



**Caractérisation des évolutions hydro-
morpho-sédimentaires et écologiques du
secteur de la fosse Nord depuis la
construction de Port 2000**



rapport du projet CAPNORD

M. Muntoni, JP. Lemoine, 2022



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

GIP Seine-Aval, 2022. **CAPNORD : Caractérisation des évolutions hydro-morpho-sédimentaires et écologiques du secteur de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000**. 55 pp.

Auteurs : Jean-Philippe Lemoine et Manuel Muntoni

avec la contribution de l'ensemble de l'équipe du GIP Seine-Aval

Etude complémentaire au programme de recherche Seine-Aval 7, financée par HAROPA Port.

Participants aux Groupes de Travail (en ordre alphabétique)

Pierre Beaudouin (HAROPA Port du Havre)
Sébastien Brasselet (HAROPA Port du Havre)
Chloé Dancie (Cellule de Suivi du Littoral Normand)
Jean-Claude Dauvin (Université de Caen)
Sylvain Duhamel (Cellule de Suivi du Littoral Normand)
Albert Gallicher Lavanne (HAROPA Port de Rouen)
Robert Lafite (Université de Rouen - Comité Scientifique de l'Estuaire de la Seine)
Pierre Le Hir (Ex. Ifremer - Comité Scientifique de l'Estuaire de la Seine)
Thomas Lecarpentier (Maison de l'Estuaire)
Jérémy Lobry (IRSTEA - Comité Scientifique Seine-Aval)
Jean-Philippe Pezy (Université de Caen)
Nils Teichert (Muséum Nationale d'Histoire Naturelle)
Patrice Tournier (HAROPA Port de Rouen)
Romaric Verney (Ifremer- Comité Scientifique Seine-Aval)

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :



SOMMAIRE

Sommaire	2
Résumé	3
Introduction	7
Problématique générale	7
Secteur d'étude	7
I Evolution du physiotope	9
I.1 L'équilibre Hydro-Morpho-Sédimentaire	9
I.2 Les forçages depuis la construction de Port 2000	10
I.2.1 Les forçages hydrodynamiques	10
I.2.2 Les aménagements réalisés dans le cadre de la construction de Port 2000	13
I.3 Les évolutions Hydro-Morpho-Sédimentaire	16
I.3.1 Les évolutions morphologiques	16
Comparaison des bathymétries/topographies	17
Évolution de la répartition des profondeurs - "hypsométrie"	23
Évolution des volumes sédimentaires en place - "Cubatures"	30
I.3.3 L'hydrodynamisme : la salinité	31
Encart : La continuité latérale : les filandres	33
I.4 Relations forçages, aménagements, évolutions Hydro-Morpho-Sédimentaire	35
II. Évolution de la composante écologique	37
II.1 Évolution des peuplements macrozoobenthiques	37
II.2 Évolution des peuplements suprabenthiques	40
II.3 Évolution des peuplements ichtyologiques	43
Encart : Effets potentiels sur le réseau trophique	47
Encart : Le reposoir sur dune	48
Conclusion	50
Littérature citée	52

RÉSUMÉ

Les estuaires sont des milieux dynamiques qui évoluent selon les interactions entre les forçages naturels et les forçages anthropiques. De manière générale, dans les estuaires anthropisés, les aménagements sont nombreux et jouent un rôle important dans la dynamique et les évolutions du système : c'est le cas de l'estuaire de la Seine, utilisé par l'homme depuis l'antiquité et aménagé massivement depuis le XIXe. Son fonctionnement actuel est ainsi le fruit de son aménagement, de sa gestion et des conditions naturelles très dynamiques qui en complexifient la compréhension.

Parmi les aménagements récents, le projet Port 2000, dont les travaux ont débuté en 2002, a induit des modifications majeures de la morphologie de la rive droite de l'embouchure de la Seine (secteur de la fosse Nord). Ils ont impliqué des modifications du fonctionnement physique de ce secteur, avec des répercussions sur sa composante écologique. De plus, les années suivant ces travaux ont connu une hydrologie caractérisée par des débits de Seine relativement faibles comparés aux années précédentes. Par ailleurs, durant cette période, les conditions marines, habituellement corrélées aux conditions de débits, ont été relativement intenses, générant une certaine prépondérance des conditions marines.

Le projet CapNord vise à synthétiser et mettre en regard les données et connaissances disponibles sur ces évolutions, afin de mettre en exergue les évolutions hydro-morpho-sédimentaires et écologiques de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000.

Les aménagements associés à la construction de Port 2000 ont eu des répercussions directes, principalement :

- la disparition de 434 ha de milieux naturels principalement subtidiaux peu profonds (entre -1 m et 1,5 m CMH), au profit d'un bassin portuaire, de quais et de zones logistiques
- l'aménagement ou la modification de 14 km de digues, sur un trait de côte d'environ 35 km (entre Le cap de La Hève, le Pont de Normandie et Deauville). Il s'agit principalement des digues de Port 2000, de la prolongation de la digue basse nord à l'aval, de la réhausse entre l'épi et le pont de Normandie, de la modification des brèches à l'aval du pont de Normandie et de la création de la brèche amont. La brèche aval a été rehaussée, la brèche accidentelle à l'amont immédiat du pont réparée et la brèche amont créée en 2005 pour permettre la circulation dans le méandre artificiel (mesure d'accompagnement de Port 2000). Ces travaux ont modifié et diminué la connexion de la fosse au chenal de navigation.
- le dragage entre la digue extérieure de Port 2000 et la digue basse nord de 3,3 millions de mètres cubes de sédiments pour favoriser les courants de flots et limiter la sédimentation potentiellement induite par la mise en place de Port 2000.

Ces évolutions morphologiques, importantes à l'échelle de l'embouchure, impactent directement le fonctionnement de celle-ci. Combinés aux spécificités hydrologiques des années post-travaux, les travaux ont perturbé les dynamiques hydro-morpho-sédimentaires (HMS) de la fosse Nord. Les répercussions sur la dynamique des fonds peuvent se résumer à :

- une érosion de l'aval du secteur de la fosse Nord, entre les années 2004 et 2010, consécutive aux aménagements ;
- une sédimentation le long de la digue basse nord (banc aval) avoisinant la cote d'arase de la digue submersible (environ 4 m CMH) et une sédimentation (principalement sableuse) sur le banc de la passe et entre l'épi et le pont de Normandie.

Logiquement, ces évolutions (impacts directs des travaux et évolutions morphologiques associées) ont affecté l'hydrodynamisme de la zone et en particulier sa connexion à la Seine.

L'approfondissement naturel et anthropique du chenal de flot à l'aval a vraisemblablement renforcé l'asymétrie de marée et les apports marins (eau salée). Tandis que la réhausse des digues, les modifications des brèches et le renforcement des piles du pont de Normandie ont limité la connexion au chenal, diminuant par ailleurs les apports fluviaux (eau douce chargée en matières en suspension [MES]) à la fosse nord. Il en résulte :

- une augmentation de la salinité ;
- une diminution des apports en vases et donc une évolution des faciès sédimentaires avec une augmentation des teneurs en sables au détriment des teneurs en vases dans les sédiments superficiels.

Il est à noter que malgré les débits élevés des 5 dernières années (2016 à 2021), ces tendances ne semblent pas s'être inversées.

Ce nouvel équilibre HMS a eu des répercussions sur le fonctionnement écologique du secteur, en modifiant les caractéristiques et l'organisation spatiale des habitats et des communautés qu'ils abritent. Il s'exprime sur le plan bio-écologique par :

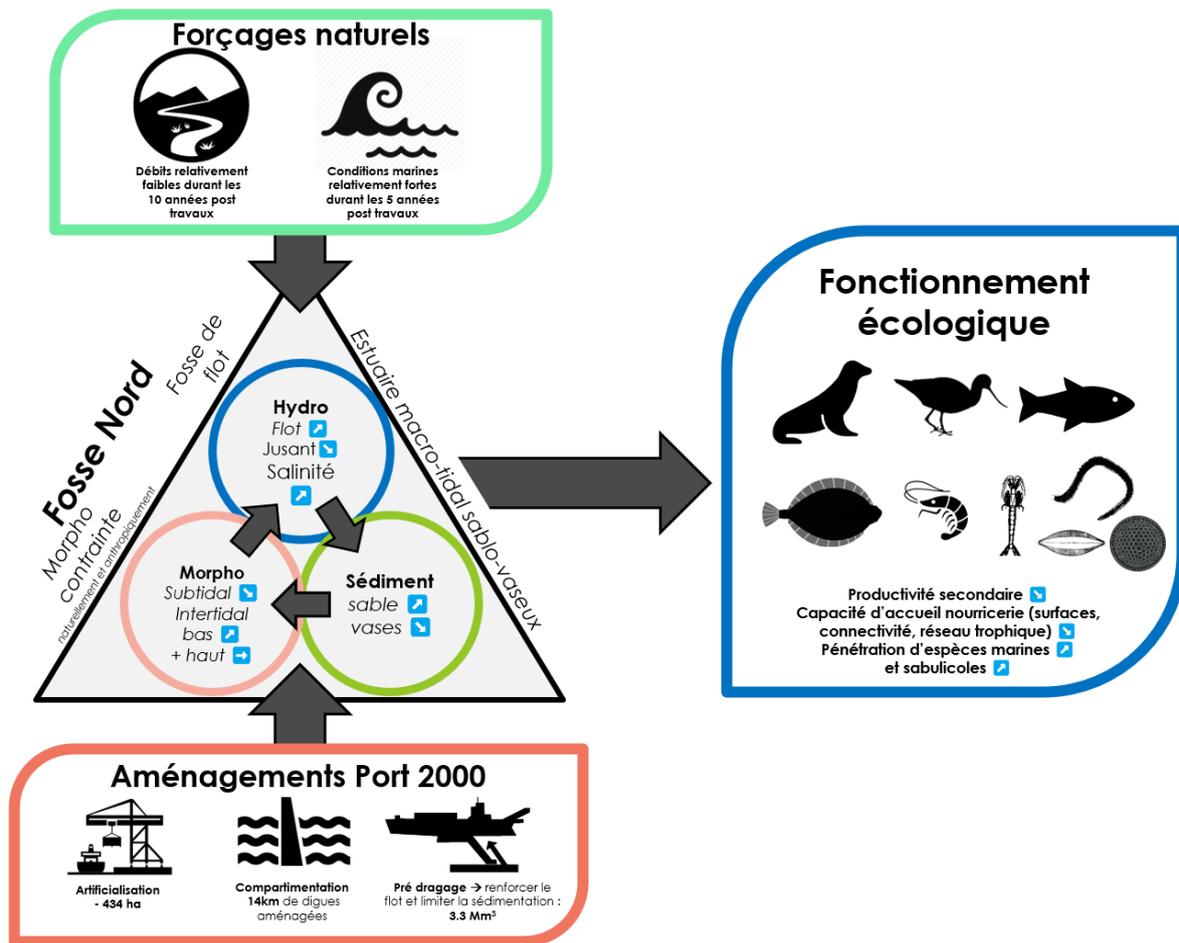
- un évolution des communautés de la fosse nord :
 - la progression des communautés suprabenthiques à affinité polyhaline et la raréfaction des espèces typiques des secteurs mésohalins ;
 - la pénétration d'espèces marines et sabulicoles (ces dernières associées aux secteurs sableux), (macrozoobenthos, suprabenthos et poissons).
- une diminution de l'abondance totale des groupes taxonomiques suivis, induite par la diminution de la capacité d'accueil :
 - une diminution des abondances des espèces clés du réseau trophique, à savoir, du mysidacé *M.slabberi* et du mollusque *L.balthica* ;
 - une diminution des effectifs des peuplements piscicoles, notamment de juvéniles.

Les répercussions écologiques liées aux aménagements Port 2000 sont à l'origine de l'affaiblissement de la fonction de nourricerie du secteur pour les poissons. Ceci est lié à :

- la diminution des surfaces disponibles (effet direct de la transformation de 434 ha de milieu naturel en une zone portuaire) ;

- un physiotope moins propice à l'accueil des juvéniles d'espèces telles que la sole (diminution des faciès vaseux peu favorables pour cette espèce, augmentation de l'asymétrie de marée et renforcement des courants de flot en lien avec l'évolution de la forme des fonds et la diminution marquée des surfaces subtidales supérieures) ;
- la diminution de la connectivité entre zones de refuge à marée basse et zones d'alimentation à marée haute, induite par la diminution du linéaire d'interfaces entre zones subtidales et intertidales (recul de la partie subtidale de la fosse nord vers l'aval). A ceci, s'ajoute la déconnexion entre le chenal principal du fleuve et le secteur de la fosse nord ;
- l'affaiblissement du réseau trophique ;
- la désestuariesation / marinisation de la nourricerie.

L'augmentation de l'influence marine, combinée à l'absence à l'amont d'habitat pouvant se substituer aux habitats mésohalin perdus, est à l'origine du phénomène de *nursery squeeze*: compression/réduction longitudinale et transversale de l'habitat de nourricerie.



Durant la période 2000-2020 le fonctionnement écologique de la fosse nord a été altéré par des années à l'hydrologie particulière et par les aménagements liés à la mise en place de Port 2000. Ceci résulte des évolutions du fonctionnement physique auxquelles les aménagements ont nécessairement contribué :

- diminution de la surface
- diminution de la connectivité au chenal principal du fleuve,
- évolution des dynamiques hydro-morpho-sédimentaires (renforcement des apports marins au détriment des apports fluviaux riches en matière en suspension, evolution des profondeurs, progression des faciès sableux)

Ces 3 éléments ont généré une modification des communautés en place et un affaiblissement de la capacité de nourricerie du système.

INTRODUCTION

Problématique générale

Dans le cadre des réflexions concernant la restauration écologique de l'estuaire, une attention particulière est attribuée aux secteurs aval de l'estuaire, notamment au secteur de la fosse Nord et des vasières intertidales associées. Ce secteur a largement évolué au cours du temps, notamment en réponse aux nombreux aménagements. Une vision globale des modifications de son fonctionnement, induites par les **effets cumulés des forçages anthropiques et naturels**, est prônée par les acteurs du territoire.

Le projet CAPNORD a été impulsé par différentes démarches dans lesquelles le GIP Seine-Aval est impliqué, en particulier i) la phase II du projet REPERE (accompagnement scientifique à la mise en œuvre de la restauration : sites ateliers), ii) le programme de recherche Seine-Aval 7 qui prévoit l'étude des trajectoires d'évolution et des réponses écologiques attendues et iii) la demande de HAROPA PORT de fournir un diagnostic des évolutions du fonctionnement physique et écologique depuis la construction de Port 2000 et préalable à la formulation des pistes de restauration écologique pour le secteur de la fosse/vasière Nord, notamment dans le contexte du projet d'aménagement dit "chatière".

L'objectif principal de ce projet est de synthétiser les connaissances disponibles sur l'évolution du fonctionnement physique et écologique du secteur de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000.

Le travail réalisé dans ce projet a bénéficié des apports, des avis et des remarques formulées par les membres du groupe de travail du projet dont la composition est indiquée en page 2. Ces experts ont été mobilisés directement pour contribuer à des aspects précis du projet. Ils ont par ailleurs été réunis afin de discuter de l'ensemble des résultats.

Secteur d'étude

Le secteur d'étude (Fig 1) se situe dans la portion aval de l'estuaire de la Seine, dans la zone limitée au sud par la digue basse nord et au nord par la cote topographique de 7,8 m (CMH). Il s'agit de la partie aquatique, "non végétalisée" de la fosse Nord. La cote 7,8 m CMH correspond au percentile 95 % du temps d'émersion de la zone, indiquant la limite haute de la frange intertidale (données HAROPA Port de Rouen). Le secteur est limité, à l'amont par la brèche amont du méandre artificiel et à l'aval par l'embouchure de la fosse nord, idéalement représentée à partir de la limite de la digue basse nord suite à sa prolongation (cf. aménagements).

Ces limites spatiales sont imposées par les besoins et les objectifs de l'étude. Néanmoins il faut rappeler que les évolutions du secteurs peuvent également être liées à des phénomènes naturels et anthropiques à plus large échelle (ex. évolution de la température en Manche).

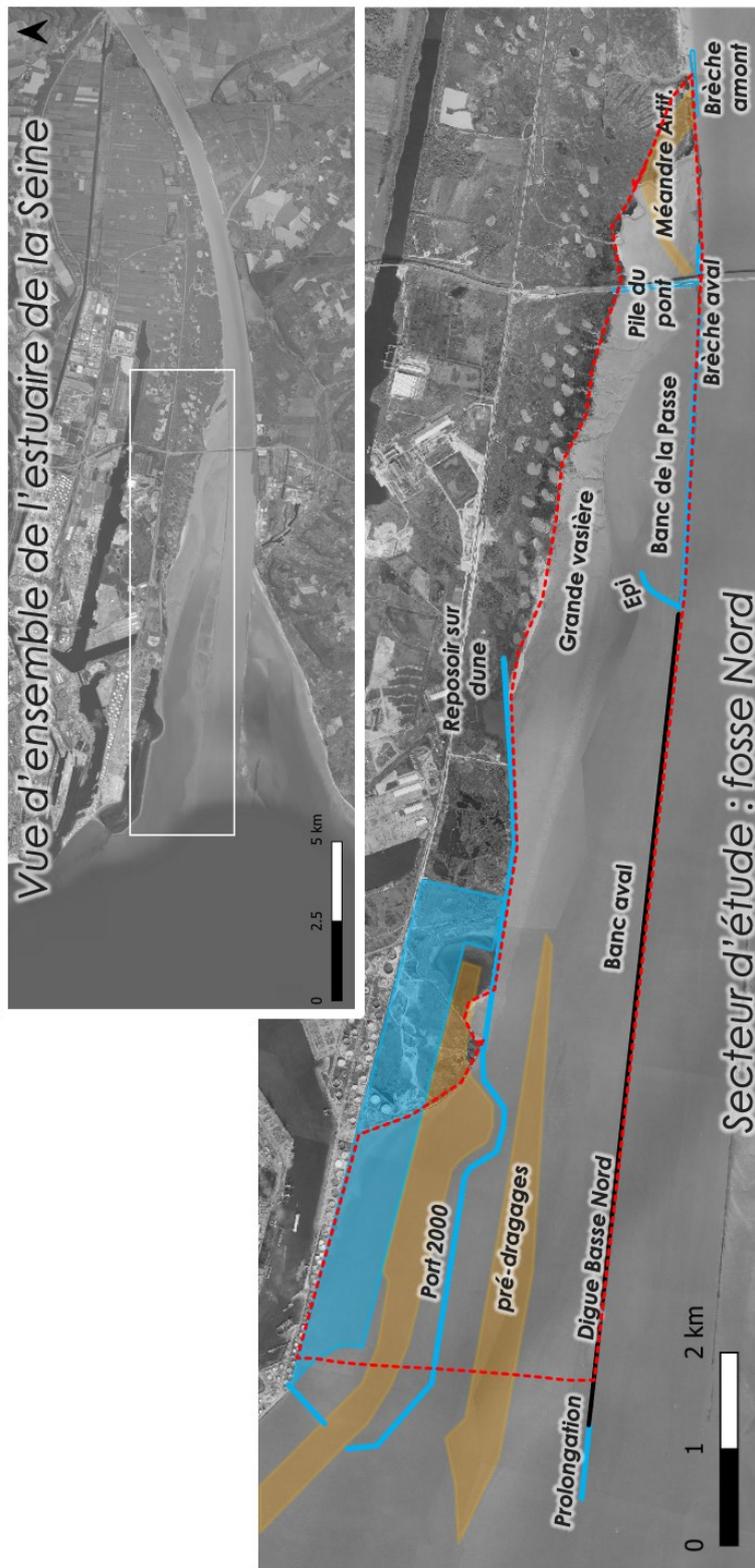


Figure 1. Zone d'étude et toponymes. En bleu, les structures créées ou modifiées depuis les débuts des années 2000. En marron, les dragages d'accompagnement

I EVOLUTION DU PHYSIOTOPE

I.1 L'équilibre Hydro-Morpho-Sédimentaire

L'équilibre Hydro Morpho Sédimentaire de la fosse Nord peut se définir comme l'adéquation entre les 3 principaux éléments qui définissent son fonctionnement physique :

- l'**hydrodynamisme** : les variations de hauteurs d'eau et de courants imposées par les forçages naturels (marée, débit, météo) sur la base de la morphologie du site,
- la **morphologie** : modelée par l'hydrodynamisme sur la base d'un socle géologique composé d'un mélange sablo-vaseux et présentant des hétérogénéités en terme d'érodabilité (ex. présence de banc de galets) et retravaillée pour les besoins des activités humaines,
- le **transport sédimentaire** induit par l'hydrodynamisme, les spécificités sédimentaires du site, et également par leur gestion anthropique (présence du site d'immersion de Kannik à l'aval de la fosse) .

Cet équilibre, interdépendant de celui de l'ensemble de l'estuaire, est historiquement contraint par les caractéristiques HMS du système et les aménagements :

- La fosse Nord est une fosse dominée par le flot dans un estuaire macrotidal (marnage > 7m) ;
- L'environnement sédimentaire est sablo-vaseux et présente des zones inafouillables constituées de blocs/galets ;
- Les aménagements (digues, quais, pont de Normandie, poldérisation, etc.) ont des répercussions directes et indirectes sur les évolutions morphologiques. Dans l'ensemble, les évolutions morphologiques de la fosse Nord sont contraintes par la présence au nord, des digues du port du Havre, de la route de l'estuaire ; à l'est, par la présence du pont de Normandie et la poldérisation et au sud, par la présence de la digue basse nord.

