



université de bretagne
occidentale



Mémoire d'Habilitation à Diriger des
Recherches

Florent GRASSO

École Doctorale Sciences de la Mer et du Littoral

Avril 2022

Dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires macrotidaux dans un contexte de changement global

Composition du jury

Mme Claude ESTOURNEL, Directrice de Recherche CNRS (HDR), UMR LEGOS : Rapporteur
Mr Robert LAFITE, Professeur (HDR), Université de Rouen – Normandie : Rapporteur
Mr Aldo SOTTOLICHIO, Professeur (HDR), Université de Bordeaux : Rapporteur
Mr Xavier CARTON, Professeur (HDR), Université de Bretagne Occidentale : Examineur
Mr Antoine GARDEL, Chargé de Recherche CNRS (HDR), UMR LEEISA : Examineur
Mr Romaric VERNEY, Chercheur Ifremer (HDR), DYNECO : Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes que j'ai eu la chance de rencontrer au cours de mon parcours scientifique. Tous ces échanges, autant formels qu'informels, m'ont permis de mieux plonger la complexité de la dynamique sédimentaire côtière et estuarienne. Plus particulièrement, j'aimerais remercier Hervé Michallet qui a su me transmettre sa passion pour la recherche, Gerben Ruessink pour m'avoir accompagné dans mes premiers pas de docteur, et l'équipe DHYSED pour son accueil chaleureux et bienveillant. Je souhaiterais également remercier les membres de mon jury, pour leurs retours positifs et constructifs. Enfin, je tiens à remercier l'Ours pour sa relecture attentive du manuscrit.

Résumé

Mes travaux de recherche portent essentiellement sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires tidaux afin de déterminer leurs trajectoires potentielles dans le cadre du changement global. Pour aborder cette problématique, j'ai combiné des approches expérimentales, d'observation *in situ* et de modélisation numérique, allant de l'étude des processus hydro-sédimentaires à celle de l'évolution des systèmes à plus long terme (i.e. estuaires sur plusieurs décennies).

A l'échelle des processus, des expérimentations en laboratoire et mésocosme ont permis d'améliorer la compréhension des mécanismes de sédimentation et de consolidation des sédiments mixtes (sable-vase), ainsi que leurs interactions avec certaines espèces benthiques. La formalisation de ces mécanismes dans notre modèle sédimentaire (MUSTANG) a ainsi apporté davantage de réalisme aux simulations de la dynamique sédimentaire estuarienne.

Des modèles numériques déterministes ont été déployés sur les estuaires de la Gironde et de la Seine afin d'étudier la réponse de ces systèmes face à différentes conditions hydrométéorologiques (ex. crues-étiages, tempêtes). Ce type d'étude nous a également éclairé sur la forte sensibilité des masses turbides (ex. bouchon vaseux) et des flux sédimentaires résiduels (ex. import-export entre l'estuaire et les mers côtières) face aux perturbations anthropiques (ex. modifications morphologiques dues aux dragages et aux extensions portuaires).

A des échelles de temps plus longues (~50 ans), des simulations morphodynamiques pour différents scénarios de changement climatique ont mis en évidence la capacité de certains systèmes estuariens à s'adapter à la montée du niveau de la mer. Bien que ce type de simulations prospectives contienne de nombreuses incertitudes, les outils actuels de modélisation peuvent apporter des informations pertinentes sur les trajectoires potentielles des habitats estuariens (ex. zones intertidales) dans le cadre du changement global.

Parmi les pistes de recherche que je souhaiterais approfondir à moyens termes, j'accorde une importance particulière la démarche inter-estuaires, afin d'aller au-delà de notre compréhension site-spécifique et ainsi proposer une conceptualisation globale de la dynamique sédimentaire estuarienne. Enfin, je pense que nous avons encore besoin d'améliorer la formalisation de certains processus sédimentaires pour mieux simuler la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires. Je pense en particulier à des processus sous-maille (ex. contribution des filandres à la dynamique des vasières intertidales) et à une meilleure prise en compte de l'effet des vagues (ex. asymétries) sur la morphodynamiques des embouchures estuariennes.

Préambule

Mes premiers pas en océanographie ont eu lieu en 2006 au milieu des montagnes. Comme les flocons, fondant en été pour gonfler les torrents, j'ai suivi les fleuves pour rejoindre les estuaires néerlandais puis la mer d'Irlande.

C'est d'abord sur les plages sableuses, où l'eau reste claire, que j'ai travaillé plus de 5 ans, à essayer de relier le déplacement des grains de sable à l'effet des vagues et de leur turbulence. La rigueur des expérimentations en laboratoire et la complexité des observations de terrain, associées à la passion des chercheurs que j'ai eu la chance de croiser, m'ont permis d'aiguiser ma curiosité et mon envie de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes côtiers.

C'est seulement en arrivant à l'Ifrermer en 2012 que j'ai commencé à mettre un pied dans la vase et me plonger dans des eaux plus turbides. Je remercie encore l'équipe qui a fait le pari de recruter un élément « non-cohésif » pour travailler sur ces milieux semi-abrités où la dynamique des sédiments fins est si singulière. La complexité des environnements sableux que je commençais à discerner s'est vue décuplée par la combinaison des forçages hydrométéorologiques (vent, vagues, marée, débit des fleuves), l'enrichissement de processus propres aux sédiments cohésifs (floculation, consolidation) et leur interaction avec les processus biologiques (bioturbation, biostabilisation, biofiltration).

J'ai particulièrement été attiré par la problématique des écosystèmes estuariens, associant des espaces avec une grande richesse écologique et d'importants usages socio-économiques. A partir d'études à l'échelle des processus, les mécanismes propres au fonctionnement physique des estuaires peuvent être formalisés et intégrés à des modèles numériques. Ces modèles permettent ensuite d'analyser les réponses et trajectoires potentielles des systèmes estuariens face à différentes pressions (anthropique, météorologique ou climatique). C'est cette démarche *bottom-up* qui m'intéresse, approfondir notre compréhension de la physique hydro-sédimentaire afin d'apporter des éléments de réponse à plus grande échelle pour nourrir les besoins d'autres disciplines.

Ce manuscrit présente une synthèse non-exhaustive de mes activités de recherche au cours des dix dernières années, en se focalisant sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires macrotidaux. L'analyse de la dynamique des plages sableuses n'est donc pas présentée, mais les connaissances acquises sur le transport des sédiments non-cohésifs sous l'influence des vagues a nourri mes travaux de recherche et m'inspire de nouvelles perspectives associées à la dynamique des sédiments mixtes (sablo-vaseux).

Tables des matières

1. Introduction.....	8
1.1. Contexte.....	8
1.2. Objectifs et organisation du manuscrit.....	11
1.3. Sites d'étude	12
1.3.1. Estuaire de la Gironde	12
1.3.2. Estuaire de la Seine.....	12
1.4. Outils de modélisation hydro-morpho-sédimentaire.....	14
1.4.1. Modèle hydrodynamique MARS3D	14
1.4.2. Module sédimentaire MUSTANG	16
1.5. Projets de recherche structurants	17
2. Processus sédimentaires estuariens.....	18
2.1. Mélanges sédimentaires sablo-vaseux	18
2.2. Dynamique des vasières intertidales	21
2.2.1. Approches ponctuelles à haute-fréquence.....	22
2.2.2. Approches spatiales à basse-fréquence.....	24
2.3. Dynamique du bouchon vaseux	27
2.3.1. Dynamique du bouchon vaseux en réponse aux forçages hydrométéorologiques	29
2.3.2. Dynamique du bouchon vaseux en réponse aux forçages anthropiques.....	30
2.4. Interactions physique-biologie.....	33
3. Flux et bilans sédimentaires le long du continuum terre-mer	36
3.1. Sensibilité et incertitudes sur l'estimation des flux sédimentaires	36
3.1.1. Sensibilité des flux à la paramétrisation du transport sédimentaire.....	37
3.1.2. Validation des flux sédimentaires	38
3.1.3. Stabilité des flux sédimentaires	40

3.2. Variabilité des flux sédimentaires en réponse aux forçages naturels et anthropiques	42
3.2.1. Influence des forçages hydrométéorologiques sur les flux sédimentaires.....	42
3.2.2. Variabilité verticale des flux de vase	45
3.2.3. Conceptualisation des transferts sédimentaires « estuaire – mer côtière » dans un contexte de changement global	47
4. Trajectoires hydro-morpho-sédimentaires des systèmes estuariens à moyens et longs termes.....	52
4.1. Capacités et limitations des simulations morphosédimentaires à moyens termes (~10 ans)	53
4.1.1. Stratégie de modélisation morphodynamique	53
4.1.2. Influence du facteur d'accélération morphologique	57
4.2. Modélisation des évolutions morphosédimentaires à longs termes (~20-50 ans).....	59
4.2.1. Évolutions morphosédimentaires rétrospectives sur 20 ans	59
4.2.2. Évolutions morphosédimentaires tendancielle sur 50 ans	64
5. Bilan et perspectives de recherche à moyens termes	70
5.1. Bilan de mes activités de recherche.....	70
5.2. Perspectives de recherche à moyens termes.....	73
5.2.1. Caractérisation globale de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire estuarienne	73
5.2.2. Influence des vagues sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des embouchures estuariennes.....	75
5.2.3. Étude des filandres et de leur rôle dans la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des zones intertidales estuariennes.....	79
6. Bibliographie.....	82
7. Annexes	92
7.1. Curriculum Vitae	92
7.2. Projet CAPTURE.....	99
7.3. Résumés de 5 articles représentatifs de mes travaux de recherche .	110

1. Introduction

1.1. Contexte

Les estuaires représentent des zones maritimes passionnantes, de par la complexité des processus physiques et biogéochimiques les gouvernant, et de par les enjeux socio-économiques et écologiques y prenant place. A l'interface entre les continents et les océans, la grande diversité de gradients physico-chimiques rencontrés (ex. courant, salinité, turbidité, faciès sédimentaires) permet d'offrir des habitats benthiques et pélagiques privilégiés, faisant des estuaires des *hotspots* de la biodiversité [Costanza *et al.*, 1997]. Cependant, ces écosystèmes sont très vulnérables aux pressions humaines (ex. activités de dragages, travaux portuaires) [Avoine *et al.*, 1981; Nichols *et al.*, 1986], et leur capacité d'adaptation face au changement climatique pose question (ex. élévation du niveau de la mer, évolution des évènements extrêmes) [Best *et al.*, 2018; Leuven *et al.*, 2019].

Les estuaires sont soumis aux influences marines (marée, vagues, surcotes, apports sédimentaires), fluviales (débits liquide et solide), et atmosphériques (vent, pression). La variabilité de ces conditions hydrométéorologiques, associée aux évolutions interannuelles et/ou à celle du changement climatique, exacerbent les évènements de crues/étiages et de tempêtes qui ont des impacts majeurs sur le fonctionnement physique des estuaires [Ralston *et al.*, 2013; Ralston *et al.*, 2020]. Il est donc important de comprendre la dynamique estuarienne au cours de ces périodes critiques afin d'apporter un éclairage sur les trajectoires potentielles des estuaires à plus long terme (50-100 ans) sous l'influence de pressions anthropiques et climatiques.

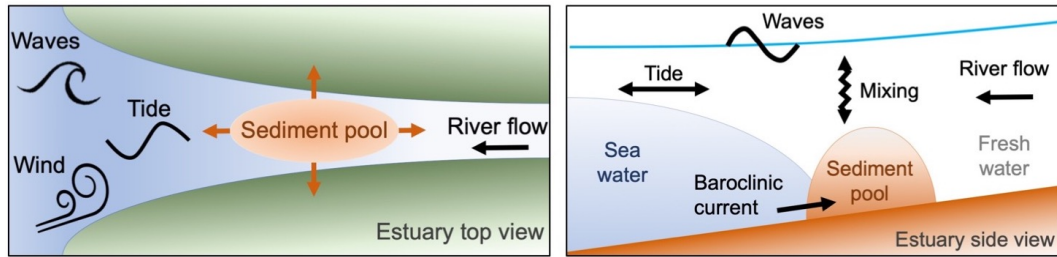


Figure 1. Représentations schématiques des principaux forçages et mécanismes de la dynamique sédimentaire des estuaires macrotidaux.

Les estuaires macrotidaux sont principalement dominés par les courants barotropes induits par la marée, mais la circulation barocline, induite par les gradients de densité entre les eaux douces fluviales et les eaux salées marines, peut fortement modifier la circulation résiduelle de ces estuaires [Geyer & MacCready, 2014]. L'hydrodynamique de ces systèmes « partiellement mélangés » induit généralement la formation d'une zone à forte teneur en matière en suspension (MES) appelée « bouchon vaseux » (Figure 1) [Allen *et al.*, 1980; Burchard *et al.*, 2018]. Le bouchon vaseux vient moduler les transferts sédimentaires entre les apports continentaux et marins, et joue un rôle de filtre dans les échanges biogéochimiques à l'interface terre-mer [Gil-Díaz *et al.*, 2019]. Ainsi, la compréhension et la prédiction des flux sédimentaires estuariens – principaux vecteurs de nutriments, polluants et contaminants [Billen *et al.*, 2007; Dabrin *et al.*, 2009] – est essentielle pour déterminer les évolutions hydro-morpho-sédimentaires, biogéochimiques, biologiques et écologiques des estuaires et des zones côtières adjacentes.

La prédiction des évolutions hydro-morpho-sédimentaires des systèmes estuariens nécessite de mettre en place des outils de simulations. Ces outils peuvent s'appuyer sur des approches conceptuelles [De Vet *et al.*, 2020], des modèles numériques idéalisés [Dijkstra *et al.*, 2017; Horemans *et al.*, 2021] ou à partir de configurations schématiques [Olabarrieta *et al.*, 2018]. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'appuient essentiellement sur de la modélisation numérique « réaliste » basée sur les processus (*process-based*). La notion de simulation « réaliste » est à prendre avec précaution, car un modèle est par définition « faux », sachant qu'il n'est pas la réalité. Un modèle dit « réaliste » cherche néanmoins à s'approcher au plus près de la réalité (ex. en termes de forçages, morphologie, processus), mais il comprend de nombreuses approximations, autant dans les formulations empiriques de certains processus que par la négligence de certains mécanismes (ex. interactions physique-biologie, interactions inter-granulaires). Ainsi, pour répondre à une question donnée, la modélisation devra trouver un compromis en termes de : taille de domaine, résolutions spatiale, verticale et temporelle, facteur d'accélération morphologique (MF) et processus à prendre en compte. Ces compromis dépendent :

- De l'objet d'étude : en fonction de la problématique (ex. turbidité, flux, morphodynamique), les besoins peuvent être différents en termes de types de sédiments (ex. vase, sable, gravier), de processus biologiques à considérer (ex. matière organique, faune benthique, végétation) et de forçages (ex. marée, débit, vent, vagues, surcotes).

- Des échelles spatiales : l'extension du domaine d'étude et sa résolution dépendent de l'échelle à laquelle on souhaite aborder le problème (ex. filandre, zone intertidale, estuaire, continuum terre-mer).
- Des échelles temporelles : la durée sur laquelle la problématique est étudiée (ex. cycles tidaux, évènements de tempêtes, saisons, années, décennies) nécessite de considérer certaines pressions spécifiques (ex. changement climatique, activités anthropiques).

Les modèles numériques *process-based* s'appuient sur des lois de comportement dont les formulations sont généralement déduites de travaux expérimentaux en laboratoire. Ces milieux contrôlés restent actuellement le meilleur moyen de caractériser le fonctionnement d'un processus physique en lien avec ses paramètres de contrôle. Cependant, la validation des modèles réalistes nécessite de comparer les simulations aux observations de terrain. Ces observations peuvent provenir de différentes sources, comportant chacune leur avantages et inconvénients [Fettweis *et al.*, 2019].

- Mesures *in situ* : le déploiement de stations de mesures (fond ou surface) dans les zones subtidales et intertidales apportent des données haute-fréquence (ordre de grandeur : $\mathcal{O} \sim$ minutes) mais ponctuelles [Chapalain *et al.*, 2019]. Toutefois, les mesures le long de radiales (ex. par ADCP tracté ou Glider) peuvent apporter une vision plus étendue [Bourrin *et al.*, 2015; Gentil *et al.*, 2020]. Le développement des réseaux de mesures haut-fréquence en continu apporte une information riche multipoints pluriannuelle (ex. MAGEST en estuaire de Gironde [Jalón-Rojas *et al.*, 2015] ; SYVEL en estuaire de Loire [Jalón-Rojas *et al.*, 2016] ; et SYNAPSES en estuaire de Seine [Druine *et al.*, 2018]). Cependant, les points de mesures sont généralement situés en bord de rive et peuvent être soumis à des remises en suspension locales non représentatives des sections transversales.
- Mesures par télédétection : l'analyse de la couleur de l'eau par imagerie satellite permet de quantifier les concentrations en MES de surface [Doxaran *et al.*, 2009; Gangloff *et al.*, 2017; Constantin *et al.*, 2018]. Ces mesures permettent de couvrir une grande étendue spatiale (estuaire) mais sont limitées par la basse fréquence d'acquisition associée au passage des satellites ($\mathcal{O} \sim$ jour), étant contraignante dans les environnements tidaux. Concernant l'évolution morphologique des zones intertidales, les mesures topographiques aéroportées permettent d'apporter des informations à une résolution satisfaisante ($\mathcal{O} \sim$ cm) sur de grande surface ($\mathcal{O} \sim$ km²) [Jaud *et al.*, 2016]. Néanmoins, ces mesures restent difficiles à réaliser régulièrement.

Ainsi, l'étude de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire estuarienne nécessite de combiner des mesures en laboratoire, des observations de terrain et des méthodes de modélisation numérique. Ce triptyque fondamental permet de construire l'approche *bottom-up* qui est adoptée dans ce manuscrit. Cela permet aussi de mieux comprendre et quantifier les erreurs et incertitudes associées aux simulations numériques pour la prédiction des trajectoires des estuaires face au changement global.

1.2. Objectifs et organisation du manuscrit

Ce manuscrit a pour objectif de faire une synthèse non-exhaustive de travaux auxquels j'ai contribué au cours des 10 dernières années sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires macrotidaux. J'ai adopté une stratégie scientifique combinant des études de processus à petite échelle pour aller vers une caractérisation des systèmes estuariens à plus grandes échelles (temporelles et spatiales). Mes travaux se sont appuyés sur des approches expérimentales (en laboratoire et mésocosme), sur l'analyse d'observations de terrain (mesures *in situ*, campagnes en mer, télédétection), et sur l'exploitation de modèles numériques (hydrodynamique, vagues et sédimentaire). Ce dernier volet a représenté une part importante de mon activité et l'outil de modélisation utilisé est brièvement présenté par la suite. De plus, les sites d'étude auxquels je me suis particulièrement intéressé (i.e. estuaires de la Gironde et de la Seine) sont présentés dans la prochaine section.

Le manuscrit est structuré en trois parties principales :

- La Section 2 présente l'analyse des processus hydro-morpho-sédimentaires estuariens. Il comprend des études sur le comportement de mécanismes spécifiques et leur formulation (ex. consolidation, interactions physique-biologie), ainsi que sur le fonctionnement de certaines structures turbides caractéristiques des estuaires (ex. bouchon vaseux).
- La Section 3 présente l'analyse des flux et bilans sédimentaires estuariens. Les travaux présentés abordent la problématique des flux sablo-vaseux à différentes échelles spatiales (horizontales et verticales) et leurs réponses aux pressions naturelles et anthropiques.
- La Section 4 présente l'analyse de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire estuarienne à moyen (~10 ans) et long (~50 ans) termes. Ce chapitre illustre les intérêts et les limitations des outils de modélisation morphodynamique réalistes pour étudier les trajectoires potentielles des systèmes estuariens dans le cadre du changement global (climatique et anthropique).

Le bilan de mes travaux et mes perspectives de recherche à moyen terme (5-10 ans) sont ensuite présentés en Section 5.

Enfin, les annexes comprennent mon CV, le descriptif du projet inter-estuaires CAPTURE et les résumés de 5 articles représentatifs de mes travaux de recherche.

1.3. Sites d'étude

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'appuient principalement sur l'étude des estuaires de la Gironde et de la Seine. Ci-dessous sont brièvement présentées les principales caractéristiques de ces sites d'étude.

1.3.1. Estuaire de la Gironde

L'estuaire de la Gironde est un système macrotidal (marnage de 1,5 à 5,5 m) avec un bassin versant d'environ 71 000 km² [Allen *et al.*, 1980], représentant un des plus grands estuaires d'Europe occidentale (Figure 2a et b). Résultant de la confluence des rivières de la Garonne et de la Dordogne, il s'étend sur 180 km entre l'embouchure et la limite de l'influence de la marée en amont (La Réole sur la Garonne et Pessac sur la Dordogne). Le débit liquide moyen (Garonne + Dordogne) est de 700 m³/s [Jalón-Rojas *et al.*, 2015] avec un débit solide d'environ 0,8 Mt/an [Coynel, 2005], dont une contribution principale de la Garonne (~70%). L'estuaire de la Gironde est responsable d'environ 60% des apports d'eau douce et de sédiment dans le Golfe de Gascogne [Jouanneau *et al.*, 1999].

L'estuaire présente un bouchon vaseux parmi les plus développés d'Europe (~4 Mt), avec des concentrations en MES de surface pouvant atteindre plusieurs kg/m³ [Castaing & Allen, 1981]. Les variations saisonnières du débit de la Gironde et de l'intrusion saline influencent le positionnement longitudinal du bouchon vaseux, se situant entre Le Verdon et Pauillac en période de crue et pouvant remonter en amont de Bordeaux par fort étiage [Sottolichio & Castaing, 1999].

1.3.2. Estuaire de la Seine

L'estuaire de la Seine est un système macrotidal (marnage de 3 à 8 m). Avec un bassin versant de 79 000 km², il fait également partie des plus grands estuaires d'Europe occidentale. Il s'étend sur plus de 170 km entre l'embouchure et la limite d'influence de la marée à Poses (Figure 2c). Le débit liquide moyen est de 450 m³/s et le débit solide d'environ 0,7 Mt/an [Schulz *et al.*, 2018].

L'estuaire a été fortement altéré par les activités humaines au cours des deux derniers siècles, passant ainsi d'un système « naturel » à un système « anthropisé » [Avoine *et al.*, 1981]. Exposées aux vents d'ouest, les zones intertidales à l'embouchure de l'estuaire sont soumises à l'érosion induite par l'effet combiné des vagues et des courants de marée [Deloffre *et al.*, 2007; Verney *et al.*, 2007]. La partie aval de l'estuaire est caractérisée par la présence d'un bouchon vaseux bien développé (~0,3 Mt) avec des concentrations en MES de surface pouvant atteindre 1 kg/m³. Principalement situé aux environs de Fatouville, le bouchon vaseux migre en amont proche de Tancarville en période d'étiage et migre en aval vers Balise A en période de crue [Grasso *et al.*, 2018b], pouvant même être expulsé hors de l'estuaire lors de très forts débits (>1500 m³/s).

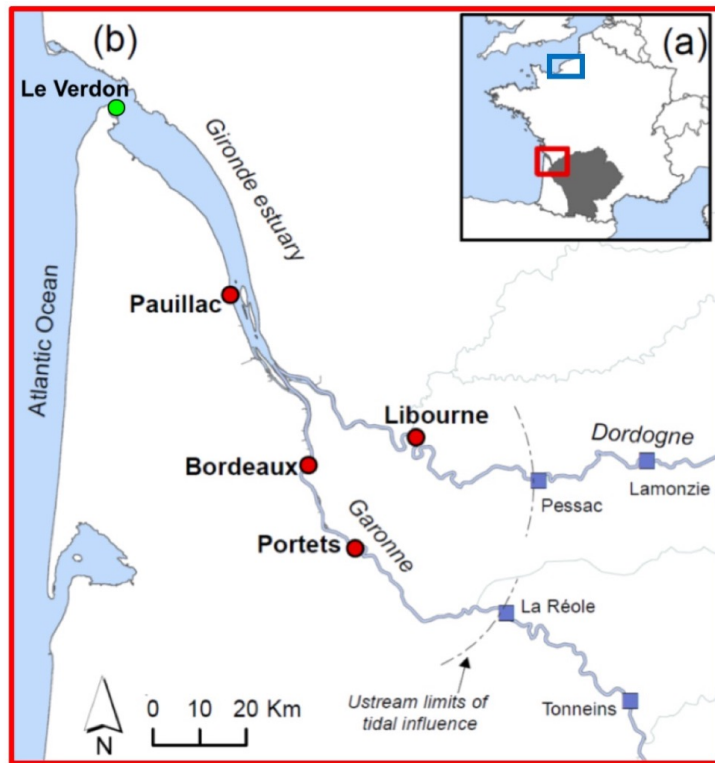


Figure 2. Illustration des estuaires (a, b) de la Gironde (cadre rouge) et (a, c) de la Seine (cadre bleu). Sources : (a, b) Diaz [2019], modifié de Jalón-Rojas et al. [2015] et (c) GIP Seine-Aval.

1.4. Outils de modélisation hydro-morpho-sédimentaire

Les travaux de modélisation se basent sur le modèle hydrodynamique MARS3D, développé à l'IFREMER, couplé au module sédimentaire MUSTANG développé au sein de l'équipe DHYSED (IFREMER – DYNECO). Le schéma conceptuel illustré sur la Figure 3 décrit le fonctionnement général de la configuration et récapitule les différents forçages pris en compte.

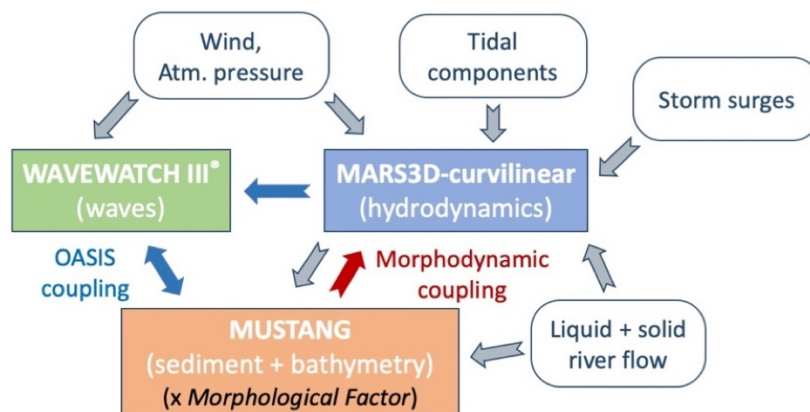


Figure 3. Représentation schématique de la chaîne de modélisation MARS3D-MUSTANG-WW3. Les flèches grises représentent les forçages, les flèches bleues représentent les couplages de modèles via le coupleur OASIS, et la flèche rouge représente le couplage morphodynamique lorsque les évolutions morphologiques calculées par le modèle sédimentaire MUSTANG sont prises en compte par le modèle hydrodynamique MARS3D.

1.4.1. Modèle hydrodynamique MARS3D

Le modèle hydrodynamique MARS3D [Lazure & Dumas, 2008] est un modèle à surface libre aux différences finies suivant une grille Arakawa-C qui résout les équations de Navier-Stokes sous l'approximation de Boussinesq et l'hypothèse d'hydrostaticité. Le modèle résout séparément, mais avec un même pas de temps, un mode barotrope qui fournit l'élévation de la surface libre et les courants barotropes 2D, ainsi qu'un mode barocline qui calcule les courants baroclines 3D.

Les configurations déployées sur les estuaires de la Gironde « CurviGironde » et de la Seine « CurviSeine » (Figure 4) utilisent un maillage horizontal curviligne permettant de garantir une résolution adaptée aux processus physiques depuis l'estuaire au plateau continental, et d'assurer des temps de calcul raisonnables (~24 h de calcul sur 168 processeurs pour une simulation hydro-morpho-sédimentaire d'un an). Ce dernier autorise à la fois la modélisation des méandres, un raffinement dans l'estuaire (~100 m) et une emprise plus étendue aux abords du plateau (~2 km). La résolution verticale est répartie sur 10 niveaux équidistants.

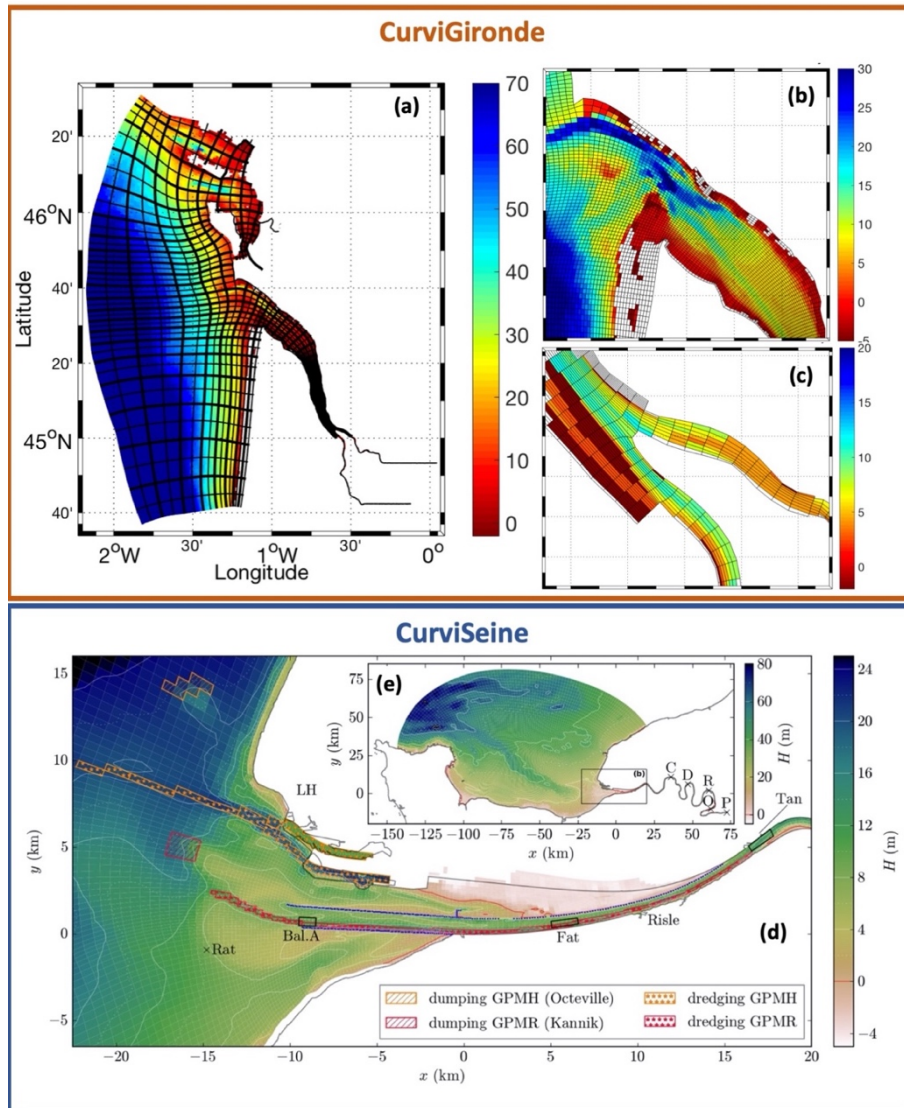


Figure 4. Emprise, maillage et bathymétrie (relative au niveau moyen) de la configuration (haut) CurviGironde et (bas) CurviSeine. Pour le maillage CurviGironde (a), une maille sur dix est représentée en gras et une maille sur cinq en trait fin. (b) et (c) sont des zooms de la configuration (a), et (d) est un zoom de la configuration (e).

Le modèle est forcé: (i) à la limite marine par les composantes harmoniques de la marée (CST France, SHOM) et les surcotes simulées par le modèle MARS2D à l'échelle Manche-Gascogne, (ii) aux limites amont des fleuves par les débits solides et liquides journaliers, et (iii) sur tout le domaine, par les vents issus du modèle Météo-France haute résolution AROME et par les vagues issues du modèle WAVEWATCH III® (WW3). La prise en compte des vagues dans le modèle hydrodynamique s'effectue en deux temps : pour le calcul des vagues, le modèle WW3 est forcé par les hauteurs d'eau et courants du modèle hydrodynamique MARS3D. Les vagues calculées par WW3 servent ensuite de forçage pour le modèle sédimentaire (contraintes de frottement au fond).

1.4.2. Module sédimentaire MUSTANG

Les concentrations en MES dans l'ensemble de la colonne d'eau et la dynamique du sédiment dans le compartiment du fond sédimentaire (en termes de nature et d'épaisseur) sont simulées par le module sédimentaire MUSTANG (MUd Sand TrANsport modellinG). Celui-ci est dérivé de l'ancien module sédimentaire MIXSED, décrit par Le Hir *et al.* [2011], puis par Grasso *et al.* [2015] et Mengual *et al.* [2017b]. Couplé au modèle hydrodynamique précédemment décrit, le module sédimentaire MUSTANG, modèle multicouches et multi-classes (gravier-sable-vase), reproduit les processus d'érosion, de dépôt, de transport en suspension, de floculation, de charriage et de consolidation. A partir d'une couverture sédimentaire initiale, le module permet de simuler la concentration et les flux des sédiments en suspension, l'épaisseur et la nature du lit sédimentaire et son évolution. Le compartiment sédimentaire de fond fonctionne à partir d'un nombre de couche variable dont l'épaisseur est elle-même variable.

Le fonctionnement de ce module sédimentaire nécessite de définir un nombre fini de classes de sédiments, auxquelles sont associées un type de sédiment, une taille de particules et des caractéristiques intrinsèques à la classe considérée (ex. vitesse de chute, érodabilité). La définition de la couverture sédimentaire initiale, choisie uniforme selon la verticale, nécessite de préciser une épaisseur sédimentaire initiale et un pourcentage de chaque classe initialement présente dans cette épaisseur de sédiment, ce qui détermine un stock de particules disponibles initialement dans chaque maille du domaine. A partir des distributions granulométriques des zones d'études, 5 classes de sédiment ont été définies : 1 gravier, 3 sables et 1 vase de vitesse de chute variable pour prendre en compte les processus de floculations. Les diamètres des sédiments non-cohésifs pour la configuration CurviGironde sont : 100 μm , 250 μm , 400 μm et 3 mm ; et pour la configuration CurviSeine : 100 μm , 210 μm , 800 μm et 5 mm.

Plus de détails sur la paramétrisation et la validation des modèles hydro-sédimentaires sont disponibles dans Grasso *et al.* [2018b], Diaz *et al.* [2020] et Diaz *et al.* [in prep.].

1.5. Projets de recherche structurants

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont le fruit d'un certain nombre de projets de recherche qui ont été structurants pour mes activités scientifiques au cours des 10 dernières années. Voici une brève présentation des principaux projets :

- **HYMOSED** (2013-2017), Seine-Aval 5 : Modélisation du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine (coordination : [F. Grasso](#)) ; Postdoctorat de E. Schulz « Modélisation et analyse des flux et bilans sédimentaires en estuaire de Seine » (2016-2017), encadré par [F. Grasso](#) [100%] ;
- **ANPHYECO-SEINE** (2013-2017), Seine-Aval 5 : Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique [en vue d'une recherche de pistes de restauration globale] de l'estuaire de la Seine (coordination : Université d'Anvers, Belgique) ;
- **AMORAD** (2013-2022), ANR « Investissement d'Avenir » : Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement (coordination nationale : IRSN, coordination Ifremer : [F. Grasso](#)) ; Doctorat de M. Diaz « Modélisation numérique des transferts sédimentaires de l'estuaire de la Gironde au plateau continental » (2016-2019), co-encadré par [F. Grasso](#) [90%] et P. Le Hir [10%] ;
- **HYDRALAB+** (2015-2019), EU-H2020 / JRA1 RECIPE et JRA2 COMPLEX : WP9 Interactions sédiment-biota (coordination : Deltares, Pays-Bas) ;
- **MORPHOSEINE** (2017-2020, Seine-Aval 6 : Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine (coordination : [F. Grasso](#)) ;
- **ARES** (2019-2020), Seine-Aval 6 : Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine (coordination : [F. Grasso](#)) ;
- **INTEREST** (2019-2021), Ifremer – ARED Région Bretagne : Doctorat de M. Uchasara « Modélisation et conceptualisation de la dynamique sédimentaire inter-estuaires » (2019-2021), co-encadré par [F. Grasso](#) [70%] et R. Verney [30%] ;
- **CAPTURE** (2021-2024), Office Français de la Biodiversité (OFB) : Vers une caractérisation et paramétrisation globale de la turbidité dans les estuaires sous pressions anthropiques et climatiques, programme de la Mission Inter-Estuaires (MIE) (coordination : [F. Grasso](#)).

2. Processus sédimentaires estuariens

2.1. Mélanges sédimentaires sablo-vaseux

Les mélanges sédimentaires sablo-vaseux représentent la majorité des habitats côtiers semi-abrités et estuariens, zones particulièrement riches en termes de fonctions écologiques. Le transport de ces sédiments et la modification des habitats sédimentaires associés sont contrôlés par des processus complexes, qu'il faut comprendre et formaliser. Une des particularités de ces mélanges cohésifs est leur capacité à se consolider avec le temps, impactant directement leur érodabilité et donc les concentrations en MES dans l'eau [van Ledden *et al.*, 2004; Sanford, 2008].

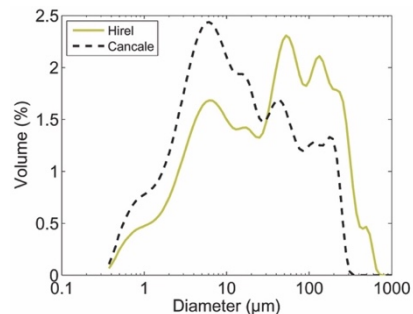
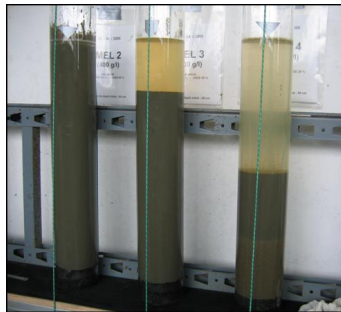


Figure 5. (Gauche) Colonnes de sédimentation pour mesurer la consolidation de sédiments de la baie du Mont St Michel. (Droite) Distributions granulométriques de sédiments en baie du Mont St Michel à Hirel (trait continu) et à Cancale (tireté) [Grasso *et al.*, 2014].

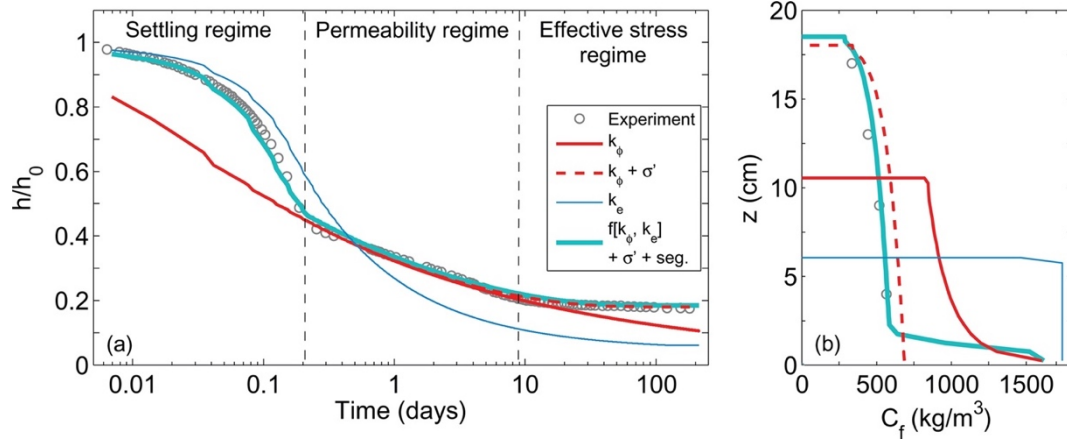


Figure 6. (a) Évolution temporelle de la hauteur relative d'un mélange sédimentaire h/h_0 et (b) profil vertical de la concentration massique C_f à la fin de l'expérience. Expérimentation (symbole) et simulations (lignes) pour différentes formulations numériques [Grasso *et al.*, 2015].

Bien défini pour les sédiments purement vaseux [Dankers & Winterwerp, 2007; Thiebot *et al.*, 2011], ce processus était encore mal conceptualisé pour les sédiments mixtes, générant de fortes incertitudes dans les modélisations morphosédimentaires des estuaires. En se basant sur des expérimentations de colonnes de sédimentation réalisées en laboratoire (Figure 5 ; Grasso *et al.* [2014]), l'objectif principal de ces travaux était d'être capable de reformuler les processus de sédimentation et de consolidation pour des sédiments cohésifs sablo-vaseux [Grasso *et al.*, 2015].

La consolidation des sédiments peut se décomposer en différentes phases, correspondant aux régimes dominants de chute entravée, de perméabilité et de contrainte effective (Figure 6a). En s'appuyant sur la théorie de la mécanique des sols [Gibson *et al.*, 1967; Toorman & Berlamont, 1993; Le Hir *et al.*, 2011], l'originalité de ce travail a consisté à combiner différentes formulations pour mieux représenter la continuité du processus de consolidation. Cela consiste en :

- Un régime de chute entravée, qui peut être caractérisé par une perméabilité du sédiment k_e basée sur l'indice des vides e : $k_e = k_1 e^{k_2}$, avec k_1 et k_2 des paramètres de calibration ;
- Un régime de perméabilité, qui peut se caractériser par une perméabilité k_ϕ basée sur la fraction volumique de vase ϕ [Sanford, 2008] et la théorie fractale introduite par Merkelbach & Kranenburg [2004] : $k_\phi = K_k \phi^{-n}$, avec K_k un paramètre de calibration, $n = 2/(3-n_f)$ et n_f le nombre fractal caractérisant la distribution solide dans le sédiment ;
- Un régime de contrainte effective, où la contrainte σ' peut également se formuler à partir de la fraction volumique de vase ϕ et la théorie fractale : $\sigma' = K_\sigma \phi^n$, avec K_σ un paramètre de calibration.

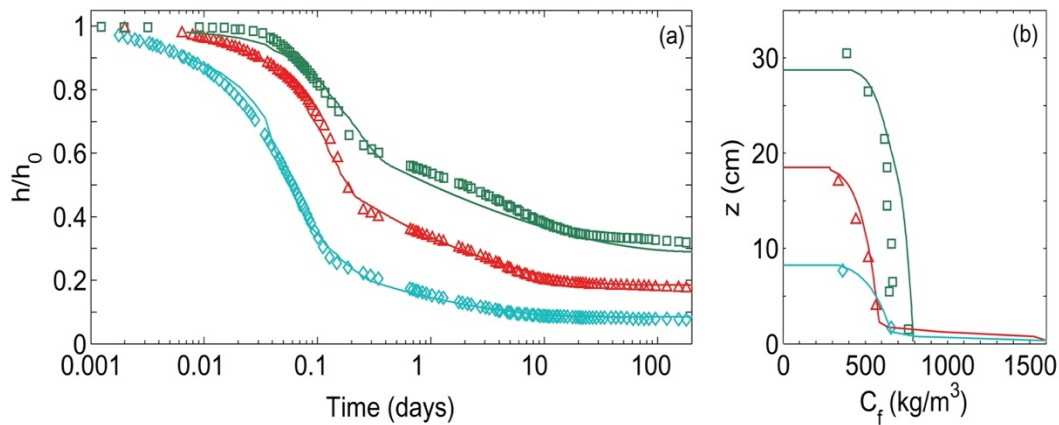


Figure 7. (a) Évolution temporelle de la hauteur relative des mélanges sédimentaires h/h_0 et (b) profils verticaux de la concentration massique C_f à la fin des expériences. Expérimentations (symboles) et simulations (lignes) pour différentes concentrations initiales C_i de mélanges sablo-vaseux (15% de sable) de la baie du Mont St Michel : $C_i = 201 \text{ kg/m}^3$ (carrés verts), $C_i = 106 \text{ kg/m}^3$ (triangles rouges) et $C_i = 54 \text{ kg/m}^3$ (losanges cyan).

