carbone assimilable pour les bactéries dénitrifiantes.

Dans le contexte de l'estuaire de la Seine, la régression des vasières, la déconnexion des zones humides et la banalisation des communautés végétales des habitats de la plaine alluviale (réduction de la diversité et de la répartition de la flore estuarienne à faveur d'espèces généralistes) ont entraîné une **réduction du potentiel filtrant de l'estuaire vis-à-vis des composés azotés**.

Les vasières, qui représentent l'habitat des communautés microphytobenthiques, contribuent fortement à l'épuration des nitrates, via la production primaire. Les études menées sur les vasières situées à l'embouchure de l'estuaire montrent que le microphytobenthos présente un potentiel de production annuel moyen de 150 gC/m² qui, dans certaines conditions, peut dépasser celui du phytoplancton présent dans la colonne d'eau (65 gC/m²) (projet PROUESSE, programme de recherche Seine Aval 5). Ainsi, malgré sa plus forte productivité, seulement 10 à 18 % de la production primaire totale de l'embouchure de l'estuaire serait attribuable au microphytobenthos. Ce pourcentage apparaît faible par rapport à d'autres estimations réalisées sur d'autres systèmes estuariens comme l'Escaut (projet ANPHYECO, programme de recherche Seine Aval 5). 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 tiers de surfaces favorables à la production primaire benthique par rapport à celles de l'Escaut (2 500 ha vs 8 894 ha).

Dans les zones humides de la plaine alluviale, l'intensité des processus de dénitrification semblerait positivement corrélée, quel que soit le sol, à la richesse spécifique floristique et l'hydromorphisme du sol (Chabrierie *et al.*, 2001). Les zones humides jouent également un rôle important dans la rétention du carbone, comme puits de nutriments et de particules ou comme producteur primaire autochtone soutenant un vaste réseau trophique local. Plus particulièrement, le processus de stockage du carbone organique dans les sols (SOC), peut apporter une contribution significative à la compensation de l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, en accord avec les engagements internationaux (ex. COP21). Un rôle prioritaire pour le stockage du carbone est assuré par les tourbières. Ces sols marécageux se caractérisent par une haute teneur de matière organique sous forme de tourbe, qui se forme dans des conditions de saturation en eau et s'enrichit pendant des milliers d'années. L'assèchement par drainage de ces sols organiques pour l'extraction de la tourbe, l'agriculture ou la sylviculture a provoqué une oxydation et une diminution de la matière organique et ainsi une perte de tourbe. De grandes quantités de CO₂ et de N₂O peuvent alors être rejetées dans l'atmosphère. Dans le contexte de la Seine, les habitats tourbeux sont principalement présents dans les marais Vernier et d'Heurteauville. Ils sont pour la plupart oligotrophes à oligo-mésotrophes et sont par conséquent très sensibles à une élévation du niveau trophique. La tourbe doit être constamment baignée dans une eau stagnante pauvre en oxygène (alimentation par des eaux pauvres en éléments nutritifs).

La fonction "puits de carbone" dans les systèmes indirectement connectés au fleuve via la nappe, comme par exemple dans le Trou Buquet (rive gauche, Yville sur Seine), situé derrière la digue, semblerait favorisée. En effet, la diminution des processus d'érosion et/ou de sédimentation, due à la déconnexion partielle du fleuve, crée les conditions anaérobies favorables au ralentissement des processus de décomposition pendant les phases



d'engorgement en eau et permettant l'augmentation de la teneur en matière organique du sol (Mchergui, 2014). Dans ces conditions, la fonction de stockage de carbone organique se trouve renforcée, mais pas la fonction « effet filtre » (vis-à-vis de l'azote)

Une première caractérisation du potentiel de stockage à l'échelle nationale de carbone organique a été conduite (Chen *et al.*, 2018, Figure 9). Ce travail montre que les différents types d'usages influencent le niveau d'épuisement des stocks de carbone et déterminent le potentiel de stockage. Les terres cultivées ne présentent pas, dans leur état actuel, les caractéristiques adaptées à la séquestration du carbone. En effet, la déstructuration du sol (labourage) et l'exportation de biomasse entraîne une perte importante de matière organique, Ainsi, la restauration de ce type milieu (par exemple : transformation en prairies inondables) permettrait un gain très élevé en termes de séquestration du carbone.

Les données relatives aux capacités de séquestration de carbone dans les vasières sont rares dans la littérature. La seule valeur de référence pour le stockage de carbone dans les vasières et zones sédimentaires sans végétation est celle de Phang *et al.* (2015) avec 124-143 tC.ha⁻¹. Toutefois, ces zones sont proches des milieux estuariens et une grande partie du carbone provient sûrement des écosystèmes proches.

En l'état des connaissances mobilisables, il n'est pas possible d'évaluer quantitativement le rôle des différentes zones humides de l'estuaire dans le cycle de l'azote et le stockage du carbone. Néanmoins le diagnostic permet de mettre en avant les principaux facteurs limitant actuellement ces fonctions.





Horizon 0 - 30 cm



Horizon 30 - 50 cm



0 10 20 Kilometers

Sequestration potentielle de carbone organique dans les sols (kg/m²)

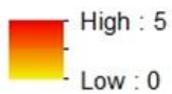


Figure 9 : Potentiel de séquestration du carbone organique dans les sols (modifiés depuis Chen et al, 2018) pour les sols superficiels (0-30cm en haut) et pour ceux plus profonds (30-50 cm, en bas).

Le diagnostic des fonctions biogéochimiques et de la productivité primaire en estuaire de Seine fait ressortir :

- Un apport excessif en nitrates (enrichissement des sols agricoles)
- Une diminution de la capacité épurative de l'estuaire vis-à-vis de l'azote (régression des habitats favorables à ces processus, zones intertidales et zones humides)
- Un fort potentiel de stockage de carbone organique des milieux estuariens avec des gains importants dans le cas de reconversion des terrains cultivés

3.1.2 Fonction de soutien au cycle de vie des espèces

3.1.2.1 Ichtyofaune

Pour plus de détails, consulter le rapport PROPOSE (<https://www.seine-aval.fr/publication/etude-propose/>)

Un panel de huit espèces indicatrices qui utilisent l'estuaire pour tout ou partie de leur cycle de vie (marines dépendantes de l'estuaire, résidentes estuariennes, dulçaquicoles et amphihalines), a été retenu pour la réalisation du diagnostic (Figure 10). Ainsi, en considérant que la structure spatiale de la faune piscicole répond remarquablement bien à celle de l'évolution des habitats, il a été possible d'obtenir des indications concernant le niveau d'expression de la fonctionnalité des milieux estuariens sur la base des différentes modalités de reproduction, de croissance (nourriceries) et de migration des espèces considérées. La réalisation du diagnostic s'appuie sur une évaluation de la qualité des habitats, de leur configuration spatiale, surfacique et trophique, et de la continuité écologique (longitudinale et latérale).

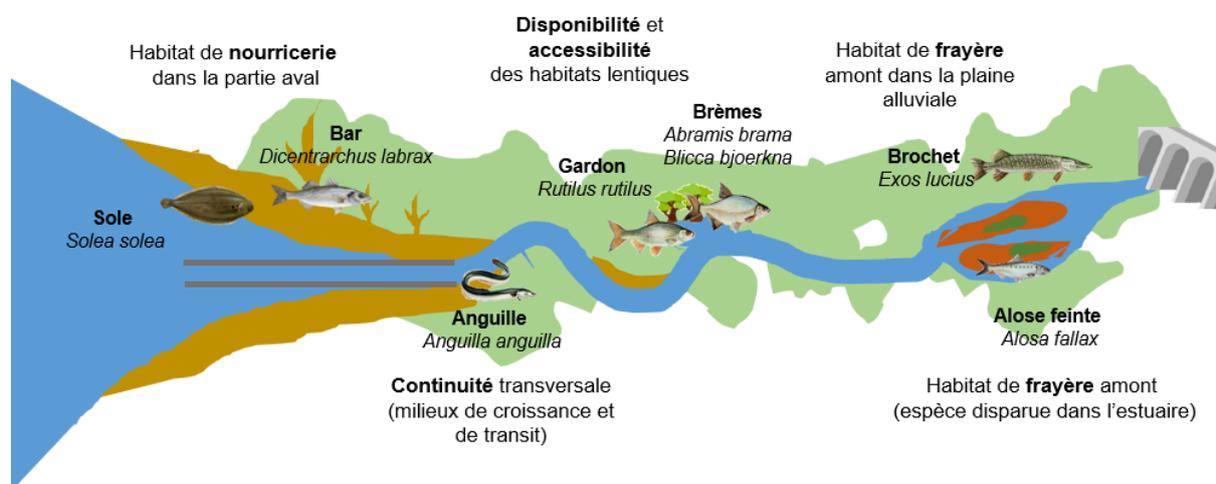


Figure 10. Représentation schématique des fonctions ciblées et espèces retenues pour le diagnostic des fonctions associées à l'ichtyofaune

La partie aval de l'estuaire de la Seine est considérée comme un important site de nurricerie pour les populations piscicoles de la Manche. La présence de vastes étendues de vasières très productives (zones subtidales peu profondes et intertidales inférieures) et les échanges avec la mosaïque latérale permettent l'alternance de phases d'alimentation et de repos nécessaires à la survie des juvéniles. Le caractère déterminant de cette écophase côtière ou estuarienne, pour les juvéniles, permet de considérer que la dégradation en termes de qualité et quantité de ces habitats côtiers est une des causes principales de diminution du recrutement et donc de la taille des populations marines qui occupent ces habitats. En effet, une forte diminution des habitats de nurricerie dans la partie aval de l'estuaire a été constatée depuis un siècle (130 km² en 1834 contre approximativement 34 km² en 2010) en lien avec l'aménagement de l'estuaire (cf § 3.3 A). Au cours de la dernière décennie, ces habitats ont continué à montrer des signes de dégradation et de régression avec une perte significative de zones de nurricerie fonctionnelles concernant les milieux subtidaux peu profonds et intertidaux bas. Le secteur mésohalin apparaît comme particulièrement concerné par ces altérations avec une perte de 64 % entre 2004 et 2018 (Muntoni, 2020). Les habitats de nurricerie se trouvent repoussés vers la partie marine. Ce constat, typique d'un estuaire aménagé, exprime une dégradation de la capacité d'accueil et de la fonctionnalité des habitats estuariens consécutivement à la compartimentation, l'artificialisation et au comblement sédimentaire des habitats intertidaux de l'estuaire moyen ainsi qu'à leur disparition presque totale dans la zone la plus amont (Duhamel and Feunteun, 2012).

En remontant vers l'amont, à partir du secteur mésohalin (pk 350), une déconnexion importante de la Seine avec les habitats latéraux réduit la fonctionnalité des nurriceries. Cette connectivité est nécessaire pour garantir l'alternance entre les phases d'alimentation et de

repos des juvéniles. En effet, les juvéniles de nombreuses espèces (ex. bar) font une large utilisation des habitats latéraux (jusqu'aux marais salés) pour s'alimenter ou trouver refuge (Duhamel and Carpentier, 2012; Parlier, 2006). De ce fait, les filandres se révèlent être des éléments de connexion fondamentaux pour le maintien du continuum latéral et jouent un rôle essentiel dans le soutien du réseau trophique. Même si actuellement la surface de filandres reste similaire à celle de 1936 (~60 ha de filandres connectées), leur dynamique a fortement changé.

Les effets de l'artificialisation des berges s'étendent ainsi sur tout le secteur intermédiaire jusqu'à Rouen. La fragmentation éco-paysagère des berges, la compartimentation engendrée par les digues, la faible diversité des habitats latéraux dans le lit mineur, la perte importante des milieux profonds et hydrologiquement très dynamiques (chenal), constituent les principaux facteurs limitant la fonctionnalité de ce secteur vis-à-vis des poissons.

Par conséquent, certaines fonctions régressent ou disparaissent comme cela a été observé pour les nourriceries et les zones de reproduction typiques des zones à brèmes ou pour les espèces réalisant des migrations latérales pour rejoindre les sites de fraie (ex. brochet). Certaines portions de l'estuaire se trouvent totalement dépourvues d'un gradient latéral d'habitats diversifiés et d'un continuum écologique chenal-berge. **75% du linéaire de la Seine entre Poses et Tancarville présente des berges artificialisées abruptes** qui ne supportent presque aucune fonctionnalité pour les communautés piscicoles. Ainsi, la zone de Vieux Port jusqu'à La Bouille, apparaît particulièrement défavorable à la fréquentation des poissons typiques du milieu limnique, avec une diminution des abondances de poissons d'eau calme (Duhamel and Feunteun, 2012). Les berges n'offrent qu'une très faible perméabilité pour les espèces aquatiques. Les conditions d'habitat du chenal font donc apparaître une prépondérance des espèces ou stades de vie qui utilisent l'estuaire pour une fonction d'alimentation via la chaîne trophique pélagique et/ou de transit, qu'elles soient amphihalines (flet, mulot porc), typiquement estuariennes (épineche, gobie tacheté) ou migratrices (éperlan, anguille).

Le peuplement d'eau douce se trouve anormalement appauvri. En réponse à la banalisation des habitats, les poissons typiques du milieu limnique, ne disposant plus d'habitats latéraux lors des écophases migratoires vers les milieux de croissance et de refuge, colonisent des milieux anthropiques de « substitution » (ex. bassins portuaires qui jouent le rôle d'annexes hydrauliques). Ceci exprime la dégradation de la fonctionnalité de ce secteur vis-à-vis des communautés piscicoles. Dans l'agglomération rouennaise, les abondances et la richesse des poissons d'eau douce y sont nettement supérieures à celles du chenal principal. Toutefois, les milieux annexes artificiels ne se substituent pas aux milieux annexes naturels d'un point de vue fonctionnel (Belliard *et al.*, 2009) :

- les milieux artificiels hébergent moins d'espèces que les milieux naturels ;
- ils sont moins propices à l'accueil d'une faune fonctionnellement diversifiée car, globalement, ils présentent une faible diversité d'habitat.



Ainsi, les habitats fonctionnels de ces peuplements ont subi un déplacement vers l'amont de Rouen où les conditions paraissent plus favorables que dans le secteur endigué.

De plus, de nombreux obstacles à l'écoulement latéral (plus de 2 500 buses, clapets, seuils, etc.) sont susceptibles de limiter la continuité entre les habitats du lit mineur et du lit majeur. Les espèces se trouvent ainsi dans l'impossibilité d'atteindre les habitats latéraux nécessaires à l'accomplissement de leur cycle de vie (bras secondaires, zones humides, marais, mares, prairies inondées, etc.). Cette rupture est encore plus exacerbée par la pression agricole (drainage de prairies), qui diminue fortement les surfaces inondables accessibles et connectées au fleuve, surfaces qui coïncident avec les zones de frai et de croissance des alevins pour le brochet. Les analyses montrent que les habitats potentiels de fraie s'étendent sur une surface d'approximativement 540 ha à l'échelle de l'estuaire. En revanche, seulement 3 % de ces milieux, soit 20 ha, sont accessibles pendant la migration reproductive. Ces milieux se situent principalement dans le secteur amont de Rouen (Muntoni, 2020).

Le diagnostic des fonctions de soutien au cycle de vie des poissons en estuaire de Seine fait ressortir :

- Une diminution et une dégradation significative des habitats de nourricerie aval (réduction des surfaces de vasière et disparition dans le secteur endigué). Des 130 km² en 1834, moins de 34 km² sont actuellement disponibles.
- Une diminution des habitats de reproduction et croissance dans le lit mineur (induite par l'homogénéisation des habitats du lit mineur). Seulement 3% des milieux humides de la plaine alluviale présentent les caractéristiques favorables à la reproduction et la croissance des espèces inféodées aux milieux lenticules et végétalisés (ex. brochet).
- Une rupture de la continuité écologique longitudinale amont/aval et latérale lit mineur/ lit majeur (artificialisation des berges et présence de nombreux obstacles), empêchant la libre circulation des espèces. 75 % du linéaire des berges entre Poses et la mer est artificialisé (béton) et présente des pentes abruptes. Plus de 2 500 obstacles à l'écoulement sont actuellement recensés le long de ce linéaire.

3.1.2.2 Avifaune

Pour plus de détails, consulter le rapport REPROS (Ranvier, 2020)

Les estuaires accueillent une forte diversité ornithologique avec des espèces spécialistes des habitats estuariens et humides mais également beaucoup d'autres espèces généralistes qui utilisent ces habitats. L'estuaire de la Seine est depuis longtemps reconnu pour son rôle sur l'**axe de migration est-atlantique** (ansériformes, des limicoles, des passereaux paludicoles), pour son fort intérêt vis-à-vis de la **nidification et reproduction** pour plusieurs



groupes d'espèces (limicoles, passereaux prairiaux et palustres, hérons, laridés et anatidés) et pour les fonctions de reposoir de pleine mer et de nourrissage sur les zones intertidales.

Les connaissances sur l'avifaune acquises dans l'estuaire de la Seine ont été capitalisées et mobilisées pour alimenter le diagnostic. Les analyses ont porté sur l'évolution des peuplements ornithologiques en termes d'effectifs et de leur répartition spatiale au sein de l'estuaire. Afin d'identifier les altérations écologiques propres à l'estuaire, les résultats ont été comparés avec les tendances nationales et/ou internationales. Afin d'obtenir des indicateurs synthétiques autour de la fonctionnalité des différents habitats estuariens, le travail a été construit autour de **8 groupes fonctionnels** (Tableau 2). Une sectorisation de l'estuaire a été proposée sur la base de la cohérence des suivis et leur pertinence par rapport à la répartition des groupes étudiés.

Les résultats du diagnostic montrent que **181 espèces sont régulièrement observées** en estuaire de Seine.

Le groupe des **limicoles (nicheurs et hivernants)** montre une répartition très orientée vers l'aval de l'estuaire. En effet, c'est dans le secteur de l'embouchure que se localisent les grandes surfaces de vasières capables d'accueillir des effectifs importants. Sur le reste de l'estuaire (secteur moyen et amont) les effectifs sont très faibles. Dans ces secteurs les habitats pour ces espèces sont relictuels et ne permettent pas une expression optimale des fonctions associées à ces milieux notamment vis-à-vis de la reproduction et de l'alimentation. A l'échelle de l'estuaire, **les limicoles hivernant montrent une tendance en régression**.

Plusieurs des groupes étudiés (laridés, limicoles nicheurs et hivernant, ardéidés, sternidés) présentent des effectifs très faibles, représentant autour d'1% des effectifs nationaux. Ce chiffre paraît très faible considérant que l'estuaire de la Seine est l'un des plus grands estuaires du territoire métropolitain.

Les espèces palustres se distribuent presque exclusivement dans la portion aval. Cette observation est la conséquence de la perte des ceintures végétales dans la portion moyenne et amont de l'estuaire, et notamment des roselières. L'artificialisation des berges et le manque de connexions latérales entre le fleuve et le lit majeur ont entraîné la réduction des zones d'alimentation de beaucoup d'espèces.

Les **espèces prairiales montrent une diminution nette**. Cette tendance trouve son explication dans la perte des zones humides, favorisée par l'organisation agricole des marais avec des réseaux de drainage qui contribuent fortement à l'assèchement de ces milieux. Au de-là des espèces prairiales, plusieurs des groupes fonctionnels considérés (exception faite pour les bocagers/forestiers) ont un besoin intrinsèque d'eau et d'humidité pour leur reproduction (ex. échasse blanche, barge à queue noire) ou pour l'alimentation (ex. sarcelle d'hiver, grand aigrette). Il n'est pas question d'inondation permanente mais de présence cyclique de faibles hauteurs d'eau qui vont créer des conditions favorables pour des limicoles nicheurs ou hivernants, des ansériformes hivernants, des oiseaux palustres, des ardéidés, des laridés et aussi des oiseaux prairiaux.



Enfin, la présence humaine est très forte dans l'estuaire de la Seine et beaucoup d'espèces d'oiseaux ont besoin de **zones de tranquillité** pour exploiter les milieux naturels. Ainsi les limicoles et ansériformes hivernants ont besoin de sites de repos sûrs pour pouvoir exploiter un secteur. De même, les oiseaux coloniaux (laridés, sternidés, grands échassiers et cormorans) ont besoin de sites sécurisés pour établir des colonies de reproduction.



DIAGNOSTIC

Tableau 2. Groupes fonctionnels retenus pour l'étude des différents habitats estuariens de l'avifaune : tendances d'évolution et facteurs explicatifs.

			Embouchure (estuaire aval)		Marais Vernier, vallée de la Risle (estuaire moyen)		Boucles de la Seine (estuaire amont)		Estuaire		
			Phase estuarienne	Habitats occupés	Présence	2003-2019	Présence	2003-2019	Présence	2003-2019	2003-2019
Nicheurs	Prairiaux	Reproduction	Prairies, cultures	forte	↘	forte	→	faible	↘	↘	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des surfaces prairiales (notamment zones inondées au printemps) • Pression agricole (intrants en nitrates, drainage, pâturage, date de fauche)
	Palustres	Reproduction	Végétations herbacées ou buissonnantes très humides, roselières	forte	→	moyenne	→	faible	→	→	<ul style="list-style-type: none"> • Absence des grosses étendues des roselières dans le secteur intermédiaire • Assèchement des roselières qui détermine le vieillissement des roselières dans la partie aval
	Limicoles estuariens	Reproduction	Bord des eaux, zones intertidales, eaux peu profondes, milieux pionniers, espaces ouverts	forte	↗	faible	↗	absent			<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des zones favorables à la reproduction (zones abritées de tranquillité à proximité de plan d'eau (fleuve, mare, zones inondées, etc.))
	Laridés / Sternidés	Reproduction	Ilots et bords des eaux sécurisés, pleines d'eaux et en zone humide (alimentation)	faible	↗	faible	?	forte	↗	↗	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des zones d'alimentation (zones intertidales, annexes hydrauliques)
	Grands échassiers-cormorans	Reproduction	Colonies sur des îlots et bords des eaux sécurisés Alimentation en pleine eau (cormorans) et écotones aquatiques/terrestres	forte	↗	faible	↗	forte	↗	↗	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité de zones d'alimentation
	Bocagers / Forestiers	Reproduction	Présence d'arbres et arbustes	faible	?	forte	→	forte	↗	↗	<ul style="list-style-type: none"> • Banalisation des associations végétales
Migrateurs hivernants	Ansériformes	Hivernage	Eaux de différentes profondeurs, plans d'eau, prairies inondables, zones de repos	forte	→	forte	→	forte	→	→	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvaise répartition temporelle des surfaces d'alimentation (diminution des zones de tranquillité inondées pendant la période d'hivernage) • Mauvaise répartition spatiale des zones de repos (plan d'eau sans présence humaine)
	Limicoles	Hivernage	Zones marnantes ou inondées, reposoir de marée haute.	forte	↘	faible	?	faible		↘	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des zones d'alimentation (surtout dans le secteur intermédiaire) • Manque des zones de repos

Le diagnostic des fonctions de soutien au cycle de vie des oiseaux en estuaire de Seine fait ressortir :

- Des effectifs faibles pour les groupes des limicoles nicheurs, des palustres, des laridés, sternidés et grands échassiers et une répartition spatiale des groupes décalée vers l'aval
- Une diminution des limicoles hivernants avec des manques d'habitats sur une part importante de l'estuaire
- Une nette diminution des espèces prairiales (diminution des espaces amphibies et prairiaux avec une présence d'eau régulière en lien avec les cycles hydrologiques annuels)
- Manque de zones de tranquillité afin de minimiser le dérangement anthropique. Beaucoup d'espèces ont besoin de tranquillité et de sécurité pour se reposer, pour se reproduire, voire s'alimenter.