Les modifications de l'équilibre HMS induites par les travaux de Port 2000 et la spécificité des interactions entre les forçages naturels et anthropiques durant les années post-travaux ont affecté certaines composantes de cet équilibre. **L'objet de la présente étude est de réaliser le bilan de ces modifications et de mettre en lumière les évolutions du fonctionnement écologique induites par ces modifications.**

En effet, le fonctionnement écologique s'adapte et évolue en réponse aux modifications du physiotope, conditionnées par l'équilibre HMS. Ainsi, les dynamiques HMS jouent un rôle essentiel dans le processus de structuration du physiotope et des habitats, dont découle la trajectoire d'expression de la composante biotique (Fig 2).

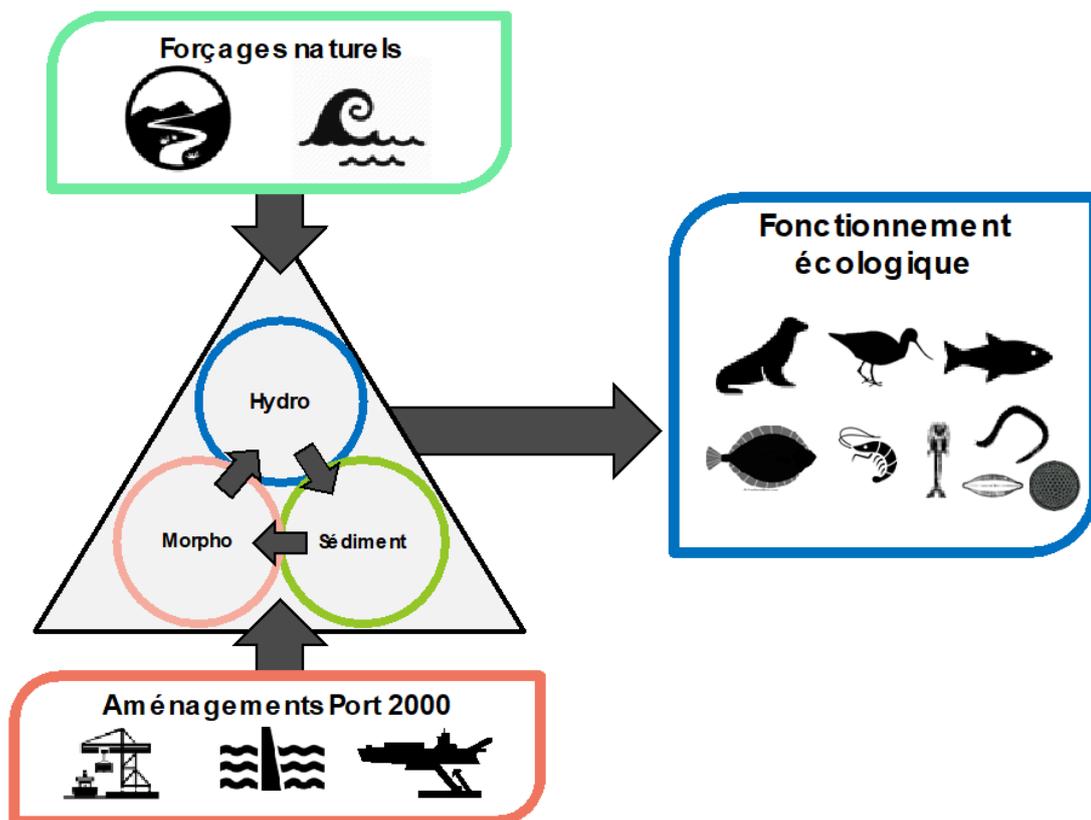


Figure 2. Schématisation des interactions entre le fonctionnement physique et écologique estuarien

I.2 Les forçages depuis la construction de Port 2000

I.2.1 Les forçages hydrodynamiques

Les années qui suivent les travaux Port 2000 et la réalisation des mesures d'accompagnement sont caractérisées par des débits de la Seine relativement faibles. En effet, la figure 3 montre qu'entre les années 2004 et 2011, aucune crue de la Seine atteignant les 1500 m³.s⁻¹ n'a été observée. A l'inverse, avant les travaux, les années 2000 à 2002 et les années récentes, 2016 à 2020, présentent des débits plutôt élevés. Cette variabilité pluriannuelle des débits est connue et peut être mise en lien avec les conclusions du projet HYDROCLIMAT sur la cyclicité et l'alternance de période de forts et faibles débits/agitations à l'embouchure provoquées par les variations climatiques gouvernées par la NAO (Massei et al., 2011).

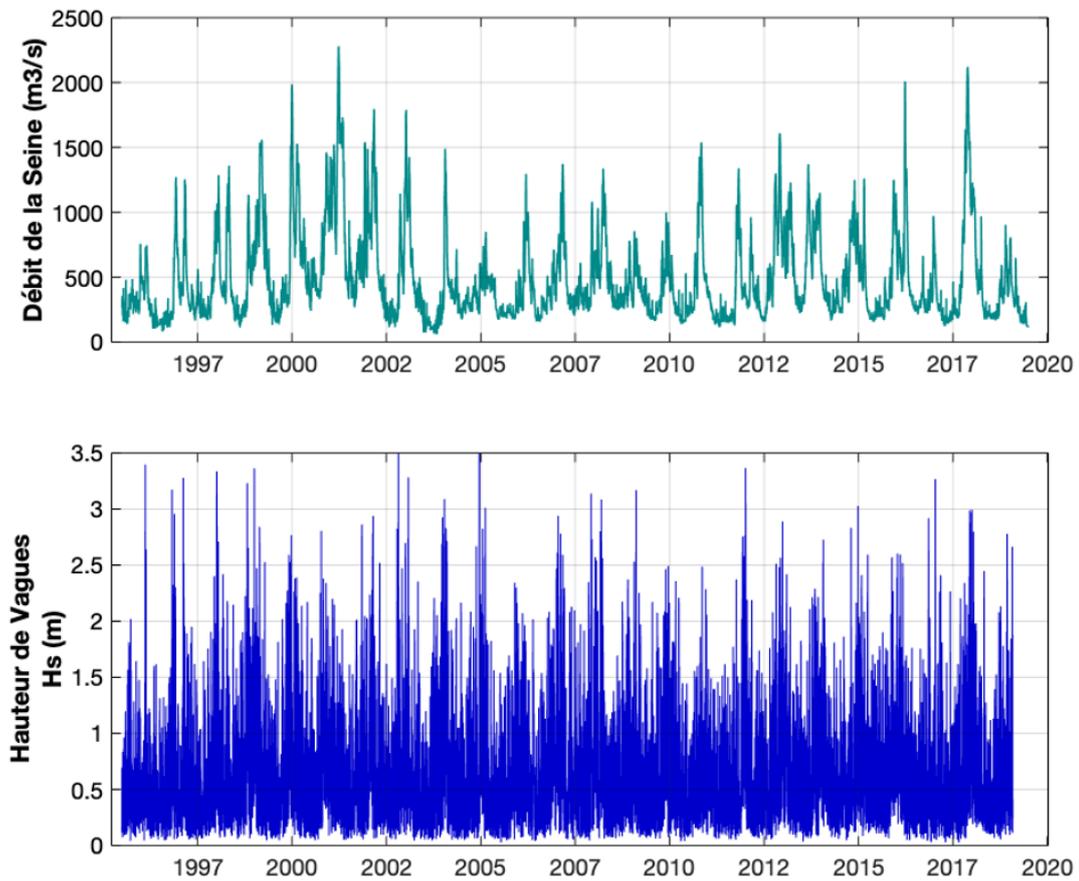


Figure 3. Evolution temporelle des débits de la Seine à Poses (banque hydro) et des hauteurs significatives des vagues à l'embouchure (simulation WW3, Projet Seine-Aval ARES) entre 1995 et 2019

Concernant les conditions de houle à l'embouchure (Figure 4), ces dernières ne présentent pas de variabilité anormale sur la période étudiée. Néanmoins, en raison des concomitances connues et quantifiées entre les périodes de débits élevés et les périodes d'agitation (Jacinto, 2005; Lemoine, 2021), les 5 années post-travaux peuvent être caractérisées comme dominées par les conditions marines. Étant donné les débits relativement faibles, les conditions de houle sont dominantes.

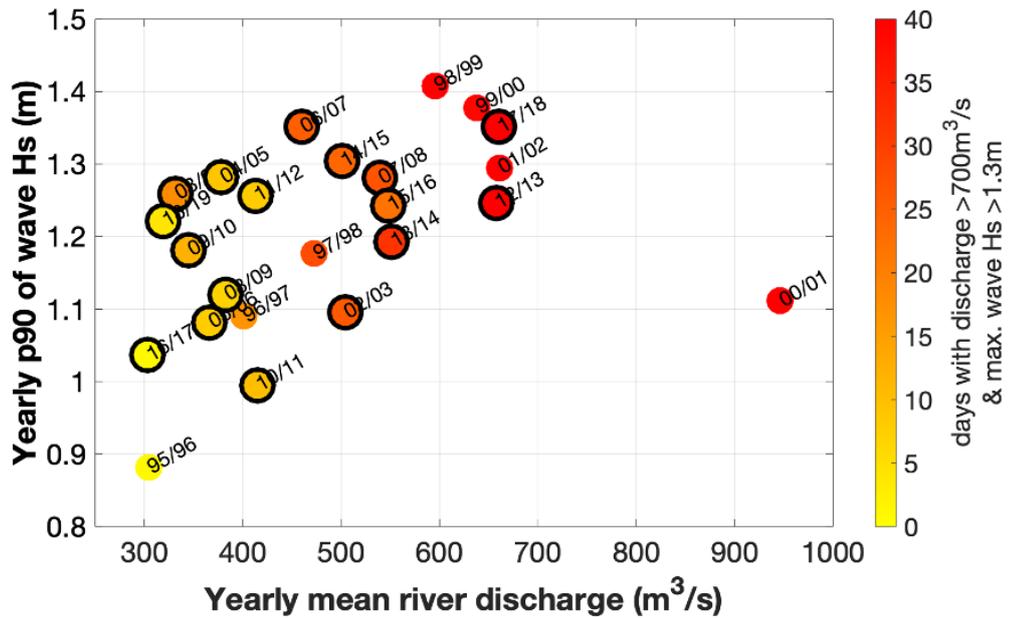


Figure 4. Relation entre les débits moyens annuels et un proxy de l'agitation à l'embouchure, le percentile 90 des hauteurs significatives de vagues. Les années hydrologiques sont considérées du 1er août au 31 juillet. Les années entourées d'un cercle noir correspondent aux années post travaux

Ainsi, pendant la période post travaux, les forçages hydrodynamiques sont plutôt dominés par les conditions marines (marées+houles):

- débits relativement faibles durant les 10 années post travaux
- conditions d'agitation (vagues) relativement fortes (par rapport au débit) durant les 5 années post travaux (2005-2010)

Cette prépondérance des forçages maritimes par rapport aux forçages fluviaux a vraisemblablement joué un rôle dans les évolutions de la fosse depuis les années 2000.

I.2.2 Les aménagements réalisés dans le cadre de la construction de Port 2000

Les aménagements réalisés dans ce secteur de l'estuaire (Fig 5) peuvent être regroupés en 2 groupes :

- **aménagements de la morphologie** : construction/modification des digues et dragage afin de contrôler l'hydrodynamisme et la dynamique sédimentaire associée au sein de la fosse Nord
 - Prolongation de l'extrémité aval de la digue basse nord sur 750 m à la cote +3,5 m CMH (juin à novembre 2003) ;
 - Construction de l'épi de 550 m à la côte +3m CMH dont 300 m réhaussé à +5,5 m CMH dans un deuxième temps (année suivante) (soubassement août 2003 - réhausse septembre à novembre 2004). Cette mesure faisait partie, avec le méandre artificiel, des mesures d'accompagnement de Port 2000. L'objectif était de maintenir les vasières en limitant la progression des herbues. En effet, ce secteur a assisté à une progression de la végétation très rapide (> 50 ha/an) entre 1974 et 1988, suivi par un ralentissement de 1988 et 1999 (10 ha/an) puis à 5ha/an entre 1999 et 2004.
 - Rehaussement de 1 m de la digue basse nord entre l'épi et le pont de Normandie (2000 m environ) jusqu'à des cotes comprises entre 6 et 6,5 m CMH (septembre à novembre 2004) ;
 - Réhausse de 1m de la brèche à l'aval du pont de Normandie à la cote 3,5 m CMH (septembre 2005);
 - modification des digues et brèches à l'amont du pont de Normandie :
 - i/ réparation de la brèche située à l'amont immédiat du pont (remise au niveau de la digue submersible 6 m CMH) (juin à septembre 2003)*
 - ii/ création de la brèche amont (pour le méandre artificiel) : 400 m à +2,5 m CMH (juillet 2005) faisant partie des mesures d'accompagnement de Port 2000*
 - Renforcement des soubassements des piles du pont de Normandie afin d'éviter de potentiels affouillements (mars à avril 2005);
 - Pré-dragage (3,3 millions de m³ sur environ 180 ha) au sud immédiat du cercle d'évitage de Port 2000 (secteur subtidal situé entre la digue extérieure de Port 2000 et la digue basse nord [DBN]) (zone Ouest : avril à novembre 2003 - zone Est : décembre 2003 à juillet 2004);
 - A l'amont du pont de Normandie, le port de Rouen est également intervenu sur les digues submersibles situées de part et d'autre du chenal de navigation notamment pour les réparer.

- **aménagements à vocation écologique** direct : création du reposoir sur dune (*mesure compensatoire du projet Port 2000*) (ainsi que le reposoir sur l'île artificielle, hors du secteur d'étude) et du méandre artificiel (*mesure d'accompagnement*)

Afin d'évaluer l'importance potentielle de ces aménagements sur la dynamique de l'estuaire, il est possible de mettre en regard le linéaire de berges modifiées/aménagées dans le cadre du projet +/- 14 km et le trait de côte situé entre Le Havre, le pont de Normandie et Deauville qui avoisine les 35 km. Par ailleurs, il est important de relativiser la hauteur des digues aux hauteurs d'eau rencontrées en estuaire, notamment la médiane des hauteurs d'eau située à 5,2 m CMH.

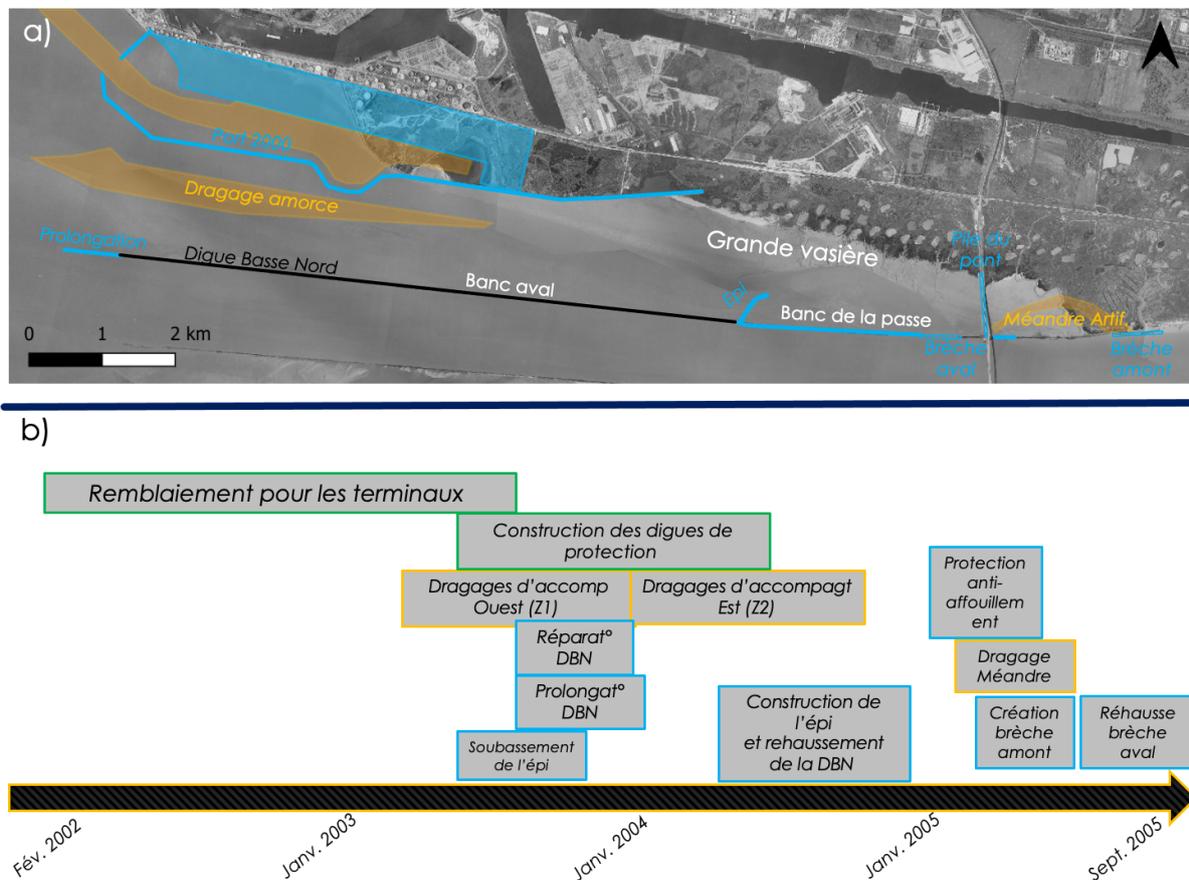


Figure 5. a) Aménagements réalisés à partir des années 2000 dans le secteur de la fosse Nord et b) chronologie des travaux d'après Artelia 2015

La figure 6 permet de visualiser les phases de la marée pendant lesquelles les principales digues délimitant la fosse nord sont submergées et également de quantifier la proportion du temps pendant laquelle la fosse est connectée au chenal principal.

Courbes de marée théorique à Honfleur
pour différents coefficients de marée ; débit de la Seine = 400 m³/s

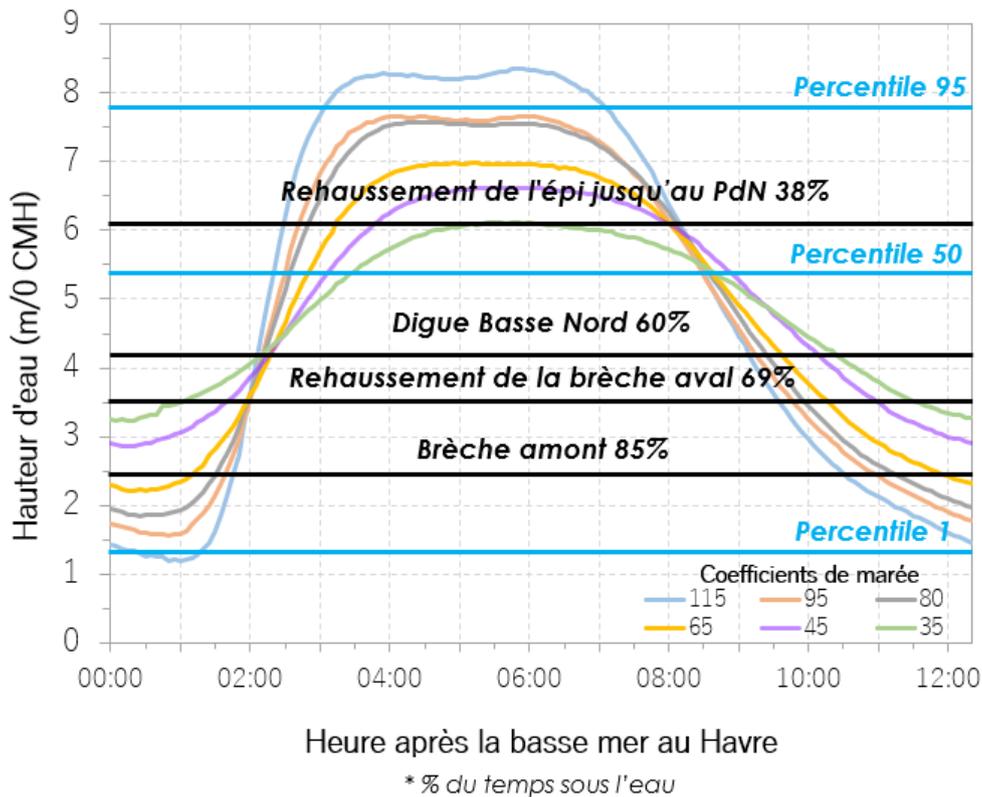


Figure 6. Comparaison des niveaux topographiques des principaux aménagements par rapport aux courbes de marée théoriques à Honfleur. Les percentiles sont calculées sur la base des mesures de niveau d'eau réalisées au marégraphe de Honfleur sur la période 2000-2010. Source de données HAROPA Port de Rouen

Les aménagements réalisés dans le secteur de la fosse Nord sont conséquents à l'échelle de l'embouchure de l'estuaire de la Seine.

Les modifications et constructions de digues combinées aux pré-dragages impactent directement la morphologie de l'embouchure et en particulier de la fosse Nord.

Malgré l'ouverture de la brèche amont, les travaux sur les digues existantes combinés à la mise en place des protections anti-affouillements sur les piles du pont de Normandie réduisent la connexion de la fosse Nord au chenal de navigation de part et d'autre du pont de Normandie mais également à l'aval de la digue submersible nord.

La combinaison de l'ensemble des aménagements renforce l'influence marine (relativement à l'influence estuarienne) à l'aval de la fosse.

La figure 7 rappelle les cotes des digues submersibles dans l'estuaire (HAROPA Port de Rouen, 2022 comm. pers.)

