



THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de Bretagne Occidentale
Ecole Doctorale N° 598 - *Sciences de la Mer et du littoral*
Spécialité : Océanographie Physique et Environnement

Unité de recherche : IFREMER – ODE - DYNECO - DHYSED

Par

Jean Philippe LEMOINE

Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien

sous la direction de **Pierre Le Hir**

présentée et soutenue à Brest, le 1^{er} février 2021

Composition du Jury :

Jean BERLAMONT
(rapporteur)

Professeur émérite
Katholieke Universiteit Leuven

Robert LAFITE

Professeur des universités
UMR CNRS 6143 M2C
Université de Rouen Normandie

Isabelle BRENON
(rapporteur)

Maître de conférence HDR
Laboratoire LIENSs, Université
de La Rochelle

Pierre LE HIR

Cadre de recherche HDR
IFREMER - DHYSED, Plouzané

Xavier CARTON
(Président du Jury)

Professeur des universités
Université de Bretagne Occidentale

Invités :

Pascal GALICHON

Chef de la direction du développement
durable et du pilotage - Grand Port
Maritime du Havre

Florent GRASSO

Cadre de recherche,
IFREMER - DHYSED, Plouzané

Patrice TOURNIER

Chef du service Chenal Aide à la
Navigation - Grand Port Maritime
de Rouen



Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien



Résumé : Le maintien des conditions de navigation dans les ports d'estuaires et leurs accès nécessite des dragages d'entretien récurrents. Dans l'estuaire de la Seine, les dragages réalisés par les ports de Rouen et du Havre génèrent des flux sédimentaires du même ordre de grandeur que les évolutions morphologiques et 10 fois supérieurs aux apports continentaux.

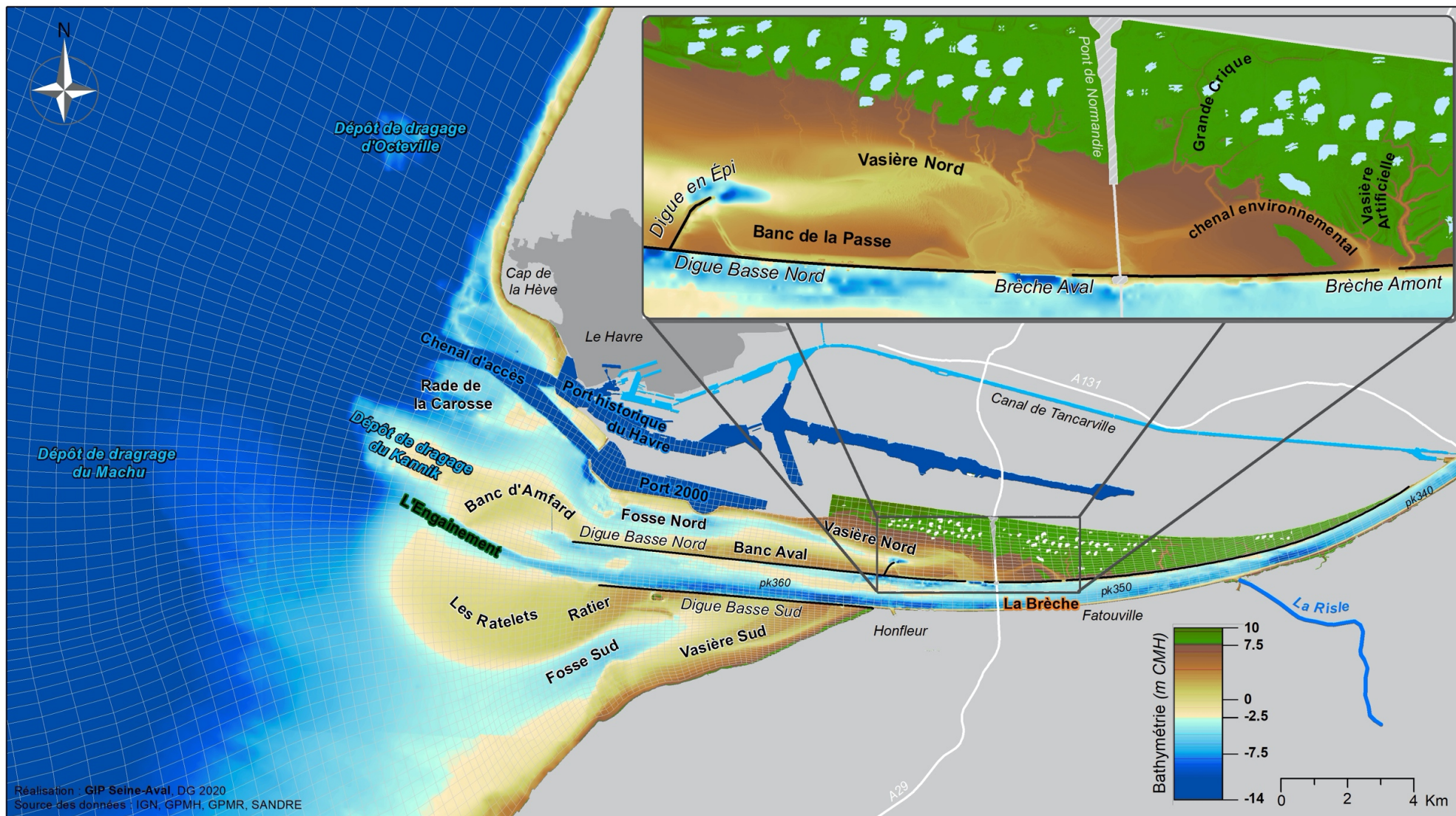
Un modèle numérique d'hydrodynamique 3D, couplé à un modèle de vagues, simulant la dynamique des sables et des vases a été adapté pour simuler les dragages comme un processus. Les matériaux déposés au-dessus d'une cote imposée sont extraits puis immergés au-dessus de sites de dépôt. Le modèle restitue les quantités de sédiments dragués à 10% près et sans dérive, leur répartition en sable et vase, et la dynamique des zones de rejet.

Des simulations réalistes pendant 10 ans montrent que les dragages sont maximaux durant la période hivernale, lorsque le débit de la Seine et les vagues sont intenses. La réponse aux différents forçages diffère selon la nature du sédiment : dans le chenal de navigation de la Seine les dragages de vase sont corrélés à l'amplitude de marée et secondairement au débit fluvial, s'intensifiant lorsque le bouchon vaseux est proche, tandis que les dragages de sable croissent avec les vagues. Les fluctuations interannuelles des débits et des tempêtes sont à l'origine d'une variabilité des besoins annuels en dragages pouvant atteindre 50%.

Lorsque les dragages sont pratiqués, le bilan sédimentaire de l'estuaire est en déficit (-2.8 Mt/an), malgré l'augmentation des flux de sédiments marins vers l'estuaire, quel que soit le mode d'immersion testé. Ce dernier influence le taux de recyclage de sédiments dragués, ici quantifié par marquage numérique. Sans dragage, l'estuaire tend à se combler (+4,5 Mt/an) et les faciès sédimentaires sont légèrement plus vaseux. En raison de l'intensité des remobilisations sédimentaires naturelles, la dynamique des MES semble peu impactée par les dragages d'entretien.



Dynamique morpho-sédimentaire de
l'estuaire de la Seine :
Rôle des dragages d'entretien



Carte "volante" : Embouchure de l'estuaire de la Seine : Localisation des principaux lieux dits utilisés dans le manuscrit. Le maillage du modèle est représenté en traits fins par-dessus la bathymétrie mesurées en 2009 par les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre

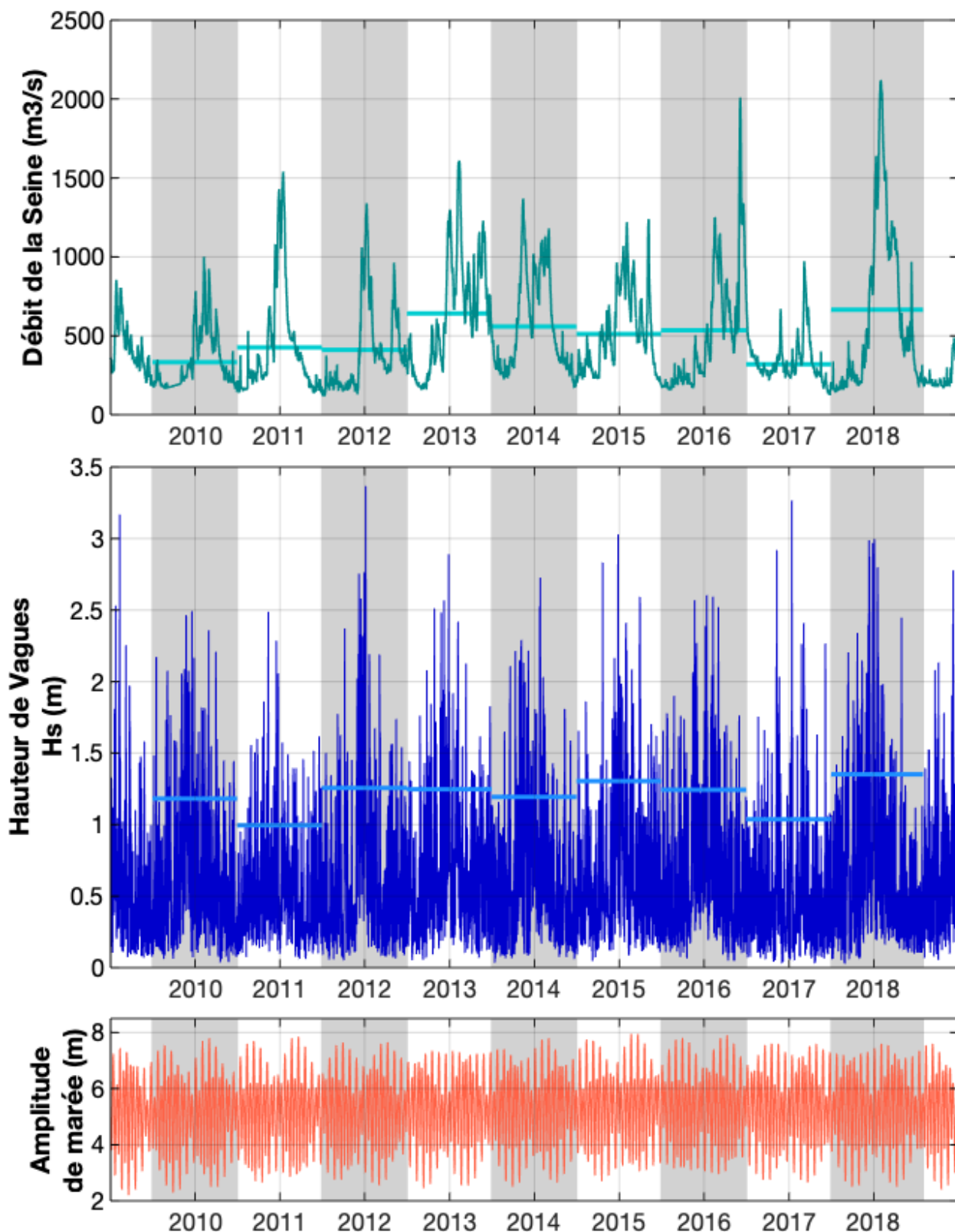


Figure "volante" : Évolutions du débit de la Seine, de la hauteur des vagues et de l'amplitude de marée à l'embouchure sur la période 2009-2018. Les alternances de bandes grises et blanches matérialisent chacune les années hydrologiques définies du 1^{er} juillet au 30 juin. Les lignes horizontales représentent les débits moyens et les percentiles 90 des hauteurs de vagues calculés sur les années hydrologiques

I	Introduction	11
	Contexte de recherche	13
I.1	Les dragages d'entretien en estuaire	14
I.2	L'estuaire de la Seine	19
I.3	Apports de la bibliographie sur les effets des dragages d'entretien sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires	22
I.4	Questionnements scientifiques et objectifs du projet	25
I.5	Organisation du manuscrit	27
II	Caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires de l'estuaire de la Seine : importance des dragages	29
II.1	Le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine	31
II.2	Dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Seine	42
II.3	Les apports sédimentaires à l'estuaire	58
II.4	Les dragages/clapages en estuaire de Seine	61
II.5	Importance des dragages dans l'estuaire de la Seine	71
III	Modélisation des dragages et analyse de leurs variabilités	73
III.1	Variabilités attendues des dragages	75
III.2	Modèle de simulation des dragages	76
III.3	Validation du modèle	81
III.4	Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing	92
III.5	Rappel des conclusions du III.4	120
IV	Effets des dragages sur le fonctionnement HMS de l'estuaire de la Seine	123

IV.1	Introduction : Le fonctionnement HMS et les dragages	125
IV.2	Méthodologie	126
IV.3	Dynamique des sites de dépôts de dragage	130
IV.4	Les effets des dragages d'entretien sur les indicateurs HMS	134
IV.5	Les effets des dragages sur les flux et bilans sédimentaires	161
IV.6	Zoom sur la fosse nord	173
IV.7	Synthèse et discussion	176
V	Simulation de l'impact potentiel d'un changement de site de clapage	183
V.1	Introduction	185
V.2	Dynamique des sites d'immersions	186
V.3	Effets des immersions à Machu ou Octeville R pour les sédiments dragués par le GPMR comparativement au cas d'un rejet au Kannik	189
V.4	Synthèse et discussion	206
VI	Conclusions et perspectives	209
	Conclusions	210
	Perspectives	213
VII	Bibliographie	219
VIII	Listes des figures et tableaux	229
	Liste des figures	230
	Liste des Tableaux	240

Introduction

Plan du chapitre :

Contexte de recherche	13
1.1 Les dragages d'entretien en estuaire	14
1.1.1 Les estuaires français	15
1.1.2 Les estuaires européens	16
1.2 L'estuaire de la Seine	19
1.2.1 Description générale	19
1.2.2 Les dragages dans l'estuaire de la Seine	21
1.3 Apports de la bibliographie sur les effets des dragages d'entretien sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires	22
1.3.1 Les effets directs	23
1.3.2 Les effets indirects	23
1.4 Questionnements scientifiques et objectifs du projet	25
1.5 Organisation du manuscrit	27



Contexte de recherche

La morphologie, l'hydrodynamisme et l'environnement sédimentaire d'un estuaire conditionnent son fonctionnement écologique et les usages qui en dépendent. Dans le cas d'un système anthropisé, les équilibres déterminant ce fonctionnement résultent des interactions entre processus naturels et effets des activités humaines. La connaissance de ces interactions, à différentes échelles spatiales et temporelles, est indispensable à l'analyse du fonctionnement global d'un estuaire, de ses composantes physiques jusqu'à l'évaluation de son fonctionnement écologique.