3.2 Quelle est l'évolution des surfaces des milieux estuariens ?

Afin de caractériser l'évolution de l'estuaire et ses liens avec les altérations constatées, une analyse de l'évolution des principales unités fonctionnelles de l'ensemble de la vallée a été conduite. Sur la base du travail de [Lavabre et Fisson \(2013\)](#) sur les associations entre habitats et fonctions écologiques, une typologie des unités fonctionnelles a été rééditée pour couvrir l'ensemble des milieux de la vallée estuarienne, en incluant les milieux intertidaux et subtidaux. Les sources d'information disponibles pour caractériser ces unités sur l'ensemble du secteur d'étude (occupation du sol et bathymétrie) ont permis de comparer deux périodes : 1973 et 2009 ([Figure 11](#)). Pour les terres émergées, les principales unités ont été structurées à partir des données d'occupation du sol (source : [PNRBSN](#) et [GIP Seine-Aval](#)). Pour les données bathymétriques, le travail se réfère aux données fournies par le Grand Port Maritime de Rouen concernant les années 1975 et 2009 et aux données topographiques acquises par LIDAR ([Bacq, 2013](#)). Les évolutions de surface des unités fonctionnelles et les changements d'affectation ([Figure 12](#)) des différents milieux sont décrits.



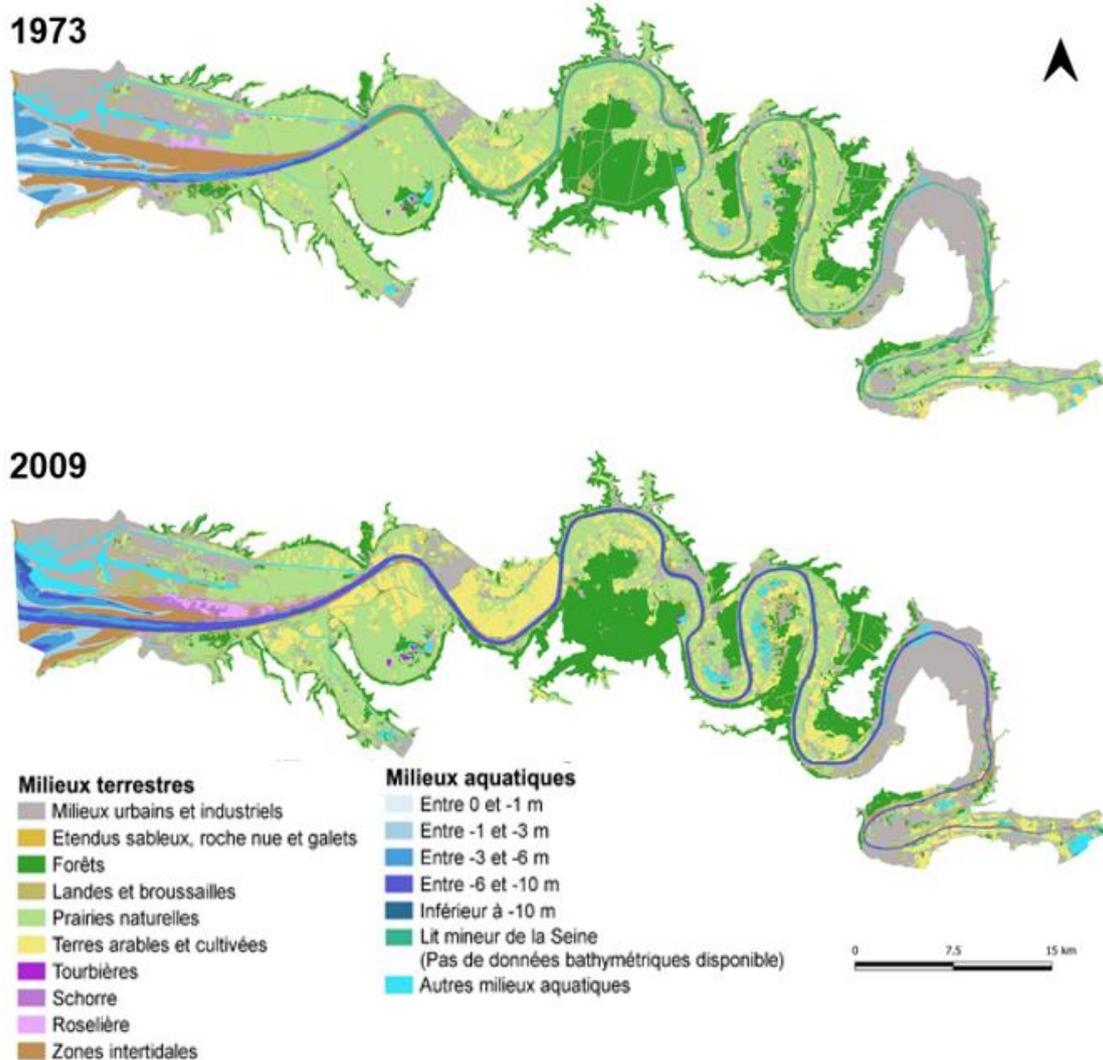


Figure 11 : Configuration spatiale des principales unités fonctionnelles de l'estuaire de la Seine entre les années 1970 (occupation du sol 1973, bathymétrie 1975) et 2009.

Les résultats montrent une perte importante (5 625 ha ; -23,8%) de prairies qui, de 23 680 ha en 1973, sont passées à 18 328 ha en 2009. Environ 25 % des prairies présentes en 1973 ont été converties en terres arables et cultivées. De même, les forêts alluviales de bord de Seine sont devenues extrêmement rares. Les éléments relictuels sont des saulaies blanches assez rudéralisées qui sont faiblement remaniées par les crues. A contrario, les surfaces arables et cultivées ont augmenté de manière significative (+20 %, passant de 9 056 ha en 1973 à 10 870 en 2009), de même que les surfaces urbaines et industrielles (+13,3 %, soit un gain net de 2 193 ha).

Une diminution de 35 % des milieux intertidaux inférieurs (slikke) est aussi mise en évidence. A l'échelle de l'estuaire, ces milieux sont passés d'approximativement 4 080 ha en 1973 à 2 650 ha en 2009, avec une diminution de 1 433 ha. Les surfaces des milieux subtidiaux

DIAGNOSTIC

peu profonds régressent fortement. Une perte d'approximativement 1 080 ha a été enregistrée pour les zones comprises entre -1 m et -6 m (CMH). Une tendance opposée a été observée pour les milieux plus profonds, notamment pour les bathymétries inférieures à 6 m, qui ont subi une augmentation de 1 200 ha.

Les surfaces de roselières ont augmenté à l'échelle de l'estuaire (augmentation de 430 ha) mais cette évolution positive se concentre dans le secteur aval. Sur le reste de l'estuaire cet habitat apparait en régression, menacé par l'atterrissement, ce qui conduit au développement de variantes moins hygrophiles évoluant vers la mégaphorbiaie oligohaline.

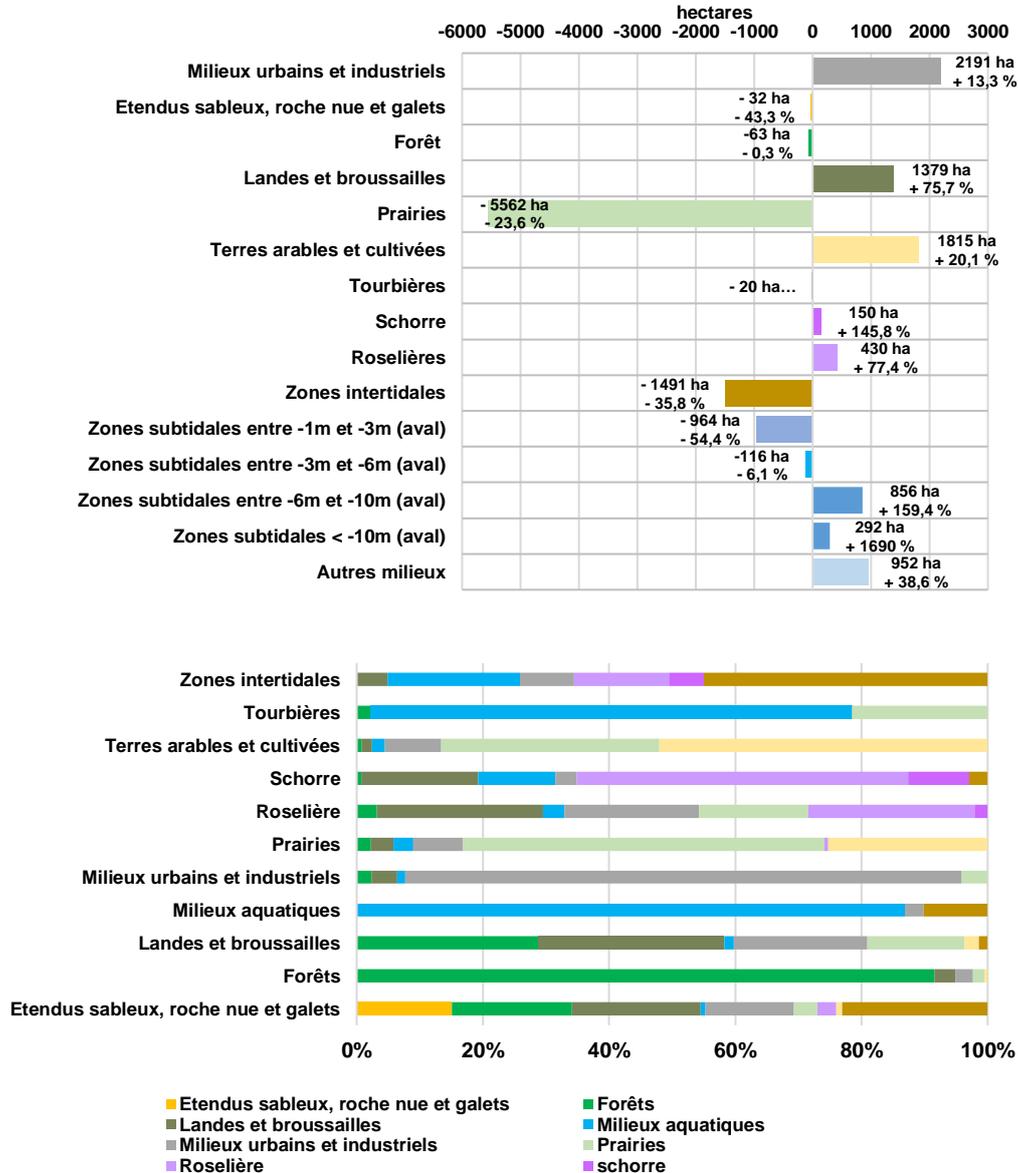


Figure 12 : Evolution surfacique entre 1973 et 2009 des principales unités fonctionnelles de l'estuaire de la Seine (en haut) et changement d'affectation (en bas). Les variations surfaciques concernant les zones subtidales se réfèrent exclusivement à la portion aval de l'estuaire (aval du pk 345).

L'analyse de l'évolution de l'estuaire de la Seine, par comparaison des deux périodes considérées (1973-2009), a permis de mettre en évidence les principaux changements d'affectation au sein du territoire estuarien. Plusieurs constats peuvent être faits sur la base de cette analyse, notamment :

- La perte significative de prairies
- L'augmentation importante des terres cultivées
- L'augmentation des landes et broussailles
- La réduction drastique des surfaces de slikke et des milieux subtidaux peu profonds
- La régression des surfaces de roselière dans le secteur intermédiaire à l'exception du secteur aval où les surfaces augmentent

3.3 Quelles sont les pressions à l'origine des principales altérations écologiques de l'estuaire de la Seine ?

L'analyse croisée des diagnostics établis sur les fonctions retenues permet d'identifier les principales modifications des physiotopes à l'origine des altérations écologiques de l'estuaire de la Seine constatées. Dans le but d'identifier les orientations de restauration, une synthèse des pressions à l'origine de ces modifications majeures des physiotopes et habitats a été réalisée (Tableau 3). Une sectorisation de l'estuaire est ainsi proposée sur la base des pressions constatées (Figure 13).

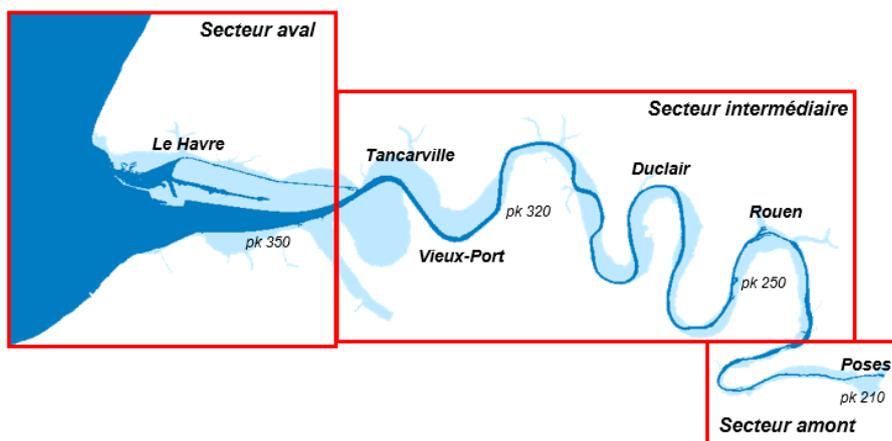


Figure 13 : Cartographie des secteurs identifiés dans le Tableau 3

DIAGNOSTIC

Tableau 3. Synthèse des principales altérations du physiotope et/ou des habitats par secteur.

Forçage anthropique	Pression	Altération du physiotope/habitat	Secteur aval	Secteur intermédiaire	Secteur amont
A. Aménagements à l'échelle du lit mineur	A.1. Aménagement des berges, endiguement et diminution du nombre d'îles	A.1.1. Raréfaction des habitats lenticques		•	
		A.1.2. Perte des surfaces intertidales inférieures et subtidales peu profondes	•	•	
		A.1.3. Diminution de la complexité géomorphologique des berges (banalisation)		•	
		A.1.4. Disparition du gradient latéral typique de la mosaïque d'écotones latéraux	•	•	
		A.1.5. Diminution de l'accessibilité aux filandres et aux marais	•	•	
		A.1.6. Perte de zones à faible hydrodynamisme et raréfaction des annexes hydrauliques		•	•
		A.1.7. Rupture du continuum écologique entre lit mineur et lit majeur (inaccessibilité aux surfaces inondables dans le lit majeur et aux affluents)		•	•
	A.2. Pratiques de dragage et clapage	A.2.1. Modification du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire	•		
B. Aménagement à l'échelle de la plaine alluviale	B.1. Consommation et artificialisation des milieux naturels estuariens (ex. intensification des pratiques agricoles, urbanisation, etc)	B.1.1. Diminution des surfaces humides naturelles	•	•	•
	B.2. Artificialisation du régime hydraulique (réseau de drainage, pompage, création de diguettes)	B.2.1. Altération et dégradation des zones humides naturelles (ex. prairies humides ou zones inondables)	•	•	•



DIAGNOSTIC

	B.3. Arrangement spatial des activités anthropiques (zones urbaines, industrielles, agricoles...)	B.3.1. Rupture du continuum écologique entre habitats (ex. fragmentation intra et inter-secteur des habitats amphibies et prairiaux)		•	•
C. Usages et pratiques à l'échelle du bassin versant	C.1. Pression chimique industrielle, agricole et urbaine actuelle et historique menant à des apports de micropolluants et macro/micro-déchets	C.1.1. Imprégnation chimique des habitats et des organismes	•	•	•
	C.2. Source de nutriments (amendement agricole et rejets urbains)	C.2.1. Déséquilibre dans les rapports stœchiométriques entre différents sels	•	•	•



A. Aménagements à l'échelle du lit mineur

A.1. Aménagement des berges, endiguement et diminution du nombre d'îles

Les aménagements successifs effectués dans le lit mineur de l'estuaire (Foussard *et al.*, 2010) ont modifié la morphologie de l'estuaire et ses habitats rivulaires. Depuis le XIX^{ème} siècle, l'aménagement de l'estuaire de la Seine a été essentiellement pensé pour améliorer sa navigabilité (digues de calibrage) et favoriser le développement urbain et industriel dans sa plaine alluviale. La problématique inondation a également influencé l'évolution de l'estuaire et son fonctionnement hydrologique, en favorisant la mise en place d'ouvrages de protection contre les inondations ou de régulation du débit. Ces aménagements, en particulier les digues de calibrage sur la portion aval de l'estuaire, ont eu pour effet de renforcer les courants de jusant (augmentation des vitesses dirigées vers l'aval dans la zone naviguée) favorisant l'auto-entretien du chenal et permettant l'expulsion des sédiments les plus fins vers la baie de Seine (Lemoine, 2015). Ceci a exacerbé la différence entre les dynamiques du chenal (dominance des courantes de jusant) et celle des fosses, dominées par les courantes de flot. Les aménagements du lit mineur de l'estuaire ont essentiellement été réalisés par :

- l'artificialisation des berges,
- la mise en place de digues et piles,
- l'approfondissement du chenal de navigation,
- l'arasement d'îles, leur rattachement à la berge et la poldérisation.

Les aménagements ont eu pour conséquence d'homogénéiser **la morphologie du fleuve**. En particulier, ceci a eu pour effet :

- i) la **diminution des surfaces des habitats latéraux, présentant des conditions hydrodynamiques calmes (A.1.1)** ;
- ii) la **perte des surfaces subtidales à faible profondeur (A.1.2)** notamment dans le secteur intermédiaire
- iii) la **perte de zones intertidales inférieures (slikke)** suite à l'augmentation de la sédimentation des secteurs latéraux et donc du niveau topographique **(A.1.2)**.

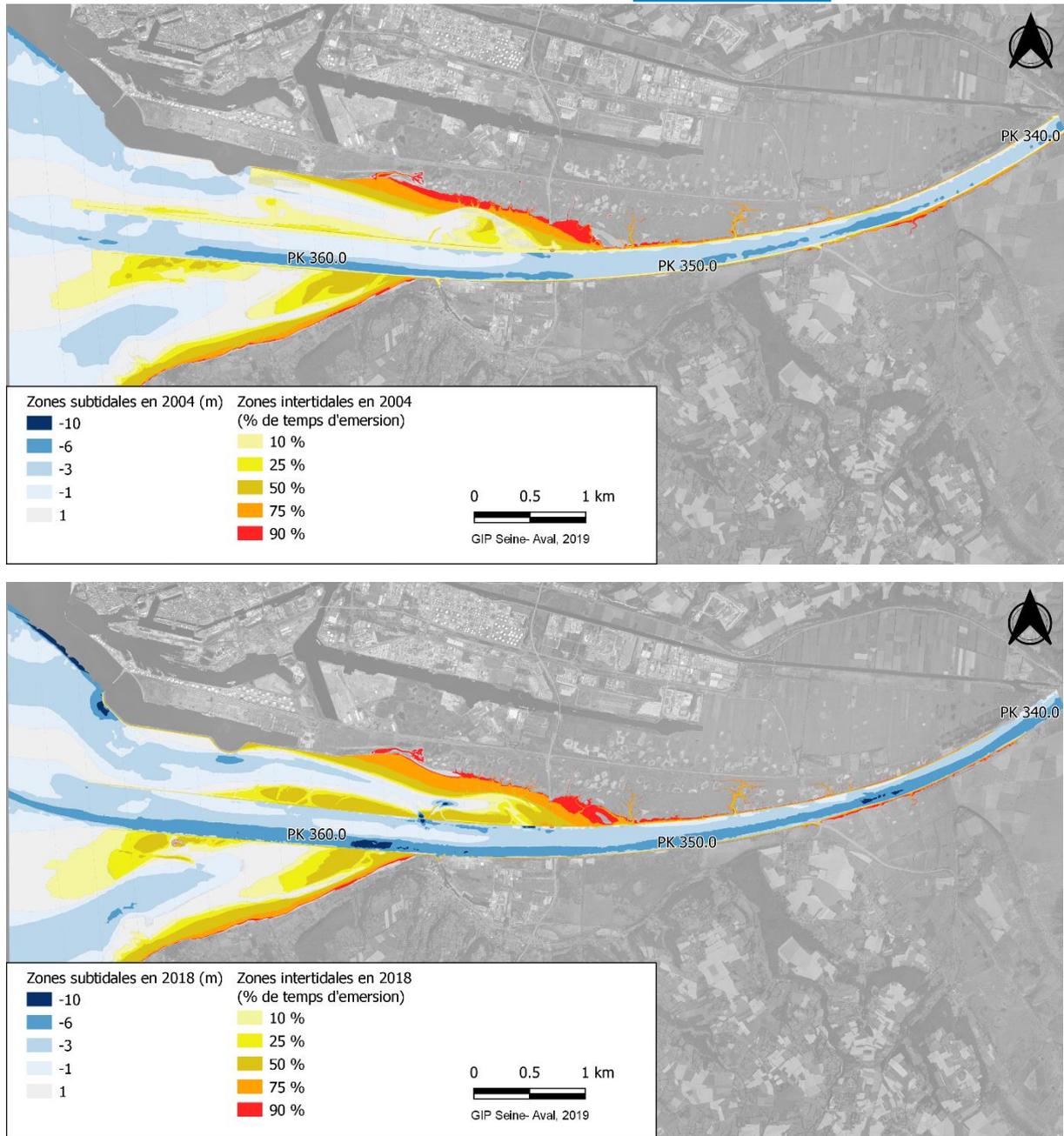


Figure 14. Evolutions spatiales des zones subtidales et intertidales dans le secteur aval de l'estuaire de la Seine. Les pourcentages se réfèrent au temps d'émerision.

Dépendant directement des forçages hydrodynamiques et de leurs variabilités, le fonctionnement des vasières évolue de façon continue le long du linéaire estuarien. La morphologie des vasières du secteur amont est ainsi principalement contrôlée par le débit de la Seine, tandis que celle des vasières d'embouchure est sous influence maritime caractérisée par les tempêtes et les marées. Ainsi, malgré le rôle stabilisateur ou destructurant de certains organismes sur le sédiment, les forçages hydrodynamiques permettent d'expliquer les

principales rythmicités des phénomènes de dépôt/érosion à l'échelle de l'estuaire (Lemoine, 2015). Les résultats du diagnostic confirment l'intérêt des vasières pour toutes les fonctions analysées. Cependant, leur fonctionnalité est très sensible aux évolutions du contexte hydro-sédimentaire pouvant être induites par les aménagements de l'estuaire ou encore par les effets du changement climatique.