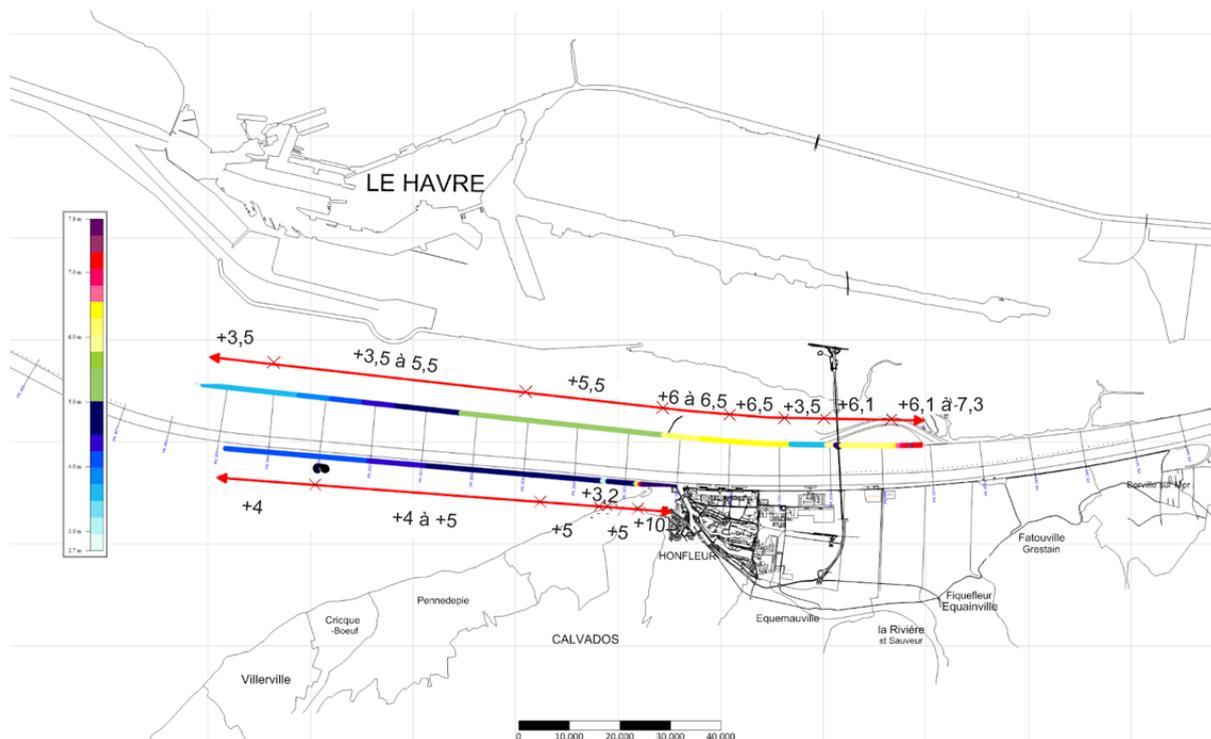


Figure 7. Cotes des digues dans la portion aval de l'estuaire (HAROPA Rouen comm. pers. 2022)

I.3 Les évolutions Hydro-Morpho-Sédimentaire

I.3.1 Les évolutions morphologiques

Pour l'analyse des évolutions morphologiques, nous avons considéré les classes bathymétriques suivantes :

Élévation z (m CMH)	Secteur
$z < -1$	subtidal profond
$-1 < z < 1.4$	subtidal peu profond
$1.4 < z < 5.2$	intertidal bas
$5.2 < z < 7.8$	intertidal haut

Comparaison des bathymétries/topographies

Le secteur d'étude bénéficie de suivis bathy-topographiques fréquents, notamment réalisés dans le cadre des suivis "Port 2000". Les relevés hydrographiques réalisés par HAROPA Port de Rouen et les suivis LIDAR réalisés pour HAROPA Port du HAVRE ont été combinés de manière à obtenir des sets de données homogènes et cohérents (emprises et résolutions). Ces référentiels bathy-topographiques sont utilisés pour étudier les évolutions morphologiques induites par les travaux réalisés depuis les années 2000.

Dans l'ensemble, la comparaison de ces différents référentiels montre que la morphologie du secteur a véritablement évolué sur la période 2000-2020.

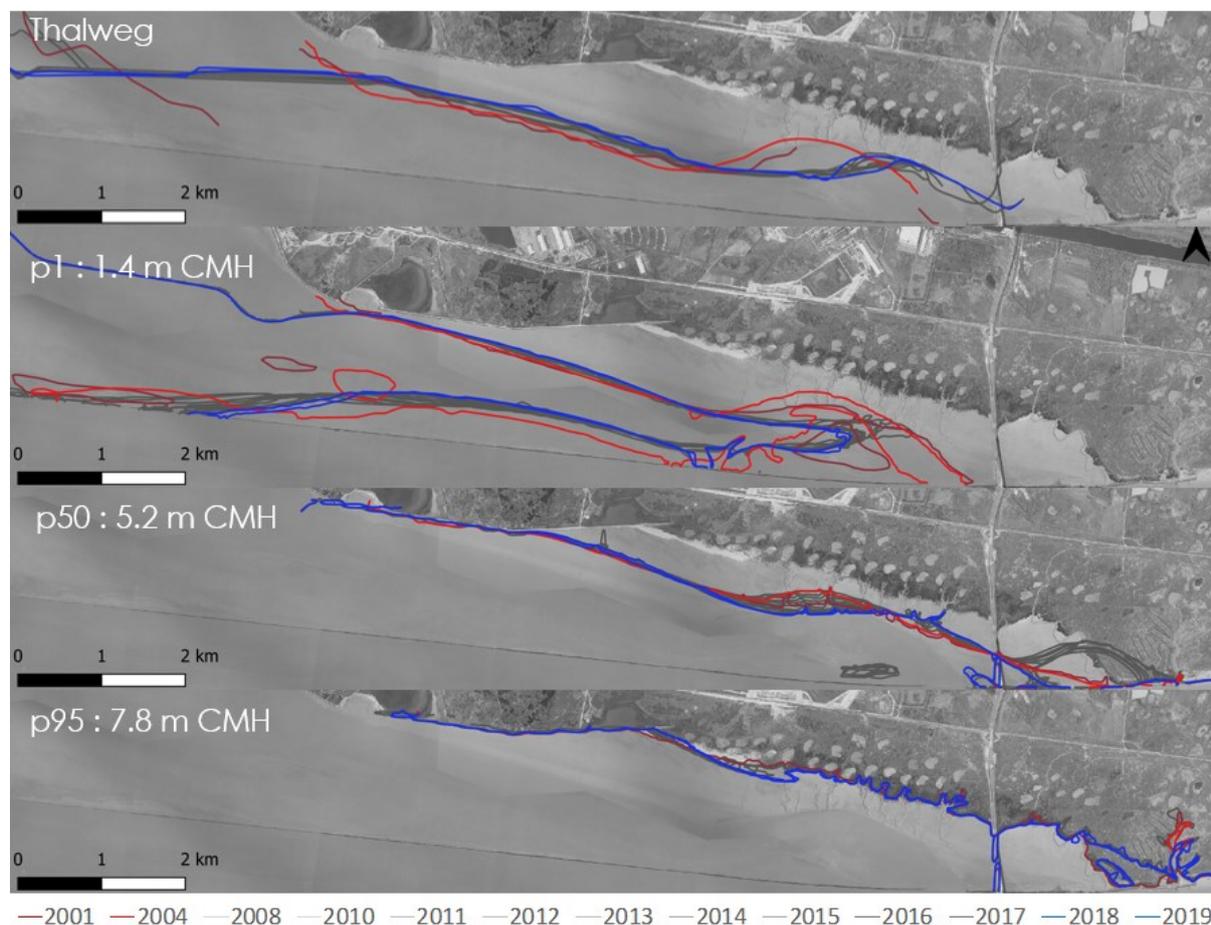


Figure 8 : Evolution au cours de la période 2001-2019, de la position du i/ thalweg, ii/du percentile 1 des niveaux de marée (niveau bas des zones intertidales), iii/ du percentile 50 niveau médian des zones intertidales, et iv/ du percentile 95 (niveau haut des zones intertidales)

Les profils tracés le long du thalweg de la fosse Nord montrent un creusement de la fosse, de l'aval jusqu'à l'épi ; et une sédimentation relativement marquée entre l'épi et le pont de Normandie (Figure 9). A l'amont immédiat des pré-dragages, une érosion est observée jusqu'aux bancs de galets connus au sud du cercle d'évitage. Entre les profils 1 et 3, à distance des pré-dragages (cf. § précédent), l'érosion au niveau du thalweg dépasse les 2 mètres. Dans la partie amont du thalweg, entre les profils 3 et 4, une importante sédimentation est observée : **les zones subtidales sont quasiment comblées**. Ces dépôts, vraisemblablement induits par la réhausse de la brèche, sont accompagnés d'une **migration vers le nord du thalweg**, traduisant un renforcement des écoulements Ouest-Est sous le

Pont de Normandie, cohérent avec les objectifs des aménagements. La position des différents thalwegs est illustrée figure 8.

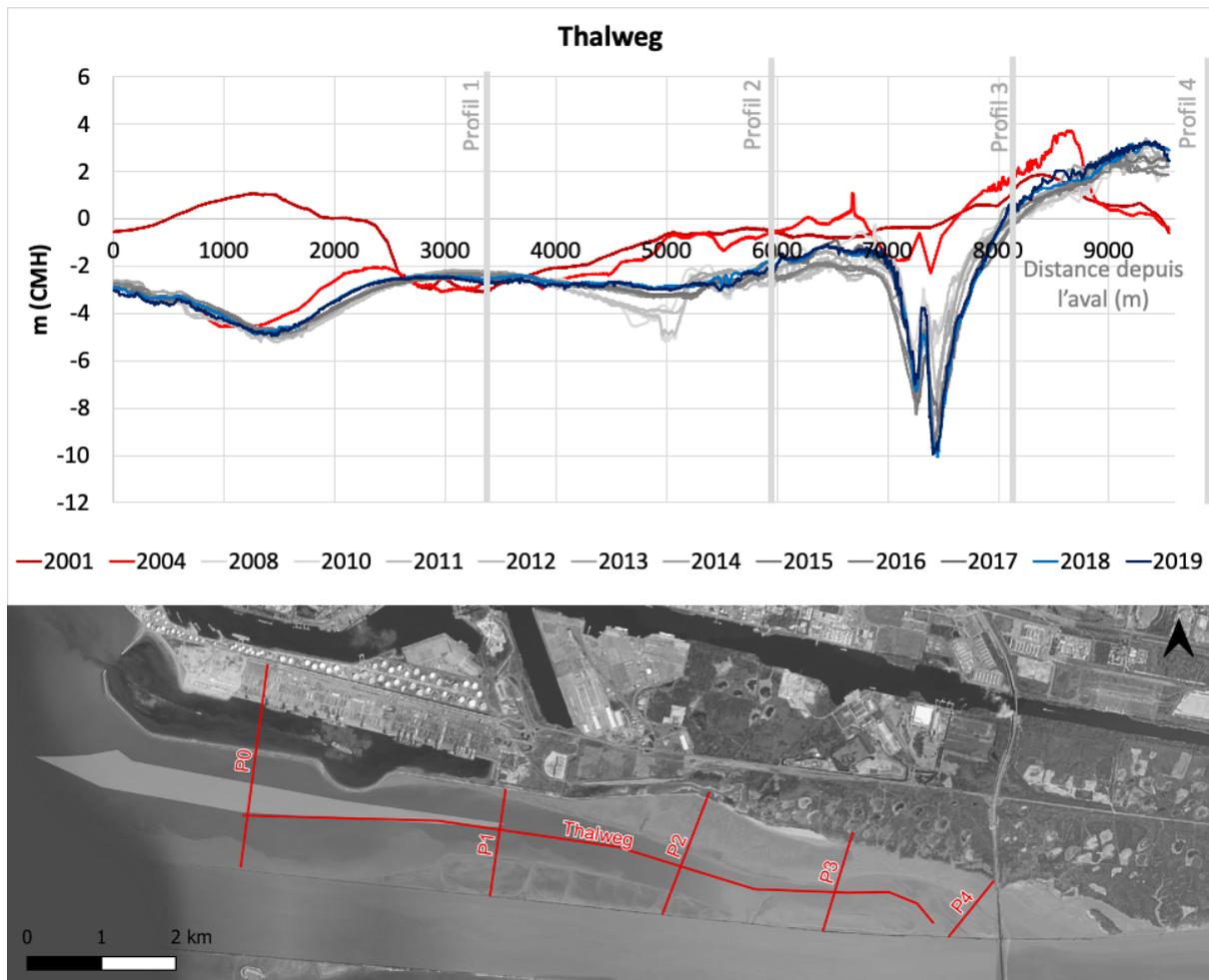


Figure 9. Profils topographiques le long d'un thalweg moyen de l'aval vers l'amont de la fosse (haut) - Position des profils P0 - P1 - P2 - P3 - P4

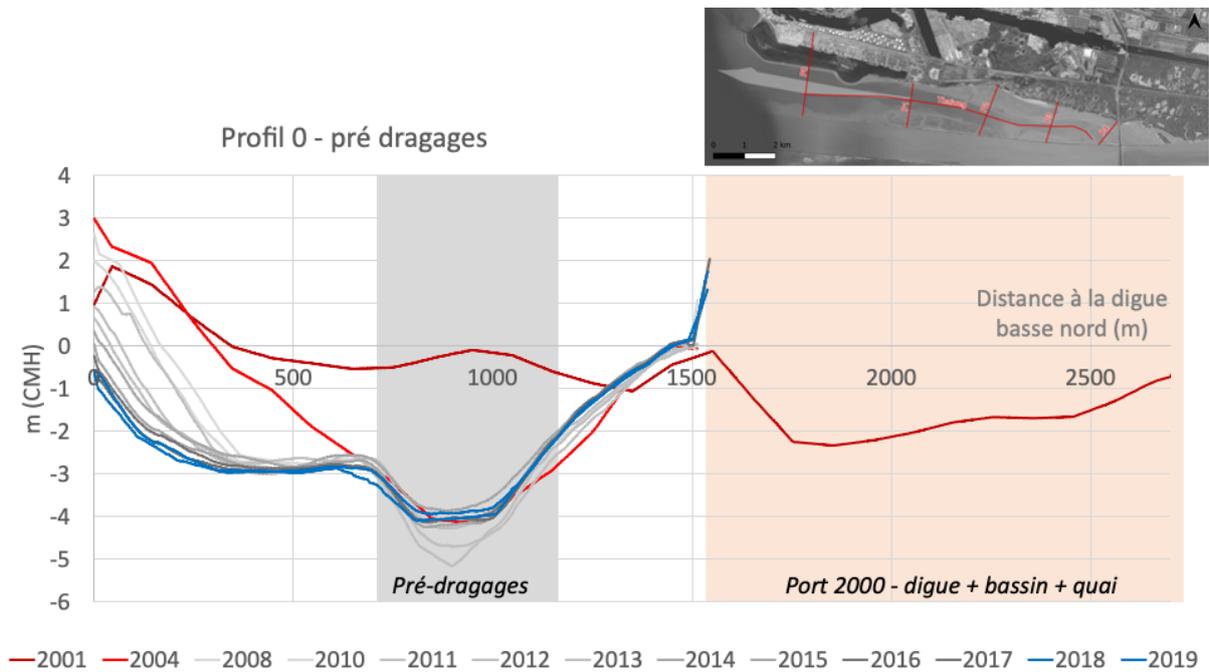


Figure 10. Profils topographiques transversaux P0 “à travers la zone des pré-dragages”

Le profil P0, situé à l’aval de la fosse Nord, traverse le secteur ayant fait l’objet des pré-dragages (Figure 10). Ce profil illustre le rétrécissement transversal d’environ 1200 m de la fosse nord induit par l’aménagement Port 2000. Au niveau de la zone draguée, un abaissement du fond de 4 m est observé. Dans l’ensemble la section présente une érosion nette importante, issue directement des travaux, mais également d’un affouillement massif vraisemblablement dû au réajustements morphologiques induits par le rétrécissement de la section et à l’importance de l’énergie du flot dans ce secteur. Les surfaces des sections mouillées sous les cotes de basses mer (1.4 m CMH) sont similaires en 2001 ($\cong 5715 \text{ m}^2$) et en 2019 ($\cong 5880 \text{ m}^2$). En revanche, sous la cote du niveau médian (5.2 m CMH) la surface de la section est moindre en 2019 ($\cong 11600 \text{ m}^2$) qu’en 2001 ($\cong 15627 \text{ m}^2$). Cette différence de surface des sections sous le niveau médian peut être mise en lien avec l’érosion constatée au fil des années entre la DBN et la zone des pré-dragages : la canalisation accrue par la nouvelle morphologie génère des vitesses de courants plus importantes et donc de l’érosion lors des phases de flot.

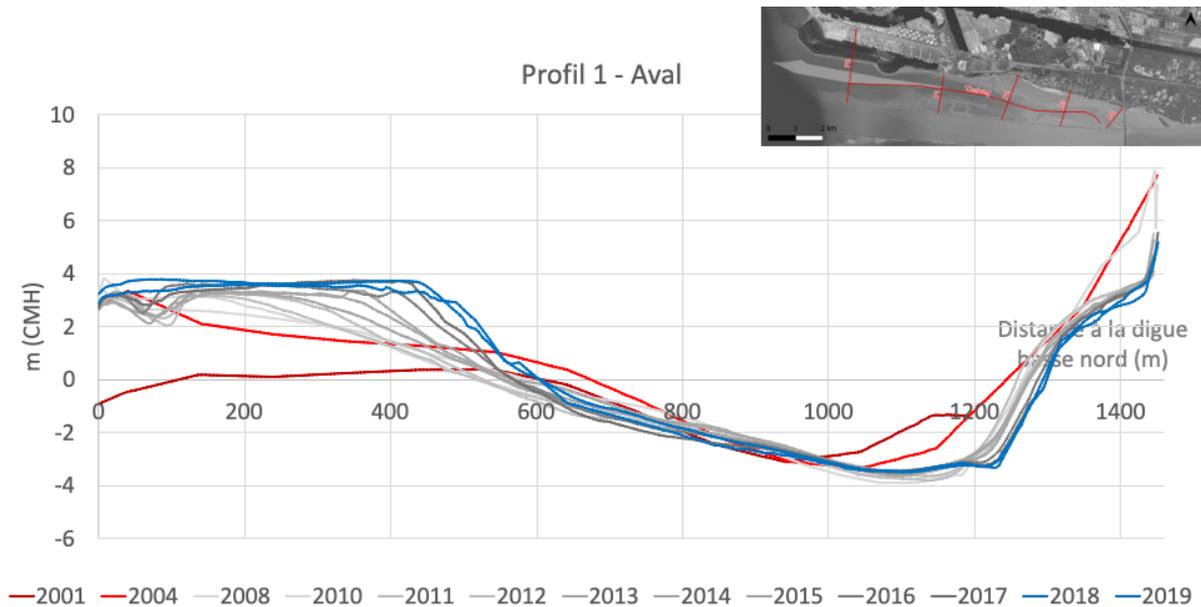


Figure 11. Profils topographiques transversaux P1 à l'aval de la zone, en amont immédiat de Port 2000

Les évolutions du profil 1 (Figure 11), perpendiculaire au thalweg au niveau de l'aval du banc aval, montrent une sédimentation marquée sur le Banc Aval, d'environ +4 m sur 400 m de long sur la période des levés. A noter que sur ce banc, la sédimentation est limitée topographiquement par la hauteur de la digue basse nord (4 m CMH). Au-delà de cette cote, les vitesses de courants induites par la présence de la digue submersible, ne permettent plus la sédimentation. Cet hydrodynamisme intense au voisinage de la cote des digues favorise la présence de sable plutôt que de vases sur les zones intertidales accolées à la digue submersible nord (cf. § couverture sédimentaire). Cette figure illustre également un approfondissement de la fosse à ce niveau et une migration vers le nord du thalweg.

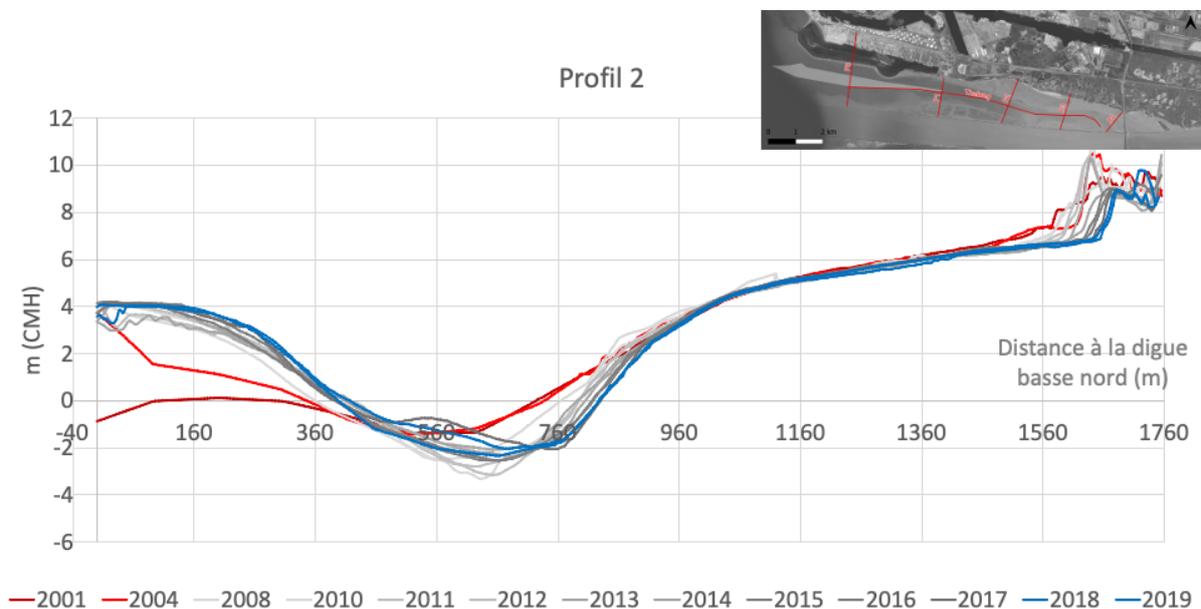


Figure 12. Profils topographiques transversaux P2 - "amont du banc aval / reposoir sur dune"

Les évolutions du profil 2 (Figure 12), situé à l'amont du banc aval, montrent également une sédimentation au niveau du banc aval (dans sa partie "historique") atteignant les 4 m CMH (cf. § précédent) mais plus limitée en termes de largeur. A ce niveau, le thalweg s'est également approfondi (-1,5 m) et a migré vers le nord.