Durant le XX^e, les estuaires ont été largement aménagés pour les besoins de la navigation. La liberté morphologique des estuaires a souvent été contrainte par l'endiguement des berges. Les écoulements ont été chenalisés pour sécuriser les conditions de navigation. Les estuaires macrotidaux, naturellement caractérisés par la présence de chenaux multiples mobiles et de grandes surfaces intertidales, ont ainsi évolué sous les contraintes anthropiques. Les répercussions de ces aménagements sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire (HMS) des estuaires sont relativement bien connues : amplification du marnage, augmentation de la turbidité, réduction des surfaces intertidales, simplification de la morphologie et disparition des chenaux secondaires (e.g. Avoine et al., 1981; Jonge, 1983; Delsinne, 2005; Cuvilliez et al., 2009; Dam et al., 2013; Winterwerp & Wang, 2013; Luan et al., 2016; Florent Grasso & Le Hir, 2019).

Les chenaux de navigation et bassins portuaires artificiellement approfondis dans le cadre de ces aménagements constituent des zones de sédimentation importantes devant être entretenues par des dragages "d'entretien". Contrairement aux dragages d'approfondissement qui modifient la morphologie des chenaux, les dragages d'entretien contraignent la morphologie des chenaux en maintenant les profondeurs définies par les ports. Historiquement, les enregistrements des volumes dragués pour l'entretien des chenaux et bassins portuaires étaient rarement dissociés des volumes extraits pour les approfondissements. Certains auteurs, notamment Talke & Swart, 2006 dans l'estuaire de l'Ems ou encore De Vriend et al., 2011 dans l'estuaire de l'Escaut ont réussi à corréliser les grandes phases d'aménagements des estuaires avec les volumes dragués totaux, démontrant l'augmentation des dragages d'entretien induite par l'aménagement des estuaires. En Seine, ce type d'analyse n'a pas été mené à l'échelle des aménagements de l'estuaire durant le XX^e siècle, mais la création récente de l'extension Port 2000 du port du Havre a été l'occasion de constater une augmentation des dragages réalisés par le GPMH d'un facteur proche de 2.

Dans certains estuaires comme celui de la Seine, le maintien de conditions de navigation sûres peut nécessiter des dragages d'entretien quasi-continus. Les dragages d'entretien des zones de navigation et l'immersion récurrente des sédiments dragués peuvent alors constituer des flux sédimentaires anthropiques importants. Ces flux s'ajoutent aux flux naturels liés aux courants et aux vagues, et contribuent ainsi au fonctionnement HMS des estuaires. Dans le cas où les sédiments sont immergés à distance des zones de dragage, en mer ou en estuaire, ils peuvent se disperser dans la colonne d'eau au cours de leur chute ou se déposer sur le fond et soit y rester, soit en être érodés pour à nouveau se disperser plus loin. La réalité est souvent plurielle. Les matériaux rejetés puis remobilisés sont susceptibles de revenir vers l'estuaire au gré des courants et ainsi de contribuer à la masse en suspension et aux évolutions morpho-sédimentaires qui caractérisent l'estuaire. En outre, les dragages concernent différents types de matériaux aux comportements distincts qui, en cas de déplacement par dragage, impacteront différemment la dynamique du système, ce qui peut conduire à une modification de la nature du sédiment superficiel.

Les conséquences environnementales potentielles des dragages d'entretien sont donc multiples. D'une part les évolutions morphologiques et les variations de nature du sédiment superficiel induites sont susceptibles de modifier les habitats benthiques (e.g. Marmin et al., 2014). D'autre part les conditions de turbidité du milieu peuvent être altérées, soit indirectement en fonction des changements de fonctionnement HMS, soit directement sur le secteur dragué dans le cas d'un relargage de particules fines lors des opérations de dragage (Duclos, 2012). Les variations de turbidité induites par les travaux de dragage (V. N. De Jonge, 1983; Shukla et al., 2015; van Kessel et al., 2015; van Maren et al., 2015) peuvent ainsi avoir des répercussions sur les conditions d'éclairement et donc sur la production primaire (Essink, 2009). Ces effets sur les concentrations en matières en suspension (MES) engendrent à leur tour des évolutions des faciès sédimentaires et donc de la production benthique (Wildish & Thomas,

1985). Ainsi, les effets directs des dragages sur la morphologie des estuaires ont des répercussions indirectes sur l'ensemble du fonctionnement écologique estuarien et sur sa productivité (Rhoads et al., 1978).

Dans le cas de l'estuaire de la Seine, l'embouchure est le lieu d'une dynamique sédimentaire intense se traduisant par une évolution morphologique spectaculaire depuis plusieurs décennies. Dans ce même secteur, des dragages d'entretien sont nécessaires pour maintenir les accès aux ports du Havre et de Rouen. La bibliographie montre que les travaux de dragages déplacent annuellement une masse de sédiments du même ordre de grandeur que la masse de sédiment entrant naturellement dans l'estuaire, et bien supérieure à la masse sédimentaire apportée par le fleuve en amont (J.P. Lemoine et al., 2015). Dans ce contexte, il est naturel de s'interroger sur les conséquences des dragages dans la dynamique et le bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine.

I.1 Les dragages d'entretien en estuaire

Historiquement, de nombreux estuaires, en tant que zones naturellement abritées des vagues, idéalement positionnés à l'interface entre le continent et la mer, ont été aménagés à des fins portuaires. En France c'est le cas des 3 grands estuaires de la façade Manche-Atlantique : le port de Bordeaux en amont de la Gironde, les ports de Nantes et Saint Nazaire dans l'estuaire de la Loire et les ports de Rouen et Le Havre dans l'estuaire de la Seine. A l'échelle internationale, on peut citer les ports de Lisbonne, Rotterdam, Hambourg, Anvers, Londres, Buenos-Aires, San-Francisco, New-York, Shanghai, Tokyo, etc. Le faible hydrodynamisme et les fortes concentrations en matières en suspension (MES) qui caractérisent ces ports les soumettent à de forts taux de sédimentation pouvant compromettre les conditions de navigation et donc nécessiter des dragages d'entretien. Les premiers témoignages de l'utilisation d'une drague pour maintenir un estuaire portuaire proviennent du port de Middleburgh (Zeeland) et datent du milieu du XV^e (Gower, 1968). Les développements portuaires n'ont depuis cessé de croître, et les ports se sont approfondis et agrandis, augmentant ainsi considérablement les besoins en termes de dragage d'entretien.

Dans les plus grands ports mondiaux, les dragages d'entretiens se chiffrent le plus souvent en millions de tonnes par an ; l'exemple le plus impressionnant étant à notre connaissance celui du port de Shanghai dans l'estuaire du Yangtze (Chine) où les volumes dragués peuvent avoisiner les 100 millions de m³/an (Liu & Zhang, 2019). Sachant que le coût des dragages est estimé en moyenne à 5 €/tonne de sédiment sec, les dragages d'entretien constituent un enjeu économique majeur pour les autorités portuaires. En lien avec le développement portuaire des 50 dernières années, le dragage est ainsi devenu un secteur d'activité important à l'échelle internationale : le coût des dragages d'entretien à l'échelle mondiale a été estimé en 2011 par the *International Association of Dredging Companies* à 2,5 Milliards d'euros (IADC, 2011).

Les méthodes de dragages peuvent être classées selon le mode d'extraction des sédiments en trois catégories : les dragages mécaniques, hydrauliques et hydrodynamiques (Figure I.1). Le dragage mécanique est réalisé mécaniquement via l'utilisation d'un godet ou d'une benne à clapet. Les dragages hydrauliques consistent à déstructurer le sédiment et l'aspirer sous la forme d'une mixture eau/sédiment. Le dragage hydrodynamique, également appelé dragage par injection d'eau, émerge actuellement : il consiste à injecter de l'eau sous pression dans le sédiment afin de le déconsolider. Un courant de densité est alors généré, permettant de transporter le mélange eau/sédiment ainsi constitué soit vers une fosse, soit vers un secteur à fort courant où les sédiments sont ensuite transportés naturellement.



Figure 1.1: Illustration des différents types de dragage. a) dragage mécanique: drague stationnaire à benne; b) dragage hydraulique: drague aspiratrice en marche rejetant dans l'air la mixture eau-sédiment ("rainbowing") ; c) dragage par injection d'eau : l'Ostrea, drague du GIE -Dragages-Ports utilisées par le port de Bordeaux. (sources des illustrations précisées sur les photos)

Les dragues aspiratrices en marche (DAM) rentrent dans la catégorie des dragues hydrauliques, il s'agit du type de drague le plus utilisé pour les dragages d'entretien en milieu estuarien. Ce sont des navires autopropulsés qui contiennent un puits à l'intérieur de leur coque. Elles sont principalement utilisées pour le dragage de matériaux meubles comme du sable, de l'argile ou du gravier. Généralement, une DAM est équipée d'un ou deux tuyaux d'aspiration attachés à des élinde. Les tuyaux d'aspiration sont abaissés sous l'eau et les crépines sont « trainées » sur le fond marin, aspirant le matériau tandis que le navire se déplace lentement. Une fois complètement chargé, le navire se dirige vers le site de déchargement ou de dépôt où les déblais de dragage sont déchargés. Les déblais sont déchargés de l'une des trois façons suivantes :

- les matériaux sont déposés sur le site d'immersion en ouvrant les portes situées dans le fond du puits
- ils peuvent être refoulés à terre par le biais de conduites, qui peuvent être immergées ou flottantes
- les matériaux peuvent être projetés en l'air par pompes : on parle de "rainbowing" (IADC, 2014).

I.1.1 Les estuaires français

En France les 4 grands ports maritimes situés en estuaire doivent réaliser d'importants dragages d'entretien pour maintenir les tirants d'eau dans leurs chenaux et bassins. Ces dragages sont réalisés principalement par le biais des dragues du Groupement d'Intérêt Économique Dragages-Ports. Ce groupement a été constitué en 1979 pour maintenir un parc d'engins répondant aux besoins de ses membres et en assurer le meilleur emploi possible. Dragages-ports associe l'Etat (51 % des parts) et les grands ports maritimes de Dunkerque, Le Havre, Rouen, Nantes St-Nazaire, La Rochelle, Bordeaux et Marseille. Ce système français de mutualisation de dragues publiques au travers d'un GIE vise à limiter la dépendance des ports vis-à-vis des fluctuations de prix des quatre entreprises hollandaises et belges leaders dans ce domaine.

Dans la Gironde, le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) drague près de 8 Mm³/an. Le GPMB dispose de 18 sites d'immersion répartis de l'amont de l'estuaire jusqu'en mer. La grande majorité des immersions est réalisée à l'intérieur de l'estuaire (Artelia, 2018). En plus des dragages hydraulique et mécanique, le GPMB utilise des dragages par injection d'eau pour déplacer environ 420000 m³ (données de l'année 2009 dans Artelia & GPMB, 2018; Figure I.1).

En Loire, les conditions de navigation peuvent être compromises par l'accumulation des dépôts de sédiments du bouchon vaseux en mortes eaux ("crème de vase") et par la formation de grandes rides de sable. Ces dépôts nécessitent des dragages quasi permanents. Entre 2006 et 2010, en moyenne 8,5 Mm³ ont été dragués par le Grand Port Maritime de Nantes Saint Nazaire (GPMNSN). Ces dragages sont principalement effectués entre Paimboeuf et la mer (75% du volume depuis 1984). Une particularité des dragages opérés par le port de Nantes Saint-Nazaire est d'évacuer en deux temps les sédiments présents dans certaines souilles ou certains accès du port. Dans un premier temps une drague aspiratrice stationnaire dirige les sédiments via une conduite de refoulement vers le chenal de navigation. Dans un second temps, ces sédiments sont repris par la drague aspiratrice en marche avant

d'être clapés sur le site de la Lambarde dans l'estuaire (Figure I.2) (GIP Loire Estuaire, 2011; CEREMA, 2015).

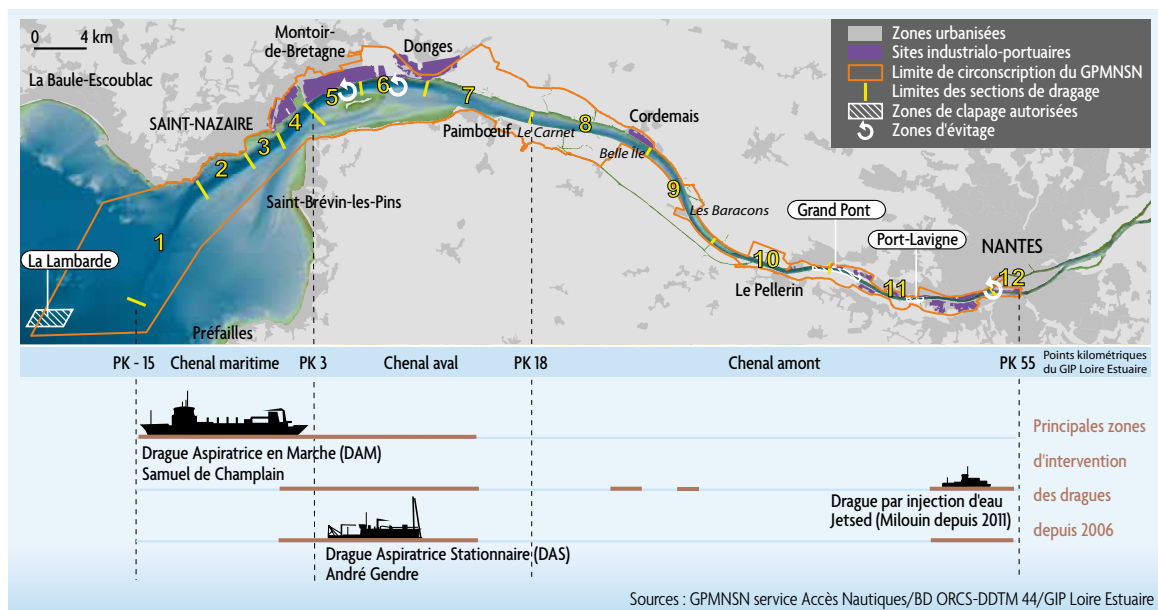


Figure I.2 : Localisation des zones de dragages et clapages dans l'estuaire de la Loire et technique de dragage utilisée selon les secteurs (GIP Loire Estuaire 2011)

I.1.2 Les estuaires européens

Dans le cadre du projet INTERREG TIDE, les dragages d'entretien dans les estuaires Européens de l'Humber, l'Escaut, l'Elbe et la Weser ont été comparés. Cette comparaison a été réalisée après un important travail d'homogénéisation des données et indicateurs. Ce travail a été mené en collaboration avec les autorités portuaires en charge des dragages dans ces estuaires. L'analyse proposée dans TIDE a l'intérêt de distinguer les dragages d'entretien et les dragages d'approfondissements. Les rapports du projet TIDE permettent ainsi d'accéder à des descriptions détaillées des dragages d'entretien, difficilement accessibles par ailleurs.

