

Projet Seine-Aval 6
MORPHOSEINE
« Modélisation de l'évolution morphosédimentaire
de l'estuaire de la Seine »

Janvier 2021

Coordination : Florent Grasso

Co-Auteurs : Baptiste Mengual, Pierre Le Hir, Régis Walther, Romaric Verney

RESUME EXECUTIF	3
REMERCIEMENTS	4
SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET	4
PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET	5
INTRODUCTION	6
CHAPITRE 1	9
1 Développement et amélioration du modèle hydro-morpho-sédimentaire <i>CurviSeine</i>	9
1.1 Rappels sur la configuration du modèle <i>CurviSeine</i>	9
1.2 Nouveauté du modèle sédimentaire MUSTANG	10
1.3 Evolution du calcul des vagues et stratégie de couplage	12
CHAPITRE 2	14
2 Evolutions morphosédimentaires à moyen terme (~10 ans)	14
2.1 Validation morphosédimentaire du modèle <i>CurviSeine-morphodynamique</i>	14
2.2 Validation morphosédimentaire du modèle TELEMAC3D « Seine »	22
2.3 Comparaison inter-modèles des évolutions morphosédimentaires	28
CHAPITRE 3	36
3 Evolutions morphosédimentaires à long terme (~20-50 ans)	36
3.1 Simulations rétrospectives sur 20 ans (1975-1995)	36
3.2 Simulations prospectives sur 50 ans (2016-2066)	42
CHAPITRE 4	51
4 Mesures <i>in situ</i> de la dynamique hydro-sédimentaire à l'embouchure de l'estuaire	51
4.1 Méthode	51
4.2 Analyse de la qualité des données collectées	56
4.3 Résultats	57
4.4 Synthèse des observations	70
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	71
LISTE DES ILLUSTRATIONS	74
BIBLIOGRAPHIE	79
ANNEXES	82

RESUME EXECUTIF

L'embouchure de l'estuaire de la Seine a subi de fortes altérations morphosédimentaires au cours du dernier siècle et son évolution se poursuit encore actuellement. La question du devenir du système et des habitats associés est donc posée, en tenant compte d'éventuels changements environnementaux ou climatiques. La modélisation morphosédimentaire a pour ambition de simuler le devenir de la morpho-bathymétrie, en rendant compte des couplages entre processus hydrodynamiques, transports de sédiment et évolution de la morphologie.

Le projet MORPHOSEINE vise à exploiter l'outil de modélisation MARS3D *CurviSeine* mis en place par l'Ifremer dans le cadre des programmes Seine-Aval (SA) 4 et 5, afin de répondre à l'attente concernant l'évolution possible de l'estuaire dans les 50 prochaines années. La « trajectoire » du système estuarien est déclinée sous plusieurs paramètres ou indicateurs, destinés à caractériser les habitats pélagiques et benthiques : i) distribution des salinités et des matières en suspension (MES), et ii) évolution morphologique, avec un regard particulier sur l'hypsométrie (évolution des zones subtidales et intertidales).

La validation du modèle morphosédimentaire s'appuie principalement sur une période décennale actuelle bien documentée (2009-2018) et sur une période tendancielle (2016-2026), pour lesquelles les tendances morphologiques simulées sont comparées avec une autre approche de modélisation mise en place par la société ARTELIA pour le compte du GPMH (TELEMAC3D-Seine). D'autre part, une tentative de reconstitution de l'évolution morphosédimentaire rétrospective (1975-1995) a été réalisée afin d'apporter une analyse critique sur des simulations prospectives à des échelles de temps plus longues (50 ans).

D'importants développements ont été apportés au module sédimentaire MUSTANG (utilisé dans la configuration *CurviSeine*) pour améliorer le réalisme des simulations de dragages et des évolutions morphologiques à l'embouchure. Bien que la dynamique des MES soit dégradée pour les simulations morphodynamiques à l'échelle décennale (par rapport aux simulations annuelles réalisées dans le cadre du projet HYMOSED-SA5), les comparaisons hypsométriques et morphologiques sont dans l'ensemble satisfaisantes. De plus, la comparaison inter-modèles révèle certaines faiblesses et incertitudes à considérer, mais apporte également un certain degré de confiance dans la simulation des tendances morphologiques pour la plupart des zones de l'estuaire aval.

L'analyse des simulations rétrospectives sur 20 ans (1975-1995) permet de mieux caractériser les événements morphogènes de l'embouchure et de mettre en évidence l'influence des vagues et du marnage sur les évolutions morphologiques des zones subtidales et intertidales, alors que les apports fluviaux semblent moins déterminants.

Les travaux de modélisation morphosédimentaire prospective à 50 ans se sont portés sur la comparaison de deux scénarios « extrêmes » de montée du niveau de la mer (RCP 2.6 : +3 mm/an et RCP 8.5 : +24/mm/an ; rapport du GIEC 2017). Les résultats révèlent que l'estuaire aval a la capacité de s'adapter à la montée du niveau moyen avec une accrétion globale de l'embouchure. Cette adaptation se traduit par des estrans moyens et supérieurs conservés après 50 ans. Il est donc important de noter que la montée du niveau de la mer n'est pas systématiquement associée à une perte des zones intertidales, en particulier si

suffisamment de sédiments sont disponibles pour nourrir l'adaptation morphologique de l'estuaire.

Les travaux de modélisation numérique conduits dans ce projet ont permis d'apporter une meilleure compréhension de la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire à l'échelle de 10 à 50 ans. Néanmoins, la modélisation morphodynamique réaliste à l'échelle d'un estuaire (i.e. dynamique tridimensionnelle, sable-vase, vagues-courants, avec aménagements-dragages), est très complexe à mener et est rarement réalisée au-delà de 10 ans à cause de contraintes liées au temps de calcul et aux problèmes de stabilité numérique.

Dans le cadre de la configuration *CurviSeine*, il reste encore de nombreuses pistes de travail pour améliorer le réalisme et la stabilité des simulations numériques, que ce soit sur les modules hydrodynamiques et sédimentaires ou sur la définition d'un maillage plus adapté pour répondre à différentes problématiques (ex. actions de restauration).

Enfin, il faut réaliser que la modélisation morphosédimentaire estuarienne à moyen et long-terme (10-50 ans) représente actuellement un réel défi scientifique. Il est essentiel de bien spécifier les objets d'étude et de connaître les capacités (forces/faiblesses) des outils numériques mis en œuvre pour y répondre. Ce sera toujours en considérant ce rapport « confiance/incertitude » que nous pourrons aborder objectivement les réponses potentielles de l'estuaire face aux pressions climatiques et anthropiques.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à chaleureusement remercier l'ensemble des contributeurs de ce projet, que ce soit au sein des équipes du projet (Ifremer, ARTELIA et M2C), mais aussi à travers la sous-traitance des campagnes de mesure réalisées par la société NortekMed. De plus, nous remercions sincèrement le GIP Seine-Aval, autant pour son soutien technique (Eric L'Ebrelec) que pour la teneur des échanges scientifiques (Jean-Philippe Lemoine et Nicolas Bacq).

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

- **Equipe 1** : Ifremer – DYNECO/DHYSED

Coordination scientifique : Florent Grasso

Autres chercheurs (ou équivalents) : Eliott Bismuth, Matthieu Caillaud, Cécile Gaillard, Pierre Le Hir, Baptiste Mengual, Bénédicte Thouvenin, Romaric Verney

- **Equipe 2** : ARTELIA Eau et Environnement – Equipe Hydraulique Numérique

Coordination scientifique : Régis Walther

Autres chercheurs (ou équivalents) : Matthieu Delinares

- **Equipe 3** : UMR 6143 M2C (Rouen)

Coordination scientifique : Benoit Laignel

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

Personnes ayant participé au suivi du projet.

GIP Seine-Aval : Elise Avenas, Jean-Philippe Lemoine, Nicolas Bacq

Acteurs de l'estuaire : Fanny Olivier, Julien de Bortoli (AESN), Patrice Tournier- Albert Gallicher Lavanne - Olivier Macur (HAROPA – Port de Rouen), Juliette Henri (Région Normandie), Catherine Dehondt (FCN), Arnaud Diarra (DREAL)

Scientifique : Job Dronkers*, Deltares, Netherlands Centre for Coastal Research

INTRODUCTION

Contexte

L'embouchure naturelle de la Seine fut caractérisée par des bancs sableux très mobiles, mais les aménagements réalisés depuis le XIXe siècle ont profondément impacté sa morphologie d'ensemble, la propagation de la marée ainsi que la nature du sédiment superficiel. L'évolution de l'embouchure de la Seine se poursuit encore actuellement, en particulier à la suite de la construction de Port 2000. La question du devenir du système et des habitats associés est donc posée, en tenant compte d'éventuels changements environnementaux ou climatiques.

La modélisation morphosédimentaire a pour ambition de simuler le devenir de la morpho-bathymétrie du secteur étudié, en rendant compte des couplages entre processus hydrodynamiques, transports de sédiment et évolution de la morphologie. Afin de bénéficier des acquis de la modélisation hydro-sédimentaire mise en place par étapes successives au cours des précédentes phases du programme Seine-Aval (SA), une stratégie de modélisation morphodynamique « basée sur les processus » (i.e. *process-based*) a été développée. Le principe en est simple : le modèle calcule courants et vagues en fonction des forçages aux limites et de la bathymétrie. Ces processus hydrodynamiques sont à l'origine de déplacements de sédiments, dont le bilan peut conduire à des érosions/dépôts, et donc à un changement de la morpho-bathymétrie qui contrôle les courants et les vagues.

Une première tentative de modélisation morphodynamique a été testée avec succès au cours de SA3 dans le cadre de la thèse de Benoît Waeles [Waeles *et al.*, 2007; Waeles *et al.*, 2008]. Depuis, la modélisation hydro-sédimentaire a été enrichie, tant du point de vue raffinement spatial [Kervella *et al.*, 2012] que du point de vue processus (interactions sable/vase [Le Hir *et al.*, 2011] ; consolidation [Grasso *et al.*, 2015]), toujours dans le cadre du programme Seine-Aval (projets MODEL-SA4 et HYMOSED-SA5). En outre, des simulations morphodynamiques sur des périodes courtes (une à quelques années) ont été réalisées dans le cadre du projet HYMOSED afin de tester la capacité morphodynamique du modèle développé, pour évaluer les effets d'épisodes hydrométéorologiques exceptionnels, ou encore pour distinguer les réponses du système à des cycles annuels contrastés (années pluvieuses ou sèches, plus ou moins tempétueuses) [Grasso *et al.*, 2018; Schulz *et al.*, 2018].

Il faut noter que la modélisation morphosédimentaire traitant à la fois les transferts de sables et de vase permet de caractériser les évolutions de la nature du sédiment superficiel, à toutes échelles de temps, de l'événementiel à plus long terme (typiquement quelques dizaines d'années). Il s'agit là d'une information essentielle en termes d'habitats benthiques. Enfin, le développement de certaines espèces benthiques (faune et flore) est susceptible de modifier le comportement du sédiment (en particulier son érodabilité et le mélange vertical ; [Orvain *et al.*, 2004; Le Hir *et al.*, 2007; Orvain *et al.*, 2012]) et parfois des mécanismes de couplages bio-physiques se mettent en place (cas des espèces ingénieures). L'évolution morphosédimentaire à long terme peut en dépendre. Même si les observations réalisées dans le cadre du projet COLMATAGE-SA4 n'ont pas révélé de signal clair, l'inventaire des effets possibles a été revisité dans le cadre des projets BARBES-SA5 et PHARESEE-SA6.

Toute évolution morphologique de l'embouchure est extrêmement dépendante des flux particuliers échangés en amont et en aval. Ces flux sont très difficiles à mesurer, et nous ne disposons à ce jour que d'estimations résultant de calculs de bilans [Avoine *et al.*, 1981; Avoine, 1995; Lemoine & Verney, 2015], encore très approximatifs. Surtout, ces flux « naturels » sont considérablement modifiés par les flux anthropiques liés aux opérations de dragage, qui représentent ~4,5 Mm³/an dans le chenal d'accès au GPM de Rouen (entre l'engainement et la Risle pour l'essentiel) et de l'ordre de 1,5 Mm³/an pour le port du Havre et Port 2000 ainsi que leurs accès, soit bien plus que les flux résiduels naturels à l'embouchure. La réponse morphodynamique de l'estuaire dépend donc des stratégies de dragage, en particulier des possibilités de remaniement des dépôts de dragage et de retour éventuel vers l'estuaire des matériaux concernés. Cette question fait l'objet du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021]. L'utilisation dans ce cadre du même modèle hydro-sédimentaire « *CurviSeine* » (couplage MARS3D curviligne, WAVE WATCH III®, MUSTANG, Figure 1) que celui mis en œuvre dans MORPHOSEINE permet d'assurer la cohérence entre les deux actions de recherche, menées simultanément. En particulier, la capacité de ce modèle à restituer schématiquement les quantités draguées ainsi que la localisation et la nature des matériaux dragués nous rend optimistes sur la pertinence de l'approche. Concernant les flux solides amont, leur connaissance progresse, grâce d'une part aux résultats des thèses de Lemoine [2014] et Landemaine [2016] au laboratoire M2C de Rouen (projet AFFLUSEINE-SA5) et d'autre part aux avancées des travaux du PIREN Seine.

Objectifs et organisation du rapport

Le projet MORPHOSEINE vise à exploiter l'outil de modélisation *CurviSeine* mis en place dans le cadre de Seine-Aval, dont la cohérence est assurée à travers plusieurs projets soutenus par le programme, pour répondre à l'attente concernant l'évolution possible de l'estuaire dans les 50 prochaines années. La « trajectoire » du système estuarien est déclinée sous plusieurs paramètres ou indicateurs, destinés à caractériser les habitats pélagiques et benthiques : i) distribution des salinités et des matières en suspension (MES), et ii) évolution morphologique, avec un regard particulier sur l'hypsométrie (évolution des zones subtidales et intertidales). La validation du modèle morphosédimentaire s'appuie d'une part sur une période décennale actuelle bien documentée (2009-2018), et d'autre part sur une tentative de reconstitution de l'évolution morphosédimentaire rétrospective (1975-1995), afin de comparer la performance des simulations sur des échelles de temps plus longues.

Parallèlement aux travaux antérieurs et actuels de Seine-Aval, une modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'embouchure de la Seine a été développée par la société ARTELIA (couplage TELEMAC3D, TOMAWAC), pour le compte du GPM du Havre. Il s'agit également d'un modèle basé sur les processus, simulant les transports de sable et de vase et restituant les couplages morphodynamiques [De Linares *et al.*, 2015; Walther, 2015]. Ce modèle a été conçu pour évaluer les évolutions morphologiques de la vasière Nord du Havre, et se différencie du modèle *CurviSeine* par une résolution plus fine mais en contrepartie des temps de calcul plus longs. La capacité morphodynamique de ce modèle a été validée dans le secteur de l'embouchure pour la période 2005-2015. Ce modèle peut actuellement fournir des résultats prospectifs sur une dizaine d'années sans distorsion temporelle.

Concernant les projections à moyen et long terme, la prudence s'impose vis-à-vis de la fiabilité des modèles. L'état de l'art ne permet pas de conclure sur cette fiabilité, même si les modèles ont fait l'objet d'une validation sur une période passée. Pour cette raison, mais aussi parce que les deux modèles n'ont pas exactement les mêmes hypothèses de

représentation de la réalité et des processus physiques (en particulier concernant la gestion des couches sédimentaires), nous comparons leurs réponses sur une période pluriannuelle commune (2009-2016), ainsi que sur un scénario identique de projection de 10 ans. Les différences de comportement permettent d'évaluer la fiabilité globale des simulations et prévisions, et permettent une analyse critique des hypothèses utilisées.

Des travaux antérieurs réalisés dans le cadre du projet HYMOSED ont mis en avant des incertitudes sur les bilans sédimentaires de l'embouchure potentiellement liées : i) aux flux de sable et de particules fines venant de la baie de Seine, et ii) à l'effet des vagues sur la stabilité des bancs (Ratier, Râtelet). Ainsi, en accompagnement aux travaux de modélisation, deux stations de mesures *in situ* ont été déployées à l'embouchure de l'estuaire dans le but d'analyser la variabilité des flux sédimentaires entre les zones Nord (bouée SCENES) et Sud de l'embouchure, ainsi que la dynamique sédimentaire sur le banc du Râtelet.

Le présent rapport est structuré de la manière suivante :

- le Chapitre 1 présente les améliorations apportées au modèle *CurviSeine* afin d'augmenter le réalisme des processus de mélange et de transport des sédiments sablo-vaseux ;
- le Chapitre 2 porte sur les simulations morphosédimentaires à l'échelle décennale. Sont détaillées les comparaisons entre modèle et observations, ainsi qu'entre les différents modèles ;
- le Chapitre 3 porte sur les évolutions morphosédimentaires à plus long terme (20-50 ans), en s'appuyant sur des simulations rétrospectives (1975-1995) et prospectives (2016-2066) pour deux scénarios de montée du niveau de la mer ;
- le Chapitre 4 présente les campagnes de mesures *in situ* hydro-sédimentaires réalisées au cours de l'hiver 2019 à l'embouchure de l'estuaire.

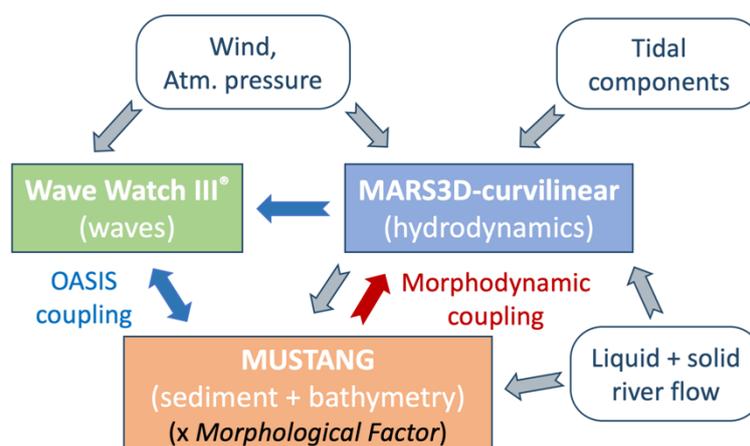


Figure 1 : Représentation schématique de la chaîne de modélisation MARS3D-MUSTANG-WW3 mise en place pour la configuration *CurviSeine*. Les flèches grises représentent les forçages, les flèches bleues représentent les couplages de modèles via le coupleur OASIS, et la flèche rouge représente le couplage morphodynamique lorsque les évolutions morphologiques calculées par le modèle sédimentaire MUSTANG sont prises en compte par le modèle hydrodynamique MARS3D.

1 Développement et amélioration du modèle hydro-morpho-sédimentaire *CurviSeine*

1.1 Rappels sur la configuration du modèle *CurviSeine*

Ce travail se base sur le modèle hydro-morpho-sédimentaire développé au cours des projets MODEL-SA4 et HYMOSED-SA5 [Grasso *et al.*, 2018; Schulz *et al.*, 2018] (Figure 1). Le modèle s'appuie sur le module hydrodynamique MARS3D [Lazure & Dumas, 2008] en version curviligne non-orthogonale s'étendant du barrage de Poses en amont jusqu'à la Baie de Seine en aval avec un intérêt particulier sur la partie aval de l'estuaire (Figure 2). Un maillage curviligne non-orthogonal est adopté afin de mieux respecter la forme de l'estuaire, d'optimiser les coûts de calcul avec des mailles de taille variable et d'améliorer l'estimation des flux sédimentaires. La dimension des mailles varie d'environ 30x100 m² à l'embouchure jusqu'à 2x2 km² au large. La colonne d'eau est discrétisée en dix couches σ équidistantes. Le modèle est forcé aux limites par les composantes principales de la marée (CST France, SHOM), le vent et pression atmosphérique issus du modèle Météo France AROME, et les apports fluviaux (Seine et Risle) imposés respectivement à la limite amont du modèle à Poses et à l'embouchure de la Risle. Les vagues sont simulées à l'aide du modèle WAVE WATCH III® (WW3) [Roland & Arduin, 2014], depuis l'océan Atlantique vers un modèle local de même résolution que le modèle de circulation.

Le modèle hydrodynamique est couplé au modèle sédimentaire multicouches, multi-classes (sable/vase) MUSTANG [Le Hir *et al.*, 2011], prenant en compte les processus d'érosion, suspension, dépôt et consolidation [Grasso *et al.*, 2015]. Cinq classes de sédiment sont utilisées, se basant sur les distributions sédimentaires observées en estuaire de Seine [Lesourd *et al.*, 2016] : un gravier (diamètre $d = 5$ mm), trois sables ($d = 800$ μm , $d = 210$ μm , $d = 100$ μm) et une vase ($d = 20$ μm) de vitesse de chute variable (0,1-1,5 mm/s). Le modèle prend en compte les zones draguées par les GPMH et GPMR (Figure 2b) en enlevant les sédiments lorsque que la cote de fond dépasse une cote de dragage et les redéposant dans la couche de fond de la colonne d'eau dans les zones de clapage. Le modèle hydro-sédimentaire, son paramétrage et sa validation (hydrodynamique, hydrologique et sédimentaire) sont davantage détaillés dans l'article de Grasso *et al.* [2018] et le rapport de projet HYMOSED.

Suite aux travaux menés conjointement au projet MEANDRES [Lemoine, 2021], les différentes classes sédimentaires sont initialement réparties : (i) en baie de Seine suivant la distribution spatiale observée en Manche [Vaslet *et al.*, 1979] ; et (ii) à l'embouchure et dans l'estuaire suivant une distribution uniforme comprenant 40% de vase, 15% de sable très fin, 30% de sable fin et 15% de sable grossier. De plus, la paramétrisation de la rugosité impactant l'hydrodynamique (z_0) et la dynamique sédimentaire ($z_{0, \text{sed}}$) a été revue pour garantir plus de réalisme et dépend maintenant de la taille des particules dans la couche superficielle du fond (sur le 1^{er} cm). Plus de détails sont disponibles dans Lemoine [2021] et Lemoine and Le Hir [under review].

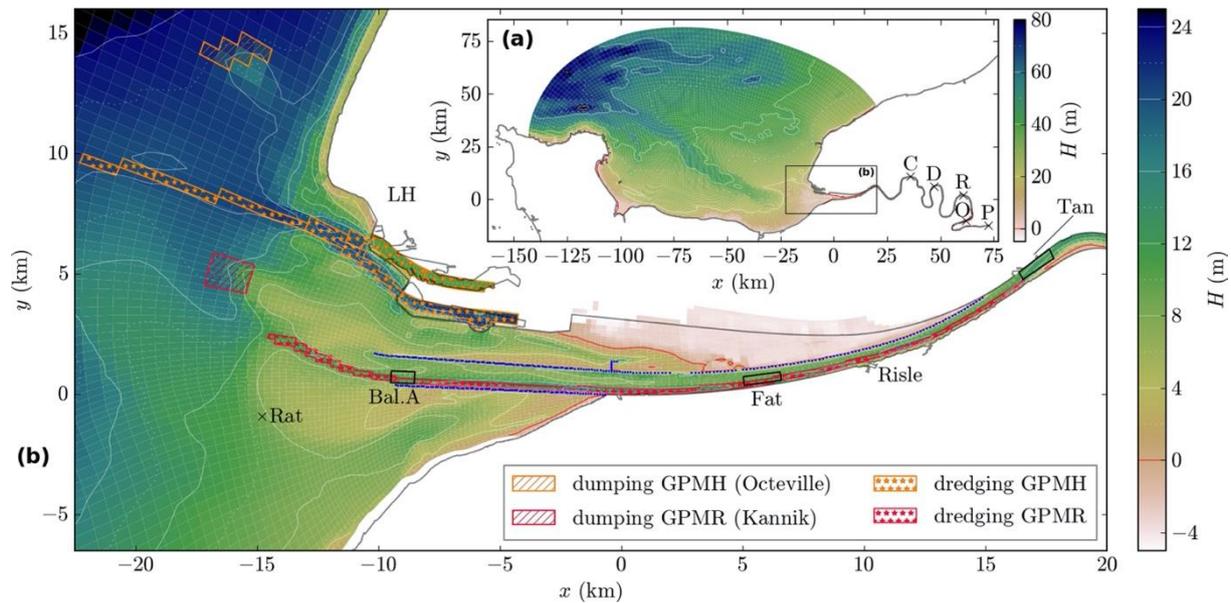


Figure 2 : Bathymétrie 2010 (par rapport au niveau moyen de la mer) du modèle MARS3D curviligne de l'estuaire de Seine « *CurviSeine* » : (a) allant de la baie de Seine au barrage de Poses 'P' avec (b) un zoom sur la partie aval de l'estuaire. Les étoiles (resp. hachures) représentent les zones de dragage (resp. clapage) du GPMH (orange) et du GPMR (rouge). Positions spécifiques : Balise A 'Bal.A', Fatouville 'Fat', Tancarville 'Tan', Le Havre 'LH', Râtelet 'Rat', Caudebec-en-Caux 'C', Duclair 'D', Rouen 'R' et Oissel 'O'.

1.2 Nouveauté du modèle sédimentaire MUSTANG

Le modèle de transport sédimentaire « SEDIMARS » élaboré depuis 2007 [Le Hir *et al.*, 2011] et validé sur l'estuaire de la Seine dans le cadre des projets MODEL-SA4 et HYMOSED-SA5 [Grasso *et al.*, 2018] se dénomme actuellement « MUSTANG » (MUd Sand TRAnsport modellinG, <http://www.ifremer.fr/docmars/html/doc.module.sedim.html>). Ce modèle présente de multiples atouts (transport simultané de sables et de vase, consolidation des mélanges sable/vase, bioturbation, transferts d'eau interstitielle, glissement des dépôts frais de vase, érosion latérale...), mais aussi quelques défauts que nous souhaitons corriger comme suit depuis quelques temps :

- prise en compte d'un transport par charriage des sédiments non-cohésifs, exprimés selon les formulations classiques de transport à l'équilibre (jusqu'à maintenant le transport total de sable était traité comme une succession d'érosions/advection/dépôts très rapides, et calibré par l'expression empirique du flux d'érosion) ;
- prise en compte des modulations du charriage en présence d'une pente du fond ;
- prise en compte des effets de masquage/exposition en présence d'un sédiment hétérométrique ;
- meilleure distinction du comportement des sédiments cohésifs et non-cohésifs, en permettant pour ces derniers une érosion distincte pour chaque classe, pas nécessairement au prorata de leur fraction dans la couche considérée, comme c'est le cas pour les sédiments cohésifs ;
- adoption du concept de couche active dans le cas d'un sédiment non-cohésif, en lui affectant une signification physique et pas seulement numérique : il s'agit d'une couche mélangée, paramétrée en fonction des forçages (intensité des contraintes hydrodynamiques sur le fond) et de la composition du sédiment superficiel ; par

construction, cette couche active est limitée dès qu'un niveau de sédiment cohésif est rencontré ;

- modification de la transition entre comportement cohésif et non-cohésif, cette transition étant d'abord rapide dès que la fraction de vase dépasse un certain seuil, puis s'atténuant avec l'augmentation ultérieure de la fraction fine ; cet upgrade résulte des travaux de thèse de Baptiste Mengual sur les sédiments sablo-vaseux du golfe de Gascogne [Mengual *et al.*, 2017] ;
- meilleure gestion de la porosité des sédiments, trop schématique dans le code existant, qui permet le « passage » entre épaisseurs de sédiment et masses concernées (la densité globale étant très différente pour les sables et les vases) ;
- introduction d'une épaisseur minimale de couche sédimentaire, dépendante de son contenu (ex. éviter qu'une couche pour laquelle la fraction de graviers serait importante ait une épaisseur de 10 μm).

Ces modifications du code sédimentaire sont loin d'être anecdotiques, et ont constitué entre aout 2017 et avril 2018 l'essentiel du travail du CDD ingénieur (Baptiste Mengual) recruté sur le projet.

Les trois premiers items (autour du charriage) bénéficiaient d'un travail préalable réalisé dans le cadre du projet ANR AMORAD par un post-doc commun (Aurélie Rivier) entre Ifremer et IRSN, appliqué à la Manche et au golfe Normand-Breton [Rivier *et al.*, 2017]. La formulation de Wu and Lin [2014] a été retenue pour le charriage, ainsi que pour le flux d'érosion des sédiments non-cohésifs.

Le calcul de porosité est réactualisé à tout moment dans toutes les couches sédimentaires où les fractions de chaque classe particulière sont modifiées (par érosion sélective, par dépôt) ou du fait de la consolidation. Le calcul est fait en considérant le sédiment comme un mélange entre une fraction fine (les vases) et un sédiment plus grossier, lui-même constitué d'une fraction sablo-graveleuse hétérométrique. La formulation de la porosité du mélange entre une vase de concentration relative donnée (le paramètre contrôlant l'érodabilité du sédiment cohésif) et une fraction « grossière » de porosité connue est inspirée des travaux de Wu and Li [2017], tandis que la porosité de la fraction grossière hétérométrique est évaluée selon la formulation de Wooster *et al.* [2008], légèrement modifiée [Mengual *et al.*, in press].

Pour illustrer ces nouveautés et l'importance d'une bonne prise en compte du comportement des sédiments non-cohésifs, nous présentons dans la Figure 3 la fraction de temps où le sédiment superficiel a un comportement non-cohésif au cours d'une année réaliste complète (2009), ainsi que la distribution des valeurs moyennes et maximales de l'épaisseur de la couche active (Figure 4). Il apparaît que le sédiment a un comportement majoritairement non-cohésif dans l'embouchure, et que l'épaisseur de la couche active est extrêmement variable, et souvent pluri-centimétrique.

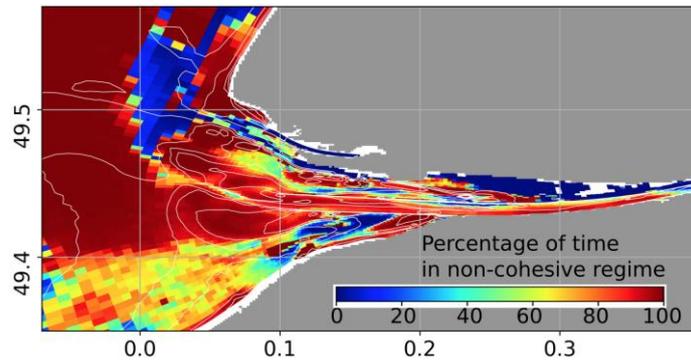


Figure 3 : Fraction de temps où le sédiment superficiel est non-cohésif au cours d'une année simulée (année 2009).

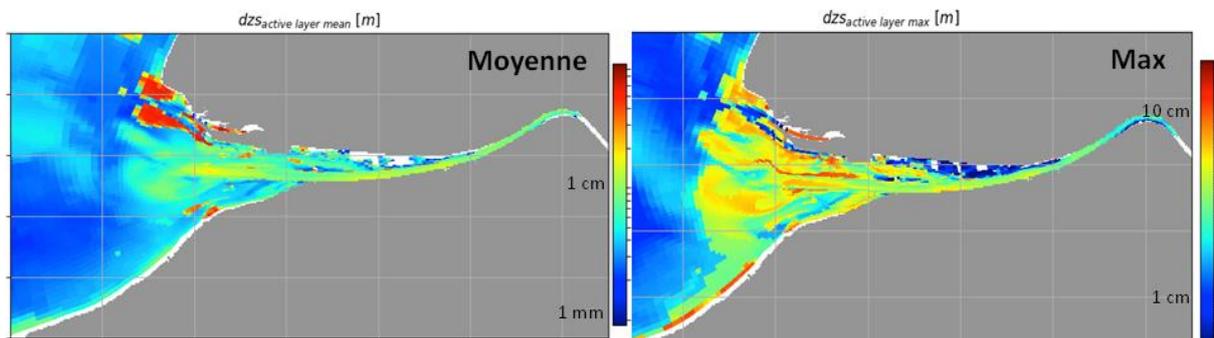


Figure 4 : Epaisseur moyenne (à gauche) et maximale (à droite) de la couche active (en m) au cours d'une année simulée (année 2009).

1.3 Evolution du calcul des vagues et stratégie de couplage

Le calcul morphodynamique couplé « vagues / courant / transport sédimentaire / morphologie » impose que régulièrement la bathymétrie soit réactualisée pour le calcul des vagues, ce qui n'était pas le cas pour les évolutions morphologiques à court terme réalisées dans le projet HYMOSED. A cette fin le coupleur OASIS-MCT (Ocean-Atmosphere-Sea-Ice-Soil, Model Coupling Toolkit) développé par le laboratoire de recherche CERFACS de Toulouse (<https://portal.enes.org/oasis>) a été utilisé. Ce code informatique permet de faire communiquer des modèles (ici MARS-MUSTANG et WW3 pour les vagues) en gérant l'échange de variables et leur interpolation (spatiale et surtout temporelle dans notre cas) entre les modèles « online ». Il est constitué d'une série de fonctions appelées dans chacun de ces modèles et est compatible avec la parallélisation MPI. Concrètement, ce couplage OASIS permet : i) de forcer WW3 à haute fréquence (toutes les 10') par les courants et niveaux d'eau calculés par MARS ; ii) de mettre à jour dans WW3 l'information bathymétrie issue du calcul morphosédimentaire ; et iii) de calculer une contrainte sur le fond liée aux vagues cohérente avec celle liée aux courants (Figure 1).

Le couplage OASIS MARS/WW3 a été mis en place pour la Seine, et fonctionne correctement. Néanmoins, le calcul de vagues est largement plus coûteux que celui des courants et du transport sédimentaire ; nous avons donc cherché à réduire le temps calcul des vagues en dégradant la richesse spectrale et la discrétisation directionnelle des vagues. WW3 calcule l'énergie des vagues (en fait la densité d'action) dans un espace à 4 dimensions constitué par les dimensions 'x,y' de l'espace horizontal (en l'occurrence selon le même

maillage que MARS), la direction des vagues et la fréquence des vagues. Classiquement la résolution se fait selon 24 directions (chaque 15°) et 32 fréquences, permettant de simuler simultanément la réfraction des houles du large (forcées aux limites à partir d'un modèle de grande emprise) et la mer de vent générée en baie de Seine. Différents tests de réduction du nombre de directions et surtout du nombre de périodes (en faisant aussi varier la période minimale) ont été réalisés. Un bon compromis a été obtenu avec une résolution selon 14 directions (~chaque 25°) et 8 fréquences. La comparaison des résultats pour la simulation de référence et la nouvelle simulation « dégradée » montre des hauteurs significatives et des vitesses orbitales près du fond (qui déterminent la contrainte de cisaillement sur le fond) quasi identiques pour les deux simulations et très proches des mesures acquises au Râtelet (Figure 5) et à l'est du banc du Ratier pendant les projets SA4 COLMATAGE et MODEL. Le gain de temps calcul est considérable avec un facteur de 13,3 pour un même nombre de processeurs.

Les développements du modèle sédimentaire, la stratégie de couplage MARS/MUSTANG/WW3, ainsi que la sensibilité du modèle associée à la prise en compte de la non-orthogonalité du maillage, sont davantage détaillés dans le rapport d'activité du CDD MORPHOSEINE (rapport de Baptiste Mengual fourni au GIPSA).

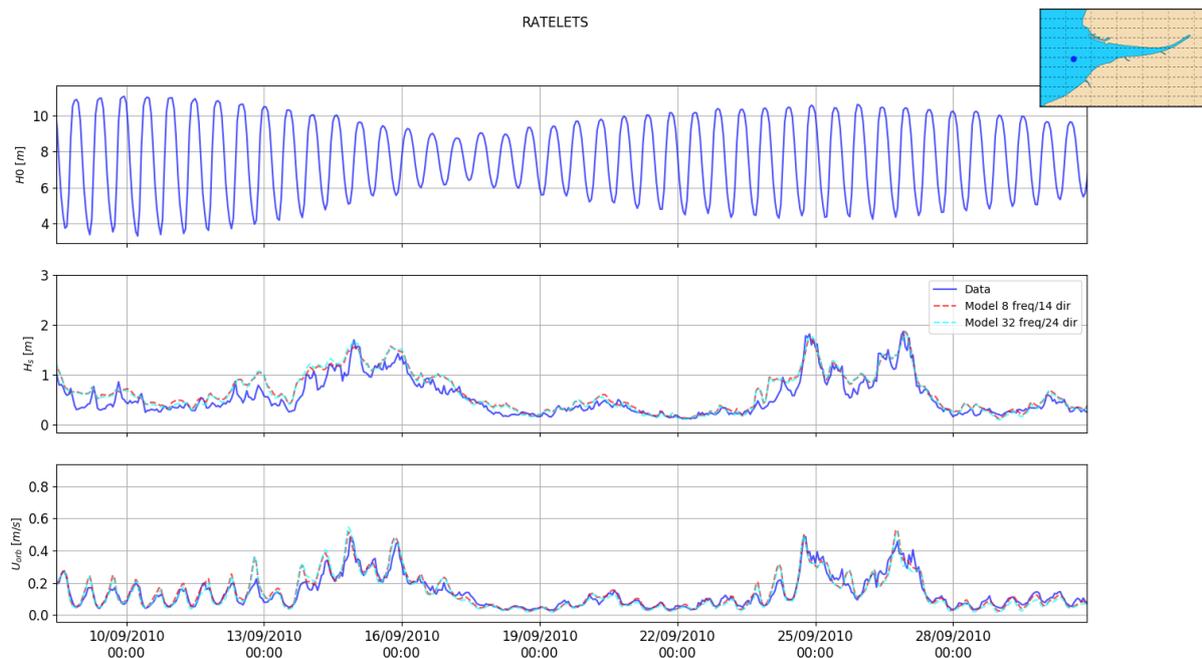


Figure 5 : Comparaison entre les vagues mesurées et calculées à l'ouest du banc du Ratier (Râtelet). (Haut) Hauteur d'eau H_0 , (milieu) hauteur significative des vagues H_s et (bas) vitesse orbitale des vagues U_{orb} .

2 Evolutions morphosédimentaires à moyen terme (~10 ans)

Ce chapitre présente une analyse des simulations morphosédimentaires de l'estuaire à des échelles de temps de l'ordre de 8 à 10 ans (moyen terme). Une première partie décrit la validation du modèle *CurviSeine* à ces échelles de temps, sachant que la validation hydro-morpho-sédimentaire à plus court terme (1-2 ans) a été réalisée dans le cadre du projet HYMOSED. Une seconde partie présente la validation morphosédimentaire du modèle développé par ARTELIA (TELEMAC3D-Seine) et une dernière partie est dédiée à la comparaison inter-modèles des évolutions morphosédimentaires afin d'analyser les tendances morphodynamiques via différentes approches de modélisations.

2.1 Validation morphosédimentaire du modèle *CurviSeine-morphodynamique*

Dans le cadre d'HYMOSED, la validation hydro-sédimentaire (hauteur d'eau, salinité, concentration en MES) s'est basée sur une approche morphostatique [Grasso *et al.*, 2018]. C'est à dire qu'il n'y avait pas de prise en compte des évolutions morphologiques sur l'hydrodynamique (pas de couplage morphodynamique). Ce type d'approche est valide pour des échelles de temps courtes (~1-5 ans), 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. Dans le cadre de MORPHOSEINE (couplage morphodynamique actif), le modèle sédimentaire et son paramétrage ont été modifiés afin de reproduire des évolutions morphologiques et des dragages plus réalistes, tout en assurant des concentrations en MES satisfaisantes.

Toutefois, notons qu'il faut accepter de dégrader la performance du modèle sur certains aspects afin de pouvoir l'augmenter sur d'autres. Cela ne serait pas nécessaire si la modélisation morphosédimentaire 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). C'est pourquoi le modèle représente avant tout un outil dimensionné et calibré pour répondre à une problématique particulière.

La simulation numérique de référence pour étudier les performances du modèle *CurviSeine-morphodynamique* se base sur le rejeu du projet MEANDRES couvrant la période 2009-2018. Cependant, l'approfondissement du chenal d'accès au GPMR fin 2012 est pris en compte dans les simulations MORPHOSEINE. La validation morphosédimentaire du modèle est présentée via la dynamique des MES, les activités de dragages et les évolutions morphologiques.

Dynamique des sédiments en suspension

Les concentrations en MES ont été comparées aux stations aval du réseau de mesures SYNAPSES (i.e. Balise A, Fatouville et Tancarville) sur la période 2014-2015 où le modèle *CurviSeine-morphostatique* a été validé dans le cadre d'HYMOSED. Pour information, c'est la configuration HYMOSED qui est utilisée pour générer les rejeux numériques du projet ARES-

SA6 [Bismuth *et al.*, 2020] (1990-2000 avec bathymétrie 1995, 2005-2015 avec bathymétrie 2010 et 2014-2018 avec bathymétrie 2016).

La Figure 6 illustre les comparaisons entre les concentrations médianes par cycle de marée, mesurées (SYNAPSES) et simulées (configurations *morphostatique* HYMOSED et *morphodynamique* MORPHOSEINE). Pour rappel : (i) la simulation HYMOSED correspond à une année simulée suite à une année de *spin-up*, en utilisant la bathymétrie fixe 2010 ; (ii) la simulation MORPHOSEINE correspond à la 5^{ème} année de calcul, considérant une bathymétrie évolutive à partir de 2009. Nous observons une nette tendance à la sous-estimation des MES pour la configuration MORPHOSEINE, et plus fortement à Fatouville et Tancarville. Ces différences se caractérisent par une augmentation de l'erreur et du biais, ce dernier pouvant atteindre -60% pour MORPHOSEINE alors qu'il n'excédait pas -40% pour HYMOSED (Figure 7). Cela s'explique principalement par une paramétrisation sédimentaire différente revue dans MORPHOSEINE afin d'améliorer le réalisme des quantités (et types) de sédiments dragués ainsi que les évolutions morphologiques (parties détaillées ci-dessous). A noter également que la simulation MORPHOSEINE correspond à la 5^{ème} année de simulation, alors que ce n'est que la seconde pour HYMOSED (i.e. possibilité d'une diminution de la source sédimentaire potentiellement remise en suspension).

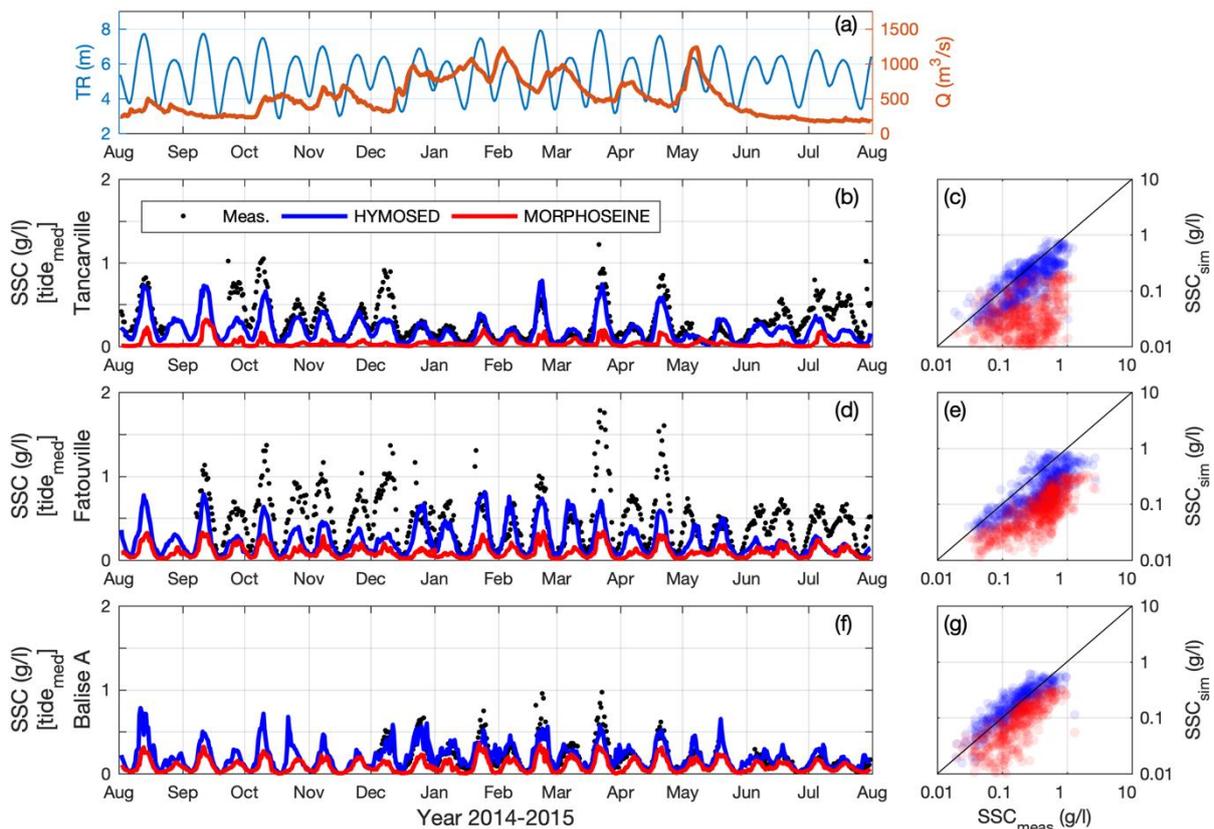


Figure 6 : (a) Marnage TR au Havre (bleu) et débit de la Seine Q à Poses (orange). Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée d'août 2014 à août 2015, aux stations de (b, c) Tancarville (d, e) Fatouville et (f, g) Balise A : (b, d, f) séries temporelles mesurées (noir) et simulées (HYMOSED : bleu, MORPHOSEINE : rouge) ; (c, e, g) corrélations modèle vs mesures pour les simulations HYMOSED (bleu) et MORPHOSEINE (rouge).