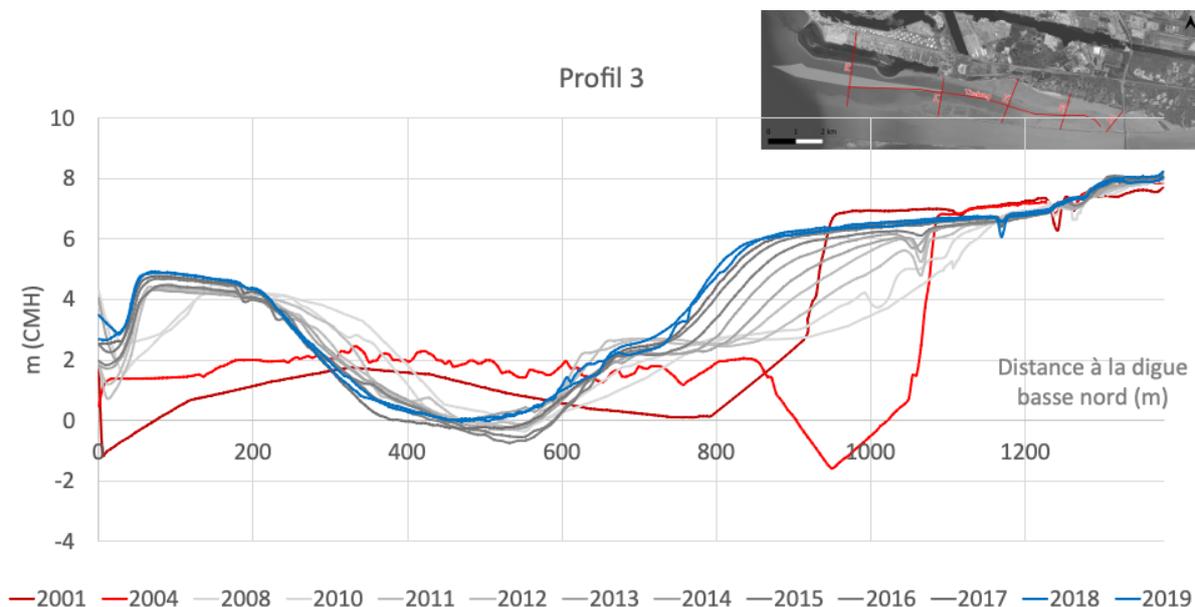


Figure 13. Profils topographiques transversaux P3 - "banc de la passe"

Au niveau du profil 3 (Figure 13), situé au milieu du Banc de la Passe, les évolutions sont très marquées. Les 300 m situés au nord de la digue basse nord sont en sédimentation, les 300 m suivants en érosion, et enfin le nord du profil (au niveau de la grande vasière) est en sédimentation. Sur ce profil on notera, en particulier, un développement relativement continu vers le sud de la grande vasière, d'environ 300 m sur la période.

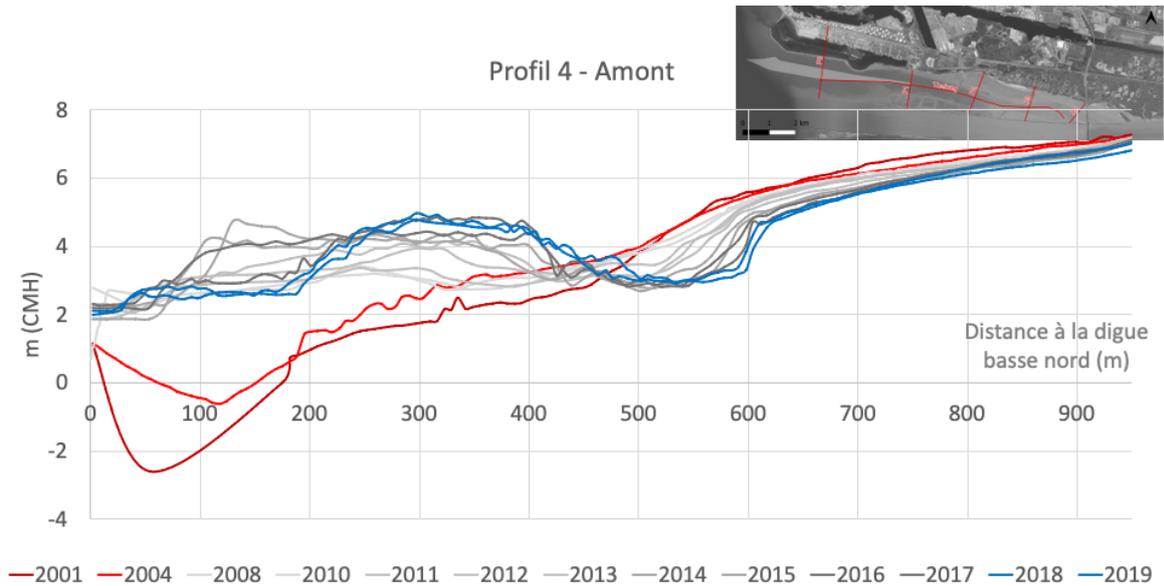


Figure 14. Profils topographiques transversaux P4 - “aval immédiat du pont de Normandie”

Le profil 4 a été tracé afin d’illustrer la migration vers le nord du thalweg de la fosse nord et la sédimentation observée à l’amont du secteur d’étude (Figure 14). Ainsi, sur les 450 m situés au sud de ce profil, une sédimentation conséquente est observée dans les zones subtidales ; tandis qu’au nord du profil, une érosion nette est observée dans les niveaux intertidaux. Ce profil illustre également la disparition des milieux subtidaux dans ce secteur.

Les parties subtidales de la fosse Nord se sont approfondies en aval de l'épi, en revanche à l'amont de ce dernier elles ont quasiment disparu.

Le banc aval s'est largement développé vers l'aval mais reste limité topographiquement par la cote de la digue basse nord.

Outre l'érosion causée par la mise en place de l'épi (pour stopper la progression des herbues), la morphologie de la partie intertidale de la grande vasière est restée relativement stable.

Entre l'épi et le pont de Normandie, une sédimentation relativement importante des milieux subtidaux a été observée. En lien avec la mise en place de l'épi, la vasière a été érodée et le thalweg de la fosse a migré vers le Nord, stoppant ainsi la progression des herbues dans ce secteur.

L'approfondissement à l'aval de la fosse favorise l'influence marine sur le secteur, influence déjà renforcée par la mise en place de la digue Port 2000. De même, la sédimentation à l'amont de la fosse réduit la connexion au chenal déjà réduite par le rehaussement de la brèche. Ainsi, les réajustements morphologiques induits par les aménagements renforcent les impacts directs de ceux-ci sur le fonctionnement hydraulique de la fosse.

Évolution de la répartition des profondeurs - "hypsométrie"

La répartition des surfaces associées aux différentes profondeurs rencontrées dans la fosse Nord ont été tracées pour différentes zones. Ces zones réparties de l'aval vers l'amont du secteur sont scindées en deux selon l'axe nord-sud au niveau d'un thalweg moyen sur la période. Il est toutefois noté que la surface de la fosse Nord était de 2176 ha en 2001 contre 1742 ha en 2019, **soit une perte de 434 ha** (Fig 15 et Fig 16). *Étant donné les incertitudes sur les côtes des zones végétalisées, ces calculs sont limités aux secteurs sous la cote 7.8m CMH (percentile 95 des hauteurs d'eau sur le secteur).*

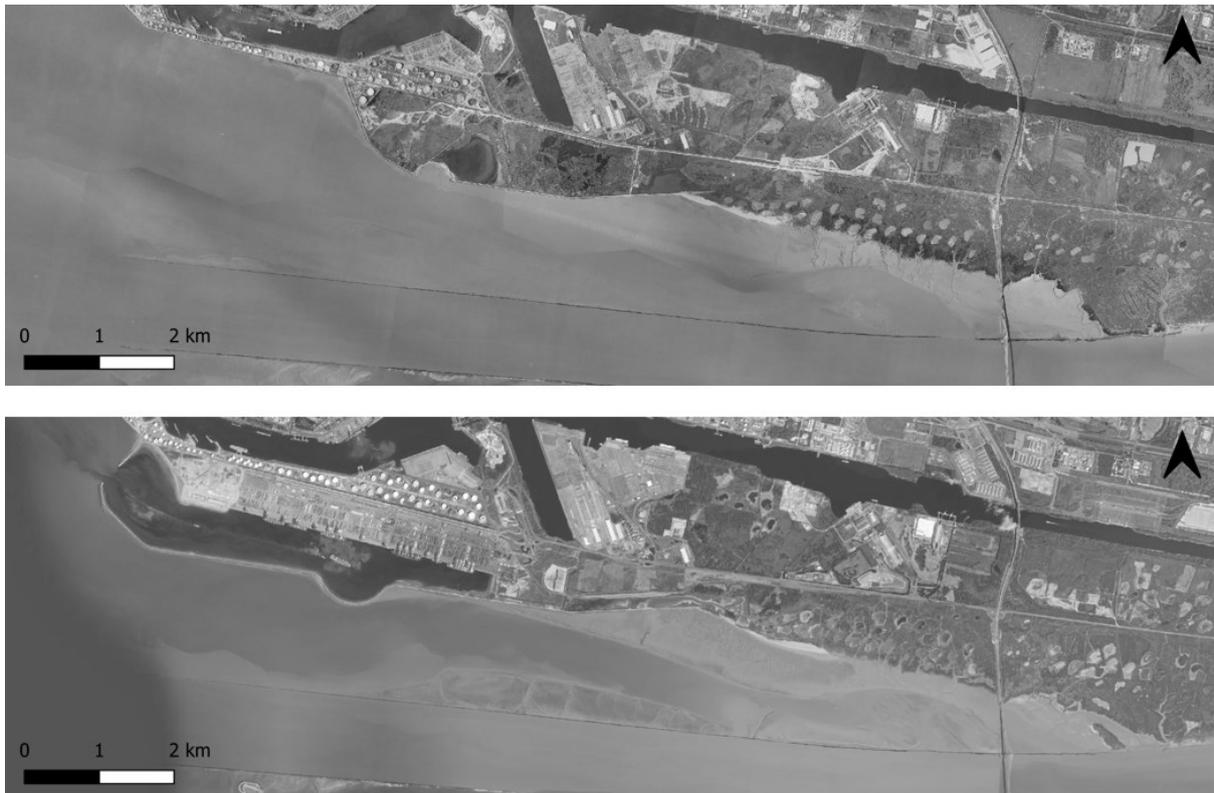
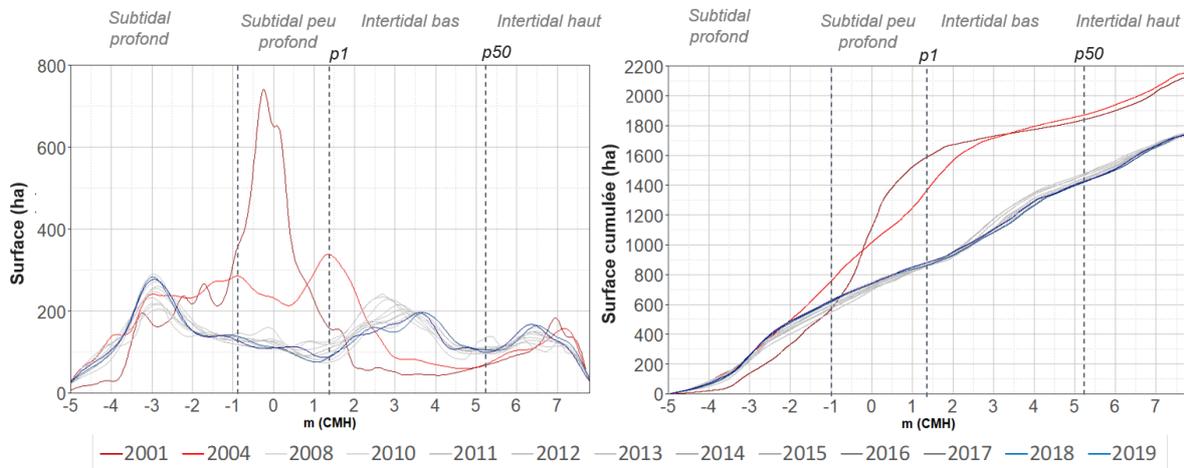
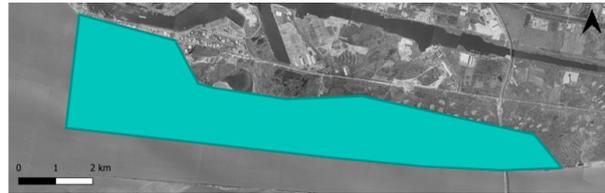


Figure 15. Orthophotos du secteur d'étude en 2001 avant les travaux de Port 2000, en haut (Geolittoral, 2001 et en 2019 en bas. (ESRI 2019)

La figure 16 illustre la répartition des profondeurs entre 2001 et 2018, pour l'ensemble du secteur d'étude. Les courbes rouges représentent les années 2001 et 2004, celles en bleu les années 2018 et 2019, et les grises correspondent aux années intermédiaires. Cette figure met en évidence les évolutions décrites précédemment et montre en particulier une perte nette sur le milieu subtidal de l'ordre de 650 ha ; résultats d'un gain de surface en subtidal inférieur à -2 m CMH de l'ordre de 200 ha et une perte importante en subtidal supérieur à -1 m CMH de l'ordre de 700 ha (classe hypsométrique majoritaire avant Port 2000). Concernant l'intertidal, une augmentation des surfaces intertidales basses (< 5,4 m CMH) de l'ordre de 300 ha est observée, alors qu'une faible diminution ($\cong 25$ ha) des surfaces intertidales hautes est mesurée.

Fosse Nord "entière"



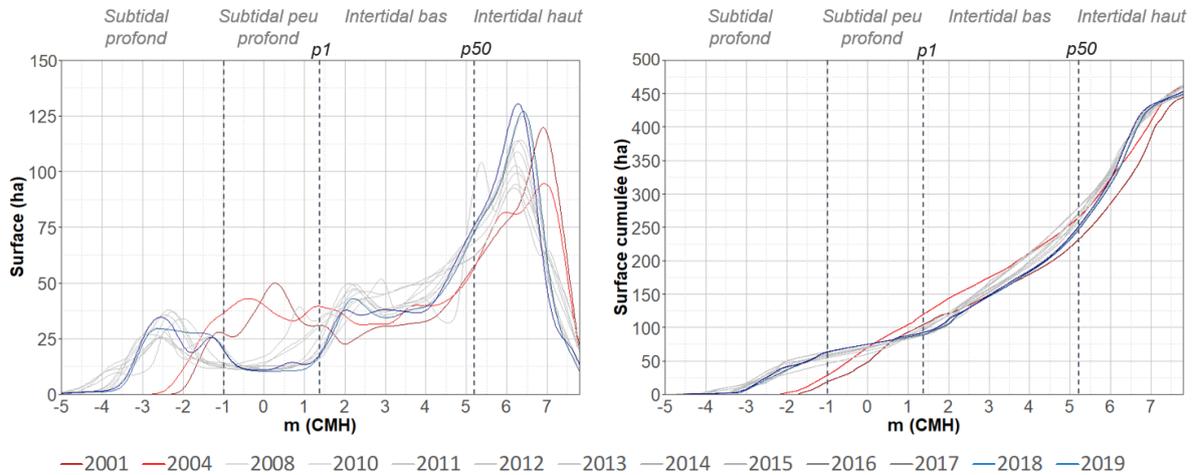
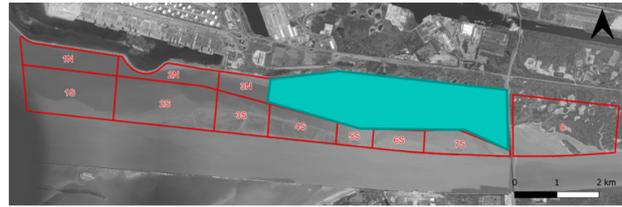
Subtidal profond (<1m CMH) : +/- 50ha
Perte en subtidal peu profond : 0= -700ha
Gain en intertidal bas : 0=+300 ha
Stabilité de l'intertidal haut : 0=-25ha

→ Perte de surface totale : 434 ha

Figure 16. Évolution des courbes hypsométriques entre 2001 et 2019 : Distribution (gauche) et distribution cumulée (droite) des profondeurs pour l'ensemble de la fosse Nord

La figure 17 concerne la grande vasière, elle montre que la répartition des profondeurs sur ce secteur a évolué, principalement en subtidal. Une augmentation des surfaces de subtidal profond de 75 ha est observée au détriment du subtidal peu profond de 75 ha également. Concernant l'intertidal, celui-ci semble relativement stable avec une augmentation des surfaces intertidales basses, compensée par les pertes du haut intertidal de 25 ha. A noter, un abaissement des cotes majoritaires (pic dans la distribution) d'environ 60 cm, vraisemblablement dû à l'érosion induite par l'épi pour stopper la progression des herbues.

Grande Vasière



Gain en subtidal profond <1m CMH : 0=+75ha
 Perte en subtidal peu profond : 0=-75ha
 Gain en intertidal bas : 0=+25ha
 Abaissement de l'intertidal haut : 0=-25ha

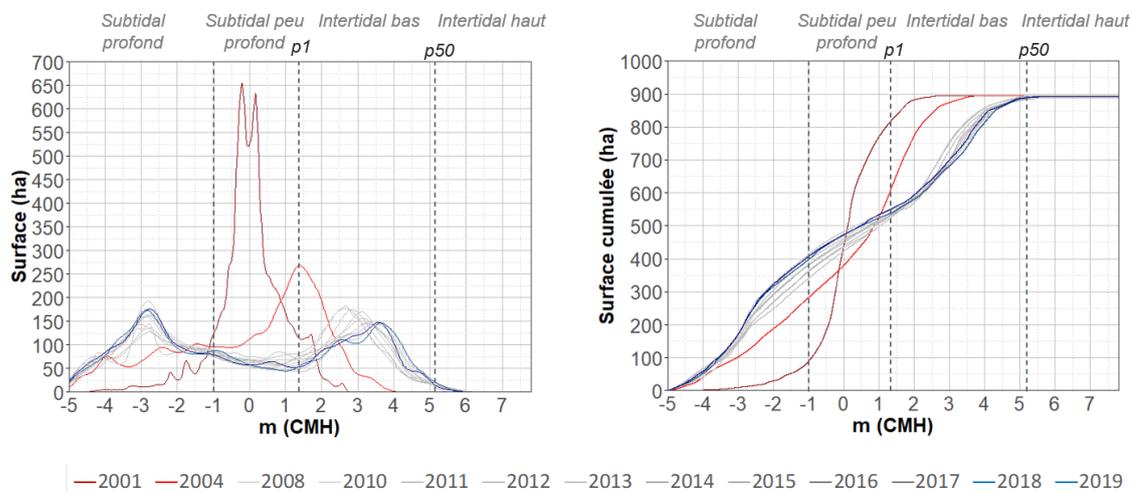
→ **Relative stabilité**

* évolution surfaces totales= recul végétation

Figure 17. Evolution des courbes hypsométriques entre 2001 et 2019 : Distribution (gauche) et distribution cumulée (droite) des profondeurs du secteur Grande Vasière

Au niveau du secteur dit Sud, entre la digue basse nord et le thalweg, les évolutions représentées en figure 18, sont importantes : ce secteur était essentiellement subtidal et centré autour de la cote 0 m CMH avant travaux. Après travaux, ce secteur présente une continuité de surface comprise entre -5 m CMH et environ 4 m CMH, correspondant à la cote d'arase de la digue submersible basse nord. Ainsi, sur ce secteur sud, un gain de 300 ha en subtidal profond et également en intertidal bas est observé au détriment du subtidal peu profond (-1 m à 1,4 m CMH) de -600 ha.

Secteur Sud

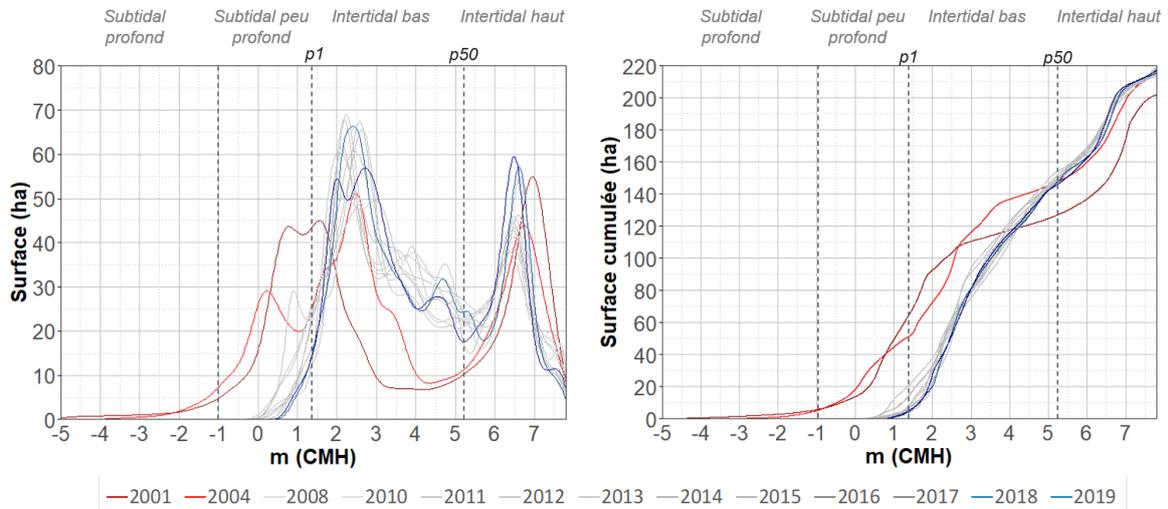
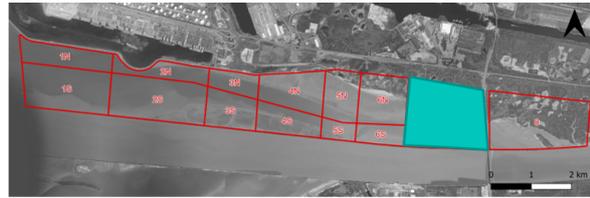


Gain en subtidal profond (<1m CMH) : O= +300ha
 Perte en subtidal peu profond : O=-600ha
 Gain en intertidal bas : O=+300ha
 Absence d'intertidal haut

Figure 18 : Evolution des courbes hypsométriques entre 2001 et 2019 : Distribution (gauche) et distribution cumulée (droite) des profondeurs du secteur dit Sud

Afin de compléter les évolutions mises en avant via les analyses de bathymétrie, la figure 19 illustre la perte des habitats subtidaux à l'aval immédiat du pont de Normandie. Sur ce secteur, une diminution du subtidal de 70 ha (soit $\cong 30\%$ de la surface du secteur) est observée entre 2001 et 2019. Seulement 5 ha de subtidal subsistent dans ce secteur de la fosse qui sert d'interface avec le chenal.