Entre Poses et l'embouchure, **environ 75 % des berges sont artificielles** (béton ou mastic bitumineux) (Figure 15). Deux digues submersibles de plusieurs kilomètres ont été construites à l'embouchure afin de canaliser les courants de jusant. Seule une portion d'une vingtaine de kilomètres de fleuve, située en amont de la zone de Rouen, présente des berges à dominante naturelle, des îles et des bras morts. Les berges artificielles à pente abrupte caractéristiques du secteur endigué (Figure 16), dont les pieds sont souvent constitués de palplanches verticales, n'offrent pas de **complexité géomorphologique** ainsi limitant fortement l'expression de la fonctionnalité de ces écotones (A.1.3).



DIAGNOSTIC

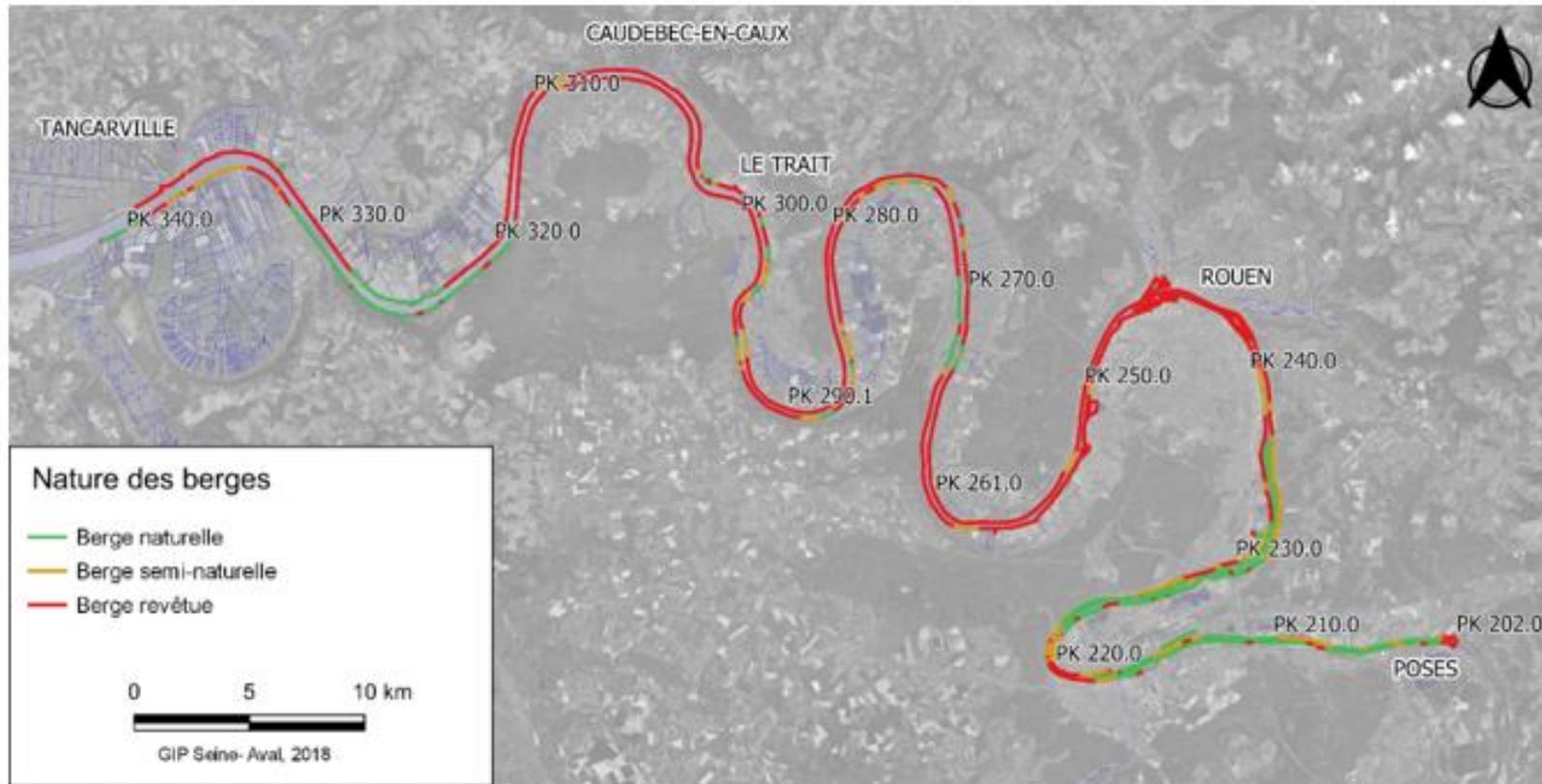


Figure 15. Nature des berges sur le linéaire de l'estuaire

DIAGNOSTIC

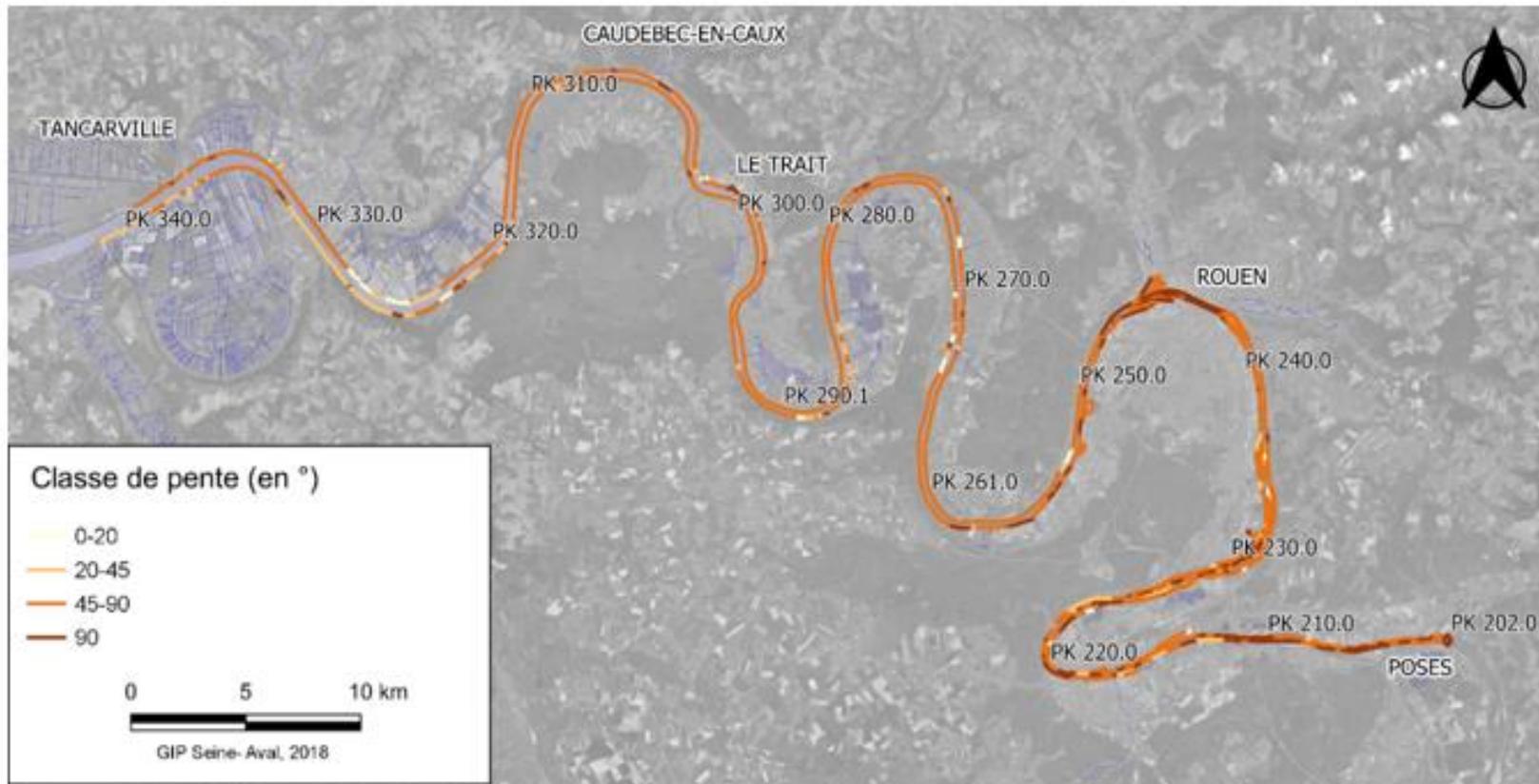


Figure 16. Classification des berges sur la base de leur pente sur le linéaire de l'estuaire

DIAGNOSTIC

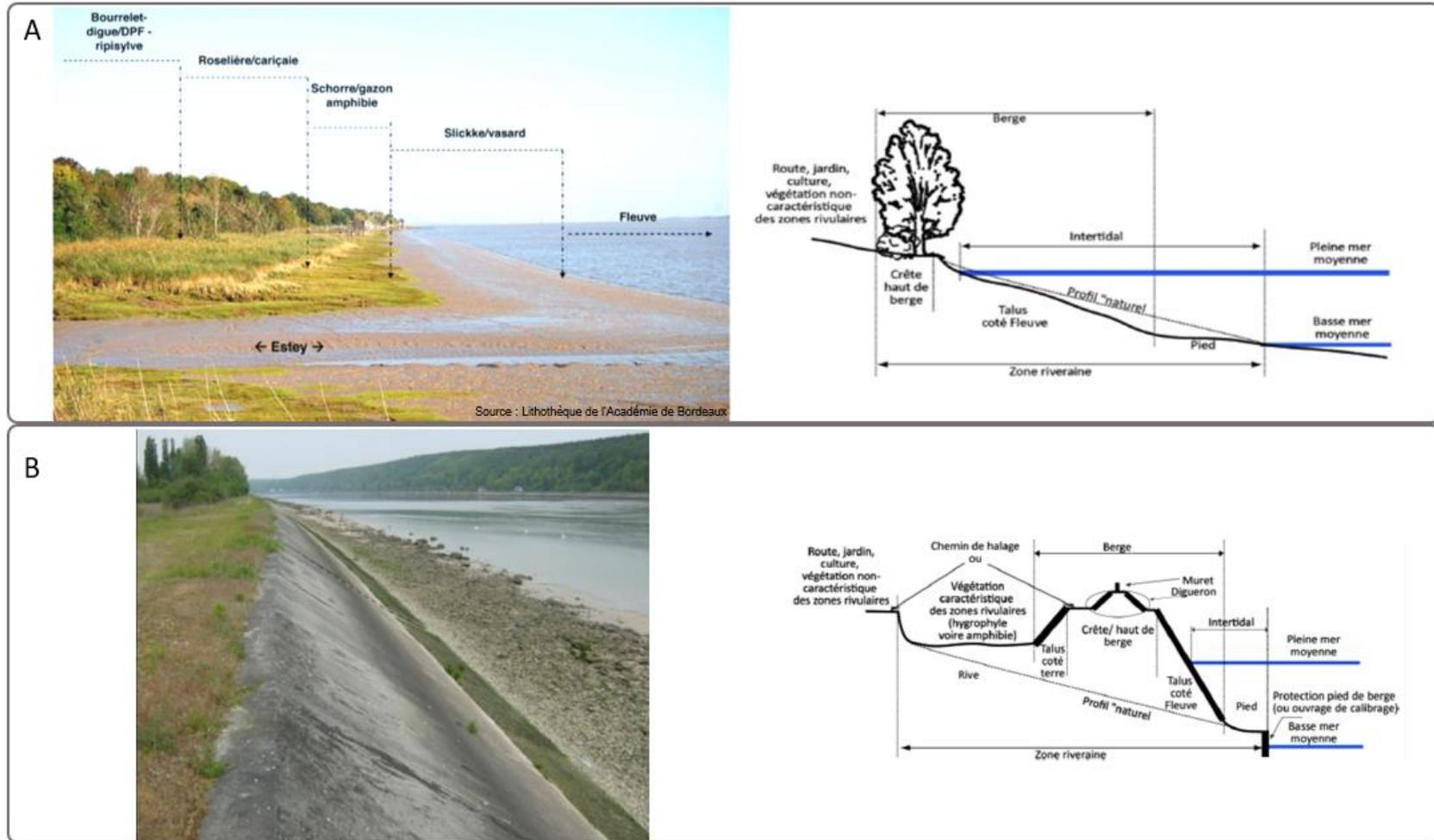


Figure 17. Représentation de différents types de berge (naturelle - en haut - et artificialisée - en bas) et du gradient latéral constituant les zones riveraines

Il est observé la **disparition du gradient latéral typique de la mosaïque d'écotones latéraux** (A.1.4), ce qui représente un des principaux facteurs limitant l'expression du fonctionnement écologique des écotones rivulaires. On observe une perte conséquente des successions d'habitats intertidaux : régression des strates inférieures (slikke) et zones supérieures dominées par les ceintures végétales, jusqu'à la ripisylve (Figure 17). Cette dernière est désormais relictuelle sur le linéaire du fleuve. A ceci, se cumulent les effets de la **disparition de 80 % des îles entre Poses et l'embouchure** (depuis 1750) qui jouaient un rôle fondamental dans la diversification des conditions hydro-morpho-sédimentaires du fleuve. Depuis Rouen (pk 242.2) jusqu'à l'embouchure, la superficie totale des îles est passée d'environ 3 900 ha en 1750 à moins de 10 ha (Foussard *et al.*, 2010) (Figure 18).

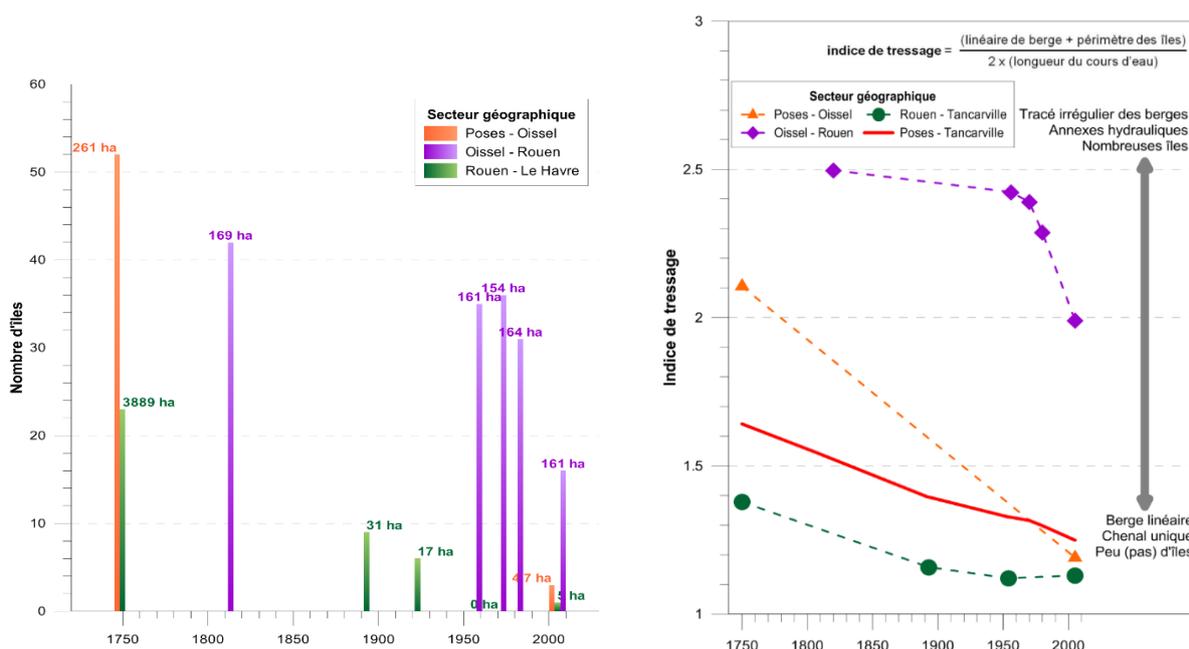


Figure 18. Variation du nombre d'îles dans les différents secteurs de l'estuaire à partir de 1750. Les surfaces relatives à chaque secteur sont reportées en format texte sur la barre correspondante (à gauche). Evolution de l'indice de tressage calculé pour les différents secteurs de l'estuaire de la Seine (à droite) D'après Fisson *et al.* (2014)

La dégradation du gradient latéral naturel et l'élévation des zones intertidales précédemment décrites, sembleraient impacter fortement les **dynamiques hydrologiques des filandres** (A.1.5). Le fonctionnement de ces systèmes dépend essentiellement du volume oscillant et notamment de la surface de leur bassin versant. Cependant, d'autres facteurs guident l'hydrologie d'une filandre, notamment la surface drainée, le marnage la cote topographique et le seuil de confluence. Le fonctionnement hydromorphologique de ces systèmes, surtout à partir de l'amont du Pont de Normandie, ne présente plus de caractère naturel ayant perdu l'équilibre avec la dynamique qui régit ces systèmes (Lesourd *et al.*, 2012). Cette dynamique apparaît encore très liée aux épisodes successifs de perturbation et de stabilisation progressive du système qui font suite aux aménagements de la fosse nord (canal,

remblais, chemins, construction de la digue nord, Pont de Normandie, Port 2000 et ses mesures d'accompagnement, réfection de la digue nord, etc.) et à la gestion hydraulique autour de la route de l'estuaire. Notamment, le fonctionnement de ces systèmes peut être perturbé par la présence d'ouvrages hydrauliques (vannes) qui peuvent bloquer la remontée de l'eau, accélérant ainsi la sédimentation au sein de la filandre et impliquant la nécessité accrue d'un entretien par curage. Or, les merlons créés par le curage sur les berges des filandres empêchent leur débordement, ce qui contraint son fonctionnement hydraulique et impacte la morphologie de la tête des filandres. Le degré de perturbation est variable, mais il peut aller jusqu'à un fonctionnement proche de celui d'un canal, permettant l'accès à l'eau pour des mares de chasses dans certains secteurs (ex : Réserve Naturelle de l'estuaire de la Seine) (Lesourd *et al.*, 2012). Ces aménagements empêchent les filandres de disposer d'un volume oscillant suffisant pour leur maintien. Les filandres nécessitent donc un entretien régulier pour éviter leur végétalisation. L'occupation du sol, son usage et le degré de végétalisation de la zone drainée par une filandre guident également ses caractéristiques hydrauliques. Ainsi, les prairies à la végétation plus basse (prairies, zones de fauchage) laissent davantage circuler les écoulements que les roselières à la végétation plus haute, induisant une moindre stabilité de la filandre. L'activité anthropique (fauche et pâturage) oriente une structure de végétation induisant une érosion plus importante des berges des filandres (ex. le fauchage saisonnier des prairies apparaît moins favorable aux écoulements qu'une pâture présente tout ou partie de l'année) (GIP Seine-Aval, 2013).

Ces facteurs déterminent une diminution de l'accessibilité de ces systèmes vis-à-vis des communautés aquatiques.

Du fait des conditions hydrologiques qui diffèrent de celles du chenal principal (vitesses de courants moindres et temps de résidence de l'eau supérieurs), les annexes jouent un rôle fondamental dans les dynamiques estuariennes. Cependant, une **perte importante d'annexes hydrauliques** est constatée pour le secteur médian du fleuve (notamment de bras secondaires et des bras morts). A la diminution importante du nombre d'annexes s'ajoute le fait que les annexes encore présentes montrent aujourd'hui un fonctionnement hydraulique peu propice à leur fonctionnalité (A.1.6). Les bras secondaires sont de plus en plus souvent à sec en période d'étiage. Ils perdent ainsi leur fonction de nurserie. Peu activés en condition de débit moyen, ils offrent un terrain propice à l'implantation de la végétation ligneuse. Le développement de la saulaie-peupleraie favorise l'atterrissement et le processus s'accélère jusqu'à la fermeture totale du milieu. Le comblement des annexes hydrauliques est un phénomène naturel, mais qui est grandement amplifié par les aménagements décrits précédemment. Demeurant au-dessus des niveaux moyens des eaux, les marais et les annexes hydrauliques sont déconnectés ou mal connectés (inaccessibilité) et ne restent plus assez longtemps inondés pour permettre la reproduction des poissons.

Conjointement à l'artificialisation des berges, l'installation de nombreux ouvrages (souvent représentés par un réseau de fossés munis de buses et de clapets) représente un des principaux facteurs déterminant la **fragmentation éco-paysagère car elle ne permet plus les échanges entre lit mineur et lit majeur** (A.1.7). Initialement créés pour drainer les parcelles trop humides et évacuer les eaux de la Seine lors des crues, d'importants réseaux

de fossés sont présents sur les terrains en bord de Seine. Peu à peu déconnectés du fleuve, les échanges avec les zones humides sont aujourd'hui limités. Le drainage des bassins versants, le recalibrage et la régulation à travers l'aménagement de berges et des digues déterminent la drastique diminution des échanges lit mineur-lit majeur limitant ainsi fortement l'expression de la fonctionnalité de ces milieux. Le nombre d'obstacles à l'écoulement (plus de 2500 entre buses, clapet entre autres) est témoin de cette rupture et représente un facteur majeur limitant la migration des organismes aquatiques vers les affluents de la Seine.

A.2. Pratiques de dragage et clapage

Des dragages d'entretien sont nécessaires pour garantir la sécurité de la navigation en maintenant le tirant d'eau nécessaire pour permettre aux navires d'accéder aux zones portuaires. Les dragages d'entretien sont effectués dans certaines portions du chenal de navigation, ou dans les secteurs élargis du fleuve favorables à la sédimentation (ex bassins portuaires, zones d'évitage).

Différents opérateurs sont responsables de ces activités, à savoir VNF pour la Seine en amont de Rouen ; le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) pour la Seine entre Rouen et l'embouchure ; le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) pour le Port du Havre (Port Nord, Port 2000), le grand canal maritime du Havre, les écluses de Tancarville et le port d'Antifer ; le Conseil Départemental du Calvados pour le Port de Honfleur.

Actuellement les dragages d'entretien représentent près de 7 millions de mètres cubes de sédiments par an, soit quasiment l'équivalent du volume de sédiments entrant dans l'estuaire naturellement (Figure 19 et Figure 20). Les sédiments dragués exportés hors de l'estuaire sont clapés sur les zones d'immersion du Machu (qui a remplacé celui du Kannik en 2017 pour le GPMR) et d'Octeville (pour le GPMH).