Enfin, l'analyse d'expériences de consolidation issues de la littérature a permis de mettre en évidence un seuil sur la concentration relative de vase ($C_{relmud\ seg} = 200 \text{ kg/m}^3$; Grasso *et al.* [2014]) au-delà duquel il n'y a plus de ségrégation possible entre le sable et la vase. C'est-à-dire que pour une concentration sédimentaire massique inférieure à ce seuil, le sable peut se déposer plus rapidement que la vase et ainsi former un lit sableux au fond de la colonne (Figure 6b). Au-delà de ce seuil, le mélange est trop dense et le sable et la vase se déposent à la même vitesse comme un mélange homogène.

Les formulations issues de ces travaux (i.e. relations constitutives de perméabilité et de contraintes effectives) ont été intégrées au modèle MUSTANG et ont été validées par des simulations numériques 1DV (i.e. une direction verticale) visant à reproduire les expériences en colonne de sédimentation (Figure 7). Les comparaisons montrent une bonne capacité du modèle (lignes continues) à reproduire les observations (symboles) pour différents mélanges sablo-vaseux, autant sur l'évolution temporelle de la hauteur des sédiments (i.e. tassement ; Figure 7a) que sur la structure sédimentaire verticale en fin de consolidation (i.e. concentration sédimentaire et présence/absence de ségrégation ; Figure 7b).

Ce modèle de consolidation est maintenant utilisé pour la majorité des simulations réalistes que DHYSED mène en dynamique sédimentaire estuarienne [Grasso *et al.*, 2018b; Schulz *et al.*, 2018; Diaz *et al.*, 2020; Mengual *et al.*, 2020; Grasso *et al.*, 2021a; Lemoine & Le Hir, 2021].

2.2. Dynamique des vasières intertidales

L'étude des processus hydro-morpho-sédimentaires associés à la dynamique des vasières intertidales est particulièrement intéressante car les évolutions morphologiques sont fortement liées à la combinaison de conditions tidales (ex. cycles flot-jusant et vive eau 'VE' - morte eau 'ME'), météorologiques (ex. vent, vagues) et hydrologiques (ex. position du bouchon vaseux) [Deloffre *et al.*, 2006; Verney *et al.*, 2007; De Vet *et al.*, 2020]. De plus, ces milieux sont généralement difficilement praticables, rendant leur monitoring compliqué. En se basant sur l'exemple de l'estuaire de la Seine, il est discuté ici différentes approches d'observations complémentaires permettant d'obtenir une meilleure compréhension de la dynamique des vasières intertidales, depuis des échelles de temps tidales à des échelles annuelles.

Dans le cadre du volet « Mesures » du projet HYMOSED (Seine-Aval 5 ; Grasso & Verney [2017]), différentes vasières de la partie aval de l'estuaire de la Seine ont été instrumentées. Il est seulement présenté par la suite le site d'étude de la Vasière Nord (Figure 8).

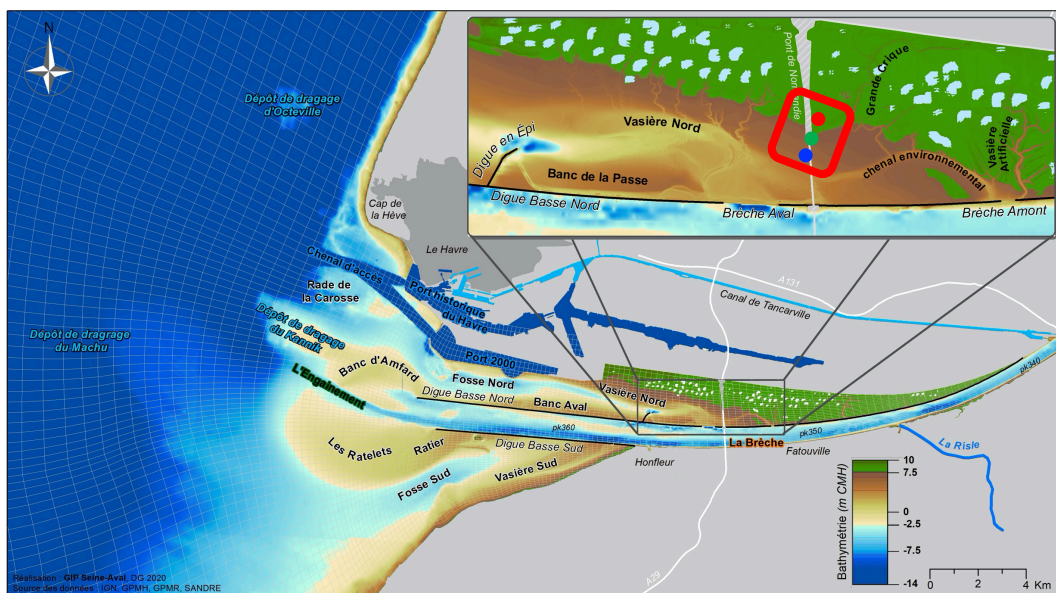


Figure 8. Partie aval de l'estuaire de la Seine et zoom sur la Vasière Nord et du site d'étude (cadre rouge). Les points représentent les positions approximatives des altimètres (VN1 : rouge ; VN2 : vert et VN3 : bleu) (source : GIP Seine-Aval).

2.2.1. Approches ponctuelles à haute-fréquence

Une méthode consiste à mettre en place des altimètres de type « échosondeur » (ALTUS ; [Bassoullet *et al.*, 2000] ; Figure 9) permettant de réaliser des mesures ponctuelles à haute fréquence ($\varnothing \sim$ minute) et haute résolution (submillimétrique). La principale limitation de ce moyen d'observation réside dans la faible couverture spatiale de la vasière, mais les mesures en continu permettent de relier plus facilement les évolutions altimétriques aux conditions hydrodynamiques [Verney *et al.*, 2007].

En collaboration avec le M2C (Rouen), des mesures altimétriques ont été réalisées entre novembre 2014 et avril 2016 (Figure 10). Ces mesures montrent une forte variabilité basse fréquence, saisonnière, à laquelle se superposent des épisodes de dépôt ou d'érosion très rapides, à l'échelle de la marée ou du cycle VE-ME. Ainsi, pour l'ALTUS le plus bas sur la slikke (VN3), des dépôts ou érosions pluri-centimétriques sont régulièrement enregistrés sur quelques marées (ex. entre 2 et 8 cm entre fin novembre 2014 et avril 2015). Une longue phase d'érosion et/ou consolidation est également observée entre mai et novembre 2015, caractérisée par un abaissement de l'interface eau-sédiment de près de 7 cm. Cette dynamique est similaire à celle observée entre juillet 2001 et mai 2003 par Deloffre *et al.* [2006]. On peut également noter une réponse cross-shore de la Vasière Nord aux forçages, avec des épisodes modulés ou absents entre les trois ALTUS.

Deloffre *et al.* [2006] avaient mis en évidence l'influence du positionnement du bouchon vaseux sur la dynamique des vasières, avec des phases d'accrétion en période de crue lorsque le bouchon vaseux était à proximité de la vasière. Nous retrouvons également cette tendance, en particulier entre février et mai 2015 lorsque la turbidité mesurée dans le chenal à Fatouville augmente. Cependant, en périodes hivernales, ces évènements de crue peuvent être concomitants avec des évènements de tempête. Pour cette raison, une analyse quantitative de l'effet des vagues sur les épisodes d'érosion-dépôt a également été réalisée.



Figure 9. Mise en place d'altimètres ALTUS sur le site de la Vasière Nord en estuaire de Seine [HYMOSED-SA5].

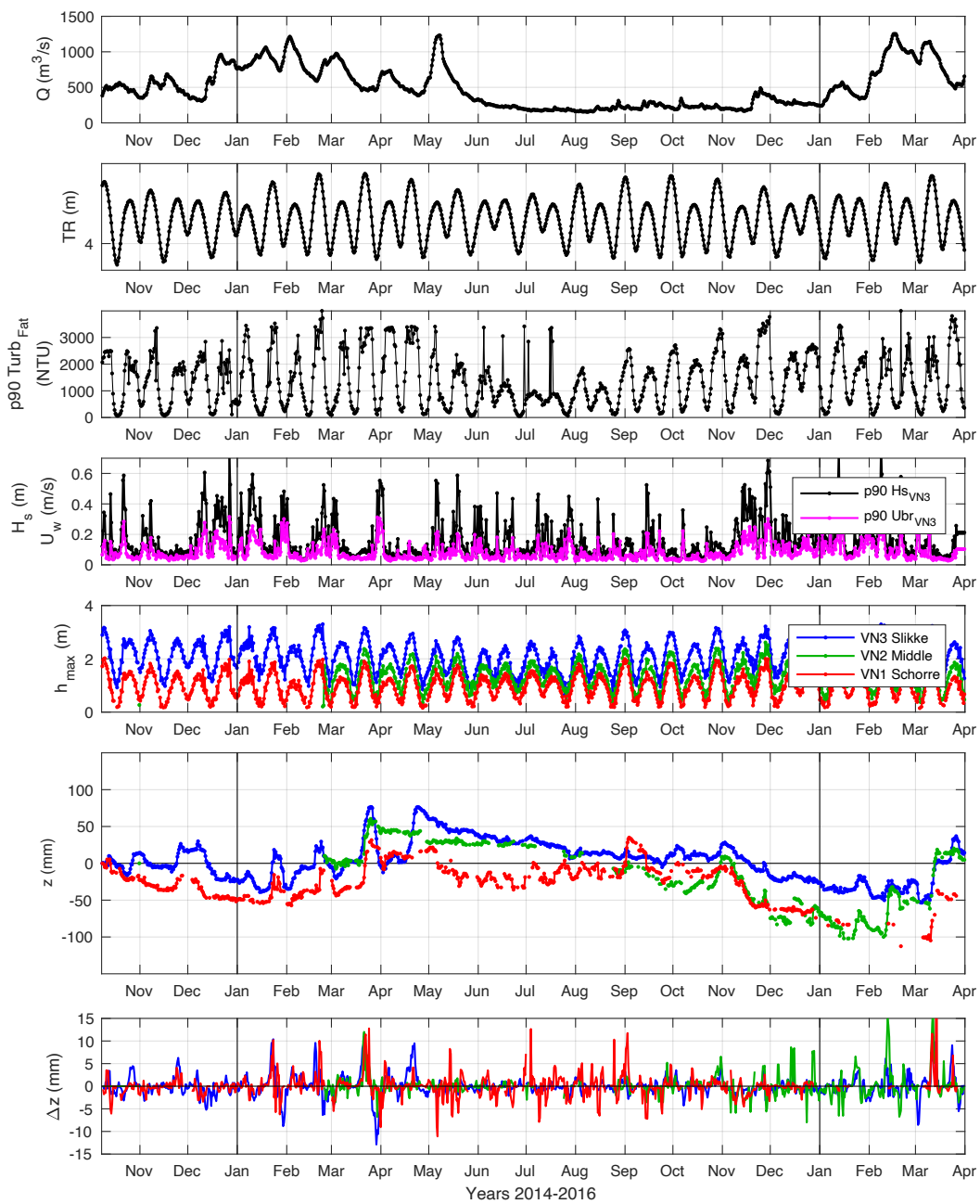


Figure 10. Évolutions altimétriques de la Vasière Nord (haut : VN1, rouge ; milieu : VN2, vert ; et bas : VN3, bleu) entre novembre 2014 et avril 2016. Débit Q , marnage TR , turbidité (Percentile 90 par marée) mesurée dans le chenal de navigation (station Fatouville SYNAPSES), hauteur significative H_s et vitesse orbitale U_w des vagues, hauteur d'eau maximale par marée h_{max} , élévation z de la vasière et différentiel d'élévation Δz entre deux marées successives.

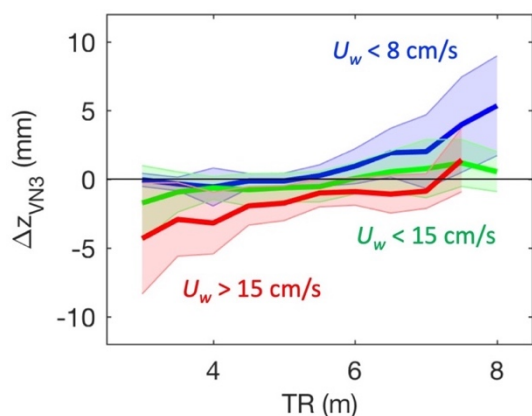


Figure 11. Corrélations entre les érosions-dépôts (Δz) mesurés par l'ALTUS de basse slikke en Vasière Nord (VN3) et le marnage TR au Havre, pour différentes conditions de vagues : faible (vitesse orbitale $U_w < 8$ cm/s ; bleu) moyenne ($U_w < 15$ cm/s ; vert) et forte ($U_w > 15$ cm/s ; rouge).

La Figure 11 met en évidence l'influence des forçages (marnage et vagues) sur les érosions-dépôts en bas d'estran (VN3). Ces érosions-dépôts sont calculés comme la différence entre deux marées successives du niveau altimétrique moyenné par cycle de marée (Δz sur la Figure 10 ; $\Delta z > 0$: dépôt et $\Delta z < 0$: érosion). Les dépôts sont principalement observés pour des marnages supérieurs à 6 m, qui correspondent à la fois à un bouchon vaseux pleinement développé et un temps d'immersion important, permettant un dépôt effectif optimal. Les dépôts sont faibles en ME (faible remise en suspension) car la source sédimentaire n'est pas suffisante pour générer un dépôt significatif. Les érosions ont principalement lieu lors d'épisodes de vagues significatifs, i.e. pour des vitesses orbitales supérieures à 15 cm/s. Et même par marées de VE, malgré une turbidité significative, on observe clairement l'absence de dépôt, voire une légère érosion.

Ces résultats confirment l'importance des vagues, bien que de faibles amplitudes, sur la dynamique des vasières, pouvant significativement impacter leur morphologie à long terme [De Vet *et al.*, 2020].

2.2.2. Approches spatiales à basse-fréquence

Le projet HYMOSED a également permis de tester de nouvelles approches de mesures altimétriques, dans le but de mieux explorer la dynamique spatio-temporelle des vasières. En collaboration avec le M2C (Rouen) et le LGO (Brest), des campagnes de mesures par TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) et par drone ont été menées sur les mêmes sites d'études où les ALTUS étaient déployés. Il est présenté ici les résultats associés aux mesures par drone (Figure 12a), représentant une forte originalité pour le suivi altimétrique des vasières intertidales [Jaud *et al.*, 2016].



Figure 12. (a) Mise en œuvre du drone et (b) exemple de cible utilisée pour le référencement DGPS.

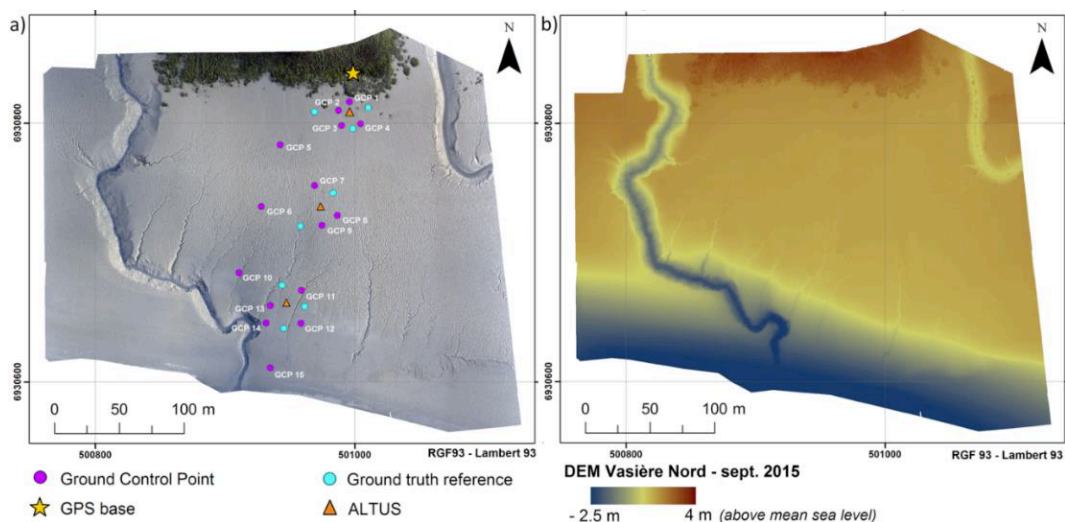


Figure 13. (a) Orthophotographie et (b) MNT d'une zone de la Vasière Nord en septembre 2015.

La mesure topographique aéroportée se base sur un principe de stéréophotogrammétrie, qui consiste à déduire une élévation du terrain à partir de deux images successives géoréférencées [Colomina & Molina, 2014]. Cette méthode, nécessitant la mise en place de cibles référencées par DGPS (Figure 12b), permet d'obtenir une orthophotographie (Figure 13a) et un modèle numérique de terrain (MNT, Figure 13b) avec une résolution verticale d'environ 2 cm et une résolution horizontale d'environ 4 cm (taille du pixel dépendant de l'altitude de vol). Le protocole et les caractéristiques de mesures sont davantage détaillés par Grasso & Verney [2017].

Dans les environnement côtiers, cette méthode était principalement utilisée pour le suivi topographique des plages sableuses ou des falaises [Mancini *et al.*, 2013], mais le suivi des vasières présentait plus de difficultés à causes des faibles variations altimétriques ($\varnothing \sim \text{cm}$) et de la saturation en eau du sédiment vaseux en surface (effet miroir).

Trois campagnes ont eu lieu sur un an (septembre 2014, mars et septembre 2015), permettant de valider le potentiel de cette approche pour les problématiques estuariennes. La résolution actuelle reste trop grossière pour suivre les faibles évolutions morphologiques à haute fréquence, mais le suivi morphologique à l'échelle saisonnière, voir évènementielle, est pertinent (Figure 14). En plus du suivi altimétrique de la partie sédimentaire de la vasière, cet outil permet de bien mesurer l'évolution des herbiers du schorre. On note par exemple une décroissance d'environ 20 cm de la végétation en période hivernale (de septembre 2014 à mars 2015 ; Figure 14a), mais une croissance équivalente en période estivale (de mars 2015 à septembre 2015 ; Figure 14b). A l'échelle annuelle, peu de variations sont observées sur le niveau de croissance de la végétation (de septembre 2014 à septembre 2015 ; Figure 14c), mais un retrait significatif du schorre (de 1 à 2 m) est clairement visible (liseré bleu sur la Figure 14c). Enfin, ce type de suivi aérien est particulièrement adapté à l'analyse morphodynamique des filandres (ex. Figure 13). Ce point est davantage discuté dans la Section 5.2.3.

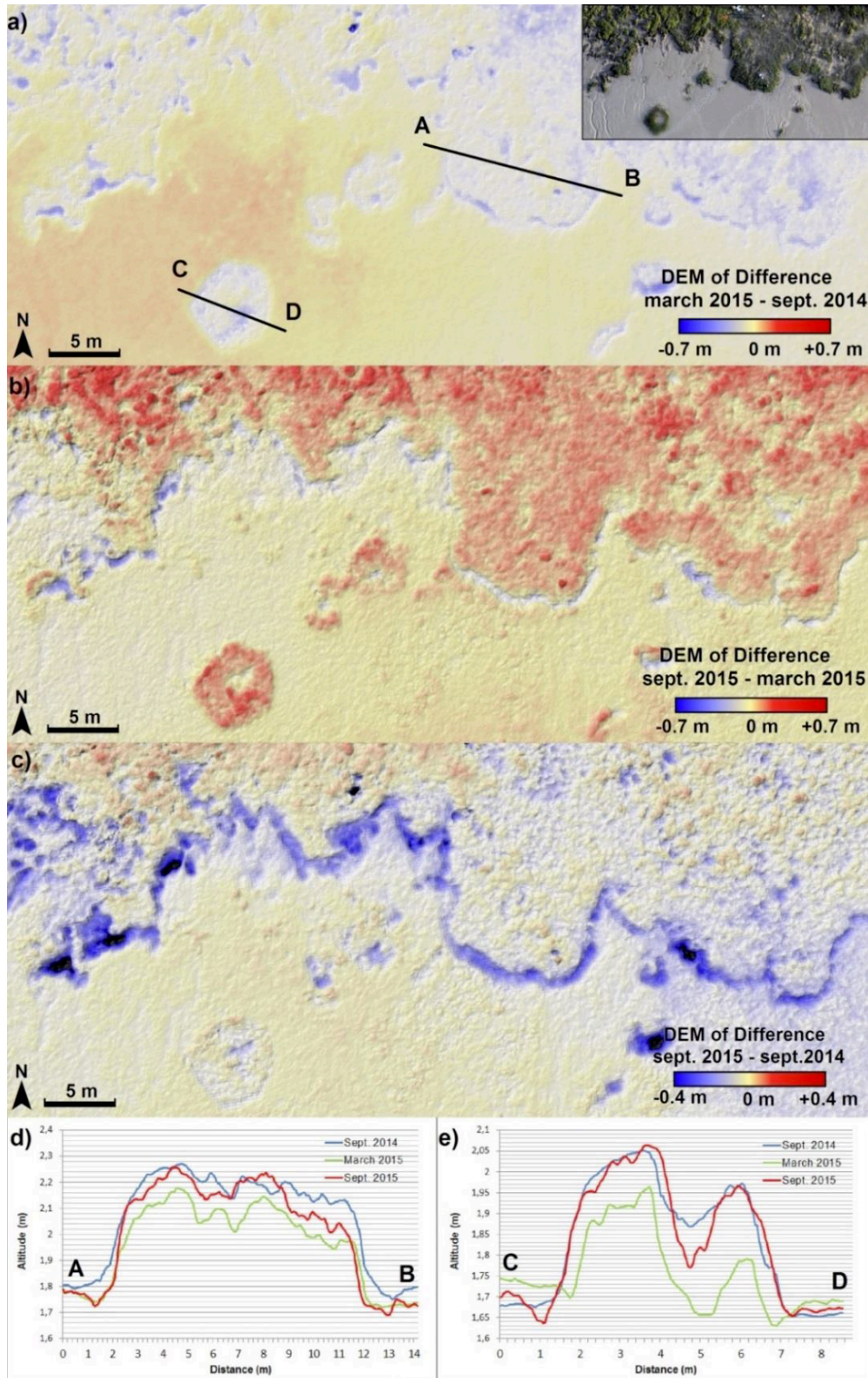


Figure 14. Différentiels de MNT en haut de Vasière Nord (schorre) : (a) entre mars 2015 et septembre 2014 (avec orthophotographie en vignette), (b) entre septembre et mars 2015, et (c) entre septembre 2015 et septembre 2014. (d) Exemples d'évolutions temporelles de coupes verticales [Jaud et al., 2016].

2.3. Dynamique du bouchon vaseux

Le bouchon vaseux (BV) est une structure sédimentaire caractéristique de nombreux estuaires tidaux à l'échelle mondiale [Yu *et al.*, 2014; Jalón-Rojas *et al.*, 2015; McSweeney *et al.*, 2016; Abascal-Zorrilla *et al.*, 2020]. Cette zone de forte remise en suspension des sédiments modifie les échanges particulières entre les fleuves et les mers côtières, contrôle l'envasement des chenaux de navigation et des zones intertidales adjacentes, et impacte les processus biogéochimiques estuariens [Billen *et al.*, 2007; Petit *et al.*, 2013].

Étudiés depuis de nombreuses années [Allen *et al.*, 1980; Uncles & Stephens, 1989], les principaux processus responsables de la formation du BV sont maintenant relativement bien connus (Figure 15; Burchard *et al.* [2018]). La convergence des sédiments résulte principalement : (i) du « pompage tidal » induit par les asymétries de marée (i.e. différences de vitesses et de durées des courants de flot et jusant) ; et (ii) de la circulation barocline induite par les gradients longitudinaux de salinité [Brenon & Le Hir, 1999; Scully & Friedrichs, 2007]. De plus, les variations tidales du mélange vertical ainsi que sa décroissance le long de l'estuaire favorisent l'accumulation de sédiment à la limite d'intrusion saline [Geyer, 1993].

Néanmoins, le développement récent de modélisations numériques réalistes *process-based* représente une avancée significative. Validées à partir de mesures haute-fréquence ($\mathcal{O} \sim$ minutes), les simulations numériques permettent entre autres de mieux discriminer les effets des forçages sur les processus hydro-sédimentaires responsables de la dynamique du BV [Zhu *et al.*, 2021].

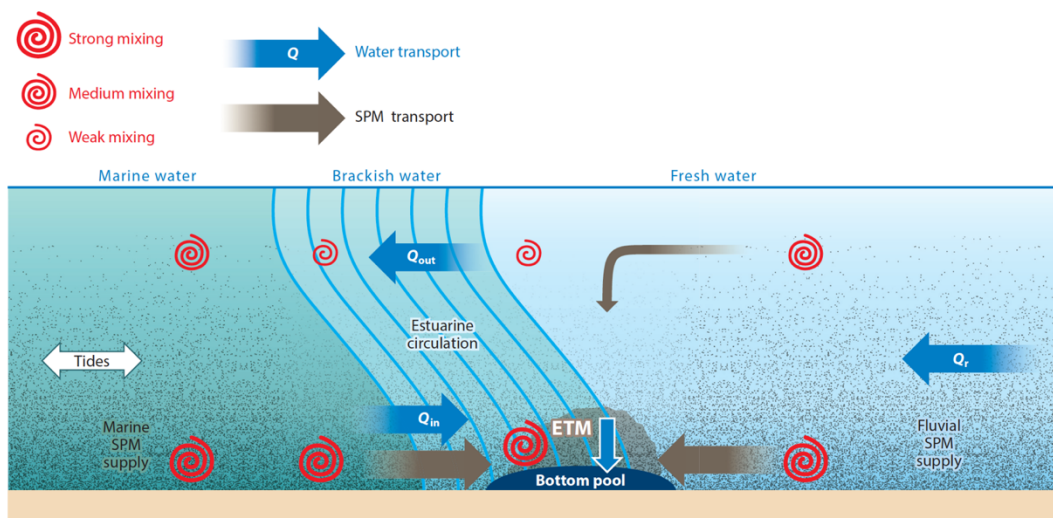


Figure 15. Principaux processus responsables de la convergence des particules en suspension (SPM) et de la formation du BV (ETM) à la limite d'intrusion saline [Burchard *et al.*, 2018].

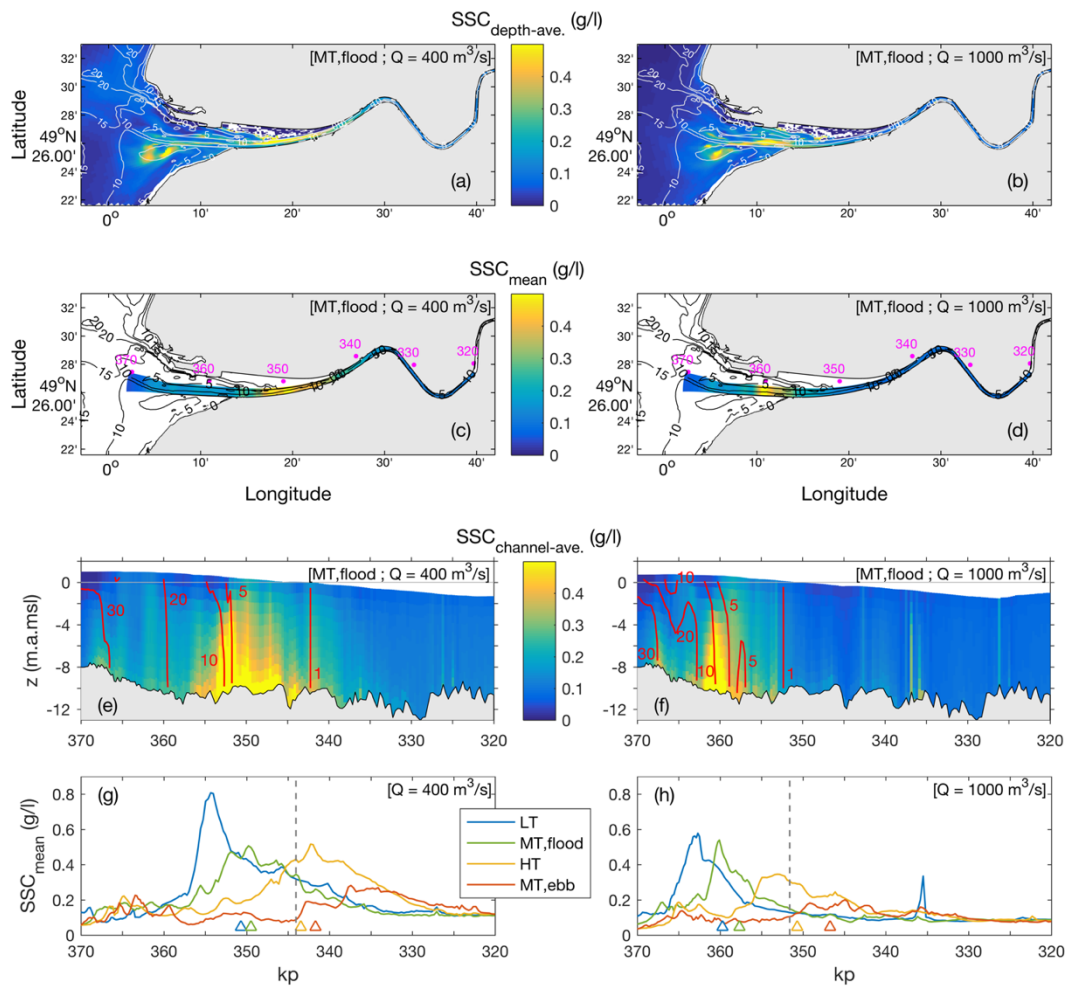


Figure 16. Méthodologie pour estimer le positionnement et la masse du BV. Simulations des concentrations en MES (SSC) par débit moyen ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$; gauche) et fort ($Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$; droite). Cartes de la concentration de vase en pic de flot (MT,flood) : (a, b) moyennée sur la colonne d'eau, avec contours bathymétriques en blanc ; (c, d) moyennée sur la colonne d'eau et la section, avec contours bathymétriques en noir et points kilométriques (pk) en magenta. (e, f) Coupes verticales de la concentration de vase moyennée sur la section, avec les isohalines en rouge. (g, h) Profils longitudinaux de la concentration de vase moyennée sur la colonne d'eau et la section, pour différents instants de la marée (basse mer : LT ; pic de flot : MT,flood ; pleine mer : HT ; pic de jusant : MT,ebb). Les triangles représentent la position du BV (i.e. centre de gravité du profil longitudinal) [Grasso et al., 2018b].

2.3.1. Dynamique du bouchon vaseux en réponse aux forçages hydrométéorologiques

Dans le cadre des projets MODEL et HYMOSED (Seine-Aval 4 et 5), une nouvelle configuration de modélisation numérique réaliste a été mise en place en estuaire de Seine (CurviSeine ; cf. Section 1.4). Les simulations hydro-sédimentaires ont été validées à partir des mesures du réseau SYNAPSES (2014-2015) et leur analyse a permis de finement caractériser la dynamique du BV de l'échelle tidale à annuelle [Grasso *et al.*, 2018b].

La méthode utilisée pour détecter la position du BV consiste à déterminer le centre de gravité du profil de concentration de vase le long de l'estuaire (Figure 16), puis le calcul de la masse se fait par l'intégration de ces concentrations. Le BV a ainsi pu être quantifié avec un pas de temps semi-horaire et mis en relation avec les forçages hydrométéorologiques.

La masse du BV est fortement corrélée au marnage (Figure 17a et b) dû à la plus forte remise en suspension des sédiments par les courants de marée en VE. Le phasage du cycle VE-ME, caractérisé par le gradient du marnage ($dTR = (TR_{t+1} - TR_{t-1})/2$), joue aussi un rôle. Pour un même marnage, il y a une hystérésis avec une masse plus importante en déchet ($dTR < 0$) qu'en revif ($dTR > 0$) à cause de l'inertie pour mettre en suspension les sédiments (Figure 17a).

En soustrayant la tendance associée au marnage (traits pointillés sur la Figure 17b) à la masse du BV, il est possible de mieux identifier les effets de second ordre associés au débit et aux vagues (Figure 17c et d). Le débit a peu d'influence sur la masse du BV, car même en période de crue les apports du fleuve restent faibles comparés aux concentrations en MES dans le BV. Cependant, ces résultats mettent en évidence que les vagues peuvent significativement augmenter la masse du BV, en particulier pour les plus fortes tempêtes ($H_s > 2$ m à l'embouchure).

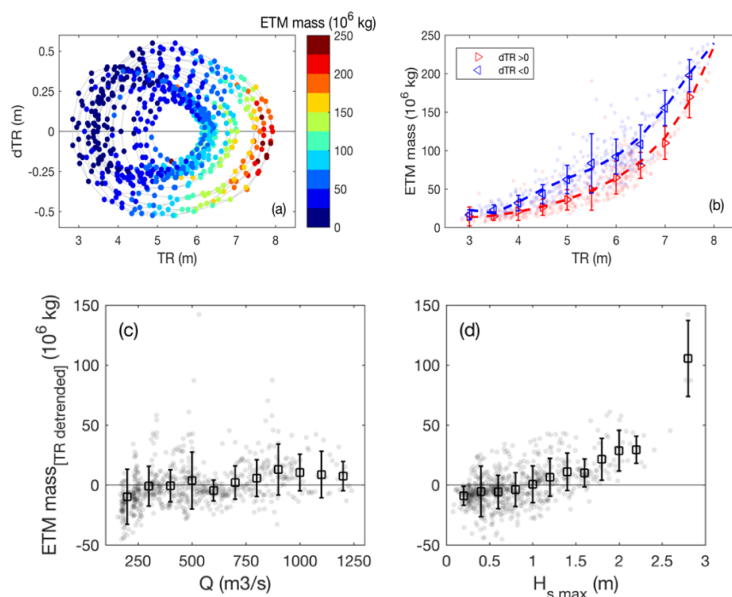


Figure 17. (a, b) Masse du BV (max par marée) en fonction du marnage TR et de son évolution ($dTR < 0$: déchet ; $dTR > 0$: revif). Anomalie de masse du BV (« detrended » du marnage) en fonction : (c) du débit Q de la Seine, et (d) de la hauteur significative des vagues $H_{s,max}$ à l'embouchure (max par marée) [Grasso *et al.*, 2018b].

2.3.2. Dynamique du bouchon vaseux en réponse aux forçages anthropiques

L'analyse de la dynamique du BV s'est poursuivie dans le cadre du projet ANPHYECO (Seine-Aval 5), en comparant son comportement pour différentes morphologies de l'estuaire représentatives du siècle passé (1960, 1975 et 2010 ; Figure 18). Partant d'un état relativement naturel en 1960, le système a ensuite été fortement anthropisé [Avoine *et al.*, 1981], marqué par l'approfondissement des chenaux de navigation pour accéder aux Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen (GPMH et GPMR), et par des extensions portuaires (ex. Port 2000 pour le GPMH). Cela s'est traduit en 2010 par un estuaire plus profond et plus étroit qu'en 1960.

Dans d'autres estuaires tidaux européens (ex. Ems, Loire), ce type de perturbation anthropique à causer des changements d'état (hydrodynamique, hydrologique et sédimentaire), passant de systèmes « normaux » à « hyper-turbides » [Winterwerp & Wang, 2013; Winterwerp *et al.*, 2013; Van Maren *et al.*, 2015]. Nous avons donc réalisé une analyse diachronique afin de mieux quantifier les impacts des modifications morphologiques sur la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de Seine [Grasso & Le Hir, 2019].

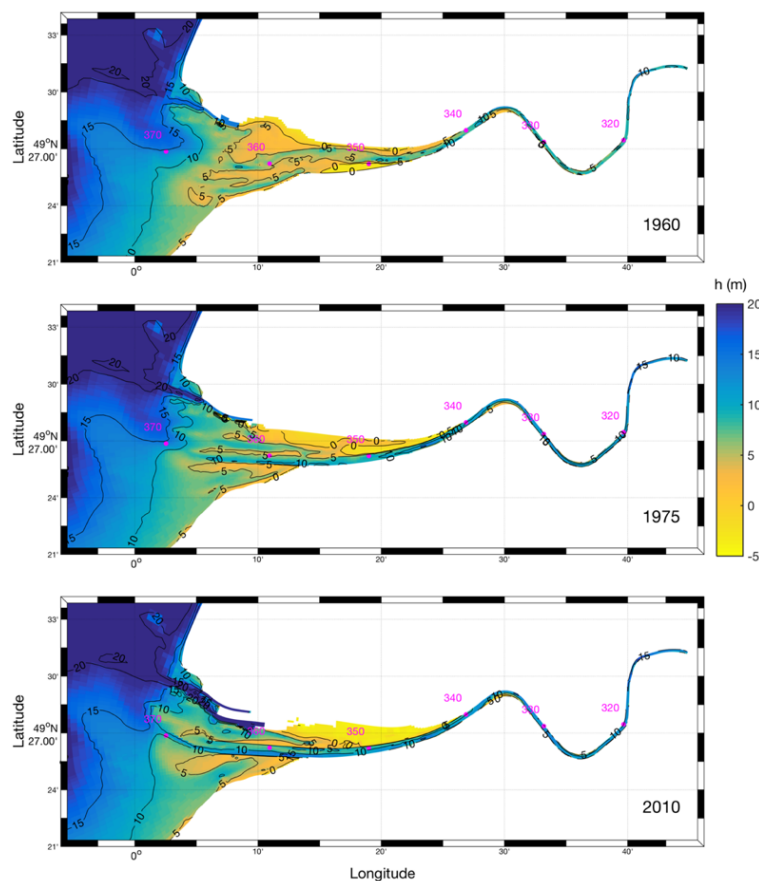


Figure 18. Bathymétries (par rapport au niveau moyen de la mer) de la partie aval de l'estuaire de Seine (haut) en 1960, (milieu) en 1975 et (bas) en 2010. Les contours noirs représentent les isobathes et les points magenta représentent les points kilométriques (kp sur la Figure 19) [Grasso & Le Hir, 2019].

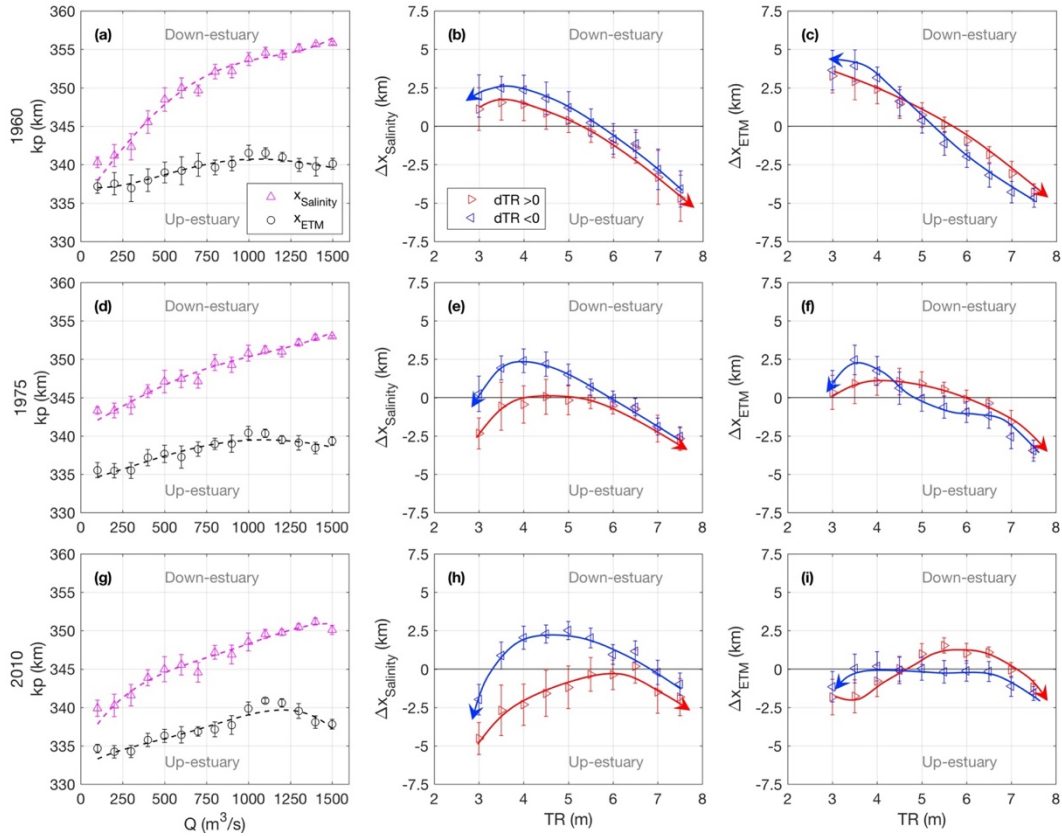


Figure 19. (Gauche) Position du front de salinité $x_{Salinity}$ (triangles magenta) et du BV x_{ETM} (ronds noirs) en fonction du débit Q de la Seine. Variations (centre) du front de salinité $\Delta x_{Salinity}$ et (droite) du BV Δx_{ETM} autour de la position moyenne associée au débit (courbes tiretées sur les graphes de gauche), en fonction du marnage TR et de son évolution ($dTR < 0$: déchet, bleu ; $dTR > 0$: revif, rouge) [Grasso & Le Hir, 2019].

Les mêmes forçages hydrométéorologiques (i.e. marée, débit, vent, vagues) d'une année représentative de la période actuelle (2010-2011) ont été appliqué aux trois bathymétries (i.e. 1960, 1975 et 2010). La méthode d'identification de la position du BV présentée ci-dessus (Figure 16; Grasso *et al.* [2018b]) a été utilisée pour comparer la dynamique du BV. Cependant, la position du BV est ici définie comme la limite amont de l'extension du BV, caractérisant la plus forte remontée du BV par marée. Le débit de la Seine contrôle principalement le positionnement du front de salinité (isohaline à 1 psu) et du bouchon vaseux, avec une migration vers l'amont par faible débit et inversement une migration vers l'aval par fort débit (Figure 19a, d et g). Autour de la position moyenne contrôlée par le débit, la position du front de salinité et du BV dépend fortement du marnage (Figure 19b-c, e-f, et h-i). En 2010, on observe la signature de deux processus distincts (Figure 19h et i) :

- La circulation barocline renforcée en ME par la stratification ($TR < 4$ m), favorisant la remontée du front de salinité et du BV vers l'amont ($\Delta x < 0$) ;
- Le pompage tidal renforcé en VE par les courants de marée plus forts ($TR > 6$ m), favorisant également la remontée du BV vers l'amont ($\Delta x < 0$).

De manière similaire à la dynamique de la masse du BV (Figure 17a et b), on note une hystérésis entre les phases de déchet et revif. C'est à dire qu'il faut un certain temps pour que les processus se mettent en place et donc une certaine inertie avant que le BV n'atteigne sa position d'équilibre.