Aval du Pont de Normandie



Perte des habitats subtidaux : -70ha → reste 5ha
 Gain intertidal bas - O= + 60ha
 Stabilité intertidal haut (Abaissement de 60cm) → érosion épi

Figure 19. Evolution des courbes hypsométriques entre 2001 et 2019 : Distribution (gauche) et distribution cumulée (droite) des profondeurs du secteur situé à l'aval immédiat du pont de Normandie

Concernant le secteur amont du pont où la création du méandre artificiel en tant que mesure d'accompagnement a été créée, la figure 20 met en avant le gain de surface intertidal induit directement par les travaux dans ce secteur : +20ha mais aussi l'atterrissement complet des milieux situés sous la cote 3,5 m CMH. Ainsi, 85% de cette zone est maintenant constitué de milieux intertidaux haut (> 5.4 m CMH).



Méandre Artificiel

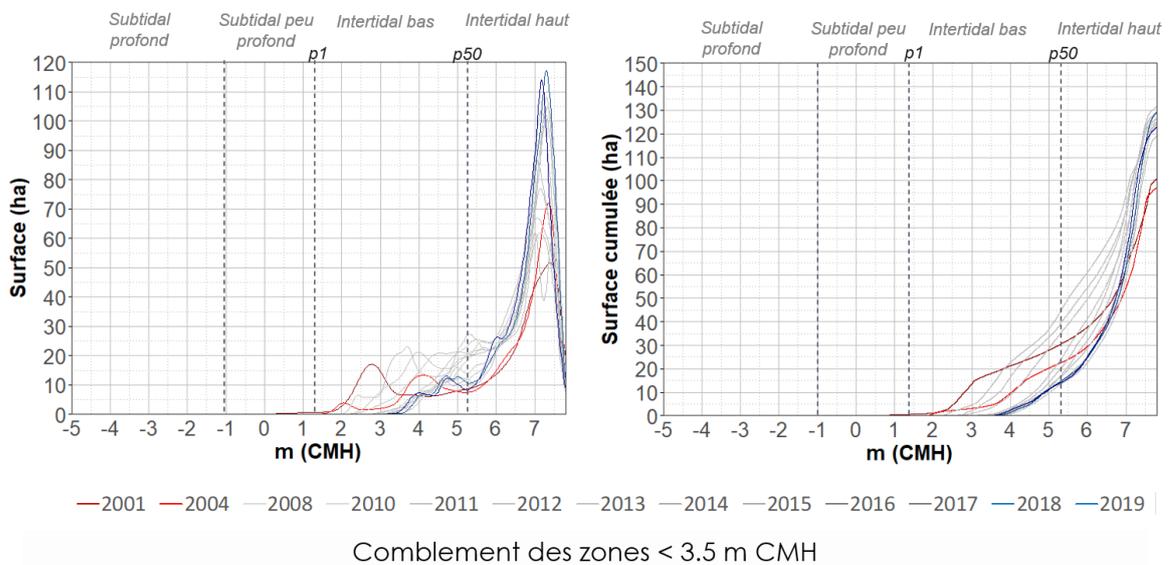


Figure 20. Evolution des courbes hypsométriques entre 2001 et 2019 : Distribution (gauche) et distribution cumulée (droite) des profondeurs du secteur situé à l'amont du pont de Normandie, dans le secteur du méandre artificiel

Les évolutions des profondeurs (hypsométrie) peuvent être résumées en 5 points :

- creusement de l'aval +200 ha de surface sous la cote -2 m CMH
- perte de subtidal peu profond (entre -1 et 1,5m CMH) : -700 ha
- développement du banc aval et du banc de la Passe le long de la digue basse nord : +300 ha secteur intertidal bas, plafonné par la cote d'arase de la digue basse nord (4 m CMH)
- stabilité de la grande vasière
- sédimentation au niveau du banc de la passe, secteur permettant la connexion au méandre artificiel et au chenal : gain en intertidal bas (60 ha) et perte du subtidal dans le secteur à l'aval immédiat du pont de Normandie (5 ha dans le compartiment 7 en 2019)

Évolution des volumes sédimentaires en place - "Cubatures"

Pour compléter l'approche, il est possible d'étudier les variations de volume sédimentaire en place à l'échelle de la fosse Nord actuelle (*i.e.* en excluant le secteur Port 2000). La figure 21 confirme les constats précédents : l'érosion généralisée de l'aval de la fosse nord ($\cong -9\text{M m}^3$ entre 2001 et 2019) et le comblement du secteur entre la brèche et le pont de Normandie ($\cong +2\text{M m}^3$ entre 2001 et 2019).

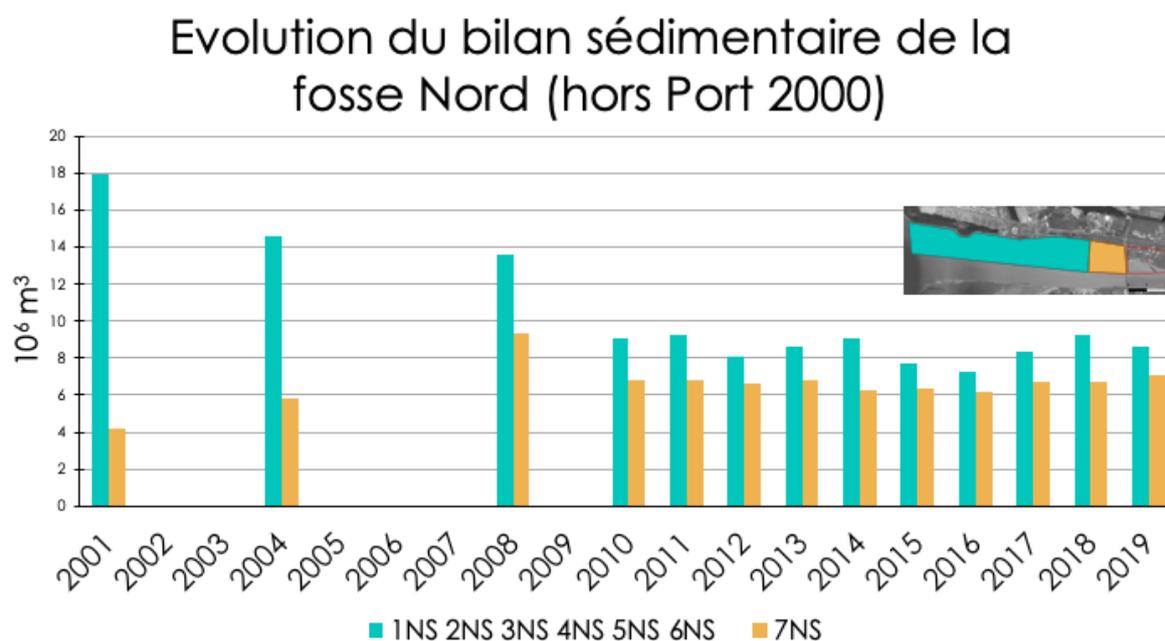


Figure 21. Evolution du bilan sédimentaire de la fosse Nord (hors Port 2000) sur la période 2001-2019

Les relevés bathy-topographiques montrent que cette tendance "érosion aval, sédimentation amont" n'est finalement observée que sur la période 2001-2008. Une érosion généralisée est observée entre 2008 et 2010. Alors qu'à partir de 2010, la morphologie semble se stabiliser : comparativement au début de la période les bilans sédimentaires n'évoluent plus significativement. Le différentiel bathymétrique de la figure 22.b., réalisé à partir des données de 2008 et 2010, met en avant que les secteurs d'érosions/dépôts sur cette période correspondent à ceux du différentiel 2019-2001 (figure 22.a). Ceci tend à montrer que les travaux ont vraisemblablement initié une nouvelle trajectoire d'évolution morphologique, que cette dernière ne s'est mise en place qu'après 2008, pour ensuite se stabiliser après 2010. Ce changement est potentiellement lié à la "fin de la période agitée" (*cf.* § Les forçages hydrodynamiques depuis la construction de Port 2000).

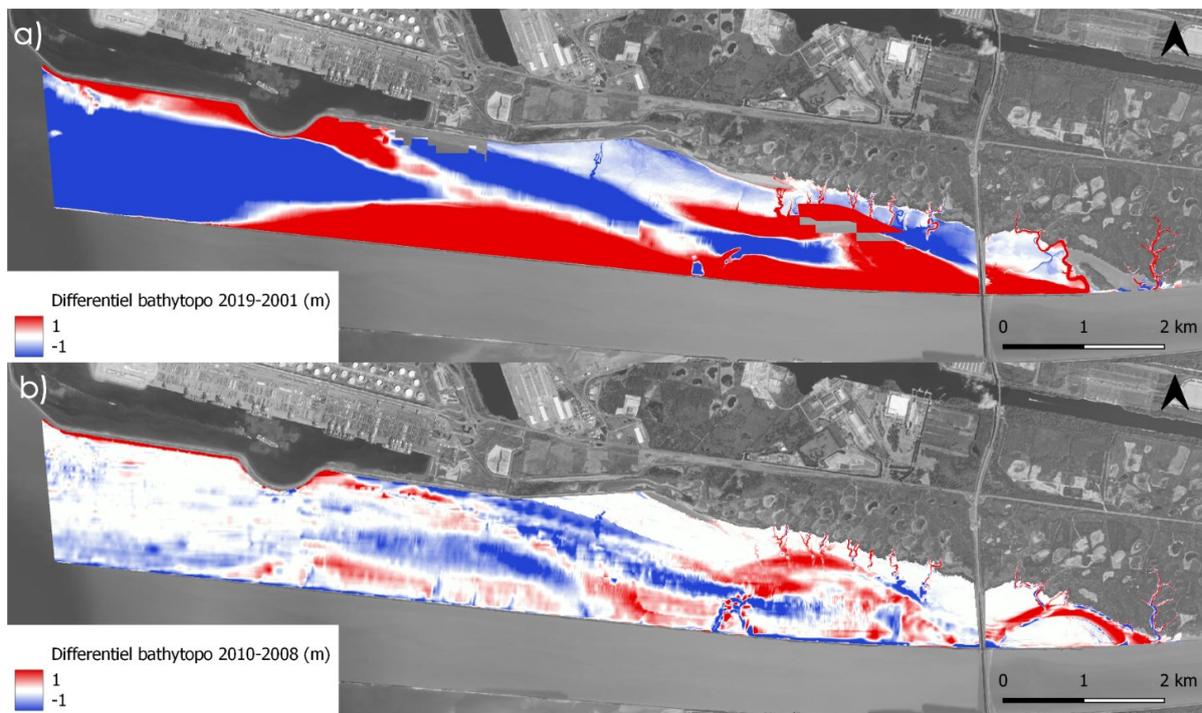


Figure 22. Différentiel bathy-topographique 2019-2001(a) et 2010-2008 (b) - Les zones en bleu présentent de l'érosion; celles en rouge du dépôt

L'analyse du bilan sédimentaire confirme les observations faites dans les paragraphes précédents :

- Erosion de l'aval de la fosse (aval de l'épi)
- Sédimentation à l'amont de l'épi

1.3.3 L'hydrodynamisme : la salinité

Comme indiqué précédemment, les 10 années qui ont suivi les travaux de Port 2000 peuvent être considérées comme des années durant lesquelles les forçages marins ont prédominé sur les forçages fluviaux. Cette relative prédominance des conditions marines s'explique en particulier par des apports fluviaux en eaux douces relativement faibles, qui tendent ainsi à augmenter la salinité moyenne observée sur le secteur. Par ailleurs, en 20 ans, le niveau moyen a augmenté avec le changement climatique, ce qui a aussi eu pour effet de favoriser la marinisation de la fosse Nord.

De plus, les aménagements (prolongation digue basse nord à l'aval et réhausse de la brèche entre l'épi et le pont de Normandie) et les réajustements morphologiques qu'ils ont induits (érosion de l'aval de la fosse et sédimentation à l'aval et à l'amont du pont de Normandie) **limitent les volumes d'eaux douces** pouvant transiter par la fosse nord. La diminution de l'influence fluviale dans ces secteurs engendre ainsi une **augmentation de la salinité à l'échelle de la fosse Nord**.

Les mesures de salinité du fond réalisées dans le cadre du suivi du suprabenthos (Dauvin et al., 2010; Pezy et al., 2017) montrent qu'à partir de la période des travaux (2002-2005) la fosse nord a été entièrement incluse dans la zone polyhaline (salinité > 18 psu), tandis qu'en 2001 les sites amont correspondaient à la zone mésohaline (salinité < 18 psu).

Ceci est en accord avec les résultats des modélisations réalisées dans le cadre du projet ARES qui montrent une augmentation de la salinité sur la période 2005-2015 comparativement à la période 1990-2000 (Fig 24).

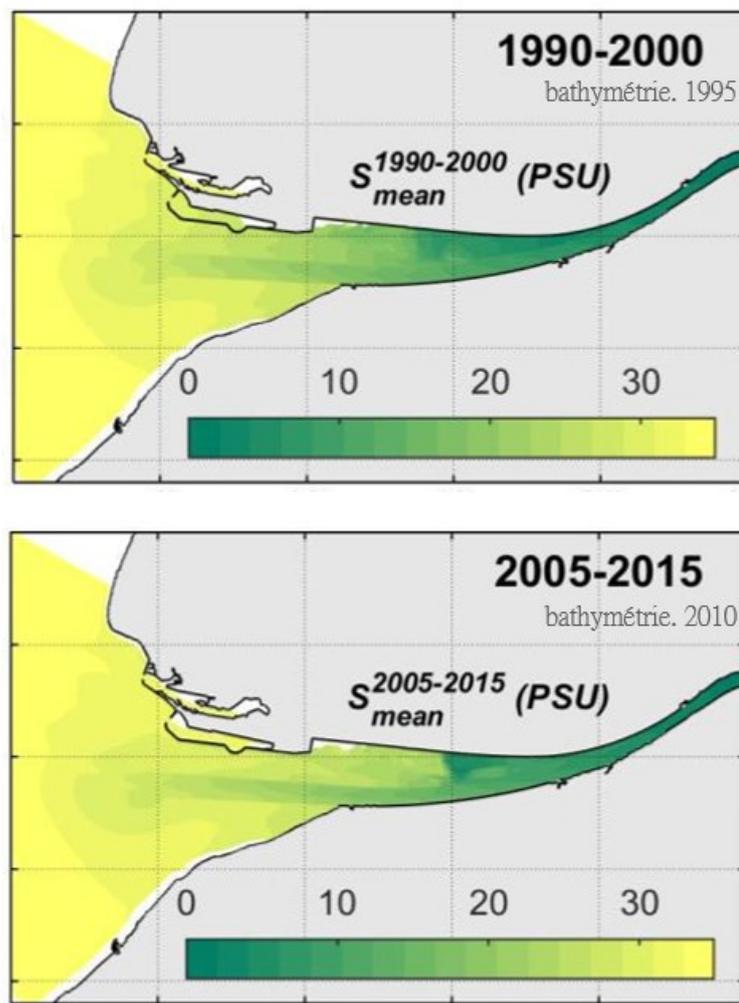


Figure 24. Salinité moyenne sur les décennies 1990-2000 (haut) et 2005-2015 (bas). La simulation 1990-2000 prend en compte la morphologie de l'estuaire en 1995, celle 2005-2015 : la morphologie 2010. Les forçages débits, marées, vents correspondent à la série temporelle réaliste des années considérées (cf. Grasso et al., 2021)

En raison de leurs incertitudes respectives, ces différentes observations peuvent être remises en question. Toutefois, leurs cohérences avec les observations faites par la Maison de l'Estuaire (Lecarpentier comm. pers.) sur l'évolution du positionnement des différentes variétés de roseaux confirment l'augmentation de la salinité sur le secteur.

Les données disponibles pour caractériser l'évolution de la salinité dans la fosse Nord entre 2000 et 2020 sont rares et difficilement comparables. Toutefois, l'ensemble des suivis et des observations indiquent une augmentation de la salinité dans le secteur.

Cette augmentation est cohérente avec les évolutions hydro-morphologiques soulignées précédemment.

Encart : La continuité latérale : les filandres

Les filandres jouent un rôle écologique fondamental dans la mesure où elles constituent les uniques voies qui permettent à la faune marine d'accéder aux ressources des marais salés (Duhamel and Carpentier, 2012). En raison de ce rôle essentiel, leurs fonctionnements complexes sont souvent au cœur des débats au sujet des évolutions de la fosse nord. Toutefois, leurs fonctionnements ne dépendent pas uniquement des dynamiques de la fosse mais également de la gestion des secteurs inondables avec lesquels ils sont le plus souvent artificiellement connectés. Ces dynamiques ne sont donc que partiellement dans le périmètre du projet CAPNORD.

Néanmoins, l'observation des orthophotos disponibles montre que sur la période étudiée (2000-2020), le nombre de filandres présentes sur le secteur d'étude est relativement stable, même s'il peut évoluer d'une année sur l'autre, notamment en raison des regroupements/scissions se produisant dans la partie aval de certaines filandres voisines. Ces dynamiques ont été observées dans le cadre du projet Seine-Aval 5 HYMOSED (Grasso and Verney, 2018). Par ailleurs, il est à noter que depuis 2006, l'accélération du comblement de la partie amont du Pont de Normandie, couplée à l'extension de bancs sableux à mégarides limitent le dynamisme de certaines filandres (Lesourd et al., 2012).

La grande crique, située à l'amont immédiat du pont de Normandie a largement évolué suite aux travaux. Avant les travaux, son débouché se faisait dans la brèche accidentelle située à l'amont du pont ; ensuite, ce dernier se faisait via le méandre artificiel ; enfin, suite au comblement de ce dernier, un chenal de ressuyage s'est mis en place sous le pont de Normandie. Il est intéressant de noter que ce chenal de ressuyage en jusant semble être très lié à la migration vers le nord du thalweg de la fosse Nord.

Il est à noter que récemment, les observations effectuées sur le terrain (Duhamel, obs.pers.) mentionnent une diminution de l'accessibilité des filandres surtout dans la partie amont du Pont de Normandie et de la Grande Crique.

Remarque : la base de données bathy-topographique n'est pas mobilisable dans ce cadre. En effet, à ces niveaux topographiques et dans ces milieux présentant une densité de végétation variable dans le temps et des épaisseurs de lames d'eau variables (selon les conditions hydrologiques et la gestion du marais), les données LIDAR des différents levés ne sont pas inter-comparables. Nous pouvons, entre autres, citer les problèmes de variabilité des résolutions planimétriques et verticales, de variation de la pénétration dans l'eau et dans la végétation, des ombrages différents selon les plans de vol. Ces hétérogénéités et incertitudes

associées rendent impossible la comparaison quantitative des évolutions interannuelles des filandres.