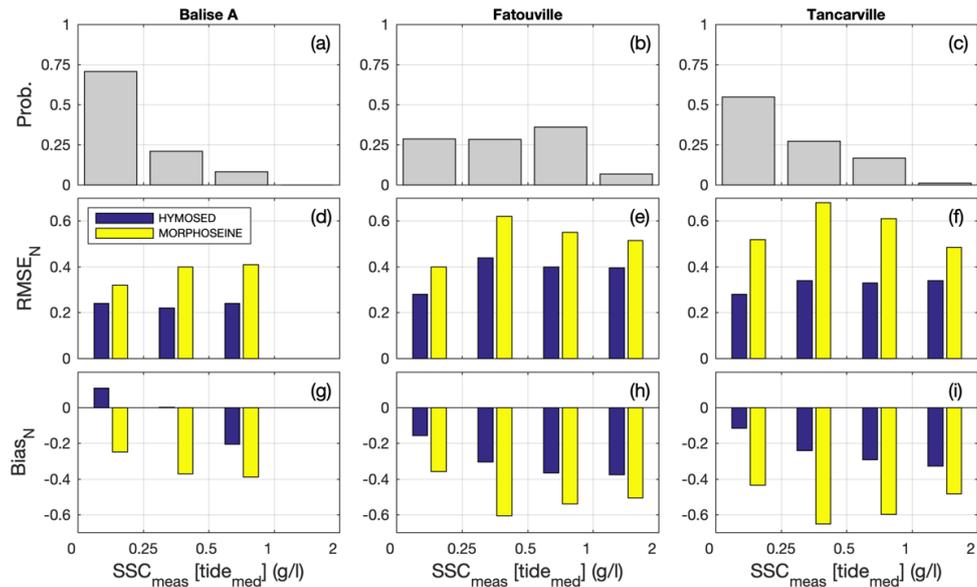


Figure 7 : Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée entre août 2014 et août 2015, aux stations de (gauche) Balise A, (centre) Fatouville, et (droite) Tancarville. Distributions par classes de concentrations en MES mesurées : (haut) de la probabilité d'occurrence, (milieu) de l'erreur quadratique normalisée $RMSE_N$ et (bas) du biais normalisé $Bias_N$, pour les simulations HYMOSED (bleu) et MORPHOSEINE (jaune).

Des comparaisons complémentaires entre les concentrations en MES observées et simulées ont été réalisées dans le cadre du projet MEANDRES, à partir de mesures effectuées dans le chenal à bord du N/O Côte de la Manche (projet FLUMES-SA4). Ces comparaisons illustrent une forte disparité entre les mesures SYNAPSES réalisées proche des berges et les mesures FLUMES réalisées dans le chenal [section III.3.2, Lemoine, 2021]. Le modèle tend effectivement à sous-estimer les pics de MES observés, mais simule correctement les niveaux moyens. Cette tendance à la sous-estimation s'explique en partie par la difficulté du modèle à capter les fortes turbidités générées en bord de rive (Figure 8), pour cause d'un maillage localement trop grossier.

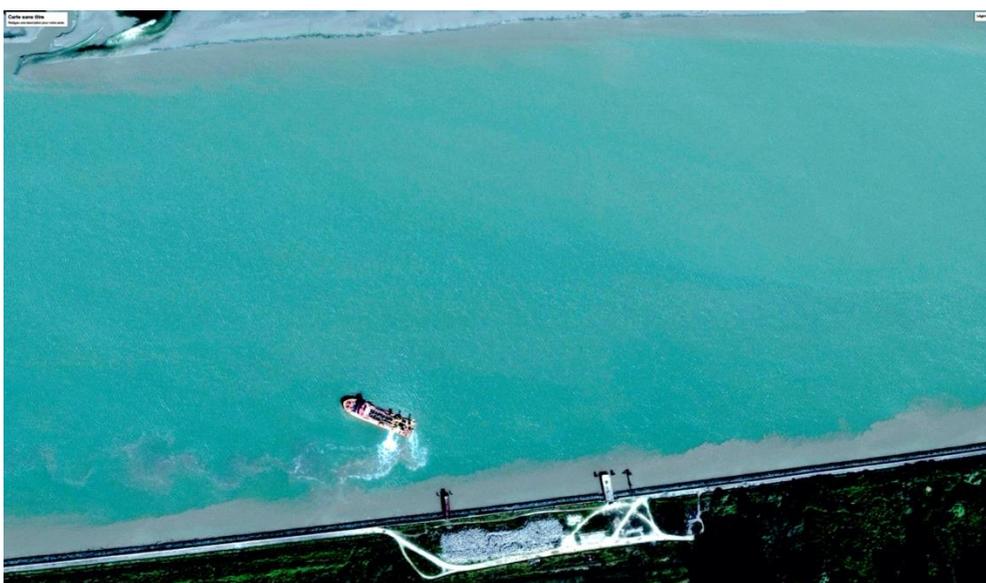


Figure 8 : Image satellite de la station SYNAPSES Fatouville prise le 22 août 2015 illustrant les forts niveaux de turbidité observés en bord de rive (Google Earth).

Pour analyser la stabilité de la dynamique des MES à moyen terme, et donc l'effet d'une possible diminution des MES au cours du temps, la masse du bouchon vaseux est étudiée sur la période 2009-2018 (Figure 9). La masse tracée représente la quantité maximale de vase remise en suspension par cycle de marée dans la zone du chenal principal (zone de calcul illustrée par le cadre noir sur la Figure 10). Le modèle présente une très bonne capacité à simuler et maintenir le bouchon vaseux sur 10 ans, attestant de la robustesse de la simulation morphodynamique. La dynamique du bouchon vaseux répond premièrement au forçage tidal de manière similaire aux résultats d'HYMOSED [Grasso *et al.*, 2018]. Cependant, la masse moyenne du bouchon vaseux est sous-estimée de plus de 50% dans la simulation MORPHOSEINE (32 kt) par rapport à la simulation HYMOSED (68 kt), en cohérence avec la sous-estimation des MES observées à Fatouville et Tancarville (Figure 6 et Figure 7).

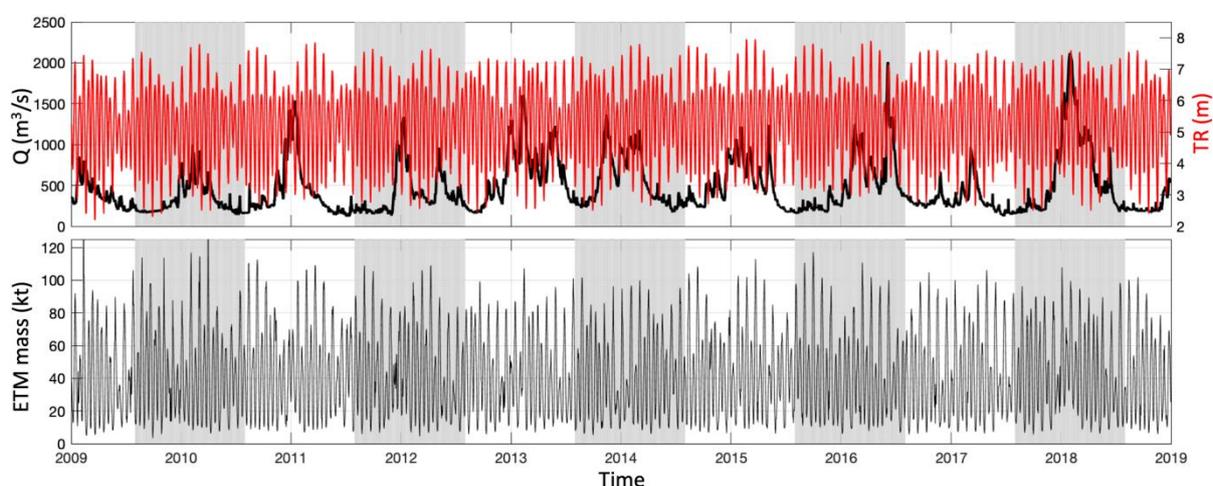


Figure 9 : (Haut) Débit de la Seine Q à Poses et marnage TR au Havre, et (bas) simulation de la masse du bouchon vaseux (maximum par cycle de marée) sur une période de 10 ans (2009-2018). Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].

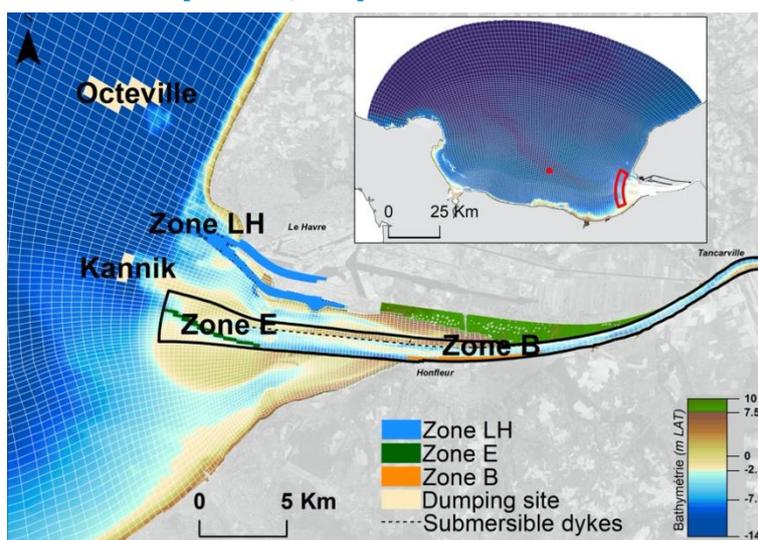


Figure 10 : Représentation des zones de dragages du GPMH ('LH') et du GPMR (Engainement 'E' et Brèche 'B'), ainsi que les zones de calcul de la masse du bouchon vaseux (cadre noir) et des vagues à l'embouchure (cadre rouge dans l'encart). Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].

Activités de dragages

L'influence des activités de dragage d'entretien des ports (GPMH et GPMR) sur la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire aval fait l'objet du projet MEANDRES-SA6. Il est brièvement présenté ici l'état de validation des simulations vis-à-vis des quantités (i.e. masses) et types (i.e. tailles) de sédiments dragués au cours de la période 2009-2018.

Le travail de calibration morphosédimentaire, conjoint entre les projets MORPHOSEINE et MEANDRES, a permis de nettement améliorer le réalisme des simulations de dragage par rapport aux simulations HYMOSED. Sachant que 94% des dragages du GPMR sont réalisés aux zones de l'Engainement 'E' et de la Brèche 'B', l'analyse suivante se base sur trois zones distinctes (GPMH 'LH', Engainement et Brèche, cf. Figure 10) via la comparaison des masses annuelles et des proportions des types de sédiments dragués, moyennés sur 10 ans (Figure 11).

Pour la zone LH, le modèle représente très bien la quantité et le type de sédiments dragués avec 2,1 Mt/an simulé (dont 92% de vase), contre 2 Mt/an observé (dont 88% de vase). La zone E est le site où les dragages sont les plus intenses et le modèle reproduit également de manière très satisfaisante les observations : 3,3 Mt/an simulé (dont 72% de vase) contre 2,9 Mt/an observé (dont 65% de vase). Cette bonne simulation du type de sédiments dragués est également illustrée sur la Figure 11 (droite) par la proportion de sédiments dragués pour différentes classes de taille (<80 μm , 80-125 μm , 125-250 μm et 250 μm). Les simulations au niveau de la zone B sont moins performantes qu'aux zones LH et E, avec une sous-estimation de 30% (1,4 Mt/an simulé contre 2 Mt/an observé). Cette sous-estimation vient principalement du manque de sables dragués dans le modèle, car les quantités de vase draguées sont très correctes (1,1 Mt/an simulé contre 1 Mt/an observé).

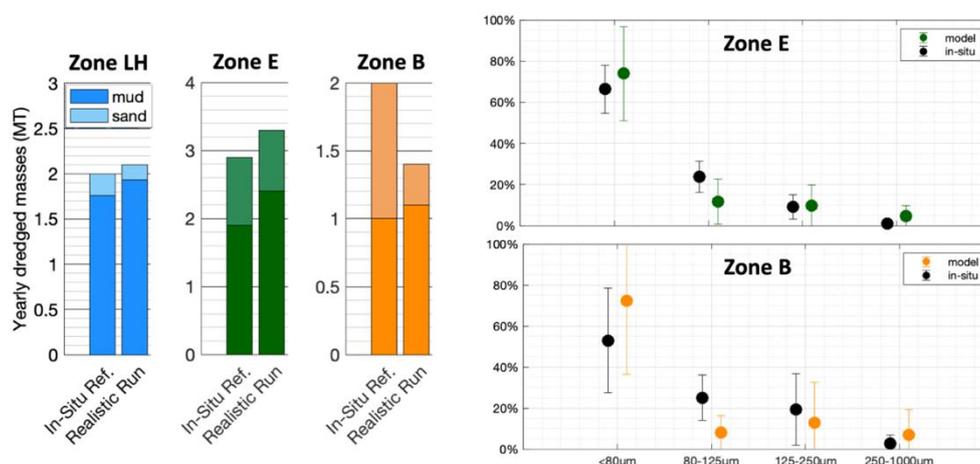


Figure 11 : Comparaisons modèle/mesures des sédiments dragués sur une période de 10 ans (2009-2018). (Gauche) Moyenne annuelle de la masse de sédiments dragués (sables : clair et vase : foncé) pour les observations (*In-Situ Ref.*) et les simulations (*Realistic Run*), aux zones du Havre 'LH' (bleu), de l'engainement 'E' (vert) et de la brèche 'B' (orange). (Droite) Proportion des sédiments dragués en fonction de leur taille, aux zones (haut) de l'engainement 'E' et (bas) de la brèche 'B'. Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].

Evolutions morphologiques

La comparaison entre les simulations morphodynamiques et les observations se base sur la période 2009-2016 pour laquelle nous disposons des bathymétries initiales et finales mesurées (données fournies par le GIPSA). Les zones caractéristiques de l'estuaire, utilisées par la suite pour le calcul de cubatures, sont illustrées sur la Figure 12. La Figure 13 illustre les bathymétries (h_0 , relatif au niveau moyen de la mer) 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 clapage) et la progradation du banc du Ratier (accrétion au Râtelet). 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.

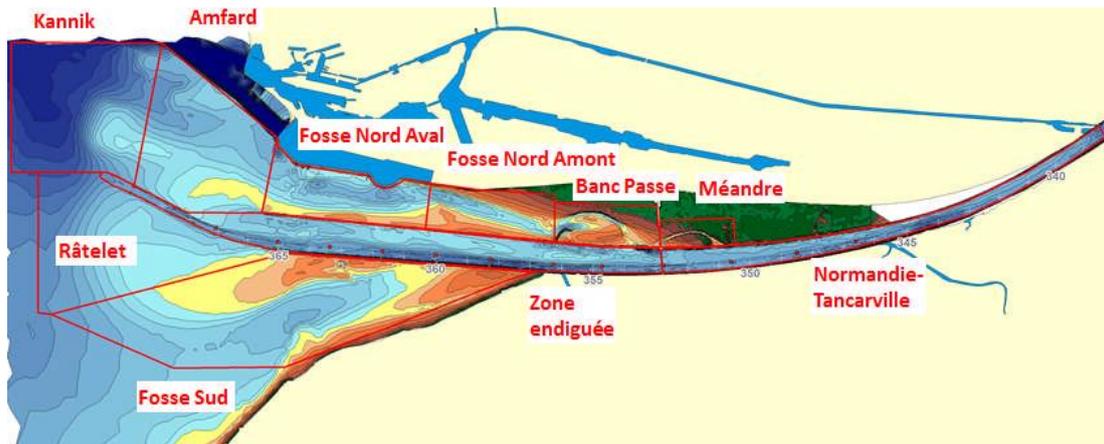


Figure 12 : Zones caractéristiques de l'estuaire utilisées pour le calcul de cubatures.

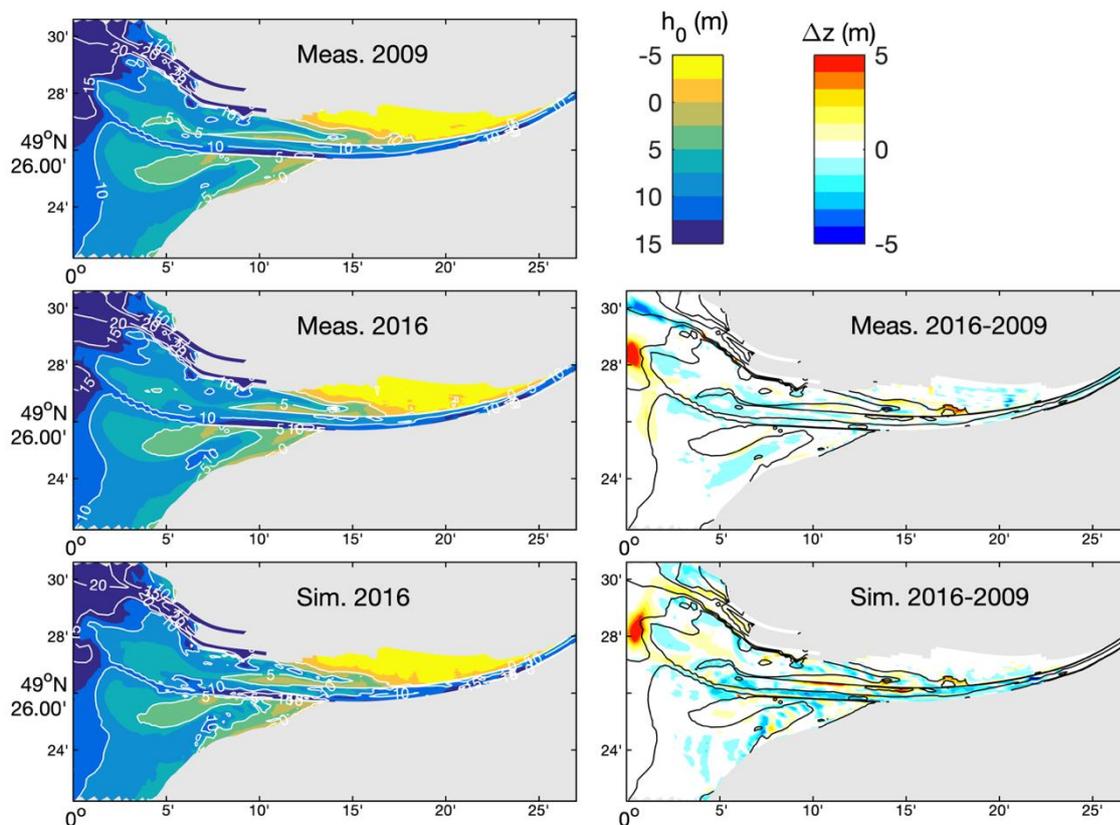


Figure 13 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2009 et 2016. (Gauche) Bathymétries h_0 (relatif au niveau moyen de la mer) et (droite) différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés.

Afin de mieux quantifier les évolutions morphologiques, nous analysons l'évolution de l'hypsométrie pour différentes zones subtidales ($h_0 = [15:5]$ m) et intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) de 2009 à 2016 (Figure 14 ; simulations : courbes noires et mesures : ronds noirs). Ces zones subtidales et intertidales représentent respectivement $\sim 172 \text{ km}^2$ et $\sim 50 \text{ km}^2$, dans le cadre géographique illustré sur la Figure 13. Au cours des 8 années, le modèle simule une augmentation (+8%) de la surface des zones subtidales inférieures ($h_0 = [15:10]$ m), surestimant les observations (+5%). En revanche, le modèle simule une diminution (-3%) de la surface des zones subtidales supérieures ($h_0 = [10:5]$ m), alors qu'aucun changement n'est observé. L'évolution de la surface des zones intertidales inférieures ($h_0 = [5:0]$ m) est très bien reproduite par le modèle avec une diminution (mesurée et simulée) de -11%. Concernant les zones intertidales supérieures ($h_0 = [0:-5]$ m), le modèle simule une légère augmentation (+2%) alors qu'aucun changement significatif n'est observé.

L'analyse de l'hypsométrie longitudinale le long de l'estuaire ($pk = [335:365]$) permet d'apprécier la distribution spatiale des surfaces pour différentes tranches bathymétriques (Figure 15, gauche). On retrouve des tendances assez nettes :

- les zones subtidales sont majoritairement présentes au large de l'embouchure, avec cependant une contribution significative des zones subtidales inférieures le long du chenal principal ;
- les zones intertidales inférieures caractérisent surtout les bancs sédimentaires à l'embouchure et sont absentes en amont du $pk = 350$;
- les zones intertidales supérieures se distribuent clairement entre les $pk = [340:360]$, caractérisant les vasières au Nord de la DBN (en amont et en aval du secteur du Méandre).

L'évolution de l'hypsométrie longitudinale entre 2009 et 2016 est relativement faible, et est plus ou moins bien simulée par le modèle en fonction des secteurs. Les évolutions morphologiques sont également quantifiables via le calcul de cubatures sur certaines zones de l'estuaire. Cet aspect-là est présenté dans la Partie 2.3, dans laquelle une comparaison avec les résultats du modèle TELEMAC3D est aussi menée.

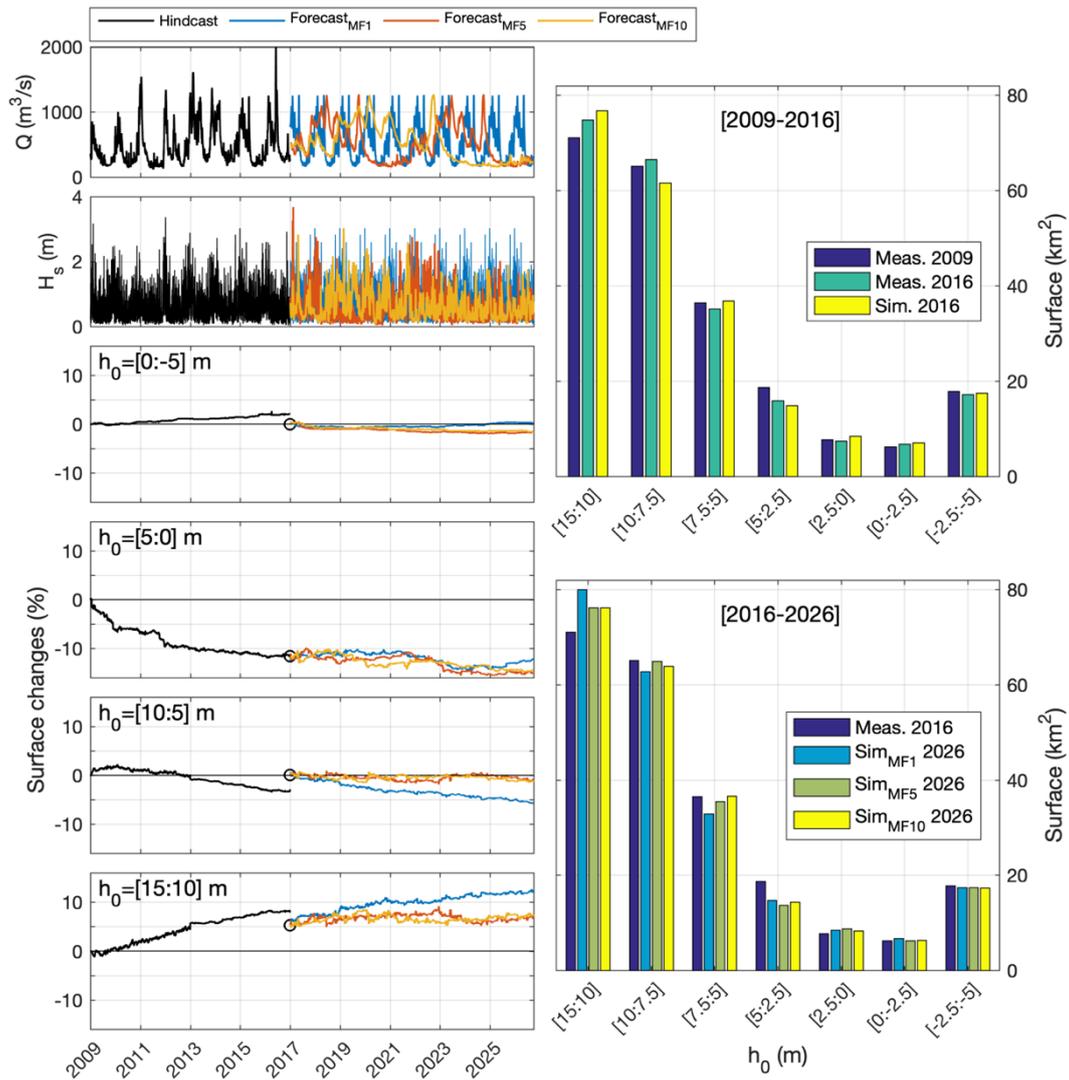


Figure 14 : Evolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval entre 2009 et 2026 (zone illustrée sur la Figure 13). (Gauche, haut) Débit de la Seine Q à Poses et hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure (zone rouge sur la Figure 10) ; (gauche, bas) variation relative des hypsométries pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m), les mesures sont représentées par des symboles ('o') et les simulations par des lignes pour les scénarios rétrospectif [2009-2016] (noir) et tendanciels [2016-2026] (avec facteur morphologique $MF = 1$: bleu ; $MF = 5$: rouge ; et $MF = 10$: jaune). (Droite) Distribution des surfaces par tranches bathymétriques h_0 , mesurées et simulées sur les périodes (haut) 2009-2016 et (bas) 2016-2026.

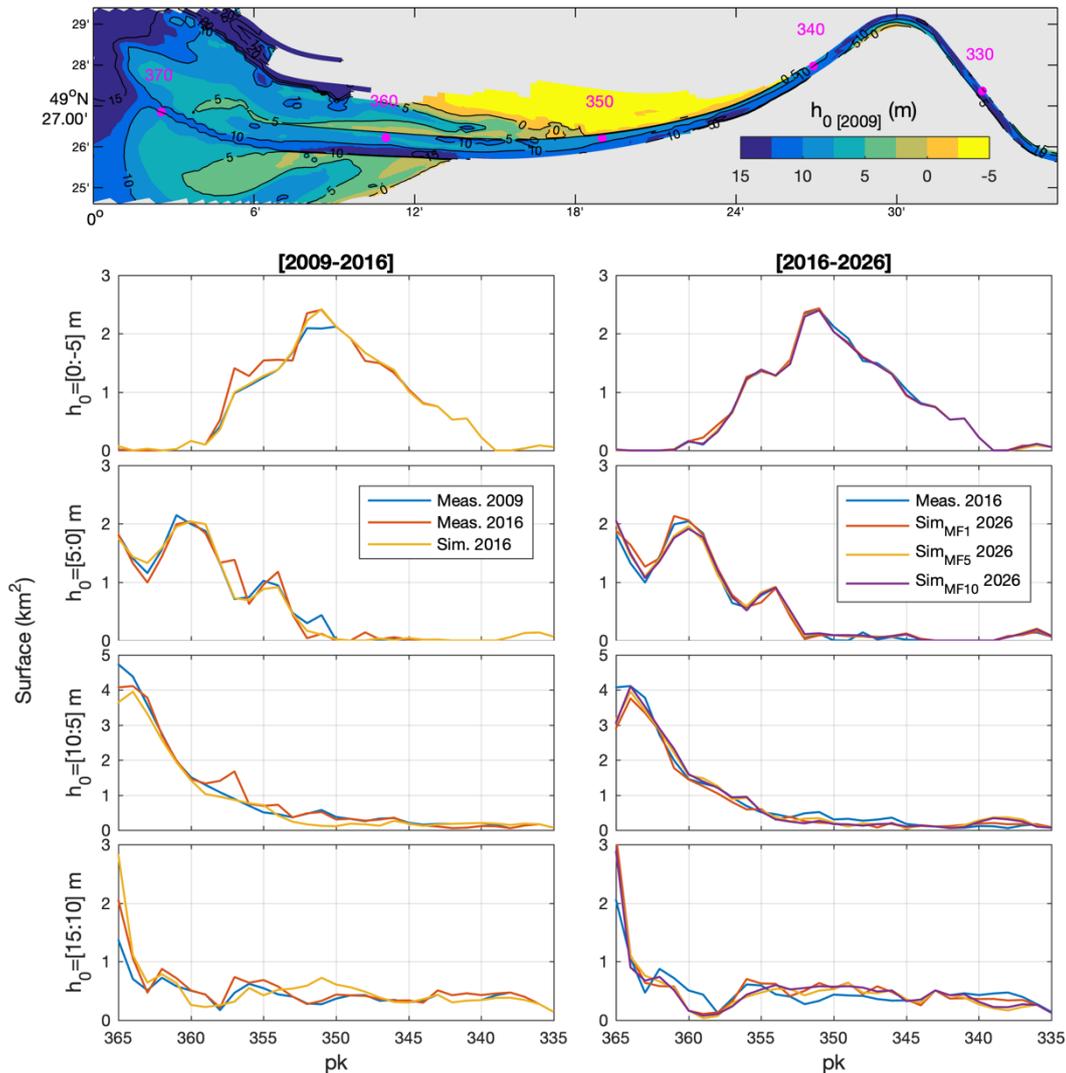


Figure 15 : Hypsométrie longitudinale mesurée et simulée le long des $pk = [335-365]$ de l'estuaire sur les périodes (gauche) 2009-2016 et (droite) 2016-2026, pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m). A droite, simulations tendancielle avec facteur morphologique $MF = 1$ (rouge), $MF = 5$ (jaune) et $MF = 10$ (violet).

2.2 Validation morphosédimentaire du modèle TELEMAC3D « Seine »

Présentation du modèle hydro-morpho-sédimentaire TELEMAC3D « Seine »

Nous présentons ici brièvement le modèle hydro-morpho-sédimentaire TELEMAC3D (T3D) que la société ARTELIA a développé et implémenté en estuaire de Seine pour le compte du GPMH, afin d'évaluer les évolutions morphologiques de la vasière Nord du Havre [De Linares *et al.*, 2015; Walther, 2015]. Une description plus complète du modèle ainsi que sa validation hydro-morpho-sédimentaire sont présentées en Annexe 2.

T3D se base sur le cœur hydrodynamique TELEMAC3D couplé au module de vague TOMAWAC. C'est un modèle de calcul à éléments finis s'appuyant sur un maillage non-structuré (composé d'environ 350 000 nœuds) permettant d'augmenter la résolution des mailles de manière optimale dans les zones d'intérêt (ex. de 5 km au large jusqu'à 20 m dans certains secteurs de l'embouchure, Figure 16). Le modèle considère 14 couches verticales dans la colonne d'eau. Il est forcé aux limites par les composantes principales de la marée,

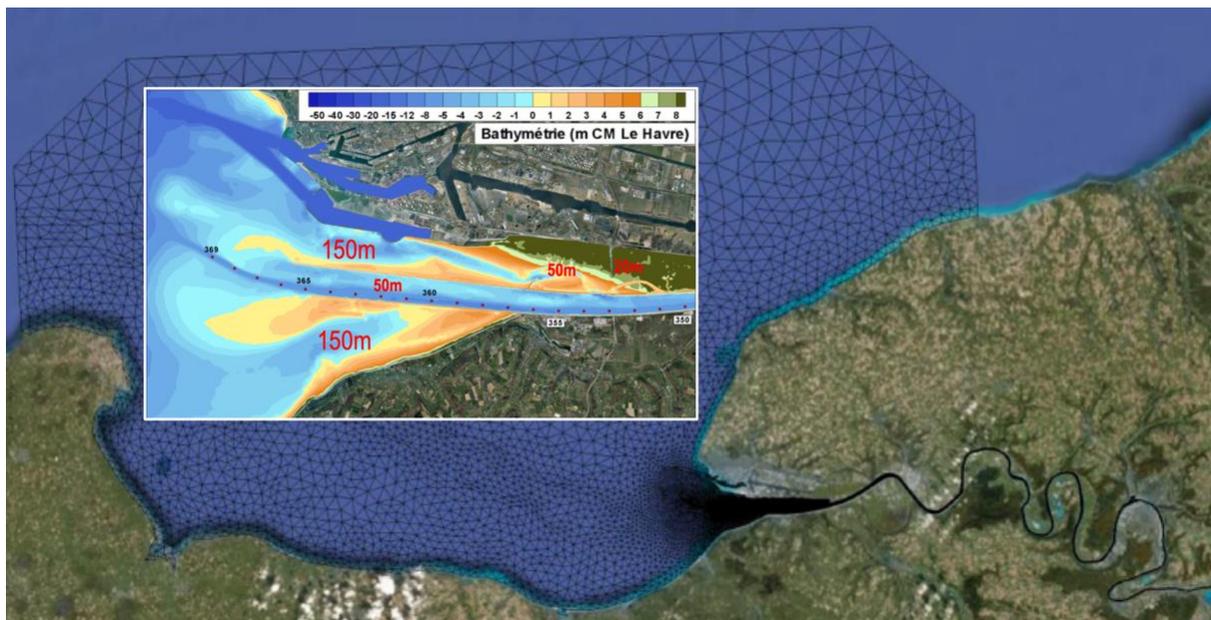


Figure 16 : Maillage du modèle T3D et zoom sur l'embouchure (en rouge est défini la résolution approximative du maillage pour différentes zones).

ainsi que par le niveau moyen calculé au Havre. Le vent est issu du modèle Globocean et les débits de la Seine, de l'Eure et de la Risle sont imposés. Une « bibliothèque » de vagues est calculée pour différents niveaux d'eau (réactualisation annuelle) afin d'imposer des conditions réalistes tout en économisant du temps calcul. Le modèle hydrodynamique est couplé à un modèle sédimentaire multicouches et multi-classes avec trois sables ($d = 350 \mu\text{m}$, $d = 220 \mu\text{m}$, $d = 125 \mu\text{m}$) et une vase (vitesse de chute constante de 1 mm/s). Le modèle prend en compte les processus d'érosion, suspension, déposition, charriage et consolidation.

T3D se différencie du modèle MARS3D-*CurviSeine* (M3D) par une résolution plus fine mais en contrepartie des temps de calcul plus longs. Par exemple, une année de simulation prend $\sim 22 \text{ h}$ de calcul (sur 168 processeurs) avec M3D, alors que cela prend $\sim 120 \text{ h}$ (sur 96 processeurs) avec T3D. Concernant la prise en compte des dragages d'entretien, T3D calcule les quantités de sédiments dragués lorsque la cote de fond dépasse la cote de dragage définie, de manière analogue à M3D. En revanche, les quantités de sédiments clapés dans T3D correspondent aux observations faites par les GPM de Rouen et du Havre, alors que M3D clape les quantités de sédiments dragués qui ont été simulées. Cela implique que les simulations T3D sont forcées par les clapages réels observés, ce qui n'est pas le cas des simulations M3D.

Validation du modèle hydro-morpho-sédimentaire TELEMAC3D « Seine » sur la période 2005-2015

Le calage effectué pour le GPMH (2005-2011, voir Annexe 2) a été ré-effectuée dans le cadre de MORPHOSEINE sur 2005-2015 en y ajoutant quelques modifications, comme la mise à jour plus régulière des bathymétries dans les calculs de houle, ainsi que l'approfondissement du chenal de Rouen entre janvier et novembre 2012. La validation morphodynamique se fait à la fois sur les principales évolutions temporelles des cubatures par zones, sur les cartes des évolutions morphologiques et sur les dragages des ports.

A l'échelle de l'estuaire, les volumes d'ensemble de dépôts et érosions sont suivis depuis fin 2005 à travers une large boîte de cubature couvrant l'emprise dans la Figure 17. Cette emprise est commune à l'ensemble des levés naturels utilisés : les ouvrages, rives, et bords de levés ne sont pas considérés de même que la zone du méandre amont. Ce graphe met en évidence l'alternance en nature de phases présentant un équilibre volumétrique et de phases présentant un apport net de sédiment de l'ordre de -7 à +10 Mm³. Ces écarts sont parfois difficilement explicables et d'autres, comme par exemple pour l'année 2013, le sont plus facilement puisque le pic de sédimentation est principalement lié à une forte hydrologie. Le modèle reproduit assez correctement les tendances à long terme sur 10 ans, et les variabilités saisonnières sont suivies très correctement, mais de manière moins intense qu'en nature.

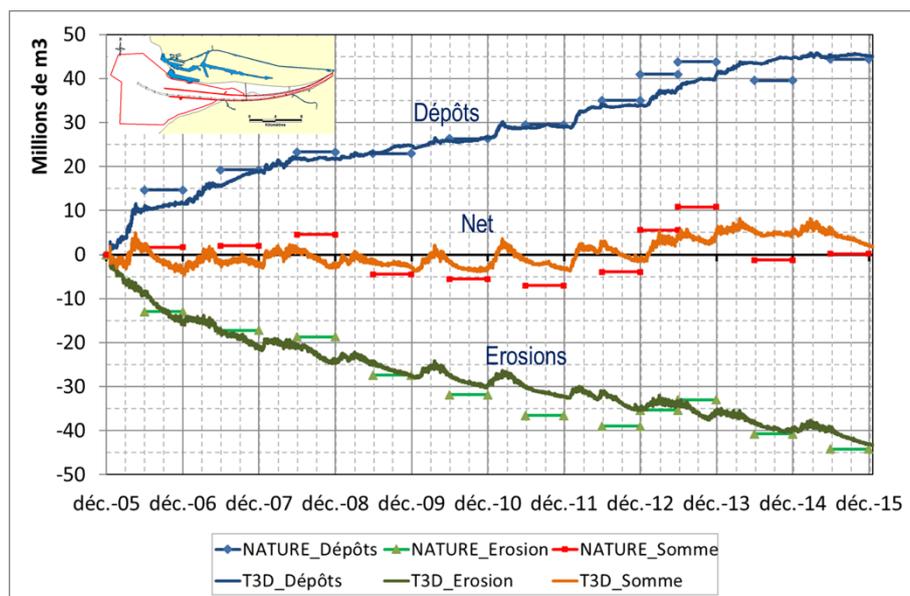


Figure 17 : Comparaison de l'évolution des volumes mesurés (GPMR) et simulés (T3D) à l'échelle de l'estuaire entre 2005 et 2015.

La comparaison de la carte des évolutions après 10 ans de calcul et de l'évolution des volumes par zone entre 2005 et 2015 (Figure 18), montre que le modèle est capable de donner des indications fiables sur les tendances morphologiques à 10 ans.

Nous avons pu aussi comparer les résultats de dragages effectués par le modèle en sable et vase que nous avons comparé aux quantités clapées par les deux ports (Figure 19). Les dragages d'entretien sont correctement reproduits sur 10 ans en quantité et en répartition sable et vase pour le GPMH et le GPMR, hormis sur la zone 4 du GPMR : le modèle sous-drague la zone du fait de la cote modélisée qui est peu de temps au-dessus de la cote de consigne introduite dans le modèle, alors qu'une importante dynamique sédimentaire est présente sur la zone. Pour pallier cette différence, nous avons introduit un indicateur, qui permet de calculer le sédiment qui aurait dû être dragué si la cote cible avait été atteinte. Il ne s'agit donc pas d'une validation du modèle pour la zone 4 mais du calage d'un indicateur qui permet, de donner une information réaliste malgré la limite actuelle du modèle sur ce point.

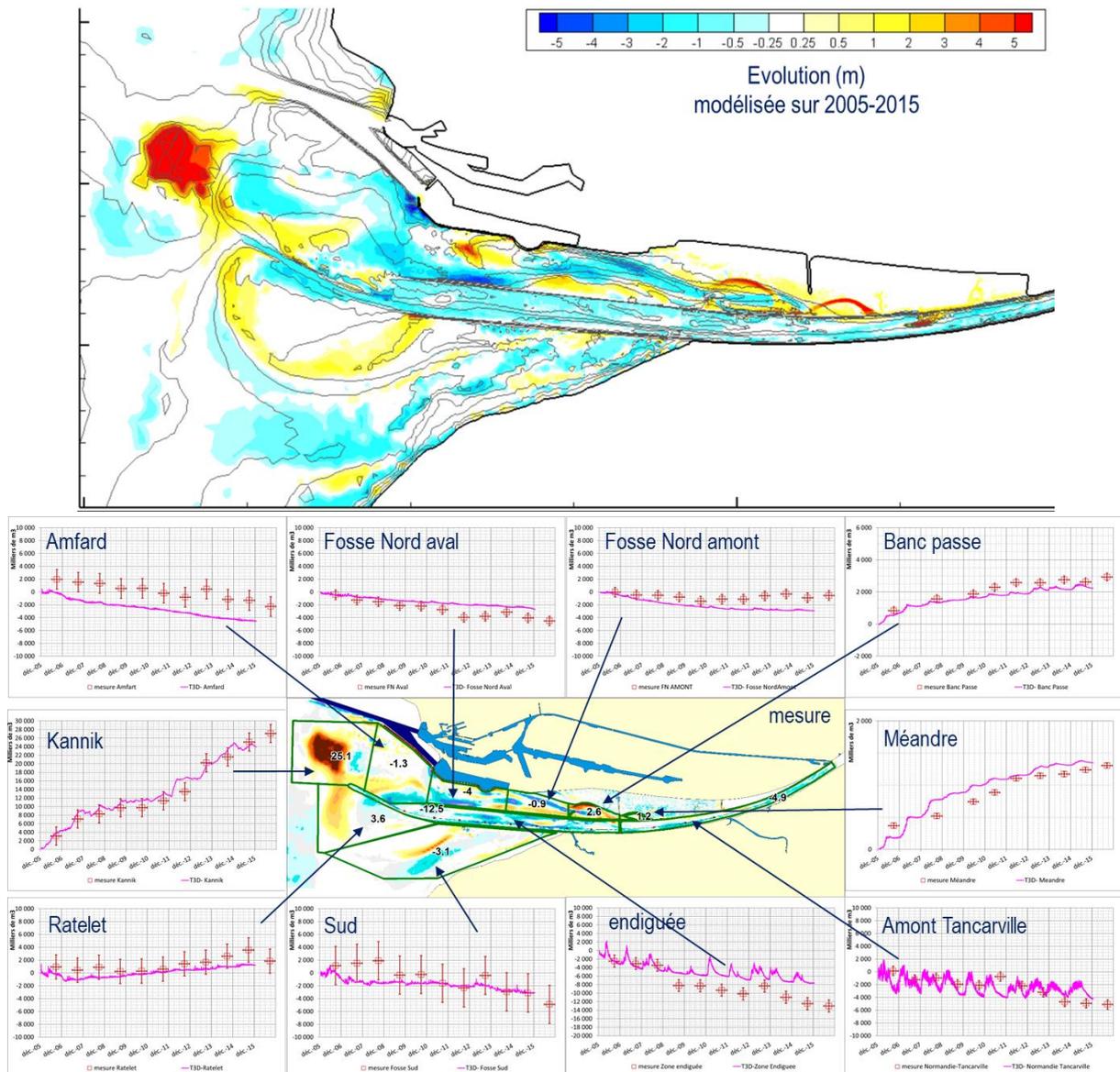


Figure 18 : Comparaison des cubatures mesurées (GPMR) et simulées (T3D) sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) entre 2005 et 2015.