Estuaire du Humber

Dans l'estuaire du Humber, sur la période 2004-2010, ce sont en moyenne 3,7 Mm³ qui sont dragués annuellement pour assurer l'accessibilité aux ports de Hull, Goole, Grimsby et Immingham. Sur cette période la majeure partie des dragages d'entretien concerne l'estuaire médian et le port d'Immingham (~85 %). 80 % des immersions sont réalisées en estuaire afin de minimiser l'impact des dragages sur la dynamique sédimentaire, et en particulier de ne pas perturber le bilan sédimentaire de l'estuaire, tout en réduisant le coût de transport associé aux immersions. A noter qu'une partie des immersions sont réalisées de manière à canaliser les courants pour favoriser l'affouillement dans une zone naviguée. Cette approche aurait a priori permis de réduire notablement les dragages entre 2005 et 2010 (Lonsdale et al., 2013).

Estuaire de la Weser

Dans l'estuaire de la Weser qui donne accès au port de Brème, les dragages d'entretien ont augmenté de 5 Mm³ en 2000 à près de 10 Mm³ en 2009. Ces sédiments majoritairement sableux sont principalement immergés au large. Des dragages par injection d'eau sont réalisés dans les secteurs sableux afin de limiter l'action des DAM (BIOCONSULT & Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN), 2012).

Estuaire de l'Elbe

Sur les 130 km de l'estuaire de l'Elbe, les dragages d'entretien des accès aux ports de Hamburg, Cuxhaven et Brunsbüttel varient de 7,7 Mm³ en 1999 à 20 Mm³ en 2008 (Figure I.3). L'augmentation résulterait des travaux d'approfondissement menés entre 1998 et 1999, et en particulier d'une potentielle augmentation du pompage tidal induite par ces derniers. Ces sédiments sont immergés tout le long de l'estuaire. Afin de palier à cette augmentation du pompage tidal, un programme baptisé *River Engineering and Sediment Management Concept for the Tidal River Elbe* a été initié en 2008 (HPA & WSW, 2008). Ce programme vise à optimiser les dragages, à en réduire les coûts et les impacts. Les mesures prises dans le cadre de ce programme concernent i/ la reconnexion de zones inondables afin de dissiper l'énergie tidale, et ii/ la mise en place d'une nouvelle stratégie de gestion des sédiments dragués avec immersion de ces derniers en pleine mer afin de limiter leur retour. On notera aussi la mise en place en 2008 d'un projet pilote de piège à sédiment de 2 km de long, 300 m de large et 2 m de profondeur en aval du port de Hamburg (Figure I.3). L'objectif premier de ce piège à sédiment est de réduire les dragages dans le port d'Hamburg, puis d'immerger les sédiments piégés en aval (HPA & WSW, 2012).

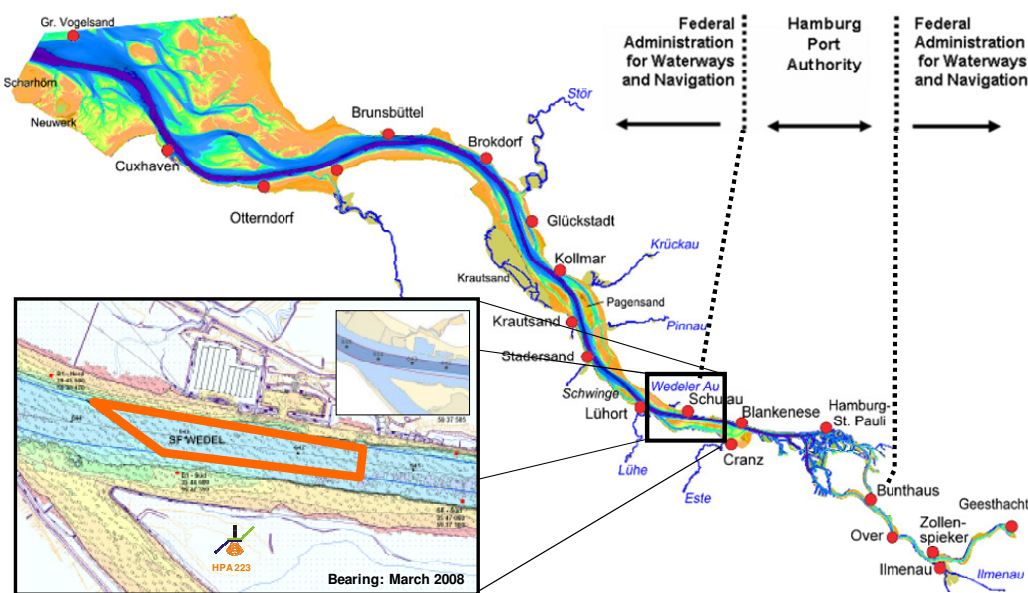


Figure I.3: Cartographie de l'estuaire de l'Elbe avec les ports de Cuxhaven, Brunsbüttel et Hamburg et zoom sur le piège à sédiment (HPA/WSW 2012)

Estuaire de l'Escaut

Dans l'estuaire de l'Escaut, les dragages opérés pour assurer l'accès au port d'Anvers varient entre 13 et 20 Mm³/an sur la période 2000-2010, et sont principalement sableux.

La situation géographique de l'Escaut, en tant qu'estuaire transfrontalier dont l'embouchure hollandaise donne accès au port belge d'Anvers est à l'origine d'un programme de gestion de l'estuaire piloté en collaboration entre Flamands et Hollandais. Ce programme intitulé *"Long Term Vision"* (LTV) repose sur 3 axes : protection contre les inondations, accessibilité portuaire et préservation de la nature. Dans ce cadre, Belges et Hollandais pilotent conjointement les dragages de l'Escaut afin de préserver le caractère multi-chenaux de cet estuaire (Ides & Plancke, 2013).

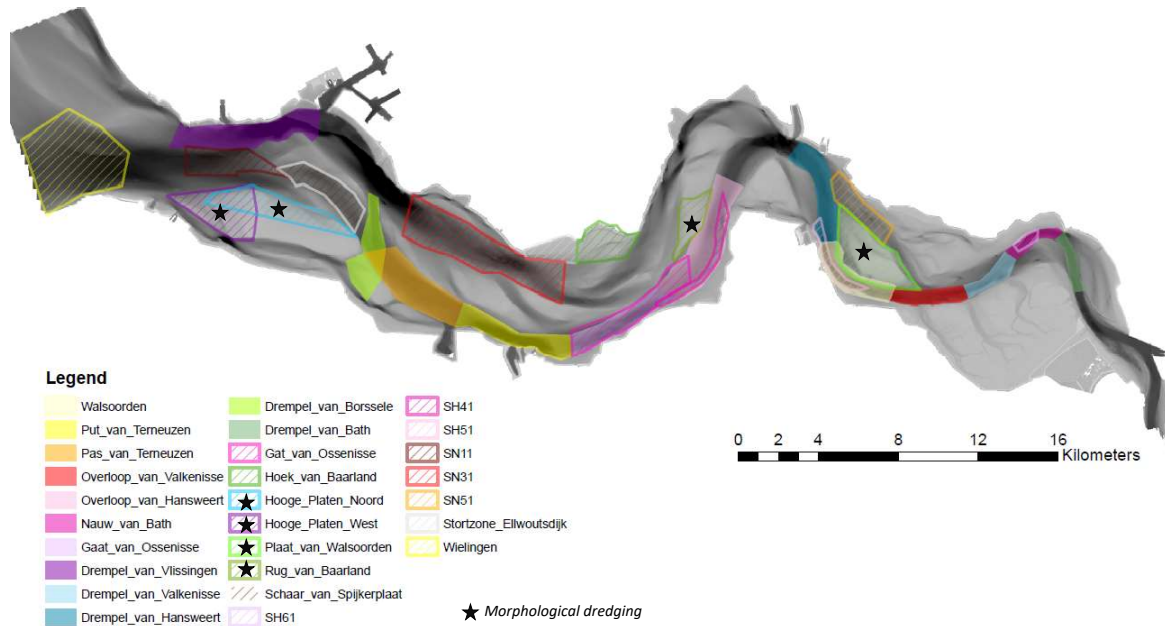


Figure I.4 : Localisation des zones de dragages et de clapages de l'Escaut utilisées depuis 2010 avec la technique flexible dumping. Les zones hachurées représentent les zones de clapages. Les zones avec une étoile correspondent aux sites sur lesquels des immersions utilisant la technique morphological dredging sont réalisées (VNSC 2016 in Cox, 2018)

La stratégie dite *flexible dumping* adoptée depuis 2010 repose sur deux principes :

- i. Suivi avec l'approche "Sand balance"
- ii. morphological dredging

- *Suivi avec l'approche "Sand balance"*

Le système multi-chenaux de l'Escaut se compose d'une alternance de chenaux de flot et de jusant séparés par de grandes zones intertidales. Ces chenaux se croisent au niveau de zones très dynamiques et peu profondes (nécessitant des dragages importants), pour former des entités morphologiques distinctes : les cellules morphologiques de l'Escaut (*morphological cell concept*, Winterwerp et al., 2001). Chaque cellule comporte ainsi un chenal de flot et un chenal de jusant. Dans l'Escaut, la navigation et donc les dragages sont principalement réalisés dans les chenaux de jusant ; les immersions sont réalisées au sein de la même cellule, dans le chenal opposé.

Le concept de *sand balance* se base sur la réalisation d'un bilan sédimentaire en volume, calculé à partir de l'évolution du volume sédimentaire d'une zone donnée. La comparaison de cette évolution bathymétrique avec les volumes dragués et/ou immergés sur cette même zone permet de déterminer les volumes de sables déplacés sur cette zone entre deux suivis. L'application de ce concept aux suivis des cellules morphologiques permet de suivre leurs états mais également leurs dynamiques morphologiques. L'estimation récurrente de ces bilans permet ainsi d'adapter l'intensité des dragages et clapages afin de préserver chaque cellule et ainsi le système multi-chenaux dans son intégralité (Taal, 2012).

- *Morphological dredging*

L'approche *morphological dredging* consiste à immerger les sédiments dragués sur des secteurs spécifiques pour influencer positivement les évolutions morphologiques naturelles. Ce mode de gestion des produits de dragage se base sur le principe développé et appliqué avec succès depuis les années 70 pour les dragages d'entretien et d'approfondissement des chenaux du delta du Zaïre au Congo (Peter et Wens, 1991 in Meersschaut et al., 2004).

Dans le cas de l'Escaut, ce mode de gestion des sédiments dragués, proposé par le Port d'Anvers, est appliqué à la restauration/préservation d'habitats intertidaux et/ou peu profonds. Après le succès de l'expérimentation menée entre 2004 et 2007, qui a permis de restaurer en partie la barre sableuse du site de Walsoorden (Vos et al., 2012), cette approche alternative des immersions a été intégrée à la stratégie de gestion des sédiments dragués de l'Escaut. En 2010, 4 sites de clapages ont été ajoutés à la liste des sites d'immersion de l'Escaut. 100 % des sédiments dragués dans le cadre de l'approfondissement initié en 2010 ont été gérés grâce à cette méthode, et depuis cette date 20 % des sédiments dragués dans le cadre des dragages d'entretien ont été immergés sur ces zones (Plancke et al., 2014 in Cox 2018).

I.2 L'estuaire de la Seine

I.2.1 Description générale

Défini comme la zone du fleuve sous influence de la marée dynamique, l'estuaire de la Seine s'étend du barrage de Poses jusqu'à la baie de Seine. Il représente les 170 derniers kilomètres du fleuve (Figure I.5).

La Seine se jette dans la Manche, plus précisément dans la partie orientale de la baie de Seine. La marée y est atypique, avec une amplitude de 7m en vive eau et une asymétrie marquée qui présente une phase de montée relativement courte et une tenue du plein de près de trois heures. Cette marée et les courants qu'elle génère expliquent de nombreuses spécificités du fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine (cf. Chapitre II).

L'estuaire est par ailleurs l'exutoire d'un bassin versant de près de 80 000 km², abritant 17,5 millions de personnes et 40 % de l'activité économique nationale.

La bathymétrie de l'estuaire de la Seine, illustrée sur une carte volante fournie avec le manuscrit, présente des profondeurs maximales dans les bassins et accès portuaires du GPMH aux alentours des -16 mCMH (Cote Marine du Havre : l'origine de ce système de nivellement est définie comme le niveau des plus basses mers astronomiques au Havre). Un système de digues submersibles à l'embouchure, motivé pour faciliter l'accès au port de Rouen (voir plus loin), permet de distinguer trois entités bathymétriques : le système fosse nord/vasière nord en rive droite et au nord de la digue submersible nord ; ii/ le secteur endigué entre les digues submersibles et iii/ la fosse sud au sud de la digue basse sud. Étant donnée l'amplitude de la marée à l'embouchure, la limite entre vasière intertidale (slikke) et herbus (schorre) se situe au voisinage +7,5 mCMH. Comme de nombreux estuaire macrotidaux, les MES de l'estuaire de la Seine forment une accumulation turbide : le bouchon vaseux de la Seine est situé à l'embouchure, au niveau de la zone du gradient de salinité, centré aux alentours de Fatouville. En termes de faciès sédimentaire, l'estuaire présente une alternance de faciès sableux, vaso-sableux et vaseux, avec la présence de quelques zones non érodables. Cette alternance de faciès sédimentaires reflète la variabilité et la complexité des processus hydro-sédimentaire à l'œuvre dans l'estuaire de la Seine. Ces processus seront détaillés au chapitre II.