La situation est très contrastée en 1960 (Figure 19b et c). On retrouve la signature du pompage tidal, mais pas celle de la circulation barocline (i.e. pas de remontée du front de salinité et du BV en ME). Cela s'explique principalement par la plus faible profondeur du chenal principal en 1960 qui favorise le mélange de la colonne d'eau même par faible courant. L'intrusion saline est donc située plus en aval en 1960 (Figure 20a) et la stratification verticale est plus faible qu'en 2010 (Figure 20b). La situation en 1975 est intermédiaire à celles de 1960 et 2010, avec une circulation barocline qui devient plus intense par l'effet de l'approfondissement du chenal de navigation (Figure 19e et f).

En comparaison avec les estuaires de l'Ems et de la Loire pour lesquels des changements d'états sédimentaires ont eu lieu [Winterwerp *et al.*, 2013; Dijkstra *et al.*, 2019], nous observons en 2010 une intensification du maximum de concentration en MES par rapport à la situation de 1960 (+25 % ; Figure 20c). Cette augmentation de la turbidité, associée à une remontée du BV vers l'amont, résulte principalement des actions anthropiques (i.e. rétrécissement et approfondissement), mais l'estuaire de Seine ne semble pas encore avoir atteint un changement d'état vers un système « hyper-turbide ».

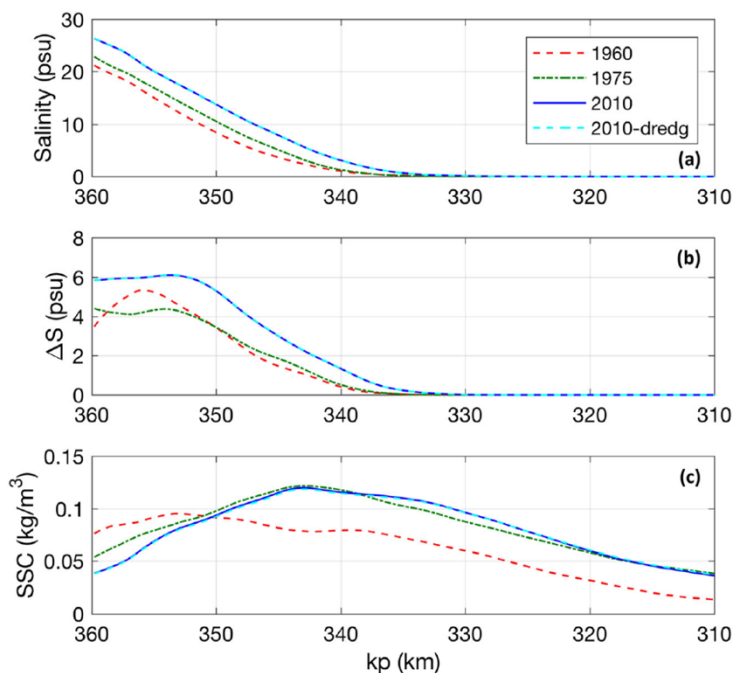


Figure 20. Moyenne annuelle des profils longitudinaux (a) de la salinité de fond, (b) du gradient vertical de salinité ΔS et (c) de la concentration de vase en surface (SSC), pour les bathymétries de 1960 (rouge), 1975 (vert), et 2010 sans dragage (bleu) et avec dragage (cyan) [Grasso & Le Hir, 2019].

2.4. Interactions physique-biologie

Les milieux marins semi-abrités (ex. baies, estuaires) représentent des habitats privilégiés pour le développement de communautés benthiques et pélagiques. Le compartiment physique (biotope) impacte directement le compartiment biologique (biota) via les forçages hydrodynamiques (ex. hauteur d'eau, courant), hydrologiques (ex. température, salinité) et sédimentaires (ex. MES, nature du fond) [Orvain & Sauriau, 2002]. Cependant, le biota (faune et flore) peut aussi rétroagir sur la physique hydro-sédimentaire par des processus de :

- Biodéposition : ex. par l'activité de filtration de la macrofaune benthique [Graf & Rosenberg, 1997; Barillé *et al.*, 2006] ;
- Bioturbation : ex. par l'effet de la macrofaune benthique modifiant l'écoulement [Moulin *et al.*, 2007] ou perturbant le lit sédimentaire (projet BARBÈS, Seine-Aval 5) [de Deckere *et al.*, 2001; Le Hir *et al.*, 2007] ;
- Biostabilisation : ex. par l'effet du microphytobenthos (projet PHARE-SEE, Seine-Aval 6) [Tolhurst *et al.*, 2002; Orvain *et al.*, 2004].

En collaboration avec les biologistes de DYNECO/LEBCO, nous avons mené des expériences en mésocosme au CEDRE (Brest) afin de mieux comprendre les interactions physique-biologie associées à la présence de crépidules (gastéropode *Crepidula fornicata*) en Rade de Brest (projet européen H2020 HYDRALAB+ ; Grasso *et al.* [2018a]; Grasso *et al.* [2020b]). Plus particulièrement, ces expériences avaient pour objectif de déterminer les processus expliquant le fort envasement des bancs de crépidules en Rade de Brest [Blanchard, 1997; Androuin *et al.*, 2018].

Les expériences ont été réalisées dans un canal annulaire permettant de générer des conditions de courant et de vagues représentatives de la Rade de Brest en présence de sédiment, d'eau salée et de biologie (Figure 21). L'analyse a consisté à comparer des expériences avec présence/absence de crépidules mortes ou vivantes pour différentes conditions hydrodynamiques (Figure 22). Pour cela, les crépidules ont été récoltées en Rade de Brest avec le sédiment vaseux naturellement présent.

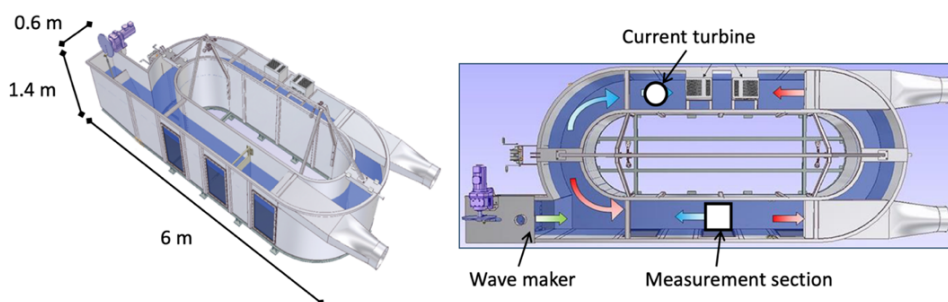


Figure 21. Schéma du canal (« Polludrome » du CEDRE) utilisé pour les expériences en mésocosme.

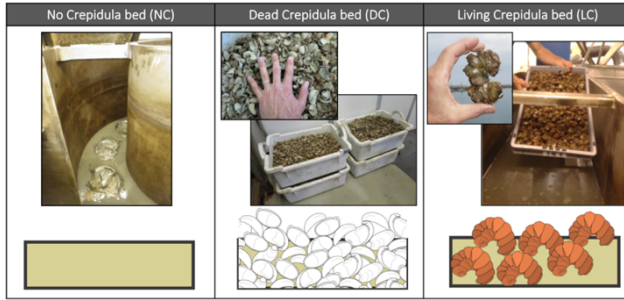


Figure 22. Représentation des trois séries de tests : (gauche) sans crépidules NC, (milieu) avec crépidules mortes DC et (droite) avec crépidules vivantes LC.

L'étude de l'influence des crépidules sur la dynamique sédimentaire s'est focalisée sur la phase de sédimentation des particules après une période de remise en suspension par le courant. Une nouvelle méthode a été proposée pour estimer la vitesse de chute des sédiments à partir de mesures de turbidité par capteurs optiques ou acoustiques. Cette méthode s'appuie sur le concept de la colonne à décanter de Owen [1976], mais en quantifiant la chute des particules par l'intégration de la concentration en MES plutôt que par la mesure de masse. La vitesse de décantation des sédiments w_s a pu ainsi être quantifiée pour chaque test et liée aux concentrations en MES initiales SPM_0 (i.e. au début de la phase de décantation ; Figure 23).

Les résultats issus des tests sans crépidules et avec crépidules mortes montrent une relation $w_s = f(SPM_0)$ similaire (carrés et ronds), caractéristique de la floculation qui s'intensifie pour les fortes concentrations en MES, augmentant ainsi la vitesse de chute [Winterwerp *et al.*, 2006; Verney *et al.*, 2009]. L'effet de la biofiltration des crépidules est visible pour les tests avec crépidules vivantes LC1-2 (triangles rouges), avec une augmentation de la vitesse de chute jusqu'à +40% en accord avec Barillé *et al.* [2006]. Néanmoins, c'est pour les tests en fin d'expériences (LC3-5 ; triangles magenta) que l'augmentation de la vitesse de chute est la plus marquée. Le croisement des mesures optiques et acoustiques de la turbidité met en évidence un changement des caractéristiques des MES, représentatif d'une intensification de la floculation, qui s'expliquerait par une augmentation de la teneur en matière organique dans la colonne d'eau [Mietta *et al.*, 2009].

Ainsi, ces expérimentations ont mis en évidence l'effet combiné des processus de biofiltration et de floculation, accélérant la décantation des MES sur les bancs de crépidules vivantes. Ces processus expliquent en partie le fort envasement observé en Rade de Brest sur les bancs de crépidules vivantes.

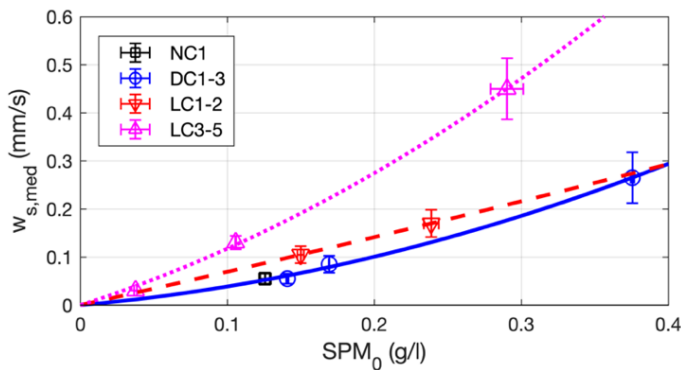


Figure 23. Vitesse de chute $w_{s,med}$ en fonction de la concentration initiale en MES SPM_0 pour des tests : sans crépidules (NC) et avec des crépidules mortes (DC) ou vivantes (LC). 5 jours séparent les tests LC1-2 et LC3-5, durant lesquels la teneur en matière organique a significativement augmenté [Grasso *et al.*, 2020b].

3. Flux et bilans sédimentaires le long du continuum terre-mer

3.1. Sensibilité et incertitudes sur l'estimation des flux sédimentaires

Les estuaires représentent des interfaces dynamiques où interagissent les particules d'origine continentales et marines. Les processus internes aux systèmes estuariens jouent un rôle de filtre venant moduler les échanges terre-mer. Il est donc important de comprendre et quantifier les flux particuliers nets (i.e. résiduels) à l'embouchure des estuaires pour connaître le devenir des habitats estuariens, mais aussi pour estimer le transfert des particules, vecteurs des nutriments, polluants et contaminants.

Les outils de modélisation numériques 3D permettent de simuler ce type de transferts pour différents scénarios hydrométéorologiques. Cependant, malgré la validation de ces modèles à partir de mesures de turbidité issues des réseaux d'observation, il reste de fortes incertitudes sur l'estimation des flux sédimentaires. Cela s'explique par le manque de mesures directes des flux, mais aussi par la formulation empirique de nombreux processus dans les modèles dit « déterministes ». Sachant qu'il est aussi important de connaître la quantité estimée que l'incertitude associée à cette estimation, les travaux suivants visent à développer ces notions trop souvent négligées.

3.1.1. Sensibilité des flux à la paramétrisation du transport sédimentaire

Dans le cadre du projet ANR AMORAD, une de nos études s'est attachée à quantifier les incertitudes sur les flux sédimentaires à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde (Le Verdon, Figure 24), associées au choix de paramétrisation sédimentaire [Diaz *et al.*, 2020]. Cette étude se base sur le principe d'équifinalité, i.e. que la combinaison de différentes paramétrisations peut mener au même niveau de validation [van Maren & Cronin, 2016]. Par exemple, le même niveau de turbidité peut être simulé à un point donné, pour différentes calibrations de l'érosion-dépôt : une forte érodabilité associée à une grande vitesse de chute peut induire localement une turbidité similaire à une faible érodabilité associée à une faible vitesse de chute. En d'autres termes, cela veut dire qu'on peut arriver à un résultat satisfaisant mais pour de mauvaises raisons. Ce constat particulièrement dérangeant, provient principalement de l'empirisme des paramètres de calibration des formulations déterministes. Néanmoins, il est possible de réduire ce problème d'équifinalité en augmentant les sources de comparaison (ex. augmenter le nombre de stations de mesures dans un estuaire).

Sachant qu'il est très difficile d'obtenir des mesures fiables des flux sédimentaires nets à l'échelle annuelle (cf. Section suivante « Validation des flux sédimentaires »), la méthode adoptée ici a consisté à étudier la variabilité des flux sédimentaires pour différentes paramétrisations présentant des performances similaires en termes de concentration en MES. Une trentaine de simulations annuelles ont été générées, pour lesquelles les comparaisons aux observations des stations de mesures dans l'estuaire (Pauillac et Bordeaux ; réseau MAGEST) étaient satisfaisantes (i.e. erreur quadratique normalisée $RMSE_{norm} < 1$; Jolliff *et al.* [2009]).

L'étude paramétrique s'est basée sur les formulations les plus déterminantes pour le transport sédimentaire : (i) la vitesse de chute de la vase ; (ii) l'érodabilité des sédiments sablo-vaseux ; et (iii) des paramètres additionnels comme l'initialisation sédimentaire, la durée de *spin-up* et la discrétisation verticale de la colonne d'eau. La synthèse de ces simulations est illustrée sur la Figure 25 par la variabilité des flux cumulés au cours de l'année 2015.

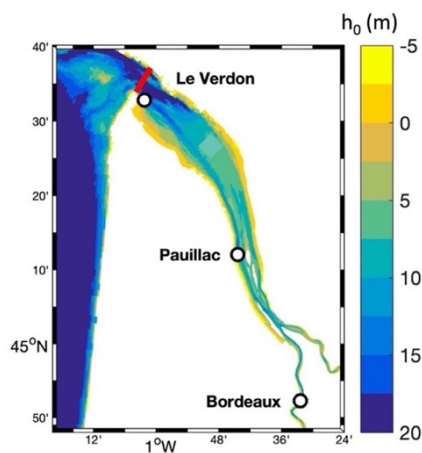


Figure 24. Bathymétrie h_0 de l'estuaire de la Gironde et (ronds) positions des stations de mesures du réseau d'observation MAGEST. La ligne rouge représente la frontière à laquelle sont calculés les flux sédimentaires à l'embouchure.

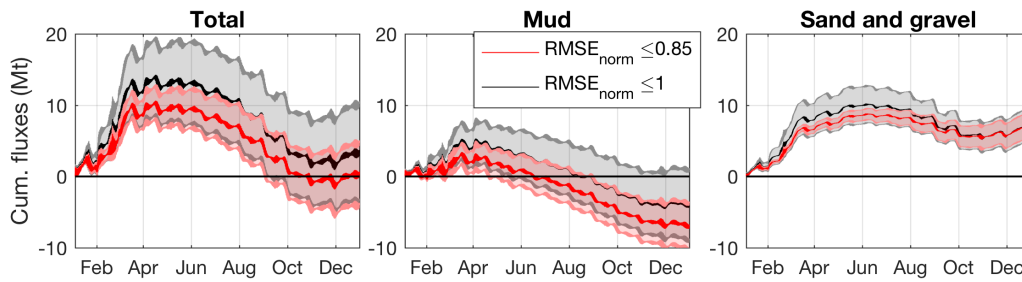


Figure 25. Flux sédimentaires cumulés à l’embouchure de l’estuaire de la Gironde (Le Verdon, Figure 24) au cours de l’année 2015 (flux positif vers l’amont) pour les sédiments (a) totaux, (b) vaseux et (c) sablo-graveleux. Flux moyens (trait plein) et écarts type (transparence) pour différents niveaux de validation en turbidité : $RMSE_{norm} < 1$ (gris) et $RMSE_{norm} < 0,85$ (rouge) [Diaz et al., 2020].

Pour la majorité des simulations, les flux nets annuels sont cohérents avec une tendance à l’export pour les vases et à l’import dans l’estuaire pour les sables et graviers. Malgré un niveau de validation satisfaisant en concentration en MES ($RMSE_{norm} < 1$), on note que la variabilité associée aux flux de vase reste très élevée (-4 ± 5 Mt/an, valeur (noir) et écart type (gris) en fin de simulation), alors que celle des sables est deux fois plus faible. Enfin, ces résultats mettent en évidence plusieurs besoins :

- Avoir une meilleure quantification des incertitudes associées aux simulations numériques ;
- Améliorer notre compréhension et conceptualisation des processus estuariens ;
- Intensifier l’effort d’observation dédié à la quantification des flux sédimentaires.

3.1.2. Validation des flux sédimentaires

Il existe actuellement peu de moyens pour valider de manière directe les flux sédimentaires entre les estuaires et les mers côtières adjacentes :

- Les mesures ponctuelles issues des réseaux d’observations peuvent difficilement être extrapolées à une section complète de l’estuaire [Druine, 2018] ;
- Les mesures le long de radiales (ex. ADCP tracté par un navire) permettent de fournir une coupe verticale de la section, mais n’apportent pas une vision instantanée de la dynamique et ne peuvent pas être réalisées en continu pour étudier l’influence des régimes tidaux et hydrologiques [Geyer et al., 2001] ;
- Les observations par imagerie satellite (couleur de l’eau) n’apportent qu’une information sur les concentrations sédimentaires en surface et ont une résolution spatio-temporelle limitée [Constantin et al., 2018].

Toutefois, il existe une méthode indirecte qui consiste à comparer les bilans sédimentaires mesurés et simulés dans une zone d’intérêt, sachant que la variation du volume sédimentaire est associée à un flux entrant ou sortant de cette zone [Ganju & Schoellhamer, 2009].

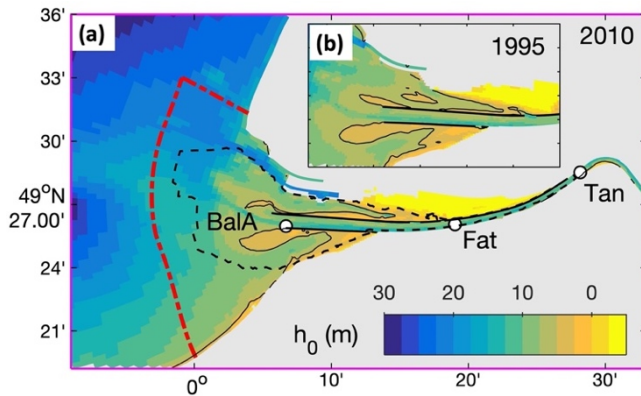


Figure 26. Bathymétrie h_0 de l'estuaire de la Seine (a) en 2010 et (b) en 1995, et (rond) positions des stations de mesures du réseau d'observation SYNAPSES. La ligne point-tirée rouge représente la frontière à laquelle sont calculés les flux sédimentaires à l'embouchure et le contour tiré noir délimite le domaine de comparaison des bilans sédimentaires de l'embouchure.

Dans le cas de la Seine, la validation des flux sédimentaires entre l'estuaire et la baie (ligne rouge sur la Figure 26) s'est appuyée sur les levés bathymétriques réalisés annuellement dans l'embouchure (contour tiré noir) par le GPMR entre 2005-2015 [Grasso *et al.*, 2021a]. Il faut noter que la mesure du volume de l'embouchure est associée à de très fortes incertitudes dues à la précision des levés bathymétriques (± 10 cm) et à la durée pour couvrir la zone (~ 6 mois) (moustaches sur la Figure 27).

On note que le modèle MARS3D CurviSeine (M3D, ronds marrons) simule de manière satisfaisante l'évolution du volume sédimentaire de l'embouchure, apportant un degré de confiance raisonnable dans la capacité du modèle à simuler les flux sédimentaires à l'échelle pluriannuelle. Il est important de relever que dans ce travail les simulations M3D ont été réalisées en morphostatique, i.e. sans couplage morphodynamique, à partir de la bathymétrie de 2010. Les érosions-dépôts sont pris en compte via l'évolution de l'épaisseur du lit sédimentaire, mais ces variations ne viennent pas modifier la bathymétrie et ne modifient donc pas l'hydrodynamique. Ces simulations morphostatiques sont comparées à des simulations réalisées par ARTELIA avec TELEMAC3D en morphodynamique (T3D, points bleus). La bonne adéquation entre les deux simulations permet de valider l'approche morphostatique pour des durées de simulation à ± 5 ans autour d'une bathymétrie donnée (faibles évolutions morphologiques), et renforce la confiance dans la simulation des flux sédimentaires.

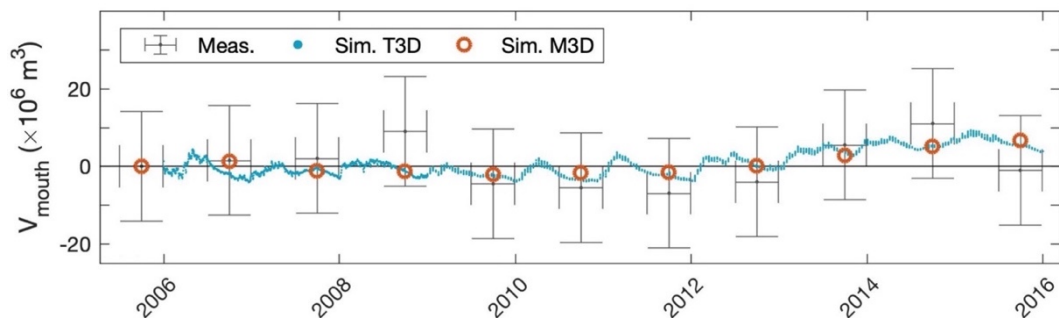


Figure 27. Évolution du volume sédimentaire de l'embouchure V_{mouth} (contour tiré noir sur la Figure 26) entre 2005 et 2015 : mesuré par le GPMR (moustaches noires), simulé par ARTELIA avec le modèle TELEMAC3D en morphodynamique (T3D, points bleus) et simulé avec le modèle MARS3D CurviSeine en morphostatique (M3D, ronds marrons) [Grasso *et al.*, 2021a].

3.1.3. Stabilité des flux sédimentaires

Pour que la simulation des flux sédimentaires soit pertinente, il faut s'assurer que le système considéré soit à l'équilibre et ne dépende plus de l'initialisation. La durée de *spin-up*, i.e. le temps de simulation nécessaire pour que les conditions initiales n'impactent plus les résultats, dépend beaucoup de l'objet d'étude. Par exemple, la durée de *spin-up* est \mathcal{O} ~ jour pour étudier la dynamique tidale, \mathcal{O} ~ mois pour l'hydrologie, et \mathcal{O} ~ année pour le bouchon vaseux [Grasso *et al.*, 2018b; Schulz *et al.*, 2018; Grasso & Le Hir, 2019; Diaz *et al.*, 2020; Grasso *et al.*, 2021a]. Cette durée dépend également de la distribution initiale du lit sédimentaire : ex. le *spin-up* sera plus court si la simulation débute d'une couverture sédimentaire spatialisée « réaliste » [Lesourd *et al.*, 2016].

Dans le cas de l'estuaire de la Gironde, nous souhaitons étudier la capacité de la modélisation numérique à reproduire des vasières subtidales sur le plateau continental et d'analyser le transfert sédimentaire entre l'estuaire et ces vasières (ex. Vasière Ouest Gironde ; Diaz [2019]; Diaz *et al.* [in prep.]). Pour cette raison, nous souhaitons débiter la simulation à partir d'une couverture sédimentaire uniforme sur l'ensemble du domaine (30% de vase, 60% de sable et 10% de gravier) et étudier son développement [Diaz, 2019]. Afin de déterminer la durée de *spin-up* nécessaire pour exploiter les simulations, l'année 2015 a été simulée 6 fois (consécutives).

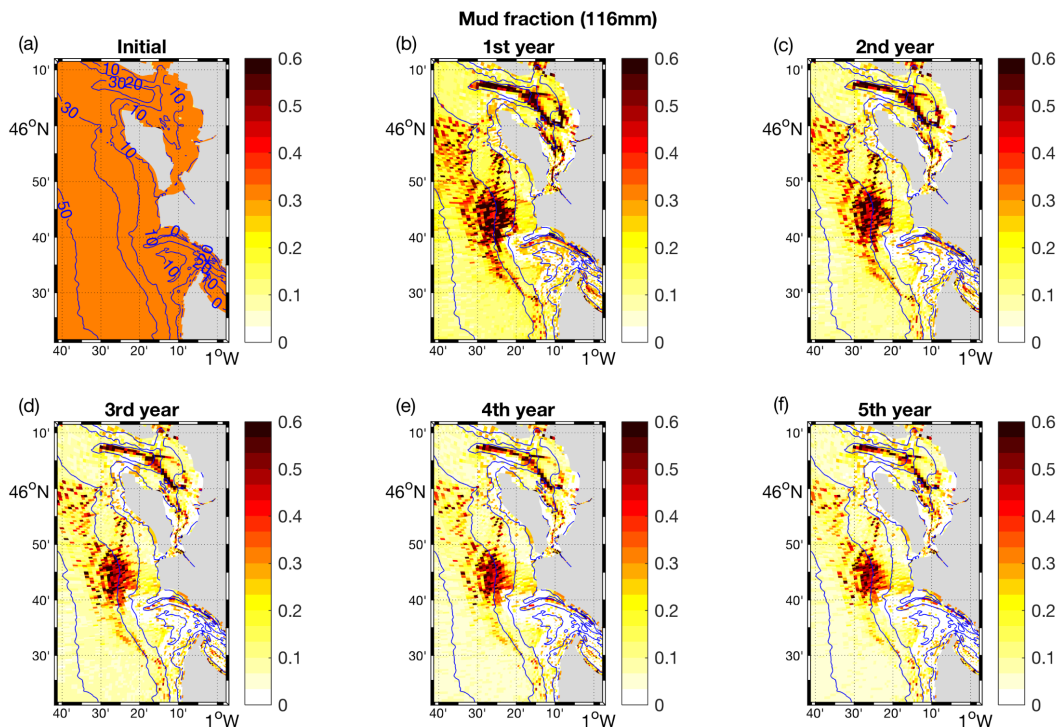


Figure 28. Fraction de vase dans le sédiment superficiel sur le plateau adjacent à l'estuaire : médiane sur un cycle VE-ME à la fin de chaque année 2015 simulée [Diaz, 2019].

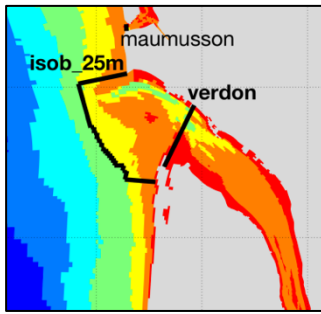


Figure 29. Embouchure de l'estuaire de la Gironde. Les lignes noires représentent les frontières auxquelles sont calculés les flux sédimentaires : au Verdon et à l'isobathe 25 m (isob_25m).

La Figure 28 représente l'évolution de la fraction de vase dans le sédiment superficiel (~10 premiers cm) au cours des 6 années de simulation. On observe progressivement une zone accumulation de la vase au nord-ouest de l'embouchure (zone rouge), caractéristique d'une vasière subtidale.

En termes de flux sédimentaire, les résultats ont été comparés à deux sections de l'embouchure (au Verdon et le long de l'isobathe des 25 m ; Figure 29). L'évolution des flux cumulés au cours des 6 années simulées est principalement associée à la variabilité du flux de vase. Au niveau du Verdon, une seule année de *spin-up* est nécessaire car les 2^{ème} et 3^{ème} années sont très similaires et convergent vers un export de vase d'environ -2 Mt/an. Le comportement est très différent au niveau de l'isobathe 25 m, il faut au moins 4 années de *spin-up* avant d'observer la convergence des flux de vase (5^{ème} et 6^{ème} années). Cela s'explique par une plus forte sensibilité des flux à la dynamique plateau-embouchure, alors que les flux au Verdon sont davantage corrélés à la dynamique estuaire-embouchure. A noter que l'export de vase au Verdon est en équilibre avec l'export à l'isobathe 25 m au bout de 5 ans (-2 Mt/an), mais que cet équilibre n'est pas complètement atteint pour les sables (+1 Mt/an au Verdon et +3 Mt/an à l'isobathe 25 m). Cela traduit une dynamique plus lente des sédiments grossiers au niveau de l'embouchure.

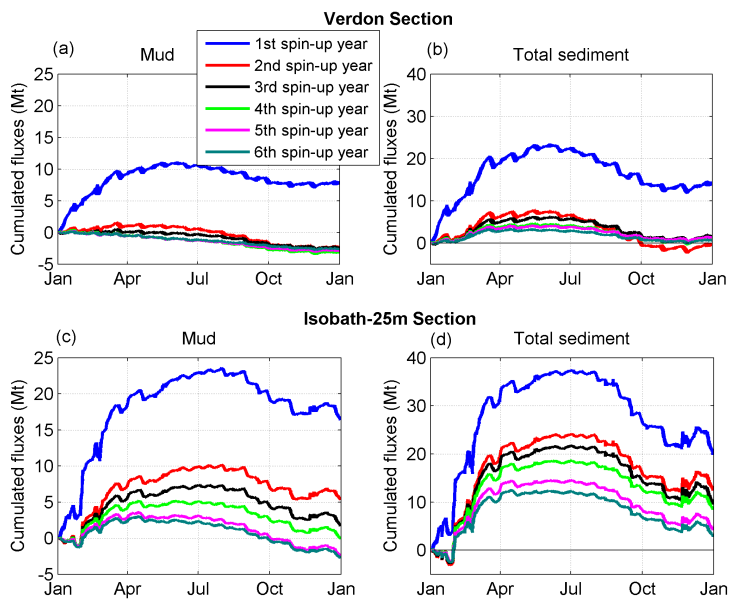


Figure 30. Flux sédimentaires cumulés à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde aux sections (haut) du Verdon et (bas) de l'isobathe 25 m (lignes noires, Figure 29) : (gauche) pour la vase et (droite) pour tous les sédiments. Les courbes représentent les simulations de l'année 2015 pour différentes durées de spin-up [Diaz et al., in prep.].

3.2. Variabilité des flux sédimentaires en réponse aux forçages naturels et anthropiques

3.2.1. Influence des forçages hydrométéorologiques sur les flux sédimentaires

Un intérêt majeur des simulations numériques consiste à analyser la variabilité spatio-temporelle des flux sédimentaires (sable et vase) en réponse à différentes conditions hydrométéorologiques. Dans le cadre du projet HYMOSED (Seine-Aval 5), nous avons étudié la variabilité des flux et bilans sédimentaires en estuaire de Seine pour différents scénarios de forçage en conservant la même bathymétrie de 2010 [Schulz *et al.*, 2018] :

- Année de référence (A) : vent-vague-marée 2010-2011 + débit 2010-2011 ($Q_{moy} = 433 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- Année sèche (B) : vent-vague-marée 2010-2011 + débit **1995-1996** ($Q_{moy} = 309 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- Année humide (C) : vent-vague-marée 2010-2011 + débit **2000-2001** ($Q_{moy} = 958 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- Année tempétueuse (D) : vent-vague-marée **2011-2012** + débit 2010-2011 ($Q_{moy} = 433 \text{ m}^3/\text{s}$).

A l'échelle annuelle, le calcul des flux et bilans sédimentaires dans différents compartiments de l'estuaire permet de dégager des structures de circulation. Par exemple pour l'année de référence A, la Figure 31 met en évidence une cellule de recirculation antihoraire au sud-ouest de l'embouchure (entre les limites *mouth* 'mou' et Honfleur 'Hon'), avec une tendance à l'import des sédiments (i.e. de la baie vers l'estuaire) par le sud et une tendance à l'export par le nord.

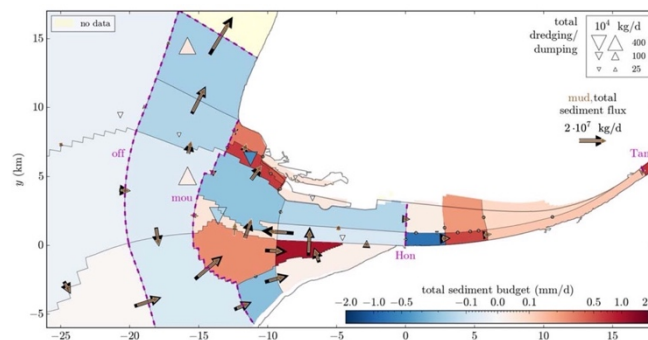


Figure 31. Flux sédimentaires résiduels (flèches : vase en marron et total en noir), bilans sédimentaires (érosion en bleu et accrétion en rouge), dragages (triangles vers le bas) et clapages (triangles vers le haut) à l'embouchure de l'estuaire de Seine pour la simulation de référence A (i.e. année 2010-2011). Les lignes tirées magenta représentent les frontières où sont calculés les flux sédimentaires (offshore 'off', mouth 'mou', Honfleur 'Hon' et Tancarville 'Tan') [Schulz *et al.*, 2018].

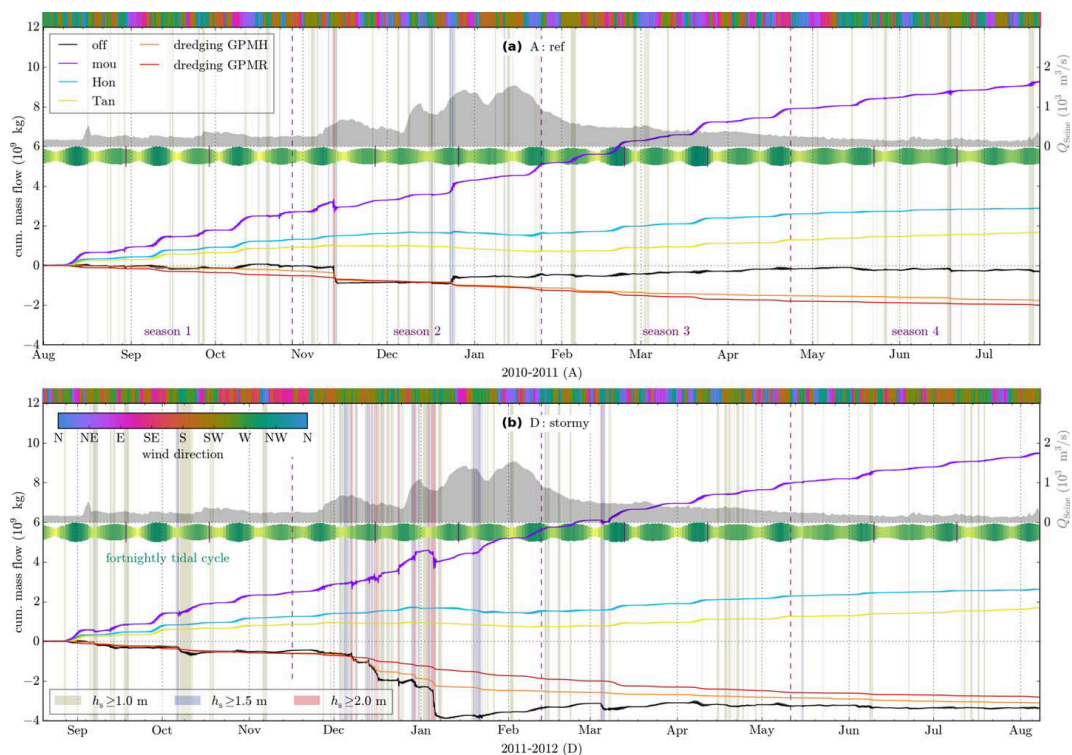


Figure 32. Flux sédimentaires cumulés (positifs vers l'amont) à travers les 4 frontières illustrées sur la Figure 31, et quantités de sédiments dragués par les ports (GPMH et GPMR) : (a) pour l'année de référence A et (b) pour l'année tempétueuse D. Sont également représentés : le débit de la Seine Q_{Seine} (gris), les cycles tidaux VE (vert) - ME (jaune), la direction du vent (bandeau horizontal) et la hauteur significative des vagues à l'embouchure (bandes verticales: $h_s \geq 1$ m en beige, $h_s \geq 1,5$ m en bleu et $h_s \geq 2$ m en rouge) [Schulz *et al.*, 2018].

La Figure 32a illustre l'influence des conditions hydrométéorologiques sur la variabilité temporelle des flux sédimentaires, comme observé dans d'autres estuaires [Lindsay *et al.*, 1996] :

- Les périodes de VE favorisent la remonté des sédiments dans l'estuaire, principalement dû au renforcement du pompage tidal [Scully & Friedrichs, 2007] ;
- Les périodes de crue renforcent les flux sédimentaires vers l'aval dans la partie haute de l'estuaire (Honfleur et Tancarville), mais favorisent la remontée des sédiment dans la partie basse (offshore et mouth), par l'effet de la circulation barocline [Talke *et al.*, 2009] ;
- Les épisodes de vagues induisent un export des sédiments vers la baie de Seine, comme observé par French *et al.* [2008].

L'influence des vagues est encore plus marquée pour la simulation de l'année tempétueuse (Figure 32b), renforçant l'export de sédiment vers la baie de Seine. Ce type de scénario impacte fortement les transferts baie-estuaire (i.e. frontière offshore) à l'échelle annuelle, passant d'un flux net proche de l'équilibre pour l'année de référence (-0,3 Mt/an), à un export de -3,3 Mt/an pour l'année tempétueuse (courbes noires sur la Figure 32a et b).

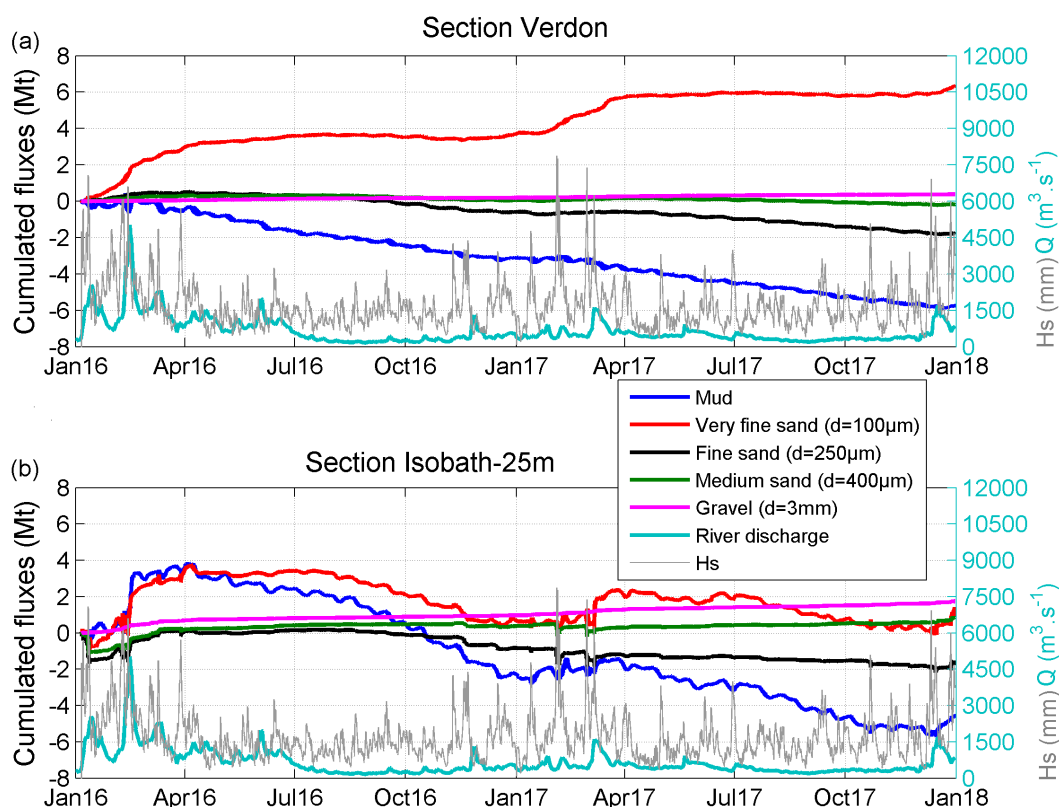


Figure 33. Flux cumulés à l'embouchure de la Gironde pour les différentes classes sédimentaires (flux positifs vers l'amont) au cours des années 2016-2017 : (a) à la section Verdon et (b) le long de l'isobathe 25 m (Figure 29). Sont également représentés le débit Q (Garonne + Dordogne, cyan) et la hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure (gris) [Diaz et al., in prep.].

Le même type de comportement a été observé à l'embouchure de l'estuaire de la Gironde au cours des années 2016-2017 (Figure 33), simulées après 5 ans de *spin-up* [Diaz, 2019]. Si l'effet du débit se fait ressentir aux deux sections, celui des vagues est peu prononcé au niveau du Verdon dû à l'atténuation de la houle à l'embouchure.

Le plus remarquable réside dans la variabilité des flux pour les différentes classes sédimentaires. La différence de comportement entre la vase et les sables est assez attendue, dans la mesure où la vitesse de chute de la vase ($w_s \sim 0,01-0,1$ cm/s) peut être jusqu'à 2 ordres de grandeur plus faible que celle des sables ($w_s \sim 1-4$ cm/s ; Baba & Komar [1981]). Cependant, les différences observées entre les flux de sable très fin (diamètre $d = 100 \mu\text{m}$, $w_s \sim 1$ cm/s), fin ($d = 250 \mu\text{m}$, $w_s \sim 2,5$ cm/s) et moyen ($d = 400 \mu\text{m}$, $w_s \sim 4$ cm/s) sont à première vue assez surprenantes. Cela s'explique par les seuils de remise en suspension (érodabilité) et les durées transport (vitesse de chute) différents pour chaque taille de grain, pouvant induire des transports résiduels contrastés sous un forçage tidal asymétrique (cycles flot-jusant et VE-ME) [Castaing, 1981; Townend & Whitehead, 2003].

Ces résultats soulignent ainsi la nécessité de considérer différentes classes sédimentaires pour simuler les transferts sédimentaires dans ce type d'environnement sablo-vaseux polydispersés.

3.2.2. Variabilité verticale des flux de vase

Le gradient horizontal de densité à l’embouchure des estuaires, résultant de la rencontre des eaux douces apportées par les fleuves avec les eaux salées marines, génère une circulation résiduelle barocline caractérisée par un courant dirigé vers l’aval en surface et vers l’amont au fond [Geyer & MacCready, 2014]. Ce type de circulation est observé aux embouchures de la Seine [Schulz *et al.*, 2018] et de la Gironde [Diaz *et al.*, 2020]. En termes de flux sédimentaire, cela se traduit par un export de vase en surface et un import au fond [Burchard *et al.*, 2018].

De manière assez contre-intuitive, on observe que le flux de vase à la section du Verdon (courbe bleue sur la Figure 33a) est très peu influencé par le débit du fleuve, i.e. la tendance à l’export est seulement légèrement atténuée en période de crue. Pour mieux comprendre cette dynamique, nous avons étudié plus en détail la variabilité verticale du flux de vase au niveau de cette section [Diaz, 2019].

Moyenné sur un cycle VE-ME en étiage, le flux de vase présente une structure classique avec un flux entrant dans l’estuaire au fond et sortant en surface (Figure 34a). En période de crue la circulation barocline est renforcée [Talke *et al.*, 2009], augmentant l’import de sédiment au fond (Figure 34b). Cependant, l’export en surface est lui aussi renforcé et le flux net intégré sur la section est proche de celui de l’étiage. Cela explique la faible variabilité du flux net (i.e. résiduel) de vase avec le débit du fleuve, bien que les échanges sédimentaires bruts soient beaucoup plus importants en crue.