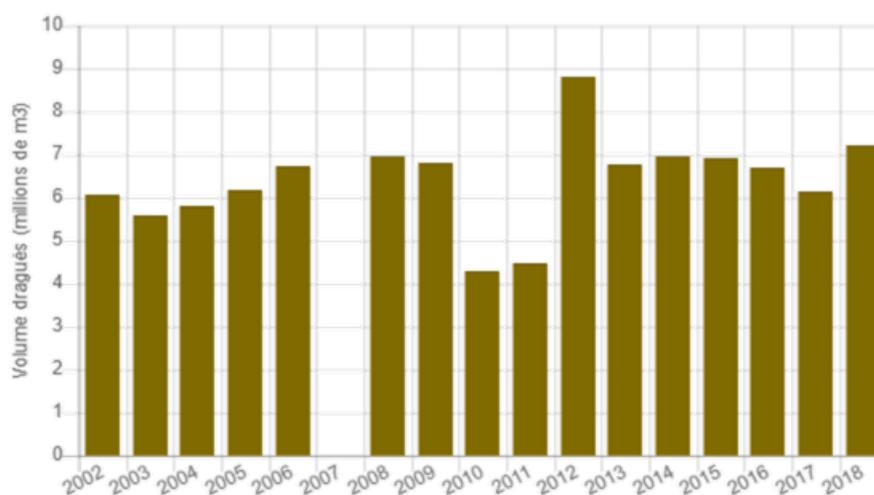


Figure 19. Volume cumulé des sédiments dragués lors des dragages d'entretien par les différents opérateurs (source : Observatoire environnemental de l'estuaire de la Seine)

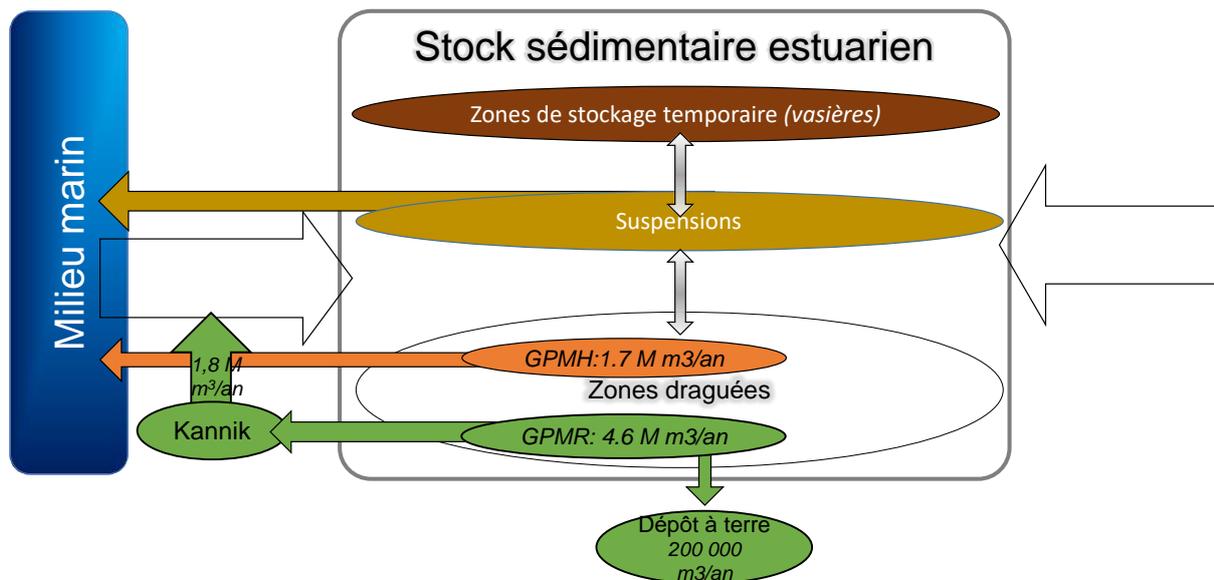


Figure 20. Bilan sédimentaire annuel des relations entre les dragages et les dynamiques hydro-morpho-sédimentaires (d'après Lemoine, 2020)

Le dragage est par définition un processus hydro-morpho-sédimentaire anthropique visant à modifier les évolutions morphologiques résultantes de l'ensemble des processus hydro-morpho-sédimentaires naturels. Ainsi le dragage peut être considéré comme une altération des dynamiques naturels, susceptible d'impacter le fonctionnement écologique des habitats benthiques ou pélagiques ; en entraînant des changements importants des conditions environnementales, notamment :

- (i) l'incision du lit mineur du fleuve (augmentation des zones profondes et du haut intertidal au détriment du reste),
- (ii) l'augmentation des particules en suspension et de la turbidité de l'eau,
- (iii) la réduction de la productivité primaire,
- (iv) la modification de la composition du substrat,
- (v) la perturbation des peuplements aquatiques (ex. réduction de l'abondance des macroinvertébrés, augmentation de la mortalité à différents stades de vie, œufs, larves et juvéniles) (Alizier *et al.*, 2010).

Les effets des perturbations ponctuelles (ex. augmentation de la turbidité, bruit, destruction des habitats sédimentaires, remobilisation des contaminants contenus dans les sédiments) provoquées par les opérations de dragage et clapage dans le lit mineur du fleuve doivent encore être étudiées. Plus particulièrement, un projet du programme Seine-Aval 6, SARTRE (<https://www.seine-aval.fr/projet/sartre/>) visant à mieux comprendre le fonctionnement trophique de la colonne d'eau, présente un volet destiné à mieux déterminer les effets du clapage sur les milieux pélagiques. En effet, certaines espèces pélagiques comme l'éperlan

(*Osmerus eperlanus*) semblent profiter des conditions hydrologiques de la colonne d'eau mais pourraient être perturbées par des modifications des concentrations en matières en suspension.

B. Aménagement à l'échelle de la plaine alluviale

B.1. Artificialisation de l'espace estuarien (ex. zones agricoles, urbanisation, etc)

L'anthropisation des espaces naturels de la plaine alluviale de la vallée de la Seine a provoqué une transformation importante du paysage estuarien, entraînant des changements importants dans la structure et l'arrangement spatial des habitats naturels. Les milieux les plus concernés par ces modifications sont les **zones humides**, qui ont subi une **importante diminution de leurs surfaces (B.1.1)** (§ 3.2). La conséquence est un affaiblissement global de leur fonctionnalité à l'échelle de l'estuaire. En effet, les milieux amphibies et prairiaux contribuent fortement au fonctionnement écologique de l'estuaire en assurant :

- un rôle d'épuration de l'eau par leur capacité de dégradation de l'azote, du phosphore, des matières en suspension et des micropolluants, via les processus biogéochimiques et d'assimilation par les boucles microbiennes et végétales ;
- une importante capacité d'accueil et de support de biodiversité, du fait de leur rôle trophique, d'abri pour les espèces migratrices, de lieu de reproduction ou encore d'alimentation et croissance. ;
- un rôle de rétention ou de restitution de l'eau selon les saisons. Les prairies humides constituent les principales zones de stockage-transfert-restitution d'eau (pluviale, de crue) (Maman & Vienne, 2009).

B.2. Artificialisation du régime hydraulique (Utilisation du réseau de drainage, pompage, création diguettes)

Au niveau hydromorphologique, les réseaux de drainage (ex. fossés) évacuent l'eau vers le réseau hydrologique naturel (notamment la Seine), avec un impact potentiel sur le fonctionnement de l'hydrosystème. Ce type d'aménagement permet de limiter les impacts des excès d'eau hivernaux sur les rendements agricoles et maintenir une activité agricole plus stable. De même, l'entretien des mares de chasse prévoit la création d'un réseau de drainage, pompage et parfois de diguettes.

L'artificialisation du régime hydraulique de ces milieux a provoqué un **assèchement progressif des zones humides** et une **diminution importante des zones humides et inondables (B.2.1)**. Une progression importante des zones mésophiles (sèches la majeure partie de l'année) au détriment des zones hygrophiles et mésohygrophiles (humides une grande partie de l'année) a été mise en évidence par des études précédentes (SAFEGE, HORIZONS, ECOSPHERE, 2001). Ainsi, les zones à caractère plutôt sec sont majoritaires

alors que pour une zone alluviale, ce sont les zones à caractère plus humide (les zones mésohygrophiles ou hygrophiles) qui devraient dominer.

On observe ainsi, une perte conséquente du **pouvoir filtrant** de ces zones et de la **capacité d'accueil** pour plusieurs espèces, notamment par l'altération des habitats essentiels de repos ou d'alimentation pour l'avifaune et de reproduction pour l'ichtyofaune. Par exemple, la présence d'une lame d'eau temporaire correspond aux préférences écologiques des anatidés et des limicoles en hivernage mais aussi en reproduction. Aussi, ce sont des secteurs de prédilection pour la reproduction des passereaux prairiaux et surtout les paludicoles. Les deux groupes exploitent ces zones à différents gradients d'humidité ou d'assèchement.

Une étude réalisée par le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine en 2014 (Bricard and Davy, 2014), a permis de constater une **dégradation marquée des sols tourbeux** du marais Vernier en lien avec la gestion des niveaux d'eau. Si la saturation en eau n'est pas maintenue à un niveau suffisant, la tourbe se dégrade au contact de l'air, se minéralise, relâchant ainsi le carbone sous forme de CO₂. Aujourd'hui, on estime que **57 % de la surface du marais subit ce type de dysfonctionnement en période estivale** (PNRBSN, 2014).

B.3. Arrangement spatial des activités anthropiques (zones urbaines, industrielles, agricoles, etc)

Une **rupture du continuum écologique entre habitats (B.3.1) intra et inter-secteur des milieux amphibies et prairiaux** peut être observée dans le secteur intermédiaire et amont de l'estuaire. A l'aval, les ensembles humides sont représentés par des grandes surfaces peu distantes entre elles. A l'opposé, à partir du secteur intermédiaire, les surfaces prairiales présentent des surfaces plus modestes et fragmentées. Cela est amplifié historiquement par les aménagements de la Seine pour la navigation qui ont fait disparaître beaucoup de zones rivulaires mais aussi par l'artificialisation des sols en général. Par exemple, dans les boucles de Seine en aval de Rouen, l'extraction de matériaux (granulats et tourbe principalement) s'est réalisée au détriment des zones humides préexistantes.

C. Usages et pratiques à l'échelle du bassin versant

C.1. Pressions chimiques industrielles, agricoles et urbaines menant à des apports de micropolluants et macro/micro-déchets

La Seine draine un bassin versant d'environ 78 000 km² où se concentre 40 % de la production industrielle française et 30% de la population. Après trois décennies de forte pollution de la Seine et de son estuaire, la qualité des eaux a été améliorée à partir des années 1980 par la mise en place d'une politique de gestion visant à diminuer les pressions chimiques sur le bassin versant du fleuve. Cependant, une multi-contamination chimique de l'estuaire persiste avec la présence de nombreux contaminants à des teneurs parfois encore élevées dans les sédiments, l'eau et le biote (Fisson, 2014 et Fisson, 2017) (Figure 21).

Malgré la diminution des rejets, les **activités industrielles, urbaines et agricoles** représentent encore aujourd'hui une source directe de contaminants importante. Un inventaire des micropolluants présents dans les rejets a permis d'estimer la pression actuelle des divers secteurs d'activité sur l'estuaire, mettant en évidence des apports de nombreuses familles de contaminants chimiques (métaux, HAP, COV, etc. (pour plus des détails voir [Fisson, 2015](#)). En lien avec les pratiques agricoles, l'utilisation de pesticides ([Figure 21](#)) représente une source de contamination particulièrement importante dans le contexte de la Seine ([AESN, 2019](#)).

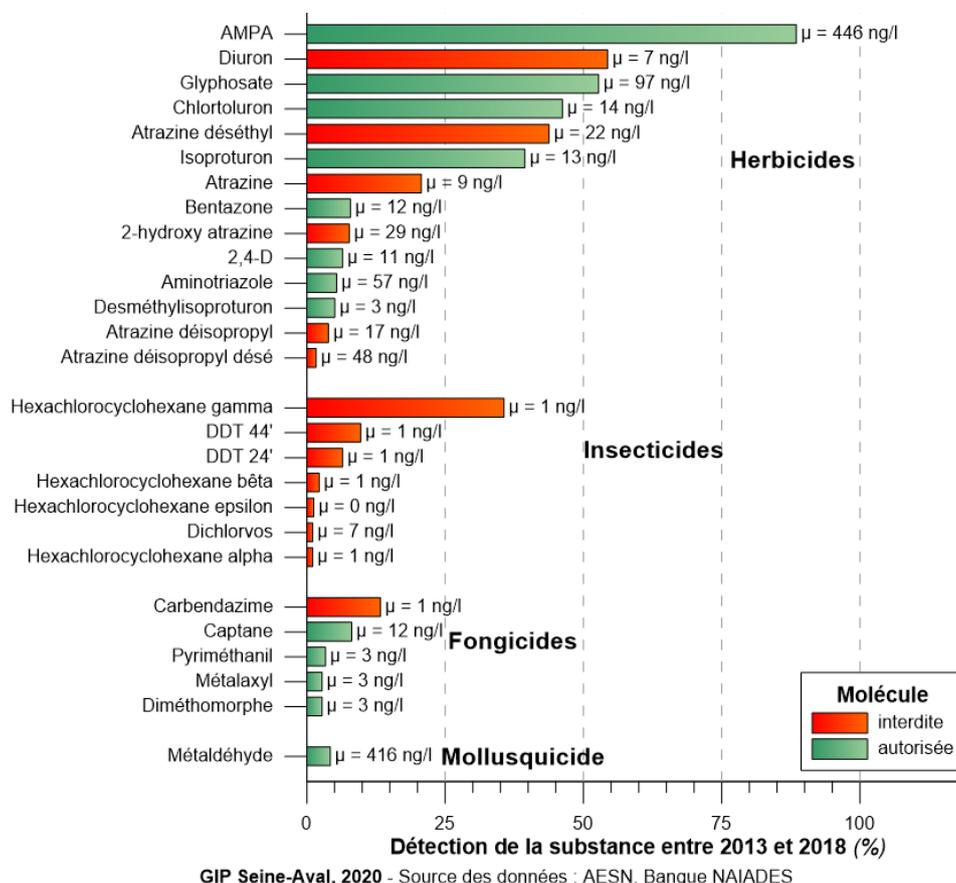


Figure 21. Détection et concentration moyenne des principaux pesticides et de leurs métabolites dans l'estuaire de la Seine entre 2013 et 2018

Ces sources actuelles alimentent le flux de contaminants circulant dans la Seine, qui s'ajoute à celui issu des contaminants déjà présents dans le milieu. Ces derniers sont un héritage historique de la pollution passée de la Seine et constituent des stocks pouvant être considérés comme des sources secondaires de contaminants vers le milieu. Un travail de photo interprétation a été mené afin d'identifier les zones d'accumulation de sédiments (et de la pollution associée) transitant dans la Seine dans les années 60-70 aujourd'hui déconnectées du lit mineur ([Fisson, 2017, Figure 22](#)). Enfin, des apports ponctuels dans le

temps peuvent venir enrichir ce flux circulant, lors de situations exceptionnelles (accidents industriels, naufrages, forte crue...).

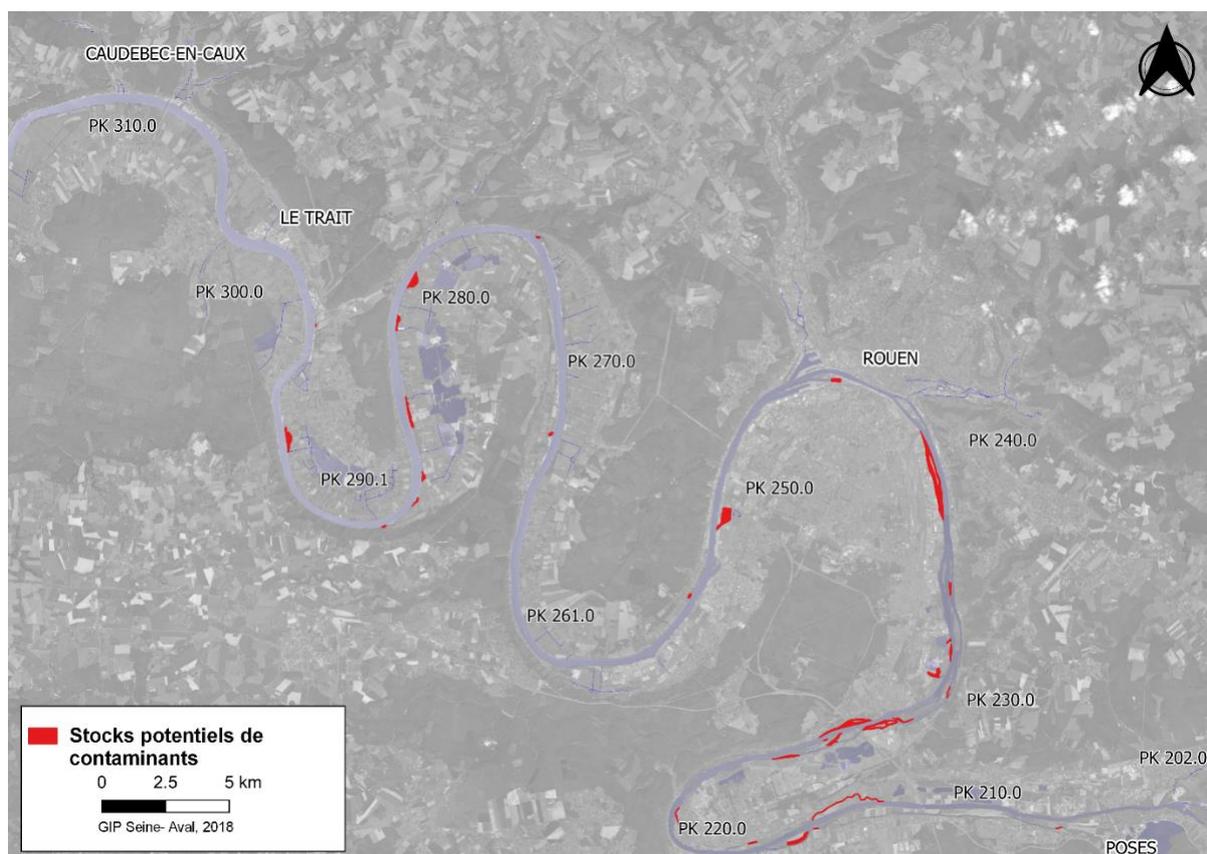


Figure 22. Stocks potentiels de contaminants identifiés par photo-interprétation en bord de Seine (depuis Fisson, 2017, Fascicule 3.6 GIP Seine-Aval)

La pression chimique exercée sur l'estuaire entraîne une bio-accumulation de contaminants et des impacts toxicologiques pour les espèces présentes dans l'estuaire et la Baie de Seine. La caractéristique principale de cette pression chimique est la **multi-contamination (« effet cocktail »)**, avec une présence de très nombreuses familles de substances chimiques, à des concentrations parfois élevées (Fisson, 2012). La présence de PCB, de HAP, de certains métaux est spécifique d'une signature de la Seine (AESN, 2019), mais des phtalates, des PBDE, des pesticides, des résidus médicamenteux entre autres, sont également retrouvés dans les différents compartiments environnementaux de l'estuaire (Fisson, 2014). Ces substances sont à l'origine de diverses perturbations (effets génotoxiques, neurotoxiques et des perturbations endocriniennes) enregistrées à tous les niveaux d'organisation (de la cellule à l'individu) et chez l'ensemble des organismes suivis. Ces résultats témoignent d'un **état de santé dégradé des organismes aquatiques**. Cependant, des études sur des flets prélevés à l'embouchure de la Seine montrent que les effets observés sont inférieurs à ceux obtenus il y a 10 ou 15 ans, indiquant une baisse de la pression chimique en estuaire de Seine (Couteau, 2020). Les investigations menées sur l'avifaune confirment que les oiseaux nichant dans et

autour de l'estuaire sont fortement exposés aux polluants organiques persistants (POPs), en lien avec la composition et l'origine de leur alimentation. Le goéland marin apparaît particulièrement exposé aux POPs en raison de sa position trophique élevée. La grande majorité des individus de cette espèce présents en Seine dépassent les seuils de toxicité du mercure, des PCB et des DDTs. Dans leur ensemble, les résultats obtenus par les suivis scientifiques révèlent une qualité médiocre des eaux estuariennes entre 2015 et 2017.

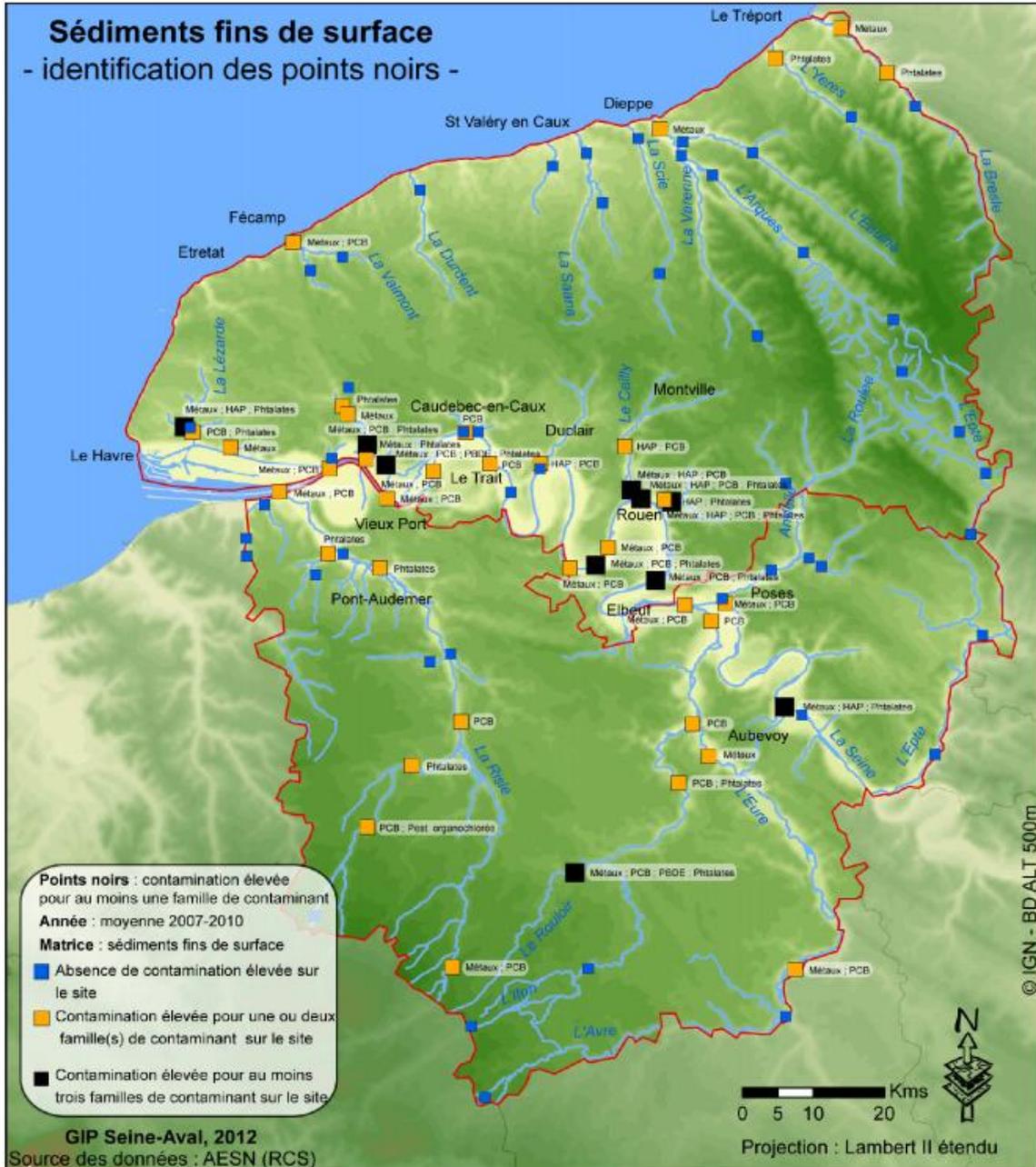


Figure 23. Niveau de qualité de la matrice sédimentaire

Selon leurs caractéristiques physiques, les habitats estuariens sont touchés à divers degrés par l'accumulation de **déchets plastiques**. L'estuaire de la Seine est en effet particulièrement sensible à cette pollution du fait d'apports importants du bassin versant amont, d'un stock historique conséquent et de nombreux sites d'accumulation de macrodéchets (Tramoy *et al.* 2019, *Projet MACROPLAST*) (Figure 24). Les rares berges naturelles et leur végétation rivulaire jouent un rôle de peigne et retiennent les déchets lors de leur dérive en période de crue ou de forte marée, même si elle peut parfois jouer un rôle d'écran refoulant les macrodéchets volumineux. Les zones en pentes douces sont propices aux dépôts lors du flot et la présence d'une arrière berge plongeante facilitera l'accumulation de déchets déposés lors de crues ou de grandes marées. Enfin, l'agencement à « contre-courant » des bassins portuaires est propice à la retenue des déchets flottants.