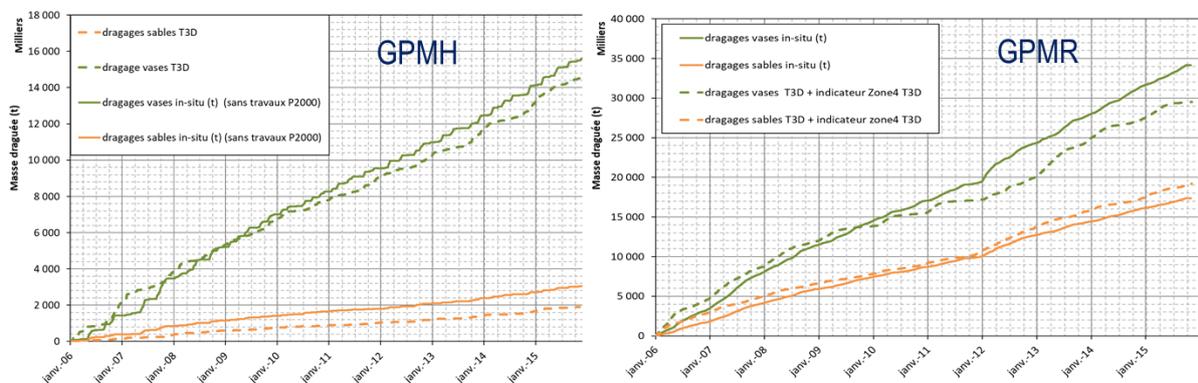


Figure 19 : Comparaison des dragages effectués et ceux modélisés (T3D) en sable et vase pour le GPMH et le GPMR (avec un indicateur de dragage en zone 4 pour le GPMR).

Validation du modèle hydro-morpho-sédimentaire TELEMAC3D « Seine » sur la vasière Nord pour un indicateur vasière

Ce modèle a été conçu notamment pour pouvoir donner des indications sur l'évolution de la Fosse Nord et ses vasières. Il a été défini un indicateur de suivi dans le modèle pour suivre cette évolution, qui a permis de valider le modèle sur l'évolution de la nature des sédiments modélisée dans cette zone.

La définition d'indicateurs nature passe d'abord par un rassemblement des données disponibles depuis la fin des travaux de Port 2000 sur la période fin 2005 - fin 2015 : cela inclut les levés bathymétriques d'ensemble de l'estuaire, les levés topographiques par laser aéroporté et les orthophotos de la vasière Nord (Tableau 1). L'indicateur de surface de vasière est ensuite défini comme la surface totale d'une zone, à laquelle sont soustraites les surfaces végétalisées, les surfaces sous la cote +2.5 mCMH (surfaces « subtidales ») et les surfaces de bancs sableux. Cette définition a d'abord été validée par comparaison avec les travaux d'Antoine Cuvilliez de suivi des surfaces par la télédétection à basse altitude entre 2006 et 2014 puis appliquée à l'ensemble des données natures disponibles. Elle a ensuite été adaptée pour s'appliquer aux résultats du modèle hydro-sédimentaire 3D (rapport ARTELIA 171 3 203 - Na13 : Réhabilitation des vasières de l'estuaire de la seine développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire 3D de l'estuaire, conception et validation d'un indicateur vasière dans le modèle 3D).

La surface des vasières a augmenté les 5 première années sur la zone se situant à l'aval contre la Digue Basse Nord à l'inverse des zones < à -2,5mCMH (Figure 20). La zone sableuse continue à augmenter mais principalement sur la zone du banc de la Passe. Une cartographie de la répartition de ces surfaces est présentée en exemple pour 2015 sur la Figure 21.

Tableau 1 : Synthèse des données utilisées (mesures et simulations T3D) pour caractériser l'évolution de la vasière Nord.

	Mesures	Modèle hydro-sédimentaire 3D
Données de base	Orthophotos et levés complets de l'estuaire	Résultats de la modélisation numérique
Surface végétalisée	Entre la limite de végétation et la digue haute Nord jusqu'à l'extrémité amont du chenal environnemental	Au-dessus de la cote +7,5m CMH
Domaine subtidal	Inférieur à la cote +2,5 mCMH	En dessous de la cote +2,5m CMH
Domaine sableux	Surfaces de bancs à méga rides repérés sur orthophoto + surface de la flèche littorale au NO de la vasière Nord	% vase < 30% et Dm sables > 200 microns sur 5 cm d'épaisseur (180 microns sur le banc de la Passe)

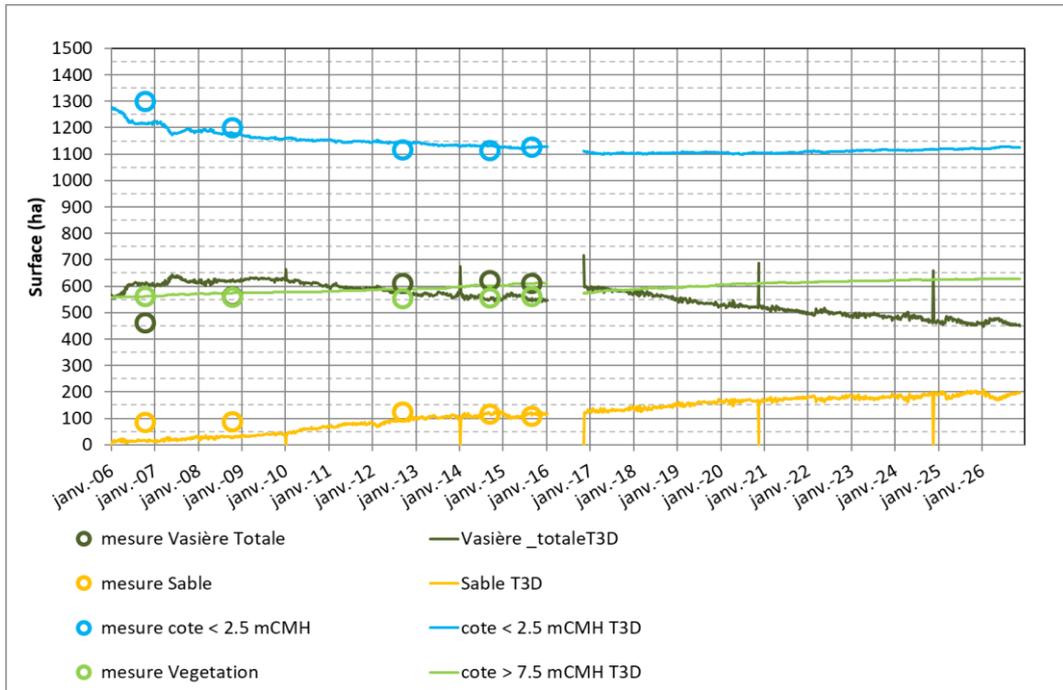


Figure 20 : Comparaison de l'évolutions de l'indicateur vasière mesuré (o) et simulé par T3D (lignes) sur 2005-2026.

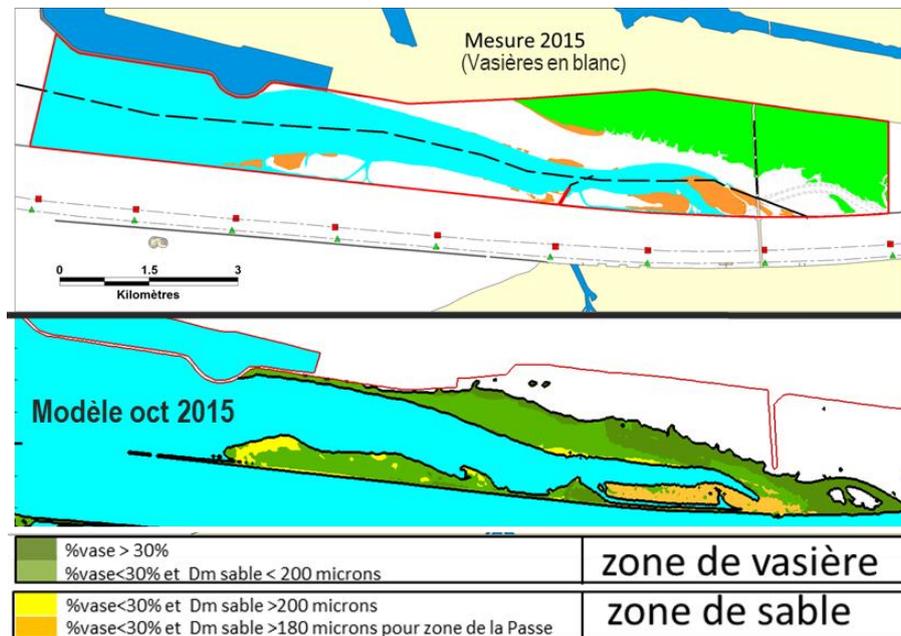


Figure 21 : Cartographie de l'indicateur vasière en 2015 (nature en haut et modèle T3D en bas).

2.3 Comparaison inter-modèles des évolutions morphosédimentaires

Cette partie porte sur l'étude du comportement des modèles hydro-morpho-sédimentaires MARS3D 'M3D' (*CurviSeine-morphodynamique*, cf. Partie 2.1) et TELEMAC3D 'T3D' (développé par ARTELIA, cf. Partie 2.2) pour deux périodes d'étude :

- i. une période rétrospective '*Hindcast*' commune aux deux modèles (2009-2016), pendant laquelle des mesures de cubatures sont disponibles (données GPMR), en prenant en compte les forçages hydrométéorologiques réels ;
- ii. une période tendancielle '*Forecast*' (2016-2026), pour laquelle les forçages hydrométéorologiques de l'année hydrologique 2015 (i.e. oct. 2014 – oct. 2015) sont générés chaque année. L'année hydrologique 2015 représente une année moyenne (en termes de débit et de tempêtes) représentative des 20 dernières années [Schulz *et al.*, 2018].

Pour la période rétrospective, les simulations numériques prennent en compte l'approfondissement du chenal principal réalisé fin 2012 (+1 m), ainsi que la nouvelle cote de dragage associée. A noter que les simulations T3D ont débuté en décembre 2005 (bathymétrie initiale 2005), alors que celles de M3D ont débuté en janvier 2009 après un an de *spin-up* (bathymétrie initiale 2009). Les évolutions issues de T3D se font donc à partir d'une bathymétrie 2009 « modèle » suite à 3 ans de calcul 2005-2008 (pour une évolution calculée à partir d'une bathymétrie réelle se référer à la Partie 2.2). Les deux modèles simulent les clapages sur la zone du Kannik, mais T3D injecte les quantités réelles mesurées par les GPMH et GPMR, alors que M3D injecte les quantités effectivement draguées par le modèle.

Pour la période tendancielle, les modèles débutent leurs simulations fin 2016 à partir de la bathymétrie mesurée en 2016. Malheureusement, suite à une incompréhension sur la définition des conditions initiales, T3D simule les clapages sur la zone du Machu, alors que M3D les simule sur la zone du Kannik. Cela explique certaines différences de comportement observées entre les deux modèles.

Evolutions morphologiques rétrospectives

Sur la période 2009-2016, le modèle T3D parvient à correctement simuler les zones d'accrétion au niveau des méandres (au Nord de la DBN), dans la zone du Kannik, mais également au niveau du Râtelet, correspondant à la progradation du banc du Ratier vers l'Ouest (Figure 22, gauche).

Les évolutions morphologiques simulées par M3D et T3D sont comparées aux observations à travers la comparaison des cubatures calculées sur 10 zones de l'estuaire (Figure 12). Les cubatures illustrées sur la Figure 23 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. $V(z, t) - V(z, t_{2009})$). 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 les mesures bathymétrique estimée à ± 10 cm.



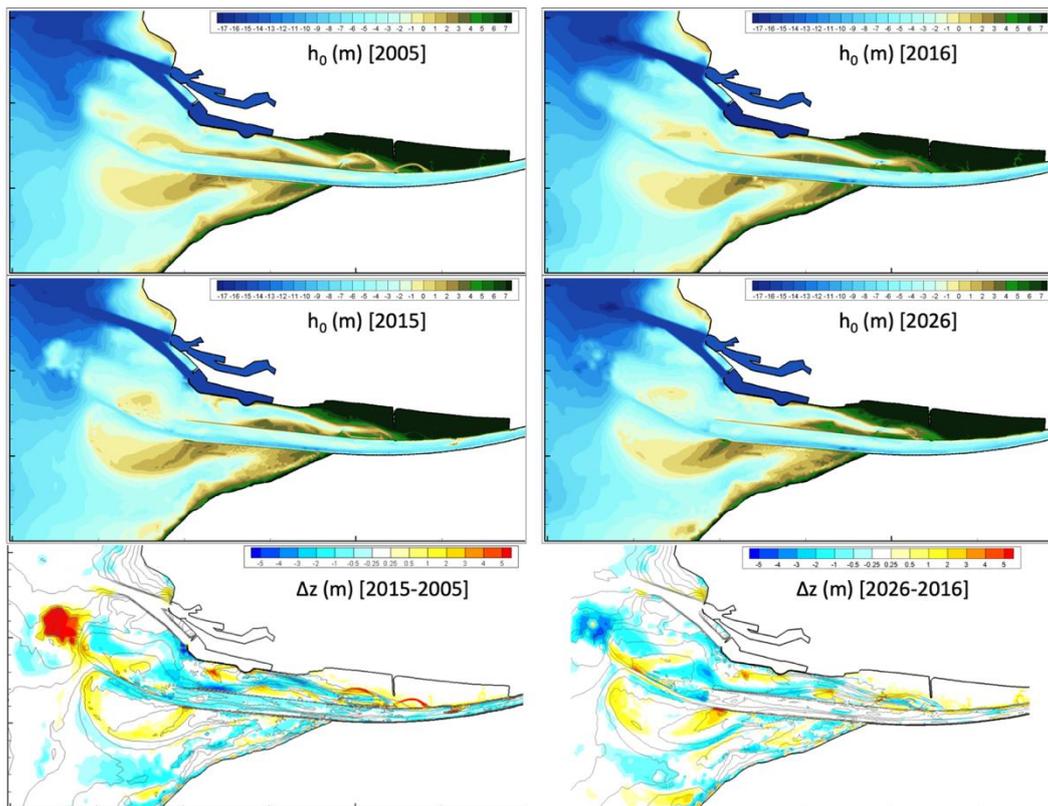


Figure 22 : Evolution morphologique de l'estuaire aval sur les périodes (gauche) 2005-2015 et (droite) 2016-2026. Bathymétries h_0 et différentiels bathymétriques Δz , simulés avec T3D.

La Fosse Sud est en érosion au cours de la période 2009-2015 ($-5 \pm 3 \text{ Mm}^3$), ce qui est relativement bien simulé par M3D ($-3,7 \text{ Mm}^3$), mais davantage sous-estimé par T3D ($-1,5 \text{ Mm}^3$). A noter que cette zone ne représente pas un intérêt majeur pour l'application de T3D, principalement focalisé sur les vasières Nord du Havre. En revanche, l'accrétion observée sur la zone du Râtelet ($+2,7 \pm 1,9 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par T3D ($+2 \text{ Mm}^3$), mais pas du tout par M3D qui simule une érosion de $-4,5 \text{ Mm}^3$. Ce manque d'accrétion sur le banc du Râtelet était également visible sur le différentiel bathymétrique de la Figure 13. La complexité de la dynamique sédimentaire sur ces bancs à l'embouchure (courants de marée + vagues), et donc la difficulté à modéliser son évolution morphologique, avait été mis en évidence dans le projet HYMOSED. Cela a motivé le besoin de réaliser des campagnes de mesures complémentaires pour mieux comprendre cette dynamique. Dans le cadre de ce projet, des mesures ont pu être réalisées au cours de l'hiver 2019 et sont présentées dans le Chapitre 4. Concernant T3D, il a fallu que certaines zones des bancs à l'embouchure soient définies comme « non-érodable » afin de pouvoir simuler de l'accrétion dans ce secteur.

Jusqu'en 2013, l'accrétion dans la zone du Kannik ($+5,2 \pm 2,1 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par les modèles ($+5,5 \text{ Mm}^3$ pour M3D et $+6,9 \text{ Mm}^3$ pour T3D). Par contre, suite à l'approfondissement du chenal (début 2013), M3D sous-estime nettement l'accrétion observée en 2015 ($+16,8 \pm 2,1 \text{ Mm}^3$), avec seulement $+7,2 \text{ Mm}^3$. Cela peut venir d'une réduction des quantités clapées au Kannik, car T3D qui injecte les quantités observées parvient à bien simuler cette augmentation ($+14,4 \text{ Mm}^3$). Dans la zone d'Amfard, l'érosion observée ($-2,6 \pm 1,5 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par les modèles ($-1,7 \text{ Mm}^3$ pour M3D et $-2,5 \text{ Mm}^3$ pour T3D), même si la tendance sur 7 ans est plus monotone pour T3D.

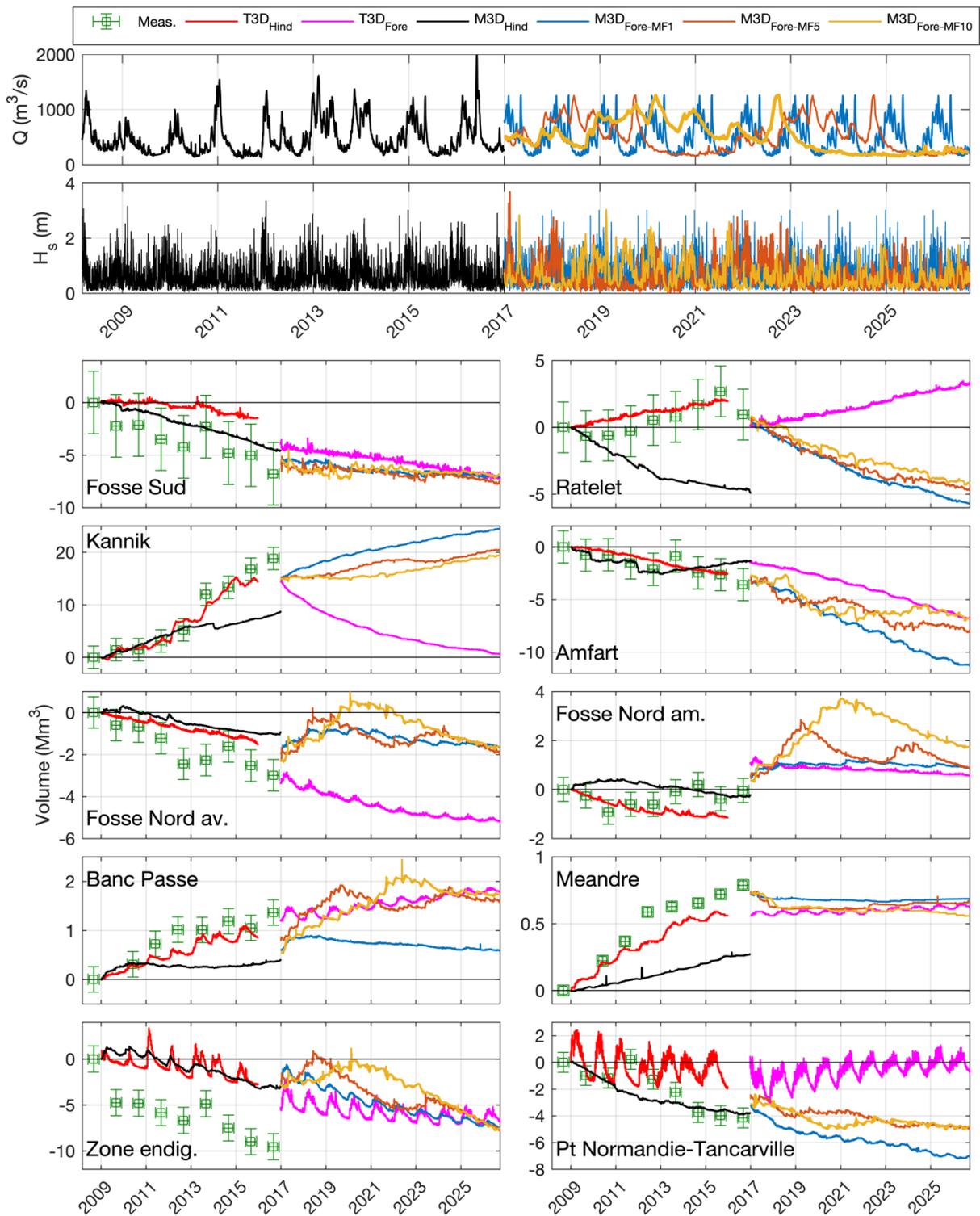


Figure 23 : Cubatures sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios rétrospectifs 'Hindcast' (2009-2016) et tendanciels 'Forecast' (2016-2026), mesurées par le GPMR (symboles) et simulées par T3D et M3D (lignes). A noter que les simulations T3D réalisent les clapages au site du Machu à partir de 2017 (2017-2026), alors que les simulations M3D les réalisent au site du Kannik sur l'ensemble de la période 2009-2026.

Les modèles sont moins performants dans la Fosse Nord Aval, avec une tendance à sous-estimer l'érosion observée ($-2,5 \pm 0,7 \text{ Mm}^3$) : $-0,9 \text{ Mm}^3$ pour M3D et $-1,3 \text{ Mm}^3$ pour T3D. Dans la Fosse Nord Amont, les modèles ont un comportement assez différent. T3D simule bien l'érosion observée jusqu'en 2013 ($-0,6 \pm 0,5 \text{ Mm}^3$; T3D : -1 Mm^3), alors que M3D simule une très légère accrétion ($+0,1 \text{ Mm}^3$). Par contre, M3D se rapproche des observations en 2015 ($-0,4 \pm 0,5 \text{ Mm}^3$; M3D : $-0,2 \text{ Mm}^3$), alors que T3D s'en éloigne ($-1,1 \text{ Mm}^3$).

Dans les zones du banc de la Passe et de Méandre, T3D est plus performant pour simuler les accrétions observées (Passe : $+1 \pm 0,3 \text{ Mm}^3$ et Méandre : $+0,7 \pm 0,1 \text{ Mm}^3$) avec $+0,9 \text{ Mm}^3$ et $+0,6 \text{ Mm}^3$. M3D tend à sous-estimer ces accrétions, avec $+0,3 \text{ Mm}^3$ sur chaque zone. A noter que ces zones représentent une faible proportion de l'embouchure et que la résolution plus grossière du maillage de M3D ($\sim 50\text{-}100 \text{ m}$) par rapport à celle de T3D ($\sim 20 \text{ m}$) semble déterminante. Il est cependant bon de souligner que T3D parvient à bien simuler la morphodynamique de ce secteur, pour lequel il a principalement été conçu.

Dans la zone endiguée de la Seine, les modèles aboutissent à la même érosion en 2015 ($-2,8 \text{ Mm}^3$), malgré des fluctuations annuelles plus marquées pour T3D. Par contre, les modèles ne captent pas du tout la forte érosion mesurée en 2009 ($-4,8 \pm 1,4 \text{ Mm}^3$) et n'aboutissent donc pas au même niveau d'érosion observé en 2015 ($-9 \pm 1,4 \text{ Mm}^3$). Ce « décrochage » mesuré en 2009 semble suspect, car les conditions hydrométéorologiques de cette année-là ne justifient pas un comportement très différent des autres années. De plus, les cubatures observées entre 2005 et 2009 sont bien simulées par T3D (Figure 18), et celles observées entre 2009 et 2015 sont également bien simulées par les deux modèles. Il est également surprenant que les simulations tendancielle (T3D et M3D) débutant en 2017 avec la bathymétrie mesurée en 2016 soient aussi éloignées de la mesure de cubatures de 2016.

Enfin, l'érosion observée entre le Pont de Normandie et Tancarville ($-4 \pm 0,7 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par M3D ($-3,6 \text{ Mm}^3$), malgré le fait que la fluctuation observée en 2011-2012 ne soit pas captée par le modèle. En revanche, T3D simule des fluctuations annuelles beaucoup plus marquées, mais sous-estime l'érosion finale en 2015 ($-0,8 \text{ Mm}^3$).

En résumé, les modèles ont des comportements relativement similaires sur la plupart des zones, mis-à-part au niveau du Râtelet où T3D parvient à bien simuler l'accrétion du banc. La morphodynamique du secteur des vasière Nord du Havre est également mieux simulée par T3D, alors que M3D sera plutôt plus performant dans la Fosse Sud. De plus, des doutes sont émis sur la véracité des mesures réalisées en 2009 dans la zone endiguée.

Evolution morphologiques tendancielle

L'analyse des évolutions morphologiques pour le scénario tendanciel (2016-2026) permet de comparer les tendances des modèles pour une année hydrométéorologique donnée (i.e. 2015) qui se répète pendant 10 ans, mais aussi d'étudier les différentes réponses associées à l'utilisation d'un facteur d'accélération morphologique (MF) dans le cas des simulations M3D. Pour rappel, les modèles utilisent comme condition initiale la bathymétrie mesurée en 2016.

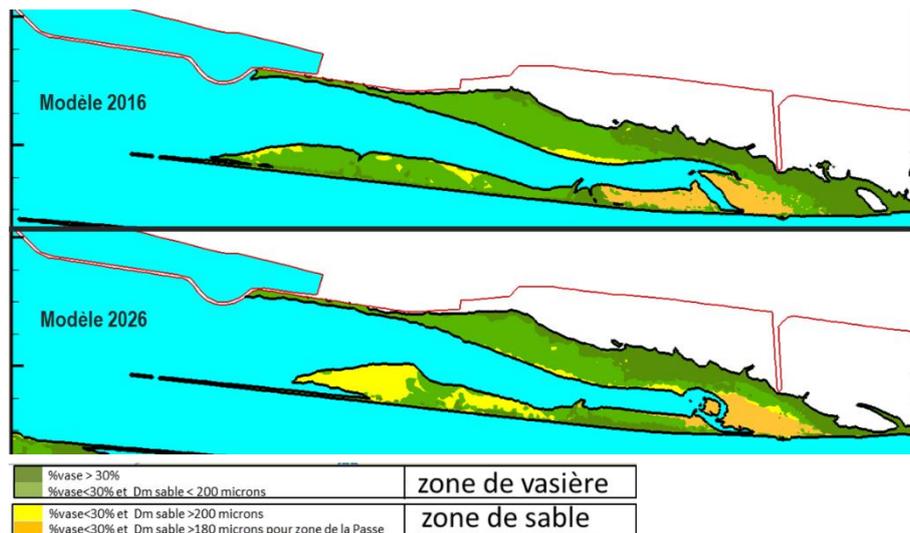


Figure 24 : Cartographie de l'indicateur vasière modélisé par T3D en 2016 et 2026

Analyse des résultats du scénario tendanciel à partir du modèle T3D

Le modèle T3D montre que les taux et la répartition sable/vase restent stable dans les dragages des deux ports par rapport à la décennie précédente (non montré).

Les principales tendances évolutives repérées sur 2005-2015 continuent sur 2016-2026 (Figure 22 et Figure 23), avec notamment :

- une accrétion du banc du Râtelet ;
- une érosion de la Fosse Sud ;
- un chenal de Fosse Nord Aval qui continue de s'appuyer sur la Digue Basse Nord et a éroder les bancs qui s'y trouvaient pour les déplacer plus en amont ;
- une accrétion du banc de la Passe.

Les tendances qui sont modifiées par rapport à la décennie précédentes sont :

- l'arrêt de l'accrétion et l'érosion de la zone du Kannik suite au déplacement des clapages vers Machu ;
- la stabilité de la zone méandre qui est due à son remplissage quasiment atteint en 2016.

Si l'on regarde l'indicateur vasière pour les 10 années prospectives, on voit que la surface des vasières diminue au profit de zones sableuses à l'aval ou de zone > à 2,5m CMH, due à l'énergie du flot qui continue à s'appuyer sur la Digue Basse Nord et à l'amont due à l'augmentation des surfaces > à 7,5 mCMH (Figure 20 et Figure 24).

Comparaison des tendances morphologiques entre les modèles T3D et M3D

Les évolutions morphologiques simulées par T3D (Figure 22) et M3D (Figure 25) sur 10 ans sont en général plus faibles que celles observées sur la période 2009-2016. On note toujours une accrétion sur le banc du Ratier à l'embouchure et dans le secteur des vasières Nord, mais cette dernière est moins intense suite au comblement du chenal sur la période passée. Une forte érosion est simulée par T3D au niveau du Kannik, suite au changement de la zone de clapage vers le Machu. Cela n'est pas simulé par M3D qui considère toujours un rejet au Kannik.

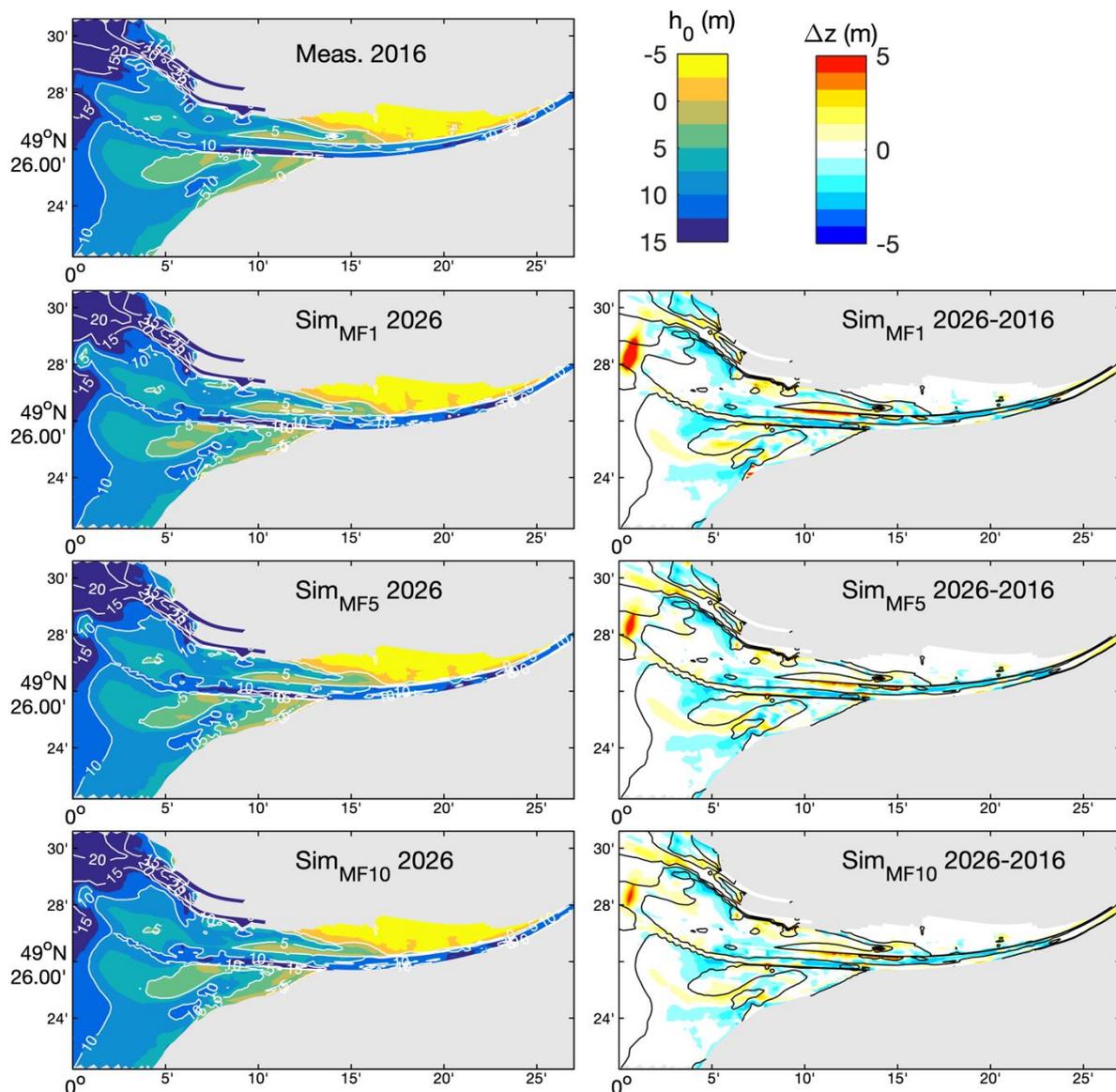


Figure 25 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2016 et 2026. (Gauche) Bathymétries h_0 et (droite) différentiels bathymétriques Δz , simulés par M3D avec facteur morphologique (haut) $MF = 1$, (milieu) $MF = 5$, et (bas) $MF = 10$.

De manière similaire à l'analyse de la période rétrospective, les cubatures ont été calculées sur les 10 zones de l'estuaire de 2016 à 2026 (Figure 23). Premièrement, il faut noter que les volumes calculés par les modèles début 2017 devraient être très proches des volumes mesurés par le GPMR fin 2016, car ils sont tous basés sur la bathymétrie mesurée en 2016. Cela s'observe par exemple au Râtelet et à Amfard, mais ce n'est pas le cas dans beaucoup d'autres zones. Ceci peut s'expliquer par le fait que le GPMR calcule les volumes à partir d'une bathymétrie à haute résolution (~ 10 m), alors que les modèles les calculent à partir des bathymétries interpolées sur leur maillage (et donc dégradées). Des différences plus importantes seraient donc attendues dans les zones à forts gradients bathymétriques.

En général, les variations de volume sont assez similaires à celles de la période 2009-2016, avec une tendance à réduire en intensité, en accord avec les différentiels bathymétriques (Figure 22 et Figure 25). Il ressort un changement net de comportement au Kannik pour T3D suite à l'arrêt des clapages dans cette zone. Au niveau d'Amfard, le comportement de M3D change un peu et tend vers une décroissance plus monotone, comme

celle observée par T3D. L'effet du comblement du méandre se voit très clairement sur les simulations T3D et M3D, avec un arrêt de l'accrétion et une stabilisation de la zone. Ce même type de stabilisation est simulé dans la Fosse Nord Amont.

Analyse de l'influence du facteur d'accélération morphologique pour M3D

Le facteur d'accélération morphologique MF est couramment utilisé pour simuler la morphodynamique estuarienne à long-terme (50-1000 ans) [e.g. 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 comprimé) 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 est important de connaître ses effets potentiels sur les évolutions morphologiques.

Il ressort de M3D que les simulations utilisant un facteur d'accélération ($MF = 5$ et 10) ont un comportement globalement similaire à celle sans accélération ($MF = 1$; Figure 25). Cependant, les évolutions morphologiques sont relativement plus faibles avec $MF = 5$ et 10 . Ce comportement est particulièrement renforcé sur la zone du Kannik dû aux plus faibles quantités de sédiments dragués dans le chenal, réduisant la quantité de sédiments clapés.

La comparaison des concentrations de vase en suspension en surface à Fatouville (Figure 26) révèle que l'utilisation d'un MF (5 et 10) induit une sous-estimation de pics de turbidité (malgré un ré-échantillonnage des données pour conserver un nombre de points identique pour chaque MF). 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 . Les valeurs extrêmes (percentiles 90 et 99) diminuent respectivement de 9% et 24% pour $MF = 5$, et de 15% et 24% pour $MF = 10$. Il est intéressant de noter que l'utilisation de $MF = 10$ ne dégrade pas significativement les niveaux de concentration comparé à $MF = 5$.



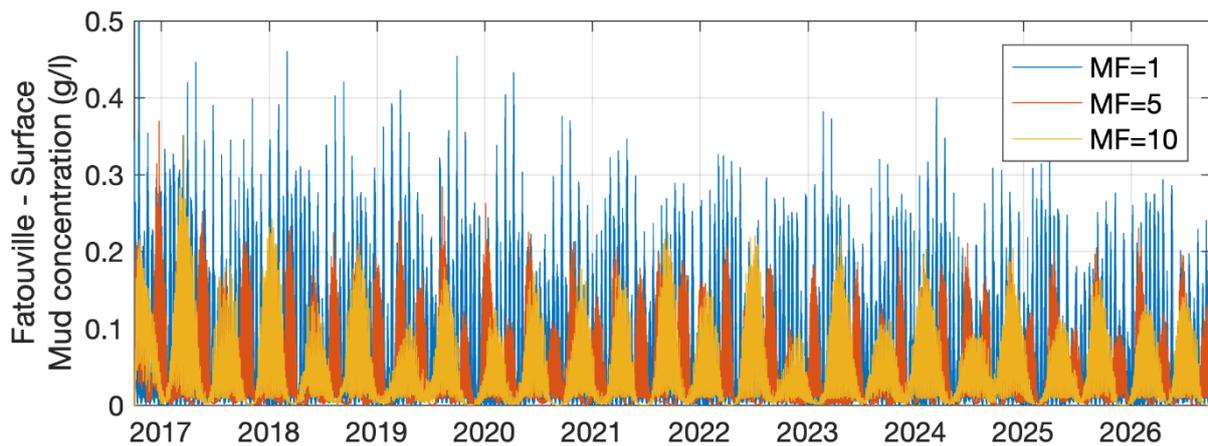


Figure 26 : Comparaison des concentrations de vase en suspension en surface à Fatouville pour différents facteurs d'accélération morphologiques ($MF = 1, 5$ et 10).

En comparant les cubatures calculées pour les simulations avec différents MF (Figure 23), on note que l'utilisation du MF ne se fait pas ressentir de partout. Par exemple, les tendances sont assez proches dans la Fosse Sud et au Râtelet. Par contre, on observe bien la réduction de l'accrétion au Kannik pour $MF = 5$ et 10 (comme observé Figure 25), ainsi que la réduction de l'érosion à Amfard. De manière opposée, l'utilisation de MF augmente l'accrétion dans le banc de la Passe, mais celle-ci représente seulement un faible volume.

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 par exemple le cas dans les Fosses Nord Aval et Amont, ainsi que dans la zone endiguée. La simulation avec $MF = 5$ « recolle » à celle avec $MF = 1$ tous les 5 ans (i.e. 2022 et 2027), et la simulation avec $MF = 10$ « recolle » à celle avec $MF = 1$ au bout de 10 ans (i.e. 2027).

En résumé, cette analyse de la période 2016-2026 permet de mieux quantifier les biais que peut induire l'utilisation du MF . Il est intéressant de noter qu'après 10 ans, les simulations avec $MF = 10$ diffèrent très peu de celles avec $MF = 5$. Nous estimons que les tendances simulées avec $MF = 5$ et 10 induisent des variations raisonnables par rapport à $MF = 1$. Ainsi, les simulations à plus long-terme (20-50 ans) présentées dans le chapitre suivant se basent sur l'utilisation d'un facteur morphologique $MF = 5$.

3 Evolutions morphosédimentaires à long terme (~20-50 ans)

Dans ce chapitre, l'idée principale est d'étudier le comportement morphosédimentaire de l'estuaire à des échelles de temps plus longues, allant de 20 à 50 ans, à partir du modèle *CurviSeine* (M3D). Afin d'assurer des temps de calcul raisonnables, nous avons utilisé un facteur morphologique de $MF = 5$. Ce choix résulte d'un compromis entre le temps de calcul et le réalisme des simulations, en s'appuyant sur l'analyse de sensibilité des résultats à différents MF (Partie 2.3). Le choix de $MF = 5$ paraît également raisonnable à l'échelle de 50 ans pour garantir suffisamment de cycles hydrologiques (i.e. 10) et de cycles de marée vives eaux/mortes eaux (i.e. 261). Cette étude se base sur deux approches :

- i. une approche rétrospective dont l'objectif initial était de simuler une période de 50 ans pour laquelle nous disposons d'informations sur les évolutions bathymétriques observées (1960-2010) ;
- ii. une approche prospective dont l'objectif initial était de simuler le potentiel devenir morphosédimentaire de l'estuaire à 50 ans, pour différents scénarios climatiques.

Malheureusement, la totalité de ces simulations n'a pas pu être réalisée, pour des raisons techniques et temporelles.

3.1 Simulations rétrospectives sur 20 ans (1975-1995)

La morphodynamique de l'estuaire entre 1960 et 2010 a été fortement impactée par les travaux d'aménagement des GPMH et GPMR (ex. endiguement, dragage, extension portuaire, approfondissement des chenaux) [Avoine *et al.*, 1981; Foussard *et al.*, 2010]. Il était donc nécessaire de prendre en compte l'évolution de ces aménagements pour simuler correctement cette période. Cela a nécessité beaucoup de travail (et d'expertise) pour déterminer les principales phases d'aménagement à considérer, ainsi que la manière d'intégrer ces changements dans les simulations numériques.

En se basant sur les données fournies par le GPMR et le GIPSA, associées aux informations issues de la littérature [Chapon, 1964; Foussard *et al.*, 2010], la prise en compte des ouvrages a été implémentée dans le modèle en regroupant les travaux en différentes phases entre 1960 et 2010 (1960, 1970, 1974, 1980, 1989 et 2005 ; voir Figure 27 et Figure 64 en Annexe 3). La nouvelle configuration du modèle *CurviSeine* a ainsi été appliquée sur la bathymétrie de 1960 afin de simuler les évolutions morphologiques avec la prise en compte progressive des ouvrages. Cependant des difficultés ont été rencontrées pour simuler de manière continue l'évolution morphologique de l'estuaire entre 1960 et 2010, en particulier dû à des instabilités numériques associées à l'implémentation des ouvrages et à la prise en compte des dragages sur cette période. Ces instabilités semblent provenir d'une implémentation trop brusque des ouvrages qu'il faudrait palier par différentes phases plus progressives, ainsi que par une modification des propriétés sédimentaires au voisinage des ouvrages (pour représenter des processus sous-maille). Des préconisations sur les méthodes et pistes de réflexion à suivre pour résoudre ces problèmes sont proposées en perspectives. Suite à ces difficultés, il a été décidé d'étudier la morphodynamique de l'estuaire à partir de différentes bathymétries initiales (1960, 1975 et 1995) mises en place dans le cadre des projets ANPHYECO-SA5 [Grasso & Le Hir, 2019] et ARES-SA6 [Bismuth *et al.*, 2020].

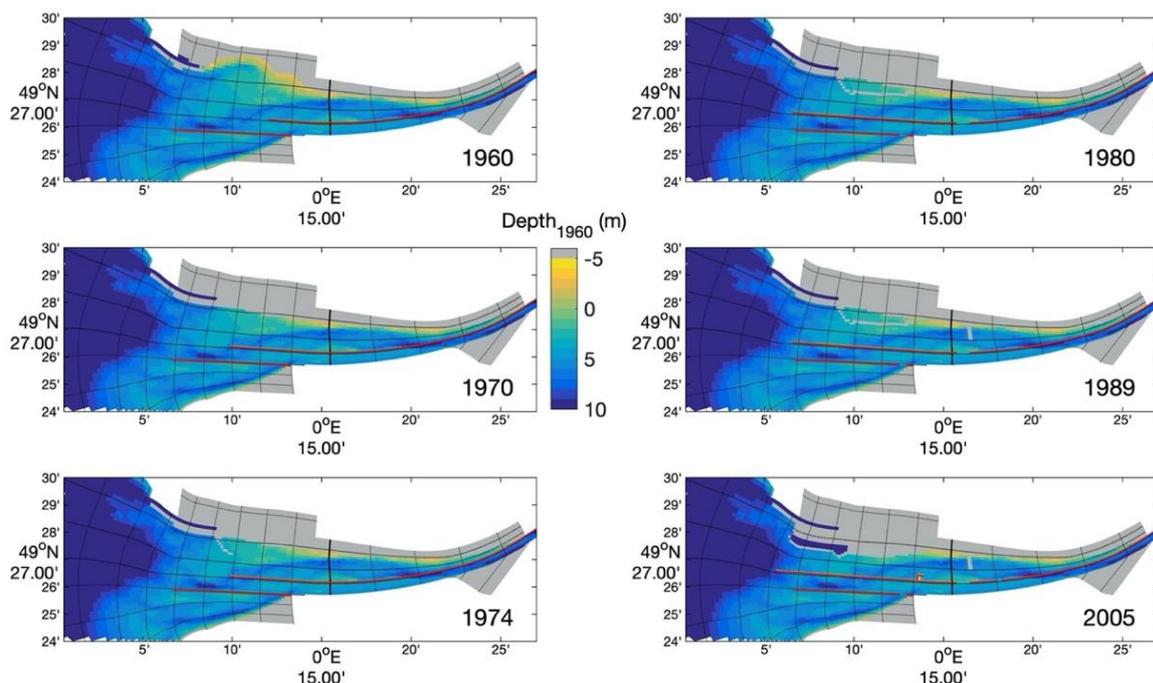


Figure 27 : Stratégie d'implémentation des ouvrages lors de la période 1960-2010, illustrée sur la bathymétrie 1960 ; les digues apparaissent en rouge.