A noter que le bilan entre les flux de surface et de fond dépend des conditions hydro-sédimentaires (ex. pour différentes sections d’un estuaire et d’un estuaire à l’autre), pouvant être négatif (i.e. export ; ex. en Gironde, Figure 33a) ou positif (i.e. import ; ex. en Seine, Figure 32a).

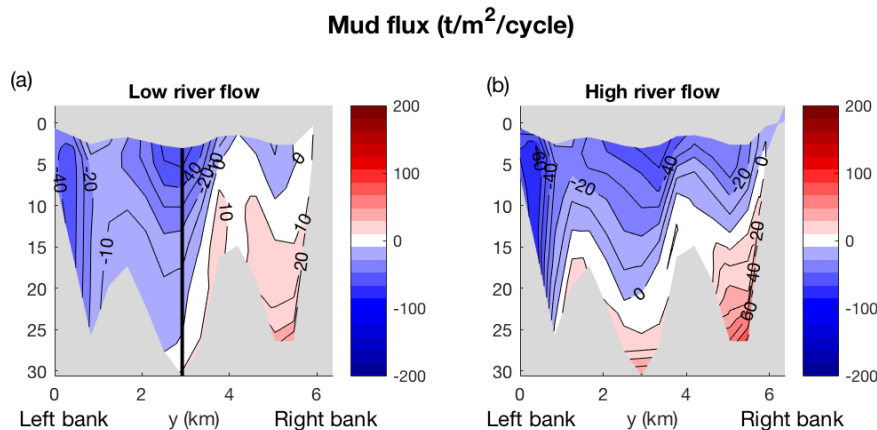


Figure 34. Coupe verticale du flux résiduel de vase sur un cycle VE-ME à la section du Verdon (Figure 29) : (a) en étiage et (b) en crue. (a) La barre verticale noire repère le profil vertical analysé sur la Figure 35 [Diaz, 2019].

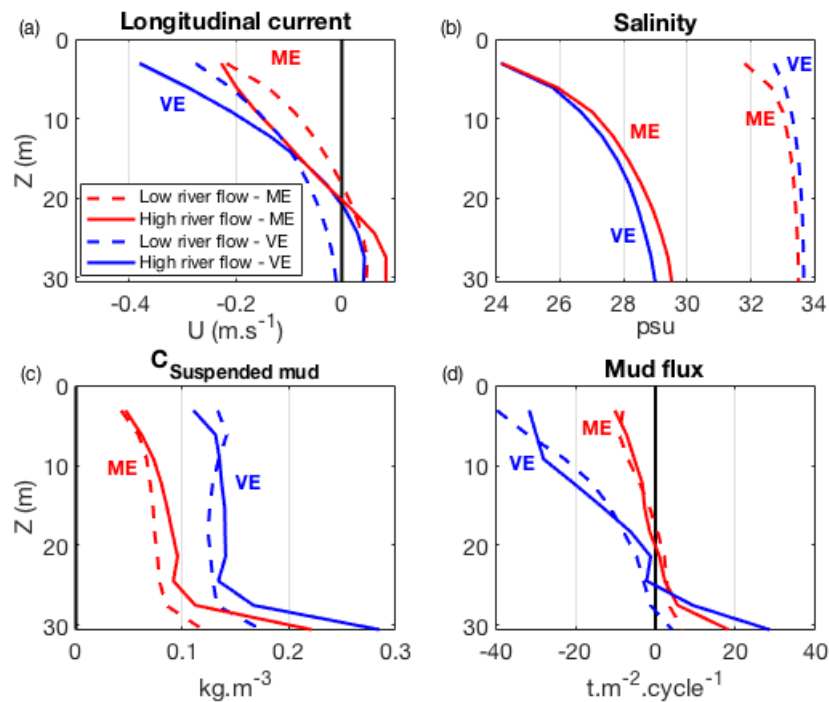


Figure 35. Profils verticaux résiduels sur une VE (bleu) et une ME (rouge) en crue (lignes continues) et en étiage (lignes tiretées) : (a) du courant longitudinal (positif vers l'amont), (b) de la salinité, (c) de la concentration en vase et (d) du flux de vase (positif vers l'amont) dans la zone la plus profonde de la section Verdon (ligne verticale noir sur la Figure 34a) [Diaz, 2019].

La variabilité verticale du flux de vase est également bien marquée à l'échelle du cycle VE-ME. La Figure 35 représente les conditions hydrodynamiques (i.e. courants), hydrologiques (i.e. salinité) et sédimentaires (i.e. concentration de vase en suspension et flux de vase) le long d'un profil vertical au milieu du chenal principal de la section Verdon (ligne verticale noire sur la Figure 34a). Ces profils attestent d'une stratification renforcée en période de crue à l'embouchure liée à des gradients de salinité plus marqués qu'en étiage (Figure 35b). Ceux-ci sont d'autant plus marqués en ME grâce au faible mélange vertical. Cette stratification induit une circulation barocline renforcée en crue et en ME (Figure 35a). La concentration de vase est plus élevée en VE (Figure 35c) dû aux courants de marée plus intenses, ainsi qu'en crue du fait de la position du bouchon vaseux plus proche de l'embouchure durant cette période [Sottolichio & Castaing, 1999]. Comme observé sur la Figure 34, les flux nets intégrés sur la verticale sont similaires en crue et en étiage (Figure 35d). Toutefois, on observe que l'export de vase se fait principalement en VE alors qu'en ME le bilan est proche de l'équilibre, comme observé sur la Figure 33a et en accord avec les observations de Castaing [1981].

3.2.3. Conceptualisation des transferts sédimentaires « estuaire – mer côtière » dans un contexte de changement global

Dans le cadre du projet ARES (Seine-Aval 6), un rejeu numérique de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de Seine a été généré sur les périodes 1990-2000 et 2005-2015 (ARES hindcast ; Grasso *et al.* [2019]). Ces simulations morphostatiques se sont basées sur les bathymétries de 1995 et de 2010, respectivement pour les 1^{ère} et 2^{ème} périodes, avec une évolution morphologique caractérisée par un approfondissement et un rétrécissement de l'estuaire en 2010 (Figure 26a et b). La dynamique hydro-sédimentaire de la colonne d'eau a été validée à partir des mesures du réseaux SYNAPSES (hauteur d'eau, température, salinité, concentration en MES ; Grasso *et al.* [2020a]) et les bilans sédimentaires ont été validés à partir des relevés bathymétriques du GPMR (cf. Section 3.1.2, p.38).

On constate que les tempêtes ont tendance à favoriser l'export des sédiments et que les crues peuvent dans certaines situations induire un import de sédiment dans les estuaires [French *et al.*, 2008; Sommerfield & Wong, 2011; Yu *et al.*, 2020]. Cependant, il est difficile de bien distinguer ces deux effets antagonistes à causes de la concomitance des évènements de crues et de tempêtes lors des périodes hivernales en hémisphère nord [Schulz *et al.*, 2018; Diaz, 2019]. De plus, la modification morphologique des estuaires par les activités anthropiques impacte directement la dynamique hydro-sédimentaire [Van Maren *et al.*, 2015; Grasso & Le Hir, 2019], pouvant modifier les flux sédimentaires à l'interface estuaire-mer côtière [Guo *et al.*, 2021]. Enfin, ces pressions anthropiques peuvent impacter les milieux estuariens à des échelles de temps similaires à celles des variabilités météorologiques interannuelles.

Nous avons donc exploité le rejeu ARES dans le but d'analyser les contributions relatives des forçages météorologiques et anthropiques sur les échanges sédimentaires entre l'estuaire et la baie de Seine (ligne point-tirée rouge sur la Figure 26a) [Grasso *et al.*, 2021a].

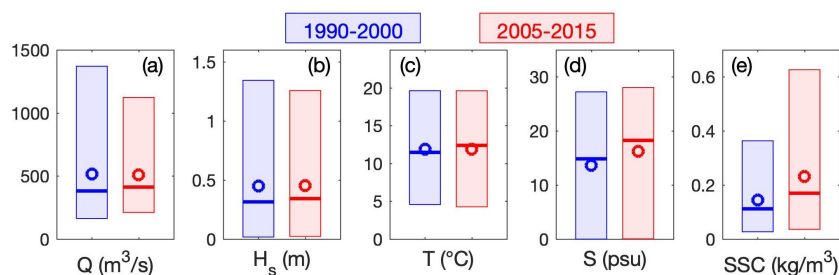


Figure 36. Comparaison des principaux paramètres environnementaux entre 1990-2000 (bleu) et 2005-2015 (rouge). (a) Débit de la Seine Q et (b) hauteur significative des vagues H_s à la frontière estuaire-baie (ligne point-tirée rouge sur la Figure 26a). Simulations au fond à Fatouville ('Fat' sur la Figure 26a) de : (c) la température T , (d) la salinité S et (e) la concentration en MES SSC . Les boîtes délimitent les percentiles 5 à 95 ; les lignes et ronds représentent respectivement les valeurs médianes et moyennes [Grasso *et al.*, 2021a].

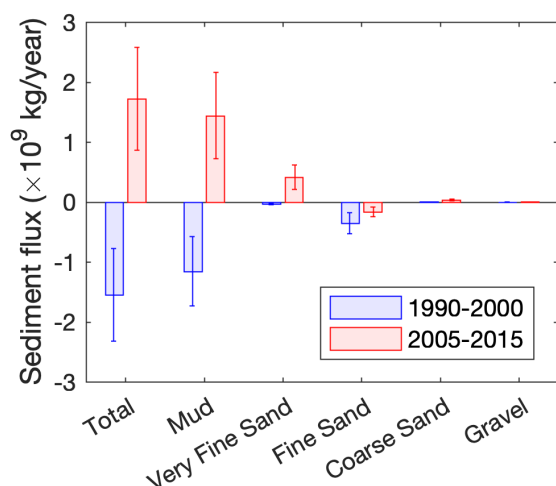


Figure 37. Comparaison des flux sédimentaires annuels moyens à la frontière estuaire-baie (ligne point-tirée rouge sur la Figure 26a) entre 1990-2000 (bleu) et 2005-2015 (rouge), pour chaque classe sédimentaire et la somme (Total). Les flux positifs sont orientés vers l'amont (i.e. import) et les moustaches représentent l'écart type associé à la variabilité interannuelle [Grasso *et al.*, 2021a].

Les forçages de débit et de vagues suivent la même tendance entre 1990-2000 et 2005-2015, avec une augmentation de la médiane (+8%) et une diminution des valeurs extrêmes (-8 à -16% ; Figure 36a et b). Ces changements ne reflètent pas l'évolution climatique attendue, i.e. augmentation des événements extrêmes et réduction des débits moyens [Pachauri *et al.*, 2014; Young & Ribal, 2019; Passeri *et al.*, 2020], mais sont davantage représentatifs de la variabilité météorologique naturelle pour deux décades contrastées. Néanmoins, l'augmentation de la température moyenne de fond à Fatouville (+0,2 °C) est bien représentative du réchauffement climatique observé en Manche (Figure 36c) [Saulquin & Gohin, 2010]. Toujours au niveau de Fatouville, zone centrale de l'excursion du bouchon vaseux et du biseau salé, les augmentations de la salinité et de la concentration en MES sont très fortes (de +23% à +52% en moyenne ; Figure 36d et e), résultant principalement de la circulation barocline renforcée par l'approfondissement du chenal de navigation et le rétrécissement de l'estuaire induit par l'extension « Port 2000 » du GPMH [Grasso & Le Hir, 2019].

A l'échelle annuelle, les flux sédimentaires sont majoritairement négatifs en 1990-2000 (i.e. export de sédiment vers la baie) et positifs en 2005-2015 (i.e. import de sédiment dans l'estuaire) (Figure 37). Cela résulte en grande partie de la variabilité des flux de vase, responsables de plus de 70% des flux totaux. Afin de mieux comprendre les raisons de ce changement de comportement, nous avons cherché à corrélérer les flux sédimentaires dominants (i.e. vase, sables très fin et fin), moyennés par cycle VE-ME de 14 jours, aux conditions de débit Q et de vagues H_s (Figure 38).

Sur la période P#1 (1990-2000), ce type de diagramme $Q-H_s$ permet de mettre en évidence la tendance à l'export de la vase pour les conditions de vagues plus intenses, alors que l'augmentation du débit favorise l'import de vase jusqu'à un certain seuil ($Q_{095} < 1500 \text{ m}^3/\text{s}$) au-delà duquel l'export est à nouveau dominant (Figure 38a). De manière assez remarquable, le sable très fin est également exporté pour les forts H_s (Figure 38b), mais ce comportement est inversé pour le sable fin (Figure 38c). Cela rejoint l'observation de Diaz [2019] sur la variabilité des flux sableux à l'embouchure de la Gironde.

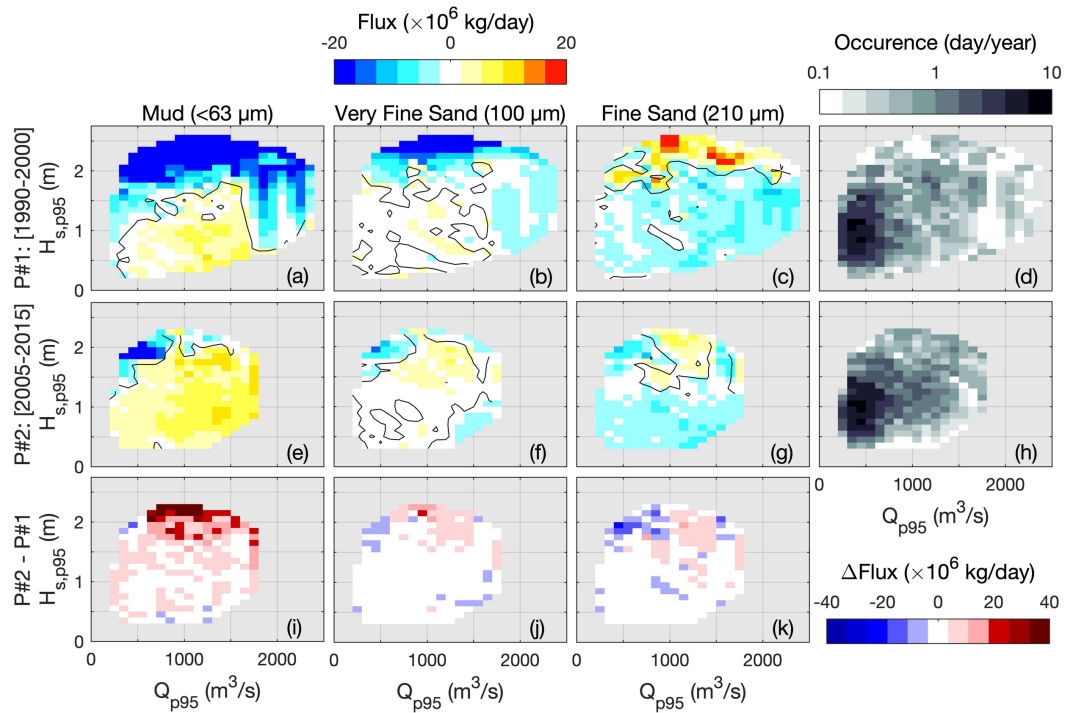


Figure 38. Comparaison des flux sédimentaires moyennés par cycles VE-ME à la frontière estuaire-baie (ligne point-tirée rouge sur la Figure 26a) entre (a-d) 1990-2000 : P#1 et (e-h) 2005-2015 : P#2, en fonction du percentile 95 du débit Q_{p95} et de la hauteur significative des vagues $H_{s,p95}$, pour les trois classes sédimentaires dominantes : (a, e) vase, (b, f) sable très fin et (c, g) sable fin. Les flux positifs sont orientés vers l'amont (i.e. import). Les panneaux du bas (i-k) représentent la différence de flux $\Delta Flux$ entre les périodes P#2 et P#1, et les panneaux de droite représentent l'occurrence du forçage $Q-H_s$ lors des périodes (d) P#1 et (h) P#2 [Grasso et al., 2021a].

Pour la période P#2 (2005-2015), il y a une plus faible occurrence des valeurs extrêmes de vagues et de débit (Figure 36 et Figure 38d et h), limitant les conditions favorables à l'export de vase. Afin de mieux distinguer l'influence des changements anthropiques, la différence des flux $\Delta Flux$ entre P#2 et P#1 permet de comparer l'effet des modifications morphologiques pour les mêmes conditions de débit-vagues. Il apparaît clairement que la tendance à l'export de vase est diminuée, voir inversée (Figure 38i), mais que la structure du diagramme reste similaire à P#1, i.e. déplacement du seuil import-export vers le haut du diagramme (Figure 38e). Ce changement s'explique par l'augmentation des asymétries de marée [Nidziko & Ralston, 2012], caractéristique du pompage tidal [Scully & Friedrichs, 2007], et l'augmentation du nombre de Richardson, caractéristique d'une stratification renforcée et d'une circulation barocline plus intense [Talke et al., 2009].

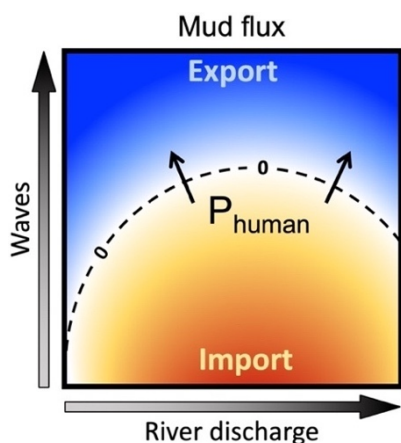


Figure 39. Représentation conceptuelle du flux de vase à la frontière estuaire-baie en fonction du forçage par les vagues et le débit. Les couleurs chaudes représentent un flux vers l'estuaire (i.e. import) et les couleurs froides représentent un flux vers la baie (i.e. export). P_{human} désigne les pressions anthropiques impactant les isolignes du diagramme [Grasso et al., 2021a].

Pour les flux de vases, qui représentent les principaux échanges particulaires entre les estuaires et les mers côtières, les résultats obtenus sur plus de 20 ans de simulation (Figure 38a et e) peuvent être synthétisés par un diagramme conceptuel représentant les flux sédimentaires en fonction des conditions météorologiques (vagues et débit) (Figure 39). Ce schéma met en évidence la tendance à l'export de vase lié aux conditions de vagues, et nuance la tendance à l'import de vase pour des débits modérés à soutenus, mais pas extrêmes. Les perturbations morphologiques de l'estuaire induites par les activités humaines viennent modifier les contours de ce diagramme, comme par exemple avec l'élévation de l'isoligne lors de l'approfondissement et le rétrécissement de l'estuaire (Figure 38e et ligne tiretée sur la Figure 39).

Dans le cas de l'estuaire de Seine, le changement d'état d'un système exportant des sédiments en 1990-2000 vers un système qui en importe en 2005-2015 s'expliquent donc par l'influence des changements :

- Météorologiques : par une plus faible occurrence en période P#2 des conditions extrêmes de vagues et de débit, durant lesquelles les sédiments sont majoritairement exportés ;
- Anthropiques : par une modification de la morphologie de l'estuaire (approfondissement et rétrécissement), renforçant les processus de pompage tidal et de circulation barocline, et favorisant ainsi l'import des sédiments.

En plus d'améliorer nos connaissances sur les processus hydro-morpho-sédimentaires le long du continuum terre-mer, les rejeux numériques pluriannuels sont particulièrement pertinents pour les études écosystémiques. Ainsi, la génération de simulations réalistes validées à l'échelle des estuaires (22 ans en Seine, 9 ans en Gironde et 10 en Loire) permet par exemple la mise en œuvre des modèles d'habitat fonctionnel (couplage physique, biologie, biogéochimie et écologie) et la caractérisation des distributions spatio-temporelles des espèces benthiques et pélagiques [Champagnat et al., 2021; Lamarque et al., 2021; Lamarque et al., under review].

4. Trajectoires hydro-morpho-sédimentaires des systèmes estuariens à moyens et longs termes

Prédire l'évolution des habitats estuariens dans le cadre du changement global requiert de travailler à l'échelle des systèmes sur des périodes temporelles plus étendues (*i.e.* pluri-décennales) [Guo *et al.*, 2015; Best *et al.*, 2018]. Dans ce contexte, la modélisation morphosédimentaire représente un véritable défi scientifique, en particulier pour les environnements sablo-vaseux, macrotidaux, et soumis à l'influence des événements hydrométéorologiques (vent, vagues, débit des fleuves) et des activités anthropiques (ex. dragages) [Zhou *et al.*, 2016]. Il est cependant possible d'étudier les trajectoires potentielles de ces systèmes en étant conscient des limitations et incertitudes associées à la modélisation numérique [van der Wegen & Jaffe, 2013].

En s'appuyant sur l'expérience acquise en modélisation morphosédimentaire de l'estuaire de Seine (programmes Seine-Aval 3-5 ; Waeles *et al.* [2007]), et en particulier sur les travaux réalisés dans le cadre du projet MORPHOSEINE (Seine-Aval 6), nous explorons ici les limitations et les capacités de ce type d'outil pour prédire les trajectoires des habitats estuariens dans le cadre du changement global (*i.e.* anthropique et climatique).

4.1. Capacités et limitations des simulations morphosédimentaires à moyens termes (~10 ans)

4.1.1. Stratégie de modélisation morphodynamique

La stratégie adoptée pour la modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de Seine consiste à intégrer le maximum de processus pour mieux représenter la complexité du milieu naturel. En plus des processus pris en compte dans le modèle morphostatique (i.e. érosion-transport-dépôt de sédiments cohésifs et non-cohésifs + consolidation ; Le Hir *et al.* [2011]; Grasso *et al.* [2015]; Grasso *et al.* [2018b]), la version utilisée par la suite comprends plusieurs particularités [Mengual *et al.*, 2017a; Mengual *et al.*, 2020] :

- Le couplage morphodynamique WW3-MARS-MUSTANG (via le coupleur OASIS) : réactualisation de la bathymétrie à chaque pas de temps en fonction des érosions-dépôts (MUSTANG), modifiant ainsi l'hydrodynamique (MARS) et la propagation des vagues (WW3) ;
- Le transport par charriage pour les particules non-cohésives, en plus du transport par advection [Wu & Lin, 2014] ;
- Le masquage-exposition en présence de sédiments hétérométriques [Wooster *et al.*, 2008] ;
- La porosité des sédiments calculée en fonction de la distribution des classes sédimentaires dans le mélange [Wu & Li, 2017].

Dans les parties précédentes, la validation hydro-sédimentaire (hauteur d'eau, salinité, concentration en MES) était basée sur une approche morphostatique [Grasso *et al.*, 2018b]. Ce type d'approche est valide pour des échelles de temps courtes (≤ 5 ans ; Figure 27 ; Grasso *et al.* [2021a]), mais pas pour des échelles de temps plus longues où les changements bathymétriques peuvent induire une modification des courants et de la propagation des vagues. Pour les simulations morphodynamiques, le modèle sédimentaire et son paramétrage ont été modifiés afin de mieux reproduire les évolutions morphologiques et simuler des dragages plus réalistes [Lemoine & Le Hir, 2021; Lemoine, 2021], tout en assurant des concentrations en MES satisfaisantes [Grasso *et al.*, 2021b]. Toutefois, il a fallu accepter de dégrader la performance du modèle sur la simulation des MES afin de l'augmenter sur la simulation des évolutions morphologiques. Cela ne serait pas nécessaire si la modélisation était parfaite, mais il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle qui permette de simuler correctement la dynamique morphosédimentaire des échelles de temps courtes (ex. dynamique tidale, événements de tempête) à longues (~50 ans) pour des configurations réalistes [van der Wegen & Jaffe, 2013]. C'est pourquoi le modèle représente avant tout un outil dimensionné et calibré pour étudier un objet particulier. Les performances du modèle morphodynamique sont premièrement évaluées

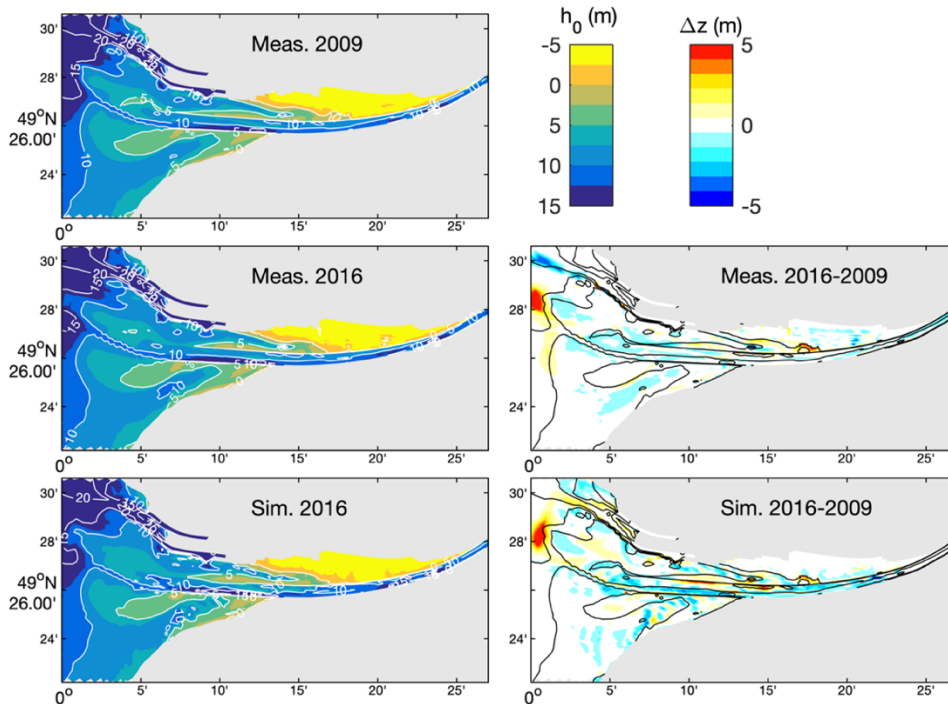


Figure 40. Évolution morphologique de l'estuaire aval entre 2009 et 2016. (Gauche) Bathymétries h_0 (relatif au niveau moyen de la mer) et (droite) différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés.

sur une période de 8 ans (2009-2016) pendant laquelle des relevés bathymétriques annuels sont disponibles pour calculer des différentiels morphologiques et des bilans sédimentaires. La Figure 40 illustre les bathymétries (h_0) observées et simulées, ainsi que les différentiels bathymétriques associés (Δz).

L'évolution morphologique observée se caractérise principalement par l'accrétion sédimentaire de la zone du Kannik (zone de clappage) et la progradation du banc du Ratier (accrétion au Râtelet) (cf. nom des zones détaillé sur Figure 41). La partie au nord de la Digue Basse Nord 'DBN' (à l'est de la Fosse Nord Amont 'FN.Am') présente également une tendance à l'accrétion, avec un comblement du méandre. L'ordre de grandeur des changements bathymétriques est relativement bien simulé par le modèle, malgré une surestimation de l'érosion dans le chenal principal (zone endiguée et en amont du Pont de Normandie). Le modèle simule bien de l'accrétion au nord de la DBN (de la FN.Am aux méandres), ainsi que sur la zone du Kannik ; par contre, il ne simule pas correctement la progradation du banc du Ratier.

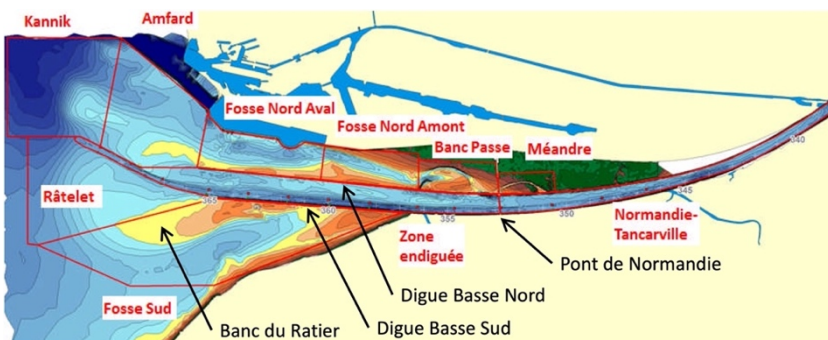


Figure 41. Zones caractéristiques de l'estuaire utilisées pour le calcul des cubatures sur la Figure 42.

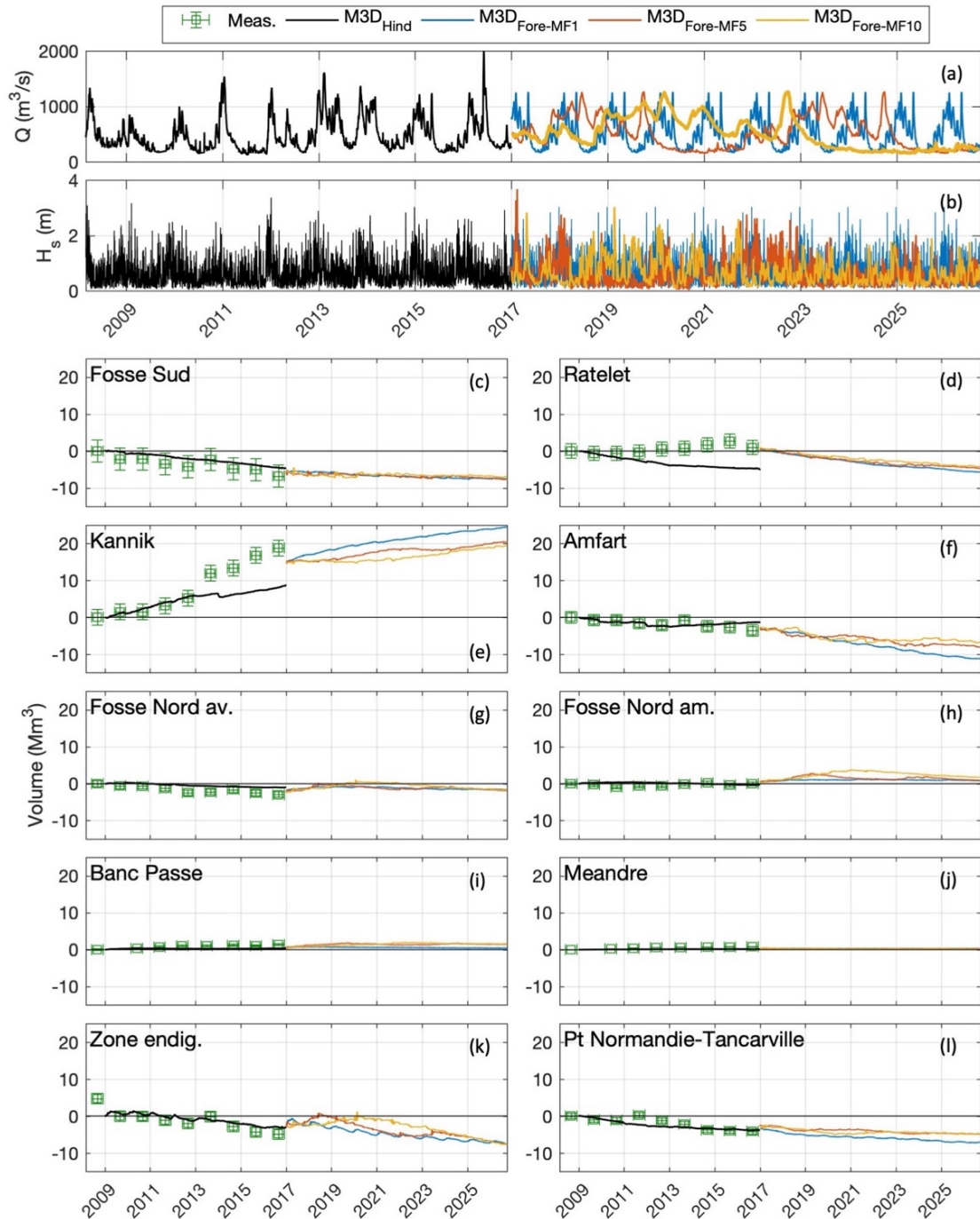


Figure 42. (a) Débit de la Seine Q et (b) hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure. (c-i) Cubatures sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 41) mesurées (symboles) et simulées (lignes) pour les scénarios rétrospectif (Hindcast, 2009-2016 ; noir) et tendanciels (Forecast, 2016-2026 ; avec facteur morphologique $MF = 1$: bleu, $MF = 5$: rouge et $MF = 10$: jaune).

L'analyse des différentiels bathymétriques permet d'avoir une vue spatialisée de la morphodynamique de l'estuaire, mais ne permet pas de facilement comparer les évolutions morphologiques. Pour cela, le calcul de cubature, i.e. le volume sédimentaire associé à une zone de l'estuaire, apporte une meilleure quantification des changements. La comparaison entre les simulations et observations a porté sur 10 zones de l'estuaire suivies par le GPMR (Figure 41).

Les cubatures illustrées sur la Figure 42 représentent l'évolution au cours du temps (t) des volumes sédimentaires (V) intégrés sur chaque zone (z), à partir des volumes de référence calculés en 2009 (i.e. $V(z,t) - V(z,t_{2009})$). Comme discuté dans la Section 3.1.2 (p.38), les mesures sont associées à de fortes incertitudes : (i) temporelles, car les levés bathymétriques sont réalisés sur une période d'environ 6 mois ; et (ii) en intensité, dû à l'incertitude sur la mesure bathymétrique estimée à ± 10 cm.

Sur la période 2009-2016, le modèle simule de manière satisfaisante la variabilité des volumes sédimentaires mesurés par le GPMH, mis-à-part sur les zones du Râtelet (Figure 42d) et du Kannik (Figure 42e) où des différences notoires sont observées.

- La dynamique du Kannik est bien simulée jusqu'en 2013, mais ensuite les simulations sous-estiment les volumes mesurés entre 2013 et 2016. C'est en partie dû au changement de casiers (i.e. zones) de clappage réalisé par le GPMR en 2013, décalé de quelques mailles vers l'ouest dans une zone plus profonde et donc plus stable (i.e. moins de dispersion de sédiment et plus d'accrétion). Ce changement n'a cependant pas été pris en compte dans les simulations, le dépôt se fait donc dans une zone moins profonde et plus active, limitant l'accrétion sédimentaire.
- La légère accrétion observée au Râtelet (Figure 42d) n'est pas captée par le modèle qui simule une diminution régulière du volume sédimentaire. Ce manque d'accrétion était également visible sur les différentiels bathymétriques de la Figure 40. La complexité de la dynamique sur ces bancs à l'embouchure (i.e. courants de marée + vagues) et la difficulté à modéliser son évolution morphologique soulignent le besoin de mieux comprendre et formuler les processus sédimentaires à cette échelle. Ce point est davantage discuté dans la Section 5.2.2 (p.75).

Une autre méthode pour quantifier les évolutions morphologiques consiste à calculer l'évolution de l'hypsométrie (i.e. répartition des surfaces par tranche bathymétrique), afin d'apporter une information intégrée sur la dynamique d'un objet d'étude au cours du temps. Cela est particulièrement pertinent pour le suivi des surfaces intertidales, représentant des zones riches en termes de fonctionnalités physiques, biologiques et écologiques [Paarlberg *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; Sheehan & Ellison, 2014; Maan *et al.*, 2015].

Entre 2009 et 2016 dans la partie aval de l'estuaire (Figure 43e), les estrans ont des comportements contrastés avec une stabilité des zones intertidales supérieures ($h_0 = [0:-5]$ m ; Figure 43c) et une réduction (-11%) des zones intertidales inférieures ($h_0 = [5:0]$ m ; Figure 43d). Ces tendances sont bien captées par le modèle, nous confortant ainsi dans sa capacité à simuler les trajectoires des zones intertidales face à différentes pressions climatiques et anthropiques (cf. Section 4.2.2, p.64).

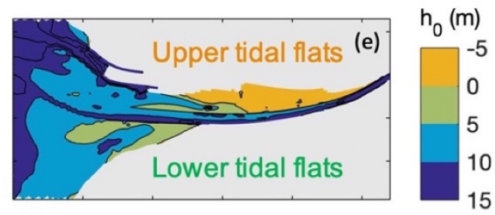
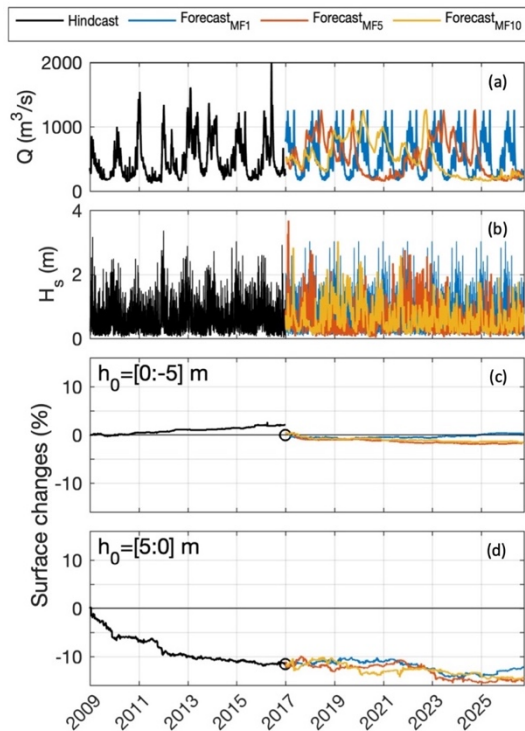


Figure 43. Évolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval (zone illustrée sur la carte (e)) entre 2009 et 2026. (a) Débit de la Seine Q et (b) hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure. Variation relative des hypsométries pour les zones intertidales (c) supérieures ($h_0 = [0:-5]$ m) et (d) inférieures ($h_0 = [5:0]$ m), mesurées (ronds) et simulées (lignes) pour les scénarios rétrospectif (Hindcast, 2009-2016 ; noir) et tendanciels (Forecast, 2016-2026 ; avec facteur morphologique $MF = 1$: bleu ; $MF = 5$: rouge ; et $MF = 10$: jaune).

4.1.2. Influence du facteur d'accélération morphologique

Le facteur d'accélération morphologique MF est couramment utilisé pour simuler la morphodynamique estuarienne à long-terme (50-1000 ans) [Coco *et al.*, 2013; van der Wegen, 2013; Zhou *et al.*, 2016]. Cela consiste à multiplier les érosions et dépôts vus par le compartiment sédimentaire d'une valeur MF , tout en conservant le calcul de l'hydrodynamique dans la colonne d'eau (i.e. advection, contrainte de frottement, etc.) simulé à l'échelle 1 (i.e. sans accélération). De cette manière, une simulation d'un an avec $MF = 10$ permet de représenter une évolution morphologique de 10 ans. L'utilisation de ce facteur et de sa valeur sont à utiliser avec précaution, car l'effet des forçages hydrodynamiques peut se retrouver « déformé ». Par exemple, une année de simulation avec $MF = 10$ ne verra passer qu'une seule crue en 10 ans, mais cette crue, vue par le lit sédimentaire, durera 10 fois plus longtemps qu'en réalité. Il est possible de compresser certains forçages (ex. hydrogramme compressé) pour prendre en compte ce phénomène, mais cela devient plus complexe pour compresser les données de vagues et de vent. De plus, les effets des phases de la marée se retrouvent aussi déformés avec ce type de méthode : une étale de basse mer qui durerait normalement 1-2 h est vue par le sédiment comme une étale de 10-20 h. Malgré l'utilisation courante de ce facteur pour les simulations morphodynamiques à long-terme, il existe peu d'études explicitant ses effets potentiels sur les évolutions morphologiques.

Pour répondre à ce besoin, des simulations tendanciennes *Forecast* (2016-2026) ont été réalisées avec l'utilisation de différentes valeurs du facteur morphologique ($MF = 1, 5$ et 10). Ces simulations sont forcées par les conditions hydrométéorologiques de l'année hydrologique 2015 (i.e. oct. 2014 – oct. 2015) répétées dix fois pour la simulation $MF = 1$, deux fois pour $MF = 5$ et

une fois pour $MF = 10$ (Figure 42a et b). L'année hydrologique 2015 représente une année moyenne (en termes de débit et de tempêtes) représentative des 20 dernières années [Schulz *et al.*, 2018].

En termes de dynamique sédimentaire dans la colonne d'eau, la comparaison des concentrations de vase en suspension en surface à Fatouville (Figure 44) révèle que l'utilisation d'un MF (5 et 10) induit une sous-estimation des pics de turbidité (diminution du percentile 99 de 24%). La concentration médiane sur 10 ans est sensiblement la même pour les différents MF (moins de 1% de variation), mais les valeurs moyennes sont 10% plus faibles pour $MF = 5$ et 10. A noter que l'utilisation de $MF = 10$ ne dégrade pas significativement les niveaux de concentration comparé à $MF = 5$.

En comparant les cubatures calculées pour les simulations avec différents MF (Figure 42), on note que l'utilisation du MF impacte différemment les zones de l'estuaire. Par exemple, les tendances sont assez proches dans la Fosse Sud et au Râtelet (Figure 42c et d). Par contre, on observe une réduction de l'accrétion au Kannik pour $MF = 5$ et 10, ainsi que la réduction de l'érosion à Amfard (Figure 42e et f). Dans les zones où l'influence du débit est importante, il apparaît nettement qu'avec $MF = 5$ et 10 il est nécessaire d'attendre la fin d'un cycle hydrologique complet pour retrouver la tendance de $MF = 1$. C'est particulièrement marqué dans la zone endiguée (Figure 42k) : la simulation avec $MF = 5$ (rouge) rejoint celle de $MF = 1$ (bleu) tous les 5 ans (i.e. 2022 et 2027) et la simulation avec $MF = 10$ (jaune) la rejoint au bout de 10 ans (i.e. 2027).

En termes d'hypsométrie, la variation des surfaces intertidales est relativement similaire pour les simulations sans et avec MF (Figure 43c et d). Néanmoins, on note une tendance à réduire la surface des estrans lors de l'utilisation de $MF = 5$ et 10, qui peut s'expliquer par une réduction des apports en MES (réduction des maximums de concentration, Figure 44). En résumé, cette analyse de la période 2016-2026 permet de mieux quantifier les biais que peut induire l'utilisation du MF , bien que ceux-ci restent raisonnables. Il est intéressant de noter qu'après 10 ans, les simulations avec $MF = 10$ diffèrent très peu de celles avec $MF = 5$. Cependant, afin de ne pas introduire trop de distorsion temporelle dans les forçages, les simulations à plus longs termes (20-50 ans) présentées dans la section suivante se basent sur l'utilisation de $MF = 5$.

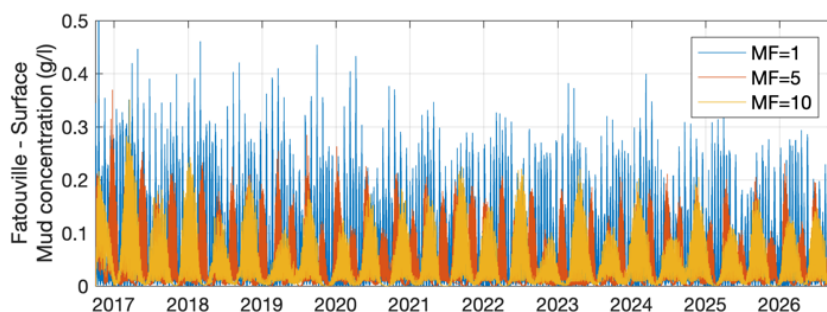


Figure 44. Comparaison des concentrations de vase en suspension en surface à Fatouville pour $MF = 1, 5$ et 10 .