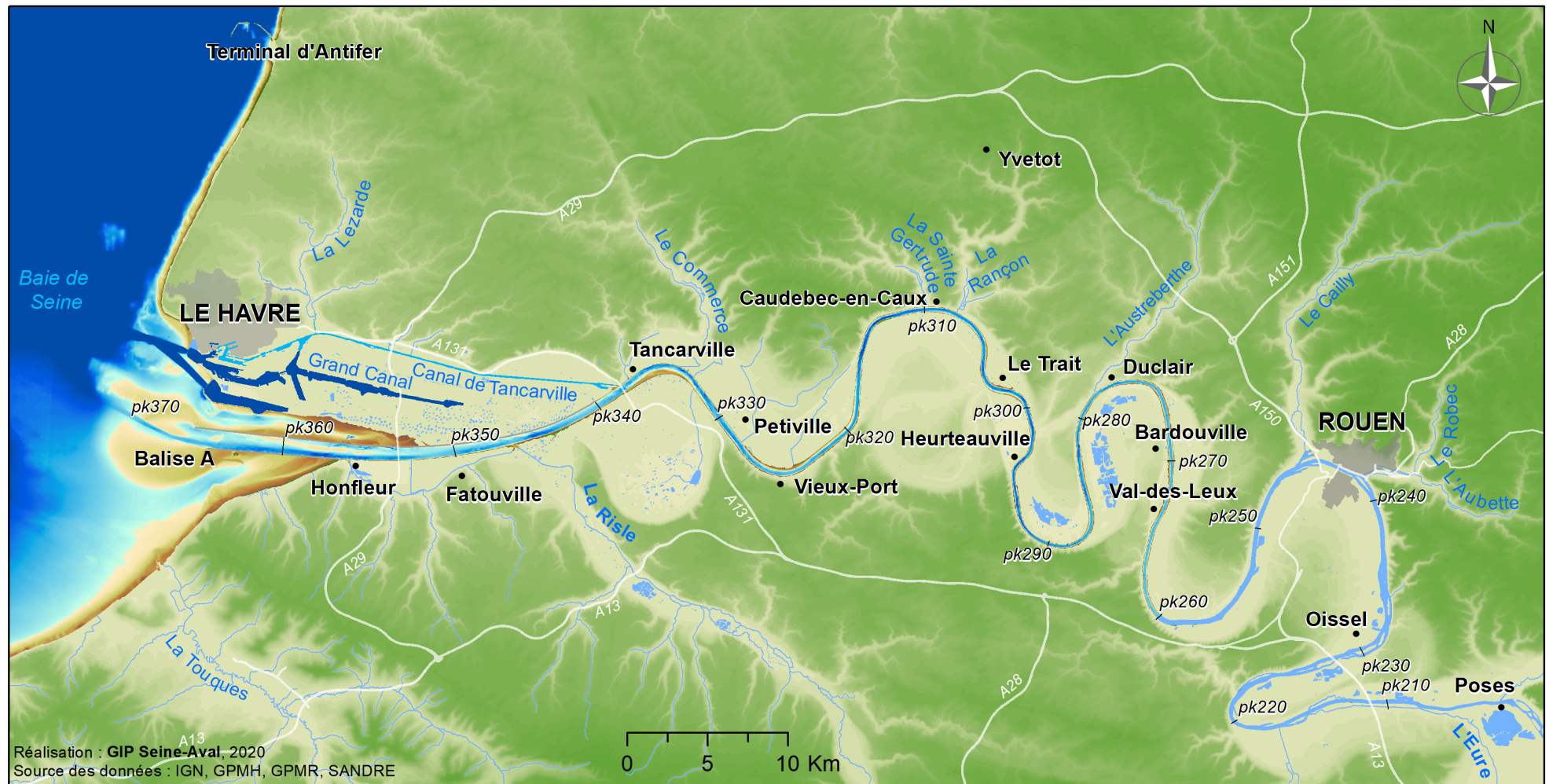


Figure I.5: Carte de l'estuaire de la Seine de Poses à l'embouchure. (pk : point kilométrique, la référence des points kilométriques (pk 0,00) se situe au Pont Marie à Paris)

L'estuaire de la Seine abrite deux ports de rang internationaux, le Grand Port Maritime de Rouen (GPMR) et le Grand Port Maritime du Havre (GPMH) qui seront fusionnés avec le port de Paris en juin 2021 pour créer un établissement public portuaire unique : HAROPA Port de Paris Seine Normandie. Le développement de ces deux ports, depuis le XIX^e, a conduit à une anthropisation extrême de la morphologie de l'estuaire (endiguement, arasement d'îles, creusement du chenal, etc.). Ces travaux, et en particulier l'artificialisation de 75 % du linéaire de berges, ont eu un fort impact sur l'évolution morphologique de l'estuaire avec notamment une réduction de la surface en eau d'un facteur 2 et une réduction des zones intertidales d'un facteur 5 (Foussard et al., 2010). Parmi les aménagements majeurs de l'estuaire, il y a la construction des deux digues submersibles nord et sud dans les années 1970 (Carte Volante). La réalisation de ce projet a entraîné une modification complète de la bathymétrie de l'estuaire, et a nécessité le déplacement de plus de 50 millions de mètres cubes de sable, la démolition de 6 km de digue en enrochements et en béton, et la construction de plus de 30 km de nouvelles digues (Chapon, 1964). Ces aménagements ont eu pour effet de renforcer les vitesses entre les digues et plus particulièrement dans le chenal de navigation où les grandes profondeurs réduisent l'effet du frottement sur le fond. La canalisation des courants par les digues a surtout amplifié l'intensité des courants de jusant. Cette accentuation artificielle du jusant entre les digues fut recherchée lors de la conception des digues pour provoquer une chasse partielle des sédiments et limiter la sédimentation dans le chenal (*e.g.* (Le Hir et al., 2001). La présence des digues submersibles à l'embouchure de l'estuaire interne constitue une contrainte morphologique majeure qui empêche toute divagation naturelle de chenaux. Ceci constitue une caractéristique unique et propre à l'estuaire de la Seine.

Plus récemment, la construction de Port 2000 (2001-2006) au nord de l'embouchure de l'estuaire a eu un impact significatif sur l'embouchure avec la construction de près de 6 km de nouvelles digues. Ce projet constitue d'ailleurs, avec la construction du terminal de Maasvlakte aux Pays-Bas, l'un des plus grands chantiers maritimes en Europe. Enfin, entre 2012 et 2017, le port de Rouen a approfondi son chenal d'accès afin de permettre à des navires de 11,70 m de tirant d'eau de remonter les 120 km qui séparent Rouen de l'embouchure. Ces aménagements permettent aux ports de l'estuaire d'effectuer un trafic de marchandise de près de 90 Mt en 2019 (HAROPA, 2020).

I.2.2 Les dragages dans l'estuaire de la Seine

Les chenaux d'accès, et les zones portuaires, de par leurs profondeurs artificiellement excessives comparées à la morphologie naturelle, constituent des zones soumises à de forts taux de sédimentation. Dans l'estuaire de la Seine, à l'échelle annuelle, la sédimentation au niveau des accès portuaires est tellement importante qu'il n'y a pas de périodes durant lesquelles il n'est pas nécessaire de draguer : en moyenne 7 Mt sont dragués chaque année (20000 t/j). Ces chiffres s'avèrent être très importants comparés aux mouvements sédimentaires quantifiés dans l'estuaire. Les tentatives de bilans sédimentaires établis à partir des quantifications des flux sédimentaires ont cherché à tenir compte des quantités draguées [Avoine (1985, 1995) ; et plus récemment Lemoine et al. (2015 ; Figure I.6), ou encore Schultz et al., 2018], mais beaucoup d'inconnues demeurent. Les 7 Mt dragués annuellement peuvent aussi être comparés aux apports solides apportés par la Seine, estimés à environ 700 000 t/an (Landemaine, 2016).

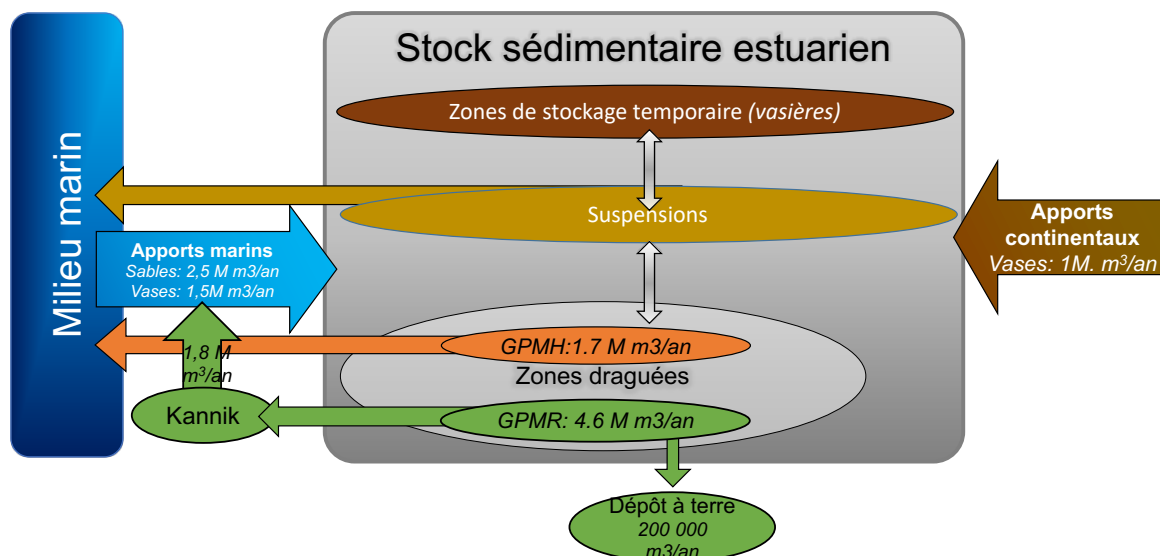


Figure I.6 : Principaux flux sédimentaires naturels et anthropiques en estuaire, quantifiés d'après la bibliographie. Les flux sédimentaires induits par les dragages du GPMH et du GPMR sont indiqués en orange et en vert respectivement. Simplifié d'après Lemoine et al. (2015)

Les emprises des Ports de Rouen et du Havre sont très différentes en termes de position dans l'estuaire. Les accès au port du Havre et ses bassins portuaires sont situés à l'extrémité aval de l'estuaire en rive droite, alors que le Port de Rouen est situé à 120 km de la mer (Figure I.5). Néanmoins plus de 90 % des dragages effectués par le port de Rouen sont réalisés à l'aval de Tancarville au niveau du chenal qui passe entre les digues submersibles (*carte volante*).

Les immersions des sédiments dragués par le GPMH sont effectués à une dizaine de km au large du port, sur le site d'Octeville. Les immersions des sédiments dragués par le GPMR ont été réalisées de 1977 à 2017 sur le site du Kannik (*Carte volante*). Depuis mi-2017, elles sont réalisées sur le site de Machu situé plus au large. La section II.4 détaille les dragages dans l'estuaire de la Seine.

I.3 Apports de la bibliographie sur les effets des dragages d'entretien sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires

D'une manière générale, les effets des dragages sur la dynamique hydro-sédimentaire naturelle peuvent être distingués en effets directs et indirects. Les premiers sont liés aux opérations de dragage, les seconds aux conséquences à moyen et long terme des modifications induites par les dragages récurrents sur la dynamique sédimentaire estuarienne (Tillin et al., 2011 in Duclos, 2012). Les effets des approfondissements sur la dynamique HMS des estuaires ont fait l'objet de nombreuses études : modification de la propagation de la marée (amplification et renforcement de l'asymétrie), augmentation du prisme tidal, augmentation de la turbidité, réduction des surfaces intertidales, simplification de la morphologie, disparition des chenaux secondaires et augmentation des dragages d'entretien (e.g. Winterwerp et al. 2001, Thomas et al., 2002, Delsinne 2005, Cuvilliez 2009, De Vriend et al. 2011, Dam 2013, Winterwerp 2013, Yan et Zhu 2015, Long Luan 2016, Grasso et Le Hir, 2019).

Les dragages d'entretien induits par les approfondissements se distinguent de ces derniers par leur récurrence, et donc la continuité de leurs effets potentiels directs et indirects. La bibliographie dédiée

spécifiquement aux effets récurrents des dragages d'entretien sur le fonctionnement des estuaires peut apparaître comme relativement pauvre, comparée à celle sur les dragages d'approfondissement.

I.3.1 Les effets directs

Concernant les effets directs, on peut distinguer ceux induits par les dragages de ceux liés aux immersions éventuelles. Les effets des dragages sur les fonds sont morpho-sédimentaires (modification de la cote du fond et des caractéristiques des sédiments superficiels), et se limitent aux traces laissées par l'élinde ou la benne sur le fond. Les caractéristiques de ces traces dépendent du type d'élinde utilisées et varient en largeur de 2 à 5 m et en profondeur de 0.3 à 0.5 m (Davies et Hitchcock, 1992 *in* Duclos, 2012). Les remises en suspension induites par les dragages dépendent naturellement du matériel dragué et sont de deux types : la remise en suspension sur le fond induite par le passage de l'élinde et le panache de surface généré par la surverse des eaux contenues dans la mixture eau/sédiment aspirée par la drague. Duclos (2012) a caractérisé les remises en suspension induites par les extractions de granulats en baie de Seine, et montre que les concentrations en MES dans le panache généré tendent très rapidement vers des valeurs proches des concentrations naturelles en baie (entre 5 et 20 mg.l⁻¹), dans le temps ($\pm$ 2h) et dans l'espace (quelques km).

Concernant les effets directs des immersions, il existe toute une littérature sur les panaches induits par un rejet de dragage, dont on peut trouver une revue dans Alzieu, (1999). Appliqués à l'embouchure de la Seine, les travaux de Hoslin (1989) et Boutin (1999) concluent que dans le cas du clapage des sédiments du chenal d'accès au port de Rouen sur le site du Kannik, l'opération n'entraîne pas, à court terme, une dispersion importante des matériaux rejetés. L'essentiel des sédiments est ainsi, selon les conditions hydrodynamiques, retrouvé sur le site d'immersion. Un panache turbide localisé à proximité du fond (haut de $\pm$ 4 m selon les conditions hydrodynamiques) et au maximum à 4 km peut néanmoins être observé si les conditions hydrodynamiques sont intenses. Par ailleurs, les impacts des immersions sur les fonds ont été quantifiés, notamment dans le cadre des thèses de Marmin (2014) et Baux, (2018) sur les habitats benthiques. Dans l'ensemble, ces travaux constatent que les effets morpho-sédimentaire des immersions restent localisés. Le site de Machu a fait l'objet d'un suivi permettant de définir un état initial avant exploitation par le GPMR mais également d'observer l'impact d'immersions expérimentales. Ces suivis montrent un enrichissement en sable fin et en vase, détectable dans les sédiments de surface à des distances inférieures à 1 km (GPMR, 2014).