Les résultats présentés ici concernent une simulation de 20 ans (1975-1995), pour laquelle les ouvrages sont peu intrusifs. Dans cette configuration ($MF = 5$), les apports des fleuves ont été compressés d'un facteur 5 (i.e. hydrogramme compressé) afin d'appliquer une variabilité de conditions hydrologiques similaire à la période réelle. Cependant, sachant que les dragages d'entretien des GPMR et GPMH n'ont pas été considérés, cette simulation représente davantage une configuration « idéalisée » où l'analyse s'est principalement portée sur l'étude des forçages (débit, marée, vagues) responsables des évolutions sédimentaires (i.e. événements morphogènes) [Grasso *et al.*, 2019].

La simulation morphodynamique de la période 1975-1995 (Figure 28) 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. A noter également des dépôts sédimentaires au Nord-Ouest du Port du Havre et sur la vasière Sud. En comparaison au différentiel bathymétrique observé entre 1975 et 1995, les simulations parviennent à reproduire les principales zones d'érosion et d'accrétion. Toutefois, les évolutions morphologiques simulées sont moins intenses que celles observées, comme cela avait été le cas sur 10 ans (2016-2026) pour les simulations avec MF (Figure 25). Cela ressort nettement au niveau du méandre Nord qui n'est pas entièrement comblé à la fin des simulations. 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.

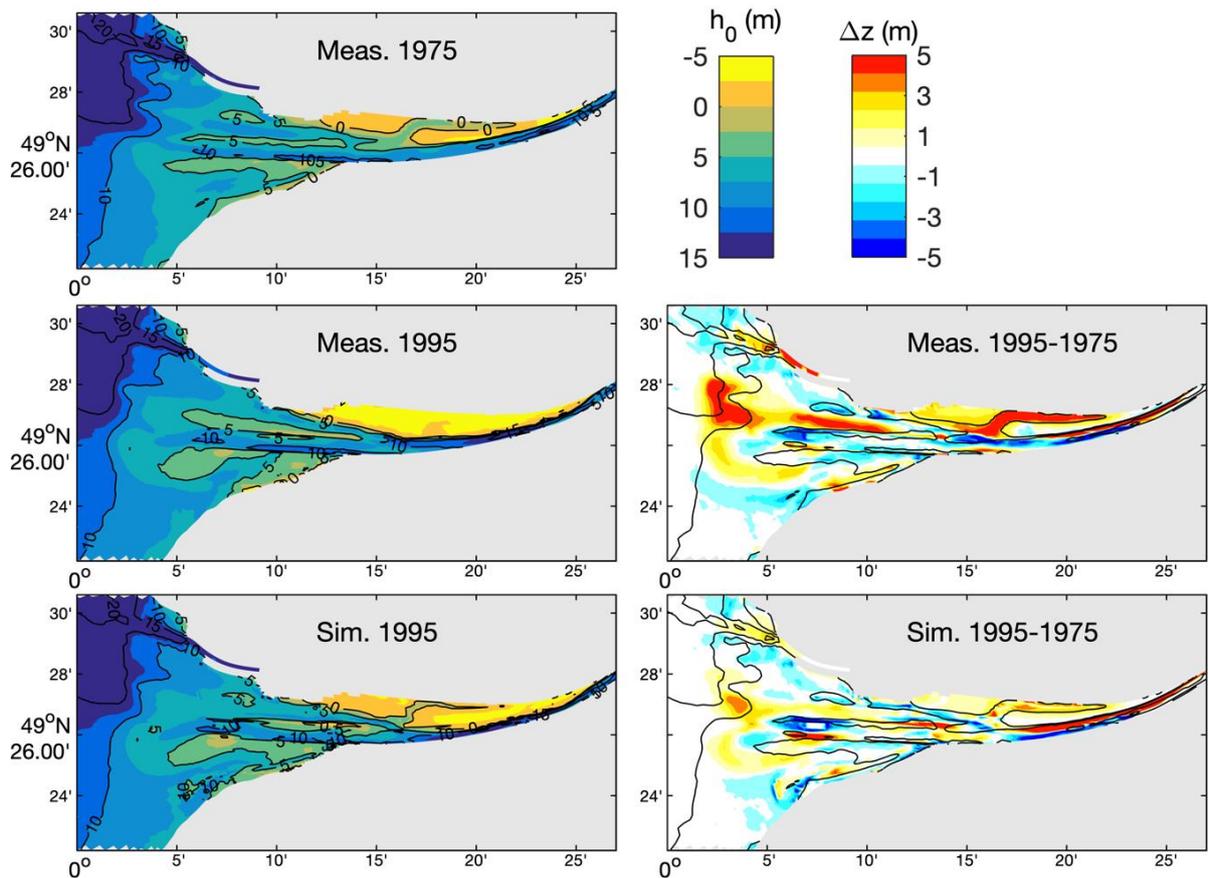


Figure 28 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 1975 et 1995. (Gauche) Bathymétries h_0 et (droite) différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés. Simulation avec facteur morphologique $MF = 5$, sans prise en compte des activités de dragage.

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 29). Par exemple, il est possible de quantifier au cours du temps 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 29d) :

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

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.

Il est possible de quantifier ce type d'évènements par le calcul des variations altimétriques absolues (Figure 29e) :

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

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

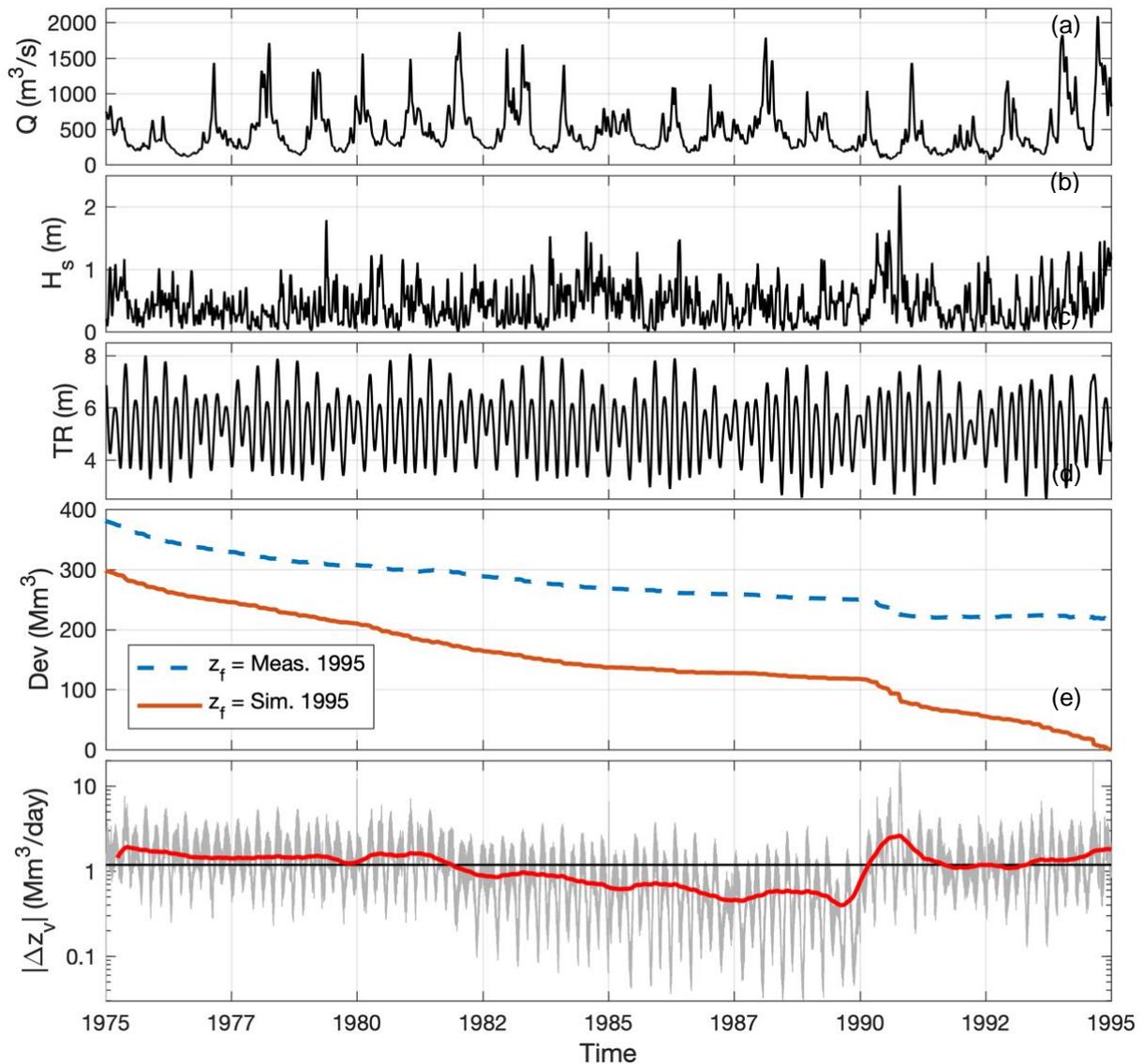


Figure 29 : Evolution temporelle entre 1975 et 1995 des conditions hydrométéorologiques : (a) débit de la Seine Q à Poses, (b) hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure, (c) marnage TR au Havre ; et des changements morphologiques : (d) écart 'Dev' aux bathymétries finales de 1995 observée ($z_f = \text{Meas. 1995}$) 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 30 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 (à droite), mais la corrélation avec le marnage apparaît nettement avec des évolutions morphologiques plus importantes en période de vives eaux (au milieu), 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 (à gauche). 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.

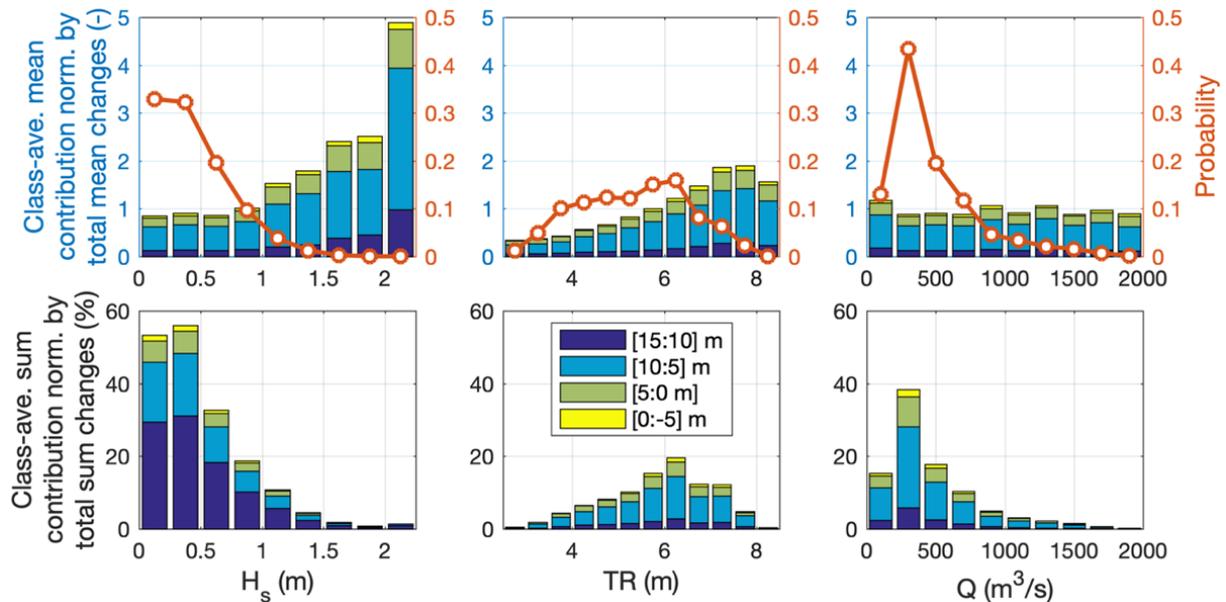


Figure 30 : Variation altimétrique absolue $|\Delta z_v|$, pour différentes tranches bathymétriques, distribuée par classes (gauche) de hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure, (milieu) de marnage TR au Havre et (droite) de débit de la Seine Q à Poses, sur la période 1975-1995. (Haut) Moyenne 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 30 (haut). 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 30, bas). 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, principalement calquées sur la distribution d'occurrence. Par contre, on observe une distribution asymétrique pour les contributions liées au marnage, 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 très impactant. La Figure 31 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 :

- i. 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 ;
- ii. l'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 est également compréhensible par les niveaux d'eau plus élevés en vive eaux, permettant de « nourrir » davantage les estrans.

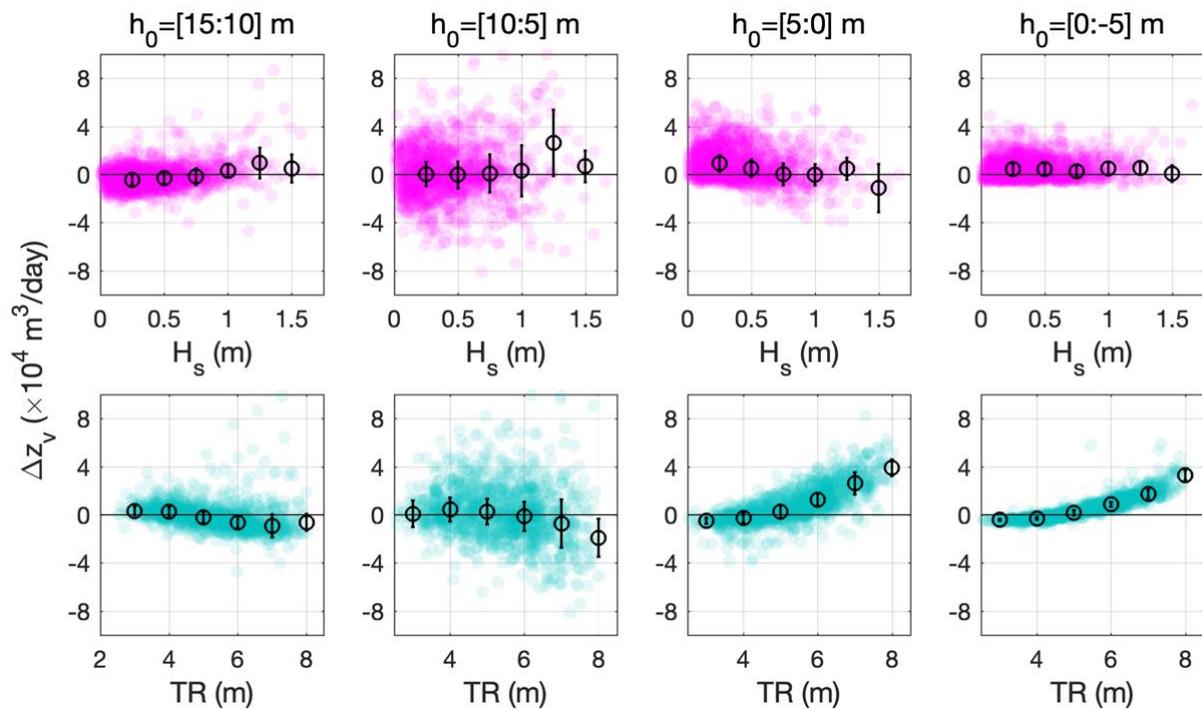


Figure 31 : Variation altimétrique Δz_v sur la période 1975-1995 pour différentes tranches bathymétriques (de gauche à droite : subtidal \rightarrow intertidal), en fonction (haut) de la hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure et (bas) du marnage TR au Havre. Les symboles représentent les moyennes par classes de H_s (0,25 m, haut) et TR (1 m, bas) et les moustaches représentent les écarts type associés.

En résumé, les simulations rétrospectives n'ont pas permis de valider *stricto sensu* le modèle sur une période de 50 ans, comme cela était initialement envisagé. Cependant, les évolutions morphologiques simulées sur 20 ans nous confortent dans l'idée que les tendances morphodynamiques de l'estuaire sont bien captées par le modèle, bien que leurs intensités soient sous-estimées. Ces simulations ont également apporté un éclairage sur les événements morphogènes de l'embouchure, et les contributions respectives des principaux forçages (marée, vagues) sur les évolutions morphologiques. Il faut toutefois rappeler que les dragages n'ont pas été pris en considération dans ces simulations rétrospectives, se traduisant principalement par la sous-estimation des dépôts sédimentaires au niveau du Kannik et la sous-estimation de l'érosion dans le chenal de navigation.

3.2 Simulations prospectives sur 50 ans (2016-2066)

Les résultats présentés dans les parties précédentes ont permis de quantifier les erreurs et incertitudes associées aux simulations morphosédimentaires à l'échelle de 10-20 ans. Nous avons vu qu'il faut rester prudent sur l'interprétation et l'exploitation des simulations morphodynamiques, mais aussi que certaines tendances sont assez robustes pour en étudier les potentielles variations de comportement. C'est dans cette optique que les simulations prospectives à 50 ans ont été réalisées.

Il était initialement prévu de tester l'influence de différents scénarios climatiques par le changement des apports fluviaux, des conditions météorologiques (vent, vagues) et de montée du niveau de la mer. Cependant, les contraintes temporelles et les difficultés rencontrées dans le cadre des simulations rétrospectives (Partie 3.1) nous ont conduit à réduire drastiquement ce nombre de scénarios. Nous avons donc focalisé notre analyse sur deux simulations de 50 ans (2016-2066) pour lesquelles les conditions de forçage sont identiques à celles utilisées dans la Partie 2.3 (période 2016-2026) : 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 prise en compte de la montée du niveau moyen de la mer (NM), suivant les scénarios RCP 2.6 et 8.5 du GIEC 2017 selon Sweet *et al.* [2017] (Figure 32) :

- i. 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 ;
- ii. 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 scénarios ne représentent pas l'élévation du NM au niveau régional en baie de Seine, mais ils permettent d'étudier une gamme de variation assez large et représentative des situations futures potentielles. Dans le cadre de nos simulations, l'année hydrologique 2015 est simulée 10 fois consécutivement avec $MF = 5$ (équivalent à la période 2016-2066), avec une augmentation du NM après chaque année simulée (+5x3 mm pour RCP 2.6 et +5x24 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 (Figure 34).

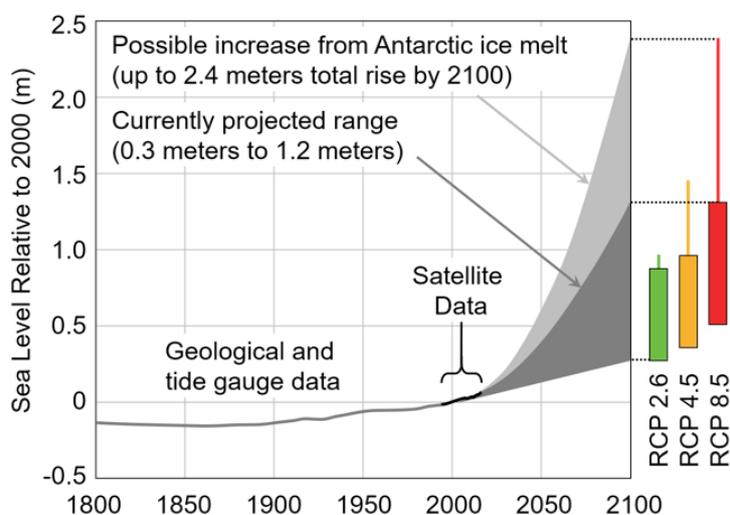


Figure 32 : Reconstruction du niveau moyen de la mer et projection à 2100 [Sweet *et al.*, 2017]. RCP 2.6 est le scénario où les émissions de CO_2 atteignent un pic avant 2020, RCP 4.5 où le pic est proche de 2040, et RCP 8.5 où les émissions continuent d'augmenter comme actuellement.

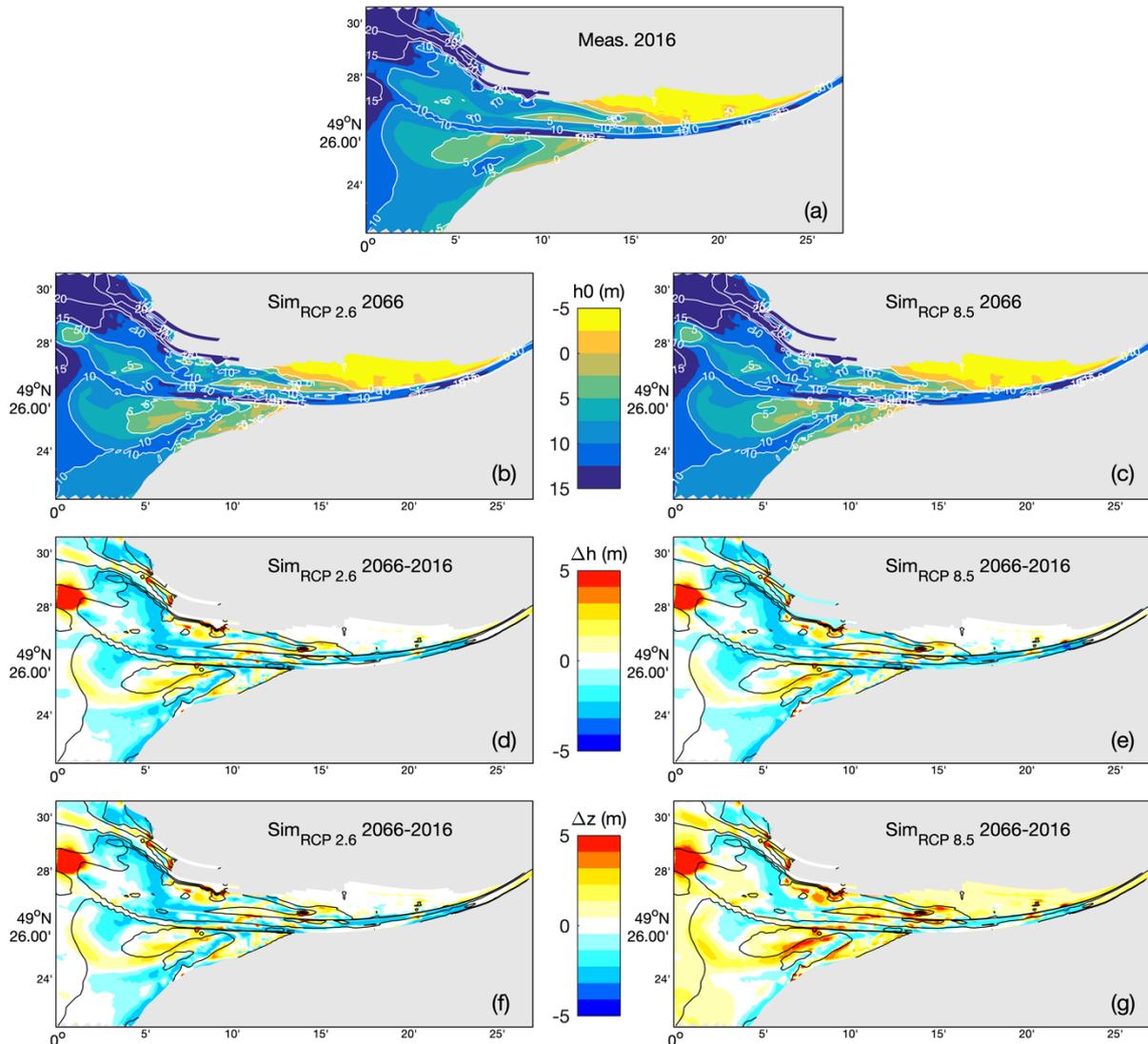


Figure 33 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2016 et 2066. Bathymétries h_0 (a) initiale en 2016 et (b, c) simulées en 2066 ; (d, e) différentiels bathymétriques en terme d'hauteur d'eau Δh , ; et (f, g) différentiels bathymétriques en terme d'élévation Δz . Simulations avec une montée du niveau de la mer suivant les scénarios (gauche : b, d, f) RCP 2.6 (i.e. +3 mm/an) et (droite : c, e, g) RCP 8.5 (i.e. +24 mm/an).

Évolutions morphologiques à l'échelle de l'embouchure

Les évolutions morphologiques sur 50 ans (Figure 33) sont semblables à celles simulées sur 10 ans (Figure 25), mais plus intenses. De manière plus 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 33d 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 33f et g). Cela traduit une adaptation de l'estuaire vers un état d'équilibre associé au NM. Afin de mieux quantifier ces évolutions morphologiques, une analyse hypsométrique similaire à celle des parties précédentes est menée (Figure 34). A noter que le calcul d'hypsométrie prend bien en compte la réactualisation du h_0 suite à l'augmentation du NM.

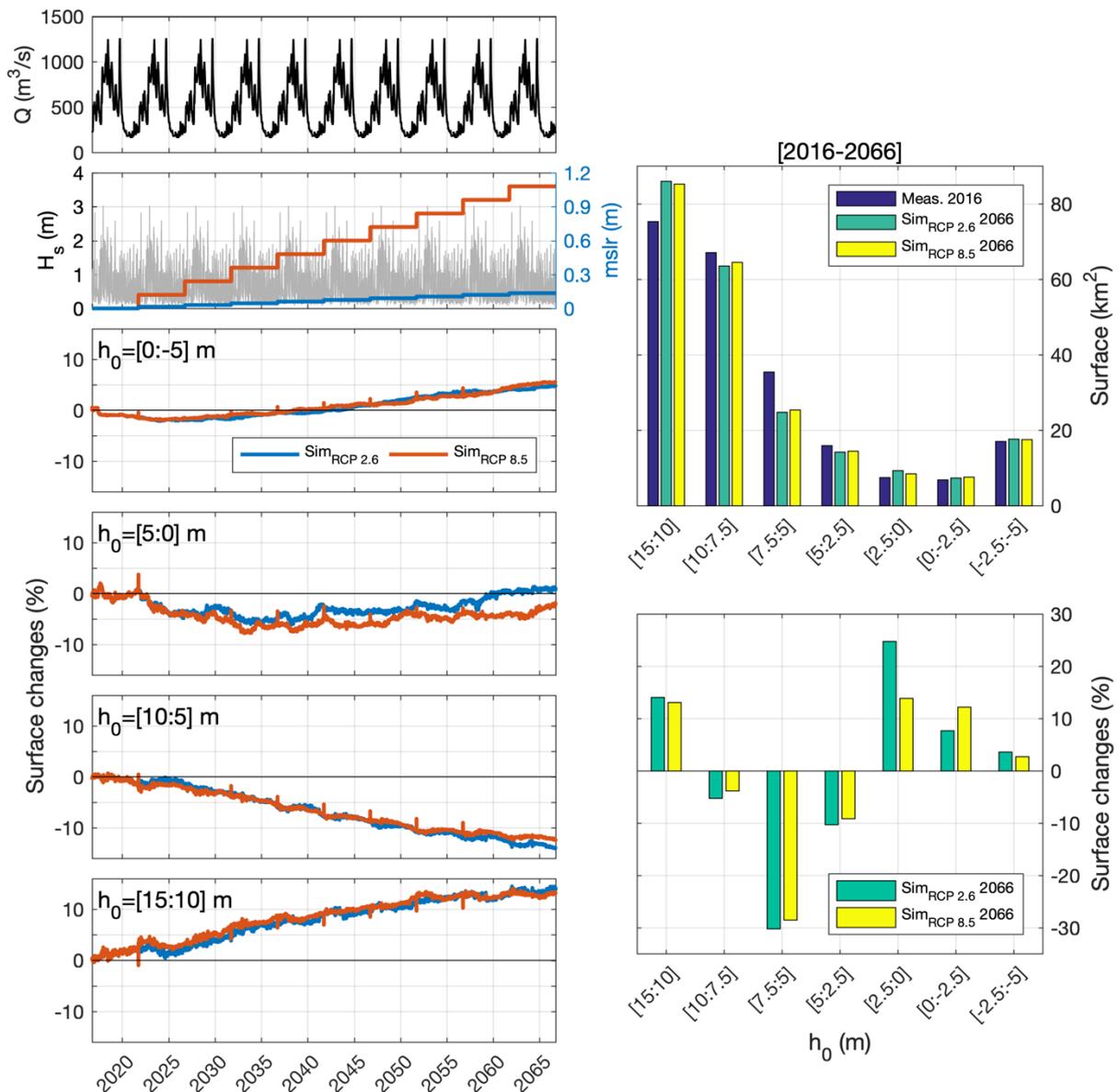


Figure 34 : Evolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval entre 2016 et 2066. (Gauche, haut) Débit de la Seine Q à Poses, hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure et élévation du niveau de la mer $mslr$; (gauche, bas) variation relative des hypsométries pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m), simulés 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). (Droite) Distribution par tranches bathymétriques h_0 : (haut) des surfaces mesurées en 2016 et simulées en 2066 et (bas) des variations de surfaces simulées en 2066.

On retrouve en effet très peu de variation sur l'évolution des hypsométries dans les zones subtidales ($h_0 = [15:5]$ m) et intertidales supérieures ($h_0 = [0:-5]$ m) (Figure 34, gauche). Cela implique qu'il y a une réelle adaptation morphologique de l'estuaire au cours de l'élévation du NM. Il y a néanmoins quelques différences de comportement entre les deux scénarios, plus clairement illustrées par les variations d'hypsométrie de la Figure 34 (bas-droite). La simulation avec RCP 2.6 va davantage gagner en estran inférieur ($h_0 = [2,5:0]$ m), alors que la simulation RCP 8.5 va davantage gagner en estran supérieur ($h_0 = [0:-2,5]$ m).

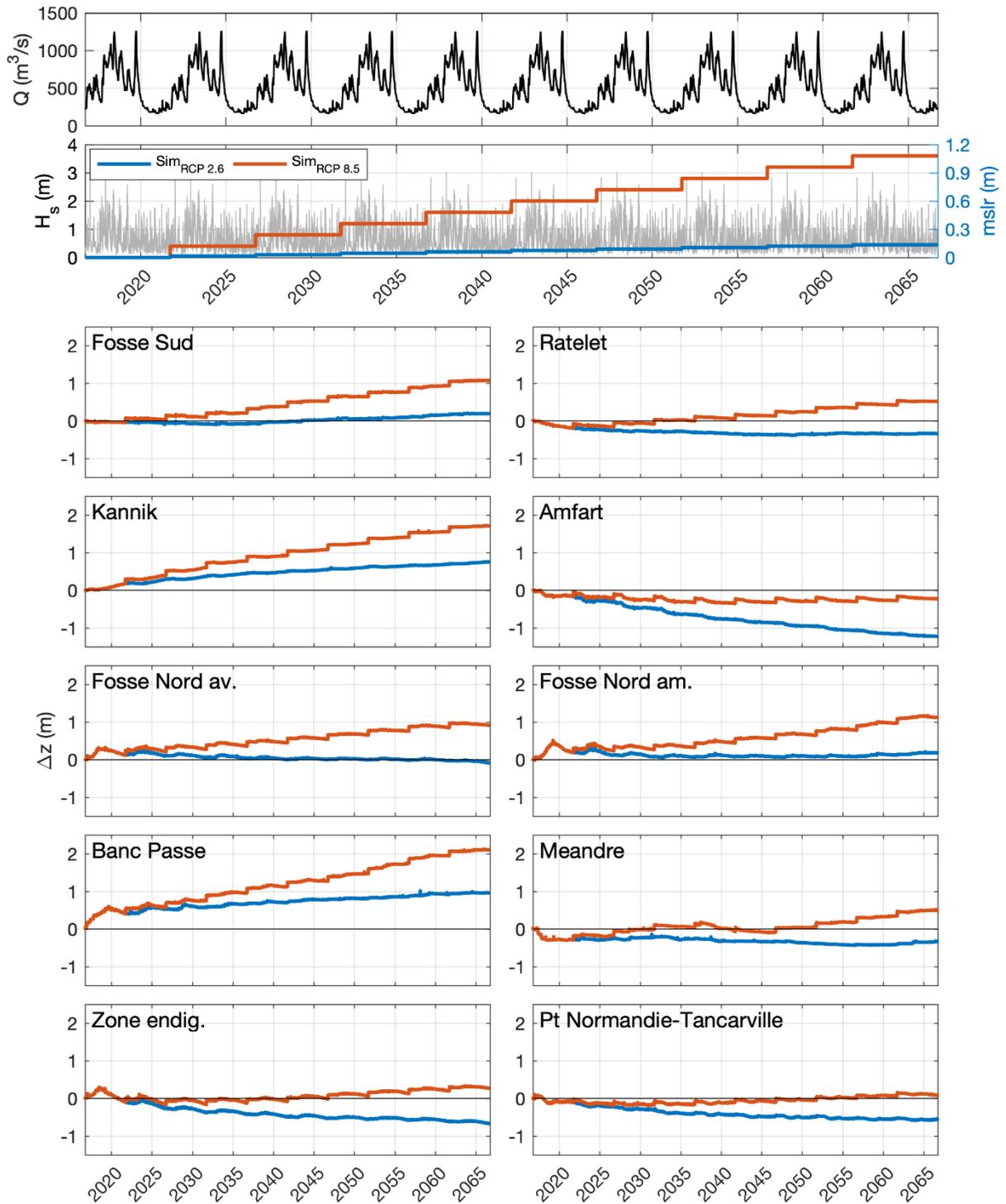


Figure 35 : Cubatures normalisées par la surface (équivalent à une élévation sédimentaire moyenne Δz) sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios tendanciels 'Forecast' (2016-2066) avec prise en compte de la montée du niveau de la mer (RCP 2.6, +3 mm/an : bleu et RCP 8.5, +24 mm/an : orange).



Cette adaptation de l'estuaire avec la montée du NM, particulièrement flagrante pour le scénario RCP 8.5, apparaît clairement à travers le calcul de cubatures dans les 10 zones caractéristiques de l'estuaire (Figure 35). A la différence des calculs précédents, les cubatures ne sont pas exprimées ici en Mm^3 , mais sont normalisées par leur surface respective afin de mieux comparer les zones entre elles. Ces cubatures normalisées (exprimée en m) représentent l'évolution de l'élévation moyenne Δz des zones. Le calcul de cubatures « classique » exprimé en Mm^3 est illustré en Annexe 4 (Figure 65).

Sur la quasi-totalité des zones (mis-à-part Amfard), les cubatures de la simulation RCP 8.5 présentent de l'accrétion, alors que pour la simulation RCP 2.6 les tendances sont plus contrastées. On observe bien ici que l'adaptation de l'estuaire face à la montée du NM nécessite une forte accrétion de l'ensemble de l'estuaire. Cela n'est possible que si suffisamment de sédiments (d'origine marine et fluviale) sont disponibles pour nourrir le système et que l'augmentation du NM n'est pas trop rapide. 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.

Evolutions morphologiques le long de radiales caractéristiques

Nous nous intéressons ici à différentes radiales représentatives de l'estuaire afin de suivre plus précisément leurs évolutions morphologiques (Figure 36) : une longitudinale le long du banc du Ratier (radiale 'AB'), et deux transversales le long des vasières Nord 'Ouest' (VNO, radiale 'BC') et 'Est' (VNE, radiale 'DE'). Les profils bathymétriques associés à ces radiales sont moyennés sur 3 mailles de large (soit environ 300 m, pointillés sur la Figure 36, haut).

La radiale AB caractérisant le banc du Ratier illustre bien la progradation du banc vers l'Ouest, associée à un raidissement du flanc et une accentuation de la barre sédimentaire au Râtelet. 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.

La radiale BC sur la VNO est proche de la radiale étudiée dans le cadre du projet PHARESEE-SA6. Pour les deux scénarios (RCP 2.6 et 8.5), on assiste à un approfondissement des trois chenaux (i.e. chenal principal, chenal secondaire et méandre au Nord de la DBN). Par contre, les zones intertidales sont nettement 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 DBN.

A partir des résultats précédents, il semblerait que l'estuaire parvienne à s'adapter et suivre la montée du NM, même pour le scénario RCP 8.5. Mais pour savoir exactement si l'élévation des estrans arrive à suivre celui du NM, nous suivons l'évolution des élévations maximales des VNO et VNE au cours des 50 ans (Figure 37).



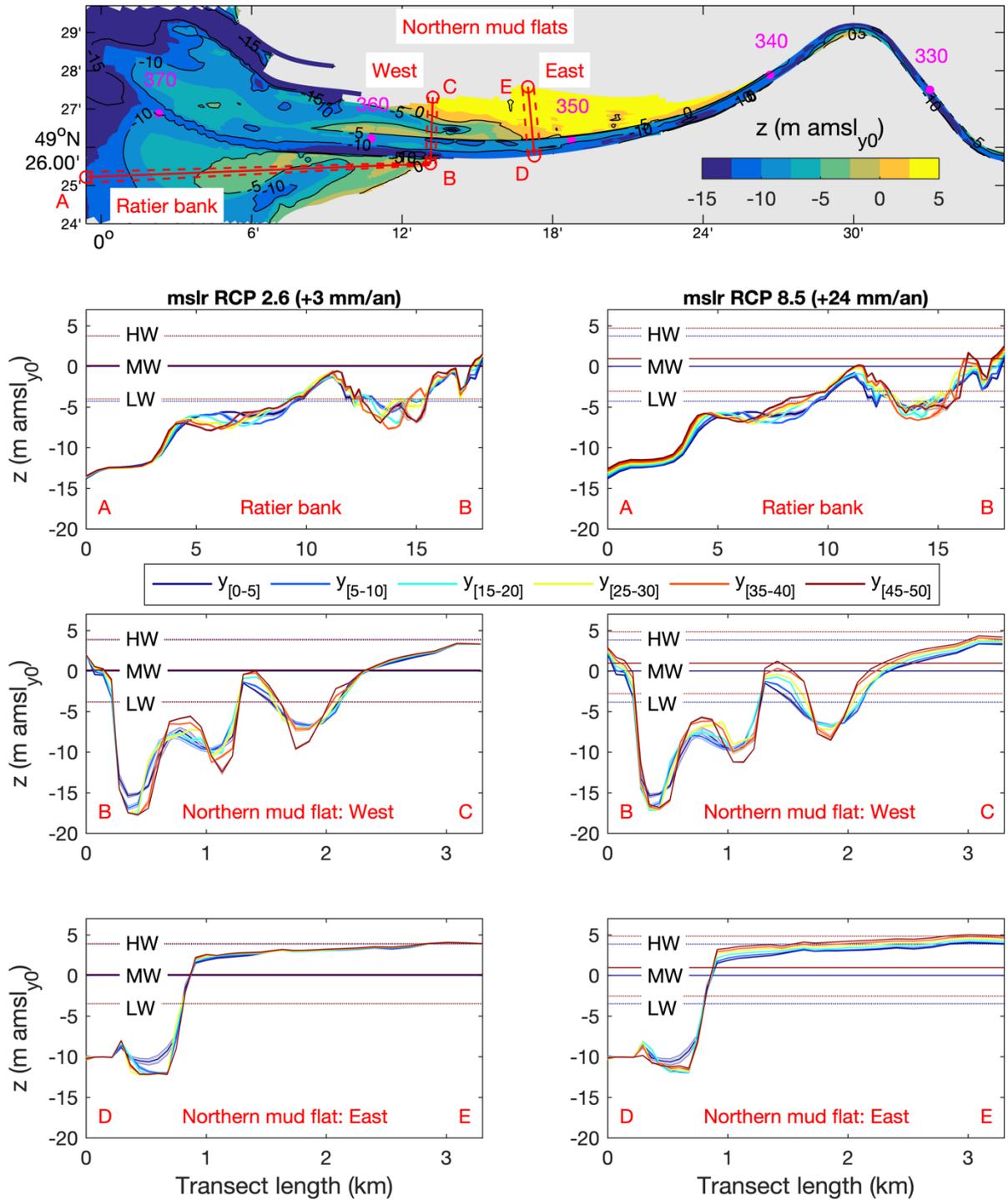


Figure 36 : Evolution morphologique sur 50 ans (2016-2066) de 3 radiales caractéristiques de l'estuaire aval : banc du Ratier (AB), vasière Nord 'Ouest' (BC) et vasière Nord 'Est' (DE) ; pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6, +3 mm/an et (droite) RCP 8.5, +24 mm/an. Elévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

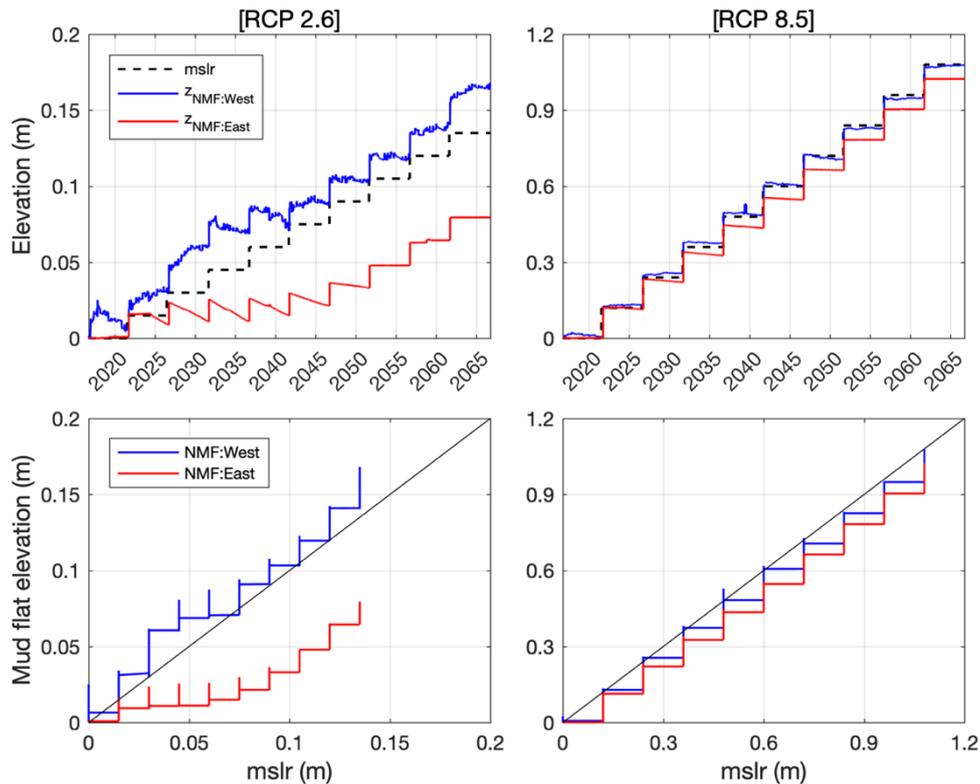


Figure 37 : (Haut) Evolution du niveau de la mer (*mslr*) et de l'élévation maximale des vasières Nord le long des radiales 'Ouest' *Z_{NMF:West}* (BC) et 'Est' *Z_{NMF:East}* (DE) (cf. Figure 36) sur 50 ans et (bas) élévation maximale des vasières en fonction de l'élévation du niveau de la mer, pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6, +3 mm/an et (droite) RCP 8.5, +24 mm/an.

Pour les deux scénarios de montée du NM, les comportements sont très différents entre les deux vasières. L'élévation de la VNO (courbe bleue) suit très bien celle du NM (courbe noire), 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 (courbe rouge) ne suit pas aussi rapidement celle du NM, et cela entraîne 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.