4.2. Modélisation des évolutions morphosédimentaires à longs termes (~20-50 ans)

L'évolution morphologique des estuaires étant relativement lente, cela nécessite de réaliser des simulations de longue durée (> 10 ans) pour en analyser le comportement [Ganju & Schoellhamer, 2010]. De plus, les pressions anthropiques (ex. approfondissement des chenaux de navigation, extensions portuaires ; Cox *et al.* [2021]; Guo *et al.* [2021]) et climatiques (ex. montée du niveau de la mer, intensification des événements extrêmes ; Young & Ribal [2019]; Passeri *et al.* [2020]), agissent également à des échelles de temps longues (i.e. pluri-décennales).

Il est présenté par la suite deux simulations morphodynamiques (avec $MF = 5$) permettant d'étudier l'effet des forçages hydrométéorologiques et climatiques sur les évolutions morphologiques estuariennes :

- Une simulation rétrospective sur 20 ans (1975-1995) pour étudier les conditions (débit, marée, vagues) responsables des évolutions sédimentaires (i.e. événements morphogènes) ;
- Une simulation tendancielle sur 50 ans (2016-2066) pour étudier les trajectoires morphosédimentaires de l'estuaire pour différents scénarios de montée du niveau de la mer.

4.2.1. Évolutions morphosédimentaires rétrospectives sur 20 ans

Pour la simulation rétrospective (1975-1995 ; Figure 45), le forçage de débit a été comprimé d'un facteur 5 (i.e. hydrogramme comprimé ; Figure 46a) afin d'appliquer une variabilité de conditions hydrologiques similaire à la période réelle. Pour les autres forçages (marée, vent et vagues), les années 1975, 1980, 1985 et 1990 ont été utilisées avec une distorsion d'un facteur 5 due au MF (Figure 46b et c). Cependant, sachant que les dragages d'entretien des GPMR et GPMH n'ont pas été pris en compte, cette simulation représente davantage une configuration « idéalisée » pour analyser l'influence des forçages hydrométéorologiques sur la morphodynamique estuarienne.

L'évolution morphologique de la période 1975-1995 se caractérise principalement par une progradation des bancs à l'embouchure, une nette accrétion du banc d'Amfard et du banc Aval au nord de la DBN, ainsi qu'une accrétion de la Vasière Nord avec le comblement du méandre Nord (Figure 45a et b). En comparaison aux observations, les simulations parviennent à reproduire les principales zones d'érosion et d'accrétion (Figure 45c). Toutefois, les évolutions morphologiques simulées sont moins intenses que celles observées. Cela est particulièrement marqué au niveau du méandre Nord qui n'est pas

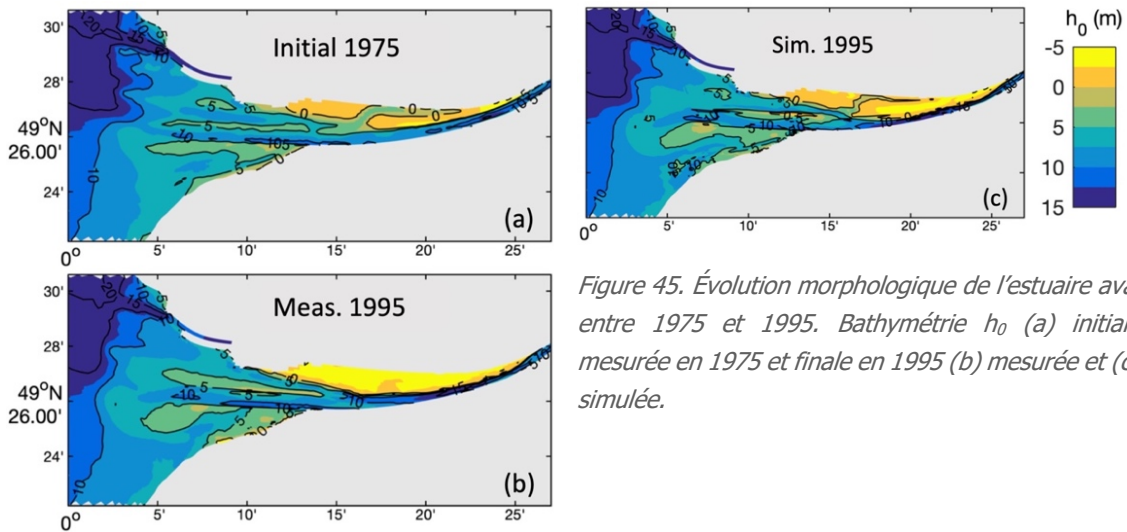


Figure 45. Évolution morphologique de l'estuaire aval entre 1975 et 1995. Bathymétrie h_0 (a) initiale mesurée en 1975 et finale en 1995 (b) mesurée et (c) simulée.

entièrement comblé à la fin des simulations. De plus, la non prise en compte des dragages (en particulier ceux du GPMR) semblent expliquer la sous-estimation des dépôts sédimentaires au niveau du Kannik et la sous-estimation de l'érosion dans le chenal de navigation.

Une étude plus détaillée des simulations a été réalisée afin d'analyser l'évolution des variations morphologiques de l'estuaire en regard des forçages hydrométéorologiques (débit, vagues, marnage ; Figure 46). Par exemple, il est possible de quantifier au cours du temps t l'écart entre la bathymétrie simulée (élévation altimétrique z_{sim}) et la bathymétrie finale mesurée en 1995 (élévation altimétrique z_f ; courbe tiretée bleue, Figure 46d) :

$$Dev(t) = \sum_{i,j} |z_{sim}(i,j,t) - z_f(i,j)| * surf(i,j) , \quad (1)$$

où $surf$ est la surface des mailles aux coordonnées (i,j) . La diminution de cet écart au cours du temps correspond au rapprochement de la simulation vers la bathymétrie « cible ». Le même type d'exercice est fait en calculant l'écart entre la simulation au temps t , et la bathymétrie finale simulée en 1995. Il est normal que l'écart atteigne 0 pour $t = t_{1995}$, car les bathymétries sont donc identiques, mais il est intéressant de noter que la diminution de cet écart n'est pas linéaire. Certaines périodes accélèrent la convergence vers l'état final (i.e. pente ' $\Delta Dev / \Delta t$ ' plus forte), comme cela est observé au cours de l'année 1990 (i.e. période morphogène).

Il est possible de quantifier ce type d'évènements par le calcul des variations altimétriques absolues (Figure 46e) :

$$|\Delta z_v|(t) = \sum_{i,j} |z_{sim}(i,j,t) - z_{sim}(i,j,t-1)| * surf(i,j) / \Delta t \quad . \quad (2)$$

Il ressort de cette analyse que les périodes particulièrement morphogènes (ex. année 1990) correspondent principalement à des évènements de tempête (vagues) plus intenses.

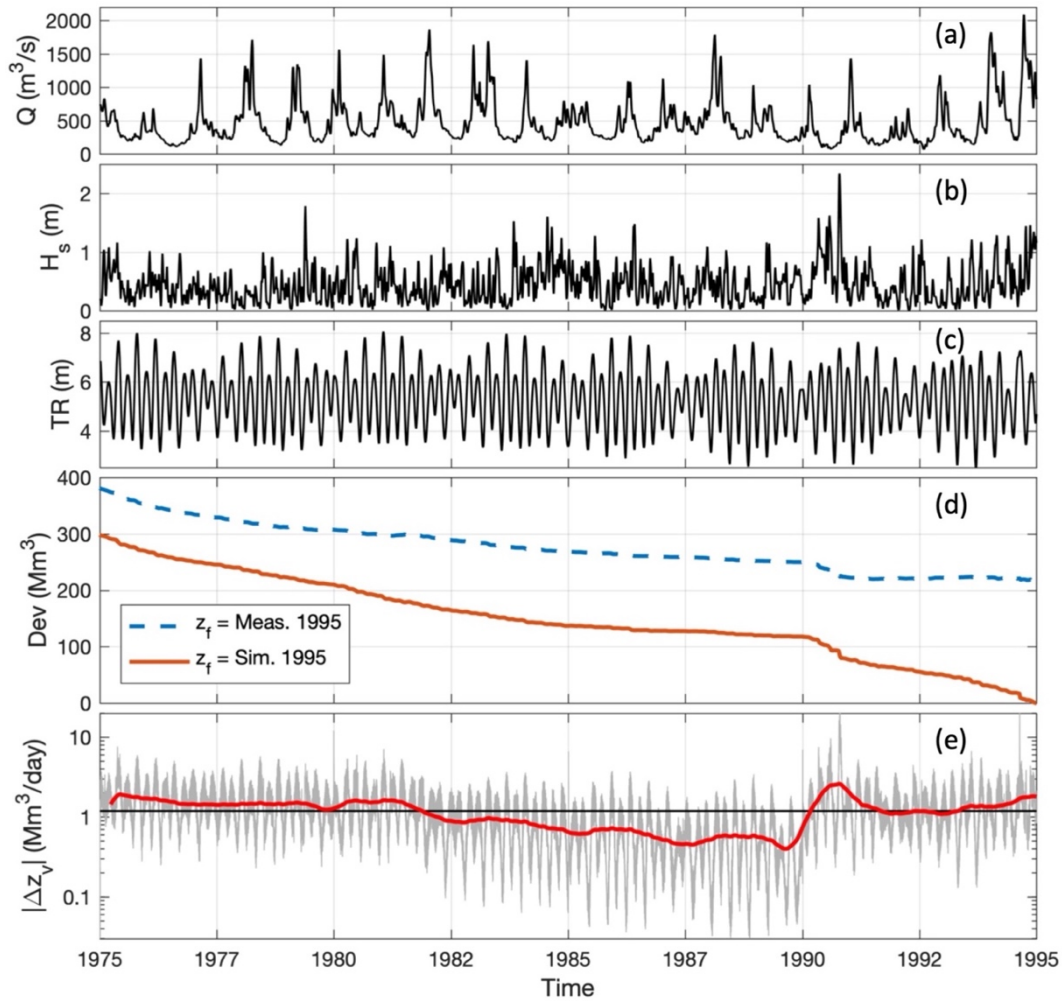


Figure 46. Évolution entre 1975 et 1995 des conditions hydrométéorologiques : (a) débit de la Seine Q à Poses, (b) hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure, (c) marnage TR au Havre ; et des changements morphologiques : (d) écart 'Dev' aux bathymétries finales de 1995 observée ($z_f = \text{Meas. 1995}$) et simulée ($z_f = \text{Sim. 1995}$), et (e) variation altimétrique absolue $|\Delta z_v|$ sur l'ensemble de l'embouchure (données haute-résolution '5 h' : gris ; données filtrées sur 6 mois : rouge).

La Figure 47 synthétise l'influence des principaux forçages (vagues, marnage et débit) sur les évolutions morphologiques. Il n'y a pas de corrélation nette entre le débit et les évolutions morphologiques (Figure 47c), mais la corrélation avec le marnage apparaît nettement avec des évolutions morphologiques plus importantes en période de vives eaux (Figure 47b), soit 2 fois plus élevées que la variation moyenne. Toutefois, c'est durant les périodes où les vagues sont les plus fortes que les évolutions morphologiques sont les plus importantes (Figure 47a). Par exemple, les périodes avec des vagues supérieures à 2 m à l'embouchure induisent des évolutions morphologiques 5 fois plus élevées que la variation moyenne. Enfin, c'est entre 5 et 10 m de profondeur que les évolutions morphologiques sont les plus importantes.

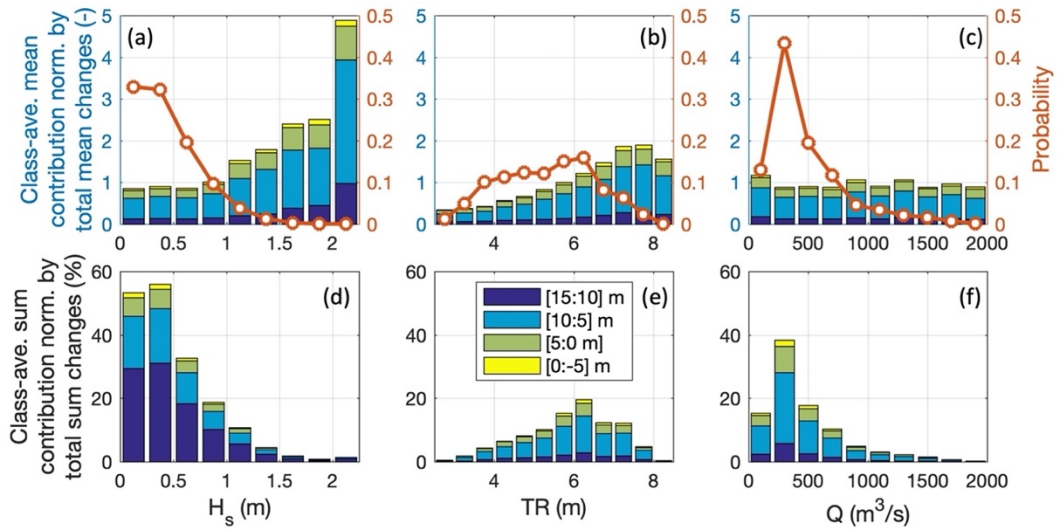


Figure 47. Variation altimétrique absolue $|\Delta z_v|$, pour différentes tranches bathymétriques (couleur), distribuée par classes (gauche) de hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure, (milieu) de marnage TR au Havre et (droite) de débit de la Seine Q à Poses, sur la période 1975-1995. (Haut) Moyenne des contributions (par classe) par rapport à la moyenne des variations totales et (bas) somme des contributions (par classe) par rapport à la somme des variations totales. En haut, les courbes orange représentent les distributions de probabilité d'occurrence des forçages (H_s , TR et Q).

Il est cependant nécessaire de rappeler que ces conditions de fortes vagues sont très rares, comme illustré par la distribution de probabilité d'occurrence (orange) sur la Figure 47a. Même si ces événements induisent des évolutions morphologiques très intenses, le croisement de leur effet avec leur occurrence induit peu de changement à l'échelle globale sur les 20 ans (Figure 47d). Par exemple, les périodes avec des vagues supérieures à 2 m ont une probabilité d'occurrence de 0,05% et sont responsables de 1,5% des évolutions morphologiques totales. Cette tendance se retrouve nettement pour les contributions liées au débit (Figure 47f), principalement calquées sur la distribution d'occurrence. Par contre, on observe une distribution asymétrique pour les contributions liées au marnage (Figure 47e), avec un impact plus important des marées de vives eaux.

Cette étude statistique révèle que le débit a peu d'influence sur les évolutions morphologiques de l'estuaire à l'embouchure, mais que les vagues et le marnage sont impactant. La Figure 48 illustre les corrélations entre les variations morphologiques Δz_v (positif = accrétion et négatif = érosion) et les forçages (H_s et TR) pour différentes zones subtidales ($h_0 = [15:5]$ m) et intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m). Il est intéressant de voir que les forçages de vagues et de marnage ont des effets très contrastés :

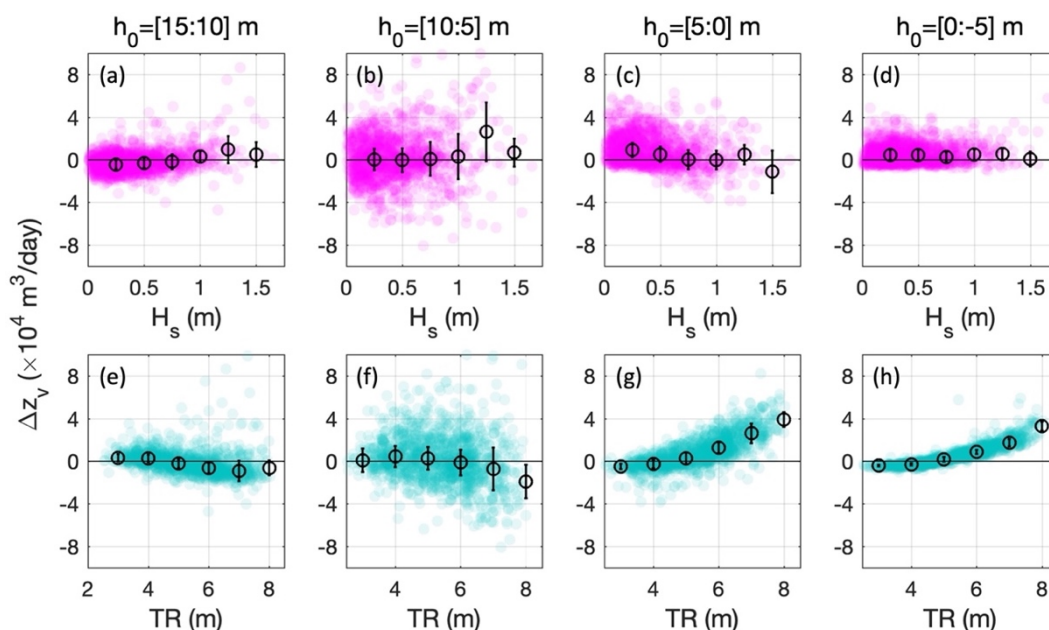


Figure 48. Variation altimétrique Δz_v sur la période 1975-1995 pour différentes tranches bathymétriques (de gauche à droite : subtidal \rightarrow intertidal), en fonction (haut) de la hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure et (bas) du marnage TR au Havre. Les symboles représentent les moyennes par classes de H_s (0,25 m, haut) et TR (1 m, bas) et les moustaches représentent les écarts type associés.

- Les vagues ont tendance à favoriser l'accrétion des zones subtidales, mais à favoriser l'érosion des zones intertidales. Ces effets sont en accord avec la dynamique estuarienne « classique » où le sédiment est remis en suspension dans les zones peu profondes et plus énergétiques (i.e. où les vagues se font plus ressentir) et advecté dans les zones plus profondes et plus calmes [Friedrichs, 2011] ;
- Le comportement inverse est observé pour l'effet du marnage, avec une tendance à favoriser l'érosion des zones subtidales en vives eaux, mais à favoriser l'accrétion des zones intertidales. Ce comportement s'explique par les niveaux d'eau plus élevés en vive eaux, ainsi que des concentrations en MES plus fortes, permettant de « nourrir » davantage les estrans [De Vet *et al.*, 2020].

Ces simulations rétrospectives apportent un éclairage sur les événements morphogènes de l'embouchure et permettent de mieux quantifier les contributions respectives des principaux forçages (marée, vagues) sur les évolutions morphologiques. Sachant que les vagues peuvent jouer un rôle important sur la dynamique sédimentaire de l'embouchure, l'augmentation de l'intensité et/ou de la fréquence des événements de tempêtes attendue dans le cadre du changement climatique [Pachauri *et al.*, 2014; Young & Ribal, 2019; Passeri *et al.*, 2020], pourra avoir un effet significatif sur les évolutions morphologiques de l'estuaire.

4.2.2. Évolutions morphosédimentaires tendancielle sur 50 ans

L'étude de l'influence des pressions climatiques sur la morphodynamique de l'estuaire de Seine s'appuie sur deux simulations de 50 ans pour lesquelles les conditions de forçage sont identiques à celles utilisées dans la Section 4.1.2 (p.57) : i.e. année hydrologique 2015, bathymétrie initiale 2016, $MF = 5$ et prise en compte des dragages avec les clapages du GPMR sur le site du Kannik. Ces deux simulations diffèrent seulement par la variabilité de la montée du niveau moyen de la mer (NM) suivant les scénarios RCP 2.6 et 8.5 du GIEC 2017 [Sweet *et al.*, 2017] (Figure 49) :

- RCP 2.6 est le scénario où les émissions de CO_2 atteignent un pic avant 2020, l'augmentation attendue du NM est de +3 mm/an (tendance actuelle de la montée du NM) ;
- RCP 8.5 est le scénario où les émissions continuent d'augmenter comme actuellement, l'augmentation attendue du NM est de +24 mm/an.

Ces valeurs de montée du NM ne sont pas issues de prédictions régionales en baie de Seine, mais elles permettent d'étudier une gamme de variations assez larges et représentatives des situations futures potentielles. Dans le cadre de nos simulations, l'année 2015 est simulée 10 fois consécutivement (équivalent à la période 2016-2066 avec $MF = 5$), avec une augmentation du NM après chaque année simulée (5x 3 mm pour RCP 2.6 et 5x 24 mm pour RCP 8.5). Il n'y a pas d'augmentation la première année, donc l'élévation finale du NM en 2066 atteint +0,135 m pour RCP 2.6 et +1,08 m pour RCP 8.5.

Les évolutions morphologiques sur 50 ans (Figure 50) sont semblables à celles simulées sur 10 ans (Section 4.1.2, p.57), mais plus intenses. De manière assez surprenante, on note peu de différences sur les différentiels bathymétriques en termes d'hauteur Δh entre les simulations avec RCP 2.6 et 8.5 (Figure 50d et e), alors que la différence finale du NM est proche de 1 m (0,945 m). Cependant, cela se traduit par une accrétion générale de l'estuaire nettement plus forte pour le scénario RCP 8.5, visible sur les différentiels bathymétriques en termes d'élévation Δz (Figure 50f et g). Cela reflète une adaptation de l'estuaire vers un état d'équilibre associé au NM.

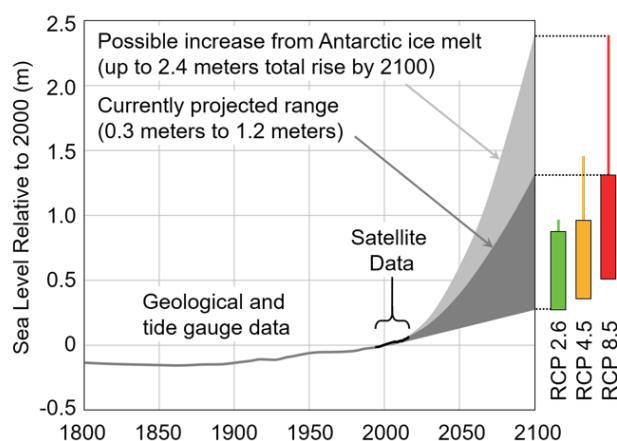


Figure 49. Reconstruction du niveau moyen de la mer et projection à 2100. RCP 2.6 est le scénario où les émissions de CO_2 atteignent un pic avant 2020, RCP 4.5 où le pic est proche de 2040, et RCP 8.5 où les émissions continuent d'augmenter comme actuellement (source : Sweet *et al.* [2017]).

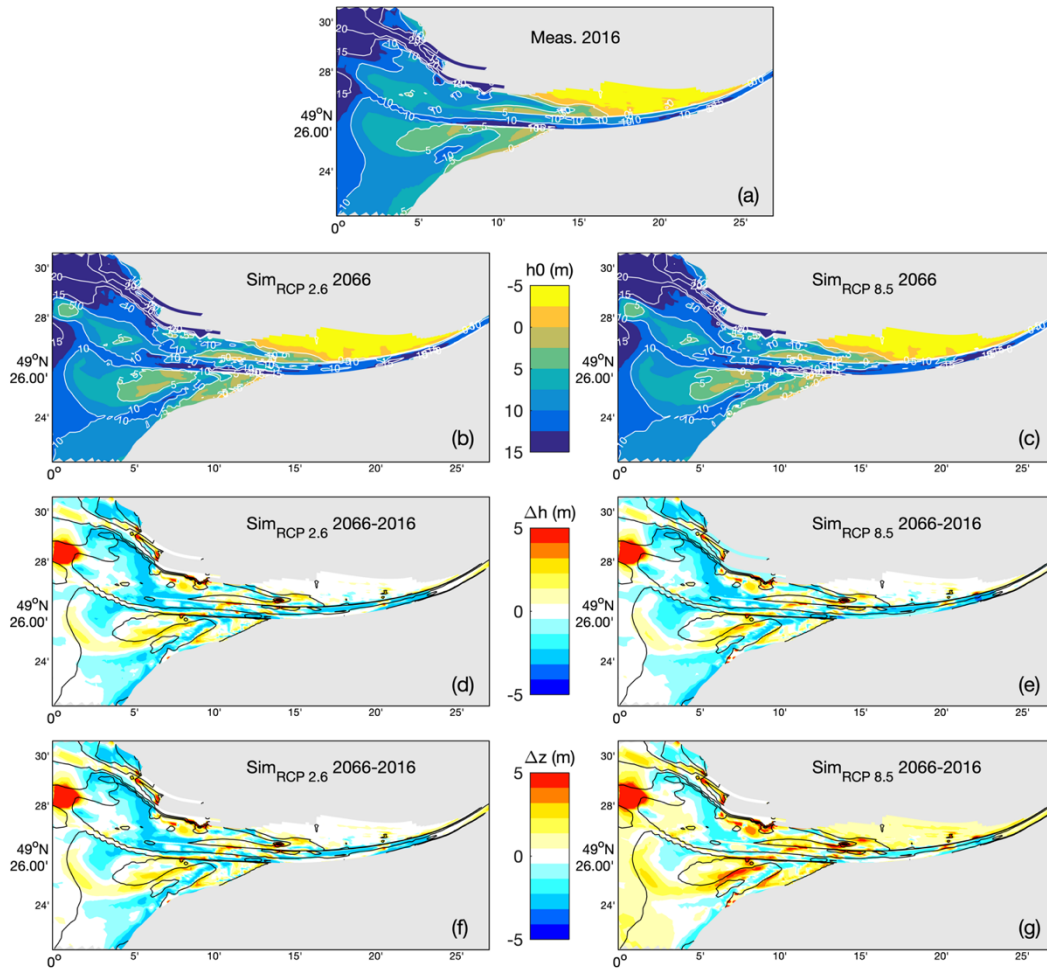


Figure 50. Évolution morphologique de l'estuaire aval sur 50 ans. Bathymétries h_0 (a) initiale en 2016 et (b, c) simulées en 2066 ; (d, e) différentiels bathymétriques en terme d'hauteur d'eau Δh , ; et (f, g) différentiels bathymétriques en termes d'élévation Δz . Simulations avec une montée du niveau de la mer suivant les scénarios (gauche) RCP 2.6, +3 mm/an et (droite) RCP 8.5, +24 mm/an.

Sur la quasi-totalité des zones de l'estuaire, les cubatures de la simulation RCP 8.5 présentent de l'accrétion, alors que les tendances sont plus contrastées pour la simulation RCP 2.6 [Grasso *et al.*, 2021b], impliquant que l'adaptation de l'estuaire face à la montée du NM est associée à une forte accrétion de l'ensemble de l'estuaire (non illustré). Cela nécessite que suffisamment de sédiments (d'origine marine et fluviale) soient disponibles pour nourrir le système et que l'augmentation du NM ne soit pas trop rapide [Ganju & Schoellhamer, 2010]. Toutefois, on note que même avec une élévation forte (RCP 8.5 : +24 mm/an), l'estuaire de Seine semble capable de s'adapter et conserver la majorité de ses surfaces intertidales.

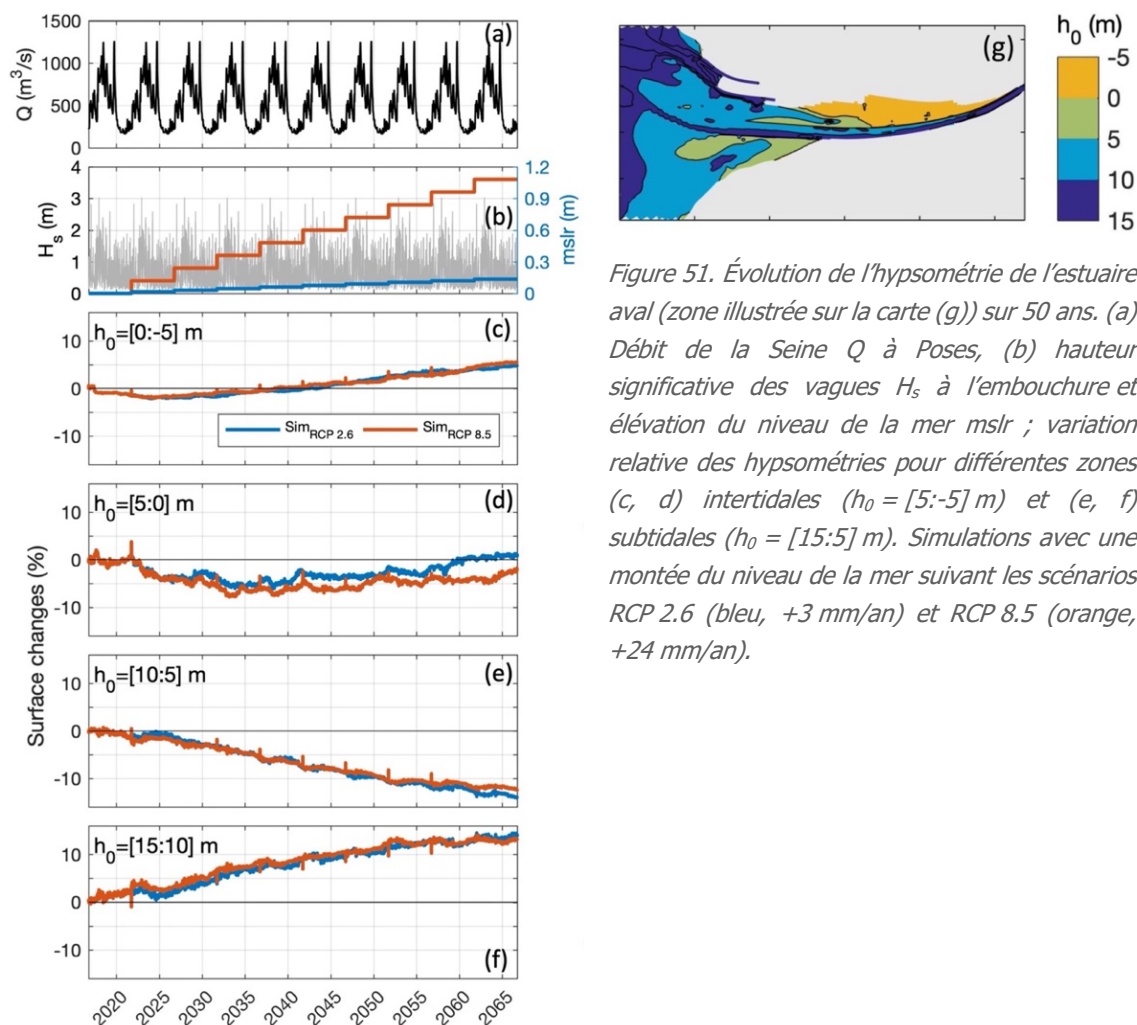


Figure 51. Évolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval (zone illustrée sur la carte (g)) sur 50 ans. (a) Débit de la Seine Q à Poses, (b) hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure et élévation du niveau de la mer mslr ; variation relative des hypsométries pour différentes zones (c, d) intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et (e, f) subtidales ($h_0 = [15:5]$ m). Simulations avec une montée du niveau de la mer suivant les scénarios RCP 2.6 (bleu, +3 mm/an) et RCP 8.5 (orange, +24 mm/an).

Afin de mieux quantifier ces évolutions morphologiques, une analyse hypsométrique semblable à celle des parties précédentes a été menée (Figure 51). Les variations de surface pour les deux scénarios de montée du NM sont très similaires dans les zones subtidales ($h_0 = [15:5]$ m) et intertidales supérieures ($h_0 = [0:-5]$ m). Cela implique qu'il y a une réelle adaptation morphologique de l'estuaire au cours de l'élévation du NM. Néanmoins, la simulation avec RCP 8.5 montre une perte des estrans inférieurs (-3% au lieu de +1% pour RCP 2.6 ; Figure 51d).

Les changements morphologiques peuvent également être analysés en suivant différentes radiales caractéristique de l'estuaire (Figure 52) : une longitudinale le long du banc du Ratier (radiale AB), et deux transversales le long des vasières nord-ouest (VNO, radiale BC) et nord-est (VNE, radiale DE). Les profils bathymétriques associés à ces radiales sont moyennés sur 3 mailles (soit environ 300 m, pointillés sur la Figure 52a).

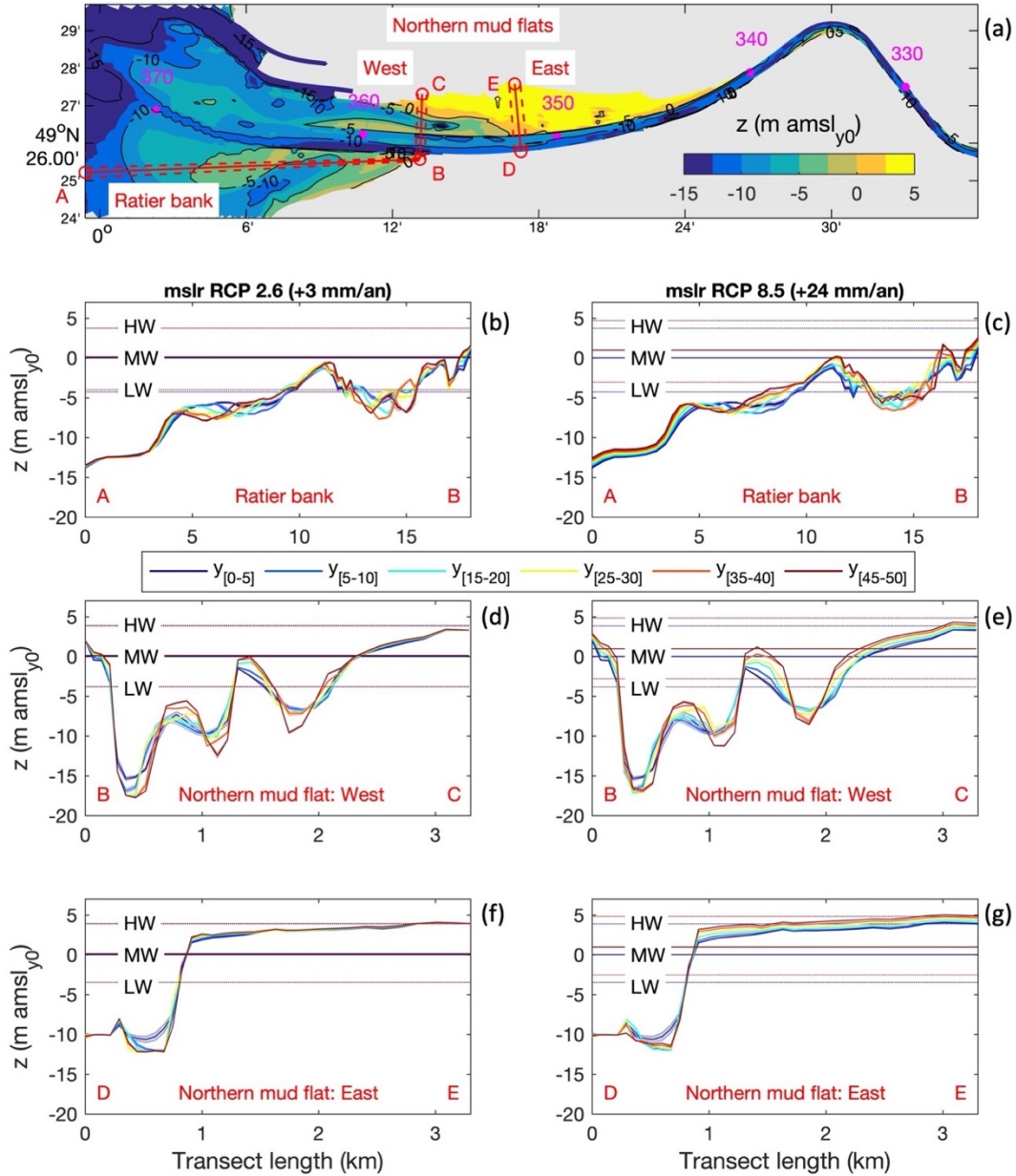


Figure 52. Évolution morphologique sur 50 ans de trois radiales caractéristiques de l'estuaire (cf. carte a) : (b, c) banc du Ratier AB, (d, e) vasière nord-ouest BC et (f, g) vasière nord-est DE ; pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6, +3 mm/an et (droite) RCP 8.5, +24 mm/an. Élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' définissent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

La radiale AB caractérisant le banc du Ratier (Figure 52b et c) illustre bien la progradation du banc vers l'ouest, associée à un raidissement du flanc et une accentuation de la barre sédimentaire au km 4. Ce comportement est encore plus marqué pour la simulation RCP 8.5, avec une progradation d'environ 400 m en 50 ans (~ 8 m/an) et une élévation d'environ 1 m (~ 2 cm/an). On observe également que le banc découvrant vers le km 12, est en accrétion et suit la montée du NM.

Le long de la radiale BC sur la VNO (Figure 52b et c), on assiste à un approfondissement des trois chenaux (i.e. chenal principal, chenal secondaire et méandre au nord de la DBN) pour les deux scénarios (RCP 2.6 et 8.5). En revanche, les zones intertidales sont en accrétion, avec une surélévation d'environ 1 m en 50 ans pour la simulation RCP 8.5. Le même type de comportement est observé sur la VNE, malgré une configuration très contrastée avec une vasière « perchée » de très faible pente, contrainte par la digue basse nord. Ces résultats illustrent une adaptation de l'estuaire à la montée du NM. Cependant, pour savoir si l'élévation des estrans arrive à suivre celui du NM, nous cherchons à quantifier plus précisément l'évolution des élévations maximales des VNO et VNE au cours des 50 ans (Figure 53).

Pour les deux scénarios de montée du NM, les comportements sont très différents entre les deux vasières. L'élévation de la VNO (bleue) suit très bien celle du NM (noir), et peut même la dépasser dans le cas de la simulation RCP 2.6. Il y a donc ici une adaptation de la vasière sans perte d'estran supérieur (voir un léger gain). Par contre, l'élévation de la VNE (marron) ne suit pas aussi rapidement celle du NM, entraînant pour les deux scénarios une perte d'estran supérieur. Il est frappant de remarquer qu'après 50 ans de simulation avec RCP 2.6 (NM +0,135 m) et RCP 8.5 (NM +1,08 m) l'élévation maximale de la VNE se retrouve toujours à la même cote sous le NM (-5,5 cm pour RCP 2.6 et -5,6 cm pour RCP 8.5). Il semblerait donc que la perte d'estran supérieur, ne soit pas liée à la montée du NM, mais plutôt à l'évolution morphologique de la vasière vers un profil d'équilibre.

En résumé, cette étude morphodynamique prospective pour différents scénarios climatiques de montée du NM met en évidence trois points importants pouvant s'appliquer à d'autres systèmes :

- Les estuaires peuvent s'adapter à la montée du NM à l'échelle de 50 ans, si suffisamment de sédiments sont disponibles dans le système ;
- La capacité d'adaptation des zones intertidales dépend de l'équilibre morphodynamique local ;
- Il est indispensable de réaliser des simulations avec couplage morphodynamique (et non morphostatique) lorsque l'on veut étudier l'influence de la montée du NM, car la capacité d'adaptation de l'estuaire n'est pas la même pour une montée progressive (ex. +20 mm/an sur 50 ans) ou brutale (+1 m) du NM.

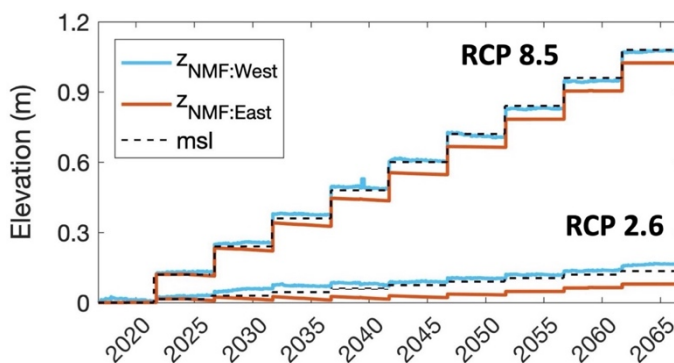


Figure 53. Évolution du niveau de la mer mslr (noir) et de l'élévation maximale des vasières nord-ouest $Z_{NMF:West}$ (bleu) et nord-est $Z_{NMF:East}$ (marron) (cf. Figure 52a) sur 50 ans, pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : RCP 2.6 (+3 mm/an) et RCP 8.5 (+24 mm/an).

5. Bilan et perspectives de recherche à moyens termes

5.1. Bilan de mes activités de recherche

Depuis mon arrivée à l'Ifremer en 2012, mon activité de recherche a principalement consisté à étudier la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires tidaux dans le but de déterminer comment évolueront ces systèmes dans le cadre du changement global (anthropique et climatique). Pour aborder cette problématique, j'ai adopté une méthodologie combinant des observations *in situ*, des expérimentations en laboratoire et de la modélisation numérique. J'ai essentiellement suivi une approche *bottom-up* allant de l'étude des processus hydro-sédimentaires à celle de l'évolution des systèmes à plus long terme (i.e. estuaires sur plusieurs décennies). Concernant les sites d'étude, je me suis principalement intéressé aux grands estuaires macrotidaux métropolitains (i.e. Gironde et Seine).

Parmi les avancées les plus significatives, l'analyse de la sédimentation et de la consolidation des sédiments mixtes (sable-vase) à partir de colonnes de tassement m'a permis d'améliorer la formulation de ces mécanismes dans le modèle sédimentaire MUSTANG (développé par notre équipe). Les développements apportés concernent principalement la prise en compte des processus de ségrégation entre la sédimentation des sables et celle de la vase, permettant d'améliorer notre capacité à simuler l'érodabilité des sédiments mixtes présents dans les milieux estuariens.

Les campagnes de mesures que j'ai réalisées, autant pour suivre l'altimétrie des vasières intertidales que la turbidité à l'embouchure des estuaires, ont principalement servi à améliorer la calibration de nos modèles numériques et ainsi augmenter le réalisme des simulations. J'ai accordé une grande importance à la quantification des erreurs et incertitudes sur nos simulations hydro-morpho-sédimentaires. Bien que basés sur une approche *process-based* déterministe, les modèles déployés en estuaires peuvent avoir de fortes incertitudes associées tant à la paramétrisation du transport sédimentaire qu'à la validation indirecte des quantités étudiées (ex. validation des flux sédimentaires à partir des concentrations en matières en suspension ou des bilans sédimentaires).

J'ai donc utilisé les modèles numériques comme des outils, connaissant leurs forces et leurs faiblesses, pour étudier certaines caractéristiques du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire des estuaires. Cela m'a permis de mettre en évidence l'influence des forçages tidaux, hydrologiques et océaniques sur la dynamique du bouchon vaseux, et en particulier de caractériser les hystérésis observées sur sa masse et son positionnement lors des cycles de vive eau - morte eau.

De plus, une étude diachronique basée sur différentes morphologies de l'estuaire de Seine, associées aux perturbations anthropiques des 50 dernières années (i.e. dragages des chenaux et extensions portuaires), nous a éclairé sur le changement de comportement physique de l'estuaire. La circulation barocline induite par les gradients de salinité, de faible importance dans les années 1960, s'est vue fortement renforcée en 2010 par l'effet de l'approfondissement et du rétrécissement de l'estuaire. Cela a généré une remontée de l'intrusion saline vers l'amont et une augmentation de la turbidité (en moyenne +25%) dans l'estuaire.

L'application de ces modèles hydro-sédimentaires à différents estuaires macrotidaux (i.e. Gironde, Loire et Seine) a permis de générer un ensemble de rejeux numériques pluriannuels (de 9 à 22 ans), à ma connaissance unique en son genre. Ce type de rejeu a par exemple servi à caractériser et conceptualiser l'influence des changements météorologiques (i.e. vagues et débit des fleuves) et anthropiques (i.e. approfondissement et rétrécissement de l'estuaire) sur la variabilité des flux sablo-vaseux le long du continuum estuaire-mer côtière. Ces rejeux ont également été exploités pour apporter les paramètres environnementaux (ex. hauteur d'eau, courant, température, salinité, turbidité, morphologie) nécessaires à diverses études interdisciplinaires. L'utilisation de ces données a par exemple aidé à caractériser la distribution d'espèces benthiques et pélagiques en milieu estuarien et côtier (ex. sole, esturgeon, macrofaune benthique).