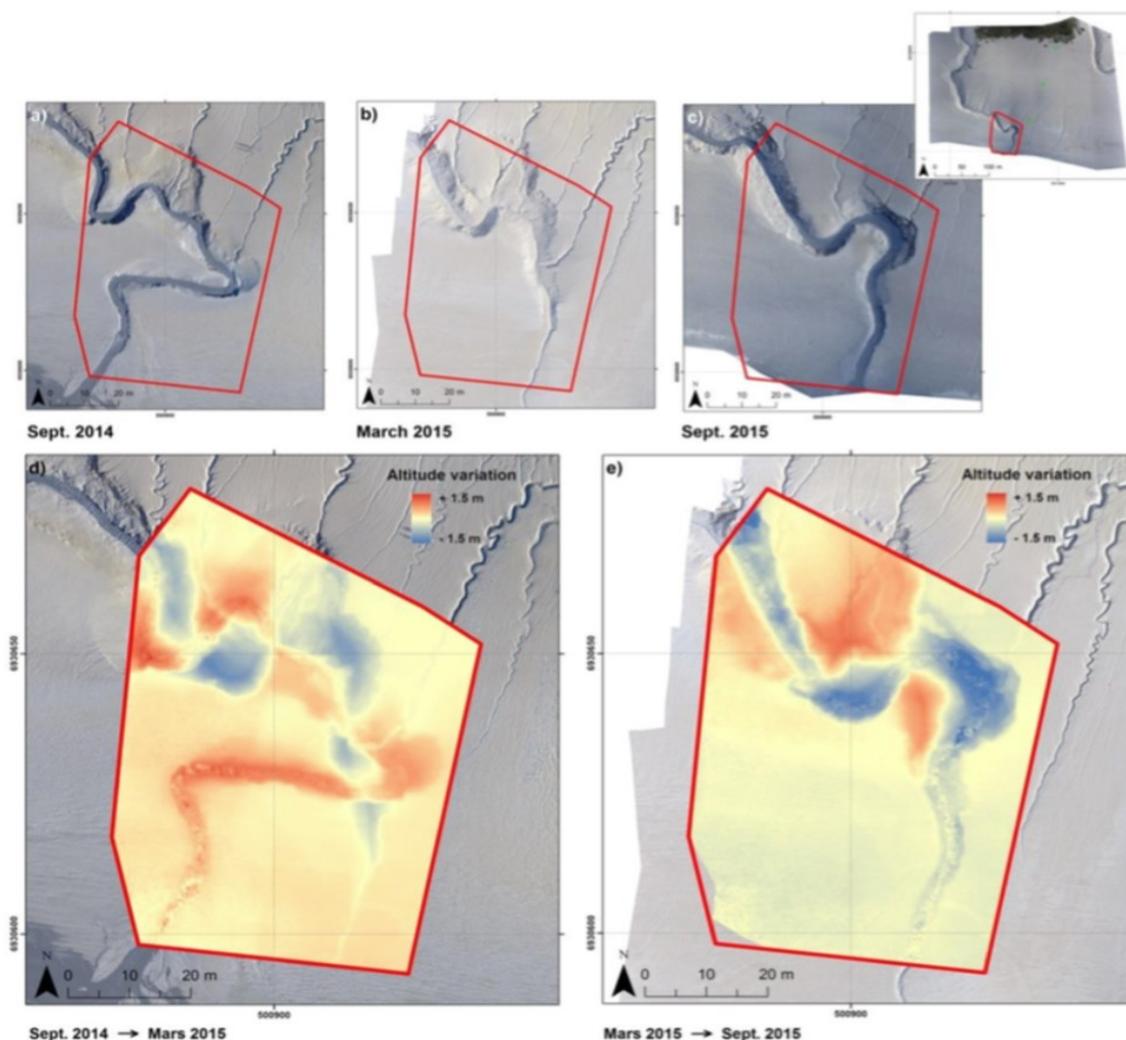


Figure E1. Illustration du dynamisme morphologique des débouchés de filandres (suivi HYMOSED, Grasso, 2017)

Il est donc évident que la fonctionnalité de ces milieux vis-à-vis de l'ichtyofaune s'intègre dans un éco-complexe hydro-morphologique plus vaste que le présent secteur d'étude et englobe les habitats adjacents. Le maintien de la connectivité transversale entre les habitats estuariens est donc déterminante pour le maintien de la fonctionnalité écologique dans les estuaires macrotidaux comme la Seine. Ceci pose la question du devenir de ces structures et donc des patrons de continuité latérale avec les marais salés dans le contexte évolutif du système décrit lors de cette étude. Plus généralement, les dynamiques physiques observées dans la partie plus amont de la fosse Nord pourraient conditionner l'avenir de l'ensemble du réseau de filandres et de la fonctionnalité des prés salés qui caractérisent cette partie de l'estuaire.

D'autre part, les données bathy-topographiques disponibles ne permettent pas l'analyse des relations causales entre l'évolution de la morphologie des filandres et les aménagements de Port 2000. En effet, les données LIDAR ne sont pas homogènes dans leur généalogie. Le

LIDAR pénètre de façon différente selon les caractéristiques du capteur et de l'eau (notamment selon la turbidité). Ceci pose de fortes incertitudes au niveau de l'altimétrie du fond de la filandre. A cela on ajoute aussi les différentes résolutions planimétriques des LIDAR depuis 2001 et les potentiels problèmes « d'ombrage » par rapport à l'angle d'incidence du rayon laser. La précision des données est hétérogène d'un jeu de données à l'autre, en particulier dans les zones concernées par les végétations denses, comme les roselières. Cette hétérogénéité ne permet pas de comparer de façon quantitative l'évolution interannuelle des systèmes de filandres.

I.4 Relations forçages, aménagements, évolutions Hydro-Morpho-Sédimentaire

Dans l'ensemble, les aménagements ont modifié l'hydrodynamisme de la fosse Nord :

- La connexion avec le chenal a été modifiée. A l'aval du pont, celle-ci a été réduite, notamment durant le flot, via le rehaussement de la DBN et de la brèche aval. Cette réduction de la connexion à l'aval du pont avait pour but de favoriser les écoulements ouest→est et en particulier de les diriger vers l'amont du pont : vers le méandre artificiel. A l'amont au contraire, la création de la brèche amont permet une connexion du méandre artificiel avec le chenal 85% du temps. Néanmoins, en raison de la mise en place des protections anti-affouillements (§ suivant), le gain de connexion en flot de la partie située à l'amont du pont de la fosse nord n'est pas suffisant pour contrebalancer les pertes induites par les aménagements à l'aval du pont.
- En accompagnement, des protections anti-affouillements ont été installées au niveau des piles du pont de Normandie. L'effet de ces protections (perte de charge) sur les courants a été sous-estimé (ARTELIA, 2015). Ces modifications limitent les échanges entre les secteurs de la fosse nord situés à l'amont et à l'aval du pont de Normandie et ont favorisé le comblement du méandre artificiel. La mise en place de ces protections et le comblement induit ont finalement contrebalancé l'augmentation de circulation souhaitée au moment des travaux. Ce comblement, qui n'accroît plus la connexion de l'extrémité amont de la fosse nord au fleuve pendant le jusant.
- De plus, les études de dimensionnement n'avaient pas anticipé que les travaux modifieraient le phasage des ondes de flot se propageant à travers la zone endiguée et à travers la fosse nord. Ainsi depuis les travaux, le flot de la zone endiguée arrive au niveau de la brèche amont avant le flot de la fosse nord et ceux-ci se rejoignent au milieu du méandre amont. Un constat similaire est observé au niveau de la brèche aval. Il en résulte des zones de faible hydrodynamisme propice à la sédimentation, tel qu'observé à l'aval immédiat et à l'amont du pont de Normandie au niveau du chenal environnemental (ARTELIA, 2012).

⇒ La combinaison de ces deux aménagements et l'évolution du méandre artificiel qui en a résulté ont réduit la connexion de la fosse Nord au chenal de navigation de part et d'autre du pont de Normandie.

- La connexion à l'aval et la potentielle intrusion des eaux douces et chargées en MES lors du flot a été réduite par la prolongation de la digue basse nord sur 750 m (O. le gradient de salinité et le bouchon vaseux s'étendent sur une dizaine de km).

- Les pré-dragages dont l'objectif était de compenser la perte de section induite par Port 2000 et une potentielle sédimentation associée à l'amont, ont favorisé la prépondérance des courants de flot sur ceux de jusant à l'aval de la fosse et ainsi en cohérence avec les observations de sédimentations sableuses observées par HAROPA Port de Rouen, à une augmentation du transport de sable vers l'amont.

⇒ **La combinaison de ces deux aménagements renforce l'influence marine (relativement à l'influence estuarienne) à l'aval de la fosse.**

Les évolutions HMS de la fosse Nord observées durant les 20 dernières années sont les résultantes des interactions entre le passé de l'estuaire (évolutions naturelles et aménagements historiques), les forçages hydrauliques observés durant ces 20 dernières années et les aménagements réalisés sur la période.

Dans l'ensemble, les forçages naturels et les aménagements ont favorisé l'expression des conditions marines dans la fosse Nord durant les 2 dernières décennies. Cette relative prépondérance des forçages marins a eu des répercussions sur le physiotope du secteur et son fonctionnement. Etant donné, i/ l'interdépendance entre les 3 compartiments HMS et ii/ les données disponibles, nous décrivons les évolutions de ce fonctionnement à travers :

1. Les évolutions morphologiques
2. Les évolutions de la couverture sédimentaire
3. Les évolutions de la salinité dans le secteur

Ces évolutions sont mises en relation avec les évolutions du fonctionnement écologique du secteur dans la seconde partie du rapport (cf. chapitre Évolution de la composante écologique).

II. ÉVOLUTION DE LA COMPOSANTE ÉCOLOGIQUE

L'évolution du fonctionnement écologique a été abordée à travers l'étude de trois groupes taxonomiques intégrateurs des changements locaux, à savoir le macrozoobenthos, le suprabenthos et l'ichtyofaune. De plus, ces groupes ont fait l'objet de suivis réguliers s'inscrivant parfaitement dans l'objectif de la présente étude.

II.1 Évolution des peuplements macrozoobenthiques

Depuis 2000, un suivi du macrozoobenthos intertidal de la Réserve Naturelle de l'Estuaire de la Seine est réalisé par la Cellule de Suivi du Littoral Normand en collaboration avec la Maison de l'Estuaire, gestionnaire de la réserve (Dancie, 2017). A ceci s'ajoute le suivi réalisé par HAROPA Port suite à l'aménagement de Port 2000 à partir de 2003. Ce suivi était assuré par la Cellule de Suivi du Littoral Normand jusqu'à 2014 (Chouquet, 2014) et puis par le bureau d'étude IDRA BIO & Littoral (Ziemski, 2022 - rapport pluriannuel en phase de validation).

Les suivis mis en place par HAROPA pendant la phase de construction de Port 2000 (Chouquet, 2014; Ziemski, 2022), montrent des densités relativement faibles dans le secteur de la fosse Nord de l'estuaire. A partir de 2014, une hausse des valeurs est appréciable dans le secteur amont de la fosse. Lors de la période entre 2017 et 2019, les valeurs s'affaiblissent à nouveau (Fig 25).

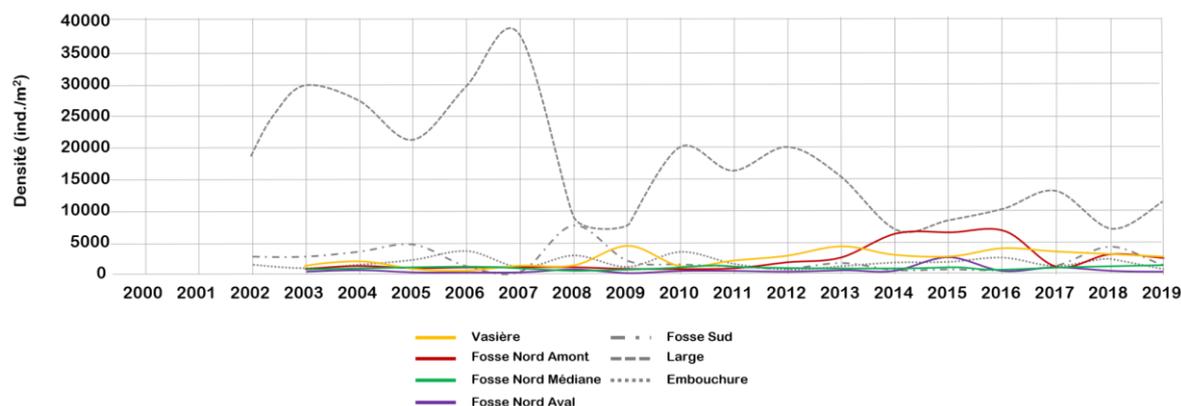


Figure 25. Évolution de la densité de macrozoobenthos observée entre 2002 et 2019 au sein du périmètre de suivis HAROPA suite à la construction de Port 2000 (IDRA Bio & Littoral, 2019)

L'évolution spatio-temporelle de la communauté macrozoobenthique intertidale entre 2000 et 2016 (Fig 26 et Fig 27) montre des variations de la structure et la répartition des biocénoses au cours de la période étudiée. Ces modifications sont intégratrices des changements du physiotope constatés dans le secteur d'étude. Notamment, une régression de l'aire de répartition des populations estuariennes, et plus précisément **une progression d'espèces marines** (*Kurtiella bidentata*, *Carcinus maenas*, *Mya arenaria*, *Phaxas pellucidus*) a été constatée en réponse à la **marinisation** du secteur d'étude.

De façon plus localisée, certains secteurs manifestent une importante et progressive **colonisation d'espèces typiquement sabulicoles**, notamment le Banc Aval et le Banc de la Passe. Lors de la première décennie des années 2000, ce secteur présentait des

biocénoses comparables à celles de la Grande Vasière et de la Grande Crique. A partir de 2009, la **progression de fonds sableux** vers l'épi a induit des shifts importants dans les assemblages faunistiques. Depuis, la pénétration d'espèces inféodées aux milieux sableux (*Bathyporeia pilosa* et *Bathyporeia sarsi*, *Haustorius arenarius*) a été observée dans ces secteurs (Chouquet, 2014; Dancie, 2017), ainsi qu'une **baisse de la diversité spécifique** induite par la disparition d'espèces telles que *Pholoe baltica*, *Eteone longa*, *Peringia ulvae*.

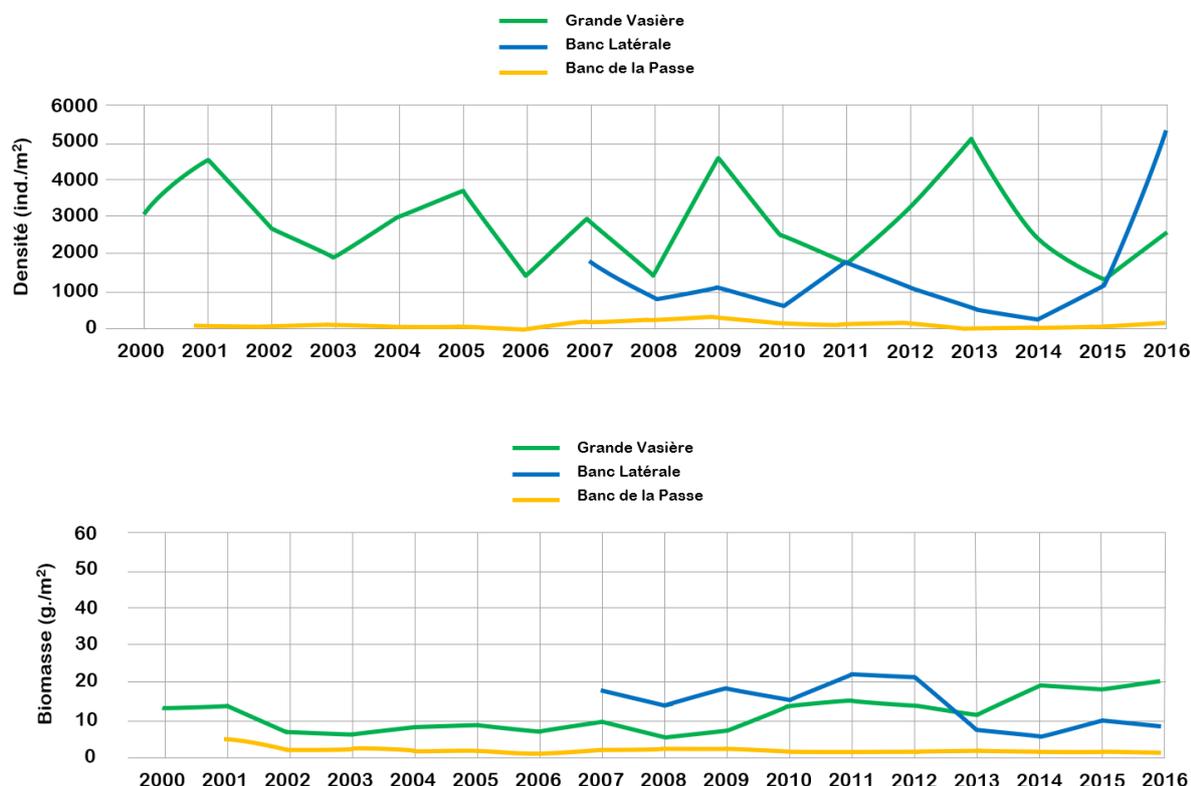


Figure 26. Evolution temporelle de la densité (en haut) et de la biomasse (en bas) de macrozoobenthos dans le secteur d'étude (Dancie, 2017)

Depuis 2014, les biomasses dans le secteur de la Grande Vasière, ont subi une augmentation importante, principalement due à l'augmentation des individus des populations de *Hediste diversicolor* et de *Scrobicularia plana*, surtout au niveau des zones de topographie moyenne de la slikke. La prolifération de ces espèces s'explique par des événements de recrutement importants. Toutefois, ces événements, dont découle en partie l'augmentation de biomasse observée, sont très localisés et cantonnés aux stations présentant une certaine stabilité morpho-sédimentaire sur la période (notamment de teneur en vase supérieure à 30 %). Les densités de *Hediste diversicolor* avaient subi une forte régression à partir de 2002 consécutivement aux travaux de Port 2000, témoignant de la sensibilité de la communauté vis-à-vis des changements abrupts du physiotope. Les très faibles niveaux d'abondance observés entre 2000 et 2004 pourraient être liés aux perturbations induites par les travaux de Port 2000, malgré des paramètres de la colonne d'eau favorables au macrobenthos, avec un débit relativement fort et des niveaux de chlorophylle a élevés (Souissi et al., 2021).



Figure 27. Evolution de la densité de macrozoobenthos dans les différentes stations du suivi du macrobenthos localisées dans le secteur d'étude (Dancie, 2017)

Ceci explique en partie le fait que les biocénoses plus denses sont cantonnées sur la Grande Vasière et la Grande Crique avec une moyenne de 2806 ind./m² (ES =± 2928). Au contraire, les fonds sableux, à mégarides, en bas de slikke et au niveau du Banc Latéral abritent des populations très éparées, les densités moyennes à la station étant inférieures à 436 ind./m². Pendant la période entre 2007 et 2012, **une diminution des biomasses a été constatée dans le secteur du Banc Aval, attribuable à la diminution des mollusques (*Limecola balthica*)**, suivie d'une hausse progressive de la proportion de *Corophium volutator* au sein de la communauté (Chouquet, 2014; Dancie, 2017). Une augmentation des abondances de *Corophium volutator* a aussi été observée au niveau du Banc de la Passe. **Les peuplements oligospécifiques des habitats devenus sableux ne présentent que peu d'intérêt trophique, étant donné les faibles valeurs de biomasse et densité des communautés qui les caractérisent.** Le développement localisé des populations de *Corophium volutator*, *Scrobicularia plana* et *Hediste diversicolor* a permis de compenser partiellement cette dégradation des ressources trophiques.

Les variations dans la structure des populations en termes de densités et biomasses de l'assemblage macrozoobenthique, et notamment des espèces caractéristiques et dominantes du secteur, entre 2000 et 2016 sont intégratrices des patrons d'évolution HMS.

Ces évolutions du physiotope se traduisent sur le plan biologique par :

i) un déclin des populations de *Limecola balthica*

ii) une augmentation depuis 2014, localisée sur la moyenne slikke, des populations d'annélides *Hediste diversicolor* et des populations de scrobiculaires qui compensent, en partie, la diminution des densités et biomasses globales

iii) la pénétration d'espèces marines, à corrélérer avec la dominance des forçages marins sur le secteur, observée depuis 2000 (conséquence des effets cumulés des aménagements et des conditions hydrologiques)

iv) une progressive colonisation d'espèces sabulicoles dans le secteur du Banc de la Passe et du Banc Aval à mettre en lien avec la progression des faciès sableux sur le secteur

II.2 Évolution des peuplements suprabenthiques

Le suprabenthos représente l'ensemble des animaux de petite taille (crustacés notamment) vivant à proximité du fond (de 0 à 1 m du fond) et disposant de capacités natatoires suffisantes pour se déplacer dans la couche d'eau adjacente au fond. Ce groupe a un rôle primordial dans les flux trophiques entre le benthos et le pelagos. Il constitue un compartiment écologique important des réseaux trophiques sur les zones de nurserie de poissons comme l'estuaire de la Seine (Mouny et al., 2000).

La distribution et la structure des communautés suprabenthiques estuariennes est dépendante du gradient de salinité et de la turbidité. Dans la partie aval de l'estuaire de la Seine, deux principaux assemblages ont été identifiés : un au niveau de l'embouchure de l'estuaire, caractérisée par des espèces à affinité plus marine, telles que *Mesopodopsis slabberi* et *Crangon crangon*, et un autre dans la partie chenalisée de l'estuaire caractérisée par des espèces estuariennes, telles que *Neomysis integer* et *Palaemon longirostris* (Dauvin et al., 2010, 2006; Dauvin and Pezy, 2013; Mouny et al., 2000) (Fig. 28). En termes d'abondances, les communautés estuariennes sont dominées par les mysidacés (ex. *Mesopodopsis slabberi*, *Neomysis integer*).

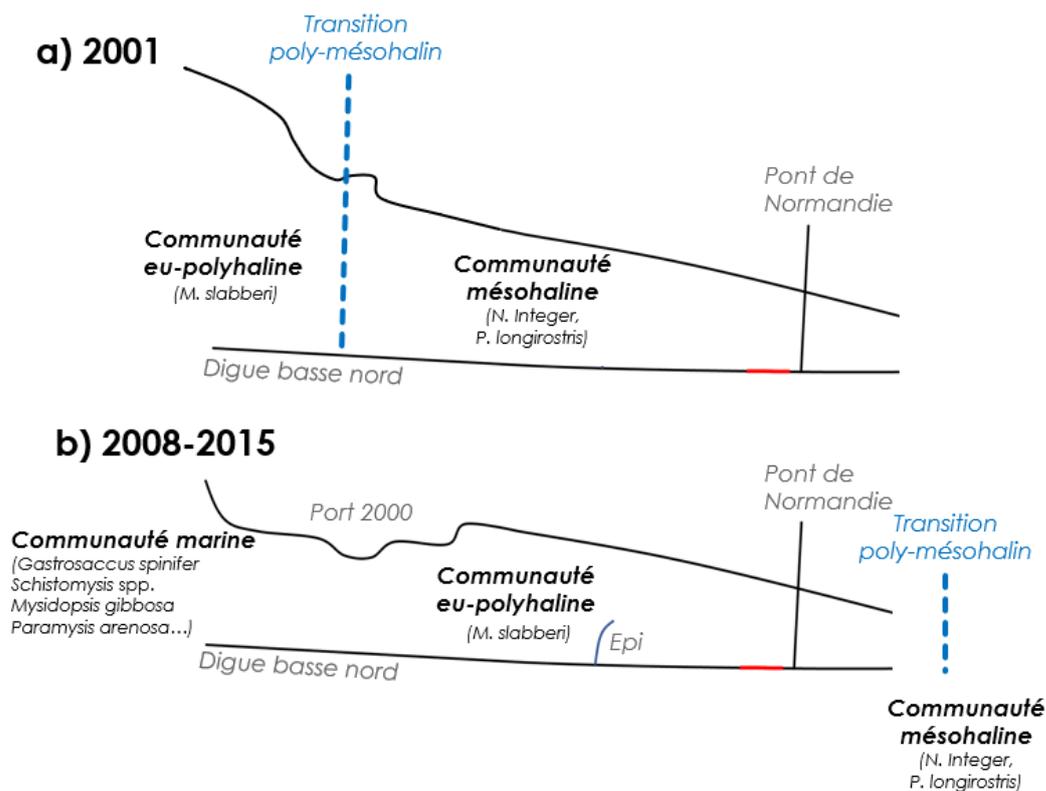


Figure 28. Schématisation de la répartition spatiale des principales communautés suprabenthiques au sein du secteur de la fosse Nord avant (2001, en haut) et après les travaux (2008-2015, en bas) de Port 2000. La ligne hachée représente la limite entre les domaines polyhalin et mésohalin

Avant les années 2000, dans le secteur aval de la fosse Nord, la communauté suprabenthique était composée par des espèces eu/polyhalines (ex. *Mesopodopsis slabberi*, *Gastrosaccus spinifer* et *Schistomysis* spp.) tandis que le secteur amont de la fosse Nord, correspondait au domaine de répartition de la communauté suprabenthique méso-oligohaline (ex. *Neomysis integer* et *Palaemon longirostris*) (Dauvin et al., 2010).