Globalement les effets directs, à court terme, des opérations de dragage/clapage effectuées par des dragues aspiratrices en marche sont connus, et il apparaît qu'ils sont relativement faibles comparés à l'intensité des processus sédimentaires estuariens.

I.3.2 Les effets indirects

Les effets indirects à moyen ou long terme des dragages d'entretien sur le fonctionnement HMS n'ont jamais fait l'objet d'étude spécifique en Seine. Cependant, leurs effets ont été étudiés dans d'autres estuaires.

Recherchant les effets du dragage sur les concentrations en MES dans l'Ems avec un modèle simulant la dynamique des vases, Van Maren et al. (2015) ont montré que les dragages et clapages ont des effets limités sur les niveaux de turbidité ; néanmoins, en testant l'absence de bassins portuaires dans leur modèle, ces auteurs observent que le piégeage récurrent des sédiments fins dans les zones portuaires de l'Ems contribue à diminuer la turbidité à proximité des zones draguées. Au contraire ils observent que les clapages augmentent les niveaux de turbidité au voisinage des sites d'immersion (100 mg/l). Avec la même approche (*i.e.* modèle de transport de vase), Van Kessel et al. (2015) montrent que globalement le dragage et le piégeage des sédiments dans les zones draguées contribuent également à diminuer la turbidité ambiante dans l'Escaut. Par ailleurs, ces auteurs montrent qu'à proximité des bassins portuaire d'Anvers, la dynamique des particules fines est étroitement liée aux pratiques de dragages qui consistent à clapper en amont des zones draguées ; dans ce secteur

plus de 2/3 des sédiments ont déjà été préalablement dragués et clapés. Une simulation théorique leur permet également de montrer qu'un changement de site d'immersion, à l'aval d'Anvers, conduirait à une diminution des concentrations en MES (de l'ordre de 7 %) à proximité des bassins portuaires. Dans l'ensemble les observations de diminution des turbidités induite par les dragages d'entretien à court terme, mises en avant par ces auteurs, sont à mettre en regard de l'effet des dragages d'approfondissement qui, via leurs effets sur la morphologie, ont plutôt tendance à générer des augmentations (e.g. De Jonge et al., 2014). Il est important de noter que les modèles utilisés pour ces deux études sont morpho-statiques et que les résultats présentés sont issus de simulations d'une durée de 1 an. Les résultats présentés n'intègrent donc pas les potentiels réajustements morpho-sédimentaires pouvant se produire du fait des dragages ou de leur absence.

Dans l'Escaut occidental (*i.e.* en aval du port d'Anvers), caractérisé par un système à chenaux multiples, où chenaux de flot et de jusant se croisent pour former des cellules morphologiques (déjà évoquées dans le § 1.1.2) ; les flux sédimentaires s'équilibrent à l'échelle de l'estuaire mais aussi à l'échelle de chacune des cellules morphologiques. Pour ne pas rompre cet équilibre, la stratégie de dragage des accès au port d'Anvers, vise entre autre à rejeter au sein d'une même cellule les sédiments extraits dans l'un des chenaux (cf. 1.1.2). Sur la base de modélisations théoriques (Wang & Winterwerp, 2001; Hibma et al., 2009; Jeuken & Wang, 2010) et d'analyses réalisées à partir de données *in-situ* par Jeuken and Wang (2013) sur l'Escaut ou Monge-Ganuzas et al. (2013) sur l'estuaire de l'Oka, Wang et al. (2015) affirment l'existence d'un seuil critique de clapage au-delà duquel la morphologie naturelle est susceptible de dégénérer. Les dragages en tant qu'approfondissement de la cellule n'ont cependant pas d'effet sur la stabilité des systèmes multi-chenaux. Ce seuil, défini pour des systèmes multi-chenaux sableux, s'applique au ratio entre les quantités clapées et la capacité de transport sédimentaire du chenal recevant les immersions. Ainsi, pour un ensemble chenal de flot/chenal de jusant constituant une cellule morphologique, les dragages dans un chenal (ex. chenal de jusant) et les clapages dans l'autre chenal (ex. chenal de flot) ne doivent pas dépasser 5 à 10 % de la capacité de transport sédimentaire naturelle du chenal recevant les immersions, sans quoi la pérennité de la structure à chenaux multiples serait compromise. En effet, si les immersions dépassent les 10 % de la capacité de transport, l'hydrodynamisme du chenal recevant les sables dragués diminue et n'est plus suffisant pour transporter le sable : le chenal commence à se combler. Ce comblement de l'un des deux chenaux de la cellule morphologique peut conduire à la dégénération de cette dernière et potentiellement à la dégénération des cellules voisines, à des échelles de temps décennale voir centennale (Taal, 2012).

En utilisant un modèle morpho-dynamique, Dam et al. (2013) ont montré qu'en une quarantaine d'années (1965-2002), l'absence de dragage dans l'Escaut aurait conduit à un rééquilibrage morphologique des chenaux principaux et secondaires de l'Escaut oriental. En effet, les dragages étant réalisés dans les chenaux principaux et les clapages dans les chenaux secondaires, l'absence de dragage/clapage conduirait à une sédimentation des chenaux principaux et une érosion des chenaux secondaires. Par ailleurs, cette simulation montre l'absence d'effet des dragages sur les surfaces intertidales (~ 2 % de surface en moins sans dragage). La modélisation d'un scénario avec dragage mais sans clapage permet également à Dam et al. (2013) de montrer l'importance des immersions dans le bilan sédimentaire de l'Escaut. En effet, en l'absence de clapage, l'estuaire apparaît comme étant en érosion. A l'échelle de temps considérée (38 ans) et à l'échelle de l'Escaut, ces auteurs démontrent aussi que les évolutions morphologiques induites par les dragages d'entretien ont des répercussions sur la propagation de la marée (7 % de marnage en moins au niveau d'Anvers sans dragage).

La mise en relation des évolutions morphologiques avec les activités de dragage/clapage réalisées dans l'estuaire de l'Oka (Espagne) permet à Monge-Ganuzas et al. (2013) de constater que les dragages/clapages réalisés dans les chenaux de flot entre 1973 et 1978 ont altéré le fonctionnement de deux des 4 cellules morphologiques de l'estuaire. Les simplifications morphologiques générées par les dragages et les immersions de sédiment dragués et en particulier l'alignement du chenal principal de jusant ont modifié la dynamique sédimentaire de l'estuaire, et augmenté les taux de sédimentations. Cette augmentation a conduit à des besoins récurrents de dragage (*i.e.* tous les 5 ans), et à des réajustements morphologiques importants : principalement la réduction des surfaces des chenaux de flot et des zones intertidales au profit de milieux supra-tidaux. Selon ces auteurs, les opérations de dragage ont ainsi compromis l'équilibre des cellules morphologiques de l'estuaire de l'Oka et accéléré son comblement.

Il convient de souligner que dans l'ensemble les études portant sur les dragages d'entretien portent soit sur la dynamique des vases soit sur les évolutions morphologiques (principalement des fonds sableux), pas les deux à la fois.

I.4 Questionnements scientifiques et objectifs du projet

La bibliographie souligne l'importance des effets potentiels des dragages d'entretien sur la dynamique des estuaires dragués, comme celui de la Seine. Nous proposons d'étudier et de caractériser les interactions entre le fonctionnement HMS naturel de l'estuaire de la Seine (tel que décrit dans la bibliographie, e.g. Grasso et al. 2020) et les dragages d'entretien. Ces relations entre les processus naturels et les dragages seront étudiées selon des échelles temporelles journalière à pluriannuelle et à l'échelle spatiale de l'embouchure de l'estuaire (cf *carte volante*). Notre approche repose sur la prise en compte du dragage comme un processus (d'origine anthropique) conditionné par les évolutions morphologiques du fond et générant des flux sédimentaires, dirigés des zones draguées vers les sites d'immersions (Figure I.7).

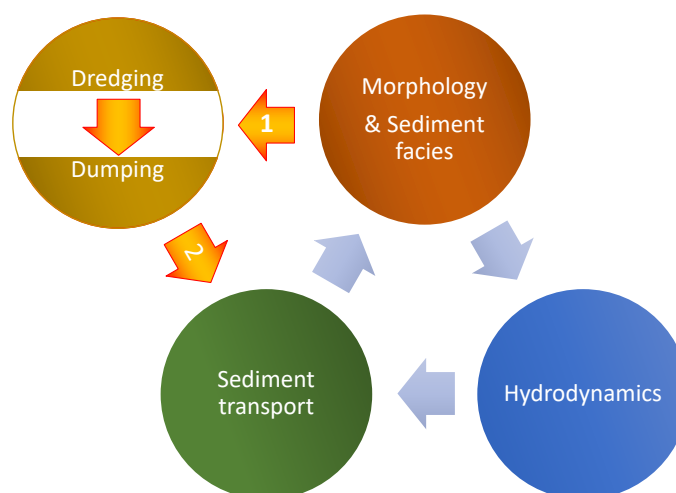


Figure I.7 : Schéma de la prise en compte du dragage parmi les processus hydro-morpho-sédimentaires

Le rappel des quantités draguées dans l'embouchure de la Seine (Section I.3) conduit à s'interroger sur les conséquences de la gestion anthropique des sédiments dans la dynamique des particules et le bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Par exemple, la question d'une dépendance éventuelle de la masse du bouchon vaseux en fonction des opérations de dragage et des conditions de rejet dans le système fait aujourd'hui débat dans la communauté. La connaissance des impacts de ce forçage reste encore limitée, car la majeure partie des études du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine n'a jusqu'ici considéré que les forçages hydrométéorologiques naturels (marées, débits de la Seine à Poses, conditions météo-océaniques). Ce n'est que très récemment que les opérations de dragage ont pu être introduites dans les modèles numériques de transport sédimentaire (Waeles et Le Hir, 2006 ; Artelia, 2014), ouvrant une voie d'investigation possible sur le lien entre dragages, flux et bilans sédimentaires et même évolution morpho sédimentaire de l'estuaire.

L'objectif du présent travail est d'étudier l'effet des transferts anthropiques de sédiments sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, et sur ses tendances évolutives en tenant compte des couplages hydro-morpho-sédimentaires. Cette analyse devrait permettre ultérieurement l'étude de ces effets sur le fonctionnement écologique de l'estuaire, en termes d'évolution d'habitats notamment.

La modélisation apparaît comme étant la meilleure solution disponible pour améliorer notre connaissance sur l'effet global des dragages en estuaire. En effet, le modèle en tant qu'intégrateur de l'ensemble de notre connaissance sur les processus estuarien, permet de simuler le fonctionnement HMS de l'estuaire, et donne accès à l'ensemble des données nécessaires pour quantifier le rôle des dragages dans ce dernier, à condition bien sûr qu'il soit validé. La modélisation permet aussi de simuler des scénarios théoriques, notamment des stratégies de dragages alternatives, qui peuvent aider à mieux comprendre les effets de la stratégie de dragage actuelle des ports dans le fonctionnement HMS de l'estuaire, et à proposer des stratégies alternatives.

Pour répondre à notre objectif, la modélisation mathématique est donc l'approche privilégiée. Différents modèles ont été développés dans le passé récent pour l'estuaire de la Seine. L'un des premiers fut mis en œuvre par Sogreah (1967 *in* Le Hir, 1980) pour forcer les limites d'un modèle physique de l'estuaire, suivi quelques années plus tard d'un modèle plus fin dans l'estuaire, également utilisé pour évaluer les transits sédimentaires (*in* Le Hir, 1980). Salomon (1980) a construit une modélisation d'ensemble sur la base de 3 modèles successifs : l'un unidimensionnel pour l'estuaire fluvial (voir aussi Salomon, 1976), l'autre bidimensionnel vertical jusqu'à Honfleur, encadrant la limite de remontée des eaux marines et ayant permis une première modélisation du bouchon vaseux, puis un troisième, bidimensionnel horizontal, couvrant l'embouchure et la baie de Seine jusqu'à Ouistreham et Antifer (*in* Salomon et Le Hir, 1980). Une discrétisation verticale opérée sur ce dernier modèle a permis de simuler les stratifications et circulations estuariennes générées par la rencontre eau douce / eau salée (Le Hir, 1980).

Exploitant la chaîne de modélisation Télémac, Sogreah puis Artelia ont développé des modèles 2D et 3D de l'estuaire de la Seine, dans le cadre des études de Port 2000, et des mesures d'accompagnement associées, avec un zoom particulier sur la fosse nord. D'abord seulement hydrodynamiques, ces modèles ont été upgradés pour décrire les transports de sédiments, dans un cadre morphostatique puis plus récemment dans un cadre morphodynamique (Walther et al. 2015).

Dans le cadre du Programme Scientifique Seine-Aval, Ifremer a développé une modélisation spécifique, basée sur le code hydrodynamique SiAM (Le Hir et al., 2001), ayant donné lieu à des thèses successives : Brenon (1997) s'est penchée sur le bouchon vaseux ; Cugier (2002) a développé la version 3D et a mis en place une modélisation écologique de la baie de Seine ; Waeles (2005) a fait évoluer le modèle 3D de transport de vase pour traiter le transport simultané de sable et de vase, dans un cadre morphodynamique. Cette modélisation SiAM a été appliquée au devenir des contaminants (Thouvenin et al., 2007) ainsi qu'à la biogéochimie et la production primaire (Even et al., 2007).

Depuis 2010, le GIP Seine-Aval a soutenu le développement par Ifremer d'un nouveau modèle 3D hydro-morpho-sédimentaire, plus fin et plus performant numériquement, car bénéficiant du calcul parallèle. La base hydrodynamique est le code MARS 3D (Lazure et Dumas, 2008). Un maillage curviligne a été optimisé pour l'embouchure (Kervela et al., 2012), et une nouvelle modélisation sable/vase intégrant une gestion originale des couches sédimentaires a été implémentée (Le Hir et al., 2011). Ce modèle a fait l'objet d'une calibration spécifique du tassement (Grasso et al., 2015) et d'une validation attentive (Grasso et al., 2018). Enfin les processus de charriage y ont été intégrés, en même temps qu'une modélisation originale de la porosité des sédiments mélangés sable/vase et qu'un couplage avec le modèle de vagues WWIII (Roland & Ardhuin, 2014 ; Mengual, 2018). C'est cette dernière version appelée MARS3D-MUSTANG pour MUD Sand TRANsport modellinG (Mengual et al., 2020) du système de modélisation élaboré au cours des programmes scientifiques Seine-Aval successifs qui sera utilisée ici.