Enfin, dans le cadre du changement climatique, je me suis intéressé à l'influence de la montée du niveau de la mer sur l'évolution morphologique des estuaires. A partir de simulations morphodynamiques longs termes (50 ans), j'ai pu montrer qu'un système estuarien a la capacité de s'adapter à la montée du niveau de la mer, même dans le cas d'une élévation rapide (i.e. RCP 8.5), à condition que suffisamment de sédiments soient disponibles dans le système. Ce type de simulations prospectives contient de nombreuses incertitudes, cependant la validation morphodynamique et hypsométrique sur la période actuelle nous conforte dans la capacité du modèle à apporter des informations pertinentes sur les trajectoires potentielles des habitats estuariens (ex. zones intertidales) dans le cadre du changement global.

5.2. Perspectives de recherche à moyens termes

Mes activités de recherches au cours des 15 dernières années ont ouvert un champ de questionnements techniques et scientifiques que j'aimerais d'avantage investiguer à moyens termes (5-10 ans). Sont présentés dans ce chapitre trois domaines d'études principaux :

- L'analyse de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire inter-estuariens ;
- L'étude de l'influence des vagues sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des embouchures estuariennes ;
- L'étude de la dynamique des filandres et de leur rôle dans les évolutions morphosédimentaires des vasières intertidales.

5.2.1. Caractérisation globale de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire estuarienne

Mes activités de recherche récentes m'ont amené à identifier un important verrou scientifique limitant notre compréhension globale de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire estuarienne. Ce verrou repose sur des approches généralement site-spécifique, ne permettant pas de facilement généraliser les avancées scientifiques à d'autres systèmes. Pour essayer d'y remédier, je me dirige vers une approche inter-estuariens qui consiste à comparer différents systèmes estuariens pour en dégager une compréhension et conceptualisation globale. Ce type d'approche a été adopté pour caractériser la circulation estuarienne [Geyer & MacCready, 2014] ou certains comportements sédimentaires [Uncles, 2002; Winterwerp *et al.*, 2013], mais il n'existe pas encore de formulations simples pour caractériser la dynamique sédimentaire estuarienne.

Caractérisation de la turbidité estuarienne

Cette dynamique inter-estuariens a récemment été lancée avec le projet CAPTURE financé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB) dans le cadre de la Mission Inter-Estuariens (MIE) : « Vers une CARactérisation et Paramétrisation globale de la TURbidité dans les Estuariens sous pressions anthropiques et climatiques » (2021-2024). En combinant l'observation *in situ* et la modélisation numérique sur les grands estuariens tidaux nord-européens (en France, Belgique, Pays-Bas et Allemagne ; Figure 54), ce projet vise principalement à étudier quelle est l'influence des paramètres estuariens clés (ex. marée, apports des fleuves, morphologie) sur la mise en suspension des particules (ex. intensité et position du bouchon vaseux). Cela permettra de :

- Comprendre pourquoi les niveaux de turbidité diffèrent fortement d'un estuaire à l'autre ;
- Proposer une typologie estuarienne basée sur les principaux forçages physiques ;
- Proposer des métriques pour caractériser la turbidité en soutien à la définition des indicateurs du Bon État Écologique des eaux de transition dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau.

Ces objectifs sont ambitieux, mais la démarche est facilitée par les configurations numériques hydro-sédimentaires que nous avons déjà déployées sur les estuaires de la Gironde [Diaz *et al.*, 2020], de la Loire (thèse INTEREST) et de la Seine [Grasso *et al.*, 2018b]. De plus, ce travail s'appuiera sur l'analyse des mesures *in situ* haute-fréquence ($\sim 5-30$ minutes) pluriannuelles des réseaux d'observation MAGEST en Gironde [Jalón-Rojas *et al.*, 2015; Schmidt *et al.*, 2016], SYVEL en Loire [Jalón-Rojas *et al.*, 2016] et SYNAPSES en Seine [Druine *et al.*, 2018].

Ces travaux s'appuieront également sur un groupe de travail européen réunissant une dizaine d'experts en dynamique hydro-sédimentaire estuarienne. Les réflexions menées conjointement sur les 7 estuaires du projet CAPTURE (i.e. Gironde, Loire, Seine, Escaut, Ems, Weser et Elbe ; Figure 54) seront déterminantes pour arriver à conceptualiser la turbidité estuarienne, et en dériver les applications potentielles sur les plus petits estuaires moins documentés.

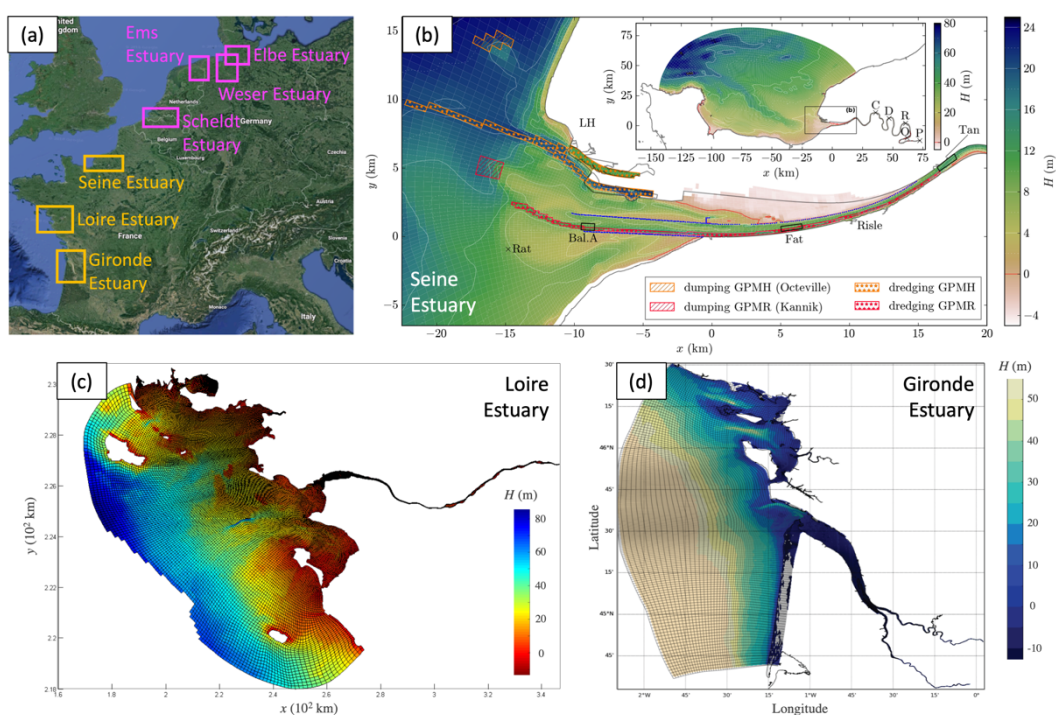


Figure 54. (a) Estuaires français et européens étudiés dans le cadre du projet CAPTURE. Représentation des configurations numériques des estuaires (b) de la Seine CurviSeine, (c) de la Loire CurviLoire et (d) de la Gironde CurviGironde.

Toutefois, l'étude des écosystèmes estuariens regroupe un ensemble de disciplines (ex. biologie, biogéochimie, écologie benthique et pélagique) dont les besoins en termes de quantification de la dynamique sédimentaire varient (ex. turbidité/MES, masse/position/extension du bouchon vaseux, valeurs min/moyen/max, surface/fond, été/hiver). Pour définir les besoins propres à chaque discipline, il est également prévu de s'appuyer sur un groupe d'experts nationaux. La définition de métriques pertinentes pour les études interdisciplinaires permettra aussi de mieux répondre aux problématiques des gestionnaires locaux. Pour plus de détails, le descriptif du projet CAPTURE est disponible en annexe (Projet CAPTURE, p.99).

Caractérisation des flux sédimentaires et des trajectoires morphosédimentaires

Le projet CAPTURE porte principalement sur la caractérisation de la turbidité dans les estuaires. Toutefois, si les résultats et les outils d'application se révèlent concluants, il sera intéressant de poursuivre ces travaux en s'intéressant à la quantification de paramètres hydro-morphosédimentaires encore plus complexes. Par exemple, étudier les transferts sédimentaires résiduels (i.e. import-export de sédiment) entre les bassins versants en amont et les mers côtières en aval permettra de :

- Quantifier le transfert de particules le long du continuum terre-mer ;
- Mieux appréhender les trajectoires morphosédimentaires des systèmes estuariens dans le cadre du changement global.

Comme cela a été fait pour l'estuaire de Seine (Figure 39 ; Grasso *et al.* [2021a]), la conceptualisation inter-estuariens des flux sédimentaires permettra de déterminer les tendances morphologiques des embouchures (ex. comblement, érosion). Cela pourra se traduire par une formulation des réponses hypsométriques (ex. évolution des zones intertidales), permettant de mieux caractériser l'évolution des habitats (i.e. biotopes) pour différentes pressions climatiques (ex. montée du niveau de mer, variabilité des apports de fleuves et des événements de tempêtes) et anthropiques (ex. activités de dragage/clappage, chenalisation, extensions portuaires).

5.2.2. Influence des vagues sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des embouchures estuariennes

Les embouchures estuariennes sont exposées aux vagues provenant des mers et océans adjacents [Coco *et al.*, 2013]. Ces vagues ont un effet sur la remise en suspension des sédiments, modifiant les flux de vase et de sable entre l'estuaire et les mers côtières (Figure 38 ; Grasso *et al.* [2021a]). Cependant, l'action des vagues peut également impacter la morphodynamique des bancs aux embouchures en induisant un transport sédimentaire résiduel différent de celui induit par les courants barotropes et baroclines [Green & Coco, 2014].

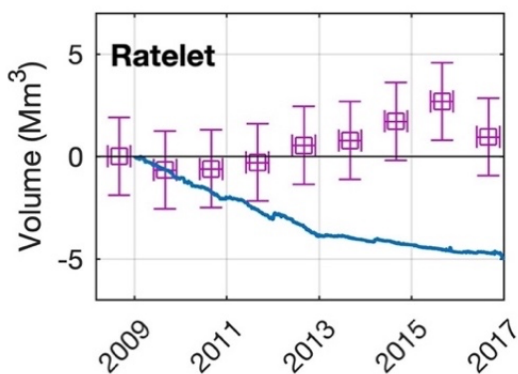


Figure 55. Cubatures sur la zone du Ratelet (définies sur la Figure 41) pour le scénario rétrospectif 'Hindcast' (2009-2016 ; p.53), mesurées par le GPMR (symboles) et simulées (ligne).

Historiquement, les compétences acquises sur la modélisation du transport sédimentaire induit par les vagues ont principalement été appliquées aux environnements purement sableux, tels que les plages [Castelle *et al.*, 2007; Price & Ruessink, 2011; Bochat Albernaz *et al.*, 2019]. Dans le cas des environnements semi-abrités (i.e. baies, estuaires) se caractérisant par des sédiments sablo-vaseux, la prise en compte de l'effet des vagues est généralement simplifiée par la seule considération des contraintes de frottement au fond [Lesser *et al.*, 2004; Le Hir *et al.*, 2011]. La combinaison des contraintes de frottement induites par les courants et les vagues [Soulsby, 1997] permet de rendre compte de la mise en suspension induite par la vitesse orbitale des vagues, mais le transport sédimentaire est seulement associé à l'intensité et à la direction des courants. Cette hypothèse est valable pour les sédiments fins lorsque le transport se fait principalement par advection, mais n'est plus valide pour des sédiments plus grossiers (ex. sables) où le transport peut se faire par charriage et dépend des caractéristiques des vagues [Grasso *et al.*, 2011].

Ces simplifications pourraient expliquer la difficulté qu'on rencontre à simuler certaines évolutions morphologiques, comme par exemple l'accrétion au niveau du Ratelet en estuaire de Seine (Figure 55). Afin d'améliorer la modélisation morphodynamique des embouchures estuariennes, il sera intéressant de développer deux aspects associés à l'effet des vagues : (i) l'influence des vagues sur la circulation résiduelle des embouchures et (ii) l'influence des asymétries des vagues sur le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques associées.

Influence des vagues sur la circulation résiduelle des embouchures estuariennes

Dans les environnements côtiers, les contraintes de radiation des vagues induisent une circulation résiduelle renforcée lorsque les vagues déferlent [Longuet-Higgins & Stewart, 1964]. L'intensité de ces courants est généralement négligeable par rapport aux courants de marée des estuaires macrotidaux, mais la circulation hydrodynamique au niveau des bancs d'embouchure peut cependant être impactée [Bertin *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2015].

Il conviendrait donc de faire une étude de sensibilité pour déterminer quelle est l'influence des contraintes de radiation sur la circulation à l'embouchure des estuaires, et comment cela impacterait les évolutions morphologiques. Sachant que l'intensité des courants induits par les vagues dépend des configurations estuariennes (ex. exposition et caractéristiques des vagues), l'effet sera sûrement plus fort à l'embouchure de la Gironde par rapport à la Seine, car les conditions de vagues y sont plus intenses (i.e. hauteurs plus élevées et périodes plus longues).

Ce type d'étude numérique pourra d'abord être mis en place sur une configuration schématique (ex. morphologie idéalisée et variation des conditions de marée et de vagues). Une application aux estuaires de la Gironde et de la Seine pourra ensuite être envisagée pour quantifier de manière plus réaliste l'intérêt d'une telle approche pour des estuaires aux comportements contrastés. Cependant, cela nécessite que les modèles numériques aient une résolution spatiale suffisamment fine (~ 10 m) pour correctement simuler la transformation des vagues dans les zones de déferlement. Ce travail pourra être réalisé en collaboration avec Xavier Bertin (UMR LIENSs), expert en modélisation hydro-sédimentaire des embouchures tidales dominées par les vagues.

Influence des asymétries des vagues sur la morphodynamique des embouchures estuariennes

Lorsque les vagues se propagent par faible profondeur, leur forme initialement sinusoïdale change pour devenir asymétrique (Figure 56). Cela crée des asymétries de vitesse orbitale (entre les intensités et les durées des phases de crête et de creux), favorisant dans la plus part des cas un transport orienté dans le sens de propagation des vagues [Grasso *et al.*, 2011]. Ce même type de mécanisme se produit sur les bancs d'embouchure, mais n'est que très rarement considéré dans la modélisation des systèmes estuariens dominés par la marée. Ruessink *et al.* [2012] ont proposé des formulations permettant d'estimer les asymétries des vagues à partir des conditions moyennes des vagues (i.e. modèle à phase moyennée du type WW3), sans avoir besoin de simuler explicitement l'évolution de la surface libre (ex. modèle du type Boussinesq ; Tissier *et al.* [2012]).

Il sera donc possible d'intégrer l'effet de l'asymétrie des vagues au transport sédimentaire par charriage actuellement calculé dans nos modèle [Mengual *et al.*, 2020], comme cela a été fait pour des modèles appliqués aux plages sableuses [Dubarbier *et al.*, 2015; Boechat-Albernaz *et al.*, 2019]. Ce développement numérique, ne nécessitant pas obligatoirement une fine résolution spatiale, pourra être appliqué à la configuration de l'estuaire de Seine pour tester si cela améliore notre capacité à simuler l'évolution morphologique au niveau du Ratelet (Figure 55). La formulation du transport sédimentaire par les vagues pourra ensuite être intégrée au modèle sédimentaire MUSTANG. Ce travail pourra être réalisé en collaboration avec Bruno Castelle (UMR EPOC), expert en modélisation hydro-sédimentaire des plages sableuses.

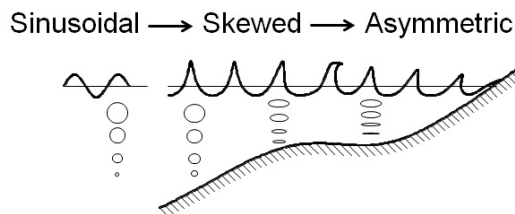


Figure 56. Illustration de l'évolution de la forme des vagues lors de leur propagation le long d'un profil de plage [Rocha *et al.*, 2013].

Stratégie de modélisation pour l'étude de l'influence des vagues sur la morphodynamique estuarienne

La prise en compte des vagues sur la circulation estuarienne nécessite une fine résolution du maillage horizontal (~ 10 m). De plus, le suivi de certaines structures morphologiques estuariennes (ex. bancs, fosses, chenaux) peut également nécessiter une fine résolution spatiale. Sachant que la résolution impacte fortement les temps de calcul, une solution intéressante consiste à adopter une méthode de grilles gigognes de type AGRIF (Figure 57 ; Debreu *et al.* [2008]). La méthode AGRIF permet de transférer l'information en *two-ways* entre les grilles mères et filles, ce qui évite de perdre de l'information lorsqu'il y a des échanges réguliers entre les différents niveaux de raffinement. Cette approche, largement utilisée en hydrodynamique côtière, est encore marginale pour les études hydro-sédimentaires, et reste très rarement appliquée aux études morphodynamiques.

L'utilisation d'un maillage curviligne (ex. CurviSeine, CurviGironde et CurviLoire ; Figure 54) est appropriée pour optimiser les temps de calcul pour une morphologie donnée : fine résolution dans les zones d'intérêt et maillage plus grossier au large, allongement des mailles dans le sens de l'écoulement principal, et suivi des méandres amont. Cependant, ce type de maillage n'est plus forcément optimisé lorsque la morphologie de l'estuaire évolue, avec par exemple la migration d'un chenal. Un maillage régulier avec des mailles carrées, dont la résolution varie avec la méthode AGRIF en fonction des zones d'intérêt, représente ainsi une solution pertinente pour les simulations morphodynamiques des estuaires.

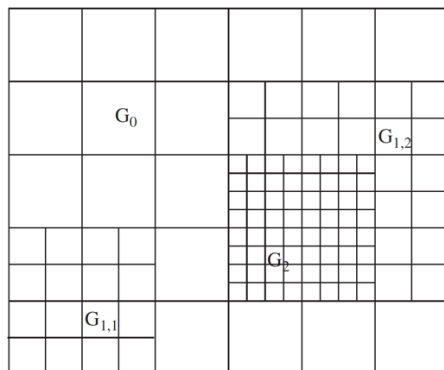


Figure 57. Exemple d'une hiérarchie de grille AGRIF : une grille mère G_0 a deux grilles filles $G_{1,1}$ et $G_{1,2}$; à un deuxième niveau de raffinement, G_2 est une grille fille de $G_{1,2}$ [Debreu et al., 2008].

5.2.3. Étude des filandres et de leur rôle dans la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des zones intertidales estuariennes

Les filandres sont des structures hydro-morpho-sédimentaires caractéristiques des zones intertidales, transversales à l'axe principal des fleuves (Figure 58). Pouvant mesurer de l'ordre de $l \sim 10-100$ m de long et $l \sim 1-10$ m de large, elles jouent un rôle important dans le fonctionnement écologique de l'estuaire en assurant différentes fonctions [Reed *et al.*, 1999] :

- Une connexion d'annexes hydrauliques entre les prés salés et le fleuve, favorisant le transfert de nutriments et d'espèces animales et végétales ;
- Une zone de stockage et de source de vases associée à la dynamique du bouchon vaseux ;
- Un réseau trophique productif pour les poissons et les oiseaux.

Ces structures peuvent se former à partir des courants de jusant qui créent des sillons à la surface du sédiment, et/ou grâce aux apports continentaux provenant des zones humides proches qui s'écoulent vers le fleuve. Les cycles de marée permettent leur remplissage à marée haute et leur vidange à marée basse [Lesourd *et al.*, 2012]. Bien qu'il existe des études quantifiant les flux sédimentaires associés à ces structures [Voulgaris & Meyers, 2004; De Vet *et al.*, 2018], il manque encore une compréhension quantitative permettant d'intégrer ces mécanismes au sein de modèles numériques à plus grande échelle. En effet, ces structures sont en général présentes à une résolution sous-maille ne permettant pas de directement prendre en compte leurs effets sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des systèmes estuariens. Il est donc important de mieux connaître leur dynamique et leur rôle sur le fonctionnement des zones intertidales, afin d'améliorer la prédiction des évolutions morphologiques des estuaires.



Figure 58. Photos aériennes de filandres : (gauche) dans l'estuaire de la Charente et (droite) sur la Vasière Nord en estuaire de Seine (sources : (gauche) Parc Naturel Marin de l'Estuaire de la Gironde et de la mer des Pertuis ; et (droite) projet HYMOSED, Seine-Aval 5).

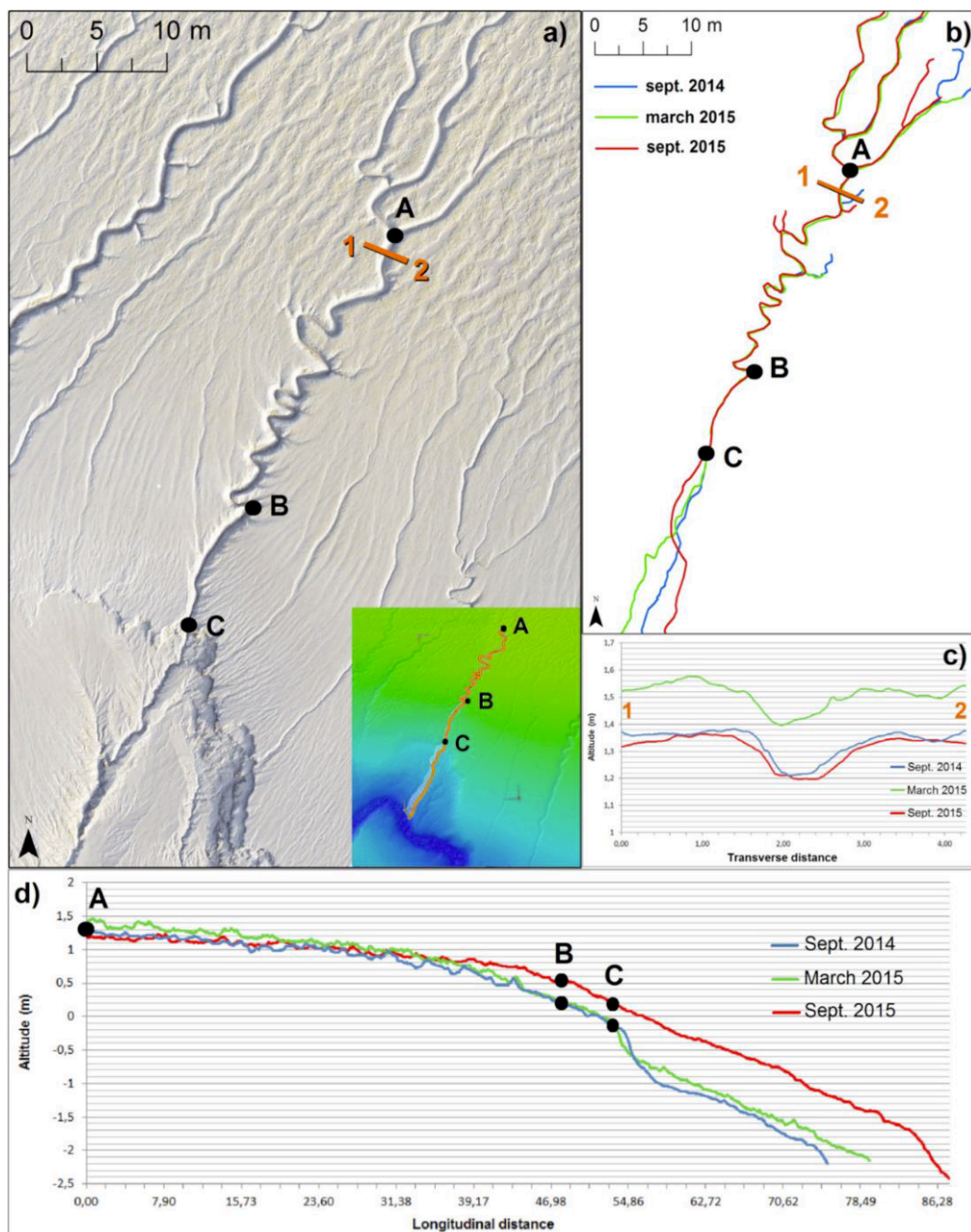


Figure 59. (a) Visualisation d'une filandre à partir d'une orthophotographie de la Vasière Nord en estuaire de Seine en mars 2015 (et du MNT associé en vignette) ; (b) suivi diachronique du positionnement de la filandre en septembre 2014, mars 2015 et septembre 2015 ; et exemples d'évolutions temporelles de coupes (c) transversales et (d) longitudinales le long de la filandre [Jaud et al., 2016].

Quantification de la dynamique des filandres par mesures aériennes

Une première étape consistera à mieux quantifier la dynamique des filandres, autant d'un point de vue spatial (ex. longueur, largeur, méandrement, rythmicité), que vertical (ex. profondeur, pente). Ce type d'information est maintenant accessible par des mesures aéroportées, par exemple via la photogrammétrie par drone (Figure 59 ; Jaud *et al.* [2016]) ou le LiDAR aéroporté [French, 2003].

Il faudra obtenir ces informations sur un maximum de systèmes estuariens pour renforcer la généralisation du comportement des filandres, en lien avec les conditions hydro-sédimentaires (ex. marée, apports amont, vagues, nature des sédiments). Ce travail pourra se faire en collaboration avec Braam Van Prooijen et Jill Hanssen (TU Delft, Pays-Bas) qui ont commencé à étudier la dynamique des filandres sur différentes vasières de l'estuaire de l'Escaut.

Modélisation des filandres et de leur rôle sur la dynamique des zones intertidales

En parallèle de l'étude des filandres par mesures aéroportées, une étude par modélisation numérique permettrait d'explorer le comportement des filandres avec une plus grande variabilité des conditions de forçage (ex. marée, apports amont, vagues) et des conditions initiales (ex. profil de l'estran, nature sédimentaire, perturbations morphologiques). La configuration d'un estran schématique (Figure 60) facilitera la simulation d'un grand nombre de tests en assurant une résolution spatiale suffisamment fine (< 1 m) et un temps de calcul raisonnable.

Les simulations, basées sur le modèle MUSTANG, auront pour but de couvrir le plus largement l'espace paramétrique des conditions estuariennes, afin de dégager des typologies de comportement. En associant ces comportements à une réponse hydro-morpho-sédimentaire de la vasière (ex. immersion-émersion, évolution altimétrique, flux sédimentaires), nous pourrons ainsi formaliser l'effet des filandres sans devoir les simuler explicitement. Ce type de formulation de processus sous-maille sera ensuite très utile pour la simulation de la dynamique hydro-morpho-sédimentaire à l'échelle des estuaires (résolution spatiale de l'ordre de 100 m). Ces travaux pourront se dérouler en collaboration avec Romaric Verney au sein de l'équipe DHYSED.

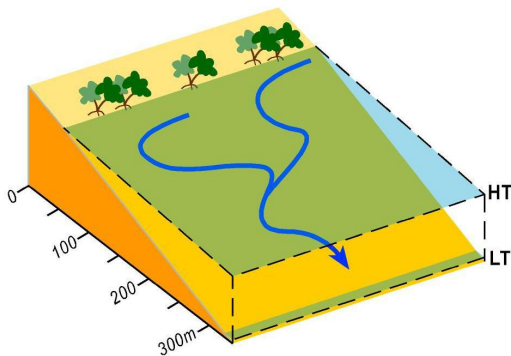


Figure 60. Illustration d'un estran schématique servant de modèle à la simulation des filandres (source : NIWA).

6. Bibliographie

- Abascal-Zorrilla, N., Vantrepotte, V., Huybrechts, N., Ngoc, D. D., Anthony, E. J., & Gardel, A. (2020). Dynamics of the estuarine turbidity maximum zone from landsat-8 data: The case of the maroni river Estuary, French Guiana. *Remote Sensing*, *12*(13), 2173.
- Allen, G. P., Salomon, J., Bassoullet, P., Du Penhoat, Y., & De Grandpre, C. (1980). Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, *26*(1-3), 69-90.
- Androuin, T., Polerecky, L., Decottignies, P., Dubois, S. F., Dupuy, C., Hubas, C., et al. (2018). Subtidal microphytobenthos: a secret garden stimulated by the engineer species *Crepidula fornicata*. *Frontiers in Marine Science*, *5*, 475.
- Avoine, J., Allen, G., Nichols, M., Salomon, J., & Larsonneur, C. (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modifications on estuary—shelf sedimentology. *Marine Geology*, *40*(1-2), 119-137.
- Baba, J., & Komar, P. D. (1981). Measurements and analysis of setting velocities of natural quartz sand grains. *Journal of Sedimentary Research*, *51*(2), 631-640.
- Barillé, L., Cognie, B., Beninger, P., Decottignies, P., & Rincé, Y. (2006). Feeding responses of the gastropod *Crepidula fornicata* to changes in seston concentration. *Marine Ecology Progress Series*, *322*, 169-178.
- Bassoullet, P., Le Hir, P., Gouleau, D., & Robert, S. (2000). Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marenngres-Oleron"(France). *Continental Shelf Research*, *20*(12-13), 1635-1653.
- Bertin, X., Fortunato, A. B., & Oliveira, A. (2009). A modeling-based analysis of processes driving wave-dominated inlets. *Continental Shelf Research*, *29*(5-6), 819-834.
- Best, Ü. S., Van der Wegen, M., Dijkstra, J., Willemsen, P., Borsje, B., & Roelvink, D. J. (2018). Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics. *Environmental Modelling & Software*, *109*, 152-166.
- Billen, G., Garnier, J., Nemery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Barles, S., et al. (2007). A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Sci Total Environ*, *375*(1-3), 80-97. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17239940>
- Blanchard, M. (1997). Spread of the slipper limpet (*Crepidula fornicata*) in Europe. Current state and consequences. *Scientia Marina*, *61*(2), 109-118.
- Boechat Albernaz, M., Ruessink, G., Jagers, H., & Kleinhans, M. G. (2019). Effects of wave orbital velocity parameterization on nearshore sediment transport and decadal morphodynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(6), 188.

- Bourrin, F., Many, G., De Madron, X. D., Martín, J., Puig, P., Houpert, L., et al. (2015). Glider monitoring of shelf suspended particle dynamics and transport during storm and flooding conditions. *Continental Shelf Research*, 109, 135-149.
- Brenon, I., & Le Hir, P. (1999). Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(4), 525-544.
- Burchard, H., Schuttelaars, H., & Ralston, D. (2018). Sediment Trapping in Estuaries. *Annual review of marine science*, 10, 371-395.
- Castaing, P. (1981). Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes. Cas de la Gironde.
- Castaing, P., & Allen, G. P. (1981). Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde: a macrotidal estuary in France. *Marine Geology*, 40(1-2), 101-118.
- Castelle, B., Bonneton, P., Dupuis, H., & Sénéchal, N. (2007). Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macrotidal French Aquitanian Coast: A review. *Marine Geology*, 245(1-4), 141-159.
- Champagnat, J., Lecomte, J., Rivot, E., Douchet, L., Martin, N., Grasso, F., et al. (2021). Multidisciplinary assessment of nearshore nursery habitat restoration for an exploited population of marine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 680, 97-109.
- Chapalain, M., Verney, R., Fettweis, M., Jacquet, M., Le Berre, D., & Le Hir, P. (2019). Investigating suspended particulate matter in coastal waters using the fractal theory. *Ocean Dynamics*, 69(1), 59-81.
- Chen, J. L., Hsu, T. J., Shi, F., Raubenheimer, B., & Elgar, S. (2015). Hydrodynamic and sediment transport modeling of New River Inlet (NC) under the interaction of tides and waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(6), 4028-4047.
- Coco, G., Zhou, Z., van Maanen, B., Olabarrieta, M., Tinoco, R., & Townend, I. (2013). Morphodynamics of tidal networks: Advances and challenges. *Marine Geology*, 346, 1-16.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 92, 79-97.
- Constantin, S., Doxaran, D., Derkacheva, A., Novoa, S., & Lavigne, H. (2018). Multi-temporal dynamics of suspended particulate matter in a macro-tidal river Plume (the Gironde) as observed by satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 202, 172-184.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260.
- Cox, J. R., Huismans, Y., Knaake, S., Leuven, J., Vellinga, N., van der Vegt, M., et al. (2021). Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine-Meuse Delta channel network. *Earth's Future*, e2020EF001869.
- Coyne, A. (2005). *Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne*. Bordeaux 1,
- Dabrin, A., Schäfer, J., Blanc, G., Strady, E., Masson, M., Bossy, C., et al. (2009). Improving estuarine net flux estimates for dissolved cadmium export at the annual timescale: application to the Gironde Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(4), 429-439.
- Dankers, P. J. T., & Winterwerp, J. C. (2007). Hindered settling of mud flocs: Theory and validation. *Continental Shelf Research*, 27(14), 1893-1907.
- de Deckere, E. M. G. T., Tolhurst, T. J., & de Brouwer, J. F. C. (2001). Destabilization of Cohesive Intertidal Sediments by Infauna. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(5), 665-669.
- De Vet, P., Van Prooijen, B., Colosimo, I., Steiner, N., Ysebaert, T., Herman, P., & Wang, Z. (2020). Variations in storm-induced bed level dynamics across intertidal flats. *Scientific Reports*, 10(1), 1-15.
- De Vet, P., Van Prooijen, B., Schrijvershof, R., Van der Werf, J., Ysebaert, T., Schrijver, M., & Wang, Z. (2018). The importance of combined tidal and meteorological forces for the flow and sediment transport on intertidal shoals. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10), 2464-2480.
- Debreu, L., Vouland, C., & Blayo, E. (2008). AGRIF: Adaptive grid refinement in Fortran. *Computers & Geosciences*, 34(1), 8-13.

- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A., & Taylor, J. (2006). Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat—role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology*, *235*(1-4), 151-164.
- Deloffre, J., Verney, R., Lafite, R., Lesueur, P., Lesourd, S., & Cundy, A. B. (2007). Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology*, *241*(1-4), 19-32.
- Diaz, M., Grasso, F., Le Hir, P., Sottolichio, A., & Caillaud, M. (in prep.). Investigating sediment dynamics on a continental shelf mud patch under the influence of a macrotidal estuary: a numerical modeling analysis. *Marine Geology*.
- Diaz, M., Grasso, F., Le Hir, P., Sottolichio, A., Caillaud, M., & Thouvenin, B. (2020). Modeling Mud and Sand Transfers Between a Macrotidal Estuary and the Continental Shelf: Influence of the Sediment Transport Parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *125*(4), e2019JC015643.
- Diaz, M. I. (2019). Modélisation numérique des transferts sédimentaires de l'estuaire de la Gironde au plateau continental. *Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale - Brest*.
- Dijkstra, Y. M., Brouwer, R. L., Schuttelaars, H. M., & Schramkowski, G. P. (2017). The iFlow modelling framework v2. 4: a modular idealized process-based model for flow and transport in estuaries. *Geoscientific Model Development*, *10*(7), 2691.
- Dijkstra, Y. M., Schuttelaars, H. M., Schramkowski, G. P., & Brouwer, R. L. (2019). Modeling the transition to high sediment concentrations as a response to channel deepening in the Ems River Estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *124*(3), 1578-1594.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Castaing, P., & Babin, M. (2009). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *81*(3), 321-332.
- Druine, F. (2018). Flux sédimentaires en estuaire de Seine: Quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesures de turbidité (réseau SYNAPSES). *Thèse de Doctorat, Université de Rouen Normandie*.
- Druine, F., Verney, R., Deloffre, J., Lemoine, J.-P., Chapalain, M., Landemaine, V., & Lafite, R. (2018). In situ high frequency long term measurements of suspended sediment concentration in turbid estuarine system (Seine Estuary, France): Optical turbidity sensors response to suspended sediment characteristics. *Marine Geology*, *400*, 24-37.
- Dubarbier, B., Castelle, B., Marieu, V., & Ruessink, G. (2015). Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior. *Coastal Engineering*, *95*, 35-50.
- Fettweis, M., Riethmüller, R., Verney, R., Becker, M., Backers, J., Baeye, M., et al. (2019). Uncertainties associated with in situ high-frequency long-term observations of suspended particulate matter concentration using optical and acoustic sensors. *Progress in Oceanography*, *178*, 102162.
- French, J. (2003). Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, *28*(3), 321-335.
- French, J., Burningham, H., & Benson, T. (2008). Tidal and meteorological forcing of suspended sediment flux in a muddy mesotidal estuary. *Estuaries and coasts*, *31*(5), 843-859.
- Friedrichs, C. T. (2011). Tidal flat morphodynamics: a synthesis.
- Gangloff, A., Verney, R., Doxaran, D., Ody, A., & Estournel, C. (2017). Investigating Rhône River plume (Gulf of Lions, France) dynamics using metrics analysis from the MERIS 300m Ocean Color archive (2002–2012). *Continental Shelf Research*, *144*, 98-111.
- Ganju, N. K., & Schoellhamer, D. H. (2009). Calibration of an estuarine sediment transport model to sediment fluxes as an intermediate step for simulation of geomorphic evolution. *Continental Shelf Research*, *29*(1), 148-158.
- Ganju, N. K., & Schoellhamer, D. H. (2010). Decadal-timescale estuarine geomorphic change under future scenarios of climate and sediment supply. *Estuaries and coasts*, *33*(1), 15-29.

- Gentil, M., Many, G., Durrieu de Madron, X., Cauchy, P., Pairaud, I., Testor, P., et al. (2020). Glider-Based Active Acoustic Monitoring of Currents and Turbidity in the Coastal Zone. *Remote Sensing*, *12*(18), 2875.
- Geyer, W. R. (1993). The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, *16*(1), 113-125.
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The Estuarine Circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *46*, 175-197. <Go to ISI>://WOS:000329820100008
- Geyer, W. R., Woodruff, J. D., & Traykovski, P. (2001). Sediment transport and trapping in the Hudson River estuary. *Estuaries*, *24*(5), 670-679.
- Gibson, R., England, G., & Hussey, M. (1967). The Theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: 1. finite non-Linear consolidation of thin homogeneous layers. *Geotechnique*, *17*(3), 261-273.
- Gil-Díaz, T., Schäfer, J., Dutruch, L., Bossy, C., Pougnet, F., Abdou, M., et al. (2019). Tellurium behaviour in a major European fluvial–estuarine system (Gironde, France): fluxes, solid/liquid partitioning and bioaccumulation in wild oysters. *Environmental Chemistry*, *16*(4), 229-242.
- Graf, G., & Rosenberg, R. (1997). Bioresuspension and biodeposition: a review. *Journal of Marine Systems*, *11*(3-4), 269-278.
- Grasso, F., Bismuth, E., & Verney, R. (2019). ARES hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/8f5ec053-52c8-4120-b031-4e4b6168ff29>.
- Grasso, F., Bismuth, E., & Verney, R. (2020a). ARES. Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine. Rapport Projet Seine-Aval 6. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00664/77610/>.
- Grasso, F., Bismuth, E., & Verney, R. (2021a). Unraveling the impacts of meteorological and anthropogenic changes on sediment fluxes along an estuary-sea continuum. *Scientific Reports*, *11*(1), 1-11.
- Grasso, F., Carlier, A., Cugier, P., Verney, R., & Marzloff, M. (2020b). Influence of *Crepidula fornicata* on suspended particle dynamics in coastal systems: a mesocosm experimental study. *Journal of Ecohydraulics*, 1-12.
- Grasso, F., Jacquet, M., Cugier, P., Carlier, A., Gaffet, J.-D., & Androuin, T. (2018a). Experimental study of sediment-biota interactions under wave-current conditions: Application to the ecosystem engineer species *Crepidula fornicata*. SEANO dataset. <https://doi.org/10.17882/54774>.
- Grasso, F., & Le Hir, P. (2019). Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dynamics*, *69*(1), 83-100.
- Grasso, F., Le Hir, P., & Bassoullet, P. (2014). *Analysis of mixed-sediment consolidation experiments*. Paper presented at the XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil. Dunkerque, 2-4 juillet 2014.
- Grasso, F., Le Hir, P., & Bassoullet, P. (2015). Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, *65*(4), 607-616. <Go to ISI>://WOS:000351478100008
- Grasso, F., Mengual, B., Le Hir, P., Walther, R., & Verney, R. (2021b). MORPHOSEINE. Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine . Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6 . <https://archimer.ifremer.fr/doc/00684/79630/>.
- Grasso, F., Michallet, H., & Barthélemy, E. (2011). Sediment transport associated with morphological beach changes forced by irregular asymmetric, skewed waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *116*(C3).
- Grasso, F., & Verney, R. (2017). Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine [HYMOSED] - Volet « Mesures» . Rapport final Seine-Aval 5 . <https://archimer.ifremer.fr/doc/00414/52523/>.
- Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., et al. (2018b). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *123*(1), 558-577. <http://dx.doi.org/10.1002/2017JC013185>
- Green, M. O., & Coco, G. (2014). Review of wave-driven sediment resuspension and transport in estuaries. *Reviews of Geophysics*, *52*(1), 77-117.

- Guo, L., van der Wegen, M., Roelvink, D., & He, Q. (2015). Exploration of the impact of seasonal river discharge variations on long-term estuarine morphodynamic behavior. *Coastal Engineering*, *95*, 105-116.
- Guo, L., Xie, W., Xu, F., Wang, X., Zhu, C., Meng, Y., et al. (2021). A historical review of sediment export–import shift in the North Branch of Changjiang Estuary. *Earth Surface Processes and Landforms*, *n/a(n/a)*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.5084>
- Horemans, D. M., Dijkstra, Y. M., Schuttelaars, H. M., Sabbe, K., Vyverman, W., Meire, P., & Cox, T. J. (2021). Seasonal variations in flocculation and erosion affecting the large-scale suspended sediment distribution in the Scheldt estuary: the importance of biotic effects. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2020JC016805.
- Jalón-Rojas, I., Schmidt, S., & Sottolichio, A. (2015). Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(6), 2805-2819.
- Jalón-Rojas, I., Schmidt, S., Sottolichio, A., & Bertier, C. (2016). Tracking the turbidity maximum zone in the Loire Estuary (France) based on a long-term, high-resolution and high-frequency monitoring network. *Continental Shelf Research*, *117*, 1-11.
- Jaud, M., Grasso, F., Le Dantec, N., Verney, R., Delacourt, C., Ammann, J., et al. (2016). Potential of UAVs for monitoring mudflat morphodynamics (application to the seine estuary, France). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *5*(4), 50.
- Jolliff, J. K., Kindle, J. C., Shulman, I., Penta, B., Friedrichs, M. A., Helber, R., & Arnone, R. A. (2009). Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment. *Journal of Marine Systems*, *76*(1-2), 64-82.
- Jouanneau, J., Weber, O., Cremer, M., & Castaing, P. (1999). Fine-grained sediment budget on the continental margin of the Bay of Biscay. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *46*(10), 2205-2220.
- Lamarque, B., Deflandre, B., Galindo Dalto, A., Schmidt, S., Romero-Ramirez, A., Garabetian, F., et al. (2021). Spatial Distributions of Surface Sedimentary Organics and Sediment Profile Image Characteristics in a High-Energy Temperate Marine RiOMar: The West Gironde Mud Patch. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(3), 242. <https://www.mdpi.com/2077-1312/9/3/242>
- Lamarque, B., Deflandre, B., Schmidt, S., Bernard, G., Dubosq, N., Diaz, M., et al. (under review). Spatio-temporal dynamics of surface sediments and benthic macrofauna in a temperate high-energy RiOMar are driven by hydrodynamics.
- Lazure, P., & Dumas, F. (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, *31*(2), 233-250. <Go to ISI>://WOS:000253137000003
- Le Hir, P., Cayocca, F., & Waeles, B. (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, *31*(10), S135-S149.
- Le Hir, P., Monbet, Y., & Orvain, F. (2007). Sediment erodability in sediment transport modelling: can we account for biota effects? *Continental Shelf Research*, *27*(8), 1116-1142.
- Lemoine, J., & Le Hir, P. (2021). Maintenance dredging in a macrotidal estuary: Modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 107366.
- Lemoine, J. P. (2021). *Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien*. Université de Bretagne Occidentale,
- Lesourd, S., Bessineton, C., Carpentier, A., Chouquet, B., Cuvilliez, A., Duhamel, S., et al. (2012). Dynamique des écosystèmes et fonctionnement hydromorphologique des filandres en Seine [DEFHFIS]. Rapport final Seine-Aval 4, 52p. .
- Lesourd, S., Lesueur, P., Fisson, C., & Dauvin, J.-C. (2016). Sediment evolution in the mouth of the Seine estuary (France): A long-term monitoring during the last 150 years. *Comptes Rendus Geoscience*, *348*(6), 442-450.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, *51*(8-9), 883-915.