Sachant que les évolutions morphologiques de l'estuaire influencent directement l'hydrodynamique, l'hydrologie et les MES, nous étudions l'évolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires le long du chenal principal ($pk = [325:370]$) au cours des 50 ans (Figure 38). Le chenal, caractérisé ici par la cote du talweg, est majoritairement en érosion à l'aval du $pk = 345$, et majoritairement en accrétion à l'amont. L'impact de l'approfondissement du chenal sur le marnage n'est pas très clair à l'aval, mais cela induit une diminution à l'amont (-0,5 m). Le marnage est peu impacté par la montée du NM (i.e. tendances similaires pour RCP 2.6 et 8.5) car l'évolution générale de l'estuaire s'adapte globalement à la montée du NM. De par sa grande longueur d'onde, la marée est principalement influencée par la morphologie de l'estuaire à grande échelle (i.e. sections) et se trouve peu impactée par l'approfondissement local du chenal principal qui est plus importante dans le scénarios RCP 8.5 (Figure 33d et e,

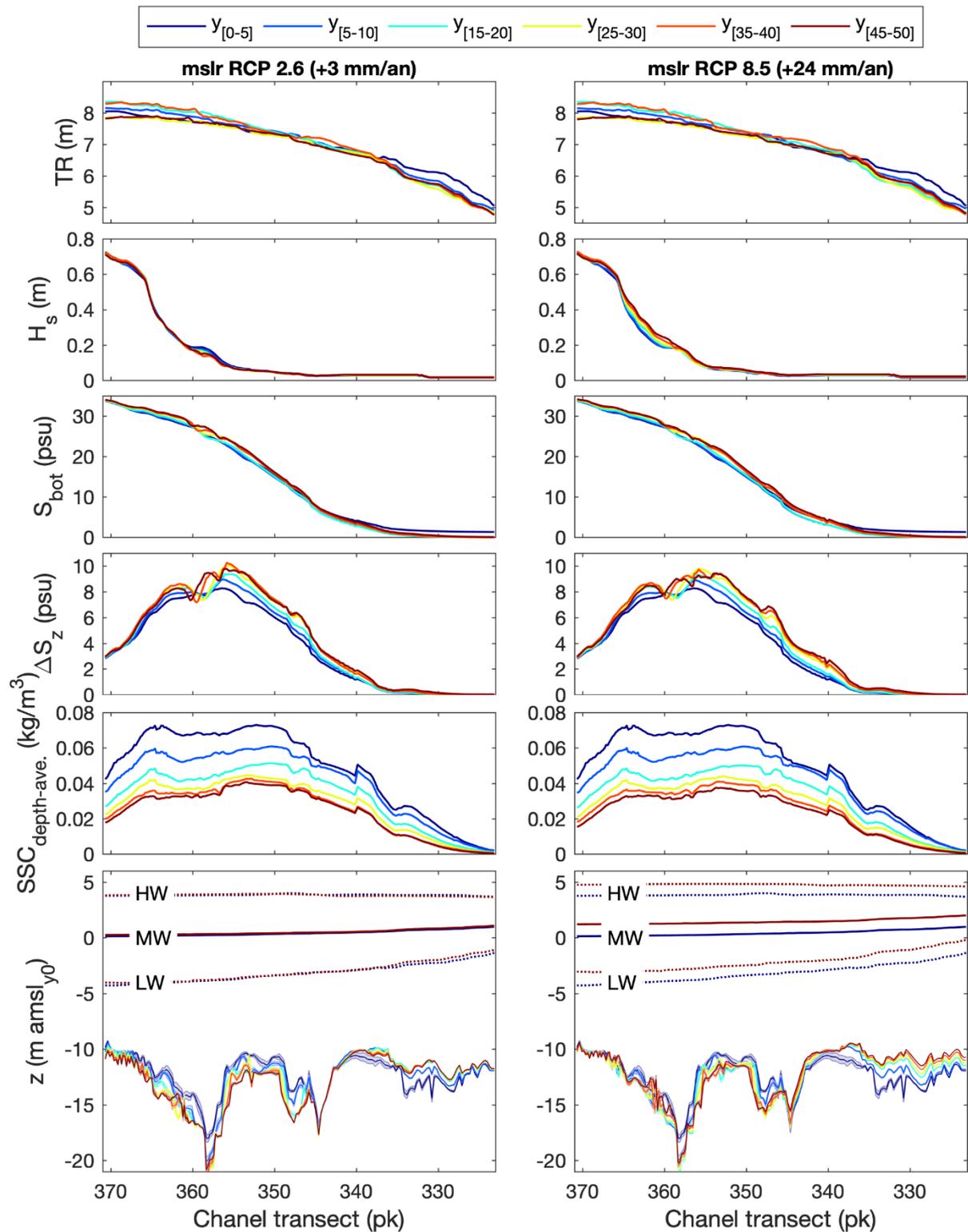


Figure 38 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long du chenal principal pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6 : +3 mm/an et (droite) RCP 8.5 : +24 mm/an. (De haut en bas) Marnage TR , hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

et Figure 38). En revanche, les vagues ayant des longueurs d'onde plus courtes sont davantage sensibles à la morphologie locale. Ainsi, l'augmentation de la profondeur dans le chenal principal se traduit par une propagation des vagues plus en amont dans l'estuaire pour le scénario RCP 8.5, entraînant une augmentation du H_s moyen (ex. +27% au $pk = 362$).

L'approfondissement du chenal et la montée du NM renforcent l'intrusion saline, se traduisant par une augmentation locale de quelques psu (ex. +2 psu au $pk = 350$) ou équivalent à un déplacement du coin salé d'environ 1 km vers l'amont. Alors que la « marinisation » de l'estuaire est accentuée par la montée du NM, ce n'est pas le cas du gradient vertical de salinité (caractéristique de la stratification et la circulation barocline associée) qui s'intensifie principalement avec l'approfondissement du chenal.

Malgré la remontée du coin salé et le renforcement de la stratification, les concentrations en MES sont plus faibles dans l'estuaire après 50 ans pour les deux scénarios de montée du NM. Cela semble principalement s'expliquer par la masse totale de MES dans l'estuaire aval qui diminue de 46% entre 2016 et 2066. A noter que la diminution des MES est la même pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5, comme illustré sur la Figure 38. Cela implique que le stock sédimentaire nécessaire à l'adaptation de l'estuaire observé pour le scénario RCP 8.5 (ex. forte accrétion des différentes zones de l'estuaire, Figure 35), ne vient pas significativement modifier la dynamique des MES (ex. bouchon vaseux). Ce même type de diminution des concentrations en MES a été observé sur les simulations rétrospectives (environ -40% sur 20 ans). Cette tendance est cohérente avec les résultats de la comparaison des concentrations de vase à Fatouville sur 10 ans pour différents facteurs d'accélération morphologique (Figure 26). Cependant, nous ne connaissons actuellement pas les raisons exactes de cette sous-estimation des MES lors de l'utilisation d'un *MF*. Il faut néanmoins relever que la diminution significative des MES sur 50 ans ne vient pas limiter la capacité d'adaptation de l'estuaire avec la montée du NM.

A noter que les mêmes types de comportements décrits ci-dessus sont observés sur les radiales du banc du Ratier et des vasières Nord (cf. Figure 66, Figure 67 et Figure 68 en Annexe 4).

En résumé, l'ensemble de ces résultats met en avant un point primordial : il est indispensable de considérer une modélisation avec couplage morphodynamique lorsque l'on veut simuler sur des temps long (>10 ans) des scénarios avec montée du NM. Malgré les faiblesses des modèles numériques, ces simulations morphodynamiques mettent en évidence que des systèmes morphosédimentaires estuariens peuvent s'adapter à la montée du NM à l'échelle de 50 ans.

4 Mesures *in situ* de la dynamique hydro-sédimentaire à l'embouchure de l'estuaire

Les travaux antérieurs (projet HYMOSED) ont mis en avant des incertitudes sur les bilans sédimentaires de l'embouchure liées au flux de sable (mais aussi de particules fines) venant de la baie de Seine. Ainsi, en accompagnement aux travaux de modélisation, des mesures *in situ* ont été réalisées à l'embouchure de l'estuaire dans le but d'analyser la variabilité des flux sédimentaires entre les zones Nord (bouée SCENES du réseau de mesures PHRESQUES) et Sud de l'embouchure (Station 1 'St1'), ainsi que la dynamique sédimentaire sur le banc du Râtelet (Station 2 'St2', Figure 39).

4.1 Méthode

Les mesures ont été réalisées par la société NORKETMED entre le 17 décembre 2018 et le 1^{er} mars 2019, en deux stations (Subtidal Sud Râtelet [station 1] et Banc du Râtelet [station 2] (Figure 39 et Tableau 2). Les mesures combinaient le déploiement de courantomètres (ponctuels ou profileurs) et de turbidimètres optiques, permettant l'évaluation conjointe des contraintes hydrodynamiques (vagues et courant) et d'un proxy de la concentration en matière en suspension (turbidité optique). Ces deux stations étaient complétées par les mesures de la bouée SCENES située à proximité du banc de la Carosse, au nord de l'embouchure.

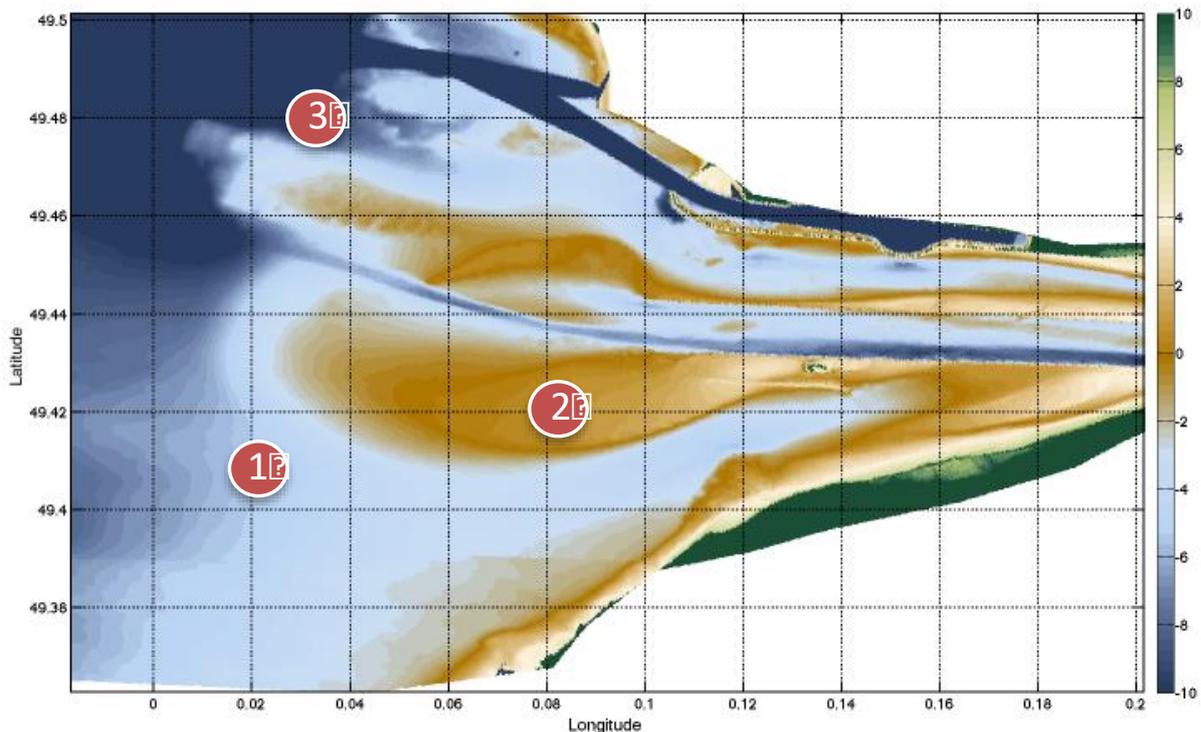


Figure 39 : Localisation des stations : 1 : Subtidal Sud Râtelet ; 2 : Banc du Râtelet ; 3 : SCENES. Données bathymétriques (élévation par rapport au niveau moyen de la mer) : GIPSA.

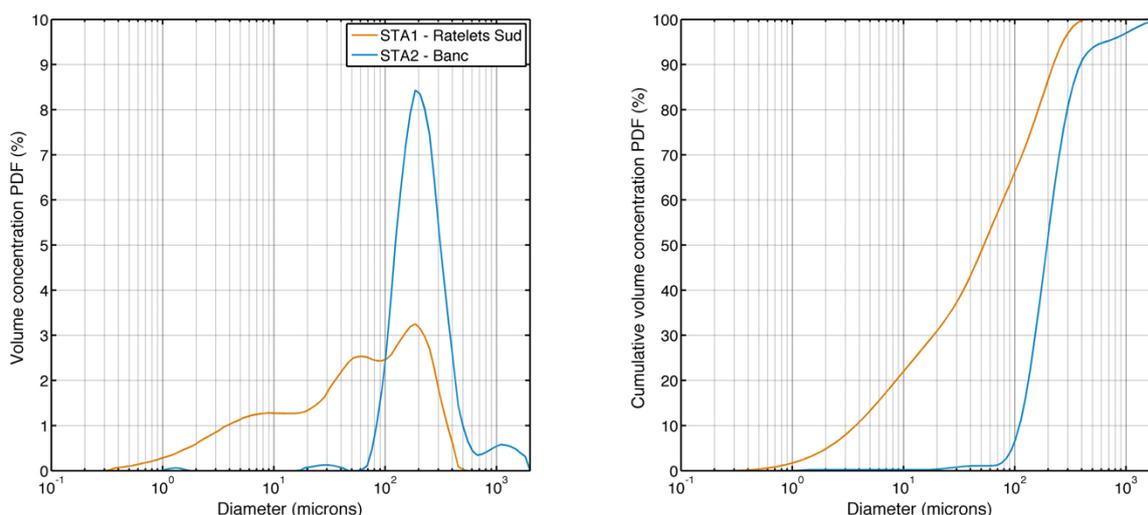


Figure 40 : Granulométrie des sédiments de fond à la station 1 (Subtidal Sud Râtelelet) et à la station 2 (Banc du Râtelelet).

Station 1 – Subtidal Sud Râtelelet

La station 1 est constituée d'un tripode équipé d'un ADCP Nortek Signature 1MHz, d'un turbidimètre optique à rétrodiffusion Wetlabs ECO NTUSB et d'une CTD Seabird SBE37 déployés par 10 m de profondeur (par rapport au niveau moyen de la mer) (Figure 41). Les sédiments sur site sont caractérisés par un mélange sable/vase (trois modes à 8 μm , 50 μm et 200 μm), et une proportion équivalente de vase (54%) et de sable (46%).

La tête de l'ADCP est localisée 50 cm au-dessus du fond. La première cellule de l'ADCP est située à 0,6 m de la tête (1,1 m du fond), et les cellules suivantes sont localisées tous les 0,5 m. Les profils de courant 3D et d'intensité acoustique rétrodiffusée sont mesurés toutes les 10 min, moyennés sur 1 min. Les caractéristiques de houle sont évaluées toutes les 30 min par salve de 4096 pings collectés à 4 Hz (soit 17 min de mesure).

Le turbidimètre optique et la CTD réalisent une mesure toutes les 10 min. La cellule de mesure du turbidimètre est co-localisée avec la première cellule de l'ADCP, soit à 1,1 m au-dessus du fond. La CTD est positionnée sur le corps du tripode, à 0,5 m au-dessus du fond.

Tableau 2 : Positionnement des stations de mesure et information sur les capteurs déployés.

Station	Instrumentation	Localisation	
		Longitude	Latitude
1 Subtidal Sud Ratelets	ADCP Nortek Signature 1MHz Turbidimètre Wetlabs ECO NTUSB CTD Seabird SBE37	0° 01.321' E	49° 24.470' N
2 Banc des Ratelets	ADV Nortek Vector 6MHz Turbidimètre Wetlabs ECO NTUSB	0° 04.998' E	49° 25.290' N
3 SCENES (données de fond uniquement)	ADCP Nortek AWAC 1MHz Turbidimètre Wetlabs ECO NTUSB CTD Seabird Coastal Hydrocat	0° 01.932' E	49° 28.844' N



Figure 41 : Equipement déployé à partir du tripode sur la station 1 : ADCP Signature au centre, CTD SBE37 sur un pied du tripode et turbidimètre Wetlabs ECONTU sur perche, cellule de mesure à 1,1 m au-dessus du fond.

Station 2 – Banc du Râtelet

La station 2 est située sur le banc du Râtelet, entre 0 et 1 m CMH, soit par 5-6 m de profondeur par rapport au niveau moyen de la mer (la station a été immergée très ponctuellement pour les marées de plus fortes VE de fin janvier et fin février 2019). Le site est sableux (>99%), avec un mode fortement dominant autour de 200 μm . Elle est équipée d'un courantomètre ponctuel ADV fixé sur une ancre à vis, tirant vers le bas et la cellule de mesure localisée à 0,21 m du fond au début du déploiement (Figure 42). Le turbidimètre Wetlabs est quant à lui fixé sur le pied vertical de l'ancre à vis, à une altitude proche de la tête de mesure de l'ADV.

L'ADV mesure ponctuellement et à haute fréquence les trois composantes du courant, l'intensité acoustique rétrodiffusée et la pression toutes les 10 min par salve de 2048 pings à 16 Hz (soit ~2 min de mesure). L'ADV fournit également via un traitement de l'intensité acoustique une estimation de la distance capteur-fond, selon un principe similaire à celui d'un altimètre acoustique.

Le turbidimètre Wetlabs ECONTU réalise une mesure toutes les 10 min.



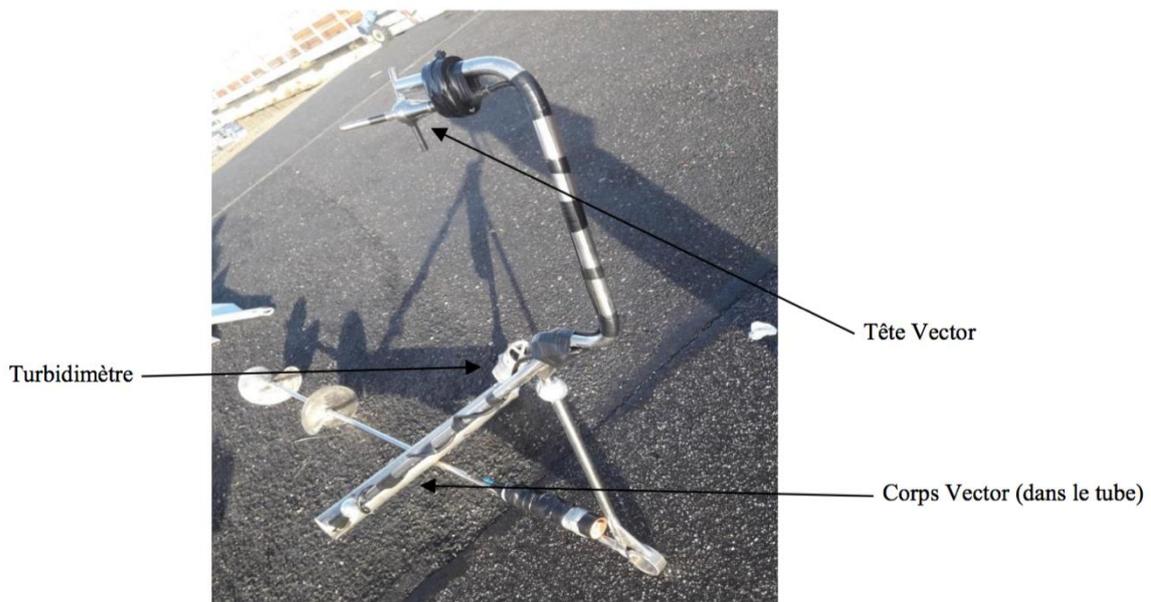


Figure 42 : Equipement déployé à partir de l'ancre à vis sur la station 2 : ADV Vector déporté, et turbidimètre Wetlabs ECONTU sur le pied vertical de l'ancre, tête vers le haut, cellule de mesure à une altitude proche de la tête de mesure de l'ADV.

Station 3 – Bouée SCENES

La bouée SCENES a été déployée depuis octobre 2017 à proximité du banc de la Carosse, au nord de l'Embouchure de l'estuaire dans le cadre du projet PHRESQUES et maintenu dans le cadre du SNO COASTHF. Le dispositif est constitué d'une bouée de surface instrumentée (station météo, capteurs de subsurface Wetlabs FLNTUSB (Turbidité et fluorescence), CTD Seabird Coastal HYDROCAT) et d'une station de fond équipée d'un ADCP Nortek AWAC 1MHz, d'un turbidimètre fluorimètre FLNTUSB et d'une CTD Seabird Coastal HYDROCAT (Figure 43). Seules les mesures de fond (AWAC et FLNTU) seront utilisées dans cette étude, car comparables aux mesures de la station 1.

Les profils de courant et d'intensité acoustique rétrodiffusée sont mesurés toutes les 30 min, moyennés sur 55 s. La première cellule de l'AWAC est située à 1,4 m au-dessus du fond (0,9 m au-dessus du capteur), et les cellules sont ensuite espacées de 0,5 m. Les vagues sont mesurées toutes les heures, sur la base de salves de 1024 pings à 1 Hz.

Le turbidimètre réalise une série de 5 mesures à 1 Hz toutes les 30 min. La turbidité médiane pour chaque salve est ensuite retenue.

Les données de la station 3 seront uniquement utilisées pour comparer les flux solides de fond avec ceux de la station 1.

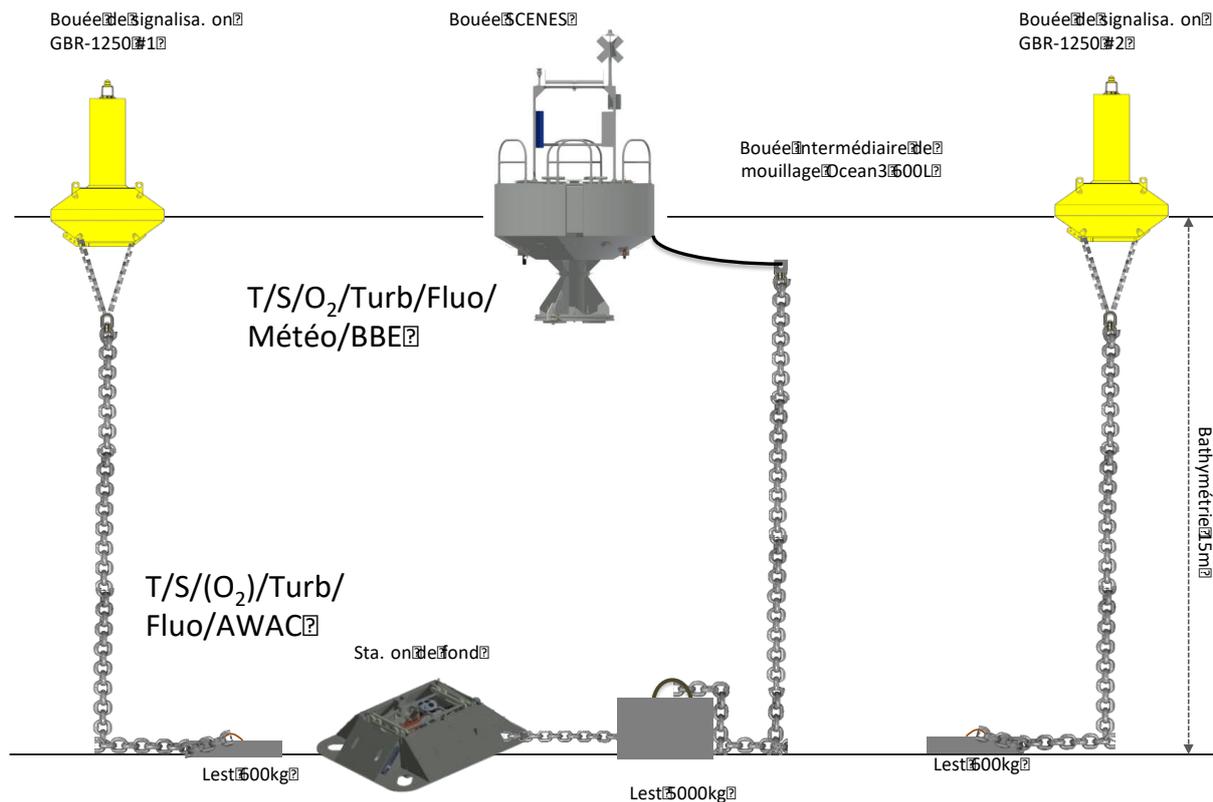


Figure 43 : Description des ensembles de mesure composant la station SCENES (bouée de surface et station de fond).

Calcul des contraintes de cisaillement

Les données de courant et de vagues sont utilisées pour estimer les contraintes de cisaillement, qui pourront remettre en suspension les sédiments.

Les contraintes de cisaillement générées par le courant τ_c sont quantifiées en utilisant la vitesse mesurée le plus proche du fond à l'altitude $u(z)$ ($z = 1,1$ m pour la station 1, entre 0,05 et 0,2 m pour la station 2, et 1,4 m pour la station 3) et une rugosité $z_0 = 0,0005$ m, identique à celle utilisée dans le modèle MARS3D-MUSTANG *CurviSeine*.

La contrainte de cisaillement est alors estimée de telle sorte que :

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

et

$$\tau_c = \rho u^{*2}$$

Les contraintes de cisaillement générées par les vagues sont quant à elles calculées à partir des mesures de houle (H_s , T_p) tel que :

$$U_b = \frac{\pi H_s}{T_p \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

avec U_b la vitesse orbitale (m/s), h la hauteur d'eau (m) et L la longueur d'onde des vagues.

$$A = \frac{U_b T_p}{2\pi}$$

avec A l'excursion sur le fond (m), utilisé pour calculer le facteur de frottement f_w [Soulsby, 1997] :

$$f_w = 1.39 \left(\frac{A}{z_0} \right)^{-0.52}$$

permettant finalement de calculer la contrainte de frottement induite par les vagues τ_w :

$$\tau_w = \frac{\rho}{2} f_w U_b^2$$

4.2 Analyse de la qualité des données collectées

Les instruments ont été entièrement fonctionnels durant la période de mesure, quel que soit la station considérée. Toutefois la qualité des données enregistrées n'est pas homogène par instrument. Les données ADCP AWAC de la station 3 (SCENES, courant, vagues et intensité acoustique) sont de bonne qualité et peuvent être utilisées sans réserve. Les données ADCP Signature de la station 1 sont très globalement de bonne qualité, seuls quelques profils de courant peuvent se trouver parfois partiellement non qualifiés. Dans ce cas, la dernière valeur bonne du profil est arbitrairement rapportée sur l'ensemble du profil. Par contre, les données d'intensité acoustique montrent une saturation des premières cellules, ne les rendant pas exploitables pour calculer le profil vertical de concentration en MES.

Le courantomètre ADV Vector présente lui une très forte hétérogénéité de la qualité des mesures (courant et intensité acoustique), du fait d'une accrétion de sédiments au droit du capteur visible sur l'altimétrie (Figure 44). En parallèle de cette accrétion, les vitesses de courant observées diminuent, la corrélation du signal baisse, témoignant d'un rapprochement de la cellule de mesure près du fond, voir se trouvant dans le sédiment. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons les données qualifiées et validées pour l'ADV, i.e. sur la période comprise entre le 17 décembre 2018 et le 20 janvier 2019.

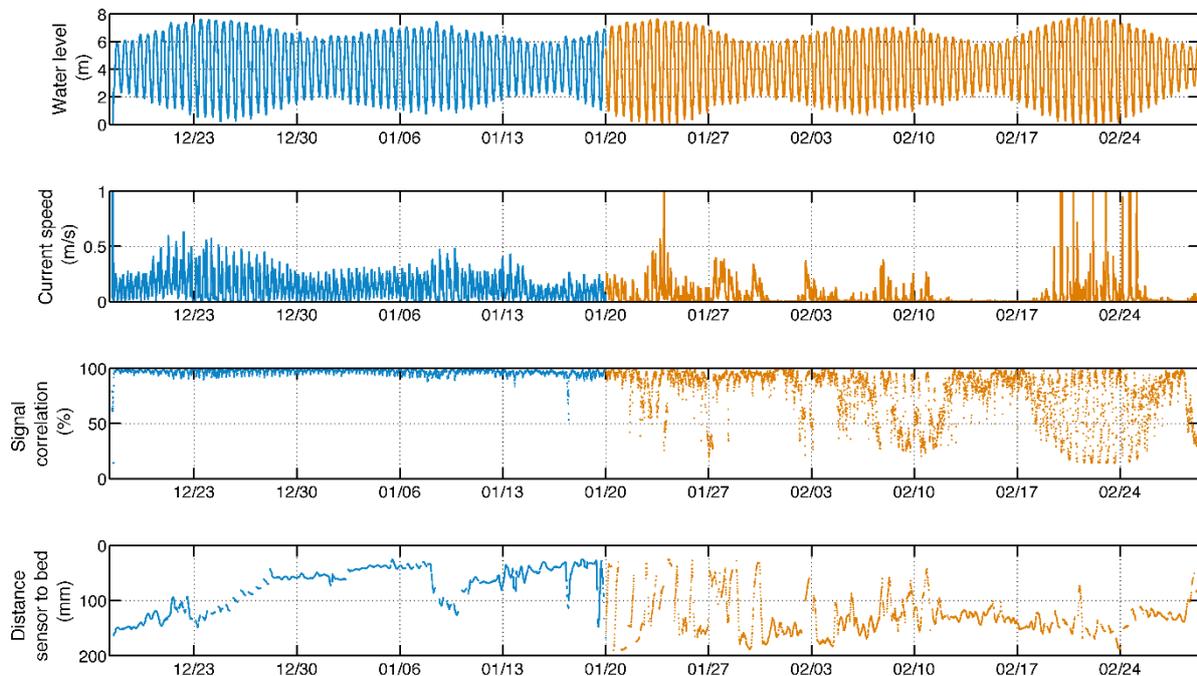


Figure 44 : Données de hauteur d'eau, de courant, de pourcentage de corrélation du signal, de la distance capteur/fond mesurées par l'ADV en station 2. Les données bleues sont considérées qualifiées et validées, les données orange sont exclues de l'analyse.

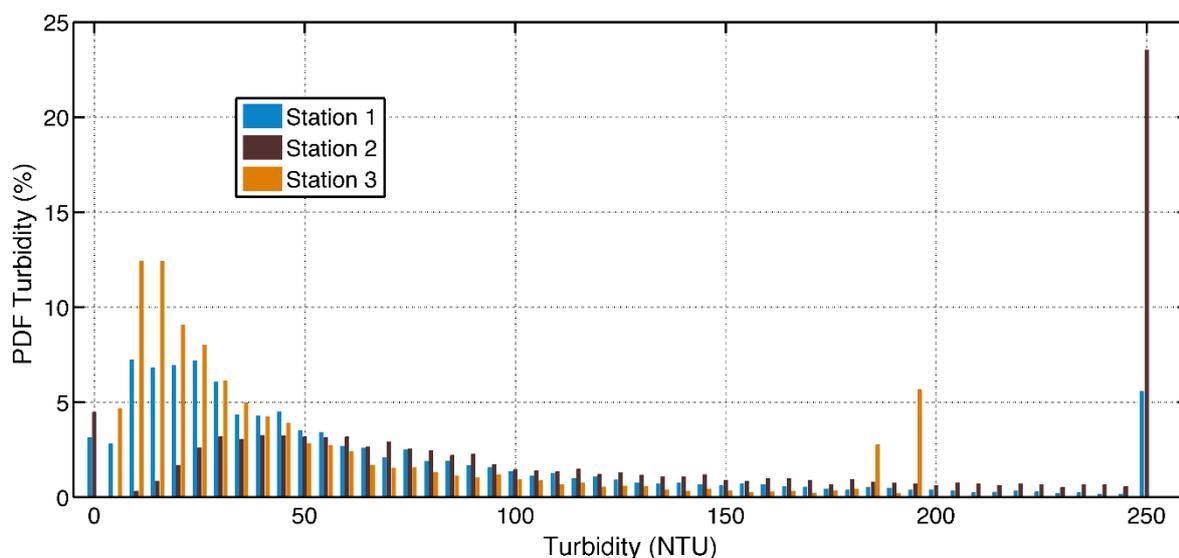


Figure 45 : Distribution des mesures de turbidités par gamme de turbidité pour les trois stations de mesure : mise en évidence de la saturation partielle des capteurs optiques.

La dernière critique vis-à-vis des données collectées provient des turbidimètres, et plus précisément de leurs gammes de mesures. Les turbidimètres travaillent sur une plage de mesure de la turbidité entre 0 et 250 NTU (ou 200 NTU - SCENES), et pour les stations 1 (Subtidal Sud Râtelet), 3 (SCENES) et surtout la station 2 les turbidimètres ont saturé. Lors de ces périodes, les valeurs de turbidité sont donc sous estimées. Pour les stations 1 et 3, le taux de valeurs saturées reste faible, inférieur à 10% sur la période d'étude. Pour la station 2, le taux de données saturées atteint presque 25% (Figure 45).

L'interprétation de ces données saturées est forcément délicate. Elle n'est pas gênante pour l'analyse de séries temporelles des chroniques brutes, mais pourra provoquer des sous-estimations de flux cumulés ou de certains indicateurs.

4.3 Résultats

Conditions hydrométéorologiques

La figure suivante présente les conditions hydrométéorologiques de la période d'étude (Figure 46), qui recouvre 5 cycles complets VE/ME. Le débit de la Seine est relativement stable entre le 17 décembre et fin janvier, oscillant autour de 400 m³/s avec un petit rebond entre le 23 et le 30 décembre atteignant 600 m³/s. Une petite crue est observée en fin de période, sur les trois premières semaines de février, avec un pic autour de 900 m³/s.

La période de mesure a permis d'enregistrer une très grande diversité de conditions de houle. Une première tempête se produit entre le 20 et le 24 décembre 2018 (H_s jusqu'à 2 m), puis les conditions se calment jusqu'à début janvier, où une série de tempêtes vont se succéder entre le 8 janvier 2018 et le 12 février 2018 : [08/01-10/01], [12/01-15/01], [17/01], [22/01-24/01], [26/01-29/01 – Tempête Martin], [30/01], [02/02-05/02], [07/02-12/02]. L'événement de tempête du 26 au 29 janvier est particulièrement à noter car il est associé à des vagues (H_s) supérieures à 3 m et un H_{max} de près de 6 m. La période du 13 février au 1^{er} mars est exempte de tempête, sur un cycle VE/ME complet, mais une petite houle longue est observée.

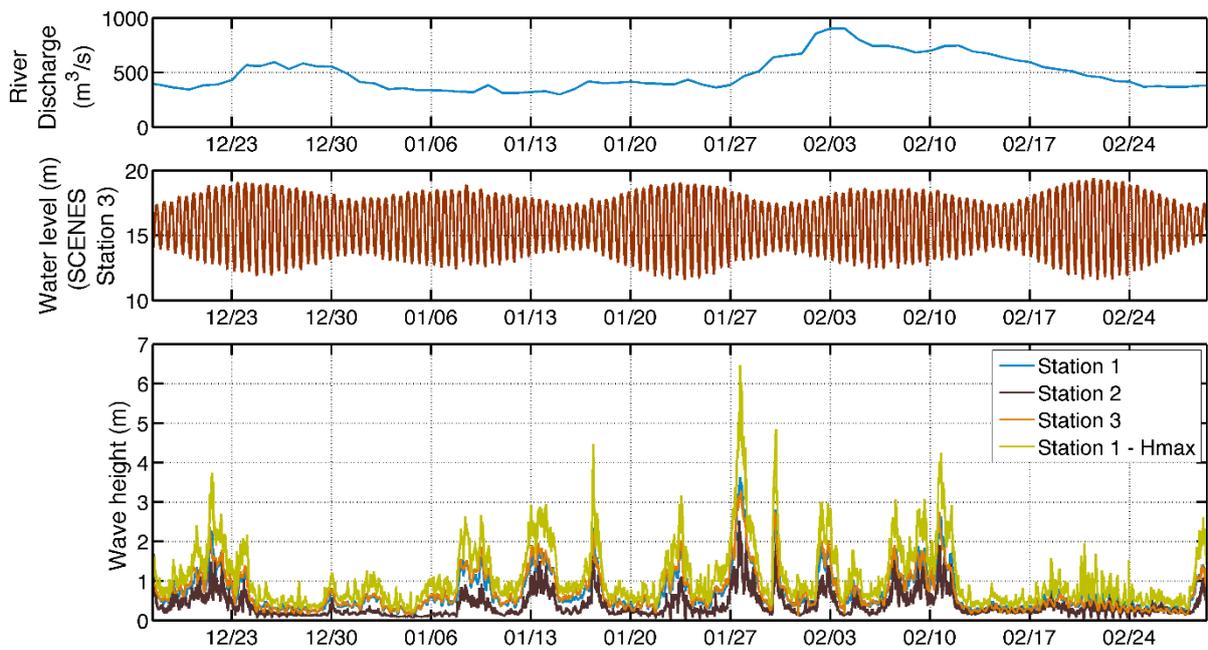


Figure 46 : Conditions hydrométéorologiques sur la période de mesure (17 Décembre 2018-01 mars 2019). Les vagues sont celles enregistrées aux trois stations (H_s) tandis que les vagues maximales sont présentées uniquement pour la station 1.

Station 1

Dynamique générale

Le courant de marée intégré sur la profondeur est fortement modulé par le cycle VE/ME et varie de moins de 0,4 m/s en flot de ME pour atteindre 1 m/s en VE (Figure 47), orienté Est à Sud-Est (Figure 48). A l'échelle tidale, on peut noter une forte asymétrie du courant de marée entre flot (jusqu'à 1 m/s) et jusant (inférieur à 0,7 m/s). Les tempêtes et en particulier celle du 27-28 janvier impactent la dynamique du courant, avec pour cet épisode particulier une intensification des courants de jusant jusqu'à atteindre 1 m/s (Figure 50).

La contrainte de cisaillement sur le fond induite par le courant suit une dynamique similaire, avec des valeurs pouvant atteindre 1,5 N/m² en VE et inférieures à 0,2 N/m² en ME. Elle reste toutefois très inférieure aux valeurs de contraintes de cisaillement générées par les vagues, qui dépassent pour les différents épisodes de houle 1 N/m², et atteignant 10 N/m² lors de la tempête Martin du 27/28 janvier 2019.

La turbidité de fond varie de quelques NTU à pleine mer de ME jusqu'à atteindre 250 NTU, valeur de saturation du capteur, en flot de VE et lors des épisodes de tempêtes (Figure 47 et Figure 51). La turbidité est fortement corrélée au courant de marée, avec des valeurs plus importantes en flot qu'en jusant et également plus importantes en VE (jusqu'à 250 NTU) qu'en ME (inférieure à 50 NTU). La turbidité à pleine mer est inférieure à 25 NTU, tandis qu'à BM elle reste plus élevée, entre 25 et 50 NTU en ME, et de l'ordre de 100 NTU en VE. Cette corrélation avec les courants de marée se retrouve bien marquée en analysant la dépendance de la turbidité instantanée aux valeurs de contrainte de cisaillement (courant et vagues) illustrée Figure 49. Un très fort gradient de turbidité est observé en lien avec les contraintes de courant, avec une augmentation significative de la turbidité lorsque la contrainte de courant

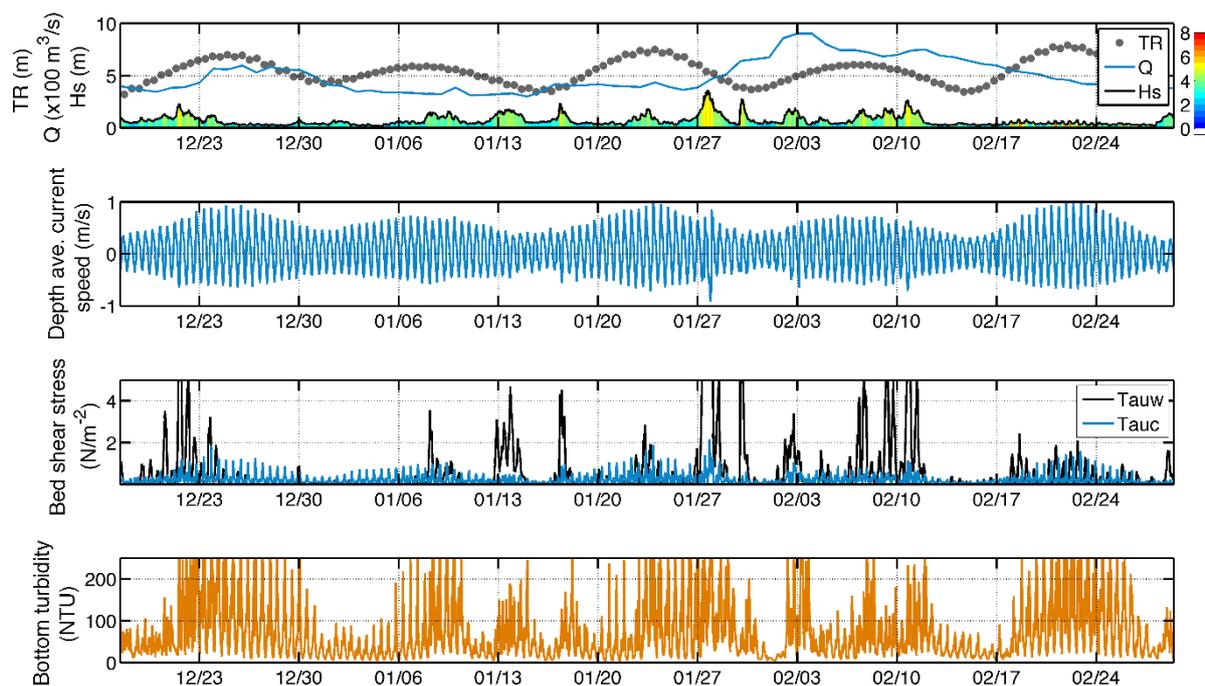


Figure 47 : Observations hydro-sédimentaires à la station 1 sur la période de mesure. L'échelle de couleur du panneau 1 correspond à la période des vagues mesurées.

dépasse $0,2 \text{ N/m}^2$. Qualitativement les contraintes de vagues induisent en moyenne une augmentation de la turbidité similaire, mais associée à une amplitude significativement plus faible (en général inférieure à 100 NTU malgré des contraintes dépassant 1 N/m^2) notamment en période de courant faible.

Il doit être noté que les passages d'épisodes de houle sont associés à l'échelle subtidale à des augmentations de la turbidité, en particulier lors des épisodes de ME (Figure 47 et Figure 50). Toutefois, cette augmentation reste proportionnelle à la dynamique intratidale : la turbidité reste corrélée à M4 (maximum de turbidité en flot, moyenne en jusant, minimale aux étales), et modulée par les épisodes de houle.

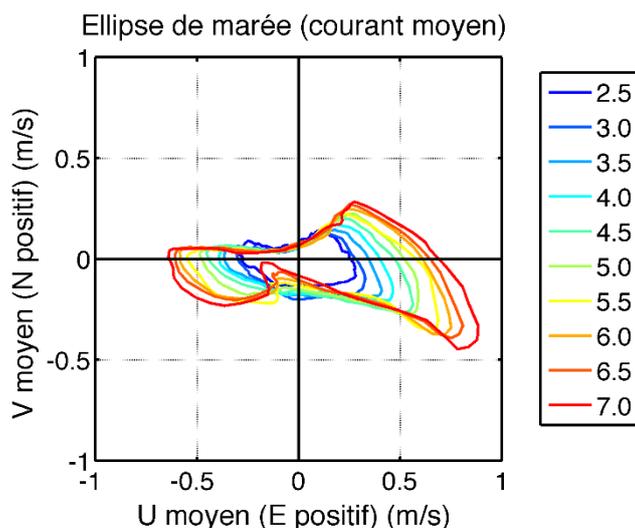


Figure 48 : Ellipse de marée associée au courant moyenné sur la profondeur à la station 1 par classe de marange (échelle de couleur).

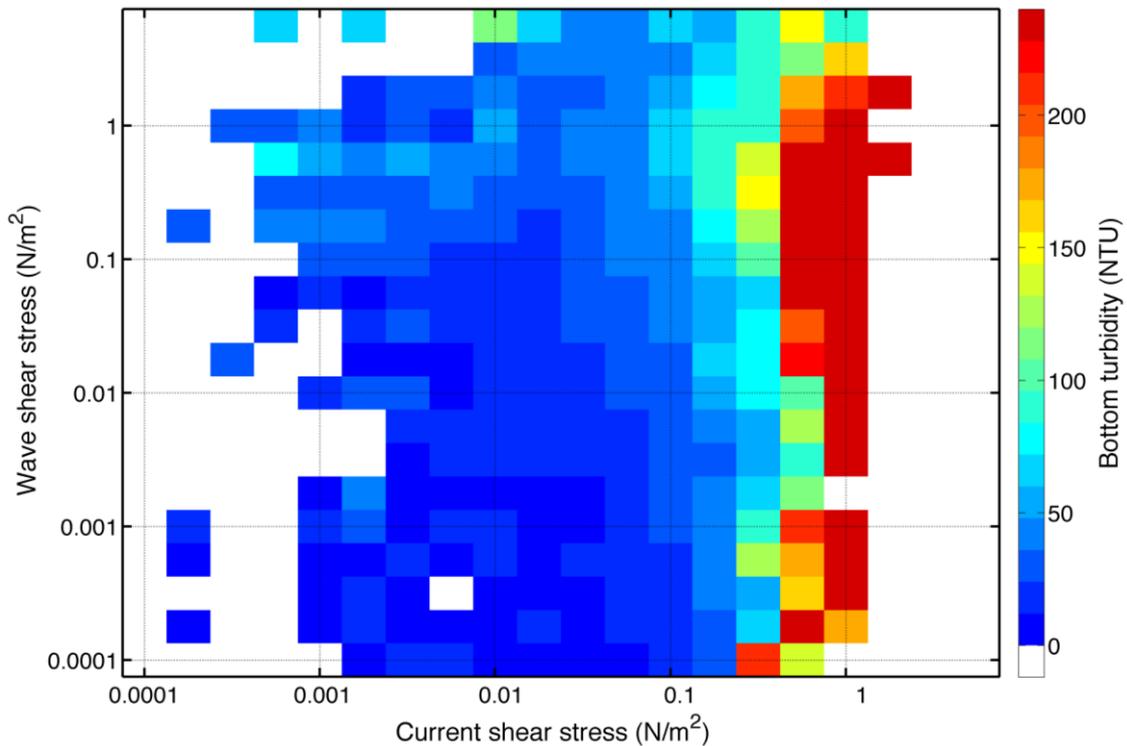


Figure 49 : Influence des contraintes de courant et de vagues sur la turbidité de fond à la station 1.