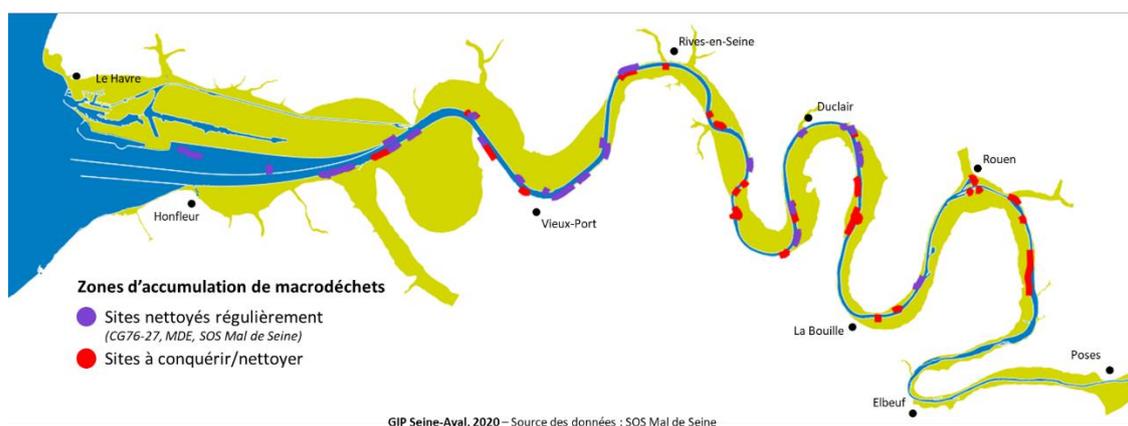


Figure 24. Zones d'accumulation des macrodéchets en estuaire de Seine

Les conséquences environnementales liées à leur accumulation sur les berges ou dans l'eau sont nombreuses et le fonctionnement de l'estuaire facilite leur dégradation en microplastiques. Des impacts avérés sur les organismes aquatiques et les oiseaux, que ce soit des dommages physiques (piégeage, étranglement ou enchevêtrement) ou écotoxiques (exposition aux contaminants chimiques les composant ou adsorbés à leur surface) (GIP Seine-Aval, 2015). En estuaire de Seine, des microplastiques ont été retrouvés dans les eaux, les sédiments et les organismes aquatiques, montrant leur transfert dans la chaîne trophique. Les effets d'une exposition à un mélange de microplastiques ont également été observés, comme des modifications du comportement de camouflage pour les soles, des modifications du développement des larves de soles et des changements de la structure de la population chez les copépodes après plusieurs générations (Cachot & Gasperi, en cours).

C.2. Source de nutriments azotés

Les pratiques agricoles représentent une **source importante de nutriments**, notamment de composés azotés. Ainsi il s'avère que les parcelles pâturées et fauchées sont nombreuses à recevoir une fertilisation supérieure à 100 kg/ha/an (Garnier *et al.*, 2018) (Figure 25).

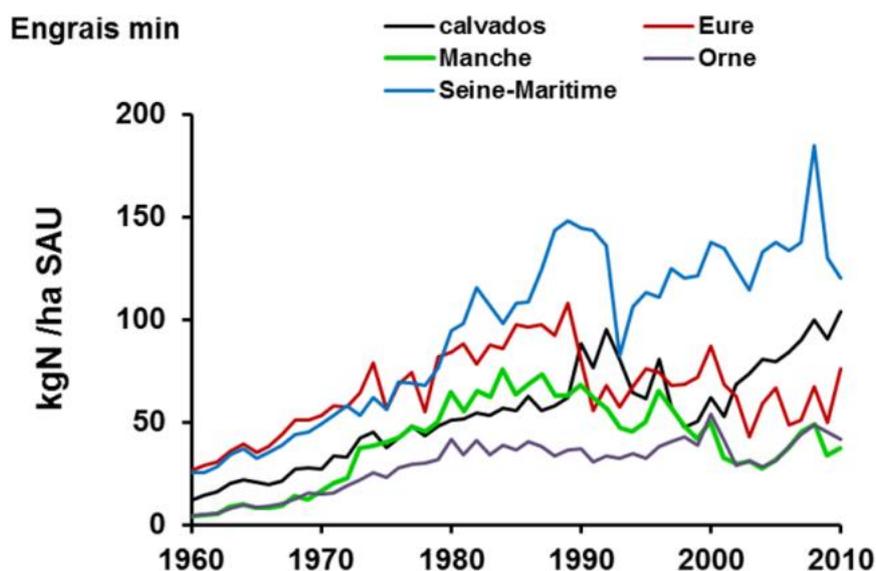


Figure 25. Evolution de l'utilisation des engrais minéraux de 1960 à 2007 pour les 5 départements de Normandie (source : Garnier *et al.* 2018, Projet Seine-Aval 5 RESET)

Ceci contribue à exacerber le déséquilibre dans les rapports entre différents nutriments (§ C.2.1). Bien que les excédents en phosphore tendent désormais à diminuer, la quantité stockée dans les sols cultivés est telle que leur désorption par ruissellement ou drainage risque encore d'alimenter de manière significative les cours d'eau en phosphore dissous. Une très forte régression des terrains mésotrophes à l'échelle de la plaine alluviale (moyennement riches en éléments nutritifs) a été observée en faveur des terrains eutrophes du fait de l'intensification des pratiques agricoles (extension des cultures, apports d'engrais...) (SAFEGE, HORIZONS, ECOSPHERE, 2001).

4. ORIENTATIONS POUR AMELIORER LE FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

4.1 Les grandes orientations préconisées pour la restauration de l'estuaire

Sur la base des résultats du diagnostic et des altérations constatées, cinq grandes orientations concernant la restauration de la fonctionnalité estuarienne ont pu être déterminées (Tableau 4). Des types d'actions spécifiques pour résorber l'altération du physiotope ou de l'habitat ont ainsi été proposées dans le cadre de ces grandes orientations.



ORIENTATIONS

Tableau 4. Synthèse des principales orientations

Orientation	Action de restauration pour résorber l'altération du physiotope/habitat	Altération du physiotope/habitat visée
O.1. Diversification des habitats aquatiques du lit mineur	O.1.1. Création de zones lenticues (diversification des conditions hydrologiques du lit mineur, ex. « trous de Seine »)	A.1.1
	O.1.2. Reconnexion ou recréation d'annexes hydrauliques (bras morts, bras secondaires, etc.)	A.1.6
	O.1.3. Diversification des berges (diminution du linéaire artificialisé à pente abrupte)	A.1.3
O.2. Préservation, recréation et réhabilitation des vasières et de leur accessibilité	O.2.1. Restauration des dynamiques hydro-sédimentaires favorisant le maintien et le développement des vasières intertidales	A.1.2 ; A.2.1
	O.2.2. Restauration des continuités écologiques entre habitats subtidaux peu profonds et intertidaux inférieurs	A.1.5 ; A.1.7
O.3. Restauration des gradients latéraux d'habitats entre le lit majeur et le lit mineur et amélioration de la continuité latérale	O.3.1. Restauration de la continuité et de l'intégrité de la mosaïque d'habitat latéraux	A.1.4 ; B.3.1
	O.3.2. Restauration d'espaces de mobilité latérale du fleuve et des zones d'expansion des crues	B.1.1 ; B.2.1
	O.3.3. Diminution du nombre d'obstacles ou amélioration de leur franchissabilité	A.1.7
O.4. Préservation et restauration des milieux humides de la plaine alluviale	O.4.1. Augmentation des surfaces de prairie	B.1.1
	O.4.2. Réhabilitation du caractère humide des milieux du lit majeur via l'optimisation de la gestion des niveaux d'eau et la diminution du drainage	B.2.1
O.5. Limiter les impacts de la pollution	O.5.1. Gestion et réduction des stocks de micropolluants dans les sédiments anciens	C.1.1
	O.5.2. Gestion et réductions des dépôts de macrodéchets sur les berges	C.1.1
	O.5.3. Diminution des apports en micropolluants et macrodéchets	C.1.1
	O.5.4. Réduction des intrants en nitrates	C.2.1

O.1. Diversification des habitats aquatiques du lit mineur

La diversité et la complémentarité des habitats constituent des facteurs fondamentaux pour garantir une bonne expression de la fonctionnalité écologique et pour répondre aux différentes exigences écologiques des communautés aquatiques. Idéalement, il est possible de définir un schéma de zonation selon un gradient dépendant du régime hydraulique, qui évolue des milieux d'eau courante (chenal principal) aux milieux calmes tels des annexes, plus ou moins connectés au chenal principal. Certains de ces milieux peuvent être en communication permanente avec le chenal principal alors que d'autres ne peuvent l'être que lors d'inondations exceptionnelles. A la dynamique hydrologique d'un physiotope sont associées d'autres caractéristiques structurelles de l'habitat, notamment géomorphologiques (type de substrat), physiques (salinité), thermiques, et biologiques (présence de végétation, d'abris, de ressources nutritives). La diversité des peuplements des communautés aquatiques, répond donc à l'hétérogénéité de ces conditions. Pour les poissons par exemple, les milieux caractérisés par un hydrodynamisme marqué sont globalement favorables aux espèces lithophiles alors que les milieux lenticques hébergent les espèces phytophiles (ex. brochet).

O.1.1. Création des zones lenticques

Dans ce cadre, des actions menant à **diversifier les conditions hydrodynamiques** dans le lit mineur du fleuve sont cruciales pour répondre à l'altération de banalisation des habitats, en **particulier pour le secteur endigué**. Notamment, la diversification des conditions à travers la **création de zones à faible hydrodynamisme (ex. anciens « trous de Seine ») (O.1.1)**, apparaît essentielle afin de rétablir des habitats propices aux assemblages piscicoles inféodés aux milieux lenticques en leur fournissant des habitats moins soumis au régime hydrologique du chenal principal.

Dans le contexte de l'estuaire de la Seine, un exemple de milieux avec un fort potentiel de restauration de la diversité des conditions hydrologiques est fourni par les anciens « trous », anciennement connectés au fleuve et favorisant la végétation des vases exondées (roselières, mégaphorbiaies et saulaies alluviales, en lien avec l'orientation O.3.1). Des préconisations de gestion de ces milieux étaient déjà proposés pour l'estuaire de la Seine ([SAFEGE](#), [HORIZONS](#), [ECOSPHERE](#), 2001). L'objectif principal de la réhabilitation de ces milieux est de permettre leur inondation régulière par la Seine via la modification structurelle des berges.



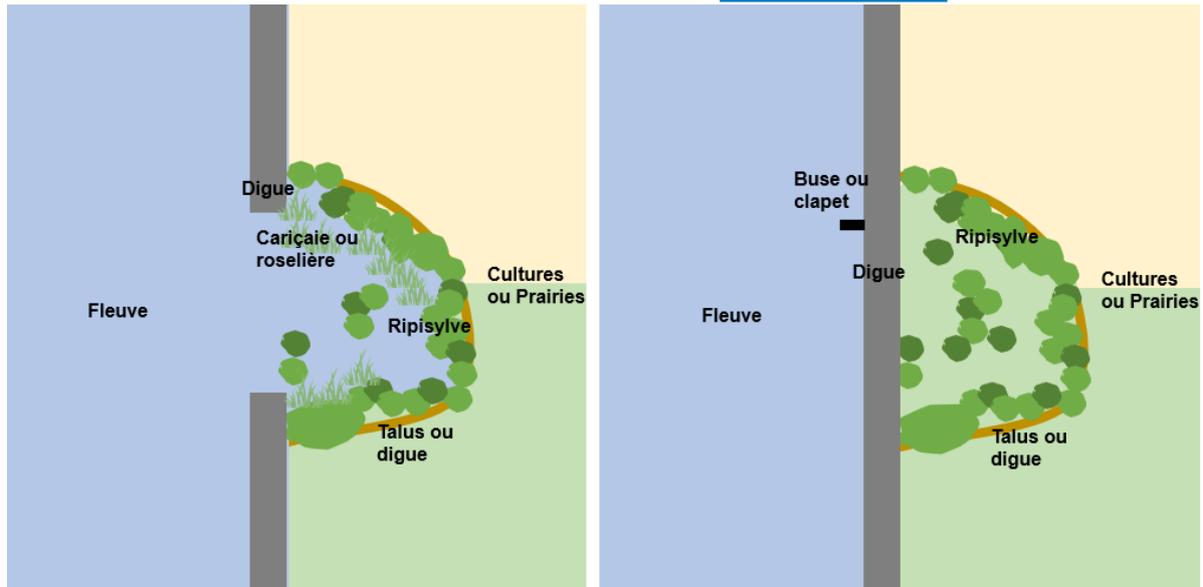


Figure 26. A gauche. Trou de Seine directement connecté au fleuve. A droite. Trou de Seine déconnecté du fleuve. Schéma modifié depuis SAFEGE, HORIZONS, ECOSPHERE (2001)

0.1.2. Reconnexion ou recréation d'annexes hydrauliques

La préservation, la restauration ou la création **d'annexes hydrauliques (bras secondaires, bras morts, noues,)** (O.1.2) permettrait d'un côté d'augmenter la capacité d'accueil de l'estuaire vis-à-vis des communautés aquatiques et de l'autre d'améliorer la fonctionnalité estuarienne d'un point de vue hydraulique (lissage des crues et des étiages), et physico-chimique (potentiel épurateur) (Figure 27).



Figure 27. Exemple de reconnexion d'une annexe hydraulique dans la Loire (source : <http://zones-humides.org>)

L'arrangement spatial de ces habitats doit cependant respecter les exigences en termes de continuité fonctionnelle des espèces (ex. alternance entre habitats d'alimentation et repos). Des outils de modélisation de la continuité écologique (Anaqualand, Le Pichon *et al.*, 2006)

ont déjà été employés dans le contexte de la Seine (projet ANACHONDA, programme Seine-Aval 5) et pourront être mobilisés pour préciser les objectifs de restauration à l'échelle locale d'un projet en particulier.

Restauration d'annexes hydrauliques dans le cadre du plan Rhône

La diversification des habitats (et des conditions hydrodynamiques) dans le contexte du Plan Rhône (Figure 28) a conduit à une nette amélioration du fonctionnement écologique du fleuve et une augmentation considérable de la diversité spécifique. Depuis le début des années 2000, plus de 40 annexes (lônes), 38 km de bras secondaires et berges du fleuve ont été restaurés, 150 km de fleuve et affluents sont de nouveau accessibles aux poissons migrateurs. Grâce à des lônes reconnectées au lit mineur, plusieurs espèces inféodées au milieux lenticques ont retrouvé leurs habitats, tout en atténuant les événements de sécheresse ou les inondations.



Figure 28. Travaux de restauration des annexes hydrauliques (lônes dans le secteur de Donzere) dans le cadre du plan de restauration du Rhône (crédit photo CNR)

0.1.3. Diversification des berges

La diversification des habitats aquatiques passe aussi par la **diversification des berges (0.1.3)**, notamment par la **revalorisation écologique des pieds des berges**. Idéalement, la recréation de berges en pente douce créant un gradient entre les habitats subtidiaux et intertidaux serait à privilégier pour les milieux estuariens (AESN, 2007). Cependant, afin de minimiser le risque d'érosion, la diversification de berges peut s'effectuer à travers la

réalisation de profils « mixtes », avec des pieds de berge en enrochement qui permettent de complexifier les habitats subtidiaux en augmentant leur capacité d'accueil et la disponibilité de zones de repos et de refuge.

Dans le cas où des contraintes majeures liées aux usages rendent impossible la réhabilitation des berges (ex. bassins portuaires), la mise en place de **récif**s artificiels pourrait représenter une solution d'amélioration de la capacité d'accueil vis-à-vis de plusieurs espèces (ex. brochet), notamment en améliorant le rôle de nourricerie pour les poissons de ces milieux (ex. Mercader *et al.*, 2017). Cette solution paraît particulièrement importante pour les milieux aquatiques fortement anthropisés, notamment les bassins portuaires et les zones fluviales urbaines.

O.2. Préservation, récréation et réhabilitation des vasières et de leur accessibilité

Le **maintien et/ou le développement de surface de vasières** dans l'estuaire de la Seine apparaît comme un enjeu prioritaire pour l'amélioration de la fonctionnalité globale de l'estuaire.

O.2.1. Restauration des dynamiques hydro-sédimentaires favorisant le maintien et le développement des vasières intertidales

Afin d'atteindre cet objectif, il est primordial de **recréer des dynamiques hydro-sédimentaires** favorisant la **genèse et le maintien de ces habitats** (O.2.1). Cet objectif passe par la maîtrise des processus hydro-sédimentaires qui façonnent la répartition des substrats meubles et constitue l'agent forçant de la configuration des courants, de la salinité et de la turbidité. Ces facteurs conditionnent à leur tour les fonctions biologiques de l'estuaire. Cet objectif peut être atteint via **l'effacement partiel ou total des obstacles empêchant la libre évolution de ces vasières** et la **redynamisation des échanges hydrauliques** entre les vasières et les zones intertidales hautes. La réhabilitation de ces processus permettrait de résorber ponctuellement les effets de l'endiguement qui a amplifié les dynamiques érosives et de dépôt (érosion du chenal et comblement des milieux latéraux de l'estuaire). Dans le cadre de cette orientation, la mobilisation d'outils de modélisation des processus hydro-morpho-sédimentaires apparaît comme nécessaire pour déterminer la meilleure option de restauration à déployer dans ce contexte pour garantir l'efficacité et la pérennité de la mesure et mieux caractériser les impacts et les évolutions potentiels sur les habitats adjacents.

Une réflexion doit être menée à l'échelle globale et locale sur le **dimensionnement et la structuration spatiale des zones intertidales**. En effet, des études précédentes (Teichert *et al.*, 2018) ont montré qu'à l'échelle globale, la restauration de vastes étendues de vasières est corrélée à des abondances de poissons plus élevées. Au contraire, la récréation fragmentaire de plusieurs vasières de faible surface semble offrir une moindre capacité d'accueil, notamment en tant que nourricerie pour les poissons. A l'échelle locale, le bon fonctionnement écologique semblerait plutôt lié à l'alternance de zones subtidales et intertidales, qui favoriserait les échanges biotiques (organismes) et abiotiques (sédiments, nutriments, etc.).

Build with nature : l'exemple des pratiques de dragage et clapage dans l'Escaut

Des actions entreprises dans le contexte d'autres estuaires comme l'Escaut, ont démontré que des **pratiques de dragage et clapage adaptatives** (*morphological dredging* ; ex. [Meersschaut et al., 2004](#)) peuvent permettre la recréation d'habitats fonctionnels. Dans ce cadre, les sédiments dragués sont utilisés pour remodeler les structures sédimentaire (vases ou sables). Ce type de stratégie de dragage type « *build with nature* » consiste à détourner les processus naturels, pour:

- limiter les couts liés aux transports des sédiments
- adapter la morphologie des zones à proximité des zones naviguées pour limiter la sédimentation au sein de ces dernières et donc in-fine limiter les dragages
- recréer des habitats à fortes valeurs écologiques en utilisant les sédiments dragués.

O.2.2. Restauration des continuités écologiques entre habitats subtidaux peu profonds et intertidaux (continuum subtidal-intertidal)

Ainsi, **la restauration des continuités écologiques entre habitats subtidaux peu profonds et intertidaux (continuum subtidal-intertidal) (O.2.2)** structurées selon un gradient de pentes douces (et par conséquent de temps d'émersion) assurerait la complémentarité des habitats et leur fonctionnement réciproque. Par exemple, les poissons utilisent les habitats intertidaux pour se nourrir pendant la marée haute et les habitats subtidaux pour se réfugier pendant la marée basse, alors que les oiseaux limicoles, au contraire, utilisent les vasières nues pendant la marée basse pour s'y nourrir. Une telle structuration spatiale des habitats, implique la préservation et la promotion des processus d'inondation naturelle liés aux dynamiques tidales. Dans cette optique, la **préservation et la restauration des filandres** représente un enjeu prioritaire pour redynamiser les flux entre les différents secteurs de l'estuaire, notamment entre les milieux intertidaux et les zones humides du lit majeur (en lien avec O.3.4). **La restauration d'un volume oscillant** capable d'éviter le comblement de ces systèmes et de les auto-entretenir devrait alors être envisagée. Cependant, un travail spécifique pour chaque projet doit être mené afin de déterminer, sur la base d'objectifs de restauration partagés, la meilleure option à mettre en place. En effet, sel

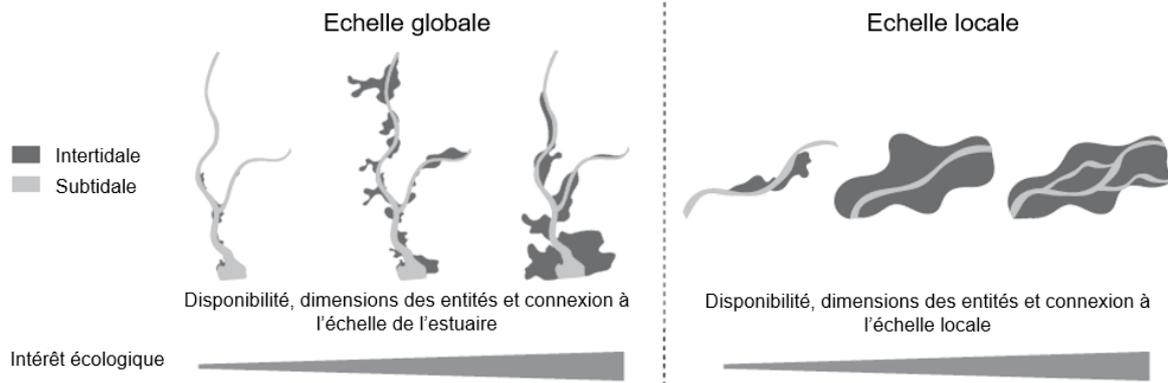


Figure 29. Illustration conceptuelle de l'intérêt écologique de la structuration spatiale des zones intertidales à l'échelle de l'estuaire et locale (10-100m) (source Teichert *et al.*, 2018)

En complément aux mesures visant à recréer un profil écologiquement fonctionnel, et plus particulièrement particulier afin d'augmenter l'attractivité des milieux estuariens vis-à-vis de l'avifaune, la **création d'habitat de reposoir** à marée haute pour les oiseaux limicoles et les laridés est nécessaire en complément des mesures visant à recréer des habitats d'alimentation tels que les vasières. Les habitats intertidaux supérieurs présentent un fort potentiel en tant que reposoir, avec notamment une faible exposition aux perturbations d'origine marine (ex. vagues, tempêtes), la proximité aux zones alimentaires et le faible risque de prédation. Pour assurer la fonction de reposoir, le dérangement anthropique (passage, chasse, présence de chien, etc.) doit être maîtrisé dans ces secteurs.