Compte tenu de l'importance des interactions sable-vase dans un environnement sablo-vaseux comme l'estuaire de la Seine, notre approche considère les interactions entre sédiments cohésifs et non cohésifs, ce qui n'était pas le cas des outils mentionnés dans la bibliographie sur les effets des dragages d'entretien. Afin d'analyser les effets de différentes stratégies de dragage/clapage sur le moyen terme et en particulier de prendre en compte leurs effets sur la morphologie, le modèle considère le couplage morpho-dynamique. Le modèle est mis en œuvre sur le calculateur de l'Ifremer DATARMOR, autorisant des simulations longues. A titre d'illustration, chacune des cinq simulations de 10 ans qui seront exploitées repose sur l'utilisation pendant environ 500 heures de 6 nœuds de calculs, possédant chacun 28 processeurs à 2,4GHz.

I.5 Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit est divisé en 4 temps.

Le chapitre II pose le cadre de notre sujet d'étude : le fonctionnement HMS et les dragages d'entretien de l'estuaire de la Seine. Dans ce chapitre, l'ensemble des forçages, le fonctionnement hydrodynamique et le fonctionnement sédimentaire qui en résulte sont rappelés. Ensuite, les différentes quantifications des apports sédimentaires à l'estuaire sont détaillées. Enfin les dragages opérés par les ports de Rouen et du Havre sont décrits.

Le chapitre III présente le modèle et les développements réalisés pour simuler les dragages d'entretien dans l'estuaire. Après une description de la validation du modèle, ce dernier est exploité pour déterminer la variabilité des dragages au regard des forçages hydrodynamiques. Cette partie faisant l'objet d'une publication, soumise à *Estuarine and Coastal Shelf Sciences* (en cours de révision) est en anglais. Les conclusions de l'article sont toutefois rappelées en français.

Dans le chapitre IV, nous étudions spécifiquement le rôle des dragages dans le fonctionnement HMS de l'estuaire de la Seine. Cette analyse intervient après la présentation de la méthode de traçage numérique des sédiments dragués que nous avons développée (Lemoine et al., 2020), et des scénarios théoriques simulés pour mieux comprendre le rôle des dragages dans le fonctionnement actuel. Ensuite les résultats sur le rôle des dragages dans le fonctionnement de l'estuaire sont présentés en deux temps :

- étude de l'effet des dragages/clapages sur les indicateurs HMS (turbidité, faciès sédimentaire et morphologie) et sur les dragages eux-mêmes,
- comparaison des flux naturels et des flux induits par les dragages d'entretien et effets des dragages sur le bilan sédimentaire de l'estuaire.

Une discussion de ces résultats et de leurs limites clôt ce chapitre relatif à l'influence des dragages sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire du système Seine.

Le chapitre V constitue une application plus opérationnelle du modèle, dédiée à un changement de stratégie de gestion des sédiments dans l'estuaire. Deux scénarios réalistes de changement de pratique d'immersion sont décrits et analysés comparativement à la situation de référence décrite dans les chapitres III et IV. L'un de ces scénarios correspond à l'exploitation récente du site de Machu par le GPMR.

Une synthèse des résultats est rappelée en conclusion, accompagnée de quelques perspectives.

Chapitre II : Caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires de l'estuaire de la Seine : importance des dragages

Plan du chapitre :

II.1	Le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine	31
II.1.1	Les apports liquides	31
II.1.2	La marée dans l'estuaire de la Seine	33
II.1.3	Le vent et les vagues à l'embouchure	34
II.1.4	Hydrodynamisme de l'estuaire de la Seine	38
II.2	Dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Seine	42
II.2.1	Caractéristiques des MES estuariennes	42
II.2.2	Dynamique des matières en suspension	43
II.2.3	Concentrations en matières en suspension	45
II.2.4	Dynamique du fond sédimentaire	51
II.3	Les apports sédimentaires à l'estuaire	58
II.3.1	Les apports continentaux	58
II.3.2	Les apports marins	60
II.4	Les dragages/clapages en estuaire de Seine	61
II.4.1	Dragages dans l'estuaire en amont de Tancarville	62
II.4.2	Dragages dans l'estuaire aval	63
II.4.3	Immersion en mer	69
II.5	Importance des dragages dans l'estuaire de la Seine	71



Le chapitre 2 présente le fonctionnement HMS ainsi que les pratiques de dragages dans l'estuaire de la Seine. Cette synthèse bibliographique du fonctionnement HMS de l'estuaire s'appuie en partie sur le

travail réalisé pour l'édition du fascicule "fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine" (Lemoine et al., 2015). Les conclusions de ce fascicule au sujet de l'importance potentielle des dragages dans le bilan sédimentaire de l'estuaire, sont à l'origine du sujet de thèse objet du présent manuscrit. La présentation des dragages a été élaborée en concertation avec les GPM et a servi de base à l'élaboration du modèle de dragage présenté au chapitre 3.

En lien avec la problématique de la thèse, le chapitre 2 présente l'état de l'art concernant l'estuaire de la Seine en 5 temps:

- Fonctionnement hydrodynamique
- Dynamique sédimentaire
- Les apports sédimentaires à l'estuaire
- Description des dragages dans l'estuaire de la Seine
- L'importance des dragages dans l'estuaire de la Seine

II.1 Le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine

Un estuaire est considéré comme l'extension dans les terres de la limite des faciès tidaux et la limite vers le large des faciès côtiers d'embouchure (d'après Dalrymple, 1992). Selon cette terminologie, l'estuaire s'étend de l'embouchure à la limite artificielle de la zone soumise à la marée, le barrage de Poses. Cette zone, à l'interface océan/continent, est le siège de processus hydrodynamiques complexes, résultant de la rencontre entre les eaux marines et fluviales. L'objet de cette partie est de caractériser les différents forçages hydrodynamiques, hydrogéologiques, atmosphériques, et leurs impacts sur l'estuaire pour enfin décrire son fonctionnement hydrodynamique.

II.1.1 Les apports liquides

Les apports liquides à l'estuaire sont séparés en trois catégories, les apports de la Seine (au droit de Poses), les apports des affluents à l'estuaire et les apports de la nappe.

II.1.1.1 Apports amont

Au niveau du barrage de Poses, la Seine draine un bassin versant d'environ 67 000 km², soumis à un climat de type océanique tempéré. En moyenne la pluviométrie sur ce bassin versant est de 750 mm/an dont un peu plus de 2/3 (550 mm/an) rejoignent l'atmosphère par évapotranspiration (Viennot *et al.*, 2009). Le résiduel (200 mm/an) s'écoule en direction de l'estuaire soit rapidement par la surface, soit sur des échelles séculaires par les nappes souterraines. Au final, il en résulte un régime hydrologique dit "pluvial océanique" avec un débit maximal en hiver quand l'évapotranspiration est faible et les pluies élevées, et inversement en été (Ducharme *et al.*, 2010).

Historiquement, les données de débit de la Seine à l'entrée de l'estuaire sont calculées à partir de données mesurées quelques dizaines de kilomètres en amont du barrage de Poses (Poissy ou Vernon). Leurs analyses statistiques montrent qu'au niveau du barrage de Poses, le débit moyen annuel sur la période 1941-2013 est d'environ 410 m³/s (Figure II.1) (Lemoine et al., 2015). Le bassin versant de la Seine étant soumis à un climat de type océanique, les débits les plus importants sont observés entre les mois de janvier et avril avec des pics de crue moyens aux alentours de 1400 m³/s. Les faibles débits

se produisent généralement entre le mois d'août et le mois d'octobre ; durant cette période d'étiage, le débit est en moyenne inférieur à 140 m³/s.

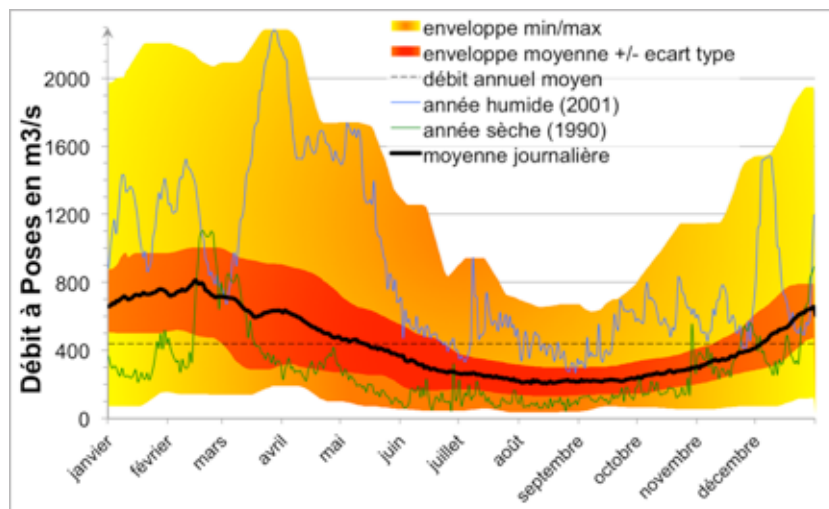


Figure II.1: Statistiques journalières sur les débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013 avec superposition des hydrogrammes de l'année humide 2001 et de l'année sèche 1990

II.1.1.2 Apports intra estuariens

Les apports intra estuariens représentent une part non négligeable des apports hydriques à l'estuaire de la Seine. En effet, les 11 500 km² du bassin versant intra estuarien représentent près de 15% de la surface totale du bassin versant de la Seine. La variabilité saisonnière du débit des affluents intra-estuariens est moins importante que celle de la Seine en amont de Poses ; ainsi durant l'étiage la part relative de ces affluents, aux apports hydriques totaux, est plus importante qu'en hiver et peut atteindre des valeurs proches de 18 % (Figure II.2). En lien avec la surface des différents bassins versants intra-estuariens, les affluents de la rive gauche, l'Eure et la Risle, constituent les deux principaux apports de surface intra-estuariens (Lemoine et al., 2015).

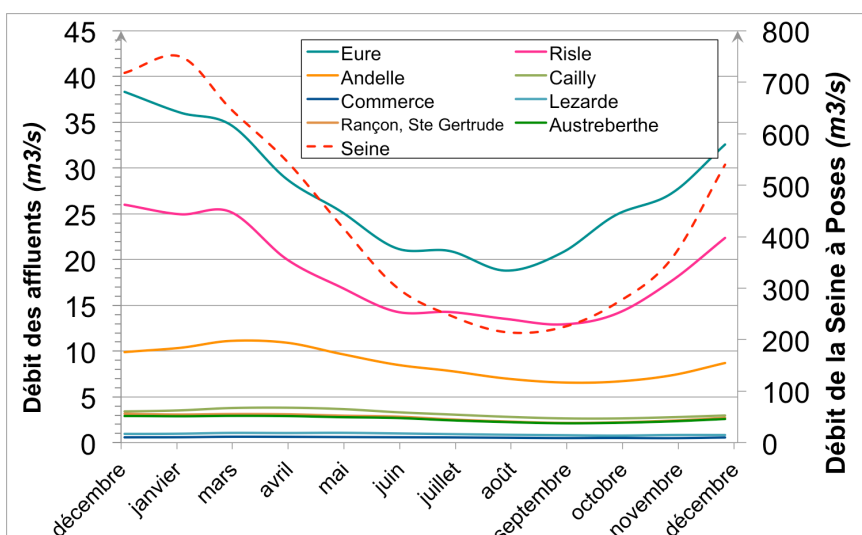


Figure II.2 : Évolution des débits moyens mensuels des affluents intra-estuariens et de la Seine à Poses calculés à partir des débits journaliers de 1996 à 2006 (Lemoine et al., 2015)

II.1.1.3 Apports souterrains

A l'échelle de l'estuaire, de Poses à la mer, les échanges nappes/rivières sont à l'origine d'un flux résiduel annuel positif vers l'estuaire (apport de la nappe) relativement stable et de l'ordre de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'ensemble du secteur de Poses à la mer. Cela représente environ 1/6^{ème} des apports d'eau douce moyens annuels à l'estuaire. Cette contribution, globalement stable à l'échelle annuelle, peut représenter jusqu'à 50 % des apports hydriques à l'estuaire durant les périodes d'étiages (Dupont et al., 2017). Néanmoins, si ces apports peuvent sembler importants à l'échelle du bilan hydrique annuel de l'estuaire, il faut également les mettre en regard des débits induits par le volume oscillant tidal qui sont de l'ordre de $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

II.1.2 La marée dans l'estuaire de la Seine

A son arrivée à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, l'onde de marée est caractérisée par une tenue du plein de presque deux heures et un flot rapide. Cette forme particulière résulte de la déformation de l'onde provenant de l'Atlantique lors de sa propagation sur les 650 km qui séparent le rebord du plateau continental de la baie de Seine (Le Floch, 1961). Lors de sa propagation dans l'estuaire, l'onde subit d'autres modifications.

II.1.2.1 Atténuation de l'amplitude de marée vers l'amont

La morphologie de l'estuaire de la Seine, en particulier les faibles profondeurs se trouvant au niveau des vasières proches de l'embouchure, favorise la dissipation de l'énergie par frottement par rapport à son amplification liée à la forme convergente de l'embouchure (Bonnefille, 1976). Ainsi l'amplitude de la marée, d'environ 7 m en vives eaux à l'embouchure, décroît vers l'amont pour n'être plus que de l'ordre du mètre à Poses. Néanmoins, lors des marées de très faibles coefficients, la faible hauteur des pleines mers n'atteint pas les zones intertidales hautes, où la dissipation de l'énergie par frottement est importante ; la concentration de l'énergie par canalisation est, dans ce cas, légèrement supérieure à sa dissipation et le marnage augmente de l'embouchure au début de la partie endiguée (Tancarville) (Lafite, 2004).

II.1.2.2 Déformation de la courbe de marée vers l'amont

Durant sa propagation vers l'amont de l'estuaire, l'onde de marée est modifiée par la morphologie des fonds, par la rencontre avec les eaux douces provenant de l'amont, mais aussi par les courants tidaux en particulier par le courant de jusant de la marée précédente (Figure II.3). Avec une hauteur d'eau moyenne de 8 m et une célérité de $8,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, l'onde de marée met environ 5 heures pour parcourir les 150 km séparant Honfleur du barrage de Poses. La basse mer quant à elle met pratiquement 6 heures à se propager de Honfleur à Poses. La basse mer de Honfleur a elle-même plus d'une heure de retard sur celle du Havre. Cette différence de vitesse de propagation selon la phase de la marée, liée à une variation de la hauteur d'eau moyenne, engendre un certain « rattrapage » de la pleine mer sur la basse mer qui précède et donc un raidissement de l'onde de marée en flot. Ceci se traduit par une réduction progressive de la durée du flot au profit de celle du jusant, accompagnée d'une prééminence de l'intensité du flot sur celle du jusant, sauf dans les biefs amont de l'estuaire : ceci est caractéristique de l'asymétrie de l'onde de marée en estuaire. La double pleine mer de l'embouchure disparaît ainsi au fur et à mesure que l'onde se propage vers l'amont (Le Hir et Jacinto, 2001).