Influence des vagues

Afin de quantifier plus précisément l'influence des vagues, nous avons quantifié l'anomalie de turbidité, i.e. la différence entre la turbidité mesurée et la turbidité moyenne attendue pour un marnage donné. Cette donnée moyenne, que l'on peut associer à une climatologie intratidale, a été calculée à partir des observations par temps calme, i.e. du 25 décembre 2018 au 6 janvier 2019 et du 13 février au 1^{er} mars 2019 (Figure 51).

La Figure 52 présente la variabilité haute fréquence de l'anomalie de turbidité. Lors des périodes de temps calme, les anomalies sont faibles par construction. On observe toutefois des anomalies négatives en revif et positives en déchet, du fait de l'inertie des processus sédimentaires (érodabilité favorisée des sédiments fraîchement remobilisés aux marées précédentes et sédimentation lente des MES), comme déjà observé dans la zone du bouchon vaseux [Grasso *et al.*, 2018]. Cette anomalie négative en revif est également observée pour la période entre le 20 et le 25 janvier 2019.

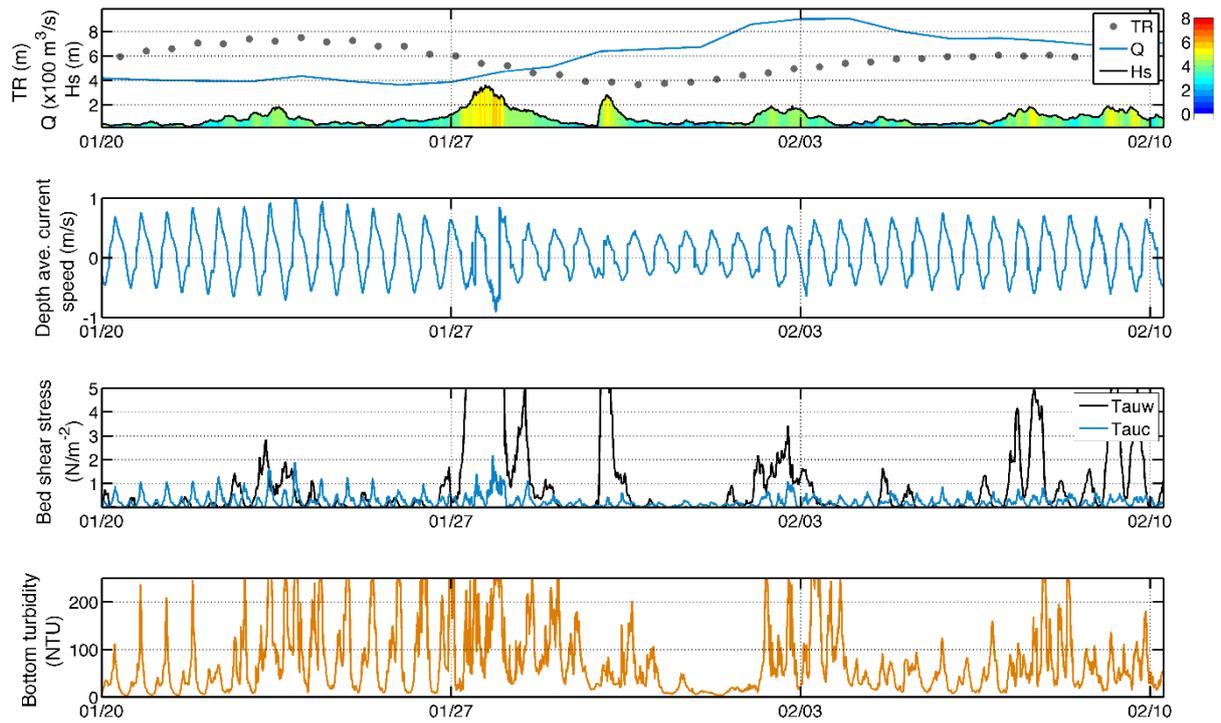


Figure 50 : Zoom sur la période tempétueuse de janvier/février 2019

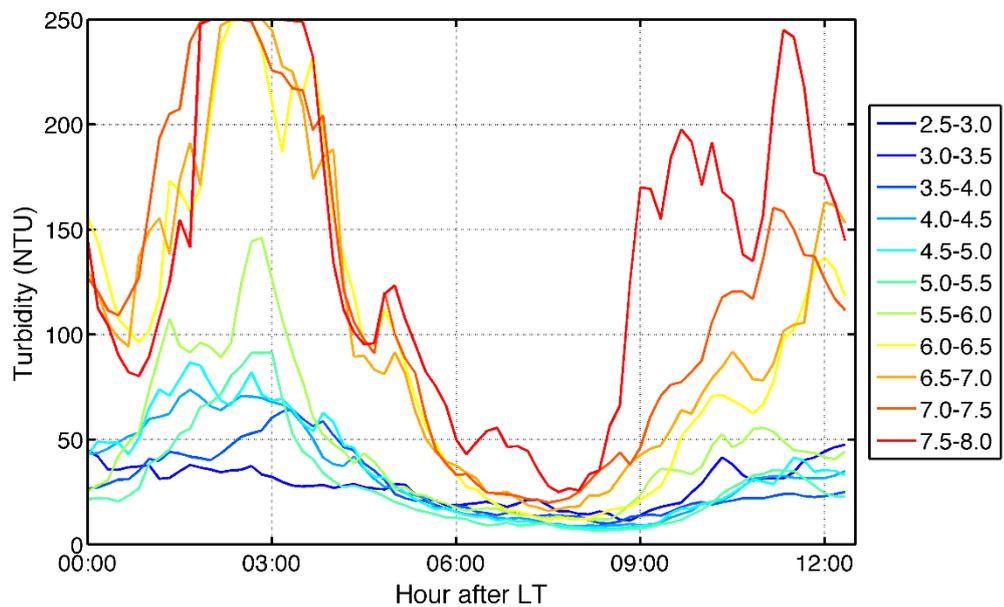


Figure 51 : Dynamique tidale moyenne de la turbidité de fond par classe de marnage à la station 1 et en absence de vagues (intégrant les périodes du 25 décembre 2018 au 6 janvier 2019 et du 13 février au 1^{er} mars 2019).



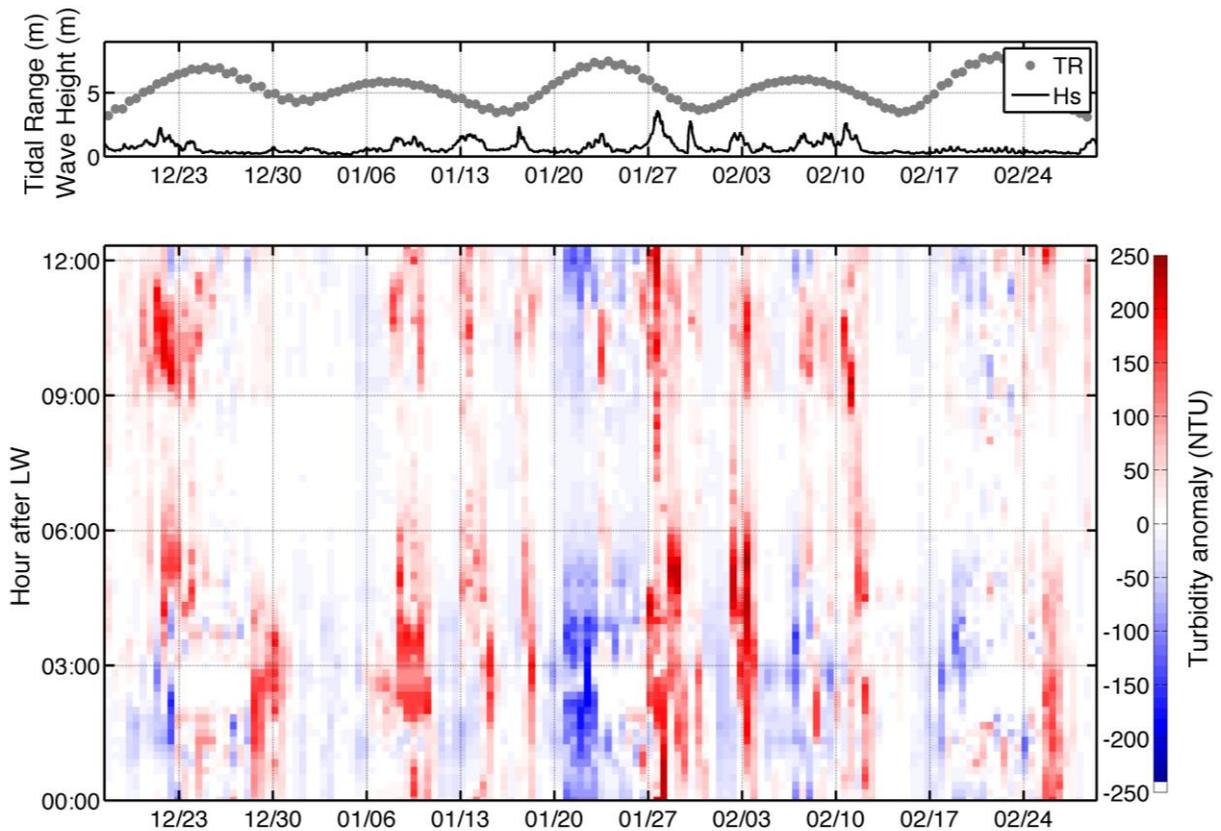


Figure 52 : Anomalie de turbidité mesurée à la station 1 (signal brut – signal moyen par classe de marnage).

L'analyse des anomalies permet surtout de mettre clairement en avant l'influence des épisodes de houles sur la turbidité, avec des anomalies positives pour tous les événements observés (Figure 52). La Figure 53 illustre plus précisément cet effet en présentant la chronique des anomalies moyennes par cycle de marée centrée sur la période tempétueuse du 6 janvier au 14 février 2019. La comparaison de cet indicateur des anomalies de turbidité avec le percentile 90 de la contrainte de cisaillement de vague par marée montre effectivement une bonne corrélation entre les deux paramètres, indiquant le rôle des vagues sur le transport sédimentaire à cette station.

On peut toutefois noter que ces anomalies perdurent au-delà des épisodes de houle forte, traduisant ici encore une inertie des remises en suspension induites par les vagues. Cette inertie temporelle a été examinée en comparant les anomalies de turbidité de la marée T aux statistiques de contrainte de vagues (ici le percentile 90) sur des périodes d'intégration croissantes : la marée T considérée, de la marée précédente à la marée considérée [T-1 ; T], et ainsi de suite jusqu'à considérer les 5 dernières marées [T-5 ; T] (Figure 53 et Figure 54). Ainsi en moyenne, l'effet des tempêtes se fait ressentir sur les deux marées suivant l'événement. Sur cette période d'intégration, les contraintes de vagues sont maximales pour les anomalies positives de turbidité.

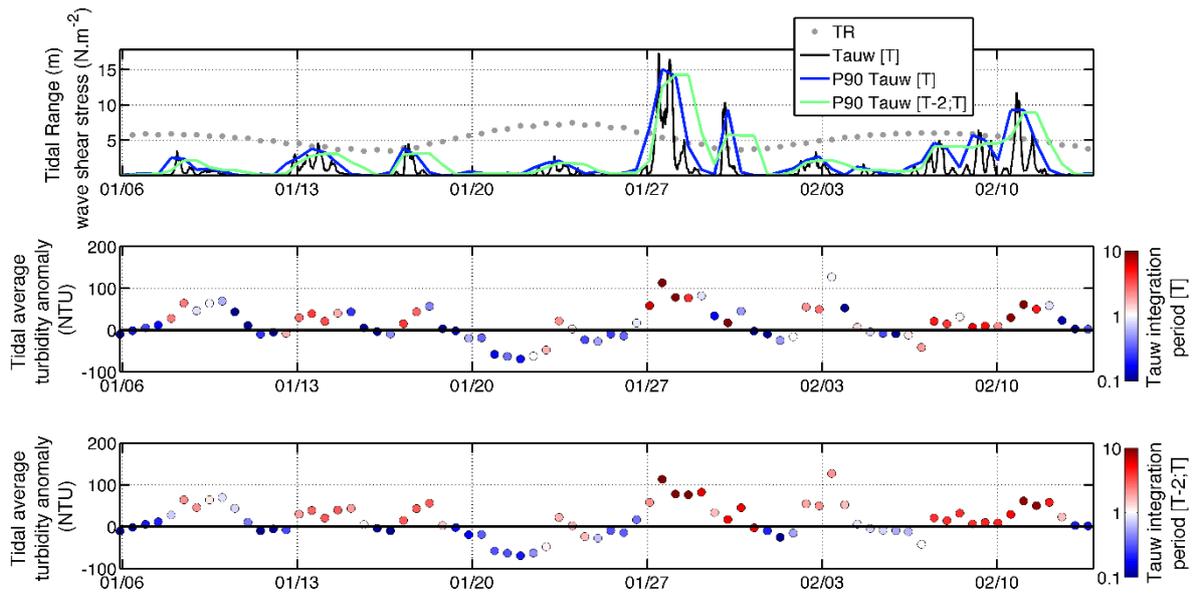


Figure 53 : Relation entre contraintes de vague et anomalie de turbidité : analyse de la période d'influence des épisodes de vagues.

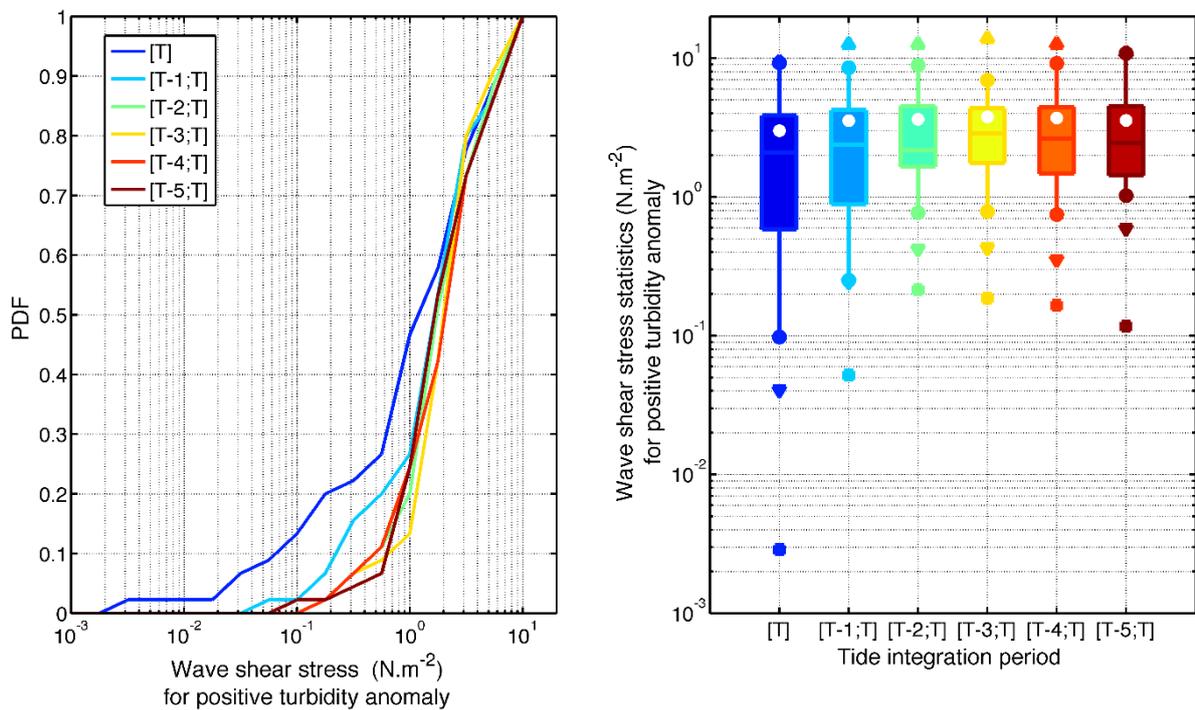


Figure 54 : Analyse statistique des contraintes de vague pour des anomalies positives de turbidité en fonction de la période d'intégration des vagues, de la marée T à la marée T-5.

Flux solides au-dessus du fond

La saturation de l'intensité acoustique mesurée par l'ADCP sur les trois premières cellules ne permet pas d'estimer la concentration en MES sur l'ensemble de la colonne d'eau et donc le flux intégré sur la profondeur. Toutefois, le flux solide au-dessus du fond peut être estimé en combinant la mesure du courant à la première cellule de l'ADCP et la concentration en MES obtenue à partir du turbidimètre optique. Les quelques prélèvements réalisés au déploiement et à la récupération des instruments n'ont pas permis d'établir une relation de calibration fiable. Cependant, les turbidimètres utilisés lors de la campagne de mesure sont identiques aux turbidimètres déployés lors des campagnes PHRESQUES et équipant la bouée SCENES. La calibration issue de ces travaux est alors réutilisée pour quantifier la concentration en MES (C_{MES} , en g/l), tel que :

$$C_{MES} = 0.00155 \text{ NTU}$$

Une méthode identique est utilisée pour quantifier les flux de fond à la bouée SCENES (station 3) pour comparaison (Figure 55). Les flux solides cumulés sont dirigés vers l'Est, donc vers l'estuaire, pour les deux stations. Cependant, les flux solides sont 5 fois plus importants en station 1, dans le sud de l'embouchure, qu'en station 3, dans le secteur nord. Ces résultats sont qualitativement en accord avec les simulations réalisées par Schulz *et al.* [2018], même si les flux sont alors intégrés sur une section complète.

Les flux solides n'augmentent pas de façon monotone mais fluctuent en fonction du forçage tidal et des conditions météorologiques (Figure 56). Les flux sont plus importants en VE qu'en ME, et l'inertie à l'échelle du cycle VE/ME déjà observé sur les concentrations en MES se retrouvent dans les calculs de flux par marée, avec un flux entrant plus important en déchet qu'en revif. Les vagues, en contribuant à maintenir en suspension les sédiments, tendent à limiter les flux vers l'amont. Dans certaines conditions le flux vers l'estuaire en période de tempête est plus important qu'en période de temps calme (ex. le flux maximal observé), mais cette marée correspond également à la période de pic de débit, qui augmente la stratification à l'embouchure et peut ainsi contribuer à intensifier la circulation de densité, et donc les flux au fond vers l'estuaire.

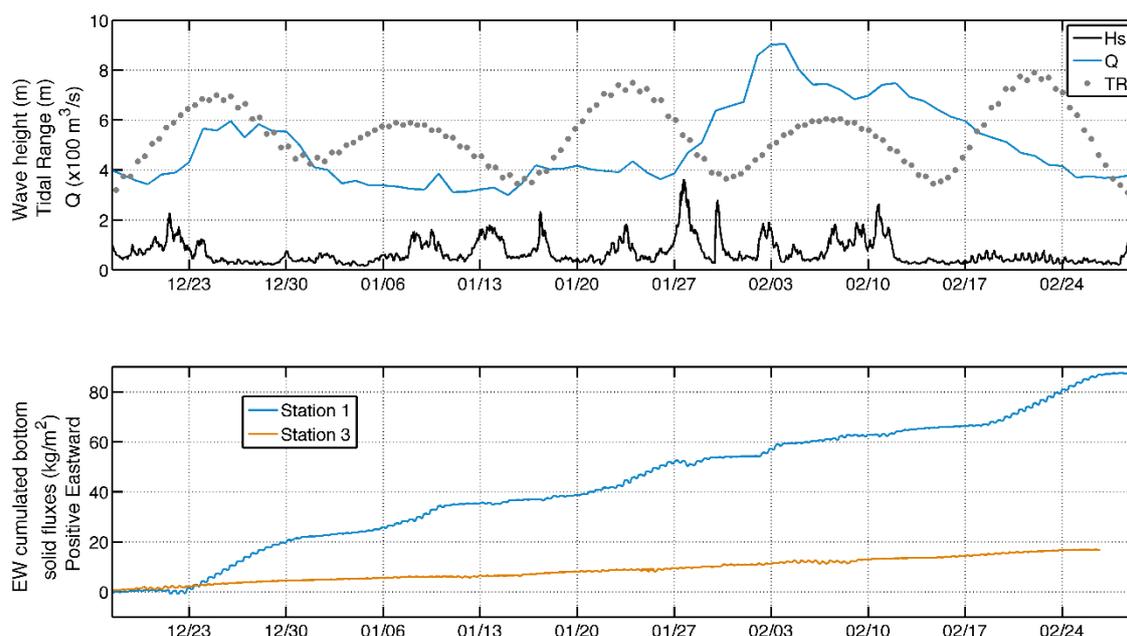


Figure 55 : Flux solides cumulés de fond (première cellule des ADCPs) aux stations 1 et 3.



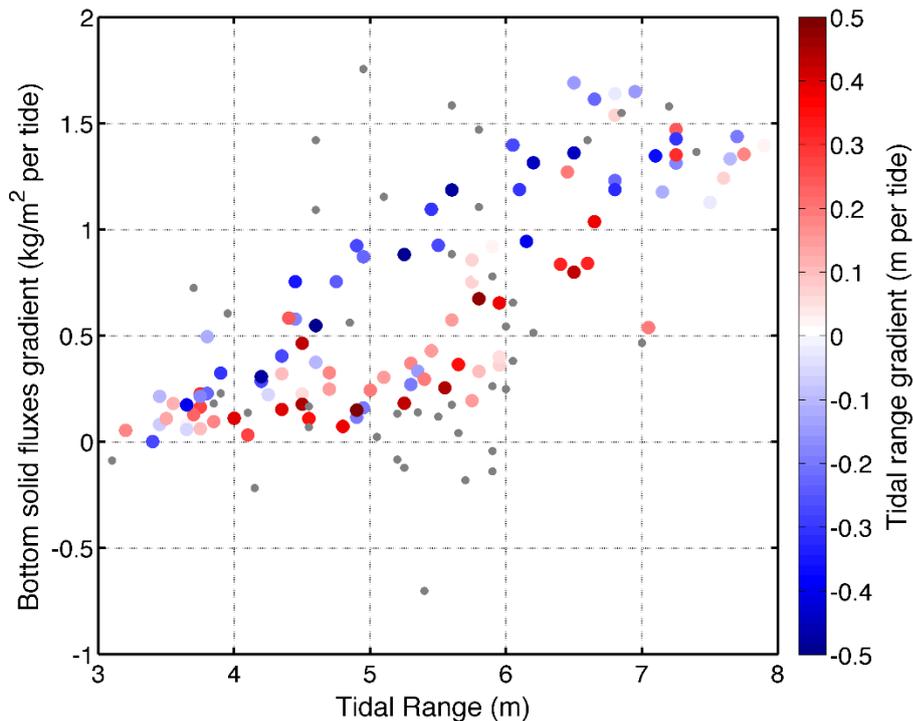


Figure 56 : Relation entre flux solides cumulés de fond par marée et forçage tidal (marnage et gradient de marnage) à la station 1. Les points gris représentent les flux en période de houle (P90 H_s par marée >1 m).

Station 2

Dynamique générale

De façon très similaire à la station 1, le courant de fond à la station 2 est maximal au flot de VE et minimal à la fois aux étales et en ME (Figure 57). Toutefois, il faut se rappeler que le site est en accrétion, et l'altitude de la cellule de mesure se rapproche du fond en fin de déploiement, ce qui explique les plus faibles valeurs de vitesse au second cycle VE/ME (Figure 58). Ces différences sont significativement atténuées pour les contraintes, le calcul de la vitesse de frottement prenant en compte l'élévation de la mesure de courant au-dessus du fond sédimentaire.

La contrainte de cisaillement de courant varie entre $1,5 \text{ N/m}^2$ en VE et $0,5 \text{ N/m}^2$ en ME. Les contraintes de vague sont significativement plus importantes, variant entre 2 et 8 N/m^2 , et sont maximales autour de la basse mer, du fait des faibles hauteurs d'eau.

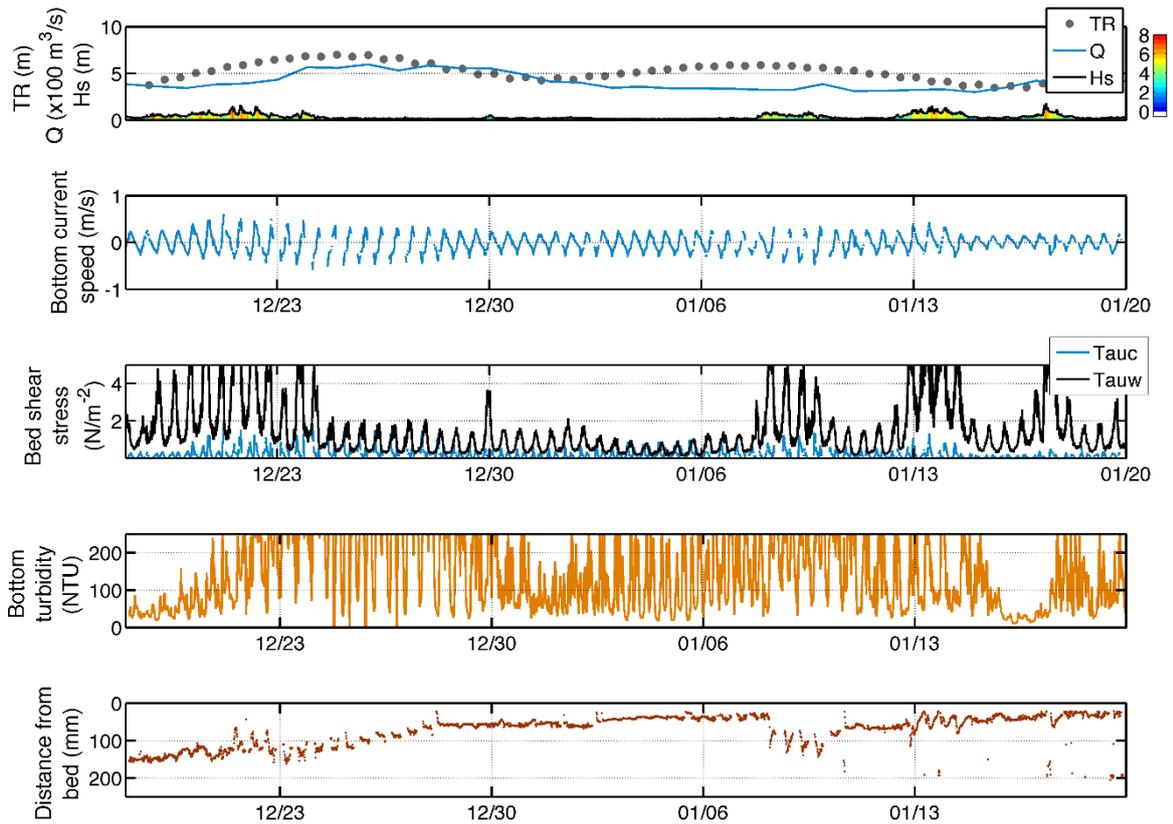


Figure 57 : Observations hydro-sédimentaires à la station 2 sur la période de mesure. L'échelle de couleur du panneau 1 correspond à la période des vagues mesurées.

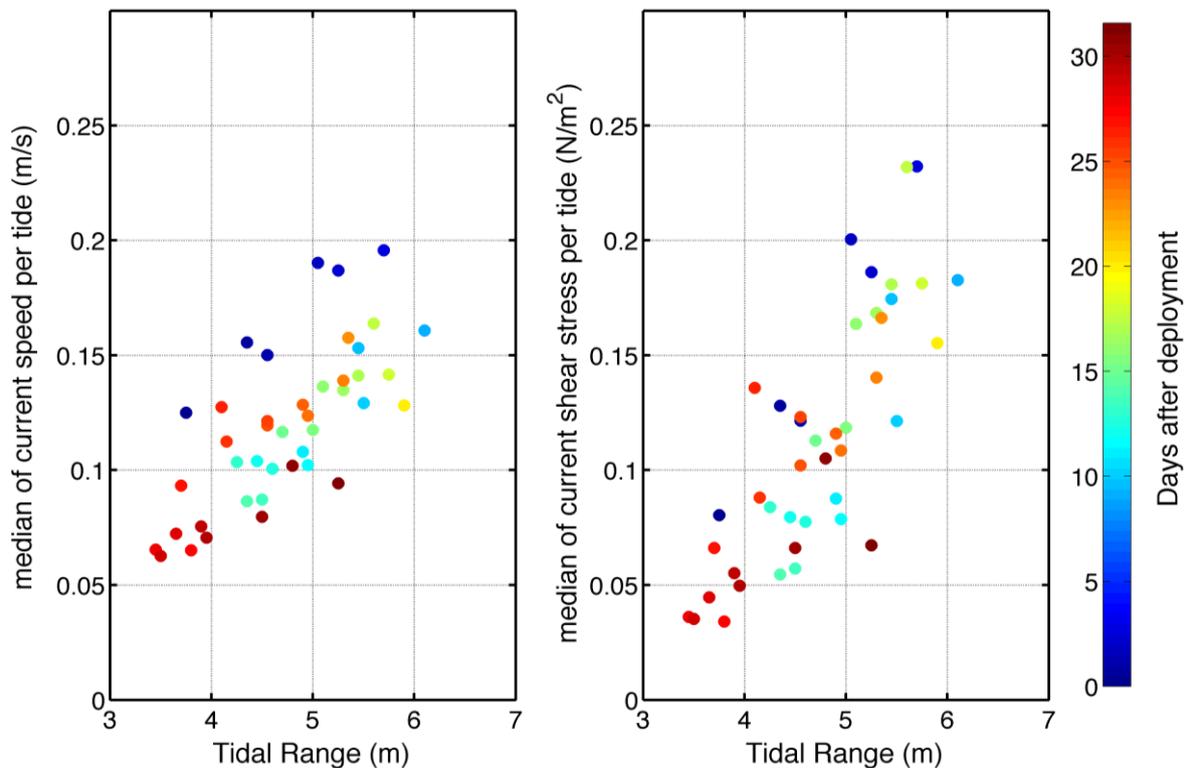


Figure 58 : Relation entre marnage et la médiane de la vitesse du courant par marée (gauche) et entre marnage et contrainte de cisaillement du courant (droite). Le gradient de couleur représente le temps en jour depuis le déploiement.

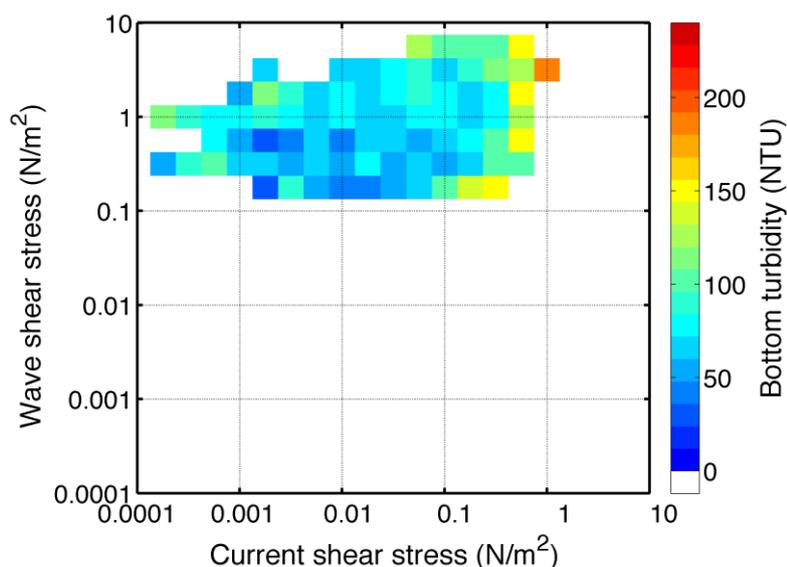


Figure 59 : Influence des contraintes de courant et de vagues sur la turbidité de fond à la station 2.

Comme pour la station 1, la turbidité est contrôlée par la marée, avec une très forte corrélation entre contrainte de courant et turbidité (Figure 59). Le lien avec la contrainte de vague est plus ténu : certains épisodes de vagues (16-24 décembre, 13-18 janvier) ne sont pas marqués par des fortes turbidités, comparativement aux périodes de courant de VE ou à l'épisode de vagues du 8 au 10 janvier. Ces faibles turbidités peuvent s'expliquer par une variabilité de la nature des MES. Ce point sera discuté ci-après.

Les premières tempêtes sont associées à un bilan relativement stable des processus d'érosion/dépôt et de l'altimétrie. Suite à cet événement, pendant la VE et en lien avec de très fortes turbidités, un dépôt rapide se crée de près de 10 cm. Pendant la ME suivante, l'altimétrie du sédiment reste stable, et augmente très légèrement pendant la petite VE. La tempête du 8 au 10 janvier érode le dépôt frais en quelques marées. La période suivante enregistre une accrétion lente de près de 5 cm, avec des variations rapides de l'interface sédimentaire au moment des tempêtes de mi et fin janvier.

Au-delà des variations altimétriques de l'interface sédimentaire, la question se pose de la nature des sédiments en suspension, déposés ou érodés. Au début du déploiement, le prélèvement de sédiment a montré que le sédiment de surface était majoritairement sableux. Toutefois, le dépôt sédimentaire se produit lors de la VE, lorsque le signal de turbidité est fort (saturation du capteur optique sur la majorité de la VE), ce qui traduirait la présence d'une source de sédiments fins, qui pourrait alimenter le dépôt. Afin de tenter d'apporter une réponse qualitative à la nature des sédiments en suspension au cours de la période de mesure, nous allons utiliser l'analyse combinée des signaux optiques (turbidimètre) et acoustique (ADV).

Cette méthode repose sur la sensibilité différenciée des capteurs optiques et acoustiques aux types de sédiments : les capteurs optiques sont principalement sensibles aux sédiments fins, tandis que les capteurs acoustiques sont sensibles aux particules sableuses, denses et de grande taille. Ainsi, des MES dominées par les vases se caractériseront par des niveaux forts de turbidité mais un signal acoustique rétrodiffusé faible, et inversement pour le sable. Cette

méthode est illustrée par la distribution des observations dans l'espace intensité acoustique/turbidité (Figure 60), associé à la contrainte de vague.

Partant du principe que la remise en suspension du sable nécessite des contraintes fortes, nous pouvons observer :

- i) pour des contraintes de vague faibles (i.e. $<0,5 \text{ N/m}^2$), où les MES sont majoritairement associées à des sédiments fins vaseux, une relation linéaire peut être obtenue.
- ii) Lorsque la contrainte de vague augmente, traduisant une présence croissante de sable en suspension, cette droite se décale : pour un même signal de turbidité (NTU), l'intensité acoustique (dB) augmente.

Nous avons traduit cette dynamique par un indice b tel que :

$$b = 10 \log_{10}(\text{Turbidité}) - \text{SNR}_{ADV}$$

Ainsi, une augmentation de l'indice b traduit une présence de vase croissante dans les MES, et une diminution de b une présence croissante de sable. Cet indice a été validé en laboratoire à partir de mesures conjointes optiques et acoustiques pour des mélanges connus de sable/vase.

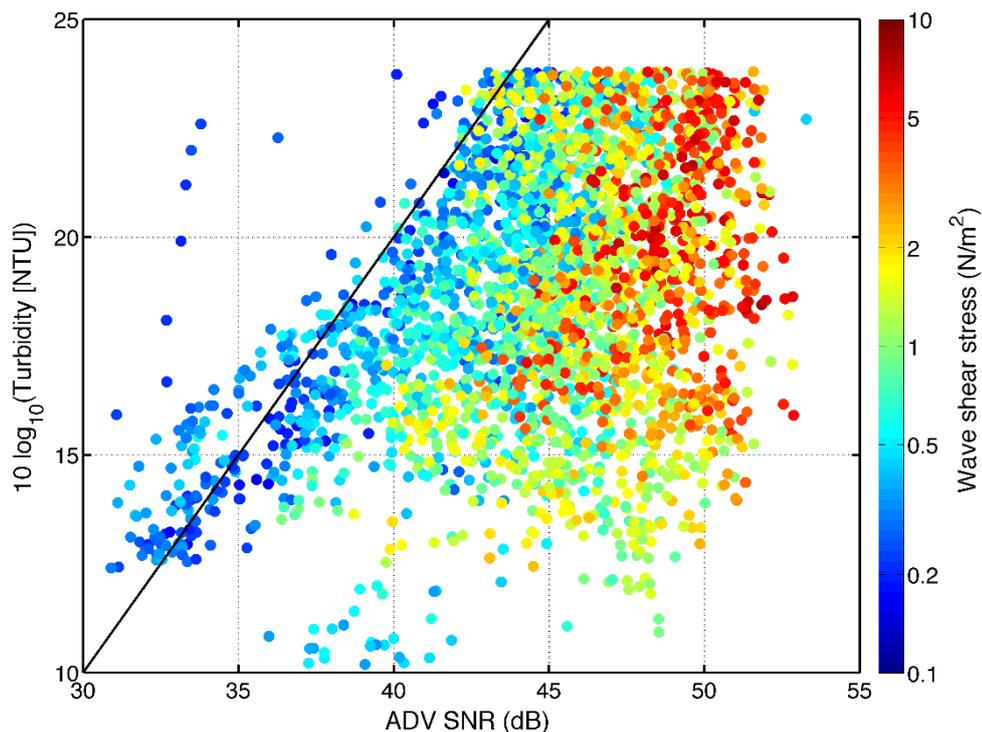


Figure 60 : Combinaison des mesures de turbidité optique (en NTU) et de signal acoustique rétrodiffusé (en dB) : vers un indicateur de nature des matières en suspension (sable/vase).

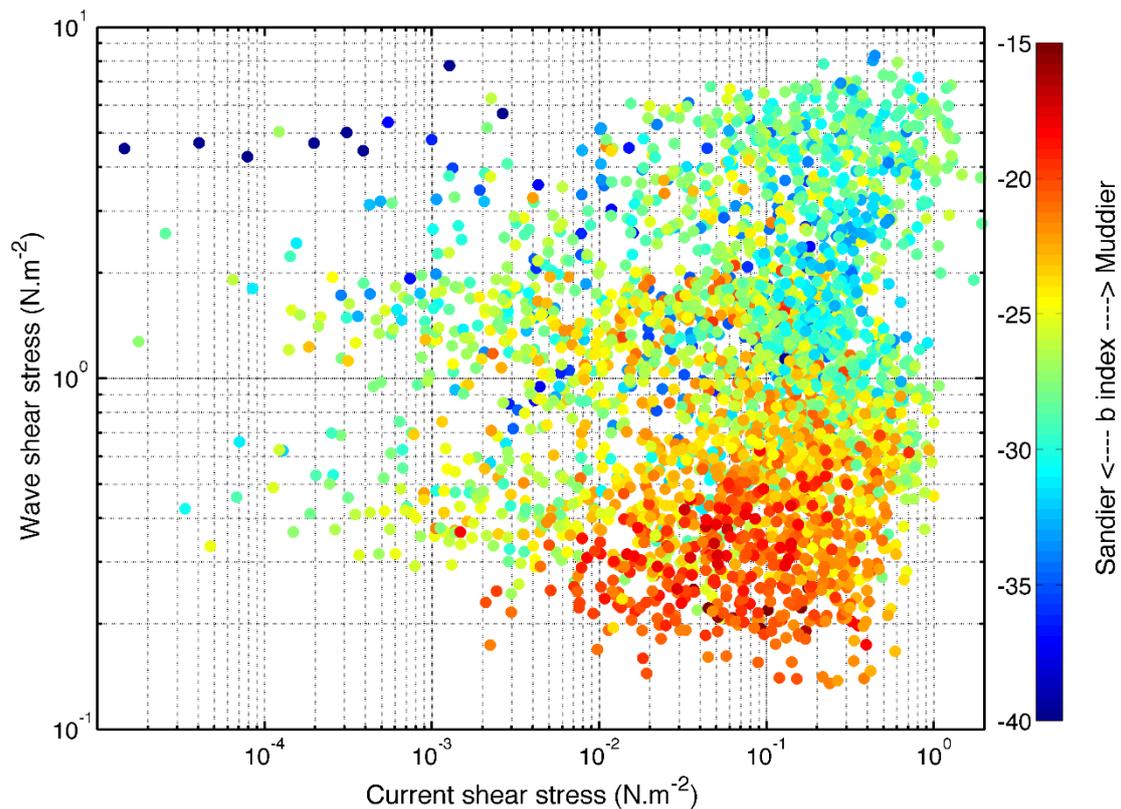


Figure 61 : Relation entre contraintes hydrodynamiques (courant et vagues) et l'indicateur *b* de la nature (sable/vase) des MES.

Appliqué aux observations de la station 2, nous pouvons ainsi observer une forte diminution de l'indice *b* en lien avec l'augmentation des contraintes de vagues, et dans une moindre mesure avec les contraintes de courant (Figure 61).

Nous pouvons donc maintenant ajouter cette information complémentaire pour décrire et analyser les processus sédimentaires observés à cette station (Figure 62).

Le début de la période de mesure, caractérisé par une première tempête, est associé à un indice *b* faible, traduisant une présence de sable en suspension en accord avec la signature des sédiments de surface en début de campagne. La période de dépôt se caractérise par un *b* qui augmente, traduisant des MES mixtes sable/vase dont la proportion de vase augmente en période de VE et en absence de vague. Ce dépôt pourrait donc être supposé sablo-vaseux. Durant la période de temps calme qui suit, l'indice *b* reste très élevé, exprimant un sédiment en suspension toujours dominé par les sédiments fins. Toutefois, les valeurs de turbidité sont plus faibles que durant la première VE, la source sédimentaire n'est donc pas suffisante pour générer un dépôt fort.

Durant la première marée de la tempête (le 8 janvier), quasiment l'ensemble du dépôt frais est érodé, et l'indice *b* diminue rapidement : suite à l'érosion du dépôt sablo-vaseux, le sédiment remobilisé semble être mixte sable/vase. Lors des pics de contraintes de vagues qui se succèdent, l'indice *b* reste faible, indiquant une forte présence de sable en suspension, en particulier autour du 17 janvier. Il pourrait donc être supposé que le sédiment de surface devienne de plus en plus sableux avec la succession des tempêtes.

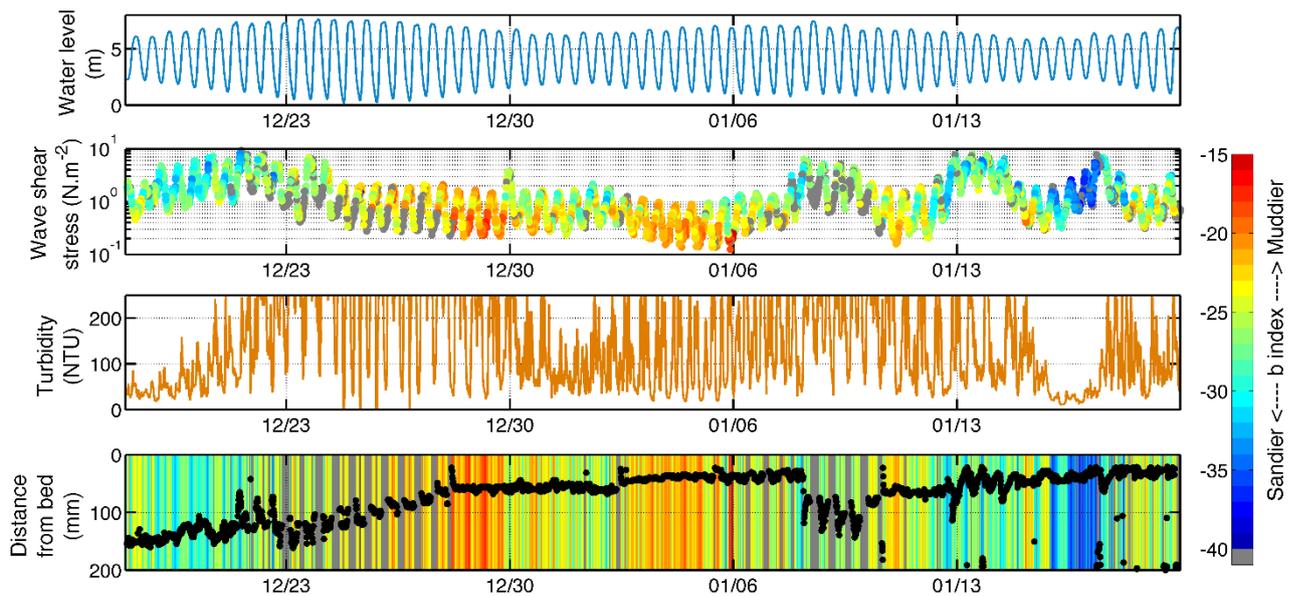


Figure 62 : Analyse de la dynamique sédimentaire sur le banc du Râtelet (station 2). Le gradient de couleur pour les panels « Wave shear stress » et « Distance from bed » correspond aux valeurs de l'indice b de nature des MES.