- Leuven, J. R., Pierik, H. J., van der Vegt, M., Bouma, T. J., & Kleinhans, M. G. (2019). Sea-level-rise-induced threats depend on the size of tide-influenced estuaries worldwide. *Nature climate change*, *9*(12), 986-992.
- Lindsay, P., Balls, P., & West, J. (1996). Influence of tidal range and river discharge on suspended particulate matter fluxes in the Forth Estuary (Scotland). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *42*(1), 63-82.
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. (1964). *Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications*. Paper presented at the Deep sea research and oceanographic abstracts.
- Maan, D. C., van Prooijen, B. C., Wang, Z. B., & De Vriend, H. J. (2015). Do intertidal flats ever reach equilibrium? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *120*(11), 2406-2436.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, *5*(12), 6880-6898.
- McSweeney, J. M., Chant, R. J., & Sommerfield, C. K. (2016). Lateral variability of sediment transport in the Delaware Estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *121*(1), 725-744.
- Mengual, B., Hir, P., Cayocca, F., & Garlan, T. (2017a). Modelling Fine Sediment Dynamics: Towards a Common Erosion Law for Fine Sand, Mud and Mixtures. *Water*, *9*(8), 564.
- Mengual, B., Le Hir, P., Cayocca, F., & Garlan, T. (2017b). Modelling Fine Sediment Dynamics: Towards a Common Erosion Law for Fine Sand, Mud and Mixtures. *Water*, *9*(8). <Go to ISI>://WOS:000408729200011
- Mengual, B., Le Hir, P., Rivier, A., Caillaud, M., & Grasso, F. (2020). Numerical modeling of bedload and suspended load contributions to morphological evolution of the Seine Estuary (France). *International journal of sediment research*.
- Merckelbach, L., & Kranenburg, C. (2004). Equations for effective stress and permeability of soft mud-sand mixtures. *Geotechnique*, *54*(4), 235-243.
- Mietta, F., Chassagne, C., Manning, A. J., & Winterwerp, J. C. (2009). Influence of shear rate, organic matter content, pH and salinity on mud flocculation. *Ocean Dynamics*, *59*(5), 751-763.
- Moulin, F. Y., Guizien, K., Thouzeau, G., Chapalain, G., Mülleners, K., & Bourg, C. (2007). Impact of an invasive species, *Crepidula fornicata*, on the hydrodynamics and transport properties of the benthic boundary layer. *Aquatic Living Resources*, *20*(1), 15-31.
- Nichols, F. H., Cloern, J. E., Luoma, S. N., & Peterson, D. H. (1986). The modification of an estuary. *Science(Washington)*, *231*(4738), 567-573.
- Nidziko, N., & Ralston, D. (2012). Tidal asymmetry and velocity skew over tidal flats and shallow channels within a macrotidal river delta. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *117*(C3).
- Olabarrieta, M., Geyer, W. R., Coco, G., Friedrichs, C. T., & Cao, Z. (2018). Effects of density-driven flows on the long-term morphodynamic evolution of funnel-shaped estuaries. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *123*(11), 2901-2924.
- Orvain, F., & Sauriau, P.-G. (2002). Environmental and behavioural factors affecting activity in the intertidal gastropod *Hydrobia ulvae*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *272*(2), 191-216.
- Orvain, F., Sauriau, P.-G., Sygut, A., Joassard, L., & Le Hir, P. (2004). Interacting effects of *Hydrobia ulvae* bioturbation and microphytobenthos on the erodibility of mudflat sediments. *Marine Ecology Progress Series*, *278*, 205-223.
- Owen, M. W. (1976). *Determination of the settling velocities of cohesive muds*. Retrieved from HR Wallingford:
- Paarlberg, A. J., Knaapen, M. A. F., de Vries, M. B., Hulscher, S. J. M. H., & Wang, Z. B. (2005). Biological influences on morphology and bed composition of an intertidal flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *64*(4), 577-590.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., et al. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* : Ipcc.

- Passeri, D. L., Dalyander, P. S., Long, J. W., Mickey, R. C., Jenkins III, R. L., Thompson, D. M., et al. (2020). The roles of storminess and sea level rise in decadal barrier island evolution. *Geophysical Research Letters*, *47*(18), e2020GL089370.
- Petit, J. C., Schäfer, J., Coynel, A., Blanc, G., Deycard, V. N., Derriennic, H., et al. (2013). Anthropogenic sources and biogeochemical reactivity of particulate and dissolved Cu isotopes in the turbidity gradient of the Garonne River (France). *Chemical geology*, *359*, 125-135.
- Price, T., & Ruessink, B. (2011). State dynamics of a double sandbar system. *Continental Shelf Research*, *31*(6), 659-674.
- Ralston, D. K., Warner, J. C., Geyer, W. R., & Wall, G. R. (2013). Sediment transport due to extreme events: The Hudson River estuary after tropical storms Irene and Lee. *Geophysical Research Letters*, *40*(20), 5451-5455.
- Ralston, D. K., Yellen, B., Woodruff, J. D., & Fernald, S. (2020). Turbidity hysteresis in an estuary and tidal river following an extreme discharge event. *Geophysical Research Letters*, *47*(15), e2020GL088005.
- Reed, D. J., Spencer, T., Murray, A. L., French, J. R., & Leonard, L. (1999). Marsh surface sediment deposition and the role of tidal creeks: implications for created and managed coastal marshes. *Journal of Coastal Conservation*, *5*(1), 81-90.
- Rocha, M., Silva, P., Michallet, H., Abreu, T., Moura, D., & Fortes, J. (2013). Parameterizations of wave nonlinearity from local wave parameters: a comparison with field data. *Journal of Coastal Research*(65 (10065)), 374-379.
- Ruessink, B., Ramaekers, G., & Van Rijn, L. (2012). On the parameterization of the free-stream non-linear wave orbital motion in nearshore morphodynamic models. *Coastal Engineering*, *65*, 56-63.
- Sanford, L. P. (2008). Modeling a dynamically varying mixed sediment bed with erosion, deposition, bioturbation, consolidation, and armoring. *Computers & Geosciences*, *34*(10), 1263-1283.
- Saulquin, B., & Gohin, F. (2010). Mean seasonal cycle and evolution of the sea surface temperature from satellite and in situ data in the English Channel for the period 1986–2006. *International Journal of Remote Sensing*, *31*(15), 4069-4093.
- Schmidt, S., Etcheber, H., Sottolichio, A., & Castaing, P. (2016). Bilan de 10 ans de suivi haute-fréquence de la qualité des eaux de l'estuaire de la Gironde. *system*, *97*, 98.
- Schulz, E., Grasso, F., Le Hir, P., Verney, R., & Thouvenin, B. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 2. Numerical Modeling of Sediment Fluxes and Budgets Under Typical Hydrological and Meteorological Conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *123*(1), 578-600. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JC012638>
- Scully, M. E., & Friedrichs, C. T. (2007). Sediment pumping by tidal asymmetry in a partially mixed estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *112*(C7).
- Sheehan, M. R., & Ellison, J. C. (2014). Intertidal morphology change following *Spartina anglica* introduction, Tamar Estuary, Tasmania. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *149*, 24-37.
- Sommerfield, C. K., & Wong, K. C. (2011). Mechanisms of sediment flux and turbidity maintenance in the Delaware Estuary. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, *116*(C1). <Go to ISI>://WOS:000286059400002
- Sottolichio, A., & Castaing, P. (1999). A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, *329*(11), 795-800.
- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. *Oceanographic Literature Review*, *9*(44), 947.
- Sweet, W. V., Kopp, R. E., Weaver, C. P., Obeysekera, J., Horton, R. M., Thieler, E. R., & Zervas, C. (2017). Global and regional sea level rise scenarios for the United States.
- Talke, S. A., de Swart, H. E., & Schuttelaars, H. (2009). Feedback between residual circulations and sediment distribution in highly turbid estuaries: an analytical model. *Continental Shelf Research*, *29*(1), 119-135.

- Thiebot, J., Guillou, S., & Brun-Cottan, J.-C. (2011). An optimisation method for determining permeability and effective stress relationships of consolidating cohesive sediment deposits. *Continental Shelf Research*, 31(10), S117-S123.
- Tissier, M., Bonneton, P., Marche, F., Chazel, F., & Lannes, D. (2012). A new approach to handle wave breaking in fully non-linear Boussinesq models. *Coastal Engineering*, 67, 54-66.
- Tolhurst, T., Gust, G., & Paterson, D. (2002). The influence of an extracellular polymeric substance (EPS) on cohesive sediment stability. In *Proceedings in Marine Science* (Vol. 5, pp. 409-425): Elsevier.
- Toorman, E., & Berlamont, J. (1993). Settling and consolidation of mixtures of cohesive and non-cohesive sediments. *Advances in Hydro-Science and-Engineering*, 1, 606-612.
- Townend, I., & Whitehead, P. (2003). A preliminary net sediment budget for the Humber Estuary. *Science of the total environment*, 314, 755-767.
- Uncles, R. (2002). Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(6), 829-856.
- Uncles, R., & Stephens, J. (1989). Distributions of suspended sediment at high water in a macrotidal estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C10), 14395-14405.
- van der Wegen, M. (2013). Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 447-460.
- van der Wegen, M., & Jaffe, B. E. (2013). Towards a probabilistic assessment of process-based, morphodynamic models. *Coastal Engineering*, 75, 52-63.
- van Ledden, M., van Kesteren, W. G. M., & Winterwerp, J. C. (2004). A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures. *Continental Shelf Research*, 24(1), 1-11.
- Van Maren, D., Van Kessel, T., Cronin, K., & Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1-14.
- van Maren, D. S., & Cronin, K. (2016). Uncertainty in complex three-dimensional sediment transport models: equifinality in a model application of the Ems Estuary, the Netherlands. *Ocean Dynamics*, 66(12), 1665-1679.
- Verney, R., Deloffre, J., Brun-Cottan, J. C., & Lafite, R. (2007). The effect of wave-induced turbulence on intertidal mudflats: Impact of boat traffic and wind. *Continental Shelf Research*, 27(5), 594-612.
- Verney, R., Lafite, R., & Brun-Cottan, J.-C. (2009). Flocculation potential of estuarine particles: the importance of environmental factors and of the spatial and seasonal variability of suspended particulate matter. *Estuaries and coasts*, 32(4), 678-693.
- Voulgaris, G., & Meyers, S. T. (2004). Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24(15), 1659-1683.
- Waeles, B., Le Hir, P., Lesueur, P., & Delsinne, N. (2007). Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach. *Hydrobiologia*, 588(1), 69-82.
- Williams, J. J., Carling, P. A., Amos, C. L., & Thompson, C. (2008). Field investigation of ridge–runnel dynamics on an intertidal mudflat. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(2), 213-229.
- Winterwerp, J., Manning, A., Martens, C., De Mulder, T., & Vanlede, J. (2006). A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(1-2), 195-207.
- Winterwerp, J. C., & Wang, Z. B. (2013). Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory. *Ocean Dynamics*, 63(11-12), 1279-1292.
- Winterwerp, J. C., Wang, Z. B., van Braeckel, A., van Holland, G., & Kösters, F. (2013). Man-induced regime shifts in small estuaries—II: a comparison of rivers. *Ocean Dynamics*, 63(11-12), 1293-1306.
- Wooster, J. K., Dusterhoff, S. R., Cui, Y., Sklar, L. S., Dietrich, W. E., & Malko, M. (2008). Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment infiltration into immobile gravels. *Water Resources Research*, 44(3).
- Wu, W., & Li, W. (2017). Porosity of bimodal sediment mixture with particle filling. *International journal of sediment research*, 32(2), 253-259.

- Wu, W., & Lin, Q. (2014). Nonuniform sediment transport under non-breaking waves and currents. *Coastal Engineering*, *90*, 1-11.
- Young, I. R., & Ribal, A. (2019). Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, *364*(6440), 548-552.
- Yu, Q., Wang, Y., Gao, J., Gao, S., & Flemming, B. (2014). Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *119*(11), 7705-7724.
- Yu, X., Zhang, W., & Hoitink, A. (2020). Impact of river discharge seasonality change on tidal duration asymmetry in the Yangtze River Estuary. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-17.
- Zhou, Z., van der Wegen, M., Jagers, B., & Coco, G. (2016). Modelling the role of self-weight consolidation on the morphodynamics of accretional mudflats. *Environmental Modelling & Software*, *76*, 167-181.
- Zhu, C., van Maren, D. S., Guo, L., Lin, J., He, Q., & Wang, Z. B. (2021). Effects of Sediment-Induced Density Gradients on the Estuarine Turbidity Maximum in the Yangtze Estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *126*(5), e2020JC016927.

7. Annexes

7.1. Curriculum Vitae

Florent GRASSO

19 avenue Quéléren

29280 Locmaria-Plouzané

02 98 22 40 75 / florent.grasso@ifremer.fr

39 ans / Français



Chercheur en dynamique hydro-morpho-sédimentaire côtière et estuarienne

QUALIFICATIONS & DIPLOMES

- 2009 **Doctorat « Sciences de la Terre, Univers et Environnement »**, Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) – Grenoble Université, France
Modélisation physique de la dynamique hydro-sédimentaire des plages
- 2006 **Master Recherche « Terre, Univers, Environnement »**, LEGI – Grenoble Université, France
- 2006 **Diplôme d'Ingénieur « Hydraulique et Environnement »**, École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, Grenoble-INP, France

PARCOURS PROFESSIONNEL

- Depuis 2012 **Chargé de Recherche**, Ifremer – DYNECO/DHYSED, Plouzané, France
Dynamique hydro-morpho-sédimentaire côtière et estuarienne
- 2011-2012 **Postdoctorat « Groupe de Recherche Côtier »**, Dép. Géographie Physique, Faculté des Géosciences, Utrecht Université, Pays-Bas (NWO / Marie Curie Actions, UE)
Turbulence et transport sédimentaire sous le déferlement des vagues
- 2010 **Postdoctorat « Groupe de Recherche Côtier »**, Dép. Géographie Physique, Faculté des Géosciences, Utrecht Université, Pays-Bas (DGA/DS)
Analyse et modélisation du transport sédimentaire en eau peu profonde pour des conditions de vagues extrêmes

RESPONSABILITES INSTITUTIONNELLES & ACCADEMIQUES

- **Responsable de l'équipe DHYSED** (*Dynamique Hydro-Sédimentaire*), de l'unité DYNECO (*Dynamique des Écosystèmes Côtiers*) à l'Ifremer (2022-2025)
- **Editeur associé** du *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2019-2022)
- **Membre titulaire** de la Commission Nationale de la Flotte Côtière (2019-2022)

PROJETS DE RECHERCHE

- **Office Français de la Biodiversité (OFB) – CAPTURE [2021-2024]** : Vers une caractérisation et paramétrisation globale de la turbidité dans les estuaires sous pressions anthropiques et climatiques, programme de la Mission Inter-Estuariers (MIE) (coordination : [F. Grasso](#))
- **Office Français de la Biodiversité (OFB) – MELTING-POTES [2021-2024]** : Modélisation de l'évolution à long terme des ingénieurs d'écosystèmes marins en réponse au changement climatique et au transport sédimentaire en estuaire de Seine, programme de la Mission Inter-Estuariers (MIE) (coordination : UMR BOREA)
- **EC2CO – RUNTIME [2020-2022]** : Réponses hydrosédimentaires et biogéochimiques du continuum terre-mer des estuaires de Seine et de la Gironde aux forçages naturels et à leur variabilité (coordination : UMR METIS)
- **Seine-Aval 6 – ARES [2019-2020]** : Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine (coordination : [F. Grasso](#))
- **Seine-Aval 6 – MORPHOSEINE [2017-2020]** : Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine (coordination : [F. Grasso](#))
- **Seine-Aval 6 – PHARE-SEE [2017-2020]** : Productivité microphytobenthique des habitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire, biogéochimique et les ingénieurs d'écosystème de la faune benthique : implication pour des enjeux de modélisation et de réhabilitation des vasières de la Seine estuarienne (coordination : UMR BOREA et UMR METIS)
- **EU-H2020 – HYDRALAB+ [2015-2019]** / JRA1 RECIPE et JRA2 COMPLEX : WP9 Interactions sédiment-biota (coordination : Deltares, Pays-Bas)
- **BELSPO – INDI67 [2015-2018]** : Développement de méthodes pour améliorer le suivi des indicateurs 6 et 7 de la DCSMM (coordination : RBINS, Belgique)
- **ANR – AMORAD [2013-2022]** / Programme de recherche « Investissement d'Avenir » : Amélioration des modèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des radionucléides au sein de l'environnement (coordination nationale : IRSN, coordination Ifremer : [F. Grasso](#))
- **Seine-Aval 5 – HYMOSED [2013-2017]** : Modélisation du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine (coordination : [F. Grasso](#))
- **Seine-Aval 5 – ANPHYECO-SEINE [2013-2017]** : Analyse du fonctionnement hydrologique, morphologique, sédimentaire et écologique de l'estuaire de la Seine (coordination : Université d'Anvers, Belgique)
- **Seine-Aval 5 – BARBÈS [2013-2017]** : Associations biologiques en relation avec le transport sédimentaire : développement d'un modèle de bioturbation par les ingénieurs d'écosystèmes en estuaire de Seine (coordination : UMR BOREA)

ENCADREMENTS

Mon pourcentage d'encadrement est notifié entre crochets

Post-doctorants et ingénieurs

- Bismuth E. (2022-2023, ingénieur 17 mois). *Analyse de données hydro-sédimentaires estuariennes*. [100%], projet OFB CAPTURE.
- Diaz M. (2020-2021, postdoc 12 mois). *Physique des transferts particulaires à l'embouchure de la Gironde*. Co-encadré [50%] avec A. Sottolichio (EPOC), projet LabEx COTE MAGMA.
- Bismuth E. (2019-2020, ingénieur 12 mois). *Analyse de rejeux hydro-sédimentaires en estuaire de Seine*. Co-encadré [90%] avec R. Verney (Ifremer), projet Seine-Aval 6 ARES.
- Berger H. (2016-2017, ingénieur 9 mois). *Développement d'un maillage curviligne de l'estuaire de la Gironde*. [100%], projet ANR AMORAD.
- Schulz E. (2015-2016, postdoc 18 mois). *Modélisation numérique et analyse des flux et bilans sédimentaires en estuaire de Seine*. [100%], projet Seine-Aval 5 HYMOSED.

Doctorants

- Moncuquet A. (2022-2023). *Impact des ondes internes sur la dynamique sédimentaire dans le Golfe de Gascogne*. Co-encadrée [10%] avec P. Lazure et F. Dufois (Ifremer) N. Jones (UWA, Australie) et L. Bordoï (SHOM), financement Ifremer (projet EC2CO SOLIBOB).
- Uchasara M. (2019-2021). *Modélisation et conceptualisation de la dynamique sédimentaire inter-estuariennes*. Co-encadrée [70%] avec R. Verney (Ifremer), co-financement Ifremer / Région Bretagne (projet INTEREST).
- Diaz M. (2016-2019). *Modélisation numérique des transferts sédimentaires de l'estuaire de la Gironde au plateau continental*. Co-encadrée [90%] avec P. Le Hir (Ifremer), projet ANR AMORAD.
- Brinkkemper J. (2013-2017). *Short-wave sand transport in the surf zone*. Co-encadré [10%] avec G. Ruessink (Utrecht University), projets EU HYDRALAB IV – BARDEX II et néerlandais NWO – STW.

Masters 2 et 3^{ème} années cycle d'ingénieur

- Gaillard C. (2020). *Forçages hydrodynamiques et dynamique sédimentaire à l'embouchure de l'estuaire de Seine et échanges avec la baie en réponse aux forçages hydrométéorologiques*. Co-encadrée [50%] avec R. Verney (Ifremer), projet Seine-Aval 6 MORPHOSEINE.
- Le Mercier J. (2016). *Comparaison des méthodes de quantification de la morphodynamique des zones découvrantes de la zone aval de l'estuaire de la Seine*. [100%], projet Seine-Aval 5 HYMOSED.
- De Winter W. (2011). Large-scale laboratory observations of beach morphodynamics and turbulence beneath shoaling and breaking waves. Co-encadrée [50%] avec G. Ruessink (Utrecht University), projet EU HYDRALAB IV – BARDEX II.
- Wesselman D. (2011). Observations of turbulence within the surf and swash zone of a field-scale sandy laboratory beach. Co-encadré [50%] avec G. Ruessink (Utrecht University), projet EU HYDRALAB IV – BARDEX II.

JURYS & ENSEIGNEMENTS

Jurys de thèse

- Rtimi R. (2022). *Dynamique hydrosédimentaire de l'estuaire de la Rance : Fonctionnement, Évolution et Gestion*. Université de Bordeaux. [Examinateur]
- Lemoine J.P. (2021). *Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien*. Université de Bretagne Occidentale. [Examinateur]
- Chassagneux F.X. (2011). *Étude expérimentale des processus hydro-sédimentaires sous le déferlement de vagues irrégulières*. Université de Grenoble. [Examinateur]

Jurys de Master 2 Recherche

- Master « Physique Océan et Climat » (POC) de l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) : commissions 2015, 2017, 2019, 2021

Enseignements

- Cours « Dynamique des sédiments cohésifs » au Mastère « Énergies Marines Renouvelables » de l'ENSTA-Bretagne : ~10 h/an de 2014 à 2021

JEUX DE DONNEES

1. **Grasso F.**, Bocher A., Jacquet M., Le Berre D., Lecornu F. (2021). Gironde Estuary Mouth MEasurement Stations (GEMMES). SEANOE. <https://doi.org/10.17882/78968>
2. **Grasso F.**, Bismuth E., Verney R. (2019). ARES hindcast. IFREMER. <https://doi.org/10.12770/8f5ec053-52c8-4120-b031-4e4b6168ff29>
3. **Grasso F.**, Jacquet M., Cugier P., Carlier A., Gaffet J.-D., Androuin T. (2018). Experimental study of sediment-biota interactions under wave-current conditions: Application to the ecosystem engineer species *Crepidula fornicata*. SEANOE. <https://doi.org/10.17882/54774>

PUBLICATIONS

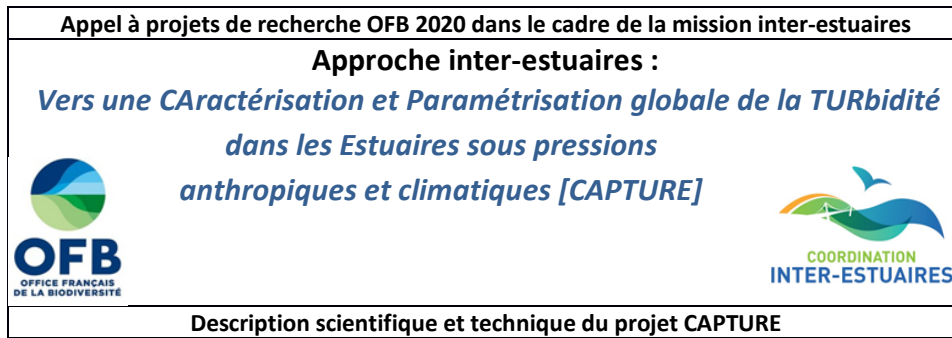
J'ai contribué à 26 publications scientifiques de rang A, dont 46% en premier auteur. J'ai également contribué à plus de 40 communications nationales et internationales, dont 33% en premier auteur. Sont présentées par la suite seulement les publications scientifiques de rang A.

1. Lamarque B., Deflandre B., Galindo Dalto A., Schmidt S., Romero-Ramirez A., Garabetian F., Dubosq N., Diaz M., **Grasso F.**, Sottolichio A., Bernard G., Gillet H., Cordier M.-A., Poirier D., Lebleu P., Derriennic H., Danilo M., M.-M.-B. Tenório, Grémare A. (2021). Spatial Distributions of Surface Sedimentary Organics and Sediment Profile Image Characteristics in a High-Energy Temperate Marine RiOMar: The West Gironde Mud Patch. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 242 (32p.).
2. Champagnat J., Lecomte J.-B., Rivot E., Douchet L., Martin N., **Grasso F.**, Mounier F., Labadie P., Loizeau V., Bacq N., Le Pape O. (2021). Multidisciplinary assessment of nearshore nursery habitat restoration for an exploited population of marine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 680, 97-109.

3. **Grasso F.**, Bismuth E., Verney R. (2021). Unraveling The Impacts of Meteorological and Anthropogenic Changes on Sediment Fluxes Along an Estuary-Sea Continuum. *Scientific Reports*, 11(1), 20230 (11p.).
4. Mengual B., Le Hir P., Rivier A., Caillaud M., **Grasso F.** (2021). Numerical modeling of bedload and suspended load contributions to morphological evolution of the Seine Estuary (France). *International Journal of Sediment Research*, 36(6), 723-735.
5. Diaz M., **Grasso F.**, Le Hir P., Sottolichio A., Caillaud M., Thouvenin B. (2020). Modeling mud and sand transfers between a macrotidal estuary and the continental shelf: influence of the sediment-transport parameterization. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 125(4), e2019JC015643 (37p.).
6. **Grasso F.**, Carlier A., Cugier P., Verney R., Marzloff M. (2020). Influence of *Crepidula fornicata* on suspended particle dynamics in coastal systems: a mesocosm experimental study. *Journal of Ecohydraulics*.
7. **Grasso F.**, Le Hir P. (2019). Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dynamics*, 69(1), 83-100.
8. Schulz E., **Grasso F.**, Le Hir P., Verney R., Thouvenin B. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France) - Part 2: Numerical Modeling of Sediment Fluxes and Budgets Under Typical Hydrological and Meteorological Conditions. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 123(1), 578-600.
9. **Grasso F.**, Verney R., Le Hir P., Thouvenin B., Schulz E., Kervella Y., Khojasteh Pour Fard I., Lemoine J.-P., Dumas F., Garnier V. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France) - Part 1: Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 123(1), 558-577.
10. Ruessink B. G., Blenkinsopp C., Brinkkemper J. A., Castelle B., Dubarbier B., **Grasso F.**, Puleo J. A., Lanckriet T. (2016). Sandbar and beach-face evolution on a prototype coarse sandy barrier. *Coastal Engineering*, 113, 19-32.
11. Brinkkemper J. A., Lanckriet T., **Grasso F.**, Puleo J. A., Ruessink B. G. (2016). Observations of turbulence within the surf and swash zone of a field-scale sandy laboratory beach. *Coastal Engineering*, 113, 62-72.
12. Jaud M., **Grasso F.**, Le Dantec N., Verney R., Delacourt C., Ammann J., Deloffre J., Grandjean P. (2016). Potential of UAVs for Monitoring Mudflat Morphodynamics (Application to the Seine Estuary, France). *ISPRS International Journal of Geo-information*, 5(4).
13. **Grasso F.**, Le Hir P., Bassoullet P. (2015). Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, 65(4), 607-616.
14. De Winter W., Wesselman D., **Grasso F.**, Ruessink B. G. (2013). Large-scale laboratory observations of beach morphodynamics and turbulence beneath shoaling and breaking waves. *Journal of Coastal Research*, SI (65), 1515-1520.
15. **Grasso F.**, Ruessink B. G. (2012). Turbulent viscosity in natural surf zones. *Geophysical Research Letters*, 39(L23603), 1-5.
16. Ruessink B. G., Boers M., Van Geer P. F. C., De Bakker A. T. M., Pieterse A., **Grasso F.**, De Winter R. C. (2012). Towards a process-based model to predict dune erosion along the Dutch

- Wadden coast. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, 91(3), 357-372.
17. **Grasso F.**, Castelle B., Ruessink B. G. (2012). Turbulence dissipation under breaking waves and bores in a natural surf zone. *Continental Shelf Research*, 43, 133-141.
 18. Michallet H., Cienfuegos R., Barthelemy E., **Grasso F.** (2011). Kinematics of waves propagating and breaking on a barred beach. *European Journal of Mechanics B-fluids*, 30(6), 624-634.
 19. **Grasso F.**, Michallet H., Barthelemy E. (2011). Sediment transport associated with morphological beach changes forced by irregular asymmetric, skewed waves. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 116, C03020.
 20. **Grasso F.**, Michallet H., Barthelemy E. (2011). Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events: A morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis. *Coastal Engineering*, 58(2), 184-193.
 21. **Grasso F.**, Ruessink B. G. (2011). Vertical structure of the turbulence dissipation rate in the surf zone. *Journal of Coastal Research*, 90-94.
 22. Castelle B., Marieu V., Bonneton P., Bruneau N., **Grasso F.** (2010). Modélisation des évolutions de profil de plage. *Houille Blanche – Revue Internationale de l'Eau*, (1), 104-110
 23. **Grasso F.**, Michallet H., Barthelemy E., Certain R. (2009). Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology: Transients and equilibrium states. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 114, C09001.
 24. **Grasso F.**, Michallet H., Certain R., Barthelemy E. (2009). Experimental Flume Simulation of Sandbar Dynamics. *Journal of Coastal Research*, 54-58.
 25. Berni C., Mignot E., Michallet H., Dalla-Costa C., **Grasso F.**, Lagauzere M. (2009). Diversity of bed evolution at wave and tidal scales on Truc-Vert beach. *Journal of Coastal Research*, 1726-1730.
 26. Michallet H., **Grasso F.**, Barthelemy E. (2007). Long Waves and Beach Profile Evolutions. *Journal of Coastal Research*, 221-225.

7.2. Projet CAPTURE



1) Contexte et enjeux

Contexte

La turbidité est un paramètre environnemental clé du fonctionnement des écosystèmes estuariens, impactant les compartiments biologique, biogéochimique et écologique (ex. limitation de la production primaire et du développement du phytoplancton, microphytobenthos, macrophytes, transport ou stockage des nutriments et contaminants, perturbation des espèces benthiques et pélagiques) [Morris *et al.*, 1978 ; Billen *et al.*, 2007]. Cela se traduit par la prise en compte de la turbidité, ou de la concentration en matières en suspension (MES), pour la caractérisation et la gestion des écosystèmes estuariens. La turbidité est par exemple utilisée pour la définition et le calcul de nombreux indicateurs du Bon Etat Ecologique (BEE) des eaux de transition dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Dans les milieux estuariens très turbides, ce paramètre impacte les indicateurs « invertébrés benthiques » et « microphytobenthos » pour les éléments de qualité biologique, l'indicateur « oxygène » pour les éléments de qualité physicochimique, et l'indicateur « hydro-morpho-sédimentaire (HMS) » pour les éléments de qualité hydromorphologique. De plus, le niveau de MES vient directement impacter les échanges dissous et particulaires le long du continuum terre-mer (i.e. flux entrant/sortant).

Cependant, ce paramètre reste difficile à estimer dans ces milieux complexes : (i) l'imagerie satellite, couvrant seulement les couches de surface de l'eau, est limitée pour cartographier l'intérieur des estuaires [Doxaran *et al.*, 2009]; (ii) les mesures *in situ* n'apportent que des informations ponctuelles difficiles à spatialiser [Jalón-Rojas *et al.*, 2016]; et (iii) la modélisation numérique réaliste est coûteuse et donc difficile à implémenter systématiquement pour les plus petits estuaires [Grasso *et al.*, 2018].

De plus, les milieux estuariens sont soumis aux forçages hydrométéorologiques (ex. apports liquides et solides amont, vent, vagues, marée), et par leur situation à l'interface entre les bassins versants et les mers côtières, sont particulièrement sujets aux pressions anthropiques (ex. aménagements portuaires, dragages) [Avoine *et al.*, 1981]. Ces différents forçages peuvent avoir des impacts forts sur les niveaux de turbidités observés dans les estuaires [Allen *et al.*, 1980 ; Burchard *et al.*, 2018], induisant des concentrations de sédiments en suspension de quelques mg/l à plusieurs g/l. Les sédiments remis en suspension peuvent former une masse sédimentaire très concentrée, appelée « bouchon vaseux », qui peut fortement varier d'un estuaire à l'autre (ex. ~300 kT en Seine et ~4 MT en Gironde) [Avoine *et al.*, 1981 ; Sottolichio & Castaing, 1999]. La dynamique du bouchon vaseux (i.e. extension, excursion, masse) résulte de la convergence des apports sédimentaires d'origine marine (par l'effet du pompage tidal et la circulation barocline) et d'origine fluviale provenant des apports amont. Le débit fluvial joue un rôle déterminant sur le positionnement du bouchon vaseux et peut

mener à son « expulsion » en dehors de l'estuaire lors de fortes crues. La reformation du bouchon vaseux et sa capacité de résilience dépendent ensuite de la disponibilité sédimentaire dans l'estuaire et les zones côtières adjacentes. La présence du bouchon vaseux vient directement impacter l'ensemble des processus morpho-sédimentaires, biogéochimiques et écologiques des estuaires. De plus, il a été observé au cours des dernières décennies que l'approfondissement des chenaux de navigation a engendré des mécanismes de rétroactions hydro-sédimentaires transformant des estuaires « normaux » en estuaires « hyper-turbides » (ex. estuaires de la Loire ou de l'Ems) [Winterwerp, 2011]. Ce type de transition peut fortement modifier les services et fonctions écosystémiques de ces milieux estuariens, et a également d'importantes répercussions sur les méthodes de gestion à adopter pour ces environnements très anthropisés.

Objectifs

Face à cette problématique, l'objectif de ce projet est de proposer une **conceptualisation générique de la turbidité dans les estuaires** à marée, afin de **déterminer les réponses et les trajectoires de ces systèmes face aux pressions anthropiques et climatiques** (i.e. modifications morphologiques et des apports amont). Ces connaissances visent à améliorer l'estimation de la turbidité estuarienne, en soutien : aux études écologiques, à la quantification des indicateurs propres à la définition du BEE des eaux de transition, et à la gestion de ces écosystèmes. La production d'un **outil de caractérisation systématique** a également pour but de dégager des **typologies d'estuaires** en termes de **turbidité potentielle** pouvant s'appliquer aux « plus petits » estuaires moins documentés.

Méthodologie

Pour mener à bien ces objectifs ambitieux, le projet s'appuiera sur la comparaison de différents estuaires français bien documentés (la Gironde, la Loire et la Seine) via la combinaison d'analyse de mesures *in situ* et de modélisation numérique. Le fonctionnement de ces systèmes métropolitains sera également comparé aux estuaires nord-européens de l'Escaut (Belgique/Pays-Bas), l'Ems (Pays-Bas/Allemagne), la Weser et l'Elbe (Allemagne) (Figure 1), via l'organisation de workshops européens annuels. Seul ce travail conjoint sur différents sites avec différents experts permettra d'aboutir à une conceptualisation générique pertinente. Enfin, l'organisation de workshops annuels avec des experts biologistes, biogéochimistes et écologues permettra de définir les métriques sédimentaires adéquates aux besoins spécifiques de leurs thématiques : écologie pélagique (phyto- et zooplancton, poissons), écologie benthique (invertébrés benthiques et microphytobentos), eutrophisation (oxygène), etc.

Liens avec les travaux antérieurs et en cours

Les objectifs de CAPTURE sont très élevés, mais le projet bénéficie de nombreux travaux qui ont été menés par l'équipe DYNECO/DHYSED, en charge de ce projet, au cours des 10 dernières années. Concernant la modélisation numérique hydro-sédimentaire, il est avéré que la mise en place de configurations réalistes est très coûteuse et complexe. Cependant, DHYSED a déjà implémenté la même chaîne de modélisation numérique hydro-sédimentaire curviligne (MARS3D-MUSTANG, Ifremer) sur les trois grands estuaires français (Gironde, Loire et Seine). Le modèle Seine a été validé dans le cadre du projet Seine-Aval 5 HYMOSED (2014-2017 ; Grasso *et al.* [2018] ; Schulz *et al.* [2018]) et le modèle Gironde a été validé dans le cadre du projet ANR AMORAD (2013-2019 ; Diaz *et al.* [2020]). Quant au modèle Loire, sa validation est réalisée dans le cadre de la thèse INTEREST (2019-2022), dont les objectifs initiaux ont dû être revus et sont maintenant davantage focalisés sur la dynamique du bouchon.

Concernant l'analyse des mesures *in situ*, des travaux ont récemment été menés à partir des données du réseau de mesures SYNAPSES en estuaire de Seine, permettant de caractériser les structures turbides caractéristiques de l'estuaire (ex : positionnement du bouchon vaseux) sur une période pluriannuelle [Verney *et al.*, 2017]. Ce type d'approche sera également adoptée pour les estuaires de la Gironde (réseau MAGEST) et de la Loire (réseau SYVEL) en s'appuyant sur les travaux antérieurs [Jalón-Rojas *et al.*, 2015; 2016], ainsi que pour les estuaires européens bénéficiant du même type de suivi.

CAPTURE agira aussi en lien avec le projet RUNTIME (*Réponses hydrosédimentaires et biogéochimiques du continuum terre-Mer des estuaires de Seine et de la Gironde aux forçages naturels et à leur variabilité*; EC2CO-OFB : thème transverse « Continuum Terre-Mer »), car les mêmes simulations numériques hydro-sédimentaires pluriannuelles seront utilisées. Cependant, les objectifs de RUNTIME se distinguent nettement de ceux de CAPTURE, car ils visent principalement à quantifier les interactions entre processus sédimentaires et processus biogéochimiques le long du continuum terre-mer, et à étudier leurs réponses face aux événements extrêmes.

2) Description détaillée du projet

CAPTURE est construit autour de deux tâches principales, et comprend une troisième dédiée à la gestion et au suivi du projet (Tableau 1).

Tâche 1 : Conceptualisation inter-estuaires de la turbidité

L'objectif principale de cette tâche est d'aboutir à un outil d'estimation de la turbidité estuarienne, en lien avec les forçages dominants. La conceptualisation et le développement de cet outil se basera sur l'analyse de mesure *in situ* (Action 1.1), de simulations numériques (Action 1.2) et de comparaison à des estuaires européens contrastés (Action 1.3). Les sept estuaires étudiés dans le cadre de CAPTURE sont illustrés sur la Figure 1a.

Action 1.1 : Analyse des données *in situ* des réseaux de mesures des estuaires (Gironde, Loire et Seine)

Les réseaux de mesures en continu de la Gironde (MAGEST), la Loire (SYVEL) et la Seine (SYNAPSES) seront exploités afin de caractériser l'évolution de la turbidité *in situ* pour différentes configurations morphologiques et différents forçages environnementaux (ex. marnage, vagues, apports liquide/solide amont). En particulier, ces données pluriannuelles haute-fréquence (toutes les 10-30 minutes) permettent de générer des statistiques de turbidité en fonction des valeurs de débit et de marnage à différents niveaux des estuaires (i.e. amont/aval). Ces données servent également de base de validation aux modèles numériques. Ces travaux se dérouleront en lien avec les experts et gestionnaires des réseaux de mesures (cf. Groupe « Projet », Tableau 2).

Jalon 1.1 : Exploitation des réseaux de mesures pour quantifier les variations de turbidité : production d'un rapport intermédiaire synthétisant la variabilité inter-estuaires.

Action 1.2 : Analyse des simulations numériques des estuaires (Gironde, Loire et Seine)

L'analyse des mesures *in situ* apporte une vision partielle de l'estuaire et ne permet pas facilement de quantifier des grandeurs intégrées (ex. masse/position/extension du bouchon vaseux, flux sédimentaires entrant/sortant). Il est donc prévu de s'appuyer sur des simulations numériques pluriannuelles pour quantifier ces métriques dans les trois estuaires. La modélisation se base sur le couplage de modèles hydrodynamique MARS3D [Lazure & Dumas, 2008], de vagues WAVE WATCH III® [Roland & Arduin, 2014] et sédimentaire MUSTANG [Le Hir *et al.*, 2011; Grasso *et al.*, 2015], à l'état

de l'art et déjà mis en place par l'équipe DYNECO/DHYSED [Grasso *et al.*, 2018 ; Schulz *et al.*, 2018 ; Grasso & Le Hir, 2019 ; Diaz *et al.*, 2020] (Figure 1b-d).

Jalon 1.2 : Exploitation des simulations numériques pour quantifier les variations du bouchon vaseux et des flux sédimentaires : production d'un rapport intermédiaire synthétisant la variabilité inter-estuariers.

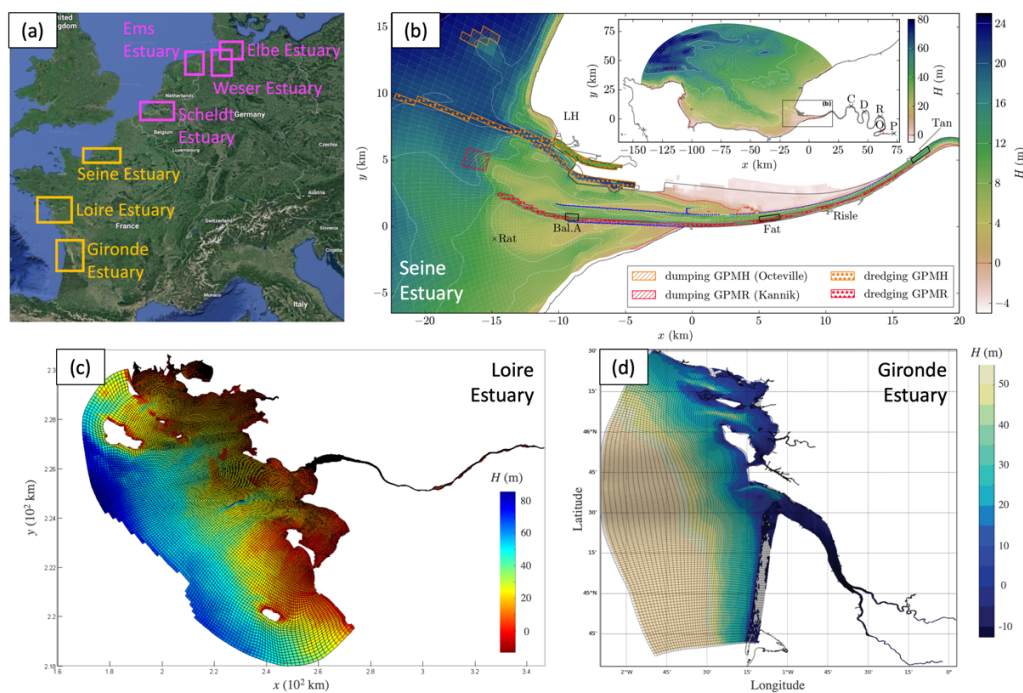


Figure 1. (a) Estuaires français et européens étudiés dans le cadre de CAPTURE. Représentation des configurations numériques des estuaires (b) de la Seine, (c) de la Loire et (d) de la Gironde.