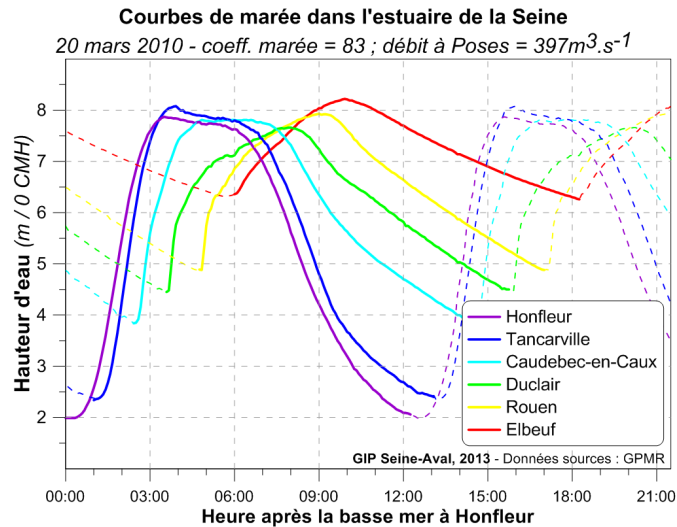


Figure II.3: Évolution des hauteurs d'eau dans l'estuaire de la Seine (données mesurées par le GPMR)

II.1.3 Le vent et les vagues à l'embouchure

Les événements météorologiques sont, au même titre que la marée et le débit du fleuve, des contraintes régissant l'hydrodynamisme estuarien. Les incidences des conditions météorologiques sont souvent considérées comme minimales dans l'environnement macrotidal de la Seine et leurs effets sur les circulations de l'estuaire n'ont pas beaucoup été étudiées. Néanmoins les épisodes exceptionnels tels que les tempêtes peuvent avoir d'importantes conséquences, tant sur l'hydrodynamisme que sur la dynamique des sédiments.

II.1.3.1 Vent au cap de la Hève

Le vent à la surface de l'eau génère une contrainte de cisaillement qui pousse les masses d'eau dans sa direction lorsque la hauteur d'eau est faible. Ainsi, si le vent souffle vers la côte, le déplacement des masses d'eau génère une surcote à l'embouchure de l'estuaire, et inversement si le vent souffle vers la mer.

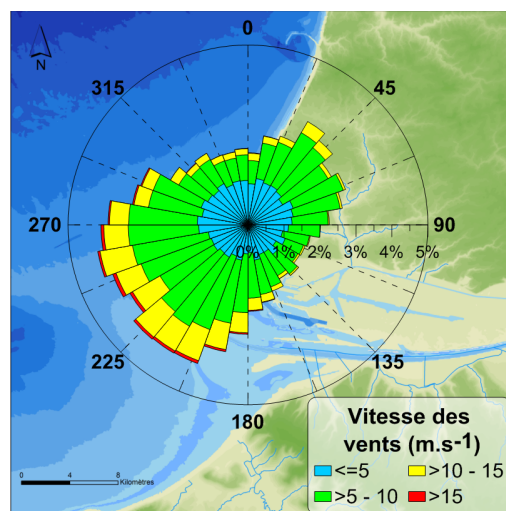


Figure II.4: Statistiques des vents en baie de Seine entre 1995 et 2011 calculées à partir du modèle Météo-France Arpège (D'après rapport final du projet Seine-Aval MODEL)

La rose des vents présentée en Figure II.4 indique les statistiques des vents à l'embouchure entre 1995 et 2011 calculées à partir du modèle ARPEGE de Météo France (Le Hir, 2012). Cette figure montre la prédominance des vents de secteur sud-ouest, en particulier les épisodes de fortes intensités en rouge sur la figure sont majoritairement en provenance du secteur 180° - 270°. En termes d'intensité, les vents sont le plus souvent d'intensité modérée avec des vitesses généralement inférieures à 10 m.s⁻¹. A titre d'exemple, l'analyse statistique des vents mesurés au niveau du cap de la Hève montre que l'intensité d'un vent de période de retour annuelle est de 11,9 m.s⁻¹ (Tableau II-1; Artelia, 2013).

Tableau II-1: Période de retour de l'intensité du vent mesuré au cap de la Hève (vent moyen en m.s⁻¹ sur 3h réduit à 10m d'altitude) (ARTELIA, 2013)

Temps de retour (années)	Vent moyen sur 3h à 10m (m/s)
1	11.9
2	14
5	16.7
10	18.8
20	20.8
50	23.6
100	25.6
200	27.6
500	30.4
1000	32.4

II.1.3.2 Vagues à l'embouchure

L'estuaire de la Seine est abrité des houles venant de l'atlantique NE par la presqu'île du Cotentin. Seules les houles de longue période sont réfractées dans la baie mais elles n'abordent l'estuaire que fortement atténuées comme l'illustre la Figure II.5 (Le Hir *et al.*, 2001; Grasso, 2013).

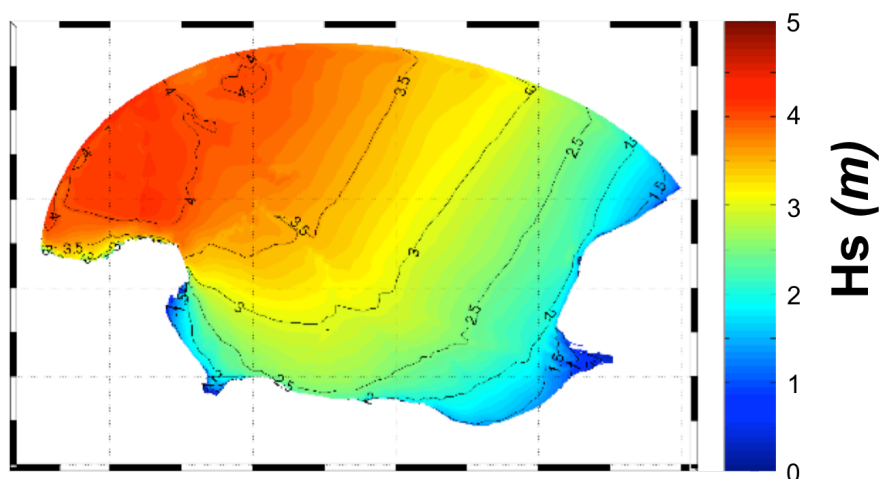


Figure II.5 : Illustration de la propagation d'une houle d'ouest dans la baie de Seine, représentation de la hauteur significative des vagues le 1^{er} mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval MODEL)

De manière générale, les vagues atteignant l'embouchure sont majoritairement générées dans la baie de Seine par les vents locaux. Ces vagues sont caractéristiques des vagues générées sur un fetch court conforme aux dimensions de la baie de Seine.

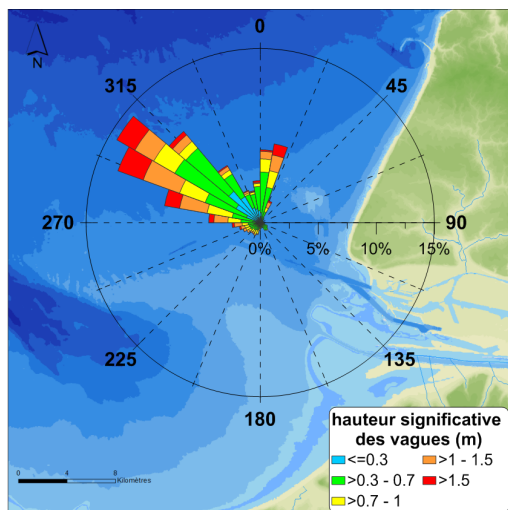


Figure II.6 : Rose des vagues à l'embouchure calculée à partir des données de la bouée Metzinger entre février 2011 et Mai 2012 (Données Candhis CETMEF)

La Figure II.6 est issue des mesures de houles réalisées par le CETMEF entre février 2011 et mai 2012 au niveau de la bouée "Le Havre Metzinger", dans le cadre de son réseau de mesure CANDHIS. Cette figure, représentant la répartition de la hauteur de la houle en fonction des directions de provenance, met bien en évidence la relation entre la hauteur des houles atteignant l'embouchure et le fetch associé. En accord avec la géométrie de la baie de Seine, les vagues les plus fréquentes et les plus hautes de cette série de mesures sont celles provenant du secteur nord-ouest. Par contre, il est remarquable de voir que durant cette période les houles de secteur sud-ouest sont très peu représentées alors qu'il s'agit du secteur de vent localement dominant. L'allure de ce spectre peut s'expliquer par le fait que le fetch correspondant à la direction de vent dominante est faible (une vingtaine de km) : ainsi les vagues générées par ce vent constituent une mer de vent, un clapot de faible amplitude et de période courte. Or, les houlographes directionnels sur bouée tels que celui de la bouée "Le Havre Metzinger" sont réputés pour sous-estimer la mesure de ce type d'agitations (Jacinto, 2005).

Ensuite, lors de sa propagation vers l'estuaire, la houle perd progressivement son énergie, qui est dissipée par frottement sur les faibles profondeurs de l'embouchure. Ainsi, une houle de hauteur significative 1 m au large de l'embouchure, ne mesurera plus qu'une cinquantaine de centimètres à l'aval de la fosse nord, au droit de Port 2000, et sera complètement dissipée au niveau du pont de Normandie (Figure II.7).

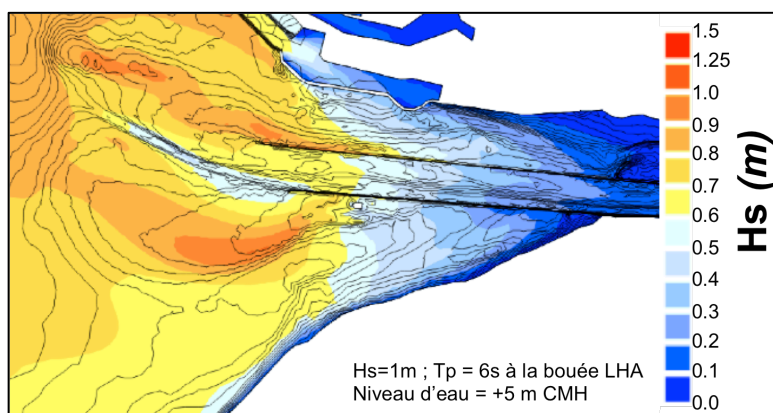


Figure II.7: Illustration de la propagation d'une houle d'ouest à l'embouchure, Représentation de la hauteur significative des vagues le 1^{er} mars 2008 (simulation WaveWatch3, projet Seine-Aval MODEL)

II.1.3.3 Importance de la marée dans la prise en compte de l'agitation :

En règle générale l'étude de l'agitation liée aux vagues est faite indépendamment de la marée. Or en baie de Seine, la grande amplitude des marées crée d'importantes variations de la hauteur d'eau et des courants dont les effets sur les vagues ne sont pas négligeables. Ainsi les courants de jusant amplifient la houle par réfraction alors que la propagation des vagues vers les faibles profondeurs entraîne une dissipation de leur énergie et donc une diminution de leur hauteur.

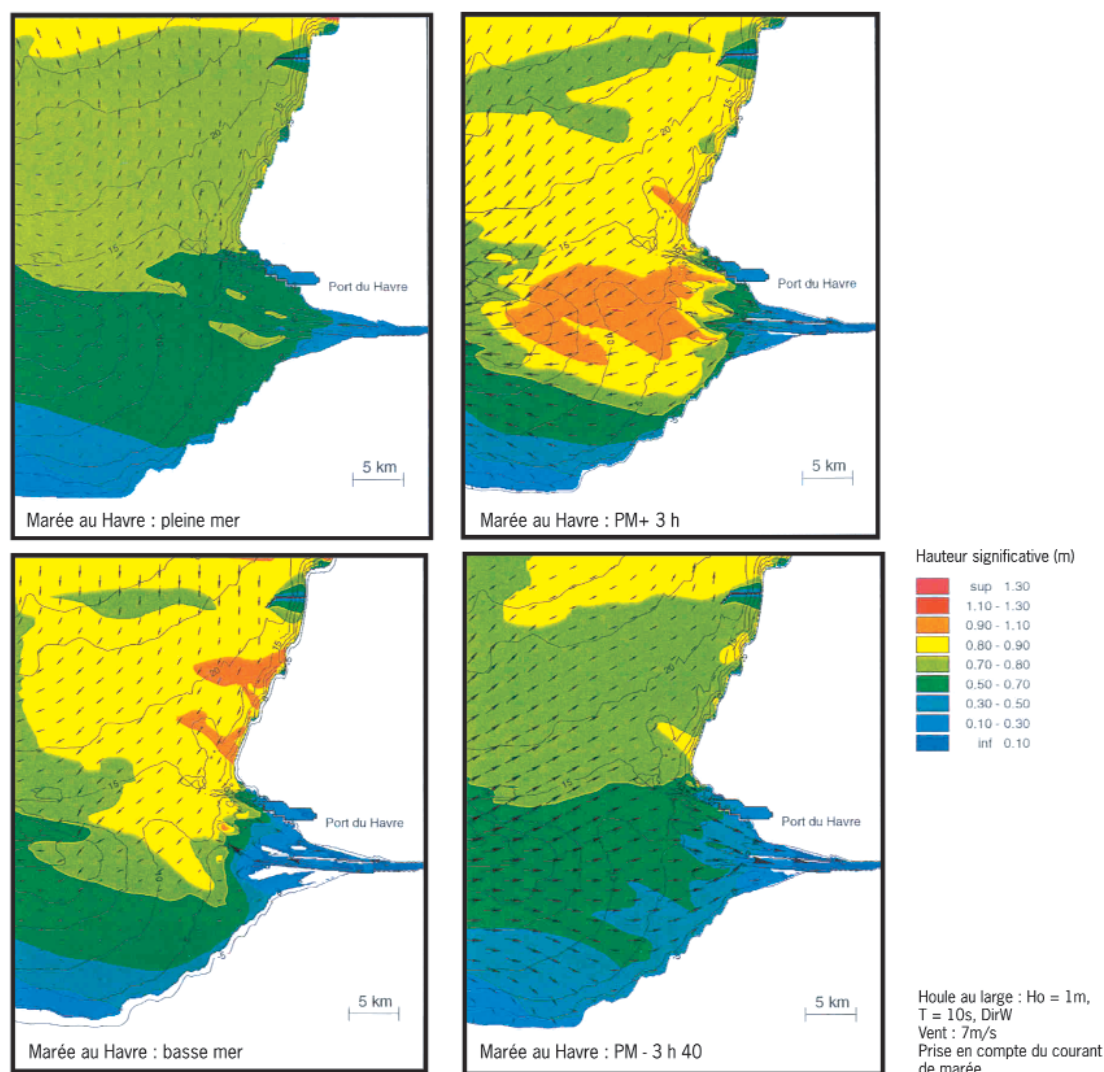


Figure II.8: Calcul des agitations en baie de Seine orientale, pour différentes phases d'une marée de vive-eau. Les flèches représentent le courant de marée (d'après Jacinto in Le Hir et al., 2001)

La Figure II.8 montre la distribution des hauteurs de vagues à quatre moments de la marée, correspondant à différents niveaux de la surface libre (qui n'est d'ailleurs pas uniforme sur le domaine) et différentes configurations de courant. On observe de grandes différences d'une situation à l'autre, en particulier entre les situations de flot (3 h 40 avant la pleine mer du Havre) et de jusant (3 h après la pleine mer), qui correspondent toutes deux à un niveau de mi-marée. Ces résultats mettent en évidence le rôle majeur de la réfraction par le courant de marée. On note une potentielle amplification des vagues devant l'embouchure en jusant (situation de « vent contre courant ») comparativement au flot, avec des hauteurs voisines de celles de la houle du large mais nettement supérieures à celles obtenues au milieu de la baie (Jacinto in Le Hir et al., 2001).