4.4 Synthèse des observations

A la station 1, la relation forte avec les courants de marée et relativement faible avec les contraintes de vagues laisse penser que la zone subtidale sud Râtelet, à l'entrée de la fosse sud, est associée à une zone de transit des sédiments, plus qu'à une dynamique locale d'érosion/dépôt. L'augmentation de la concentration avec les courants de flots traduirait une advection de sédiments fins, qui entrent dans l'embouchure. Cette dynamique est confortée par les flux sédimentaires au-dessus du fond. La comparaison des flux avec les mesures de la bouée SCENES, dans la partie Nord de l'embouchure, montre que le flux sédimentaire entrant dans l'estuaire passe préférentiellement par la fosse sud. Ces résultats (concentration et flux) seront comparés aux paramètres simulés par le modèle, mais une première comparaison avec les flux modélisés par section à l'entrée de l'estuaire par Schulz *et al.* [2018] semble confirmer les résultats des simulations.

A la station 2, les mesures montrent sur la période une accréation du banc du Râtelet, avec toutefois une très forte dynamique en réponse aux forçages tidaux et météorologiques. L'utilisation d'un indicateur de la nature des MES a permis de proposer un scénario possible de la dynamique de dépôt/érosion, qui doit être confirmé. Un dépôt frais temporaire de sédiment mixte sable/vase semble se produire en fin de VE après un épisode de tempête. Ce dépôt est complètement remobilisé lors de la tempête suivante. Si la courte période de calme qui s'ensuit se caractérise par des sédiments mixtes, les tempêtes suivantes induisent des séquences rapides d'érosion/dépôt, associé à une augmentation de la présence de sable en suspension, et donc d'un sédiment sableux en surface. Ces séquences d'érosion/dépôt ainsi que de modification de la nature des sédiments en suspension et dans le compartiment sédimentaire pourront être comparés ultérieurement aux résultats de modèle qui présente actuellement des difficultés à correctement simuler la dynamique sédimentaire de cette zone.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions

Le projet MORPHOSEINE s'est principalement porté sur la modélisation morphosédimentaire de l'estuaire aval de la Seine, i.e. de Tancarville jusqu'au large des bancs à l'embouchure (isobathe ~20 m), pour des échelles de temps allant de 10 à 50 ans. L'outil de modélisation MARS3D *CurviSeine*, développé par l'Ifremer au cours des programmes Seine-Aval 4 et 5 (projets MODEL et HYMOSED), a été amélioré afin d'augmenter le réalisme des simulations en termes d'évolutions morphologiques et de dragages. Ce travail s'est déroulé conjointement au projet MEANDRES-SA6, dont le but est d'étudier l'influence des dragages d'entretien sur la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire, à partir du même modèle *CurviSeine*.

La dynamique des MES simulée sur 10 ans avec une approche « morphodynamique » se trouve dégradée par rapport aux simulations avec une approche « morphostatique » (i.e. sans couplage morphodynamique) validée dans le cadre du projet HYMOSED [Grasso *et al.*, 2018] et utilisée pour la simulation des rejets numériques ARES-SA6 (1990-2000 et 2005-2018) [Bismuth *et al.*, 2020]. Cependant, la comparaison entre les évolutions morphologiques observées et simulées sur 8 ans (2009-2016) montre des résultats satisfaisants dans la majorité des zones de l'estuaire. La plus grande faiblesse du modèle consiste à sous-estimer l'accrétion observée sur la zone du Râtelet. Par contre, le modèle parvient dans l'ensemble à très bien reproduire les quantités de sédiments dragués par les GPMR et GPMH, ainsi que le type de sédiment (sable/vase).

Les simulations du modèle MARS3D *Curviseine* (M3D) ont été confrontées à celles du modèle TELEMAC3D (T3D) que la société ARTELIA a développé pour le compte du GPMH afin d'étudier la morphodynamique des vasières Nord du Havre. Ces deux modèles suivent une approche basée sur les processus (i.e. *process-based*) de transport sédimentaire sablo-vaseux, mais ils diffèrent par la manière dont ces processus sont conceptualisés (en particulier pour la gestion des couches sédimentaires) et par la résolution de leur maillage. Ainsi, T3D a une meilleure résolution dans certaines zones d'intérêt (ex. méandres de la vasière Nord), mais son temps de calcul est nettement plus long que M3D. L'idée de la comparaison inter-modèles est autant de comparer leurs forces et faiblesses respectives, que d'étudier leur comportement pour un scénario tendanciel.

Sur la période 2009-2016, T3D parvient à mieux simuler les évolutions sédimentaires (cubatures) observées au niveau du Râtelet, mais aussi dans le secteur des méandres. Cela s'explique en partie par la résolution plus fine dans ce secteur, mais aussi par la calibration de T3D basée sur les cubatures observées. En revanche, M3D simule de manière plus réaliste la morphodynamique observée dans la Fosse Sud.

Sur la période tendancielle (2016-2026), les tendances des modèles sont assez similaires (à part au Râtelet et au Kannik), permettant d'assurer un certain niveau de confiance dans les simulations. Par contre, dans les zones où les réponses morphologiques simulées sont différentes, et pour lesquelles les mesures n'ont pas permis de discriminer un modèle ou l'autre (ex. en amont du Pont de Normandie), la prudence s'impose sur l'interprétation des résultats.



Afin de simuler la morphodynamique de l'estuaire à plus long terme (>10 ans), le temps de calcul devient une contrainte forte et on a recourt à l'utilisation d'un facteur morphologique MF pour accélérer les évolutions du fond sédimentaire. Une étude comparative avec différentes valeurs de MF (1, 5 et 10) a mis en évidence que les tendances morphodynamiques après 10 ans sont globalement similaires, bien que l'intensité des évolutions morphologiques soit réduite.

L'utilisation de ce facteur morphologique ($MF = 5$) a été appliquée à des simulations rétrospectives sur 20 ans (1975-1995) et prospectives sur 50 ans (2016-2066). Les simulations rétrospectives ont mis en évidence l'influence des principaux forçages (marée et vagues) sur les évolutions morphologiques de l'embouchure, avec des effets contrastés dans les zones subtidales et intertidales.

Pour les simulations prospectives, deux scénarios « extrêmes » de montée du niveau de la mer ont été testés (RCP 2.6, +3 mm/an et RCP 8.5, +24 mm/an ; [Sweet *et al.*, 2017]). Il ressort de ces simulations que l'estuaire de Seine a la capacité de s'adapter et suivre la montée du niveau de la mer avec une accrétion globale de l'embouchure. Cette adaptation se traduit par des estrans moyens et supérieurs ($h_0 = [2,5;-5]$ m) conservés après 50 ans. Il est important de noter que la montée du niveau de la mer n'est pas systématiquement associée à une perte des zones intertidales, en particulier si suffisamment de sédiments sont disponibles pour nourrir l'adaptation morphologique de l'estuaire.

Préconisations et perspectives

Les simulations numériques conduites dans ce projet ont permis d'apporter une meilleure compréhension de la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire à l'échelle de 10 à 50 ans, mais il s'avère que nous avons eu beaucoup de difficultés pour en assurer la concrétisation et toutes les simulations initialement prévues n'ont pas pu être abouties. A savoir que la modélisation morphodynamique réaliste 3D, sable/vase, avec prise en compte des vagues à l'échelle d'un estuaire, n'est presque jamais simulée au-delà de 10 ans pour cause de temps calcul et de stabilité numérique.

Dans notre cas, l'implémentation des aménagements dans les simulations rétrospectives (1960-2010) génère des instabilités numériques qui stoppaient les calculs. Si l'objectif est réellement de parvenir à simuler cette période de la manière la plus réaliste possible, il faudrait alors davantage travailler sur l'implémentation progressive des ouvrages et la modification des propriétés sédimentaires au voisinage de ces ouvrages (pour représenter des processus sous-maille). Mais cela nécessiterait plus de temps à conceptualiser et coder dans le modèle.

Il existe également des instabilités numériques induites par le couplage morphodynamique lui-même. La simulation d'érosions ou dépôts trop forts peut induire une forte élévation de la cote du fond et donc affecter drastiquement les courants et hauteurs d'eau. Cela est surtout le cas dans les zones à forts gradients bathymétriques. Pour améliorer cela, il pourrait être opportun de mettre à jour le modèle sur différents aspects.

- i. Le code hydrodynamique MARS3D (actuellement en V9) pourrait passer en V11, mais cela implique d'adopter un maillage curviligne orthogonal. L'influence de la prise en compte (ou non) de la non-orthogonalité du maillage sur l'hydrodynamique a été étudiée lors du CDD MORPHOSEINE de Baptiste Mengual (voir rapport de CDD fourni au GIPSA). Les différences de comportement entre les deux versions (V9 et V11) sont négligeables dans l'estuaire, mais plus marquées sur la dynamique du panache d'eau douce à l'embouchure. Si la V9 semblait légèrement plus réaliste que la V11, ce choix peut être revu pour bénéficier d'un code hydrodynamique à jour.
- ii. Le code sédimentaire MUSTANG évolue naturellement en permanence, en fonction de la détection de bugs et/ou l'amélioration de la modélisation de certains processus. Il serait donc nécessaire de prendre en compte les dernières corrections dans la version *CurviSeine*. Malheureusement, ce n'est pas si transparent de transposer ces modifications car la configuration de l'estuaire de Seine a bénéficié de nombreux développements spécifiques à ce site d'étude.
- iii. Le maillage curviligne que nous avons adopté depuis le programme SA4 est très performant pour assurer une résolution adaptée au site d'étude (i.e. résolution plus fine dans l'estuaire et plus grossière au large), tout en garantissant des temps de calcul raisonnables (ex. mailles allongées dans la direction des chenaux où les courants sont plus forts). Néanmoins, dans le cas de simulations morphodynamiques, la bathymétrie peut évoluer et le maillage initial n'est plus forcément adapté à la morphologie finale. Le maillage curviligne peut donc devenir une contrainte aussi bien en termes de temps calcul que de stabilité numérique. Pour étudier les évolutions morphologiques de l'estuaire, il pourrait donc être intéressant de tester un maillage régulier (ex. mailles carrées) qui pourrait être raffiné dans certaines zones de l'estuaire par une méthode d'emboîtement de grilles (ex. zoom AGRIF). Cette approche serait particulièrement pertinente pour l'étude de petites zones (ex. actions de restauration), mais il faudrait s'attendre à un nouveau travail de calibration hydro-sédimentaire spécifique au nouveau maillage.

De manière générale, il faut bien réaliser que la modélisation morphosédimentaire estuarienne à moyen et long-terme (10-50 ans) reste actuellement un défi scientifique. L'essentiel est de déterminer les objets d'étude et de connaître les capacités (forces/faiblesses) des outils numériques mis en œuvre pour y répondre. Ce sera toujours en considérant ce rapport « confiance/incertitude » que nous pourrons aborder objectivement les réponses potentielles de l'estuaire face aux pressions climatiques et anthropiques.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure 1 : Représentation schématique de la chaîne de modélisation MARS3D-MUSTANG-WW3 mise en place pour la configuration CurviSeine. 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.</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2 : Bathymétrie 2010 (par rapport au niveau moyen de la mer) du modèle MARS3D curviligne de l'estuaire de Seine « CurviSeine » : (a) allant de la baie de Seine au barrage de Poses 'P' avec (b) un zoom sur la partie aval de l'estuaire. Les étoiles (resp. hachures) représentent les zones de dragage (resp. clapage) du GPMH (orange) et du GPMR (rouge). Positions spécifiques : Balise A 'Bal.A', Fatouville 'Fat', Tancarville 'Tan', Le Havre 'LH', Râtelet 'Rat', Caudebec-en-Caux 'C', Duclair 'D', Rouen 'R' et Oissel 'O'.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3 : Fraction de temps où le sédiment superficiel est non-cohésif au cours d'une année simulée (année 2009).</i>	<i>12</i>
<i>Figure 4 : Epaisseur moyenne (à gauche) et maximale (à droite) de la couche active (en m) au cours d'une année simulée (année 2009).</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5 : Comparaison entre les vagues mesurées et calculées à l'ouest du banc du Ratier (Râtelet). (Haut) Hauteur d'eau H_0, (milieu) hauteur significative des vagues H_s et (bas) vitesse orbitale des vagues u_{orb}.</i>	<i>13</i>
<i>Figure 6 : (a) Marnage TR au Havre (bleu) et débit de la Seine Q à Poses (orange). Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée d'août 2014 à août 2015, aux stations de (b, c) Tancarville (d, e) Fatouville et (f, g) Balise A : (b, d, f) séries temporelles mesurées (noir) et simulées (HYMOSED : bleu, MORPHOSEINE : rouge) ; (c, e, g) corrélations modèle vs mesures pour les simulations HYMOSED (bleu) et MORPHOSEINE (rouge).</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7 : Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée entre août 2014 et août 2015, aux stations de (gauche) Balise A, (centre) Fatouville, et (droite) Tancarville. Distributions par classes de concentrations en MES mesurées : (haut) de la probabilité d'occurrence, (milieu) de l'erreur quadratique normalisée $RMSE_N$ et (bas) du biais normalisé $Bias_N$, pour les simulations HYMOSED (bleu) et MORPHOSEINE (jaune).</i>	<i>16</i>
<i>Figure 8 : Image satellite de la station SYNAPSES Fatouville prise le 22 août 2015 illustrant les forts niveaux de turbidité observés en bord de rive (Google Earth).</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9 : (Haut) Débit de la Seine Q à Poses et marnage TR au Havre, et (bas) simulation de la masse du bouchon vaseux (maximum par cycle de marée) sur une période de 10 ans (2009-2018). Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].</i>	<i>17</i>
<i>Figure 10 : Représentation des zones de dragages du GPMH ('LH') et du GPMR (Engainement 'E' et Brèche 'B'), ainsi que les zones de calcul de la masse du bouchon vaseux (cadre noir) et des vagues à l'embouchure (cadre rouge dans l'encart). Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].</i>	<i>17</i>
<i>Figure 11 : Comparaisons modèle/mesures des sédiments dragués sur une période de 10 ans (2009-2018). (Gauche) Moyenne annuelle de la masse de sédiments dragués (sables : clair et vase : foncé) pour les observations (In-Situ Ref.) et les simulations (Realistic Run), aux zones du Havre 'LH' (bleu), de l'engainement 'E' (vert) et de la brèche 'B' (orange). (Droite) Proportion des sédiments dragués en fonction de leur taille, aux zones (haut) de l'engainement 'E' et (bas) de la brèche 'B'. Figure issue des travaux du projet MEANDRES-SA6 [Lemoine, 2021].</i>	<i>18</i>
<i>Figure 12 : Zones caractéristiques de l'estuaire utilisées pour le calcul de cubatures.</i>	<i>19</i>
<i>Figure 13 : Evolution 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.</i>	<i>19</i>
<i>Figure 14 : Evolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval entre 2009 et 2026 (zone illustrée sur la Figure 13). (Gauche, haut) Débit de la Seine Q à Poses et hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure (zone rouge sur la Figure 10) ; (gauche, bas) variation relative des hypsométries pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m), les mesures sont représentées par des symboles ('o') et les simulations par des lignes pour les scénarios rétrospectif [2009-2016] (noir) et tendanciels [2016-2026] (avec facteur</i>	



morphologique MF = 1 : bleu ; MF = 5 : rouge ; et MF = 10 : jaune). (Droite) Distribution des surfaces par tranches bathymétriques h_0 , mesurées et simulées sur les périodes (haut) 2009-2016 et (bas) 2016-2026.	21
Figure 15 : Hypsométrie longitudinale mesurée et simulée le long des pk = [335-365] de l'estuaire sur les périodes (gauche) 2009-2016 et (droite) 2016-2026, pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m). A droite, simulations tendanciennes avec facteur morphologique MF = 1 (rouge), MF = 5 (jaune) et MF = 10 (violet).	22
Figure 16 : Maillage du modèle T3D et zoom sur l'embouchure (en rouge est défini la résolution approximative du maillage pour différentes zones).	23
Figure 17 : Comparaison de l'évolution des volumes mesurés (GPMR) et simulés (T3D) à l'échelle de l'estuaire entre 2005 et 2015.	24
Figure 18 : Comparaison des cubatures mesurées (GPMR) et simulées (T3D) sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) entre 2005 et 2015.	25
Figure 19 : Comparaison des dragages effectués et ceux modélisés (T3D) en sable et vase pour le GPMH et le GPMR (avec un indicateur de dragage en zone 4 pour le GPMR).	25
Figure 20 : Comparaison de l'évolutions de l'indicateur vase mesuré (o) et simulé par T3D (lignes) sur 2005-2026.	27
Figure 21 : Cartographie de l'indicateur vase en 2015 (nature en haut et modèle T3D en bas).	27
Figure 22 : Evolution morphologique de l'estuaire aval sur les périodes (gauche) 2005-2015 et (droite) 2016-2026. Bathymétries h_0 et différentiels bathymétriques Δz , simulés avec T3D.	29
Figure 23 : Cubatures sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios rétrospectifs 'Hindcast' (2009-2016) et tendanciels 'Forecast' (2016-2026), mesurées par le GPMR (symboles) et simulées par T3D et M3D (lignes). A noter que les simulations T3D réalisent les clapages au site du Machu à partir de 2017 (2017-2026), alors que les simulations M3D les réalisent au site du Kannik sur l'ensemble de la période 2009-2026.	30
Figure 24 : Cartographie de l'indicateur vase modélisé par T3D en 2016 et 2026.	32
Figure 25 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2016 et 2026. (Gauche) Bathymétries h_0 et (droite) différentiels bathymétriques Δz , simulés par M3D avec facteur morphologique (haut) MF = 1, (milieu) MF = 5, et (bas) MF = 10.	33
Figure 26 : Comparaison des concentrations de vase en suspension en surface à Fatouville pour différents facteurs d'accélération morphologiques (MF = 1, 5 et 10).	35
Figure 27 : Stratégie d'implémentation des ouvrages lors de la période 1960-2010, illustrée sur la bathymétrie 1960 ; les digues apparaissent en rouge.	37
Figure 28 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 1975 et 1995. (Gauche) Bathymétries h_0 et (droite) différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés. Simulation avec facteur morphologique MF = 5, sans prise en compte des activités de dragage.	38
Figure 29 : Evolution temporelle 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 ($z_f = Meas.$ 1995) et simulée ($z_f = Sim.$ 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).	39
Figure 30 : Variation altimétrique absolue $ \Delta z_v $, pour différentes tranches bathymétriques, 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).	40
Figure 31 : 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.	41

Figure 32 : Reconstruction du niveau moyen de la mer et projection à 2100 [Sweet et al., 2017]. 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.	42
Figure 33 : Evolution morphologique de l'estuaire aval entre 2016 et 2066. 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 terme d'élévation Δz . Simulations avec une montée du niveau de la mer suivant les scénarios (gauche : b, d, f) RCP 2.6 (i.e. +3 mm/an) et (droite : c, e, g) RCP 8.5 (i.e. +24 mm/an).	43
Figure 34 : Evolution de l'hypsométrie de l'estuaire aval entre 2016 et 2066. (Gauche, haut) Débit de la Seine Q à Poses, hauteur significative des vagues H_s à l'embouchure et élévation du niveau de la mer mslr ; (gauche, bas) variation relative des hypsométries pour différentes zones intertidales ($h_0 = [5:-5]$ m) et subtidales ($h_0 = [15:5]$ m), simulés 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). (Droite) Distribution par tranches bathymétriques h_0 : (haut) des surfaces mesurées en 2016 et simulées en 2066 et (bas) des variations de surfaces simulées en 2066.	44
Figure 35 : Cubatures normalisées par la surface (équivalent à une élévation sédimentaire moyenne Δz) sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios tendanciels 'Forecast' (2016-2066) avec prise en compte de la montée du niveau de la mer (RCP 2.6, +3 mm/an : bleu et RCP 8.5, +24 mm/an : orange).	45
Figure 36 : Evolution morphologique sur 50 ans (2016-2066) de 3 radiales caractéristiques de l'estuaire aval : banc du Ratier (AB), vasière Nord 'Ouest' (BC) et 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. Elévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.	47
Figure 37 : (Haut) Evolution du niveau de la mer (mslr) et de l'élévation maximale des vasières Nord le long des radiales 'Ouest' $Z_{NMF:West}$ (BC) et 'Est' $Z_{NMF:East}$ (DE) (cf. Figure 36) sur 50 ans et (bas) élévation maximale des vasières en fonction de l'élévation du niveau de la mer, 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.	48
Figure 38 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long du chenal principal 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. (De haut en bas) Marnage TR, hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.	49
Figure 39 : Localisation des stations : 1 : Subtidal Sud Râtelet ; 2 : Banc du Râtelet ; 3 : SCENES. Données bathymétriques (élévation par rapport au niveau moyen de la mer) : GIPSA.	51
Figure 40 : Granulométrie des sédiments de fond à la station 1 (Subtidal Sud Râtelet) et à la station 2 (Banc du Râtelet).	52
Figure 41 : Equipement déployé à partir du tripode sur la station 1 : ADCP Signature au centre, CTD SBE37 sur un pied du tripode et turbidimètre Wetlabs ECONTU sur perche, cellule de mesure à 1,1 m au-dessus du fond.	53
Figure 42 : Equipement déployé à partir de l'ancre à vis sur la station 2 : ADV Vector déporté, et turbidimètre Wetlabs ECONTU sur le pied vertical de l'ancre, tête vers le haut, cellule de mesure à une altitude proche de la tête de mesure de l'ADV.	54
Figure 43 : Description des ensembles de mesure composant la station SCENES (bouée de surface et station de fond).	55
Figure 44 : Données de hauteur d'eau, de courant, de pourcentage de corrélation du signal, de la distance capteur/fond mesurées par l'ADV en station 2. Les données bleues sont considérées qualifiées et validées, les données orange sont exclues de l'analyse.	56
Figure 45 : Distribution des mesures de turbidités par gamme de turbidité pour les trois stations de mesure : mise en évidence de la saturation partielle des capteurs optiques.	57

Figure 46 : Conditions hydrométéorologiques sur la période de mesure (17 Décembre 2018-01 mars 2019). Les vagues sont celles enregistrées aux trois stations (H_s) tandis que les vagues maximales sont présentées uniquement pour la station 1.....	58
Figure 47 : Observations hydro-sédimentaires à la station 1 sur la période de mesure. L'échelle de couleur du panneau 1 correspond à la période des vagues mesurées.....	59
Figure 48 : Ellipse de marée associée au courant moyenné sur la profondeur à la station 1 par classe de marnage (échelle de couleur).....	59
Figure 49 : Influence des contraintes de courant et de vagues sur la turbidité de fond à la station 1.....	60
Figure 50 : Zoom sur la période tempétueuse de janvier/février 2019	61
Figure 51 : Dynamique tidale moyenne de la turbidité de fond par classe de marnage à la station 1 et en absence de vagues (intégrant les périodes du 25 décembre 2018 au 6 janvier 2019 et du 13 février au 1 ^{er} mars 2019).	61
Figure 52 : Anomalie de turbidité mesurée à la station 1 (signal brut – signal moyen par classe de marnage)...	62
Figure 53 : Relation entre contraintes de vague et anomalie de turbidité : analyse de la période d'influence des épisodes de vagues.	63
Figure 54 : Analyse statistique des contraintes de vague pour des anomalies positives de turbidité en fonction de la période d'intégration des vagues, de la marée T à la marée T-5.	63
Figure 55 : Flux solides cumulés de fond (première cellule des ADCPs) aux stations 1 et 3.	64
Figure 56 : Relation entre flux solides cumulés de fond par marée et forçage tidal (marnage et gradient de marnage) à la station 1. Les points gris représentent les flux en période de houle (P90 H_s par marée >1 m).	65
Figure 57 : Observations hydro-sédimentaires à la station 2 sur la période de mesure. L'échelle de couleur du panneau 1 correspond à la période des vagues mesurées.....	66
Figure 58 : Relation entre marnage et la médiane de la vitesse du courant par marée (gauche) et entre marnage et contrainte de cisaillement du courant (droite). Le gradient de couleur représente le temps en jour depuis le déploiement.	66
Figure 59 : Influence des contraintes de courant et de vagues sur la turbidité de fond à la station 2.....	67
Figure 60 : Combinaison des mesures de turbidité optique (en NTU) et de signal acoustique rétrodiffusé (en dB) : vers un indicateur de nature des matières en suspension (sable/vase).	68
Figure 61 : Relation entre contraintes hydrodynamiques (courant et vagues) et l'indicateur b de la nature (sable/vase) des MES.	69
Figure 62 : Analyse de la dynamique sédimentaire sur le banc du Râtelet (station 2). Le gradient de couleur pour les panels « Wave shear stress » et « Distance from bed » correspond aux valeurs de l'indice b de nature des MES.	70
Figure 43 : (Bas) Evolution de la dynamique du bouchon vaseux (position et masse) sur une période de 10 ans (2009-2018) en fonction (de haut en bas) : des quantités de sédiments dragués (aux zones du Havre, de l'engainement et de la brèche), du débit de la Seine à Poses, du marnage au Havre, de la hauteur significative des vagues à l'embouchure et du vent. Figure issue des travaux du projet MEANDRE-SA6 [Lemoine, 2021].	82
Figure 64 : Stratégie de prise en compte de l'évolution des aménagements au cours de la période 1960-2010.	92
Figure 65 : Cubatures sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios tendanciels 'Forecast' (2016-2066) avec prise en compte de la montée du niveau de la mer (RCP 2.6, +3 mm/an : bleu et RCP 8.5, +24 mm/an : orange).	93
Figure 66 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long du banc du Ratier (voir radiale 'AB' sur Figure 36) 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. (De haut en bas) Marnage TR, hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$ et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.	94
Figure 67 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long de la vasière Nord 'Ouest' (voir radiale 'BC' sur Figure 36) 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. (De haut en bas) Marnage TR, hauteur significative des vagues H_s ,	

salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer. 95

Figure 68 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long de la vasière Nord 'Est' (voir radiale 'DE' sur Figure 36) 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. (De haut en bas) Marnage TR, hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer. 96

BIBLIOGRAPHIE

- Avoine, J. (1995). Port autonome Du Havre-Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine-Partie 2-Sédimentologie.
- 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.
- Bismuth, E., Grasso, F., & Verney, R. (2020). *Analyse de Rejeux hydro-sédimentaires en Estuaire de Seine - Rapport de projet ARES*. Retrieved from Programme de recherche Seine-Aval 6.
- Chapon, P. (1964). L'ouverture du nouveau chenal d'accès au port de Rouen dans l'estuaire de la Seine. *La Houille Blanche*(4), 509-520.
- 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.
- De Linares, M., Walther, R., Schaguene, J., Cayrol, C., & Hamm, L. (2015). *Development of an hydro-sedimentary 3D model with sand-mud mixture-Calibration and validation on 6 years evolution in the Seine Estuary*. Paper presented at the 13th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH), Leuven.
- Foussard, V., Cuvilliez, A., Fajon, P., Fisson, C., Lesueur, P., & Macur, O. (2010). Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. *Programme scientifique Seine-Aval, Issue*.
- 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., Mengual, B., Le Hir, P., Lemoine, J.-P., Caillaud, M., & Thouvenin, B. (2019). *A retrospective numerical modelling analysis of the Seine Estuary (France) morphodynamics over the last 50 years*. Paper presented at the RCEM 2019 - 11th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Symposium, 16-21 November 2019, Auckland.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1002/2017JC013185>
- Kervella, Y., Khojasteh Pour Fard, I., Le Hir, P., Renault, E., & Lemoine, J.-P. (2012). Modélisation hydrodynamique tridimensionnelle en coordonnées curvilignes non-orthogonales de l'estuaire de la Seine. *XIIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génier Civil, Revue Paralia*, 5, 89-100.
- Landemaine, V. (2016). *Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris: analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle*. University of Rouen,
- 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.
- 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., & Verney, R. (2015). Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. *Fascicule Seine-Aval*, 3, 64.

- Lemoine, J. P. (2021). *Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien*. Université de Bretagne Occidentale,
- Lemoine, J. P., & Le Hir, P. (under review). Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydrometeorological forcing. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*.
- Lemoine, M. (2014). *Rôle des affluents intra-estuariens et des vasières intertidales dans le bilan sédimentaire de l'estuaire de Seine*. University of Rouen,
- 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.
- Mengual, B., Hir, P., Cayocca, F., & Garlan, T. (2017). Modelling Fine Sediment Dynamics: Towards a Common Erosion Law for Fine Sand, Mud and Mixtures. *Water*, 9(8), 564.
- Mengual, B., Le Hir, P., Rivier, A., Caillaud, M., & Grasso, F. (in press). Numerical modelling of bedload and suspended load contributions to morphological evolutions of the Seine estuary (France) *International journal of sediment research*.
- Orvain, F., Le Hir, P., Sauriau, P.-G., & Lefebvre, S. (2012). Modelling the effects of macrofauna on sediment transport and bed elevation: Application over a cross-shore mudflat profile and model validation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 108, 64-75.
- 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.
- Rivier, A., Le Hir, P., Bailly Du Bois, P., Laguionie, P., & Morillon, M. (2017). *Numerical modelling of heterogeneous sediment transport: new insights for particulate radionuclide transport and deposition*. Paper presented at the Coastal Dynamics 2017. 12-16 June 2017, Helsingør, Denmark.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JC012638>
- 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.
- 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.
- Vaslet, D., Larsonneur, C., & Auffret, J. (1979). Carte des sédiments meubles superficiels de la Manche à 1/500 000. *BRGM-IFREMER, carte géologique de la marge continentale, Orléans*.
- Waeles, B., Le Hir, P., & Lesueur, P. (2008). A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France. In *Proceedings in marine science* (Vol. 9, pp. 477-498): Elsevier.
- 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.
- Walther, R. (2015). *Développement d'un modèle numérique 3D morphodynamique de l'estuaire de la Seine. Un nouvel outil d'ingénierie pour aider à évaluer les évolutions passées, actuelles et futures de l'estuaire*. Paper presented at the Estuarine and Coastal Sciences Association (ECSA). Restoration of estuarine environments, the example of the Seine estuary. Le Havre, 27-28 May 2015.
- 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.
- 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.

Annexe 1. Evolution des dragages et dynamique du bouchon vaseux sur 10 ans (2009-2018)

Auteurs : Jean-Philippe Lemoine (GIPSA)

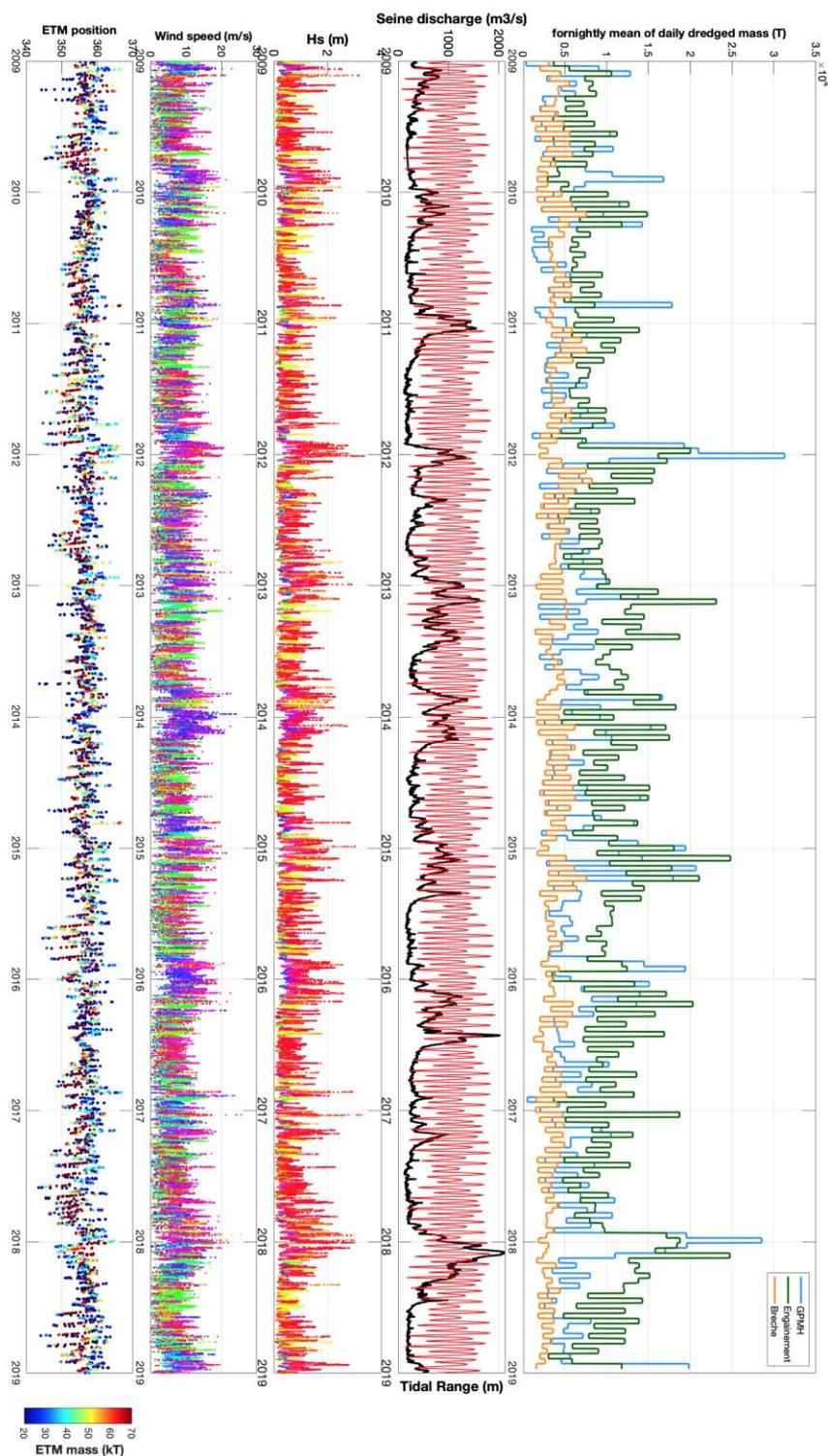
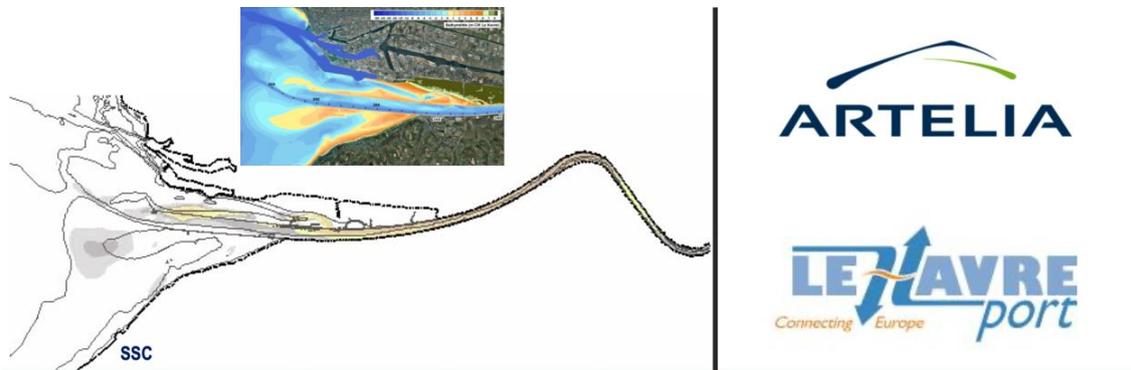


Figure 63 : (Bas) Evolution de la dynamique du bouchon vaseux (position et masse) sur une période de 10 ans (2009-2018) en fonction (de haut en bas) : des quantités de sédiments dragués (aux zones du Havre, de l'engainement et de la brèche), du débit de la Seine à Poses, du marnage au Havre, de la hauteur significative des vagues à l'embouchure et du vent. Figure issue des travaux du projet MEANDRE-SA6 [Lemoine, 2021].

Annexe 2. Présentation du modèle hydro-morpho-sédimentaire TELEMAC3D de l'estuaire de Seine

Auteurs : Régis Walther (ARTELIA)



Development of a 3D morphodynamic numerical model of the Seine estuary

a new engineering tool to help in the assessment of the past, present and future evolutions of the estuary

Régis Walther¹, Matthieu Delinares¹, Luc Hamm¹,
Pascal Galichon², Paul Scherrer²

1/ ARTELIA

2/ GPMH: Grand Port Maritime du Havre



Contents

1. Context
2. Model description
3. Calibration of hydrodynamic, salinity, turbidity maximum
4. Calibration of morphodynamic on 6 years of evolution
5. Comprehension of the past evolution

Context



Monitoring surveys of the northern area between 2005 and 2010 raised two main concerns:

- La Passe bank is exhausting as anticipated but mainly with sand (no mud)
- The new secondary channel is the place of significant sedimentation which reduce dramatically tidal flows



For these reasons, port of Le Havre commissioned ARTELIA for developing a 3D morphodynamic model of the estuary able to simulate :

- Combined sand and mud transport,
- bed evolutions over a period of several years.

The objectives are:

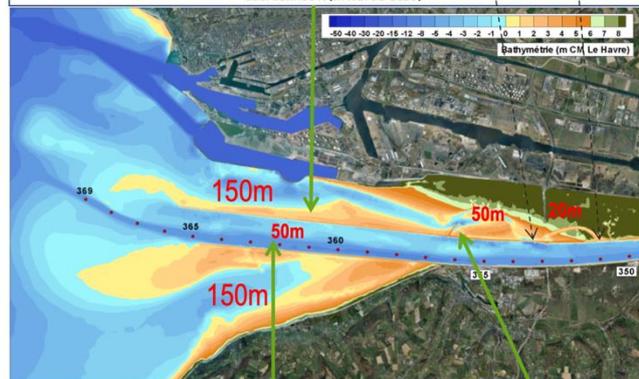
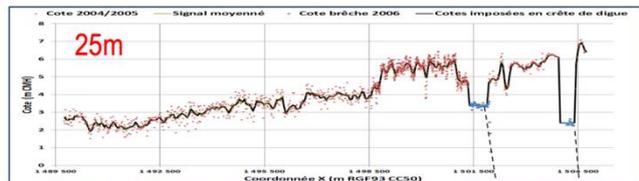
- A better understanding of the physical processes involved in the northern area
- A tool to assess the effect of possible supplementary works able to improve the sustainability of the mudflats

25/06/2020 ARTELIA 3

Bathymetry - mesh

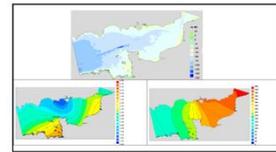


- Horizontal mesh ~28000 nodes
- size: 20 to 5000 meters
- 14 vertical layers

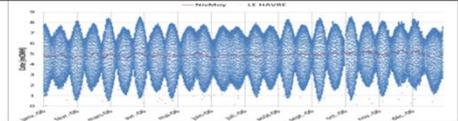


The model is forced by:

Tide: results of Channel model (astronomical tide forced by 46 waves) are imposed in term of sea level and velocity at each boundary node of the Seine 3D model



Mean sea level: is calculated at Havre tidal gauge and is imposed at the maritime boundary limit



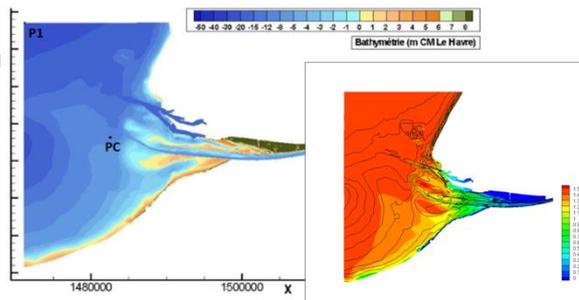
Discharges of Seine, Eure and la Risle: daily measurement imposed

Salinity: 35 g/l at maritime boundary et 0 g/l at Poses

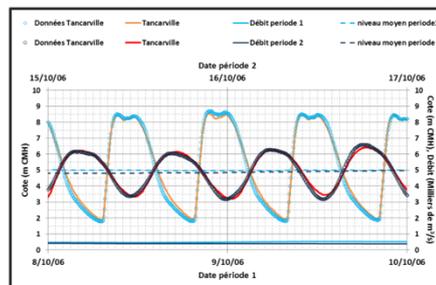
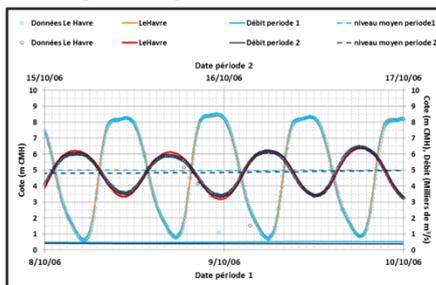
SSC: 0 g/l at maritime boundary and a concentration in function of discharge (Dupont et al., 2001) at Poses

Wind and waves:

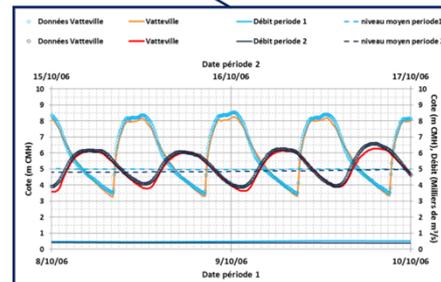
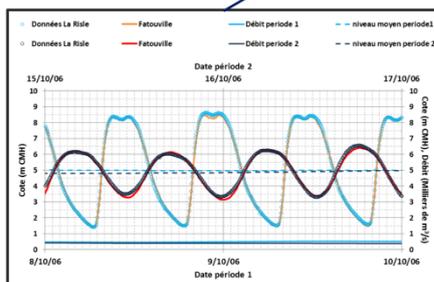
the wind is imposed on the entire maritime domain from the results of the model Globocean (each hour). A unitary matrix of waves is calculated for a sea level ranging from 0-9 m CMH with a step of 0.2 m to 6 period classes and 12 direction classes. A library of about 2400 propagated waves results is stored and actualized all year.