O.3. Réhabilitation de la continuité latérale entre lit mineur et les zones humides du lit majeur

Les résultats du diagnostic confirment la présence d'une rupture du continuum latéral entre les habitats du lit mineur et les habitats du lit majeur. Ces résultats sont en accord avec les constats effectués dans des travaux précédents (Poudevigne *et al.*, 2002), qui soulignaient que le paysage de la plaine alluviale et de la vallée de la Seine se trouve déconnecté des dynamiques fluviales (en particulier la limitation du débordement par les crues).

O.3.1. Garantir la continuité de la mosaïque d'habitat latéraux

Garantir la **continuité de la mosaïque latérale (O.3.1)** entre les habitats du lit mineur jusqu'aux zones humides situées dans le lit majeur apparaît comme un enjeu prioritaire à l'échelle de l'estuaire. Ce type d'écosystèmes assure les fonctions de dénitrification (épuration de l'azote) et d'accumulation de matière organique (stockage du carbone organique et des taux de production primaire et secondaire importants). La zone alluviale du secteur de Petiville (pk 325) présente une configuration spatiale présentant les caractéristiques physico-chimiques

et écologiques assurant au mieux ces fonctions (Mchergui, 2014). La mosaïque d'habitats de ce site présente un gradient avec la succession des éléments suivants :

- un substrat vaseux régulièrement recouvert au rythme des marées et du batillage,
- une ceinture d'herbus,
- une roselière (ex. *Phalaris arundinacea* et/ou *Phragmites*),
- une végétation de type mégaphorbiaie,
- une forêt pionnière (ex. type saulaie).

Cette structure suit un gradient d'engorgement en eau allant des sols les plus fréquemment inondés (en position topographique basse et proche de la Seine) aux sols les moins fréquemment inondés (en position topographique haute et les plus éloignés de la Seine). Cependant, les forêts alluviales sont absentes de ce site et notamment :

- une forêt post-pionnière de transition (type peupleraie noire)
- une forêt alluviale à bois dur (type frênaie-chênaie-ormaie).

Un objectif spécifique dans le cadre du maintien de la mosaïque des **habitats concerne la préservation, la récréation et la gestion de ceintures végétales**, notamment les roselières, les mégaphorbiaies et la ripisylve. Les roselières présentent un grand intérêt phytocoenotique ainsi qu'un intérêt ornithologique majeur. La conservation et la restauration à long terme des roselières passe ainsi prioritairement par le maintien des connexions hydrauliques avec le fleuve, notamment son caractère inondable. Cependant, les roselières sont des habitats très dynamiques qui évoluent plus ou moins rapidement. La dégradation de ces milieux peut conduire à terme au développement de boisements naturels à saules divers, Aulne glutineux, Frêne commun ou Chêne pédonculé (Vochelet, 2016). Dans un espace latéral fortement contraint par les usages, il peut être pertinent de spécialiser des secteurs pour conserver une mosaïque d'habitats linéaire (et viser une alternance de milieux ouverts type roselières, mégaphorbiaies et de milieux boisés). Des opérations de gestion adaptative sont alors nécessaires (débroussaillage, rajeunissement, exploitation pour le chaume, contrôle du développement des ligneux) afin d'éviter la fermeture des milieux ouverts. De même, et en complément avec l'orientation O.2.2, il apparaît important de restructurer des ceintures de ripisylve, présentant, entre autres, un intérêt majeur pour l'augmentation de la complexité morphologique des berges. Idéalement, les zones boisées seraient privilégiées devant les eaux plus calmes (ex. trous) afin de diversifier davantage le profil de la berge (Collette et al., 2018). Sur les portions endiguées de l'estuaire, la récréation de ce type de gradient peut être atteinte via la **réduction du linéaire de berge présentant des pentes abruptes et le recul des ouvrages latéraux** (ex. digues, bourrelets ou merlons), de manière compatible avec les usages.





Figure 30. Exemple de gradient d'une mosaïque latérale dans le secteur de Petiville

O.3.2. Restauration d'espaces de mobilité latérale du fleuve et des zones d'expansion des crues

Ceci permettrait au fleuve de retrouver un **espace de mobilité latéral (O.3.2)** et aux habitats latéraux de retrouver des conditions hydrologiques plus favorables pour l'expression de leur fonctionnalité. L'objectif est de laisser place à **des espaces directement connectés à la Seine**, moins soumis au fort hydrodynamisme du chenal principal. Cela permettrait le maintien de la continuité longitudinale et latérale entre les différents types d'habitats, notamment entre les fonds subtidaux (chenal), les estrans et les filandres, ces dernières représentant une voie préférentielle d'échanges physiques et biologiques (en complémentarité avec l'orientation O.2.2 quand les configurations locales le permettent). Dans la continuité de l'orientation O.2.2., **conserver et réhabiliter le rôle fonctionnel des filandres** permettra d'assurer leur rôle de connecteurs écologiques avec les zones humides du lit majeur.

Recréation de vasières : l'exemple de Lillebonne (Seine)

Un exemple de réhabilitation des gradients d'habitat latéraux dans le contexte de la Seine est fourni par les travaux finalisés sur darse de Lillebonne par HAROPA Port de Rouen. Les travaux ont consisté à déblayer une ancienne chambre de dépôt de sédiments de dragage (93 000 m³ de matériaux évacués) et supprimer 300 m de digue de protection en bord de Seine pour reconstituer des milieux intertidaux (soumis à marée) situés à l'embouchure de la rivière du Commerce.



Figure 31. Exemple de restauration du gradient latérale par suppression de digue dans l'estuaire de la Seine à Lillebonne

0.3.3. Diminution du nombre d'obstacles ou amélioration de leur franchissabilité

La **reconnexion hydraulique du fleuve** avec les prairies humides et le réseau hydraulique (affluents, fossés, plan d'eau) représente un autre levier d'action important pour redynamiser les échanges hydrauliques, bio-geo-chimiques et, *in fine*, la continuité écologique entre les habitats du lit mineur et du lit majeur. Cet objectif peut être atteint à travers l'**amélioration de la franchissabilité des seuils** et la **suppression sélective des obstacles à l'écoulement** (buses, clapets, vannes, etc.) **(O.3.3)**.

Au-delà de l'amélioration de l'effet filtre et de la capacité d'accueil des habitats latéraux, la réhabilitation d'un espace de mobilité latérale du fleuve pourrait contribuer à améliorer l'effet de protection contre les inondations (fonction d'écrêtement des crues des zones humides).

Restauration des zones humides : l'anse de Moidrey (Couesnon)

A titre d'exemple, dans le cas du Couesnon, afin de conjuguer les objectifs écologiques et la gestion du risque inondation, ce double bénéfice a été recherché en favorisant le débordement des hautes eaux vers les zones latérales ou les annexes hydrauliques restaurées au moment du débit maximal (ex. Figure 32).



Figure 32. Exemple de restauration d'une zone humide d'un ancien méandre du Couesnon, l'anse de Moidrey, anciennement poldérisé

O.4. Préservation et réhabilitation des zones humides de la plaine alluviale

O.4.1. Augmentation des surfaces de prairie fonctionnelles

Au regard du diagnostic une des actions visant à réhabiliter les zones humides du lit majeur concerne la **préservation, récréation et réhabilitation des grands ensembles amphibies et prairiaux (O.4.1)**. Les enjeux associés à la préservation des milieux amphibies et prairiaux sont à rechercher dans la i) reconquête des milieux profondément anthropisés (zones agricoles intensives, zones industrielles, urbaines et carrières) et ii) d'adapter la gestion des milieux existants. Il y a globalement une pression agricole assez forte qui oriente une gestion plutôt « intensive » impliquant du drainage et des cultures et des prairies peu humides au détriment de zones amphibies avec une végétation de marais. Favoriser les pratiques gestion extensive (ex. pâturage, fauchage) permettrait de restaurer la fonctionnalité de ces milieux et prévenir la progression des végétaux ligneux (Prévosto, 2011).

La réhabilitation (et la reconversion) des milieux artificialisés passe par la récréation de caractéristiques hydrologiques, pédologiques et floristiques aussi proches que possible de celles des prairies fonctionnelles. Des travaux menés dans le cadre de la restauration écologique de prairies humides à vocation agricole suite au comblement d'une ballastière en basse vallée de Seine (Boigné, 2017), montrent qu'en utilisant différents matériaux

pédologiques locaux, on hérite une partie de leurs caractéristiques physico-chimiques et biologiques (et de leurs fonctions écologiques, notamment stockage du carbone organique et la dénitrification).

O.4.2. Réhabilitation du caractère humide des milieux du lit majeur

Au regard du diagnostic, il apparaît essentiel de **réhabiliter le caractère humide des milieux du lit majeur (O.4.2)**. Pour cette finalité, limiter le **drainage des prairies** permettrait la recréation des milieux hydromorphes. La limitation du drainage s'effectue en modifiant le rôle des fossés dans le fonctionnement hydraulique de la vallée. Les sols hydromorphes des plaines alluviales sont susceptibles d'augmenter le potentiel de dénitrification. Ainsi, afin d'augmenter l'épuration et/ou le recyclage des éléments azotés via le couplage nitrification et dénitrification, les prairies, de même que les vasières (O.2), présentent un fort potentiel vis-à-vis de ces deux processus. Les actions de restauration doivent donc viser :

- l'augmentation de la connectivité entre les zones humides et la colonne d'eau de la Seine (apports de composés azotés vers les zones de transformations)
- l'extension des surfaces d'habitat de marais connectés et du temps de connexion à la colonne d'eau, l'augmentation des densités de végétation.

Ces actions peuvent-être complétées par des mesures semi-curatives avec, par exemple, la création de **zones tampons humides** jouant le rôle de filtres des eaux en sortie des réseaux de drainage.

Le niveau de saturation en eau des milieux permet dans certains cas, comme les tourbières, d'éviter la reminéralisation du carbone organique. Par conséquent, **l'optimisation des niveaux d'eau** dans ces milieux paraît essentielle pour préserver les stocks de tourbe. L'objectif de cette orientation, qui s'étend à des milieux autres que les tourbières, est de favoriser la rétention d'eau (en lien avec les orientations O.3.1 et O.3.2) pour favoriser non seulement les processus liés au **stockage du carbone organique ou à la dénitrification mais aussi la capacité d'accueil des espèces**. Ainsi, les situations d'inondations avec une lame d'eau temporaire sur les prairies favorisent des effectifs forts d'oiseaux d'eau hivernants et d'autres espèces nicheuses (ansériformes). Il paraît aussi nécessaire, dans des zones cibles, de **diminuer le niveau de dérangement anthropique** pour favoriser la fonction de réservoir vis-à-vis de l'avifaune.

Dans ce cadre, un exemple de restauration et gestion est fourni par les actions expérimentales menées par le PNRBSN afin de préserver les tourbières du marais Vernier. Suite aux constats de dégradation de certaines portions de la tourbière (PNR,2017). Des études sur l'efficacité de mesures de régulation des niveaux d'eau sont en cours.

O.5. Maîtrise des apports en contaminants chimiques et en macro/microplastiques

Bien que la qualité de l'eau de l'estuaire de la Seine suive une trajectoire d'amélioration, la contamination du milieu estuarien présente encore un impact important sur la santé des

organismes aquatiques et sur l'état des populations (Fisson, 2014; Xuereb, 2019). L'amélioration de la qualité des eaux et des sédiments doit donc impérativement être considérée comme un des objectifs prioritaires pour l'amélioration de la fonctionnalité écologique de l'estuaire. Afin de limiter les risques liés à la contamination et garantir un niveau compatible avec un état de santé « satisfaisant » des individus et des populations, plusieurs objectifs spécifiques peuvent être mis en avant.

0.5.1. Gestion et la réduction des stocks de micropolluants dans les sédiments anciens

Un premier objectif concerne la **gestion et la réduction des stocks de micropolluants dans les sédiments anciens (O.5.1)**. Les aménagements réalisés entre les années 1950 et 1980, posent la question du devenir des sédiments (et des contaminants associés) déposés sur cette période dans le lit mineur et majeur de la Seine. Ces sédiments, encore aujourd'hui présents dans le milieu, constituent des stocks de contaminants potentiellement remobilisables lors d'un aménagement, d'une crue ou d'une tempête. Ils peuvent alors constituer une source de pollution vers le réseau hydrographique et dégrader la qualité des eaux. Ceci met en évidence l'enjeu d'amélioration de la connaissance de ces stocks et de leur dynamique pour éviter ou maîtriser leur remobilisation dans le milieu. Un premier travail d'identification de ces stocks potentiels de contaminants a été mené à partir d'une analyse par photo-interprétation (Fisson, 2017). Cet inventaire est un préalable à la caractérisation de ces stocks et à leur gestion pour **éviter ou réduire une éventuelle remobilisation des contaminants** dans le milieu (Fisson, 2017).

0.5.2. Gestion et réductions des dépôts de macrodéchets sur les berges

De même, il apparaît désormais nécessaire de **gérer et surtout réduire les dépôts de macrodéchets plastiques sur les berges (O.5.2)**. En effet, les berges naturelles (ou celles restaurées) sont susceptibles de devenir des zones de dépôts pour ces déchets. Les nettoyages semblent déjà être très efficaces pour réduire la pollution plastique la plus grossière. Leur coût/efficacité peut potentiellement être optimisé, mais ils ne régleront pas le flux résiduel à la mer de quelques dizaines de tonnes composées de macroplastiques plus fins, inférieurs à une dizaine de centimètre (Tramoy *et al.*, 2019).

0.5.3. Limiter les nouveaux apports en micropolluants et macrodéchets

En parallèle, une politique visant au **maintien voire l'accroissement des efforts pour limiter les apports en contaminants et en macrodéchets (O.5.3)**, qu'ils soient d'origine industrielle, urbaine ou agricole. En effet, les usages actuels sur le bassin versant de la Seine (rejets directs dans le réseau hydrographique, apports par ruissellement et apports via les nappes phréatiques), continuent à déterminer une pression notable sur les milieux estuariens, qui se cumule aux usages passés qui ont participé au stockage de contaminants dans les matrices environnementales. Une attention particulière devrait être portée à la nature des supports utilisés dans la mise en œuvre des mesures de restauration qui peuvent représenter des

sources locales de pollution de macrodéchets (ex. matériaux géo-synthétiques, grillage en plastique, etc.)

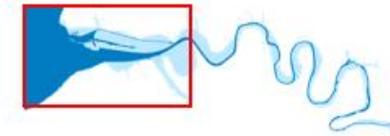
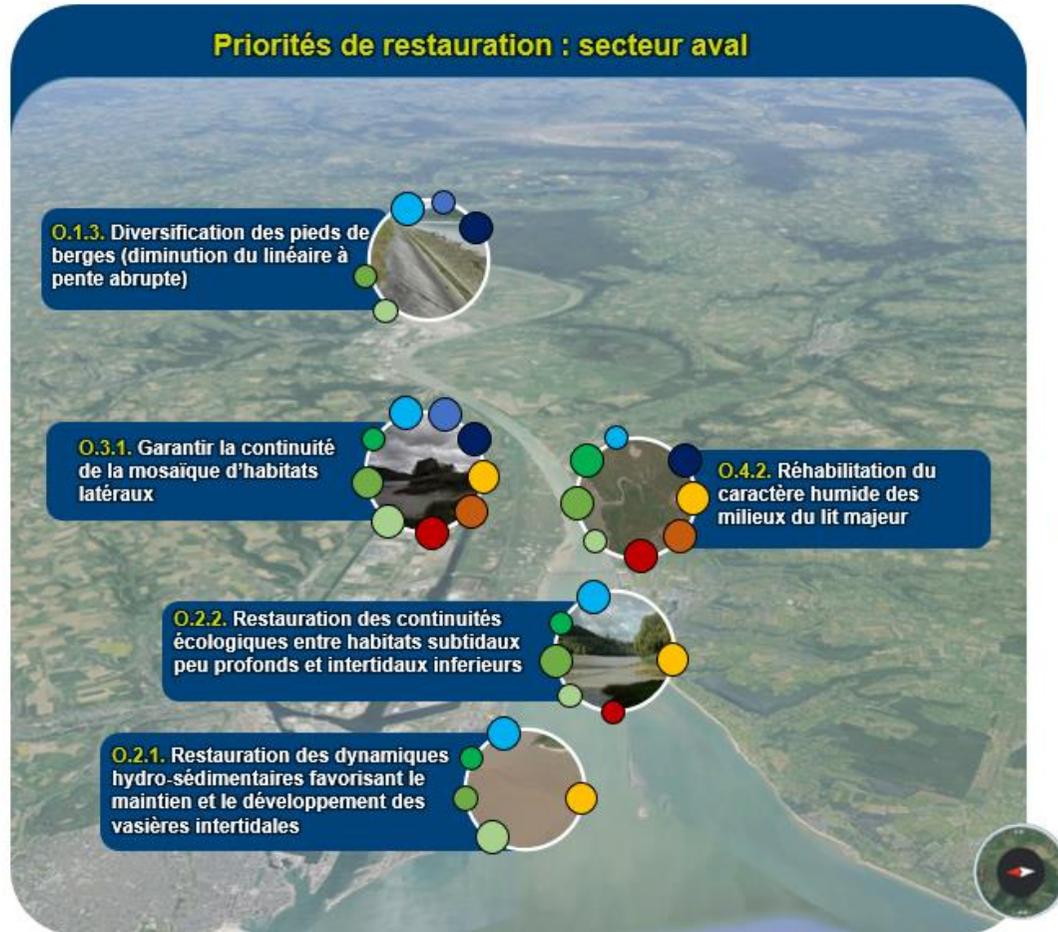
Au regard des effets (directs, indirects et cumulés) sur les organismes encore méconnus de la contamination chimique il apparaît désormais essentiel de promouvoir des actions de recherche visant à mieux **appréhender les impacts globaux sur la fonctionnalité estuarienne** (ex. nourricerie et effets à l'échelle de la population). La priorisation des substances impactant les organismes aquatiques et la recherche des sources ou des leviers d'action pour réduire la contamination chimique et la dissémination de macro/micro-plastiques s'inscrit également dans cet enjeu d'amélioration de la connaissance. La caractérisation de valeurs de référence robustes pour quelques indicateurs d'intérêt, dans une perspective de consolider l'approche « indicateurs biologiques » (i.e. LOE biomarqueurs), a été identifiée comme fondamentale pour interpréter les tendances évolutives issues des suivis et mettre en place des stratégies de gestion adaptées. Une attention particulière doit être portée sur les situations de pics de pollution. Face aux enjeux, le défi est de savoir si ces pics impactent la qualité de l'eau de manière significative au regard des situations chroniques, afin de préciser les problématiques de gestion et prioriser les actions.

O.5.4. Réduction des intrants en nitrates

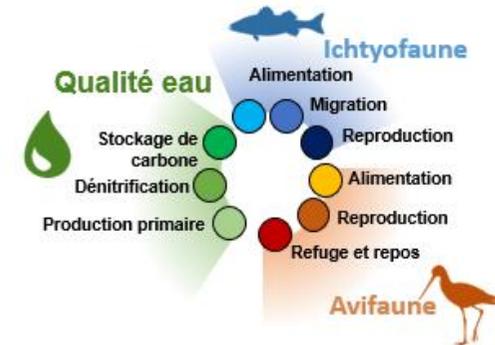
En synergie avec l'augmentation des surfaces de zones favorables à la dénitrification (O.4), des actions de gestion préventives avec la mise en œuvre de bonnes pratiques associées aux leviers agronomiques, notamment concernant la rationalisation de l'enrichissement de sol (et des traitements phytosanitaires) doivent être considérées. Afin rétablir les équilibres stœchiométriques entre les différents sels nutritifs présentes dans l'eau et réhabiliter un niveau trophique des zones humides compatible avec le fonctionnement écologique de l'estuaire, il est nécessaire de **réduire les intrants de nitrates (O.5.4)** dans le système hydrographique. Ceci est possible en réduisant en amont l'utilisation des nitrates et notamment la fertilisation des zones agricoles. A ce titre, les Mesures Agro-Environnementales et Climatiques (MAEC) permettant d'accompagner le changement de pratiques agricoles intensives vers des pratiques agroécologiques et de maintenir des pratiques vertueuses qui tendent à disparaître, ont été intégrées dans les Programmes de Développement Rural Régionaux (PDRR). Des actions de gestion sont d'ores et déjà en place dans la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine où, sur une partie des prairies, la fertilisation est maintenant interdite. Des études sur la pertinence et les impacts de cette fertilisation sont actuellement en cours dans ce cadre.