A partir des années suivant les travaux de Port 2000, **la communauté typique du secteur eu/polyhalin, a commencé à pénétrer vers l'amont du secteur de la Fosse Nord.** L'observation croissante d'espèces marines telles que *Acanthomysis longirostris*, *Mysidopsis gibbosa*, *Paramysis arenosa*, *Siriella jaltensis*, *Diastylis* spp., *Schistomysis* spp. révèle un shift des habitats marins vers les parties plus amont du secteur d'étude. Ceci induit un changement faunistique dans la Fosse Nord avec une raréfaction d'espèces estuariennes, voire une remontée vers la partie canalisée du fleuve des espèces comme par exemple *Palaemon longirostris* (Pezy and Dauvin, 2018), désormais presque absentes du secteur d'étude. La présence des espèces marines était sporadique avant les travaux associés à la construction de Port 2000. La progression vers l'amont de la communauté suprabenthique marine/polyhaline, s'accompagne d'une augmentation de la richesse spécifique constatée en 2004-2005 au **niveau du secteur de la Fosse Nord** (Figure 29). Puis **une forte diminution des abondances** a été observée pendant les années suivant les travaux de Port 2000, surtout à partir des années 2011-2012, caractérisées par des faibles valeurs d'abondance (<1000 ind.100m³). Cette tendance est principalement due à la **diminution importante des mysidacés, notamment de *Mesopodopsis slabberi***. (Dauvin et al., 2010; Pezy et al., 2017).

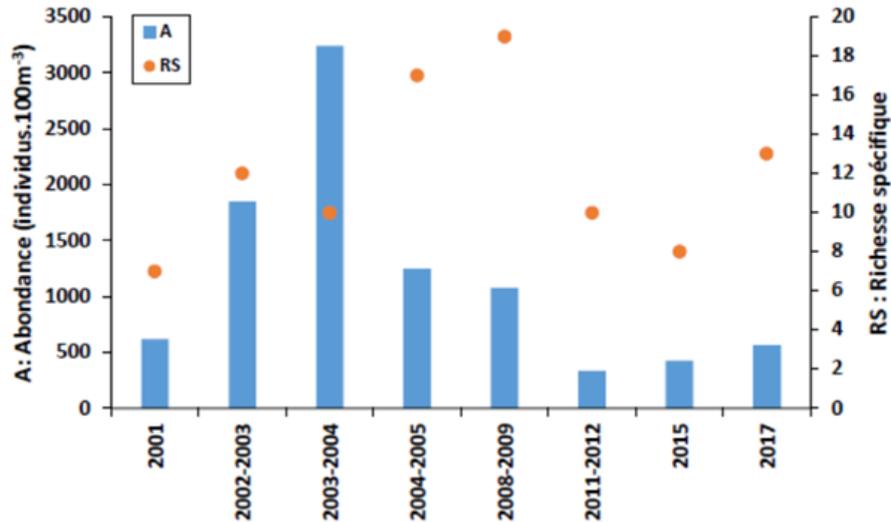


Figure 29. Evolution des richesses taxonomiques et des abondances du suprabenthos de 2001 à 2017 au niveau des stations de la Fosse Nord (Pezy and Dauvin, 2018) (Dauvin & Pezy, rapport CAPES 2021)

Un des effets de ce changement concerne aussi **la remontée de la communauté suprabenthique mésohaline, dominée par *Neomysis integer***. Les prélèvements effectués dans le cadre du projet CAPES en 2017 montrent que la zone mésohaline présente les diversités et abondances les plus importantes, soulignant ainsi l'intérêt de la zone mésohaline pour le suprabenthos. Or, le domaine mésohalin se situe actuellement dans le secteur endigué (à partir du pk 349), et les surfaces disponibles sont fortement limitées par l'actuelle configuration du fleuve.

Pour résumer, les changements à long terme de la communauté suprabenthique dans le secteur d'étude se caractérisent par :

- i) un *shift* dans la structure spécifique des communautés (communautés devenues à caractère strictement eu-polyhalin)
- ii) une importante diminution de la biomasse (notamment mysidacé dominant *M. slabberi*)

II.3 Évolution des peuplements ichthyologiques

Le secteur de la fosse Nord, en raison de sa productivité, joue un rôle prépondérant vis-à-vis de la fonction de nourricerie de l'estuaire de la Seine pour de nombreuses espèces de poissons (Brind'Amour et al., 2021; Duhamel and Feunteun, 2012; Muntoni, 2019). Depuis 2000, dans le cadre de l'évaluation des impacts de Port 2000, un suivi des poissons sur l'ensemble de l'embouchure de l'estuaire est réalisé par la CSLN pour le compte d'HAROPA Port du Havre.

Concernant le secteur d'étude fosse Nord, les données indiquent une diminution importante de l'abondance de la communauté piscicole depuis 2004 en comparaison avec les valeurs observées au début des années 2000 (Fig 30). En effet, **pendant la période comprise entre 2000 et 2003, la valeur d'abondance moyenne s'approchait, voire dépassait, les 2000 ind/ha, tandis qu'à partir de 2004, cette valeur a rarement atteint le seuil des 1000 ind/ha.** Depuis 2004, les valeurs de CPUE (Catch Per Unit Effort, exprimé en nombre d'individus par hectare) sont relativement stables. L'année 2016 semble amorcer une nouvelle augmentation des CPUE moyennes, qui n'apparaît toutefois pas sur les valeurs maximales (Balay and Duhamel, 2017). Il est important de rappeler qu'à cette **diminution des abondances par unité de surface s'ajoute la perte nette d'habitats** induite par la construction du Port 2000 (434 ha). Ceci a mené à une **diminution importante de la capacité d'accueil** du secteur et **donc à une diminution des effectifs "absolus" dans le secteur.**

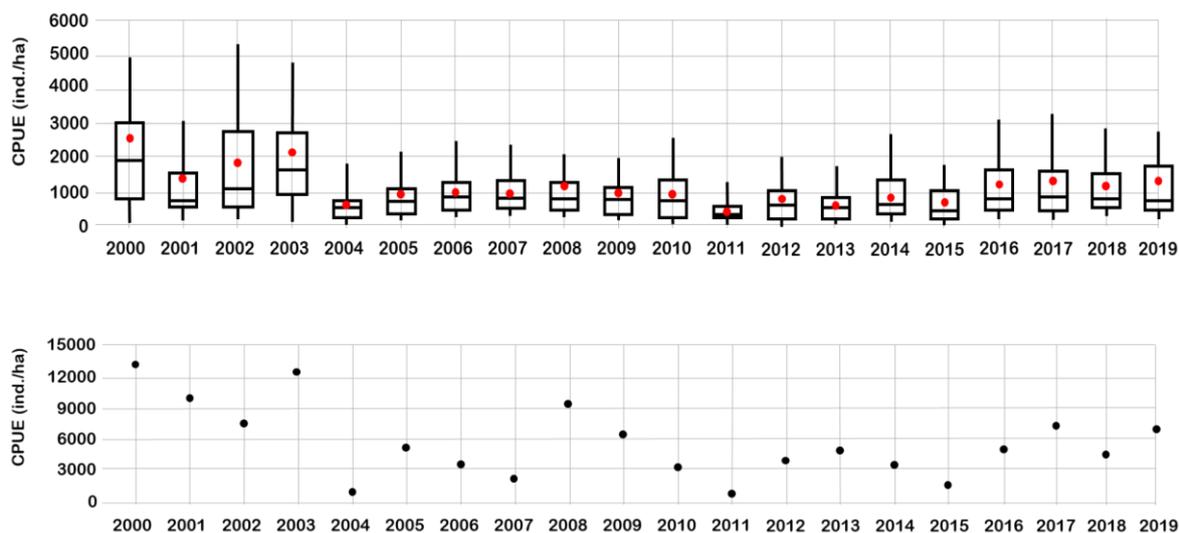


Figure 30. Évolution des CPUE (ind/ha) dans le secteur de la fosse Nord observée lors du suivi Port 2000 (en haut) pour la période 2000-2019. Les points rouges représentent la moyenne. En bas, évolution temporelle des valeurs de captures maximales (Balay and Duhamel, 2017, Duhamel, non publié)

L'évolution temporelle des abondances dans le secteur de la fosse Nord, et notamment leur tendance à la diminution, **apparaît plus marquée comparée avec l'évolution des effectifs à l'échelle de toute l'embouchure de l'estuaire** (périmètre de suivis Port 2000, Fig. 31). En effet, les suivis globaux montrent une diminution nette en 2004, suivie d'une reprise entre 2005 et 2009, avant de se stabiliser sur des valeurs deux fois plus faibles qu'au

début du suivi (Duhamel and Balay, 2020). La diminution des effectifs à l'échelle de la fosse Nord semblerait contribuer fortement à la baisse des effectifs totaux de l'embouchure. De plus, **la diminution des effectifs concerne davantage les juvéniles et les espèces de petite taille.**

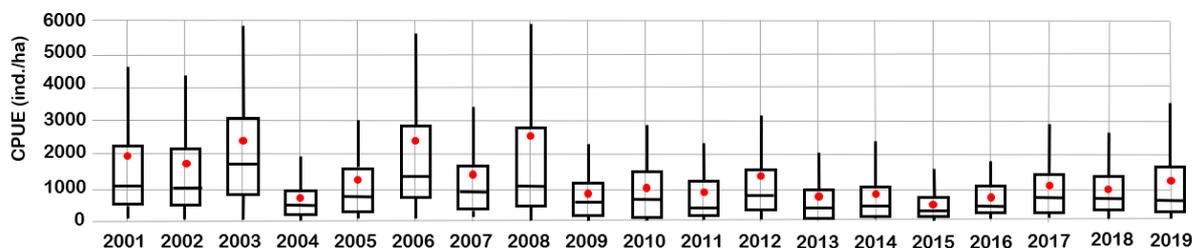


Figure 31. Évolution des CPUE (ind/ha) observées entre 2001 et 2019 dans l'estuaire de la Seine (Duhamel and Balay, 2020)

Des changements sur les assemblages de poissons ont été observés en lien avec les modifications HMS du secteur et la diminution des surfaces d'habitat aux teneurs en vase élevées (> 30%). **L'augmentation des teneurs en sable constatée** dans différentes portions du secteur d'étude s'est avérée **défavorable pour la sole** (sables propres peu attractifs pour cette espèce). A l'inverse, cette condition favorise la **progression, surtout à partir de 2010, des espèces affines aux substrats sableux telles que le lançon équille (*Ammodytes tobianus*) mais surtout la petite vive (*Echiichthys vipera*).** **Une baisse significative de la contribution de la fosse Nord aux CPUE numériques annuelles de l'anguille, de l'éperlan et du syngnathe de Duméril, espèces estuariennes et amphihalines a également été constatée.**

De plus, les habitats de nurserie semblent subir au fil des années une sorte de **“désestuvarisation”**. Le barycentre optimal/idéal des nurseries typiquement estuariennes, se situe au niveau des secteurs polyhalin et mésohalin. Cette configuration est encore observable dans les autres grands estuaires français, comme dans la Loire ou la Gironde (Fig 32), pour lesquels les nurseries d'espèces telles que la sole ou encore le bar, se situent dans la partie intérieure de l'estuaire (Le Goff et al., 2022).

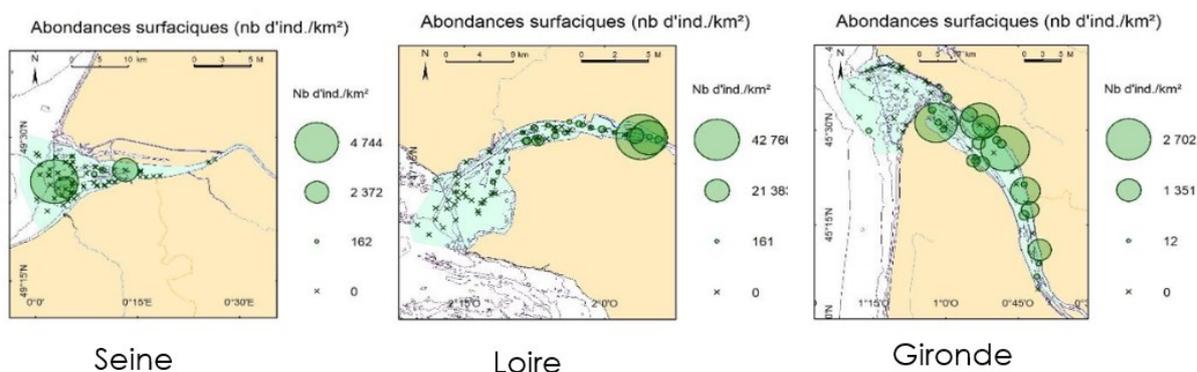


Figure 32. Répartition des abondances des juvéniles G0 de sole (*Solea solea*) dans la Seine, la Loire et la Gironde entre 2013 et 2021 (Le Goff et al., 2022)

L'augmentation de la salinité (marinisation) semblerait favoriser la remontée des zones de nourricerie vers les zones plus internes des estuaires (Pasquaud et al., 2012). En Seine, ce shift d'habitats apparaît peu probable, voire impossible, de par la morphologie actuelle de l'estuaire. En effet, le secteur mésohalin fait actuellement partie de la partie endiguée de l'estuaire, où la présence de zones latérales propices à l'accueil des juvéniles est limitée. Sous l'effet de la marinisation, la structure spatiale des habitats de nourricerie de l'estuaire de la Seine **est semblable à celle des nourriceries marines du type « baie »**, typiques d'un estuaire aménagé (Duhamel and Feunteun, 2012; Muntoni, 2019). Ainsi, les nourriceries se trouvent dans une condition de **“nursery squeeze”**, prises en tenaille entre une croissante marinisation du secteur et l'impossibilité de remonter vers les parties plus internes de l'estuaire. De plus, cette situation pourrait être exacerbée par les effets du changement climatique avec notamment, une plus forte influence marine induite par la montée du niveau marin accompagnée d'une baisse des débits. Les habitats de nourricerie présents dans le secteur d'étude, subissant cette désestuvarisation, montrent, surtout à partir de 2010, **un appauvrissement de l'assemblage de poissons typiquement estuariens** (Balay and Duhamel, 2017).

La diminution des fréquences d'occurrence de certaines espèces benthiques comme la sole traduit une baisse d'attractivité de la structure des habitats vis-à-vis des premiers stades de vie des espèces marines et questionne sur **l'avenir des nourriceries de ce secteur** (Balay and Duhamel, 2017; Duhamel and Balay, 2020).

L'évolution morphologique subie par le secteur et de sa récente stabilité semble indiquer, que **le niveau de connectivité entre les zones de refuge à marée basse et les zones d'alimentation** serait un facteur limitant pour l'accueil de ces jeunes individus. Dans les estuaires, le domaine vital des espèces est généralement limité à quelques centaines de mètres en raison de leur fidélité élevée à un site (Green et al., 2012). Ainsi, une bonne connectivité entre zones subtidales et intertidales permet aux poissons de disposer de refuges submergés pendant les marées basses à proximité des aires d'alimentation (Le Pichon and Alp, 2018). Les poissons plats se nourrissent localement sur des proies disponibles principalement dans l'habitat dans lequel ils sont capturés, suggérant un comportement alimentaire optimisant les dépenses énergétiques pour se déplacer. En effet, les traceurs trophiques ont montré l'importance des vasières intertidales, en particulier pour le bar et la sole commune, avec des contributions atteignant respectivement la moitié et les deux tiers de leur alimentation (Brind'Amour et al., 2021). Ainsi, l'organisation spatiale des zones intertidales est donc un élément important à considérer pour préserver l'accessibilité des aires d'alimentation. D'autant plus que la partie subtidale de la fosse Nord est moins productive que ses vasières (Mouny et al., 2000; Saulnier et al., 2020). De plus, l'interface entre zones intertidales et subtidales constitue un élément essentiel de la structure des habitats de nourricerie car les chenaux de marée secondaires inondés en permanence servent de couloir d'accès et de refuge pendant la marée descendante pour de nombreux poissons (Teichert et al., 2018). Or, l'étude des évolutions morphologiques du secteur d'étude fait ressortir **plusieurs éléments susceptibles d'affaiblir la connectivité à l'échelle de ce secteur**, à savoir i) l'approfondissement de la fosse Nord et ii) la migration vers l'aval et la réhausse des habitats intertidaux constatée dans la portion plus amont du secteur d'étude.

Au delà de la continuité entre les habitats de refuge et d'alimentation au sein de la fosse Nord, la compartimentation du secteur induite par la structure morphologique des digues (cf. profils),

exprime une **rupture de la continuité transversale entre le chenal et le secteur d'étude**. En effet, ces structures représentent un obstacle difficilement franchissable, surtout pour les poissons plats, qui ne possèdent pas de traits fonctionnels leur permettant de se déplacer dans le domaine necto-pélagique. Ainsi, la rupture de la continuité transversale entre le chenal principal de l'estuaire et les zones d'alimentation situées en frange intertidale dans le secteur de la fosse Nord constitue un facteur limitant la pénétration des individus dans le secteur d'étude qui se cantonne à l'embouchure de la Fosse Nord.

L'évolution du secteur induite par les effets cumulés des drivers naturels et anthropiques se traduit par :

i) une diminution des abondances de poissons depuis 2004 (abondances totales numériques et pondérales)

ii) une potentielle déconnexion entre les habitats de refuge et d'alimentation (fragmentation) et entre les habitats du chenal principal et le secteur de la fosse Nord

iii) un appauvrissement de l'assemblage typique estuarien en faveur d'un assemblage marin (marinisation)

iv) la progression d'espèces inféodées aux substrats sableux

v) un phénomène de "nursery squeeze". L'augmentation de l'influence marine, combinée à l'absence à l'amont d'habitat pouvant se substituer aux habitats mésohalin perdus, provoque la diminution et la compression de l'habitat de nurserie.

Encart : Effets potentiels sur le réseau trophique

La productivité des habitats estuariens représente un facteur essentiel qui détermine la capacité d'accueil et leur attractivité fonctionnelle. Tout changement de biomasse et/ou de production benthique estuarienne est susceptible d'avoir un impact sur les réseaux trophiques. Les vasières de la fosse Nord, de par leur productivité, contribuent davantage au réseau trophique des nourriceries que les autres milieux de la portion aval de l'estuaire.

Or, la capacité d'accueil des nourriceries estuariennes, notamment liée à la disponibilité de proie semble être régulièrement atteinte (Brind'Amour et al., 2018). Les estimations faites dans le cadre du projet CAPES (Brind'Amour et al., 2021) suggèrent une limitation trophique saisonnière (notamment à l'automne), en particulier sur les vasières intertidales. L'atteinte régulière de la capacité d'accueil et donc la saturation d'occupation du milieu, pourrait induire une compétition pour l'espace qui se traduit en une surmortalité «densité-dépendante».

La richesse spécifique des communautés estuariennes impliquées dans le soutien des réseaux trophiques est faible. Ainsi, une diminution des abondances d'une des espèces prédominantes est susceptible d'avoir des répercussions en cascade sur le réseau trophique, en limitant la capacité d'accueil du système estuarien, notamment pour les nourriceries (Pasquaud et al., 2010). La forte diminution de la biomasse suprabenthique et macrozoobenthique dans les secteurs les plus productifs, comme il l'a par exemple été constaté pour *M. slabberi* ou *L. baltica*, pourrait donc avoir des conséquences sur la capacité d'accueil de l'estuaire de la Seine et son rôle de nourricerie. D'autant plus si l'on considère que certains secteurs, comme la portion subtidale de la fosse Nord, présentent de très faibles niveaux d'abondance (Pezy et al., 2017). **Ces tendances posent la question du devenir de la capacité d'accueil de l'estuaire, et notamment de ses nourriceries.** Cette perte de qualité qui s'accroît depuis les années 1960, souligne l'urgence de préserver, voire augmenter les surfaces permettant l'installation des communautés typiques de ces habitats (Brind'Amour et al., 2021).

D'autre part, la structure des nouveaux habitats intertidaux créés au niveau de la digue basse nord, notamment le banc aval et le banc de la passe, interroge sur l'intérêt écologique de ces habitats. En effet, d'un point de vue physique, ces habitats présentent des conditions hydrodynamiques très contraignantes (vitesses de courant élevées, temps de submersion important et faible taux d'envasement), qui sembleraient être peu propices à l'expression d'une forte productivité. A la différence des vasières situées au sein d'une mosaïque latérale "complète" et allant jusqu'au schorre. Par ailleurs, ces bancs ne profitent pas des apports en matière organique et nutriments terrigènes.