Action 1.3 : Comparaison et conceptualisation inter-estuariers de la dynamique sédimentaire

Cette action est la plus ambitieuse car elle vise à proposer un outil générique d'estimation de la turbidité potentielle dans les estuaires à marée (petits à grands). Elle s'appuie sur les résultats des Actions 1.1 et 1.2, ainsi que sur des analyses analogues réalisées dans différents estuaires européens (Escaut, Belgique/Pays-Bas ; Ems, Pays-Bas/Allemagne ; Weser et Elbe, Allemagne).

Cette action vise à mettre en commun les connaissances acquises sur l'ensemble de ces systèmes contrastés via l'organisation de workshops annuels réunissant une dizaine d'experts européens en physique hydro-sédimentaire estuarienne (Groupe « Hydro-sédimentaire », Tableau 2). Chaque workshop aura pour but de répondre à une question spécifique permettant de faire avancer le projet, d'orienter les analyses, et ainsi de pouvoir atteindre les objectifs visés :

- Workshop 1 : quels sont les paramètres de forçage permettant de caractériser la dynamique hydro-sédimentaire des estuaires ?
- Workshop 2 : quelles approches et méthodes peuvent être utilisées pour conceptualiser la turbidité potentielle des estuaires ?
- Workshop 3 : quelle est la transférabilité des méthodes vers les plus petits estuaires ?

Le financement d'un an de CDD ingénieur en 2022 permettra : (i) de synthétiser et mettre en forme les données et simulations des estuaires français et européens, et (ii) de travailler sur l'exercice de typologie estuarienne en testant différentes approches méthodologiques (ex. forêts d'arbres décisionnels, analyses multi-variables).

En parallèle, d'autres approches davantage basées sur les processus seront testées, à partir de nombres adimensionnels caractéristiques de la dynamique hydro-sédimentaire (ex. paramètres de forme, asymétrie de marée, énergie/prisme tidal, nombres de Froude et de mélange). Le but est de pouvoir relier les métriques sédimentaires pertinents (ex. turbidité, bouchon vaseux, flux entrant/sortant) à ces grandeurs.

Les méthodes d'estimation de la turbidité potentielle qui découleront de ces travaux seront testées sur d'autres estuaires de différentes tailles, dont nous disposons de données de validation (ex. Vilaine, Charente, Delaware-USA). Cette étape de validation servira de « *Proof of Concept* », permettant de confirmer la pertinence de l'outil et son aspect générique.

Jalon 1.3.1 : Organisation annuelle d'un workshop européen dédié à l'intercomparaison de la dynamique sédimentaire estuarienne et production d'un rapport de synthèse sur les avancées scientifiques et techniques.

Jalon 1.3.2 : Conceptualisation de la turbidité inter-estuaires : proposition d'un outil permettant d'estimer la turbidité potentielle dans les estuaires à marée et production d'un rapport décrivant la méthode d'estimation ainsi que ses limites et incertitudes.

Tâche 2 : Définition de métriques sédimentaires caractéristiques des écosystèmes estuariens

Les objectifs de cette tâche sont double : (i) de définir et quantifier les métriques sédimentaires pertinents pour l'étude des écosystèmes estuariens (Action 2.1), et (ii) d'estimer comment seraient amenés à évoluer ces métriques dans le cadre du changement global (Action 2.2).

Action 2.1 : Définition et caractérisation des métriques ad hoc par discipline

L'étude des écosystèmes estuariens regroupe différentes disciplines (ex. biologie, biogéochimie, écologie) dont les besoins en termes de quantification de la dynamique sédimentaire varient (ex. turbidité/MES, masse/extension du bouchon vaseux, valeurs min/moyen/max, surface/fond, été/hiver, flux particuliers entrant/sortant). Pour définir les besoins propres à chacun, il est prévu d'organiser des workshops annuels regroupant des experts représentatifs d'un large panel de disciplines (cf. Groupe « Interdisciplinaire », Tableau 2). La sélection des métriques sédimentaires pertinents viendra nourrir le travail de conceptualisation inter-estuaires (Tâche 1, Action 1.3). Ces métriques devront également répondre aux besoins des gestionnaires de sites, d'où l'importance d'assurer de fortes interactions entre les avancées issues des workshops et les réunions de projet.

Jalon 2.1 : Organisation annuelle d'un workshop national dédié à la caractérisation de métriques sédimentaires adéquats aux études écologiques, et production d'un rapport intermédiaire sur les avancées scientifiques et techniques.

Action 2.2 : Evolution des métriques dans le cadre du changement global (climatique et anthropique)

A l'échelle du changement global, les conditions climatiques et anthropiques sont amenées à évoluer. Dans le cadre de CAPTURE, il est prévu d'étudier les réponses potentielles des métriques définies dans l'Action 2.1, face aux changements :

- climatiques : via la modification des apports solides et liquides amont, en adoptant des scénarii avec des augmentations/réductions globales ou suivant une intensification des crues et un allongement des étiages [Flipo *et al.*, 2019] ;
- anthropiques : via la modification de la morphologie des estuaires, en changeant la profondeur des chenaux et/ou la largeur des sections.

L'analyse de ces changements potentiels se fera sur la base des outils développés au cours de la Tâche 1 (Action 1.3), via la modification des paramètres forçant (paramètres de forme et variation des apports amont). En collaboration avec les experts concernés (ex. BRGM), il est prévu de discuter des altérations anthropiques pouvant influencer ces paramètres. Il faut cependant noter que le travail de conceptualisation proposé dans CAPTURE se base sur des paramètres de forme des estuaires (sections, profondeur, etc.) qui représentent d'avantage les systèmes dans leur ensemble. Il est par exemple attendu d'étudier l'effet d'approfondissement des chenaux, et de réduction/augmentation des sections. Mais l'outil proposé ne permettra pas d'observer l'influence d'aménagements à petite échelle. De plus, il ne sera pas possible d'étudier rigoureusement l'effet de la montée du niveau de la mer, car des phénomènes d'adaptation morphologique progressive agissent, nécessitant une modélisation morphodynamique dépassant le cadre de ce projet.

Les résultats de cette action devraient permettre aux scientifiques et gestionnaires de mieux se projeter sur les trajectoires potentielles de l'estuaire, en particulier face aux problématiques de restauration à l'échelle des systèmes.

Jalon 2.2 : Réponses des métriques sédimentaires face au changement global : production d'un rapport décrivant les trajectoires potentielles de la dynamique sédimentaire estuarienne.

Tâche 3 : Gestion et suivi de projet

L'animation et le suivi du projet se déroulera à deux niveaux :

- en interne : avec le Groupe « Projet » via les réunions de projet annuelles, en interaction avec l'animation scientifique menée dans les Groupes « Hydro-sédimentaire » et « Interdisciplinaire » ;
- en externe : avec le Comité de Suivi (cf. Section 7) via les réunions de suivi organisées par la Mission Inter-Estuaires de l'OFB.

Jalon 3 : Organisation annuelle d'une réunion de projet : production d'une note de synthèse après chaque réunion.

3) Calendrier prévisionnel du projet

Le calendrier prévisionnel du projet est synthétisé sur le Tableau 1. Chaque année, les réunions de projet (RP) se déroulent au 2^{ème} trimestre, les workshops « Hydro-sédimentaire » (WHS) au 3^{ème} trimestre, et les workshops « Interdisciplinaire » (WI) au 4^{ème} trimestre. Il est prévu de fournir des notes de synthèse après chaque réunion et workshop afin de restituer les avancées scientifiques et techniques. De plus, les réunions avec le comité de suivi (RS) auront lieu en fin d'année.

Tableau 1. Calendrier prévisionnel du projet CAPTURE.

Tâche	2021			2022			2023		
Tâche 1. Conceptualisation inter-estuariers de la turbidité									
Action 1.1. Analyse des données <i>in situ</i> des réseaux de mesures des estuaires (Gironde, Loire et Seine)									
Action 1.2. Analyse des simulations numériques des estuaires (Gironde, Loire et Seine)									
Action 1.3. Comparaison et conceptualisation inter-estuariers de la dynamique sédimentaire			WHS			WHS			WHS
Tâche 2. Définition de métriques sédimentaires caractéristiques des écosystèmes estuariens									
Action 2.1. Définition et caractérisation des métriques ad hoc par discipline			WI			WI			
Action 2.2. Evolution des métriques dans le cadre du changement global (climatique + anthropique)									WI
Tâche 3. Gestion et suivi de projet		RP	RS		RP	RS		RP	RS

RP : Réunion de Projet ; RS : Réunion de Suivi ; WI : Workshop Interdisciplinaire ; WHS : Workshop Hydro-Séd. ;  : CDD CAPTURE

4) Partenaires du projet

L'Ifremer (DYNECO/DHYSED) est l'unique partenaire formel de CAPTURE, mais le projet s'appuie sur un large consortium national et européen aux compétences complémentaires (inter-sites et interdisciplinaire ; Tableau 2). Ce consortium regroupe 22 participants de 15 différentes structures (laboratoires de recherche, bureaux d'études et groupements publics de gestion). Les sessions de travail (workshops) organisées par l'Ifremer représentent une des pierres angulaires de CAPTURE, permettant de rassembler les connaissances et synthétiser les réflexions nécessaires à l'aboutissement du projet.

Le groupe « Projet » est dédié au suivi de l'avancement du projet, réunissant des experts scientifiques des principaux estuaires étudiés (Gironde, Loire et Seine), ainsi que des gestionnaires des réseaux de mesures. Ce groupe intègre aussi des gestionnaires d'autres estuaires (ex. EPTB Vilaine), et reste ouvert à d'autres membres potentiellement intéressés (ex. EPTB Charente, PNM Estuaire de la Gironde et de la Mer des Pertuis).

Le groupe « Hydro-sédimentaire » réunit des experts européens travaillant sur des systèmes estuariens contrastés, afin de proposer une conceptualisation de la turbidité estuarienne la plus générique possible. L'objectif est de s'appuyer sur les connaissances de chaque expert, spécifiques à leur site d'étude.

Le groupe « Interdisciplinaire » croise de nombreuses thématiques associées aux différents compartiments des écosystèmes estuariens (physique, biologique, biogéochimique et écologique). Les experts de ce groupe partagent la conviction que chaque discipline nécessite une meilleure quantification de la turbidité estuarienne (ou des MES associées), et que cela passe par une meilleure définition des besoins associés à leurs problématiques.

Tableau 2. Description du consortium de CAPTURE à travers les différents groupes d'action du projet.

Groupe "Projet"			Groupe "Hydro-sédimentaire"			Groupe "Interdisciplinaire"		
Nom	Structure	Expertise	Nom	Structure	Expertise	Nom	Structure	Expertise
GRASSO Florent	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, resp. projet	GRASSO Florent	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, resp. projet	GRASSO Florent	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, resp. projet
SOTTOLICHIO Aldo	UMR EPOC	Hydro-sédimentaire, réf. Gironde	SOTTOLICHIO Aldo	UMR EPOC	Hydro-sédimentaire, réf. Gironde	SOTTOLICHIO Aldo	UMR EPOC	Indicateurs hydro-morpho-sédiment.
LAFITE Robert	UMR M2C	Hydro-sédimentaire, réf. Seine	LAFITE Robert	UMR M2C	Hydro-sédimentaire, réf. Seine	LAFITE Robert	UMR M2C	Hydro-sédimentaire
WALTHER Régis	ARTELIA	Hydro-sédimentaire, réf. Loire	WALTHER Régis	ARTELIA	Hydro-sédimentaire, réf. Loire	BUCHET Rémi	Ifremer - VIGIES	Réf. Ifremer DCE/DCSMM
SCHIMDT Sabine	UMR EPOC	Réf. réseau MAGEST (Gironde)	BURCHARD Hans	IOW (Allemagne)	Hydro-sédimentaire, réf. Elbe	DANIEL Anne	Ifremer - DYNECO	Biogéochimie
LEMOINE Jean-Philippe	GIP Seine-Aval	Réf. réseau SYNAPSES (Seine)	SCHUTTELAARS Henk	Univ. Delft (Pays-Bas)	Hydro-sédimentaire, modélisation	DESROY Nicolas	Ifremer - UL	Ecologie benthique
FALLOU Héléne	GIP Loire Estuaire	Réf. réseau SYVEL (Loire)	VAN KESSEL Thijs	DELTAIRES (Pays-Bas)	Hydro-sédimentaire, réf. Escaut aval	LEPAGE Mario	INRAE	Ecologie pélagique (poissons)
LEBRETON Aurore	EPTB Vilaine	Réf. Vilaine	VAN MAREN Bas	DELTAIRES (Pays-Bas)	Hydro-sédimentaire, réf. Ems	ORVAIN Francis	UMR BOREA	Ecologie benthique (phyto)
BUCHET Rémi	Ifremer - VIGIES	Réf. Ifremer DCE/DCSMM	VANLEDE Joris	Flanders Hyd. (Belgique)	Hydro-sédimentaire, réf. Escaut amont	SOUCHU Philippe	Ifremer - UL	Eutrophisation
VERNEY Romaric	Ifremer - DYNECO	Hydro-sédimentaire, réseaux de mesure	ZORNDT Anna	BAW (Allemagne)	Hydro-sédimentaire, réf. Weser	SOUISSI Sami	UMR LOG	Ecologie pélagique (zooplancton)

5) Moyens mobilisés

Ce projet est planifié sur une durée de 3 ans (2021-2023). Les moyens humains dédiés à CAPTURE se répartissent de manière suivante :

- Florent Grasso, responsable du projet, consacrera 3 mois/an à CAPTURE (total de 9 mois ETP), dont 2 mois/an sur la Tâche 1 et 1 mois/an sur la Tâche 2 ;
- Le temps du CDD ingénieur demandé en financement (12 mois ETP en 2022) sera consacré à la Tâche 1 ;
- La participation des experts aux workshops européens « Hydro-sédimentaire » représente un investissement de plus de 2 mois ETP dédié à la Tâche 1 (9 personnes ; 2 workshops présentiels : 2 jours + 2*0,5 jours de déplacement ; 1 workshop en visioconférence : 2 jours) ;
- La participation des experts aux workshops nationaux « Interdisciplinaire » représente un investissement de plus de 1 mois ETP dédié à la Tâche 2 (9 personnes ; 2 workshops présentiels : 1 jour + 2*0,25 jours de déplacement ; 1 workshop en visioconférence : 1 jour).

Sachant que ce projet s'appuie majoritairement sur l'exploitation de données (réseaux de mesures) et de modèles numériques (MARS3D-MUSTANG) existants, les moyens financiers sont principalement dédiés à la mise en commun des connaissances et des réflexions pour atteindre les objectifs visés (Tableau 3). Pour cette raison, une importante part du budget est allouée à l'organisation de workshops. Cependant, certains workshops et réunions de projet ont été proposés sous forme de visioconférences afin de réduire les coûts. Il faut aussi relever la grande opportunité de pouvoir réunir des experts européens sur cette thématique inter-estuarienne, sans qu'il soit nécessaire de leur apporter un financement en temps personnel.

La demande de CDD ingénieur de 1 an en 2022 a pour but de travailler sur la synthèse et la mise en forme des données/simulations des estuaires européens, ainsi que sur l'exercice de typologie estuarienne. Enfin, la participation à des colloques en 2022 et 2023 a pour finalité de valoriser et promouvoir les résultats des Tâches 1 et 2.

Tableau 3. Budget prévisionnel du projet CAPTURE.

Budget prévisionnel	2021 (€)	2022 (€)	2023 (€)	TOTAL (€)
Fonctionnement	11 500	2 500	14 000	28 000
Colloques : (1 pers/2022, 1 pers/2023)	0	2 500	2 500	
Réunions de suivi de projet : visio (1/an)	0	0	0	
Workshops nationaux 'Interdisciplin.' (1 jours) : 350€/pers (10 pers/2021, visio/2022, 10 pers/2023)	3 500	0	3 500	
Workshops européens 'Sedim.' (2 jours) : 800€/pers (10 pers/2021, visio/2022, 10 pers/2023)	8 000	0	8 000	
Équipement	400	400	400	1 200
PC : 2000€ (amortissement de 400€/an)	400	400	400	
Travail du personnel	21 831	81 735	21 831	125 397
Non-permanent	0	59 904	0	59 904
CDD ingénieur (12 mois en 2022)	0	59 904	0	
Permanent	21 831	21 831	21 831	65 493
Florent Grasso (3 mois/an)	21 831	21 831	21 831	
Coût marginal (Fonct. + Miss. + Invest. + Pers. non-perm.)	11 900	62 804	14 400	89 104
Coût total (Coût marginal + Pers. Perm.)	33 731	84 635	36 231	154 597
Frais de structure (15% du coût total)	5 060	12 695	5 435	23 190
Coût éligible (Coût marginal + Frais de structure)	16 960	75 499	19 835	112 294
Aide demandée (80% du coût éligible)	13 568	60 399	15 868	89 835

6) Valorisation des résultats envisagée

Les résultats seront valorisés sous forme de publications scientifiques et de présentations à des colloques internationaux. Il sera fourni une analyse critique de l'évolution de la turbidité dans les grands estuaires et de la réponse aux forçages hydrométéorologiques (marée, vagues, apports amont) et humains (modifications morphologiques).

Le croisement des mesures *in situ* et des simulations numériques permettra de déterminer une configuration optimale pour la distribution des stations de mesures le long des estuaires et ainsi de proposer des recommandations sur le dimensionnement des réseaux de mesures (ex. positionnement, gamme de turbidité).

Il sera proposé un outil permettant d'estimer la turbidité (ex. MES, bouchon vaseux, flux entrant/sortant) à partir des caractéristiques des estuaires, pouvant servir de base à la définition de typologie d'estuaires en termes de turbidité potentielle. Cet outil, qui devra également s'appliquer aux plus petits estuaires, pourra servir à fournir des pistes de réflexion sur les méthodes de gestion à adopter en termes de restauration écologique à l'échelle des systèmes (ex. modification de la profondeur et/ou des sections). Cependant, ce type d'outil pourra difficilement s'appliquer à des projets de restauration à petite échelle, pour lesquels une modélisation « *process-based* » à haute résolution spatio-temporelle reste nécessaire.

Les méthodes d'estimation de la turbidité estuarienne seront mises à disposition des utilisateurs via l'accès à un rapport disponible sur un site web. Ce document, préconisant la méthodologie à suivre pour estimer la turbidité dans les estuaires à marée, permettra de spécifier les domaines d'application des méthodes proposées (ainsi que leurs limites et incertitudes) afin que les gestionnaires puissent déterminer la pertinence des outils pour un environnement donné.

Enfin, il est prévu une restitution des résultats lors des colloques de fin d'année organisés par la MIE.

7) Comité de suivi du projet

Afin de garantir un bon avancement des travaux, il est proposé de mettre en place un comité de suivi (CS) annuel qui se déroulerait en fin d'année (Tableau 1). Ce CS pourrait être constitué :

- d'une référente OFB au sein de la MIE : Maïa AKOPIAN ;
- d'une référente en dynamique sédimentaire estuarienne : Isabelle BRENON (Univ. La Rochelle) ;
- d'un référent en écologie estuarienne en lien avec les gestionnaires : Cédric FISSON (GIPSA) ;
- d'une référente DCE (MEFM estuaires et eaux côtières) : Cécile CAPDERREY (BRGM).

Cette proposition de CS est bien évidemment ouverte à davantage de personnes potentiellement intéressées.

8) Références

- Allen, G. P., Salomon, J., Bassoullet, P., Du Penhoat, Y., & De Grandpre, C. (1980). Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 26(1-3), 69-90.
- Avoine, J., Allen, G., Nichols, M., Salomon, J., & Larssonneur, C. (1981). Suspended-sediment transport in the Seine estuary, France: effect of man-made modifications on estuary—shelf sedimentology. *Marine Geology*, 40(1-2), 119-137.
- Billen, G., Garnier, J., Nemery, J., Sebilo, M., Sferratore, A., Barles, S., et al. (2007). A long-term view of nutrient transfers through the Seine river continuum. *Sci Total Environ*, 375(1-3), 80-97.
- Burchard, H., Schuttelaars, H., & Ralston, D. (2018). Sediment Trapping in Estuaries. *Annual review of marine science*, 10, 371-395.
- Diaz, M., Grasso, F., Le Hir, P., Sottolichio, A., Caillaud, M., & Thouvenin, B. (2020). Modeling Mud and Sand Transfers Between a Macrotidal Estuary and the Continental Shelf: Influence of the Sediment Transport Parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(4), e2019JC015643.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Castaing, P., & Babin, M. (2009). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 321-332.
- Flipo, N., Gallois, N., Labarthe, B., Baratelli, F., Viennot, P., Schuite, J., et al. (2019). Pluri-annual water budget on the Seine basin: past, current and future trends.
- Grasso, F., & Le Hir, P. (2019). Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dynamics*, 69(1), 83-100.
- Grasso, F., Le Hir, P., & Bassoullet, P. (2015). Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, 65(4), 607-616.
- Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., et al. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1), 558-577.
- Jalón-Rojas, I., Schmidt, S., & Sottolichio, A. (2015). Turbidity in the fluvial Gironde Estuary (southwest France) based on 10-year continuous monitoring: sensitivity to hydrological conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2805-2819.
- Jalón-Rojas, I., Schmidt, S., Sottolichio, A., & Bertier, C. (2016). Tracking the turbidity maximum zone in the Loire Estuary (France) based on a long-term, high-resolution and high-frequency monitoring network. *Continental Shelf Research*, 117, 1-11.
- Lazure, P., & Dumas, F. (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, 31(2), 233-250.
- Le Hir, P., Cayocca, F., & Waeles, B. (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, 31(10), S135-S149.
- Morris, A., Mantoura, R., Bale, A., & Howland, R. (1978). Very low salinity regions of estuaries: important sites for chemical and biological reactions. *Nature*, 274(5672), 678-680.
- Roland, A., & Ardhuin, F. (2014). On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean. *Ocean Dynamics*, 64(6), 833-846.
- Schulz, E., Grasso, F., Le Hir, P., Verney, R., & Thouvenin, B. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 2. Numerical Modeling of Sediment Fluxes and Budgets Under Typical Hydrological and Meteorological Conditions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1), 578-600.
- Sottolichio, A., & Castaing, P. (1999). A synthesis on seasonal dynamics of highly-concentrated structures in the Gironde estuary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 329(11), 795-800.
- Verney, R., Grasso, F., Druine, F., Deloffre, J., & Lemoine, J. P. (2017). *Using real time monitoring networks for investigating sediment dynamics in estuaries: a step beyond turbidity time series analysis*. Paper presented at the INTERCOH 2017- 14th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes, November 13-17, 2017, Montevideo, Uruguay.
- Winterwerp, J. C. (2011). Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening. *Ocean Dynamics*, 61(2-3), 203-215.

7.3. Résumés de 5 articles représentatifs de mes travaux de recherche

Numerical modelling of mixed-sediment consolidation

Florent Grasso · Pierre Le Hir · Philippe Bassoullet

Received: 23 May 2014 / Accepted: 10 February 2015 / Published online: 1 March 2015
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Abstract Sediment transport modelling in estuarine environments, characterised by cohesive and non-cohesive sediment mixtures, has to consider a time variation of erodibility due to consolidation. Generally, validated by settling column experiments, mud consolidation is now fairly well simulated; however, numerical models still have difficulty to simulate accurately the sedimentation and consolidation of mixed sediments for a wide range of initial conditions. This is partly due to the difficulty to formulate the contribution of sand in the hindered settling regime when segregation does not clearly occur. Based on extensive settling experiments with mud-sand mixtures, the objective of this study was to improve the numerical modelling of mixed-sediment consolidation by focusing on segregation processes. We used constitutive relationships following the fractal theory associated with a new segregation formulation based on the relative mud concentration. Using specific sets of parameters calibrated for each test—with different initial sediment concentration and sand content—the model achieved excellent prediction skills for simulating sediment height evolutions and concentration vertical profiles. It highlighted the model capacity to simulate properly the segregation occurrence for mud-sand mixtures characterised by a wide range of initial conditions. Nevertheless, calibration parameters varied significantly, as the fractal number ranged from 2.64 to 2.77. This study investigated the relevance of using a common set of parameters, which is generally required for 3D sediment transport modelling. Simulations were less

accurate but remained satisfactory in an operational approach. Finally, a specific formulation for natural estuarine environments was proposed, simulating correctly the sedimentation-consolidation processes of mud-sand mixtures through 3D sediment transport modelling.

Keywords Mud-sand mixtures · Hindered settling · Consolidation · Experiments · Numerical modelling · Segregation

1 Introduction

The simulation of cohesive sediments requires that a time variation of erodibility due to consolidation be taken into account (e.g. Van Ledden et al. 2004; Sanford 2008; Le Hir et al. 2011). Different stages characterise the sediment behaviour from suspension to compaction, namely, flocculation, settling and sedimentation, and consolidation (e.g. Imai 1981). This final stage is driven by pore water release: firstly, without solid skeleton formation, named as the permeability regime, and secondly, with solid skeleton formation, named as the effective stress regime (e.g. Dankers and Winterwerp 2007). To a lesser extent, the creep effect that consists in solid skeleton compression may then take place for a long-term sediment consolidation (e.g. Merckelbach and Kranenburg 2004a).

Several techniques for simulating consolidation have been proposed in the literature. The simplest methods consist in (i) splitting the sediment into layers characterised by their density and/or shear strength and (ii) translating the consolidation into a residence time concept (e.g. Teisson 1991) or into a regular mass transfer with the underlying layer that is more consolidated (e.g. Le Hir and Karlilow 1992). Another empirical technique is based upon an increase of sediment density (or

Responsible Editor: Jeremy Spearman

This article is part of the Topical Collection on the *12th International Conference on Cohesive Sediment Transport in Gainesville, Florida, USA, 21–24 October 2013*

F. Grasso (✉) · P. Le Hir · P. Bassoullet
IFREMER–DYNECO/PHYSED, Centre de Bretagne, BP 70,
29280 Plouzané, France
e-mail: florent.grasso@ifremer.fr



Influence of *Crepidula fornicata* on suspended particle dynamics in coastal systems: a mesocosm experimental study

Florent Grasso^a , Antoine Carlier^b, Philippe Cugier^b, Romaric Verney^a and Martin Marzloff^b

^aIFREMER – DYNECO/DHYSED, Centre de Bretagne, Plouzané, CS, France; ^bIFREMER – DYNECO/LEBCO, Centre de Bretagne, Plouzané, CS, France

ABSTRACT

In coastal environments, strong feedback can exist between benthic fauna and sediment dynamics. Benthic populations can modify sediment dynamics through biofiltration and bioturbation, while hydro- and sediment dynamics directly determine local environmental conditions for benthic organisms. However, these complex feedbacks are difficult to study *in situ*. Here, we carried out mesocosm experiments to characterize the effects of a benthic species (the gastropod *Crepidula fornicata*) on mud dynamics under hydrodynamic conditions representative of their natural habitat. Different experimental tests related to the inclusion (or not) of dead or live crepidula reveal that biofiltration can increase particle settling up to 40%. Flocculation, which is strengthened by organic matter enrichment in shell beds, also substantially increases particle settling. Thus, both processes enhance sedimentation above live crepidula habitats. Furthermore, these experiments highlight serious technical, physical and biological challenges that have to be tackled for properly investigating biophysical interactions.

ARTICLE HISTORY

Received 9 January 2020
Accepted 7 October 2020

KEYWORDS

Laboratory experiments;
coastal processes; physical-
biological interactions;
benthic engineer species;
mud settling; flocculation;
biofiltration; organic matter

1. Introduction

In coastal and estuarine areas, benthic-pelagic coupling largely contributes to dissolved and particulate matter fluxes (e.g. sediments, nutrients, pollutants), primary production dynamics as well as energy transfers within food webs. The relative importance of benthic and pelagic primary productions for sustaining benthic invertebrate communities depends on many factors, such as water depth, hydrodynamics, bed coverage, nutrient availability and benthic biodiversity.

Physical (i.e. biotope) and biological (i.e. biota: flora and fauna) compartments are often studied independently. However, recent studies highlight nonlinearities in hydro-bio-geochemical processes due to strong interactions between physical and biological processes (e.g. Graf and Rosenberg 1997; Murray et al. 2002; Rice et al. 2016). Benthic species can modify their habitat either via their physical disturbance (e.g. bed roughness, sediment trapping) or their biological activities (e.g. bioturbation, biofiltration and biodeposition) (Orvain et al. 2004). These hydro-bio-sediment interactions directly impact particulate fluxes at the water-sediment interface (e.g. Orvain and Sauriau 2002; Reise 2002; Widdows

et al. 2002; Le Hir et al. 2007; Ganthy et al. 2013; Kombiadou et al. 2014).

Coastal benthic habitats are by definition variable, for instance in terms of hydrodynamics (e.g. wind-, tide- and wave-induced currents), bed substrate (e.g. mud-sand bed coverage) and biogeochemical conditions (e.g. season-changing organic matter (OM) contents). Moreover, complex feedback between biological and physical processes remains difficult to study *in situ* and small-scale (i.e. at the scale of $\sim 0.1\text{--}1\text{ m}^2$) laboratory experiments are by definition limited in their simplified representation of marine environments. Hence, mesocosm experiments constitute a valuable option to perform controlled studies on these complex feedbacks. However, physically simulating bio-sediment interactions under realistic conditions remains challenging at any scale, as it requires the generation of tide- and wave-induced current while maintaining live benthic organisms in a cohesive sediment (i.e. mud) bed. The presence of mud induces additional complexity over non-cohesive sediments, which remains difficult to characterize in mesocosm experiments. Among the most relevant mechanisms: (i) flocculation processes increase the mud settling velocity, increasing suspended sediment deposition (e.g. Gibbs 1985; van

RESEARCH ARTICLE

10.1002/2017JC013185

Companion to Schulz et al. [2018],
<https://doi.org/10.1002/2016JC012638>.

Key Points:

- A realistic 3-D numerical model of mud-sand dynamics has been developed to investigate turbidity maximum dynamics of a macrotidal estuary
- The ETM location is driven by river flow and tides; the ETM mass is driven by tides and influenced more by waves than by river flow
- The neap-to-spring phasing substantially influences the ETM location and mass through a hysteresis response related to stratification, mixing, and tidal pumping mechanisms

Correspondence to:

F. Grasso,
florent.grasso@ifremer.fr

Citation:

Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., ... Garnier, V. (2018). Suspended sediment dynamics in the macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical modeling of turbidity maximum dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 558–577. <https://doi.org/10.1002/2017JC013185>

Received 15 JUN 2017

Accepted 12 DEC 2017

Accepted article online 28 DEC 2017

Published online 24 JAN 2018

Corrected 12 FEB 2018

This article was corrected on 12 FEB 2018. See the end of the full text for details.

© 2017. American Geophysical Union.
 All Rights Reserved.

Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics

F. Grasso¹, R. Verney¹, P. Le Hir¹, B. Thouvenin¹, E. Schulz^{1,2}, Y. Kervella³, I. Khojasteh Pour Fard^{1,4}, J.-P. Lemoine⁵, F. Dumas^{1,6}, and V. Garnier⁷

¹IFREMER – DYNECO/DHYSED, Centre de Bretagne, Plouzané, France, ²Department of Physical Oceanography and Instrumentation, Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemünde (IOW), Warnemünde, Germany, ³OPEN OCEAN, Recherche et Développement, Brest, France, ⁴Now at University of Isfahan, Isfahan, Iran, ⁵Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval, Pôle Régional des Savoirs, Rouen, France, ⁶Now at Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Brest, France, ⁷IFREMER, Univ. Brest, CNRS, IRD, Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale, IUEM, Plouzané, France

Abstract Tidal pumping, baroclinic circulation, and vertical mixing are known to be the main mechanisms responsible for the estuarine turbidity maximum (ETM) formation. However, the influence of hydro-meteorological conditions on ETM dynamics is still not properly grasped and requires further investigation to be quantified. Based on a realistic three-dimensional numerical model of the macrotidal Seine Estuary (France) that accounts for mud and sand transport processes, the objective of this study is to quantify the influence of the main forcing (river flow, tides, and waves) on the ETM location and mass changes. As expected, the ETM location is strongly modulated by semidiurnal tidal cycles and fortnightly time scales with a high sensitivity to river flow variations. The ETM mass is clearly driven by the tidal range, characteristic of the tidal pumping mechanism. However, it is not significantly affected by the river flow. Energetic wave conditions substantially influence the ETM mass by contributing up to 44% of the maximum mass observed during spring tides and by increasing the mass by a factor of 3 during mean tides compared to calm wave conditions. This means that neglecting wave forcing can result in significantly underestimating the ETM mass in estuarine environments. In addition, neap-to-spring phasing has a strong influence on ETM location and mass through a hysteresis response associated with the delay for tidal pumping and stratification to fully develop. Finally, simulations show that the uppermost limit of the Seine ETM location did not change notably during the last 35 years; however, the seaward limit migrated few kilometers upstream.

1. Introduction

The estuarine turbidity maximum (ETM) is a key pattern in worldwide macrotidal estuarine sediment dynamics (e.g., Delaware Estuary [USA] [McSweeney et al., 2016], Gironde Estuary (France) [Jalón-Rojas et al., 2015], and Yalu Estuary (China) [Yu et al., 2014]). This zone of high suspended sediment concentration (SSC) buffers sediment exchanges between continental and coastal waters, controls channel siltation, and drives biogeochemical processes (Billen et al., 2007; Passy et al., 2016).

Many studies investigated ETM dynamics from in situ measurements (Jalón-Rojas et al., 2015, 2016; McSweeney et al., 2016; Sottolichio et al., 2011) and/or numerical modeling (Bi & Toorman, 2015; Le Hir et al., 2001; Sottolichio et al., 2000; Toubanc et al., 2016; Winterwerp, 2011; Yu et al., 2014). They enabled the characterization of the major mechanisms for ETM formation as: (i) the “tidal pumping” induced by the tidal asymmetry between stronger flood-tide velocity and weaker ebb-tide velocity and (ii) the upward bottom residual transport induced by longitudinal salinity gradients between the fresh river flow and the saline seawater (Allen et al., 1980; Brenon & Le Hir, 1999; Dronkers, 1986; Dyer, 1973; Scully & Friedrichs, 2007; Uncles & Jordan, 1979; Yu et al., 2014). Moreover, the tidal variations of turbulent mixing, with enhanced vertical mixing during the flood and suppressed mixing during the ebb phase (Simpson et al., 1990), modify the vertical distribution of particles, which are likely to settle more easily on ebb (Burchard & Baumert, 1998; Burchard & Hetland, 2010). Turbulent mixing also decays from the upper estuary down to the stratified saline intrusion zone, so that sediment settling (and trapping) is enhanced in the latter area (Geyer, 1993).



Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010

Florent Grasso¹ · Pierre Le Hir¹

Received: 4 June 2018 / Accepted: 23 October 2018 / Published online: 8 November 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

Estuaries are subject to extensive morphological changes through human activities, such as deepening and narrowing via dredging and channelization. The estuary sediment load, characterised by the estuarine turbidity maximum (ETM), can severely increase in response to channel deepening, shifting the estuary from a natural to hyperturbid state. The main processes driving the estuarine circulation, hydrology and sediment dynamics are relatively well known. However, their relative influence on suspended sediment concentration (SSC), as well as their role in the transition toward hyperturbid estuaries, is still a subject of debate. Therefore, this study aims at investigating the relative contribution of key estuarine drivers (gravitational circulation and tidal pumping mechanisms) on the ETM dynamics under significant estuary morphological changes. In a 3D numerical model of the Seine Estuary (France), three bathymetries from the last 50 years (1960, 1975 and 2010) were implemented, characterising the gradual estuary deepening and narrowing. The morphological changes induce an expected tidal amplification in the main channel, associated with a decrease of the tidal duration asymmetry. The salinity front slightly migrates up-estuary and the stratification strengthens, resulting in a higher and upper-estuary SSC distribution. Starting from a dominantly natural system driven by the tidal pumping mechanism in 1960, the contribution of the gravitational circulation strongly increased in the present-day anthropogenically-controlled system. Contrastingly, the maximum ETM mass barely changes with the morphological changes and dredging activities have hardly any influence. Hence, the maximum ETM mass in the Seine Estuary would principally result from the tidal forcing rather than the morphology.

Keywords Estuary deepening and narrowing · Sediment dynamics · Turbidity maximum · Tidal asymmetry · Stratification · Numerical modelling · Morphological changes

1 Introduction

Estuaries constitute dynamic areas mixing fresh riverine water within sea water, providing high levels of nutrients both in the water column and in the sediment that makes estuaries among the most productive natural habitats in the world (Morris et al. 1978). Nevertheless, these highly anthropized ecosystems are

drastically vulnerable to human pressures (Nichols et al. 1986). Representing strong economic stakes, estuaries undergo considerable changes through engineering works, such as dredging activities, dike construction and harbour extensions, potentially associated with channel deepening and estuary narrowing (e.g. Avoine et al. 1981).

Many estuaries around the world are characterised by an estuarine turbidity maximum (ETM), defining a zone of high suspended sediment concentration (SSC) that can reach tens to hundreds of g/l (e.g. Glangeaud 1938; Le Hir and Thouvenin 1994; Sottolichio et al. 2000; Uncles 2002; Sommerfield and Wong 2011; Bi and Toorman 2015; Jalón-Rojas et al. 2016; Grasso et al. 2018). Winterwerp (2011) summarised the various mechanisms classically attributed to the transport and trapping of fines in estuaries and tidal rivers and the formation of an ETM in relation to the physical properties of the sediment. These mechanisms are defined as: tidal asymmetry in ebb/flood current velocities (e.g. Allen et al.

Responsible Editor: Francisco Pedocchi

This article is part of the Topical Collection on the *14th International Conference on Cohesive Sediment Transport in Montevideo, Uruguay 13-17 November 2017*

✉ Florent Grasso
florent.grasso@ifremer.fr

¹ Centre de Bretagne, IFREMER – DYNECO/DHYSED, CS 10070, F-29280 Plouzané, France



OPEN Unraveling the impacts of meteorological and anthropogenic changes on sediment fluxes along an estuary-sea continuum

Florent Grasso[✉], Elliott Bismuth & Romaric Verney

Sediment fluxes at the estuary-sea interface strongly impact particle matter exchanges between marine and continental sources along the land-sea continuum. However, human activities drive pressures on estuary physical functioning, hence threatening estuarine habitats and their ecosystem services. This study explores a 22-year numerical hindcast of the macrotidal Seine Estuary (France), experiencing contrasted meteorological conditions and anthropogenic changes (i.e., estuary deepening and narrowing). The hindcast was thoroughly validated for both water column and sediment bed dynamics and showed good capacities to simulate annual sediment budgets observed from 1990 to 2015. We aim at disentangling the relative contributions of meteorological and human-induced morphological changes on net sediment fluxes between the estuary and its adjacent coastal sea. Our results highlight that intense wave events induce fine sediment ($\leq 100 \mu\text{m}$) export to the sea but coarser sediment ($\geq 210 \mu\text{m}$) import within the estuary. Although intense river discharges induce mud export to the sea, moderate to large river discharges prove to support mud import within the estuary. Wave and river discharge events were less intense in 2005–2015 than in 1990–2000, reducing fine sediment export to the sea. The estuary deepening and narrowing due to human activities increased fine sediment import within the estuary, shifting the estuary from an exporting to importing system. We propose a conceptualization of mud flux response to river discharge and wave forcing, as well as anthropogenic pressures. It provides valuable insights into particle transfers along the land-sea continuum, contributing to a better understanding of estuarine ecosystem trajectories under global changes.

Suspended sediments are vectors of nutrients and pollutants along the land-sea continuum¹. In tidal estuaries, at the interface between continental freshwaters and coastal seas, sediment from diverse sources (e.g., marine, estuarine, and riverine supplies) are transported by river and tidal flows. The interaction of tide-induced and density-induced processes can trap sediment in estuary channels and intertidal flats, and form estuarine turbidity maxima (ETM)^{2–8}. Such pools of mainly muddy sediment buffer particulate and dissolved matter exchange between terrigenous and marine sources, altering the system morphology and its functioning⁹. These dynamics directly impact estuarine habitats, which are considered among the most productive in the world^{10,11}. In addition, estuaries often represent highly-populated areas and are strongly vulnerable to human pressures (e.g., engineering works, dredging and dumping activities, and land reclamations)^{12–14}. Such anthropogenic interventions drastically modify sediment budgets in estuarine and deltaic systems, having important consequences for navigation, ecology, and flood safety. Moreover, current sediment management policies may impact the system's capacity to cope with sea-level rise in the coming decades¹⁵.

In situ measurements, remote satellite observations, and numerical simulations have shown that estuary sediment fluxes are driven by the combination of hydro-meteorological forcing, such as tides, waves, wind, and river discharge^{16–20}. These fluxes directly depend on the availability of sediment pools originating from marine, estuarine and riverine sources². The export of estuarine and riverine sediments to coastal seas is usually associated

Ifremer – DYNECO/DHYSED, Centre de Bretagne, CS 10070, 29280 Plouzané, France. ✉email: florent.grasso@ifremer.fr

Résumé

Mes travaux de recherche portent essentiellement sur la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires tidaux afin de déterminer leurs trajectoires potentielles dans le cadre du changement global. Pour aborder cette problématique, j'ai combiné des approches expérimentales, d'observation *in situ* et de modélisation numérique, allant de l'étude des processus hydro-sédimentaires à celle de l'évolution des systèmes à plus long terme (i.e. estuaires sur plusieurs décennies).

A l'échelle des processus, des expérimentations en laboratoire et mésocosme ont permis d'améliorer la compréhension des mécanismes de sédimentation et de consolidation des sédiments mixtes (sable-vase), ainsi que leurs interactions avec certaines espèces benthiques. La formalisation de ces mécanismes dans notre modèle sédimentaire (MUSTANG) a ainsi apporté davantage de réalisme aux simulations de la dynamique sédimentaire estuarienne.

Des modèles numériques déterministes ont été déployés sur les estuaires de la Gironde et de la Seine afin d'étudier la réponse de ces systèmes face à différentes conditions hydrométéorologiques (ex. crues-étiages, tempêtes). Ce type d'étude nous a également éclairé sur la forte sensibilité des masses turbides (ex. bouchon vaseux) et des flux sédimentaires résiduels (ex. import-export entre l'estuaire et les mers côtières) face aux perturbations anthropiques (ex. modifications morphologiques dues aux dragages et aux extensions portuaires).

A des échelles de temps plus longues (~50 ans), des simulations morphodynamiques pour différents scénarios de changement climatique ont mis en évidence la capacité de certains systèmes estuariens à s'adapter à la montée du niveau de la mer. Bien que ce type de simulations prospectives contienne de nombreuses incertitudes, les outils actuels de modélisation peuvent apporter des informations pertinentes sur les trajectoires potentielles des habitats estuariens (ex. zones intertidales) dans le cadre du changement global.

Parmi les pistes de recherche que je souhaiterais approfondir à moyens termes, j'accorde une importance particulière la démarche inter-estuaires, afin d'aller au-delà de notre compréhension site-spécifique et ainsi proposer une conceptualisation globale de la dynamique sédimentaire estuarienne. Enfin, je pense que nous avons encore besoin d'améliorer la formalisation de certains processus sédimentaires pour mieux simuler la dynamique hydro-morpho-sédimentaire des estuaires. Je pense en particulier à des processus sous-maille (ex. contribution des filandres à la dynamique des vasières intertidales) et à une meilleure prise en compte de l'effet des vagues (ex. asymétries) sur la morphodynamiques des embouchures estuariennes.