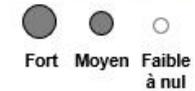
4.2 Synthèse graphique des orientations de restauration prioritaires par grandes secteurs



■ Fonctions écologiques ciblées

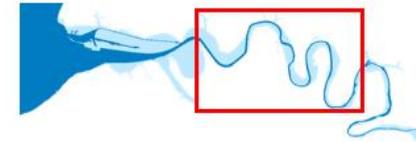


■ Potentiel d'amélioration de la fonction

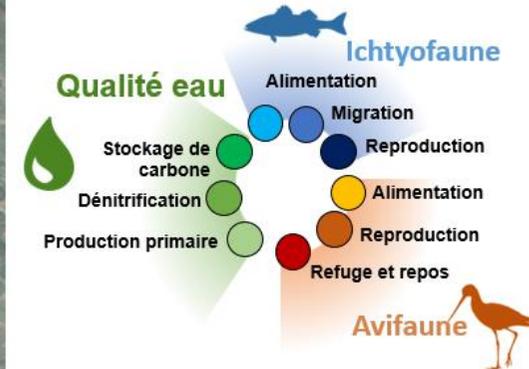


ORIENTATIONS

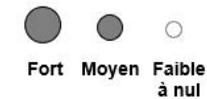
Priorités de restauration : secteur intermédiaire



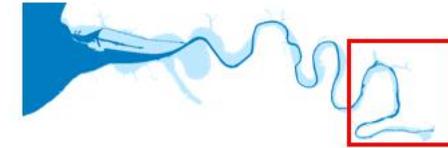
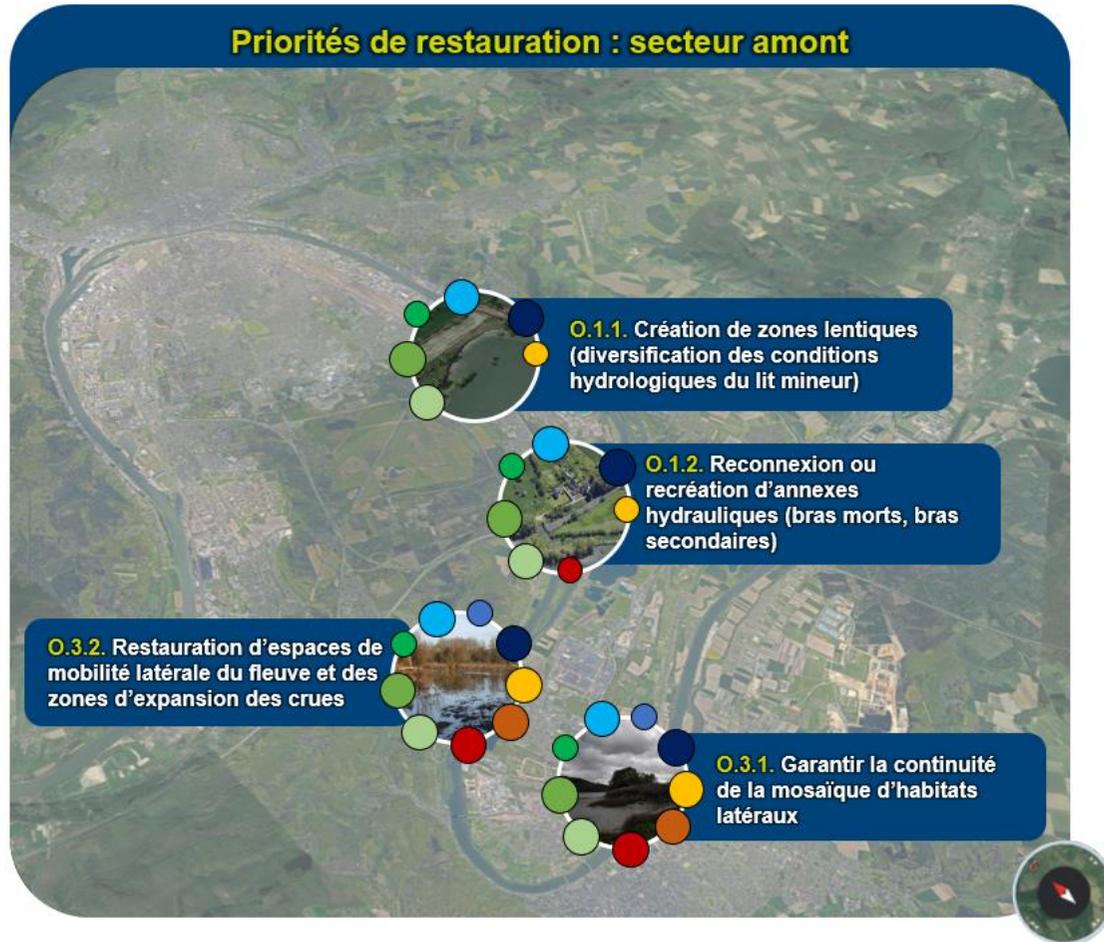
Fonctions écologiques ciblées



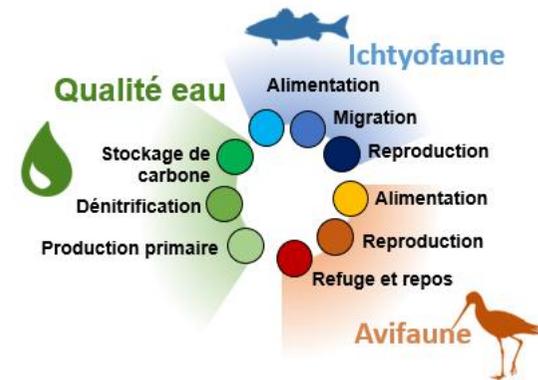
Potentiel d'amélioration de la fonction



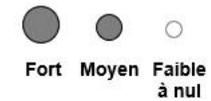
ORIENTATIONS



Fonctions écologiques ciblées



Potentiel d'amélioration de la fonction



ORIENTATIONS

Pratiques de gestion : un enjeu à l'échelle de l'estuaire



5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Face aux nombreuses pressions impactant le fonctionnement écologique de l'estuaire de la Seine, **une vision globale et partagée de la restauration de l'estuaire** se construit à travers la mise en place du référentiel REPERE. L'identification des altérations écologiques en lien avec les différentes pressions exercées sur le système a permis de mettre en évidence les habitats à préserver ainsi que les orientations de restauration par grands secteurs de l'estuaire. Les résultats du projet REPERE permettront ainsi aux acteurs de la restauration de replacer leurs projets dans un contexte plus global notamment en termes d'objectifs écologiques et favoriser la cohérence des projets.

REPERE est un projet ambitieux. La définition des priorités de restauration de la fonctionnalité des habitats de l'estuaire de la Seine représente une étape clé de la réflexion. Si d'un côté ces orientations ont une application opérationnelle, de l'autre il apparaît nécessaire **d'acquérir des informations à une échelle plus fine** pour leur mise en œuvre et assurer leur efficacité et leur pérennité en lien avec les enjeux socio-économiques et patrimoniaux. A l'issue de la phase de diagnostic, il ressort notamment un besoin de préciser le diagnostic sur les zones humides. Une réflexion visant à répondre à ce besoin est déjà en cours au sein du GIP Seine-Aval (Programme de recherche 2021-2026) pour atteindre une meilleure caractérisation quali-quantitative des habitats à restaurer et mieux cerner les leviers autour desquels structurer les opérations de restauration. Également, le référentiel sera mis à jour au fur et à mesure que des connaissances sur des grands groupes (flore, invertébrés, amphibiens, etc.) non abordés dans cette première partie du travail pour le manque d'informations, seront disponibles.

Les sites ateliers de restauration représentent une opportunité pour mener des travaux scientifiques qui permettront d'enrichir et alimenter la réflexion sur la restauration écologique de l'estuaire. En effet, malgré les nombreuses connaissances déjà acquises, la mise en œuvre des mesures de restauration écologique en milieu estuarien reste extrêmement complexe en raison des spécificités environnementales de ces milieux et de leur haut niveau d'anthropisation. Les difficultés sont rencontrées dès la définition des objectifs des mesures de restauration. En particulier, le volet prédiction des effets à court, moyen et long terme des actions, implique la mobilisation des connaissances et d'outils dédiés à l'écologie de la restauration parfois complexes à appréhender, souvent lacunaires renvoyant à des besoins d'expertise. Par manque de précision sur les objectifs, le suivi écologique des mesures n'est pas toujours adapté et l'évaluation de l'efficacité difficile à mener.

Ainsi, la **mise en place d'expérimentations de restauration** apparaît comme une étape incontournable dans la mise en œuvre des orientations. Sur la base d'une démarche scientifique, ces expérimentations doivent permettre l'analyse de la pertinence des hypothèses sous-jacentes aux objectifs et aux mesures de restauration mises en œuvre sur l'estuaire. Cette analyse permettra d'obtenir progressivement les retours d'expérience nécessaires pour mieux évaluer l'efficacité de la restauration, minimiser les incertitudes et les potentiels échecs et in fine, quantifier de manière plus précise les objectifs de restauration pour l'estuaire.



CONCLUSION

La deuxième phase du projet REPERE a pour objectif d'accompagner les acteurs dans la mise en place de sites ateliers d'expérimentation. Selon le contexte et l'avancement des projets des maîtres d'ouvrage, cet accompagnement aura pour objectif (Figure 33) :

- d'aider à la définition des objectifs spécifiques de restauration écologique à l'échelle du projet, tout en s'inscrivant dans une perspective globale de la restauration de la fonctionnalité écologique estuarienne;
- d'acquérir les données nécessaires au suivi et à l'évaluation de l'efficacité de différentes mesures de restauration de milieux estuariens par rapport aux objectifs de gain de fonctionnalité ;
- d'établir et d'affiner les méthodes de suivi et des méthodes d'évaluation des actions de restauration des fonctionnalités écologiques estuariennes en articulation avec les démarches nationales (ex. méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides) ;
- de formaliser et de partager les retours d'expérience à l'échelle de l'estuaire.

Une première étape du travail a permis d'inventorier plusieurs projets de restauration (réalisés, en cours de réalisation ou en voie de définition) sur le territoire estuarien. Une série de réunions pilotées par la DREAL, a permis aux acteurs du territoire de présenter les projets qu'ils souhaiteraient inscrire dans la démarche, sur la base du volontariat.

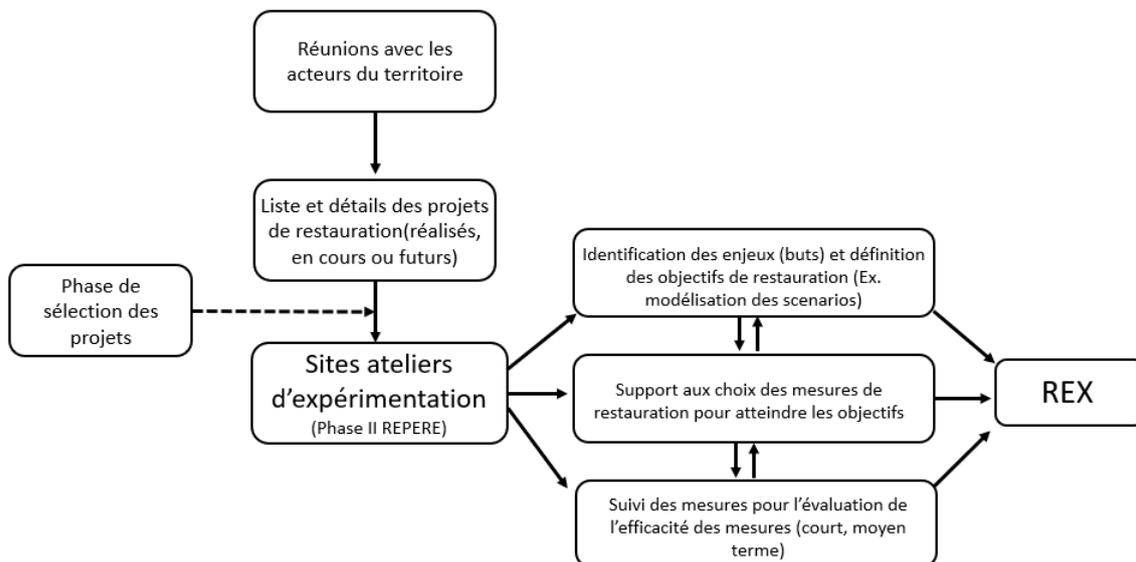


Figure 33. Etapes de l'identification des sites ateliers de restauration et modalités d'accompagnement scientifique

CONCLUSION

Une première sélection de sites ateliers a été éditée (Tableau 7) sur la base de plusieurs critères, notamment :

- la cohérence avec les orientations de restauration identifiées lors de la première phase du projet REPERE (voir [Tableau 1](#)) ;
- la répartition spatiale des projets, afin de pouvoir acquérir des informations sur les différents habitats se structurant autour des gradients longitudinaux et latéraux du fleuve ;
- l'envergure du projet, avec une note prioritaire assignée aux projets présentant les enjeux écologiques majeurs ;
- la reproductibilité du projet afin de fournir des retours d'expérience applicables à d'autres projets similaires.

La définition des travaux scientifiques à mener pour répondre aux objectifs de retours d'expérience de la restauration écologique est engagée en collaboration avec la communauté scientifique et les porteurs de projet.

LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AESN, 2019. État des lieux 2019 du bassin de la Seine et des cours d'eaux côtiers Normands. Agende de l'Eau Seine-Normandie.
- AESN, 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau.
- Alizier, S., Aulert, C., Bessineton, C., Cuvilliez, A., Denis, L., Dauvin, J.-C., Dauvin, J.-C., Garcia, C., Janson, A.-L., Jourde, J., Lesourd, S., Lozach, S., Morin, J., Ruellet, T., Spilmont, N., Tous Rius, A., 2010. Le benthos de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 2.4. GIP Seine-Aval.
- Bacq, N., 2013. Projet LIDAR Estuaire de la Seine – Acquisition, contrôle qualité et produits disponibles. GIP Seine-Aval.
- Balaguer, L., Escudero, A., Martín-Duque, J.F., Mola, I., Aronson, J., 2014. The historical reference in restoration ecology: Re-defining a cornerstone concept. *Biol. Conserv.* 176, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.007>
- Beck, M.W., Heck, K.L., Able, K.W., Childers, D.L., Eggleston, D.B., Gillanders, B.M., Halpern, B., Hays, C.G., Hoshino, K., Minello, T.J., Orth, R.J., Sheridan, P.F., Weinstein, M.P., 2001. The Identification, Conservation, and Management of Estuarine and Marine Nurseries for Fish and Invertebrates A better understanding of the habitats that serve as nurseries for marine species and the factors that create site-specific variability in nursery quality will improve conservation and management of these areas. *BioScience* 51, 633–641. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0633:TICAMO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0633:TICAMO]2.0.CO;2)
- Belliard, J., Gorges, G., Le Pichon, C., Tales, É., 2009. Le peuplement de poissons du bassin de la Seine: comprendre son évolution sous l'impact des changements générés par l'homme ou la nature. Agence de l'eau Seine-Normandie, Nanterre.
- Boigné, A., 2017. Restauration écologique de prairies humides à vocation agricole suite au comblement de ballastières en basse vallée de Seine : Incidence du type de sol recréé sur les fonctions pédologiques associées et sur la dynamique de colonisation végétale (PhD thesis). Université de Rouen Normandie, Rouen, France.
- Bricard, O., Davy, E., 2014. Elaboration d'une stratégie de suivi du fonctionnement hydrologique du Marais Vernier. EGIS/PNRBSN.
- Chabrierie, O., Poudevigne, I., Bureau, F., Vincelas-Akpa, M., Nebbache, S., Aubert, M., Bourcier, A., Alard, D., 2001. Biodiversity and ecosystem functions in wetlands: A case study in the estuary of the Seine river, France. *Estuaries* 24, 1088.
- Chen, S., Martin, M.P., Saby, N.P.A., Walter, C., Angers, D.A., Arrouays, D., 2018. Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France. *Sci. Total Environ.* 12.
- Choi, Y.D., 2007. Restoration Ecology to the Future: A Call for New Paradigm. *Restor. Ecol.* 15, 351–353. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00224.x>
- Collette, O., Davreux, T., Bauffe, C., Dancart, D., Dumont, S.-P., 2018. La ripisylve : Intérêts et particularités, travaux, gestion.
- Dauvin, J.-C., Desroy, N., 2005. The food web in the lower part of the Seine estuary: a synthesis of existing knowledge. *Hydrobiologia* 540, 13–27. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-7101-3>
- Duarte, C.M., Conley, D.J., Carstensen, J., Sánchez-Camacho, M., 2009. Return to Neverland: Shifting Baselines Affect Eutrophication Restoration Targets. *Estuaries Coasts* 32, 29–36. <https://doi.org/10.1007/s12237-008-9111-2>
- Ducrottoy, J.-P., Dauvin, J.-C., 2008. Estuarine conservation and restoration: The Somme and the Seine case studies (English Channel, France). *Mar. Pollut. Bull.* 57, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.04.031>

- Duhamel, S., Carpentier, A., 2012. Projet DEFHFIS: Dynamique des Ecosystèmes et Fonctionnement Hydromorphologique des Filandres en Seine. Partie VI Ichtyologie (Programme Seine-Aval 4). GIP Seine-Aval, Rouen, France.
- Duhamel, S., Feunteun, E., 2012. ICHTYO. Structuration spatio-temporelle des assemblages d'espèces de poissons dans l'estuaire de la Seine. Etat actuel et incidences du paysage aquatique sur la fonctionnalité des habitats (No. 4), Rapport Seine-Aval. GIP Seine-Aval, Rouen. France.
- Dyer, K.R., 1997. Estuaries: a physical introduction, 2nd ed. ed. John Wiley, Chichester ; New York.
- Elliott, M., Hemingway, K.L., 2008. Fishes in Estuaries. John Wiley & Sons.
- Elliott, M., Quintino, V., 2007. The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 640–645. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.003>
- Fisson, C., 2017. Industrialisation de l'estuaire de la Seine : Quel héritage pour la qualité des eaux ? Fascicule 3.6 (Fascicule Seine-Aval No. 3.6). GIP Seine-Aval.
- Fisson, Cedric, 2014. Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.2. GIP Seine-Aval.
- Fisson, C., 2014. Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.2, 58p.
- Fisson, C., 2012. Imprégnation du compartiment aquatique de Haute-Normandie par les contaminants chimiques. Données 2007/2010. GIP Seine-Aval, Rouen, France.
- Fisson, C., Leboulenger, F., Lecarpentier, T., Moussard, S., Ranvier, G., 2014. L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution. Fascicule Seine-Aval 3.1. GIP Seine-Aval.
- Foussard, V., Cuvilliez, A., Fajon, P., Fisson, C., Lesueur, P., Macur, O., 2010. Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. Fascicule Seine-Aval 2.3. GIP Seine-Aval.
- Garnier, J., Barles, S., Billen, G., Bognon, S., Romero, E., Le Gendre, R., Silvestre, M., Ramarson, A., Thieu, V., Théry, S., Castaings, J., Riou, P., 2018. RESET. Rôle de l'Estuaire de Seine dans l'Ecologie Territoriale de la Normandie : cycles des nutriments et systèmes hydro-agro-alimentaires. GIP Seine-Aval.
- GIP Seine-Aval, 2015. Les macrodéchets. Fiche thématique : Qualité de l'eau et contaminations.
- GIP Seine-Aval, 2013. Les filandres à l'embouchure de la Seine. Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine et de son évolution. 6p.
- Higgs, E., Falk, D.A., Guerrini, A., Hall, M., Harris, J., Hobbs, R.J., Jackson, S.T., Rhemtulla, J.M., Throop, W., 2014. The changing role of history in restoration ecology. *Front. Ecol. Environ.* 12, 499–506. <https://doi.org/10.1890/110267>
- Kaiser, M.J., Attrill, M.J., Jennings, S., Thomas, D.N., Barnes, D.K.A., 2011. *Marine ecology: processes, systems, and impacts.* Oxford University Press.
- Lavabre, J., Fisson, C., 2013. Les habitats naturels de l'estuaire de la Seine 78.
- Le Pichon, C., Gorges, G., Faure, T., Boussard, H., 2006. *Anaqualand 2.0. Modelling connectivity in riverscapes.* Cemagref, HBAN, France.
- Lemoine, J.-P., 2015. Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.3. GIP Seine-Aval.
- Lesourd, S., Bessineton, C., Carpentier, A., Chouquet, B., Cuvilliez, A., Duhamel, S., Julve, P., Lecarpentier, T., Marion, C., Morel, F., 2012. DEFHFIS. Dynamique des écosystèmes et fonctionnement hydromorphologique des filandres en Seine (Rapport Seine Aval 4). GIP Seine-Aval.
- McDonald, T., Gann, G.D., Jonson, J., Dixon, K.W., 2016. *International standards for the practice of ecological restoration—including principles and key concepts.* Society for Ecological Restoration, Washington, DC Front cover photo credits:\copyright Marcel

- Huijser, Errol Douwes, \copyright Marcel Huijser Back cover photo credits:\copyright Marcel Huijser. Soil-Tec Inccopyright Marcel Huijser Bethanie Walder.
- Mchergui, C., 2014. Restauration écologique dans un système estuarien fortement anthropisé: applications au compartiment sol des écotones rivulaires et aux marais alluvionnaires de la Basse Vallée de Seine (PhD Thesis). Université de Rouen.
- Mercader, M., Mercière, A., Saragoni, G., Cheminée, A., Crec'hriou, R., Pastor, J., Rider, M., Dubas, R., Lecaillon, G., Boissery, P., Lenfant, P., 2017. Small artificial habitats to enhance the nursery function for juvenile fish in a large commercial port of the Mediterranean. *Ecol. Eng.* 105, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.022>
- Moreno-Mateos, D., Power, M.E., Comín, F.A., Yockteng, R., 2012. Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. *PLoS Biol.* 10, e1001247. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001247>
- Muntoni, M., 2020. PROPOSE : Potentialités de RestauratiOn des habitats clés pour les POissons dans l'estuaire de la SEine. GIP Seine-Aval, Rouen, France.
- Palmer, M.A., Zedler, J.B., Falk, D.A. (Eds.), 2016. Foundations of Restoration Ecology. Island Press/Center for Resource Economics, Washington, DC. <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-698-1>
- Parlier, E.P., 2006. Approche quantitative de la fonction de nourricerie des systèmes estuaires-vasières. Cas du bar européen (*Dicentrarchus labrax*, L. 1758 ; a.k.a. Morone labrax) dans cinq nourriceries du Ponant : estuaire de la Seine, estuaire de la Loire, baie du Mont Saint-Michel, baie de Saint-Brieuc et baie de l'Aiguillon (PhD). Université de la Rochelle, La Rochelle.
- Phang, V.X.H., Chou, L.M., Friess, D.A., 2015. Ecosystem carbon stocks across a tropical intertidal habitat mosaic of mangrove forest, seagrass meadow, mudflat and sandbar: Carbon Stocks in Intertidal Ecosystems. *Earth Surf. Process. Landf.* 40, 1387–1400. <https://doi.org/10.1002/esp.3745>
- Poudevigne, I., Alard, D., Leuven, R.S.E.W., Nienhuis, P.H., 2002. A systems approach to river restoration: a case study in the lower Seine valley, France. *River Res. Appl.* 18, 239–247. <https://doi.org/10.1002/rra.667>
- Prévosto, B., 2011. Abandon des terres par l'agriculture et colonisation par les ligneux : quelles conséquences sur la végétation pour différents écosystèmes européens ? *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/45825>
- SAFEGE, HORIZONS, ECOSPHERE, 2001. Etude hydraulique des boucles de Seine.
- Sheaves, M., Baker, R., Nagelkerken, I., Connolly, R.M., 2015. True Value of Estuarine and Coastal Nurseries for Fish: Incorporating Complexity and Dynamics. *Estuaries Coasts* 38, 401–414. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9846-x>
- Teichert, N., Borja, A., Chust, G., Uriarte, A., Lepage, M., 2016. Restoring fish ecological quality in estuaries: Implication of interactive and cumulative effects among anthropogenic stressors. *Sci. Total Environ.* 542, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.068>
- Teichert, N., Carassou, L., Sahraoui, Y., Lobry, J., Lepage, M., 2018. Influence of intertidal seascape on the functional structure of fish assemblages: Implications for habitat conservation in estuarine ecosystems. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 28, 798–809. <https://doi.org/10.1002/aqc.2914>
- Theobald, D.M., Kennedy, C., Chen, B., Oakleaf, J., Baruch-Mordo, S., Kiesecker, J., 2020. Earth transformed: detailed mapping of global human modification from 1990 to 2017. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 1953–1972. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1953-2020>
- Tramoy, R., Gasperi, J., Tassin, B., Rognard, F., 2019. Estimation des flux de macrodéchets sur le bassin de la Seine (Research Report). LEESU ; MTE ; UPEC ; ENPC.
- Vochelet, E., 2016. Les végétations de l'estuaire de la Seine 6.