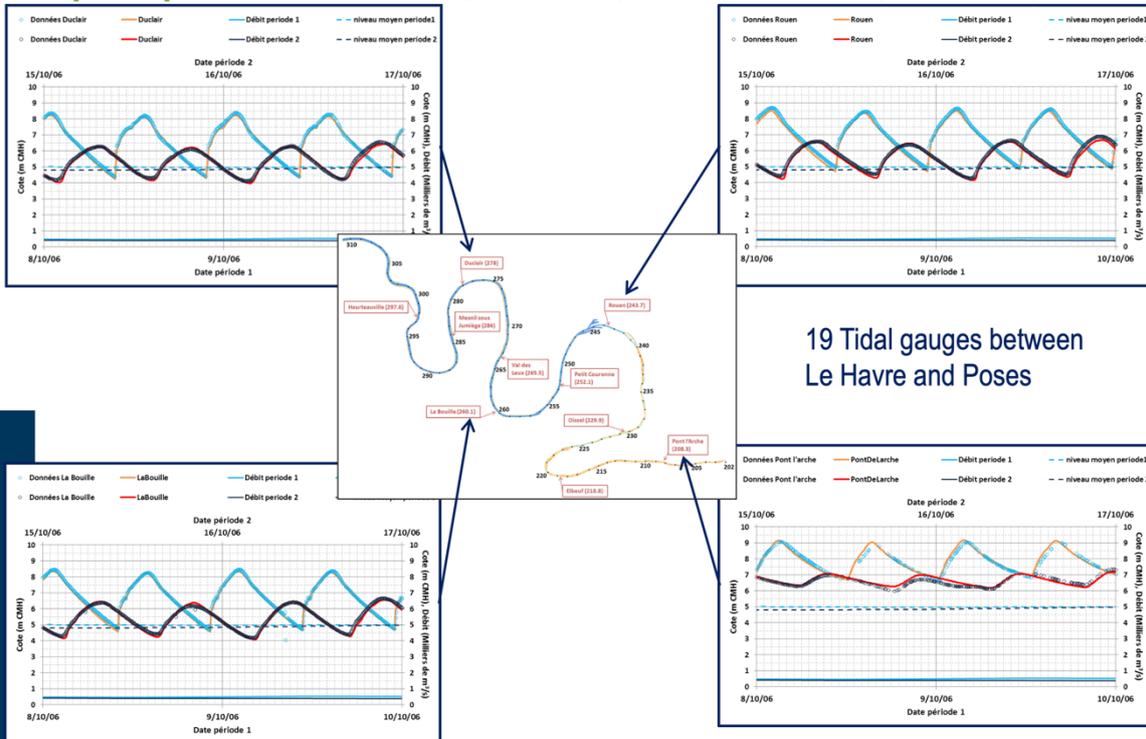
Hydrodynamic calibration (3 months) and validation (6 months)



19 Tidal gauges between Le Havre and Poses

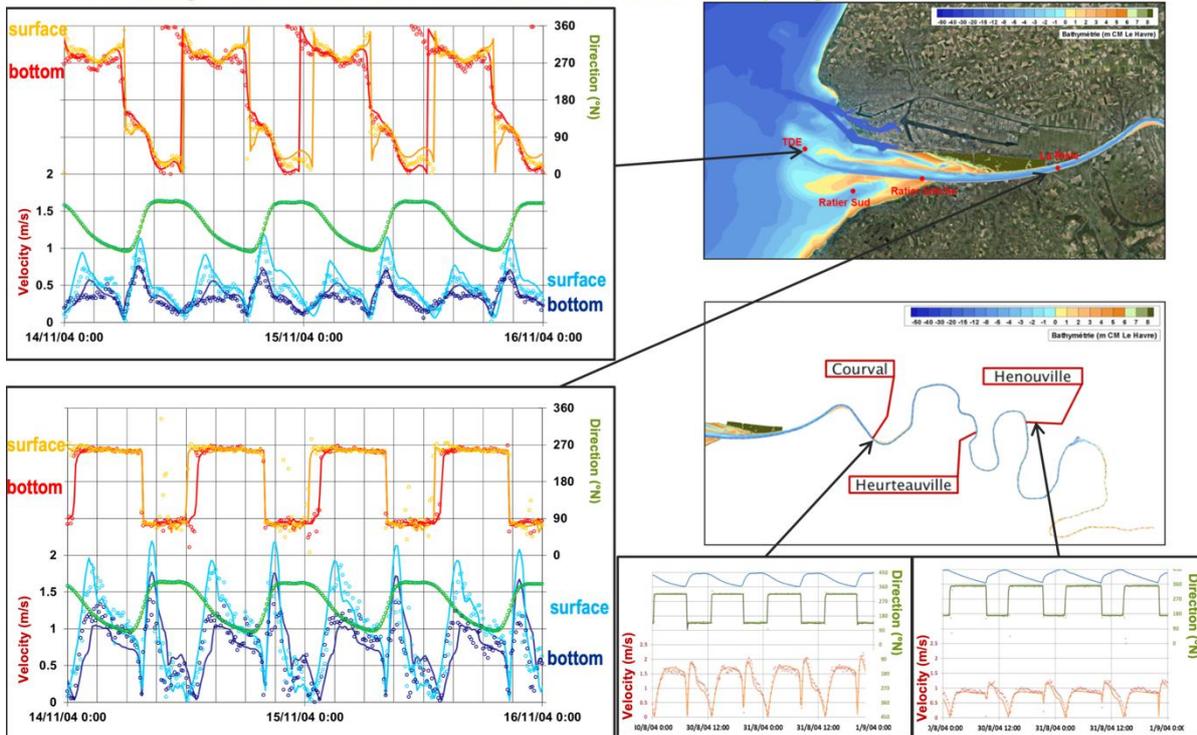


Hydrodynamic calibration (3 months) and validation (6 months)

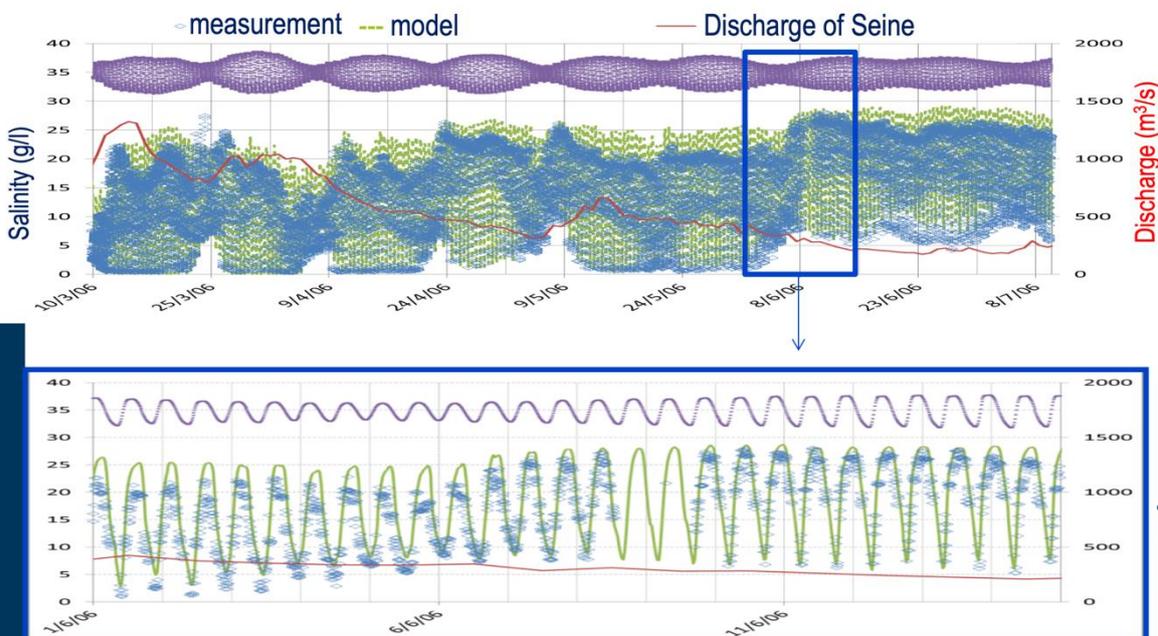


25/06/2020 ARTELIA 7

Velocity validation on 4 measurements campaign



Salinity calibration at Honfleur

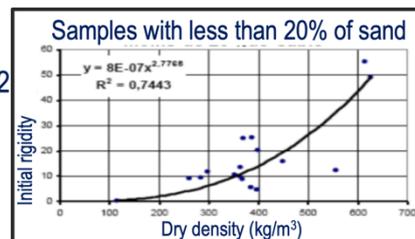
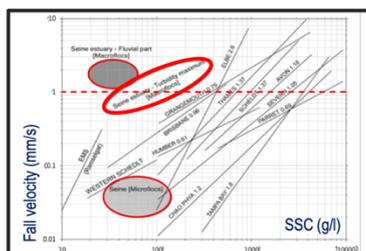


Processes of cohesive sediment

Erosion flux: Partheniades law with a constant fixed at $M=0,0002$ and a critical shear stress in function of sediment concentration (measurement of Seine Aval 4)

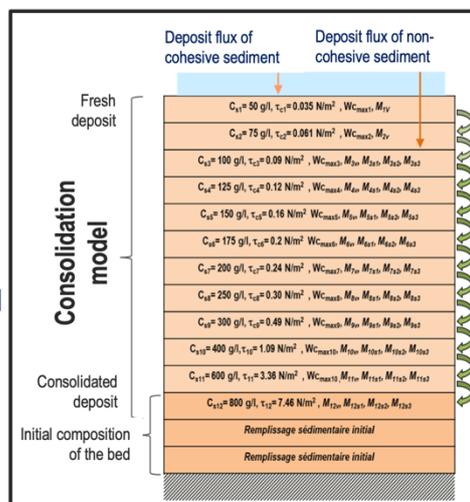
Constant fall velocity:

1mm/s

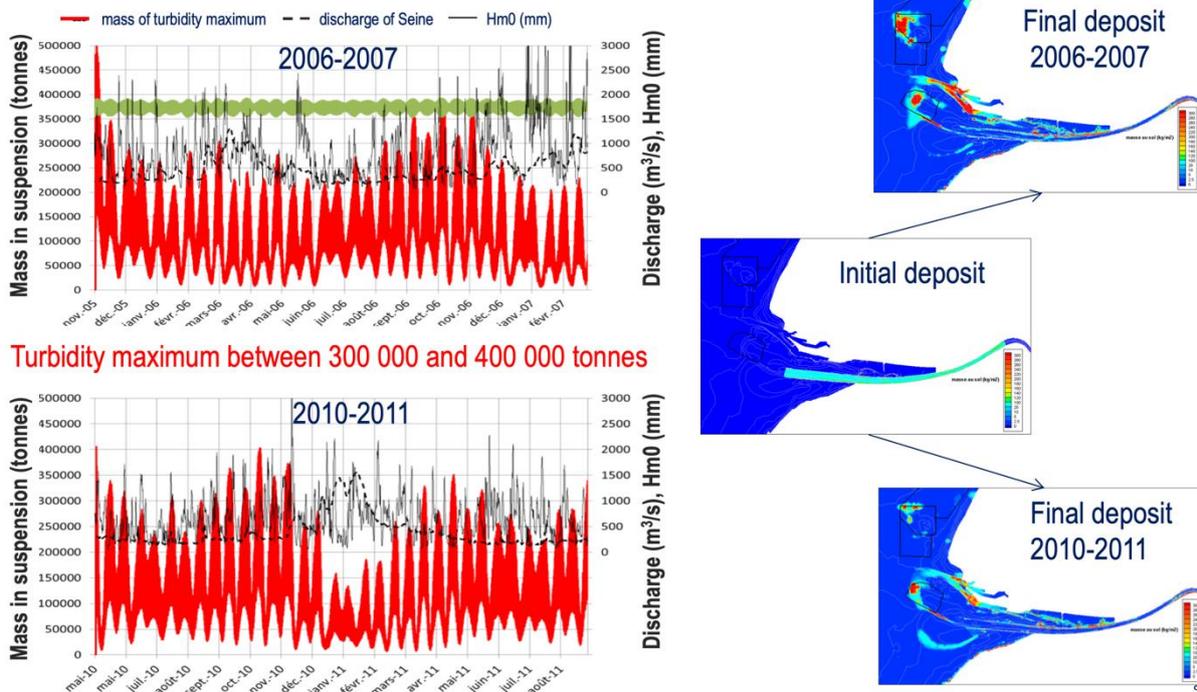


Consolidation model:

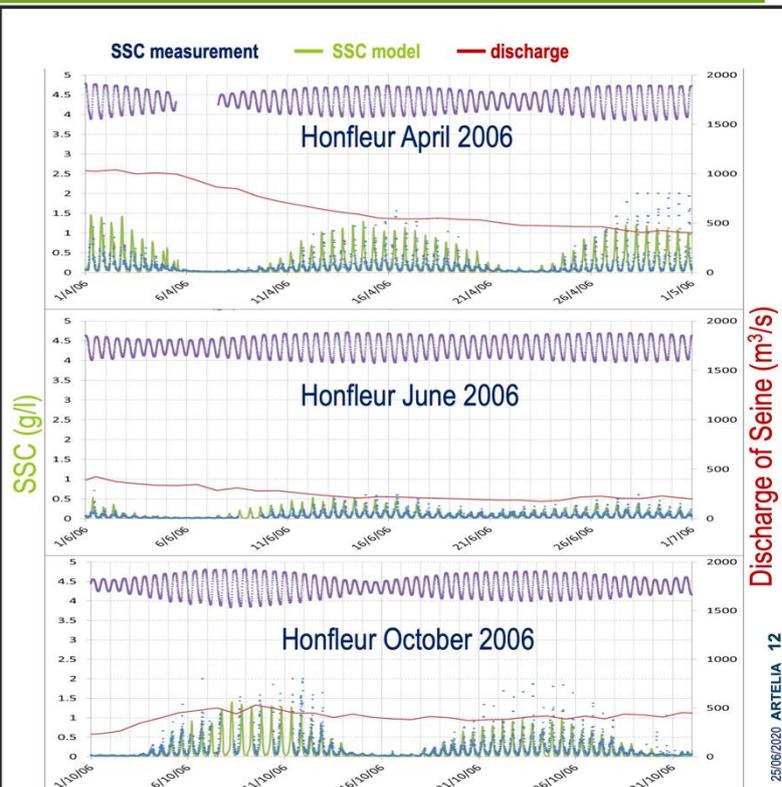
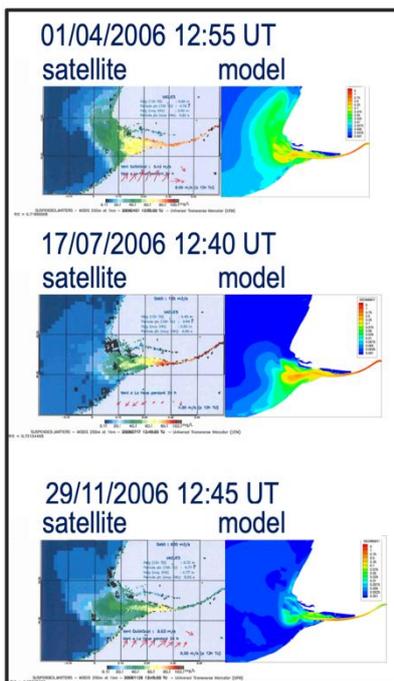
- 11 layers of non consolidated sediment
- Each layer is characterized by a fixed dry density and the associated critical shear.
- Consolidation is calculated at each time step with a transfer of mass in the sub layer. A parameter of transfer flux in function of mass is calibrated for each layer. (measurement of Seine Aval 4)



Calibration and validation of turbidity maximum dynamic



Calibration and validation of turbidity plume and SSC



Non-cohesive sediment and morphodynamic

- 3 classes of sand and 1 class cohesive sediment (cohesive mud < 80 microns)

Very fine sand	125 µm
Fine sand	220 µm
Medium sand	350 µm

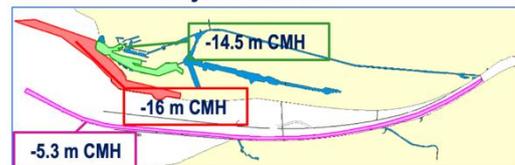
- ✓ 3D Convection of suspension for cohesive sediment and very fine sand
- ✓ 2D modelling of equilibrium bedload for all sand (Transpor 2004-Van Rijn).
- ✓ 2D modelling of equilibrium suspension for fine sand and medium sand (Soulsby-Varijn 1997)
- ✓ Consolidation model take in account process of mixing sediment (sand/mud) to calculate critical shear stress and erosion fluxes (Lehir et al, 2011)

25/06/2020 ARTELIA 13

Simplified maintenance dredging activities

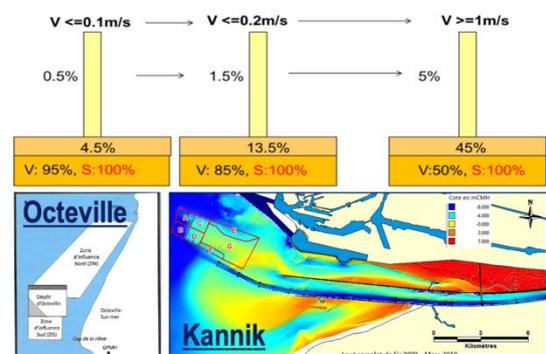
- one operation of dredging per day
- Dredged mass in Seine is limited to 45 000 t / day

Objectiv level:



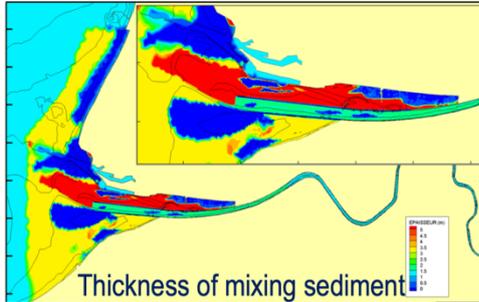
Dumping activities

- Dumping activities are simulated with real data for GPMH and GPMR (position, time, and mass for each class of sediment).
- The mass distribution in the water column is based on the speed of the ambient current (Boutin)



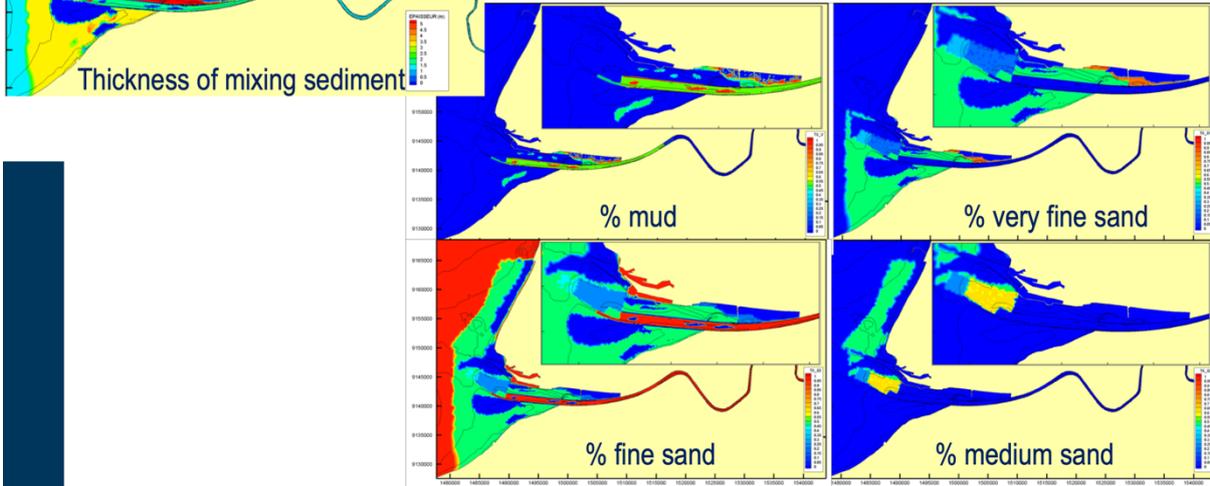
25/06/2020

Initial bed composition in 3 dimensions

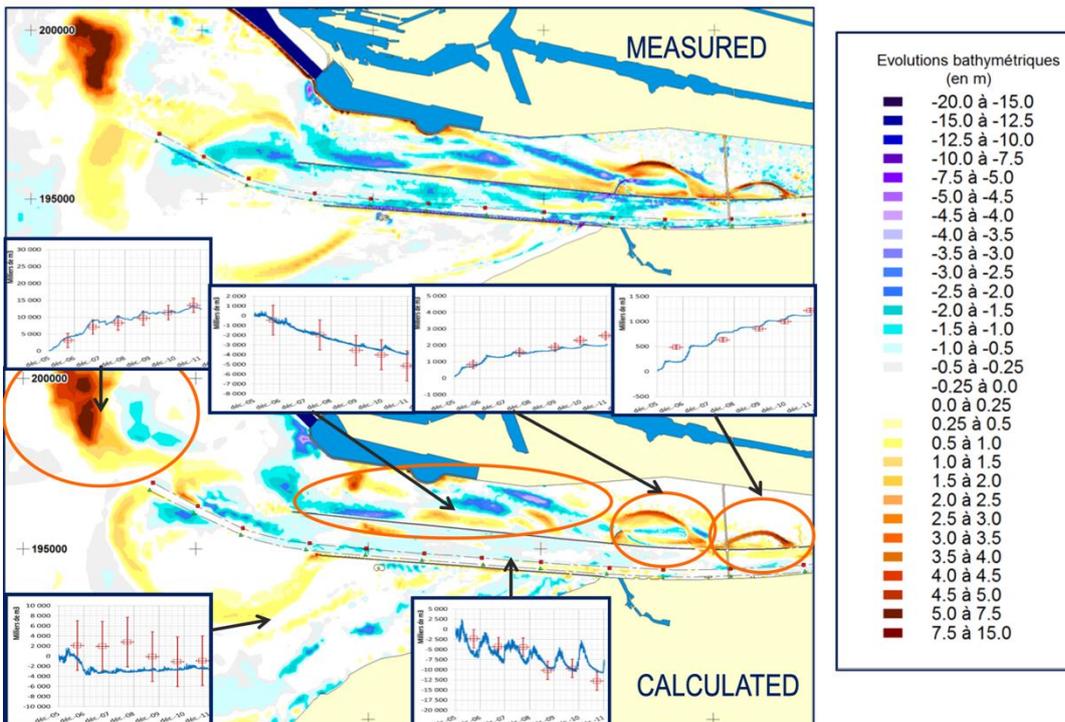


For each node of the model:

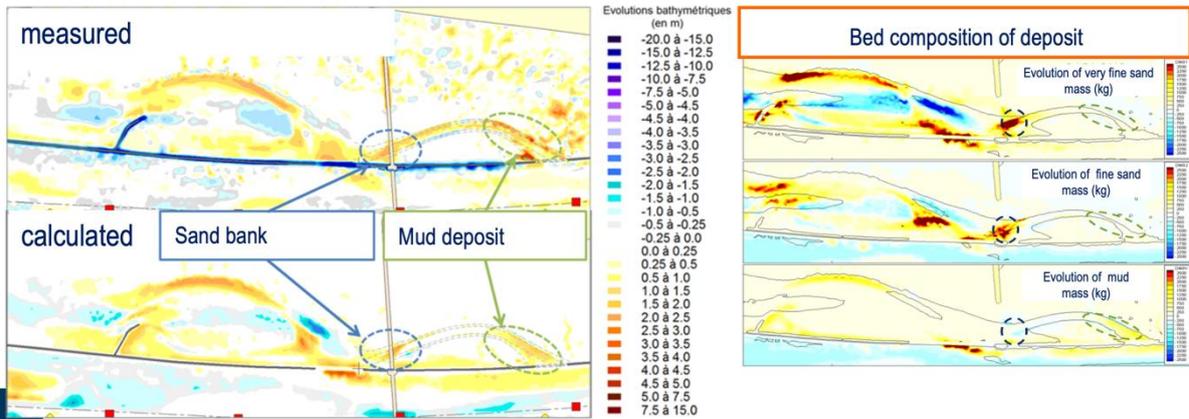
- Choice of thickness of mixing sediment
- Choice of the distribution of each class of sediment



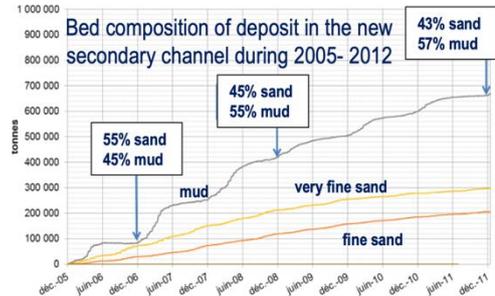
Comparison of bed evolution during 2005-2011:



comprehension of evolution in the new secondary channel



Bed evolution during 2005 -2006



Conclusion

The 3d model developed is able to reproduce on several years:

- Hydrodynamic, salinity
- Turbidity maximum dynamic
- Morphodynamic with mixing sediment (3 sands and 1 mud)

This model help us in the comprehension of past evolution and can to help in the assessment of the future evolutions of the estuary.

Annexe 3. Compléments d'analyse aux simulations rétrospectives sur 50 ans (1960-2010)

Auteurs : Pierre Le Hir (Ifremer)

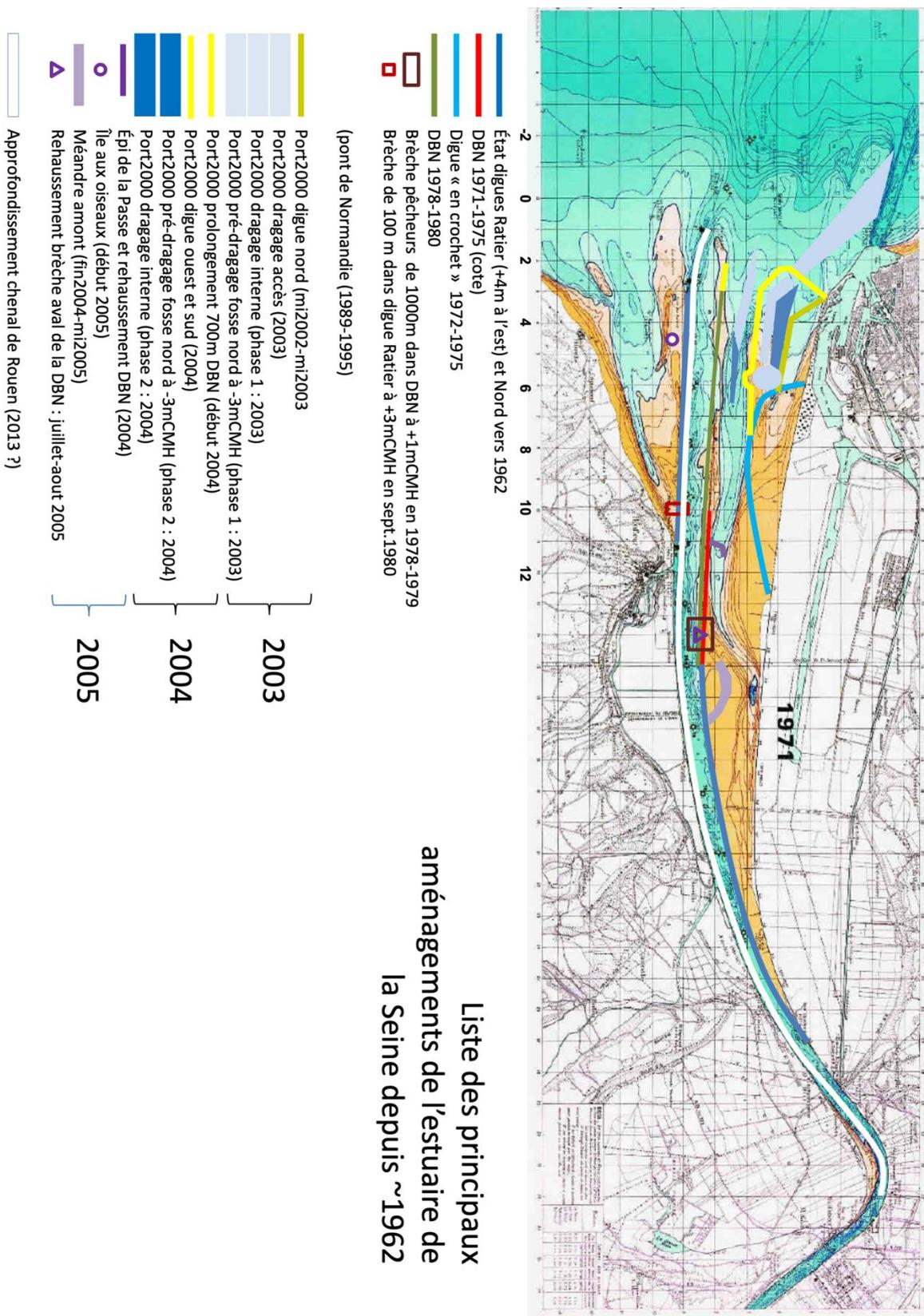


Figure 64 : Stratégie de prise en compte de l'évolution des aménagements au cours de la période 1960-2010.

Annexe 4. Compléments d'analyse aux simulations tendancielles sur 50 ans avec prise en compte de la montée du niveau de la mer (RCP 2.6 et 8.5).

Auteurs : Florent Grasso (Ifremer)

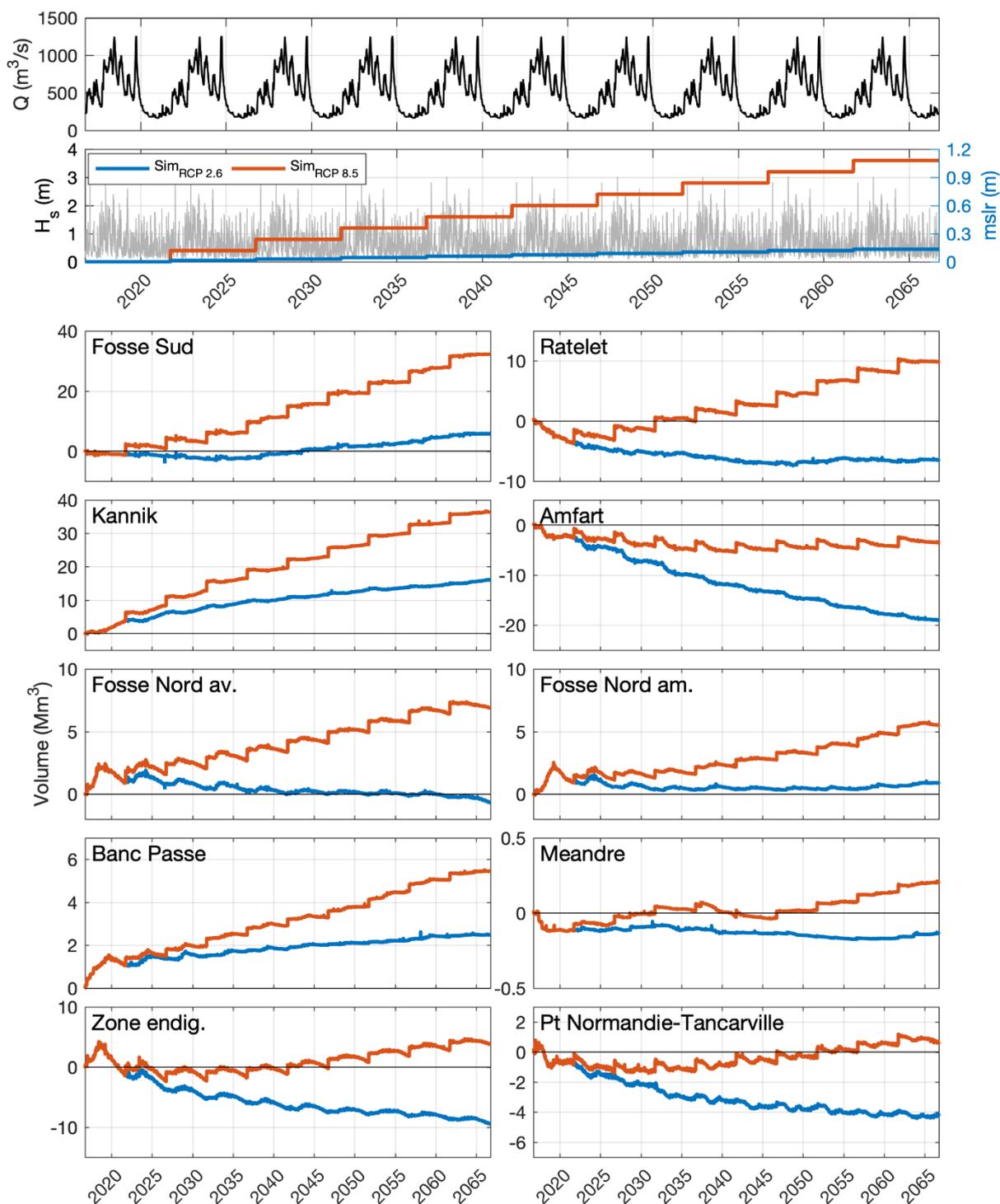


Figure 65 : Cubatures sur 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure 12) pour les scénarios tendanciels 'Forecast' (2016-2066) avec prise en compte de la montée du niveau de la mer (RCP 2.6, +3 mm/an : bleu et RCP 8.5, +24 mm/an : orange).



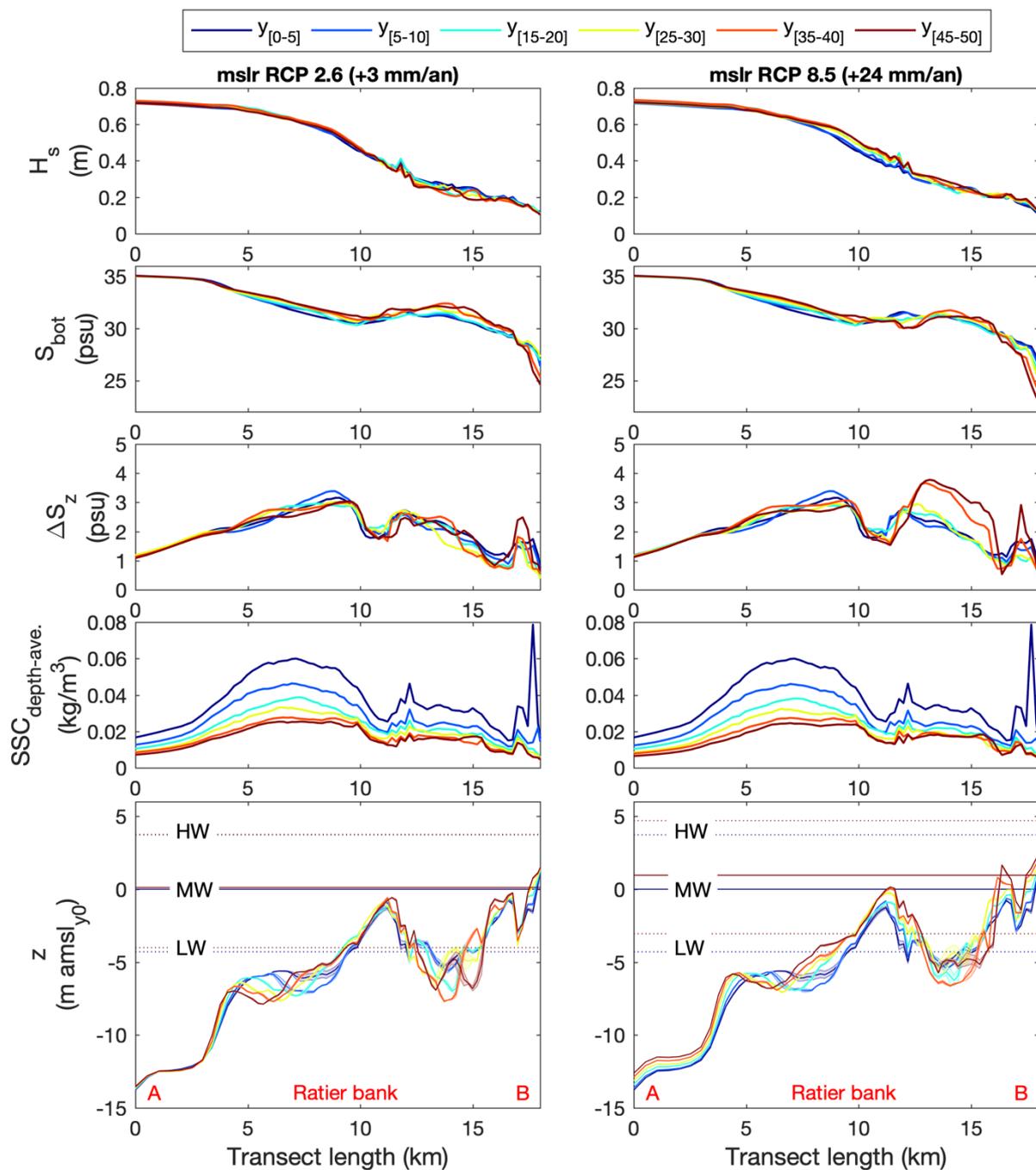


Figure 66 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long du banc du Ratier (voir radiale 'AB' sur Figure 36) pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6 : +3 mm/an et (droite) RCP 8.5 : +24 mm/an. (De haut en bas) Marnage TR , hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

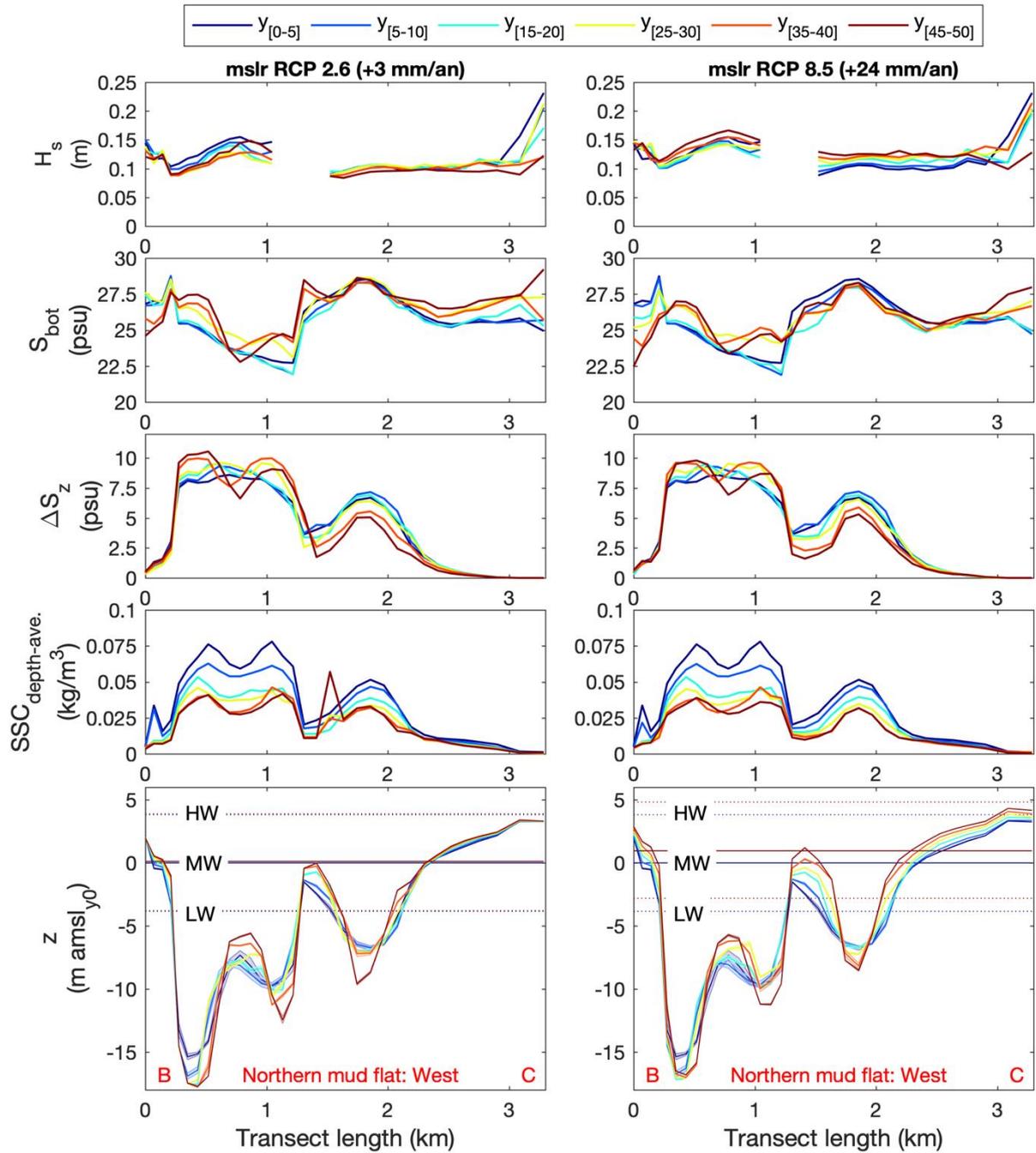


Figure 67 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long de la vasière Nord 'Ouest' (voir radiale 'BC' sur Figure 36) pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6 : +3 mm/an et (droite) RCP 8.5 : +24 mm/an. (De haut en bas) Marnage TR , hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

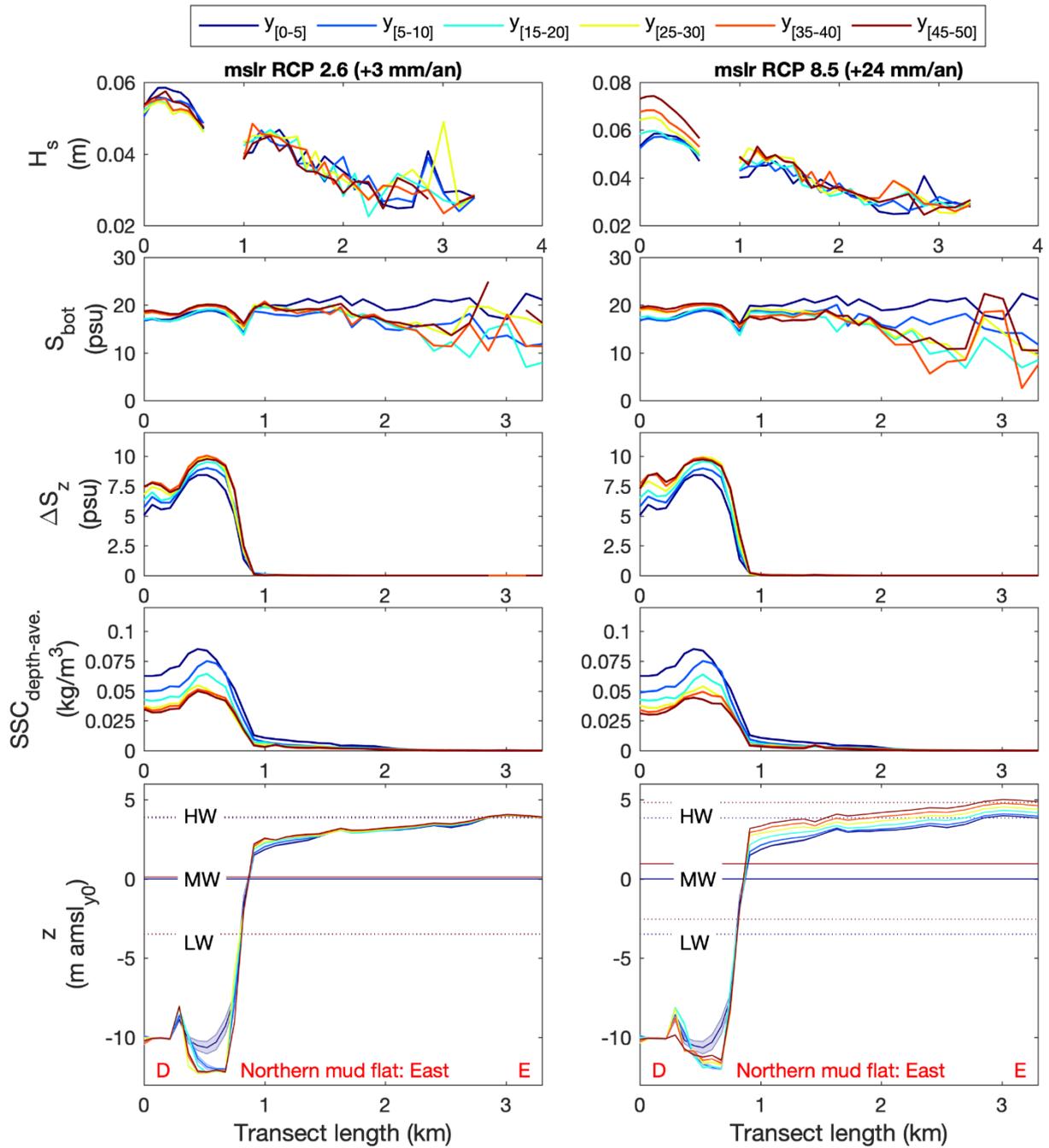


Figure 68 : Evolution des caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires sur 50 ans le long de la vasière Nord 'Est' (voir radiale 'DE' sur Figure 36) pour deux scénarios de montée du niveau de la mer : (gauche) RCP 2.6 : +3 mm/an et (droite) RCP 8.5 : +24 mm/an. (De haut en bas) Marnage TR , hauteur significative des vagues H_s , salinité de fond S_{bot} , gradient vertical de salinité ΔS_z , concentration en MES moyennée sur la colonne d'eau $SSC_{depth-ave.}$, et élévation du fond z par rapport au niveau moyen de la mer en 2016 (y_0) ; 'LW', 'MW' et 'HW' représentent respectivement les niveaux d'eau de basse mer, moyen et pleine mer.

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

GIP Seine-Aval
Hangar C - Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

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

Grasso F. (coord.), Le Hir P., Mengual B., Walther R., Verney R., 2021. Projet MORPHOSEINE « Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 97 p.

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

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

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