Encart : Le reposoir sur dune

Le reposoir sur dune fait partie des mesures compensatoires mises en œuvre par HAROPA Port du Havre dans le cadre de l'aménagement de Port 2000. Les travaux ont été achevés en février 2002. L'objectif de cette mesure est d'assurer la fonction de repos et de zone de reproduction pour certaines espèces d'oiseaux (limicoles, anatidés, sternidés, laridés etc...), ayant besoin, à marée haute, de zones de repos notamment pendant que les vasières sont recouvertes par la marée. Le reposoir sur dune est un espace de 40 ha, constitué de 2 bassins dont l'un à niveau d'eau stable et l'autre soumis à marnage, de zones à sec (îlots), parsemées d'une végétation arbustive, de roselières et d'herbacées.

La nécessité de recréer des zones de repos suite à la perte de l'ancien reposoir de la CIM, a été démontrée par les suivis ornithologiques menés dans le territoire de la RNNES (Fig E2). En effet, l'évolution des limicoles hivernants, objectif prioritaire du reposoir, montre un diminution nette pendant la période des travaux.

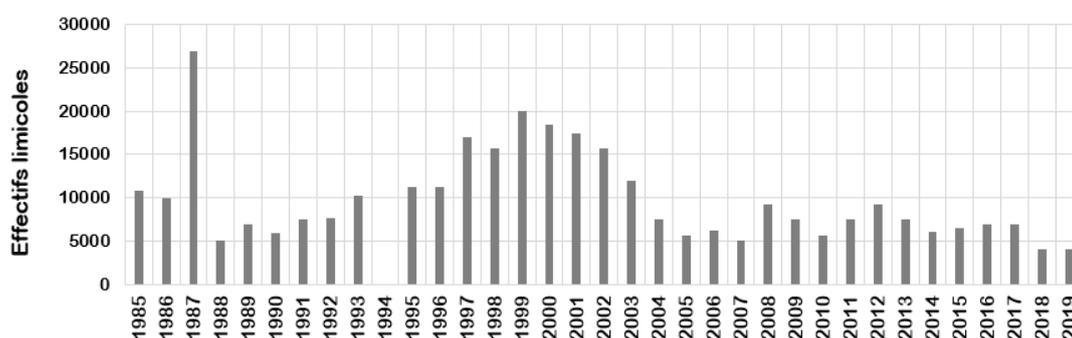


Figure E2. Effectifs de limicoles hivernants sur le périmètre de la Réserve Naturelle Nationale de l'estuaire de la Seine

Depuis 2018, un autre point d'inflexion des effectifs apparaît. En effet, pendant cette période, lors de tempêtes hivernales, des brèches se sont créées dans le cordon dunaire protégeant le reposoir. En 2019, une brèche de 160 m de long s'est formée dans la dune située entre le secteur du reposoir et la fosse Nord, lors des fortes marées du 28 septembre au 2 octobre. Cette ouverture du reposoir sur dune à la marée a généré une perte de la capacité d'accueil pour les oiseaux à marée haute ou en reproduction sur les îlots, qui semble impacter les effectifs de limicoles hivernants sur le territoire de la réserve naturelle. A ceci s'ajoute l'affaiblissement du réseau trophique des zones d'alimentations situées dans l'estran du secteur Fosse Nord, qui a contribué à diminuer l'attractivité de ce site pour l'avifaune.

Cette érosion de la dune lors des tempêtes hivernales (Fig E3) est relativement cohérente avec les autres évolutions morphologiques constatées et en particulier avec l'approfondissement de l'aval de la fosse. En effet, les plus importantes profondeurs actuelles favorisent l'intrusion de l'énergie marine (houle et courants de flots) à l'origine des évolutions de ce secteur. Ces évolutions ont été documentées spécifiquement dans le cadre d'un autre projet via des études confiées aux bureaux d'études Artelia ainsi qu'à Geodunes (Artelia 2022, Geodunes 2022). Il est à noter que cette érosion est associée à des zones de dépôts, et la migration d'une flèche sableuse, qui en cohérence avec nos analyses à l'échelle de la fosse équilibre le bilan sédimentaire du système grande vasière (Artelia 2022).

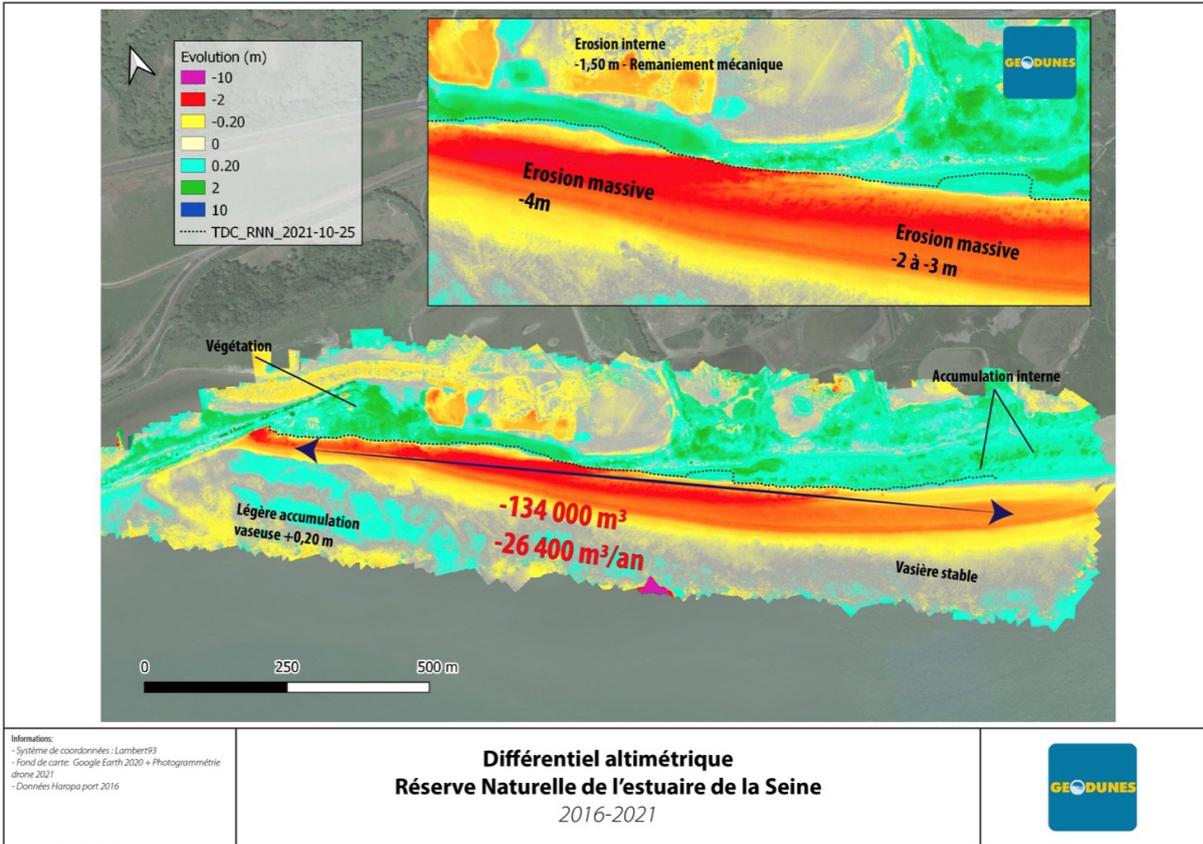


Figure E3. Différentiels altimétriques 2021-2016 au niveau du reposoir sur dune

CONCLUSION

Le projet CAPNORD a pour objectif de caractériser les évolutions hydro-morpho-sédimentaires et écologiques de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000. La caractérisation des effets cumulés liés aux aménagements réalisés dans le secteur de la fosse Nord a été demandée par les instances institutionnelles (ex. Conseil Scientifique de l'Estuaire de la Seine CSES) et les acteurs du territoire. Ceci représente un préalable essentiel pour la définition des objectifs de restauration spécifiques et la mise en place d'une stratégie de réhabilitation du fonctionnement du secteur.

Ainsi, un diagnostic global et multidisciplinaire du fonctionnement du secteur en réponse aux drivers naturels et anthropiques a été réalisé en reliant et en analysant les informations disponibles pour la période concernée. Cette démarche a fait appel à un panel d'experts thématiques sur les différents aspects du fonctionnement physique et écologique du secteur. Ceci a permis d'aboutir à des conclusions partagées sur les relations entre les changements du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire induits par l'aménagement de ce secteur et les réponses de sa composante biotique.

Il est important de rappeler dans ce contexte que l'analyse des effets cumulés des drivers anthropiques et naturels sur l'évolution du fonctionnement de l'estuaire est extrêmement complexe. Ces forçages interagissent en permanence, en modulant les réponses du système sur différentes échelles spatiales et temporelles, ce qui rend difficile de discriminer les effets induits par l'anthropisation de ceux qui relèvent de la variabilité naturelle (*paradoxe de la qualité estuarienne*) (Dauvin, 2007).

Cependant, **les aménagements, combinés aux spécificités hydrologiques des années post-travaux, ont eu des effets directs (perte de surfaces, modification de la connectivité) et indirects (modifications de la dynamique HMS)** importants sur le fonctionnement du secteur :

- diminution de 434 ha de la surface totale de la fosse Nord, représentant approximativement 20 % de la surface totale avant travaux ;
- compartimentation du secteur due à sa déconnexion avec le chenal principal du fleuve, attribuable à l'aménagement ou la modification de 14 km de digues et à la création/modification des brèches;
- érosion de l'aval du secteur de la fosse Nord, entre les années 2004 et 2010, induite directement par la réduction de la section induite par la création de Port 2000 et par les dragages d'accompagnement (3,3 millions de mètres cubes) et indirectement via les réajustements morphologiques initiés par ces derniers (*rappel : l'objectif des pré-dragages était de favoriser les courants de flot et de limiter la sédimentation dans la fosse*) ;
- sédimentation le long de la digue basse nord (banc aval) avoisinant la cote d'arase de la digue submersible (environ 4 m CMH) et une sédimentation (principalement sableuse) sur le banc de la passe et entre l'épi et le pont de Normandie.
- augmentation de l'influence marine et diminution de l'influence fluviale sur le secteur : *diminution des apports en eaux douces chargées en MES et augmentation des apports en eaux salées. Cette prépondérance des apports marins sur la fosse génère une augmentation des salinités. Les réajustements morphologiques sont quant à eux*

favorables au transport de sables vers l'amont de la fosse (renforcement de l'asymétrie de marée sur le secteur), combinés à la diminution des concentrations en MES, ces deux évolutions expliquent l'augmentation des teneurs en sables dans les sédiments superficiels.

Il est à noter que d'après les observations terrain, les crues de 2016, 2018 et 2020 n'ont, à priori, pas remis en question les constats listés ci-dessous, bien que ces derniers aient été établis suite à des années de faibles débits.

Dans l'ensemble, les évolutions physiques de la fosse nord peuvent être associées à une sous-estimation de l'effet hydrodynamique des piles du viaduc Nord du Pont de Normandie lors de la conception des aménagements (ARTELIA, 2014). En effet, les aménagements à l'aval du pont (réhausse de la digue basse nord entre l'épi et le pont de Normandie, réhausse de la brèche aval) et à l'amont (creusement du méandre artificiel et création de la brèche amont) avaient pour objectif de concentrer les flux de l'Ouest vers l'Est et de favoriser les échanges avec le chenal à l'amont du pont plutôt qu'à l'aval. Or les piles du pont génèrent une perte de charge singulière qui conduit à une baisse significative des courants, qui combinée aux effets des aménagements réalisés à l'aval du pont ont conduit à une sédimentation relativement importante du méandre artificiel et du secteur situé entre le banc de la passe et le Pont de Normandie.

D'un point de vue écologique, ces changements physiques ont eu pour répercussion un appauvrissement des communautés estuariennes qui reflète à la fois une diminution de la disponibilité et de l'attractivité des habitats (courantologie, substrat, profondeur, connectivité, réseau trophique). Cet appauvrissement est en partie contrebalancé par une évolution des communautés en place avec l'apparition croissante d'espèces marines présentant une affinité pour les faciès sableux.

Ceci est particulièrement vrai concernant les habitats de nurserie des poissons. La capacité d'accueil du secteur semble être impactée par une diminution importante des abondances des communautés clés du réseau trophique, à savoir le suprabenthos et le macrobenthos. De plus, le physiotope semblerait être moins propice vis-à-vis du rôle de nurserie et l'accueil des juvéniles. Plusieurs éléments sont à la base de ce constat : i) une diminution de la connectivité intra-secteur (entre zones d'alimentation à marée haute et de refuge à marée basse) et inter-secteur (entre le chenal et la fosse Nord) ; ii) une plus forte influence marine et iii) l'impossibilité pour les nurseries de s'établir dans le secteur mésohalin situé à l'amont, dans une zone dépourvue de vase et d'un mosaïque latérale allant jusqu'au schorre.

Les évolutions importantes de ce secteur, constatées suite à la période 2000-2020, rendent compte de la sensibilité et de la vulnérabilité de son fonctionnement vis-à-vis de l'évolution des forçages environnementaux (ex. climatiques) et anthropiques (gestion et aménagement). Ainsi, un des défis majeurs pour maintenir le fonctionnement écologique de ce secteur consistera à garantir sa possible adaptation, sa résilience face à ces changements. Ceci nécessitera la prise en compte de ce fonctionnement complexe répondant à des processus multi-échelles dans la planification des aménagements de l'estuaire de la Seine (i/ temporellement des évolutions induites par le changement climatique sur les temps longs jusqu'à l'échelle de la marée pour l'évolution des événements extrêmes et ii/ spatialement de l'échelle du bassin versant/de la baie de Seine jusqu'à l'échelle de l'estuaire et de ses aménagements).

LITTÉRATURE CITÉE

- ARTELIA, 2014. Réhabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine. Développement et exploitation d'un modèle hydro sédimentaire 3d de l'estuaire. Construction, calage et validation du modèle hydro sédimentaire (No. Rapport R2-171 3203).
- Balay, P., Duhamel, S., 2017. Suivi des populations de crevettes et des ressources halieutiques dans l'estuaire de la Seine (Rapport de synthèse annuelle pour le Grand Port Maritime du Havre). Cellule de Suivi du Littoral Normand, Le Havre.
- Brind'Amour, A., Chaalali, A., Tableau, A., Pinsivy, L., 2018. MODHANOUR : Modélisation des Habitats de Nourricerie en Baie de Seine (No. Rapport du Programme de Recherche Seine-Aval 5). GIP Seine-Aval, Rouen, France.
- Brind'Amour, A., Day, L., Cresson, P., Vogel, C., Chouquet, B., Pezy, J.-P., Dauvin, J.-C., Duhamel, S., Le Bris, H., 2021. CAPES : CApacité trophique des nourriceries de Poissons de l'Estuaire de Seine (Programme Seine-Aval 6 No. Rapport d'étude).
- Chouquet, B., 2014. Suivi des sédiments et des peuplements benthiques dans l'estuaire de la Seine 120.
- Cuvilliez, A., Deloffre, J., Lafite, R., Bessineton, C., 2009. Morphological responses of an estuarine intertidal mudflat to constructions since 1978 to 2005: The Seine estuary (France). *Geomorphology* 104, 165–174.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.010>
- Dancie, C., 2017. Suivi du macrozoobenthos intertidal de la Réserve naturelle de l'estuaire de la Seine. Rapport Pluriannuel 2000-2016. Cellule de Suivi du Littoral Normand.
- Dauvin, J.C., 2007. Paradox of estuarine quality: Benthic indicators and indices, consensus or debate for the future. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 271–281.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.017>
- Dauvin, J.-C., Alizier, S., Vallet, C., Ruellet, T., 2010. Does the Port 2000 harbour construction have an effect on the Seine estuary suprabenthic community? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86, 42–50.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.10.005>
- Dauvin, J.C., Desroy, N., Janson, A.L., Vallet, C., Duhamel, S., 2006. Recent changes in estuarine benthic and suprabenthic communities resulting from the development of harbour infrastructure. *Marine Pollution Bulletin* 53, 80–90.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.020>
- Dauvin, J.-C., Pezy, J.-P., 2013. Long-term changes of the Seine estuary suprabenthos (1996–2012). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 448, 93–103.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.06.019>
- Deloffre, J., 2005. La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux (PhD Thesis). Université de Rouen.
- Duhamel, S., Balay, P., 2020. Suivi des populations de crevettes et des ressources halieutiques dans l'estuaire de la Seine. (Rapport de synthèse). Cellule de Suivi du Littoral Normand.
- 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.
- Grasso, F., Bismuth, E., Verney, R., 2021. Projet ARES. Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en estuaire de Seine : référentiel de données de modélisation des variables hydro-sédimentaires de l'estuaire et stratégie d'actualisation (Rapport Seine Aval 6).

- Grasso, F., Verney, R., 2018. HYMOSED « Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine ». Volet Mesures (Rapport du Programme de recherche Seine-Aval 5). GIP Seine-Aval.
- Green, B.C., Smith, D.J., Grey, J., Underwood, G.J.C., 2012. High site fidelity and low site connectivity in temperate salt marsh fish populations: a stable isotope approach. *Oecologia* 168, 245–255. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2077-y>
- Jacinto, R.S., 2005. Action des vagues sur les estrans et vasières Application à l'estuaire de la Seine (PhD Thesis). Université de Rouen.
- Le Goff, R., Drogou, M., Lebigre, C., Woillez, M., Cornou, A.S., Berthele, O., Delaunay, D., Martin, S., Le Ru, L., Barone, H., Bouche, L., Roy, A., Le Roy, D., Huet, J., Garren, F., Edin, L., Michelet, N., Denize, S., Nguyen, P., Nfis, F., Le Roy, E., Marhic, C., Mahe, K., Weiss, J., 2022. NourDem 2019-2021. Rapport final. IFREMER.
- Le Pichon, C., Alp, M., 2018. ANACONDHA : Analyse spatiale de la connectivité des habitats fonctionnels pour les poissons à l'échelle de l'estuaire (Rapport du Programme de recherche Seine-Aval 5). GIP Seine-Aval, Rouen, France.
- Lemoine, J.-P., 2021. Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : rôle des dragages d'entretien (PhD Thesis). Université de Bretagne occidentale - Brest.
- Lemoine, J.-P., 2015. Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.3. GIP Seine-Aval.
- Lesourd, S., 2000. Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine (PhD Thesis). Caen.
- 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.
- Massei, N., Laignel, B., Fritier, N., 2011. Projet HYDROCLIMAT : Réponse hydrologique du bassin versant de la Seine aux changements climatiques – État des lieux et perspectives (Rapport Seine Aval 4).
- Mouny, P., Dauvin, J.-C., Zouhiri, S., 2000. Benthic Boundary Layer fauna from the Seine Estuary (eastern English Channel, France): spatial distribution and seasonal changes. *J. Mar. Biol. Ass.* 80, 959–968. <https://doi.org/10.1017/S0025315400003027>
- Muntoni, M., 2019. PROPOSE : Potentialités de restauration des habitats clés pour les poissons dans l'estuaire de la Seine (Rapport du GIP-Seine Aval). GIP Seine-Aval.
- Pasquaud, S., Béguyer, M., Larsen, M.H., Chaalali, A., Cabral, H., Lobry, J., 2012. Increase of marine juvenile fish abundances in the middle Gironde estuary related to warmer and more saline waters, due to global changes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 104–105, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.03.021>
- Pasquaud, S., David, V., Lobry, J., Girardin, M., Sautour, B., Elie, P., 2010. Exploitation of trophic resources by fish under stressful estuarine conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 400, 207–219. <https://doi.org/10.3354/meps08387>
- Pezy, J.-P., Baffreau, A., Dauvin, J.-C., 2017. What are the factors driving long-term changes of the suprabenthos in the Seine estuary? *Marine Pollution Bulletin* 118, 307–318. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.008>
- Pezy, J.-P., Dauvin, J.-C., 2018. Projet CAPES. Capacité des réseaux trophiques en estuaire de Seine : compartiment méiobenthique, zooplanctonique et suprabenthique.
- Saulnier, E., Le Bris, H., Tableau, A., Dauvin, J.C., Brind'Amour, A., 2020. Food limitation of juvenile marine fish in a coastal and estuarine nursery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 241, 106670. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106670>
- Souissi, S., Azémar, F., Combes, T., Le Coz, M., Mouneyrac, C., Tackx, M., Tlili, S., 2021. Projet SENTINELLES. Fonctionnement des écosystèmes de l'embouchure de l'estuaire de la Seine à travers une étude interdisciplinaire ciblant le zooplancton et le macrozoobenthos (Rapport Seine Aval 6).
- 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. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst* 28, 798–809. <https://doi.org/10.1002/aqc.2914>

Ziemski, 2022. Suivis de sédiments et des peuplement benthiques dans l'estuaire de la Seine. Rapport Scientifique Pluriannuel 2019.



Caractérisation des évolutions hydro-morpho-sédimentaires et écologiques du secteur de la fosse Nord depuis la construction de Port 2000

Résumé : Durant la période 2000-2020 le fonctionnement écologique de la fosse nord a été altéré par des années à l'hydrologie particulière et par les aménagements liés à la mise en place de Port 2000. Ceci résulte des évolutions du fonctionnement physique auxquelles les aménagements ont nécessairement contribué :

- diminution de la surface
- diminution de la connectivité à l'estuaire,
- évolution des dynamiques hydro-morpho-sédimentaires (renforcement des apports marins au détriment des apports fluviaux riches en matière en suspension, évolution des profondeurs, progression des faciès sableux)

Ces 3 éléments ont généré une modification des communautés en place et un affaiblissement de la capacité de nourricerie du système.