- Wiens, J.A., Hobbs, R.J., 2015. Integrating conservation and restoration in a changing world. *BioScience* 65, 302–312. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu235>
- Wolanski, E., Elliott, M., 2016. *Estuarine ecohydrology: an introduction*, Second edition. ed. Elsevier, Amsterdam Boston Heidelberg.
- Xuereb, B., 2019. Effets de la contamination sur les organismes de l'estuaire de la Seine (ECOTONES) (Rapport du Programme de recherche Seine-Aval 5). GIP Seine-Aval.

ANNEXES

Encart 1 - Restauration écologique : concepts clé et contexte sémantique

Au sens large, la **restauration écologique** est définie comme « une action intentionnelle qui initie ou accélère l'auto-réparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (McDonald *et al.*, 2016). Le terme restauration écologique peut être employé pour indiquer toute mesure visant à améliorer l'état écologique afin d'augmenter leur contribution au fonctionnement estuarien global. Différents types de mesures s'inscrivent par exemple dans cette définition :

- **Réhabilitation** : dans le cas où la suppression des pressions anthropiques n'est pas envisageable, une telle mesure vise plutôt à rétablir la fonctionnalité du système, et insiste sur la récupération des processus écologiques du système en tentant de faire coexister un bon fonctionnement écologique avec les usages à la base des perturbations.
- **Réaffectation** : en présence d'un degré trop élevé de dégradation ayant compromis irréversiblement le fonctionnement de l'écosystème, la réaffectation prévoit la mise en place d'un nouveau système avec des fonctions autres que celles du système de départ.

Le lexique utilisé dans le cadre de la restauration écologique au sens large est très riche et d'autres types de mesures de restauration « moins ambitieuses » peuvent s'inscrire dans le cadre de celles mentionnées auparavant. C'est le cas du **rajeunissement** d'un écosystème qui vise à faire revenir un écosystème à un stade antérieur de sa succession ; de la **revégétalisation**, où l'intérêt porte sur le retour d'un couvert végétal au sein d'un site dégradé ; ou de la **renaturation**, qui a pour objectif de redonner une vocation plus naturelle à un site dégradé.

Au sens strict, l'objectif des mesures de restauration est de rétablir un écosystème fonctionnel et prévoit la suppression intégrale des pressions à l'origine de la perturbation du système (état pré-perturbation). Cependant, le niveau d'expression de ces fonctions, et donc la fonctionnalité estuarienne, résultent des interactions inextricables entre les processus estuariens et les pressions d'origine anthropique. En raison du degré élevé de variabilité de leurs caractéristiques physicochimiques, les estuaires sont, par nature, des écosystèmes « stressés ». A ce stress naturel s'ajoute une multiplicité de pressions anthropiques. Ainsi, la hiérarchisation et l'identification des altérations induites par les pressions anthropiques sont particulièrement difficiles dans les zones où différentes pressions se cumulent, comme les estuaires. Cette difficulté à identifier le stress d'origine anthropique dans les estuaires est appelée « *Estuarine Quality Paradox* » (Elliott and Quintino, 2007). Ces difficultés implicites liées à la caractérisation des impacts limitant l'expression des fonctions rendent la définition d'un écosystème de référence extrêmement

compliqué. En effet, l'écosystème de référence pourrait être choisi sur la base de sa similarité avec un site fonctionnel à proximité (théorie du paradigme de la variation spatiale régionale) ou de « l'écosystème historique pré-perturbation » et nécessiterait donc une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle des écosystèmes ciblés en tant que références et de leur évolution historique. Cependant, plusieurs auteurs (Balaguer *et al.*, 2014; Choi, 2007; Duarte *et al.*, 2009) s'accordent à dire que le site de référence ne constitue pas un objectif de restauration, mais plutôt un exemple de la structure capable de fournir des informations sur la trajectoire d'évolution du système restauré. Les retours d'expérience montrent que restaurer – *stricto sensu* – un écosystème historique ou un état antérieur reste utopique, au regard du fait que les écosystèmes restaurés ne présentent pas les mêmes caractéristiques que ceux du passé. Ceci est d'autant plus vrai pour les estuaires, qui se trouvent en forte interaction (et interdépendance) avec les différents types d'usages. En effet, « la structure biologique et les fonctions biogéochimiques des sites restaurés restent inférieures aux sites de référence » (Moreno-Mateos *et al.*, 2012).

De plus, il paraît essentiel d'intégrer les notions de **préservation** et **conservation**, soit le maintien des écosystèmes à haute valeur fonctionnelle (Wiens and Hobbs, 2015). En effet, l'application d'une approche holistique de la gestion des milieux naturels se base sur la complémentarité des mesures de conservation et celles de restauration. En effet, la conservation vise à maintenir l'état fonctionnel d'un système et les conditions qui le déterminent, tandis que la restauration écologique s'intéresse aux systèmes dégradés afin d'augmenter leur valeur environnementale intrinsèque via l'amélioration de leur niveau de fonctionnalité.

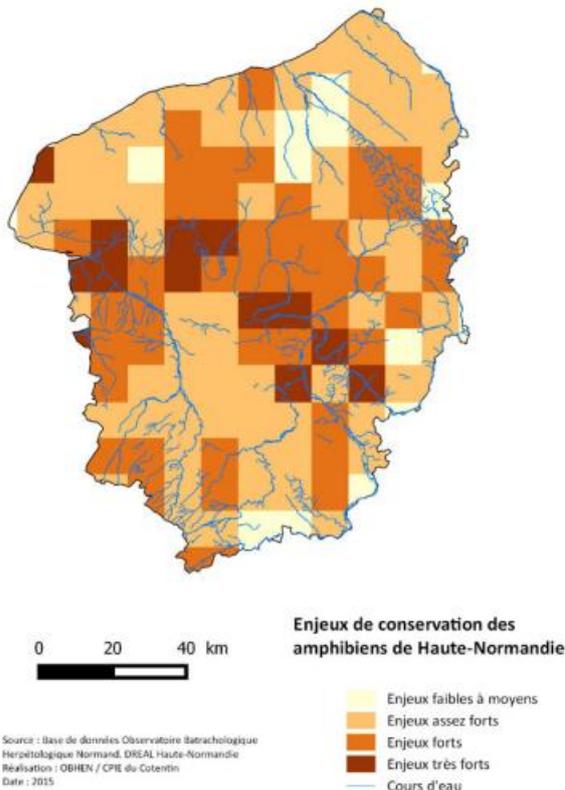
Cependant, la préservation et la conservation se focalisent souvent sur la pérennisation des habitats dans un état « figé » défini sur la base d'une **approche patrimoniale** (ex. espèces protégées) ou **utilitariste** (Ducrotoy and Dauvin, 2008) souvent **peu adaptée au dynamisme des milieux estuariens** et qui, dans certains cas, peut s'opposer à une **approche fonctionnelle**.



Encart 2 - Répartition des enjeux de conservation des amphibiens

Informations extraites depuis « Etat des amphibiens en Haute Normandie, 2015, Observatoire Biodiversité Haute-Normandie »

Au regard de leur biologie et de leur écologie (organismes ectothermes, activité biphasique aquatique et terrestre, faible capacité de déplacement, etc.), les amphibiens sont particulièrement sensibles aux effets des altérations induites par l'anthropisation de leurs habitats.



Enjeux de conservation actuels selon la Liste rouge (2014)

Quatorze espèces d'amphibiens autochtones sont actuellement présentes en Haute-Normandie, soit 44 % de la batrachofaune nationale. La vallée de la Seine et ses affluents, représentent des milieux très riches en termes de nombre d'espèces. Dans le contexte normand, 87 % des espèces d'Amphibiens sont en régression. Aucune espèce n'a connu d'expansion de son aire de répartition.

En accord avec les résultats du diagnostic REPERE, l'artificialisation de la vallée de la Seine et la fragmentation des habitats induite par l'urbanisme, l'industrialisation et l'agriculture intensive est un facteur de régression majeur de l'aire de répartition de ces espèces. Les boucles de Rouen et d'Elbeuf apparaissent être les secteurs les plus touchés par les disparitions.

Encart 3 – Focus sur la mosaïque d’habitats latéraux de l’embouchure de la Seine

A l’embouchure, la slikke est caractérisée par une faible diversité floristique mais de forts enjeux patrimoniaux car elle regroupe des habitats spécialisés, soumis à de fortes contraintes (salinité variable, cycles d’immersion/émersion, etc.). Ces habitats sont très souvent menacés tant à l’échelle régionale que nationale ou européenne. Seules les végétations du bas schorre sont encore aujourd’hui bien exprimées dans l’estuaire de la Seine. Les végétations du moyen et haut schorre ont été fortement impactées par l’artificialisation du milieu et se composent principalement de roselières saumâtres, les autres végétations ne subsistant que de façon très relictuelle. En arrière du schorre, sur les espaces les plus exhausés, se développent des végétations prairiales subhalophiles souvent pâturées ainsi que des roselières et des mégaphorbiaies, oligohalophiles (Vochelet, 2016).



Encart 4 – Espèces exotiques envahissantes en estuaire de Seine

L'artificialisation a aussi favorisé la prolifération des espèces exotiques envahissantes (EEE). Auparavant appelées plantes invasives, ce sont des organismes végétaux introduits volontairement ou involontairement dans le milieu naturel et qui se sont naturalisés. De par leur adaptation à certains écosystèmes et en l'absence de facteur de régulation naturel, ils sont capables de prolifération induisant dans les milieux naturels ou semi naturels des changements significatifs de composition, de structure ou de fonctionnement des écosystèmes. Plusieurs espèces végétales et animales ont ainsi colonisé les nouvelles niches « artificielles » créées par l'anthropisation de l'estuaire

Parmi les espèces végétales envahissantes plus fréquentes dans l'estuaire de la Seine, citons *Reynoutria japonica*, *Bidens frondosa*, *Impatiens capensis*, *Ludwigia grandiflora*, *Solidago gigantea*, *Spartina anglica*, *Crassula helmsii*. Les milieux aquatiques ont aussi vu l'implantation des plusieurs espèces de poissons (OBHN, 2014).

Les politiques de gestion visent souvent à maintenir l'EEEs à des densités suffisamment basses pour que l'écosystème puisse tolérer les dommages qu'elles causent. Les options de maintenance comprennent généralement le contrôle mécanique, chimique et biologique. Bien que souvent l'éradication soit identifiée comme des priorités de gestion, cet objectif trouve une acceptation scientifique limitée pour trois raisons : i) l'éradication est considérée comme peu susceptible de réussir, ii) les procédures sont souvent très coûteuses.

En réponse au manque de succès de la lutte aux EEE, pendant les dernières décennies la communauté scientifique se concentre plutôt sur les fonctions associées aux nouveaux habitats et leur adaptation aux grands changements globaux (Davis *et al.*, 2011).

Ne disposant pas de connaissances suffisantes pour alimenter un diagnostic robuste dans le cadre de REPERE sur i) le nombre d'EEE, ii) la densité et la répartition, ii) les effets sur les habitats, il nous paraît essentiel d'enrichir le cadre informatif sur ces espèces à l'échelle de l'estuaire de la Seine. Des REXs sur les actions déjà effectuées et futures permettront d'obtenir une meilleure compréhension des dynamiques liées à ces espèces

Tableau 5 : Liste des membres du comité de pilotage du projet REPERE

Monsieur le préfet de la Région Normandie, préfet de la Seine-Maritime
Monsieur le préfet de l'Eure
Monsieur le préfet du Calvados
Monsieur le secrétaire général pour les affaires régionales
Monsieur le directeur régional de l'environnement de l'aménagement et du logement de Normandie
Monsieur le directeur départemental des territoires et de la mer de la Seine-Maritime
Monsieur le directeur départemental des territoires et de la mer de l'Eure
Monsieur le directeur départemental des territoires et de la mer du Calvados
Monsieur le président du conseil régional de Normandie
Monsieur le président du conseil départemental de la Seine-Maritime
Monsieur le président du conseil départemental de l'Eure
Monsieur le président du conseil départemental du Calvados
Monsieur le président de la communauté d'agglomération Caux Seine Agglo
Monsieur le président de la communauté de communes de Pont-Audemer / Val de Risle
Monsieur le président de la communauté de communes Roumois Seine
Monsieur le président du pôle métropolitain de l'estuaire
Monsieur le président de la communauté urbaine Le Havre Seine Métropole
Monsieur le président de la communauté de communes du Pays de Honfleur-Beuzeville
Monsieur le président du pôle métropolitain de l'estuaire
Monsieur le président de la métropole Métropole Rouen Normandie
Monsieur le président de la communauté de communes Inter Caux Vexin
Monsieur le président de la communauté d'agglomération Seine Eure
Monsieur le président du directoire du Grand Port Maritime du Havre
Monsieur le président du directoire du Grand Port Maritime de Rouen
Madame la directrice territoriale Seine-Aval de l'agence de l'eau Seine-Normandie
Madame la directrice du GIP Seine Aval
Monsieur le directeur régional Normandie de l'Office français de la biodiversité
Monsieur le directeur du conservatoire des espaces naturels de Normandie
Monsieur le président du parc naturel régional des boucles de la Seine normande
Monsieur le président du syndicat mixte du bassin versant Caux Seine
Monsieur le délégué régional du conservatoire du littoral
Monsieur le président du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande
Monsieur le président du syndicat des bassins versants Cailly-Aubette-Robec
Monsieur le président du syndicat mixte du bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec
Madame la présidente du conseil scientifique de la réserve naturelle de l'estuaire de la Seine
Monsieur le président du conseil scientifique de l'estuaire
Monsieur le président du conseil scientifique régional du patrimoine naturel de la région Normandie
Monsieur le président de l'association France nature et environnement Normandie

Monsieur le président de l'association estuaire de Seine vivant
Monsieur le président du groupement régional des associations de protection de l'environnement
Monsieur le président de UNICEM Normandie
Monsieur le président de la chambre d'agriculture de Normandie
Monsieur le président de la fédération de l'Eure pour la pêche et la protection du milieu aquatique
Monsieur le président de la fédération de la Seine-Maritime pour la pêche et la protection du milieu aquatique
Monsieur le président de la fédération du Calvados pour la pêche et la protection du milieu aquatique
Monsieur le président du comité régional des pêches maritimes et des élevages marins de Normandie
Monsieur le président de la maison de l'estuaire

Tableau 6 : Liste des acteurs sollicités pendant les échanges finalisés à capitaliser les informations disponibles

Organisme	Contact	Fonction
Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande	Christelle Steiner	Responsable du pôle eau et biodiversité
	Florian Rozanska	Chargé de mission rivières et ichtyofaune
	Simon Gaudet	Chargé de mission invertébrés
	Clémentine Camus	Chargée de mission hydrologie des milieux humides
	Rachel Siccard	Chargé de mission flore et végétation
	Christelle Dutilleul	Conservatrice Reserve Nationale du Marais Vernier
	Géraud Ranvier	Chargé de mission Observatoire de l'Avifaune
Maison de l'Estuaire	Faustine Simon	Chargée de mission Coordinatrice Suivi ornithologique
	Thomas Lecarpentier	Chargé de mission hydraulique et milieu marin
Conservatoire des espaces naturels Normandie	Stéphane Lemonnier	Chargé de projets
	Aurélien Noraz	Chargé de projets
	Nathalie Moreira	Chargée de missions pédologue
	Frank Nivoix	Directeur
HAROPA Rouen	Sandrine Samson	Cheffe du Service Environnement
HAROPA Le Havre	Natasha Massu	Cheffe du Service Environnement
Institut National Patrimoine Naturel	Coline Chanet	Gestionnaire de données de programmes scientifiques
Conservatoire Botanique de Bailleul		

ANNEXES

Tableau 7 : Informations concernant les projets retenus

N° site atelier	Equipe Site Atelier	MOA	Details du projet de restauration écologique à l'origine du site atelier				Date réalisation du projet de restauration	Lien avec les orientations REPERE	REX réglementaires	REX scientifique envisageable
			Secteur	Type de mesure	Objectifs et actions envisagés					
1	HAROPA - Havre Maison de l'estuaire	HAROPA - Havre	RNNES - Site Millenium	Compensatoire	Récupération du caractère humide de 13 ha en compensation de ZH détruites sur la ZIP pour projet PLPN3	2020	O.4	Non	Etude de fonctionnement BGC d'une ZH restaurée. Test de le MNEFZH.	
2	HAROPA - Havre Maison de l'estuaire	HAROPA - Havre	RNNES	Compensatoire ou Accompagnement	Garder les milieux intertidaux ouverts par organisation de la gestion de la coupe des roseaux	Inconnue	O.3	Identifier les statuts réglementaires envisageables de telles mesures	A définir sur la base des objectifs du projet	
3	HAROPA - Rouen	HAROPA - Rouen	Lillebonne	Accompagnement	Réouverture des berges sur 300m au niveau de la darse de Lillebonne	2018	O.2 O.3	Non	Etude de la productivité d'une vasière intertidale restaurée dans le secteur intermédiaire oligohalin	
4	HAROPA – Rouen SOS Mal de Seine	HAROPA - Rouen	Henouville et Quévillon	Compensatoire ou Accompagnement	Etude pour gestion de sites « piège a déchets »	Inconnue	O.5	Non	Etude des dynamiques de dépôt des déchets plastiques, les enjeux écologiques associés et les leviers de réduction des flux vers la mer sur des sites d'accumulation présentant des caractéristiques différentes	
5	CEN Normandie CA Seine Eure MRN CD76	CEN Normandie	Iles et berges de la Seine	Volontaire	Objectifs à définir	Inconnue	O.1 O.3	Accompagnement sur les potentiels aspects réglementaires (actions peu pratiquées)	A définir sur la base des objectifs du projet	



ANNEXES

6	PNRBSN SBVCailly Aubette SBV Caux Seine FPPMA 27 FPPMA 76	PNRBSN	ENS sur Saint-Sulpice de Grimbouville	Volontaire	Restauration continuité latérale par ouverture d'un clapet d'un fossé donnant sur la Seine	2018	O.3	Retours d'expérience concernant la gestion des clapets anti-retour	Evaluation des effets de la réhabilitation de la connectivité latérale sur les peuplements ichtyologiques
		PNRBSN	Saint Nicolas de Bliquetuit	Volontaire	A l'étude, pistes envisageables : RCE	Inconnue	O.3		
		Syndicat du Bassin Versant Cailly Aubette	Rouen	Volontaire	Projet de réouverture de l'embouchure du Cailly à Rouen	2022?	O.3		
		Syndicat du Bassin Versant Caux Seine	Berges de la Sainte Gertrude et de l'Ambion	Volontaire	Restaurer la continuité écologique de la Sainte Gertrude (90 % réalisés, 1 ouvrage restant)	2024	O.3		
		Syndicat du Bassin Versant Caux Seine	Rançon	Volontaire	Étude en cours pour restaurer la continuité écologique de la Rançon (bras secondaire à créer autour d'un ouvrage). Travail sur restauration de la continuité latérale	2022	O.3		
		Syndicat du Bassin Versant Caux Seine	Fontenelle	Volontaire	Lancement d'une étude en 2020 pour restaurer la continuité écologique de la Fontenelle (franchissement du dernier ouvrage)	2023	O.3		
7	HAROPA - Rouen MRN SBV Cailly Aubette	MRN	Rouen, bassin Saint Gervais	Volontaire	Recherche de moyens de restaurer des berges à fonctionnalité piscicole en zone urbaine et portuaire À développer en lien avec le projet de réouverture de l'embouchure du Cailly	2021?	O.1	Non	Evaluation des effets locaux de l'installation de microhabitats pour améliorer la capacité d'accueil des milieux fortement anthropisés



ANNEXES

8	MRN PNRBSN CD 76	MRN	Le Trait	Compensatoire ou Accompagnement	Étude en cours pour la recréation milieux intertidaux + filandre. Problématique pollution très marquée (site industriel a proximité directe)	2021?	O.1 O.2 O.3	Non	Etudier l'intérêt de mobiliser les techniques multispectrales pour l'évaluation de la contamination dans les sédiments. Evaluation de la faisabilité et l'efficacité de la réhabilitation d'une filandre potentiellement polluée et de la zone humide connectée
9	Caux Seine Agglo PNRBSN Chambre d'agriculture de Normandie CEREMA	Caux Seine Agglo	ZAC Port- Jérôme 2	Compensatoire	Mesures de restauration des ZH au nord de PJ2 (formant une ceinture) à l'étude, en prévision des compensations nécessaires suite à l'aménagement total de PJ2	Inconnue	O.4	Retour d'expérience sur la compatibilité entre compensation écologique et pratiques agricoles	Non identifié
10	CBN CEMEX HAROPA - Rouen	CBN CEMEX	Anneville- Ambourville	Compensatoire ou Accompagnement	Reconnexion de plan d'eau à la Seine	Inconnue	O.1	Retour d'expérience sur les possibilités d'action dans le respect des autorisations d'exploitation	Evaluation des fonctions associées à la création d'un annexe hydraulique connecté à la Seine
11	HAROPA - Havre HAROPA - Rouen Maison de l'estuaire	HAROPA - Havre HAROPA - Rouen Maison de l'estuaire	RNNES – Grande Crique	Accompagnement PLPN3	Expérimenter la réhabilitation des filandres et des prairies subhalophiles connectés dans la RNNES	2025?	O.1 O.2 O.3	Identification des statuts réglementaires envisageables ;	Evaluation de l'efficacité en termes de fonctionnalité écologique de la restauration hydraulique des filandres et des zones humides connectées. Test de le MNEFZH.
	HAROPA - Havre HAROPA - Rouen Maison de l'estuaire	HAROPA - Havre HAROPA - Rouen Maison de l'estuaire	RNNES	Volontaire		2023	O.2 O.3 O.4		



ANNEXES

12	HAROPA - Rouen Conservatoire du Littoral Chambre d'agriculture de Normandie PNRBSN	HAROPA - Rouen	Secteur de compensation à l'Ouest du Marais Vernier	Compensatoire ou Accompagnement	Intégration de projets de compensation et d'accompagnement dans une stratégie environnementale plus large de recréation de zones humides connectées à la Seine	Inconnue	O.3 O.4	Analyse des possibilités de phasage de mesures environnementales (réalisation par étapes successives)	Etude de fonctionnement BGC d'une ZH restaurée. Test de le MNEFZH.
----	---	----------------	---	---------------------------------	--	----------	------------	---	--





REPERE

COMPRENDRE - PARTAGER - RESTAURER

 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 :

MUNTONI Manuel. 2020. REPERE : Référentiel partagE sur les Priorités de restauration des fonctionnalitéEs des milieux estuariEns de la vallée de Seine-Aval. Rapport réalisé par le GIP Seine-Aval. 94 pp.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :



CRÉER
RÉVÉLER
PARTAGER