D'un point de vue hydro-sédimentaire, ces interactions vagues/marées ont d'importantes répercussions. En effet, plus les vagues sont hautes et plus la hauteur d'eau est faible, plus la contrainte exercée par les vagues sur le fond est importante et est susceptible de remobiliser les sédiments (Jacinto, 2005).

II.1.4 Hydrodynamisme de l'estuaire de la Seine

II.1.4.1 Courants

La propagation de la marée de l'embouchure jusqu'au barrage de Poses induit un déplacement important des masses d'eau. En effet à chaque marée, c'est entre 100 et 150 millions de m³ d'eau salée (respectivement en morte eau et en vive eau) qui rentrent et sortent de l'estuaire sous l'action des marées (Le Hir, 2001). Ce volume, appelé volume oscillant, génère des courants importants dirigés vers l'amont pendant le flot et vers l'aval en jusant. Il contribue à la structuration du gradient de densité (§ II.2.4.2). L'intensité de ces courants est en lien direct avec la forme de l'onde de marée, en particulier son asymétrie. Ainsi durant les 3 heures de flot, les courants sont très intenses et peuvent atteindre 2 m.s⁻¹ au niveau de l'embouchure. Alors qu'en jusant, les vitesses maximales sont de l'ordre de 1,2 m.s⁻¹, mais ceci pendant quasiment 5 heures (Figure II.9).

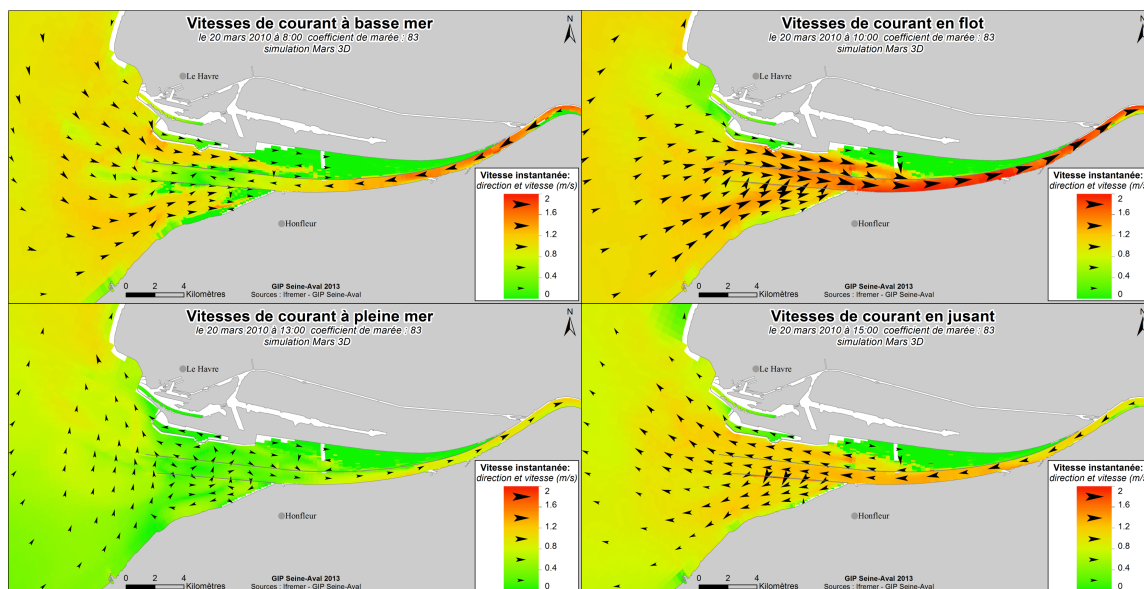


Figure II.9: Répartition des vitesses de courants au niveau de l'embouchure pour différents moments de la marée en conditions moyennes (débit : 397m³.s⁻¹, coeff. de marée 83) vitesses moyennées sur la hauteur d'eau – Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)

En fin de marée basse, à l'arrivée du flot, l'opposition des courants de flot et de jusant entre les digues a pour conséquence de favoriser la propagation de l'onde de marée dans les fosses nord et sud également appelées fosses de flot.

En effet, une des particularités morphologiques de l'estuaire de la Seine est la présence des deux digues submersibles nord et sud. Mises en place à la fin des années 1950 pour faciliter la navigation et permettre aux navires marchands à fort tirant d'eau de remonter jusqu'à Rouen, ces digues gouvernent l'hydrodynamisme de l'embouchure.

Ces aménagements ont eu pour effet de renforcer les vitesses entre les digues et plus particulièrement dans le chenal de navigation où les grandes profondeurs réduisent l'effet du frottement sur le fond.

La canalisation des courants par les digues a un effet particulièrement important sur les courants de jusant qui sont maximaux entre les digues. Cette accentuation "artificielle" du jusant entre les digues avait été recherchée lors de la conception des digues pour éviter la sédimentation dans le chenal voir même pour auto-draguer le chenal (Le Hir, 2001). La Figure II.10, représentant les vitesses résiduelles barotropes (moyenne sur la hauteur d'eau), illustre ce phénomène ; en effet les vitesses résiduelles entre les digues sont toutes dirigées vers l'aval et leurs amplitudes est largement supérieures aux vitesses observées dans les fosses nord et sud.

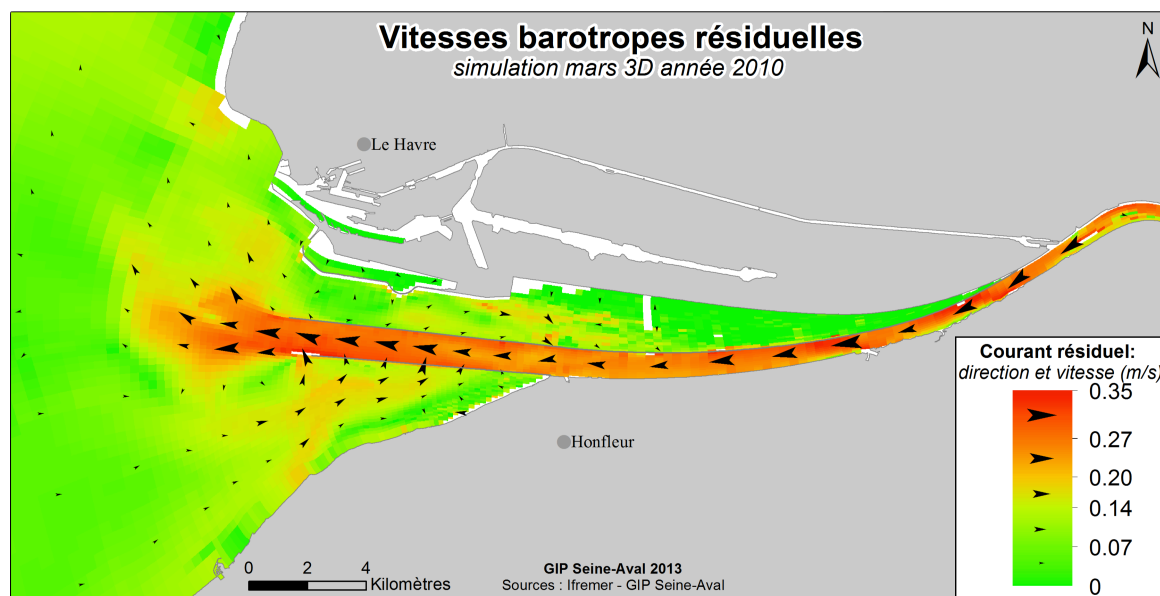


Figure II.10: Répartition des vitesses résiduelles de courants barotropes pour l'année 2010 - Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)

II.1.4.2 Salinité

A l'embouchure de l'estuaire, les eaux douces drainées par la Seine se mélangent aux eaux salées marines, générant une zone de gradient de salinité. La position et l'emprise de cette zone, ainsi que sa structuration verticale, sont principalement contrôlées par l'intensité des marées et par les débits.

A l'échelle de la marée, le va et vient du volume oscillant entraîné par la marée régit la salinité à l'embouchure. Lors du flot et jusqu'à l'étale de pleine mer, les eaux marines remontent dans l'estuaire et induisent une montée progressive de la salinité. Après la renverse, les courants s'inversent et le niveau d'eau s'abaisse (jusant) ; la salinité diminue alors jusqu'à la fin de l'étale de basse mer (Figure II.11).

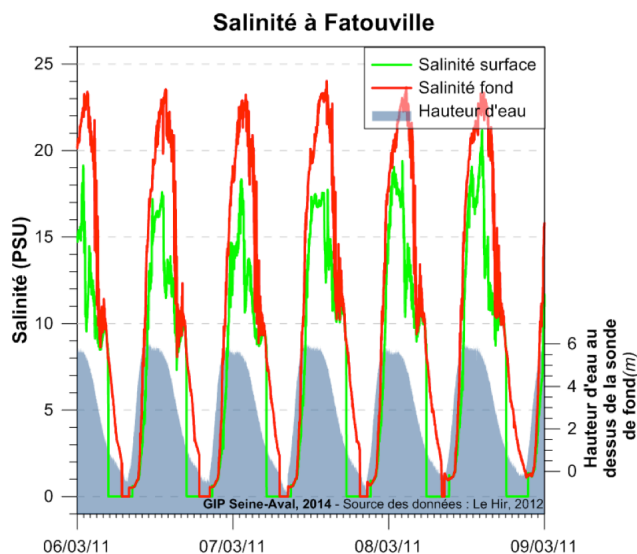


Figure II.11 : Variation de la salinité en lien avec la marée à l'embouchure (site de Fatouville). Données mesurées dans le cadre du Projet Seine-Aval 4 MODEL (Le Hir, 2012)

A l'échelle annuelle, la salinité moyenne représentée sur la Figure II.12, est à mettre en lien avec les conditions hydrodynamiques de l'embouchure, en particulier avec les vitesses de courants résiduelles. En effet, le courant résiduel étant dirigé vers l'aval entre les digues, la majeure partie des eaux douces y transite, rendant la salinité plus faible que dans les fosses nord et sud où l'influence marine est plus forte. La limite "officielle" de dessalure des eaux se trouve à Vieux-Port au pk 325 (en limite droite de la Figure II.12), néanmoins cette limite est largement dépendante des conditions hydrologiques et peut soit remonter vers l'amont durant des phases d'étiages sévères, soit descendre vers l'aval en crue.

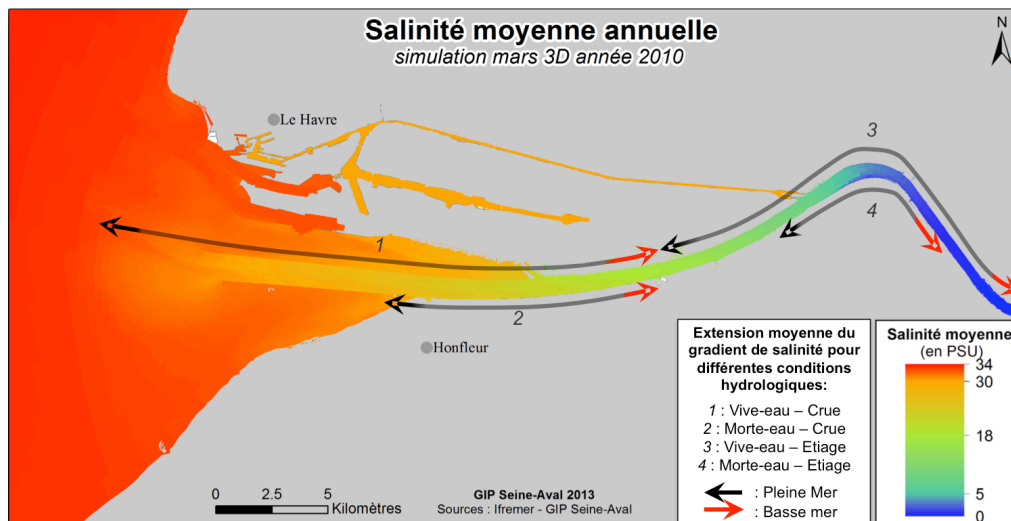


Figure II.12: Représentation des salinités moyennes à l'embouchure pour l'année 2010 – Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)

Le mélange des eaux douces et salées de densités différentes implique également un gradient vertical de salinité: l'eau salée, plus dense, s'écoulant sous l'eau douce (Figure II.13). Ceci explique le phénomène de *circulation estuarienne*, avec une circulation moyenne près du fond vers les secteurs d'eau moins dense, donc vers l'amont, compensée par un écoulement des eaux douces vers l'aval, en surface. Cet écoulement est lui-même sous l'influence de facteurs qui fluctuent à l'échelle saisonnière (alternance crue/étiage et morte- eau/vive-eau), dont la combinaison contrôle l'intensité de la variation

de la salinité en un point. Ce phénomène contribue également à la formation du bouchon vaseux (cf. § II.3.2.2) .

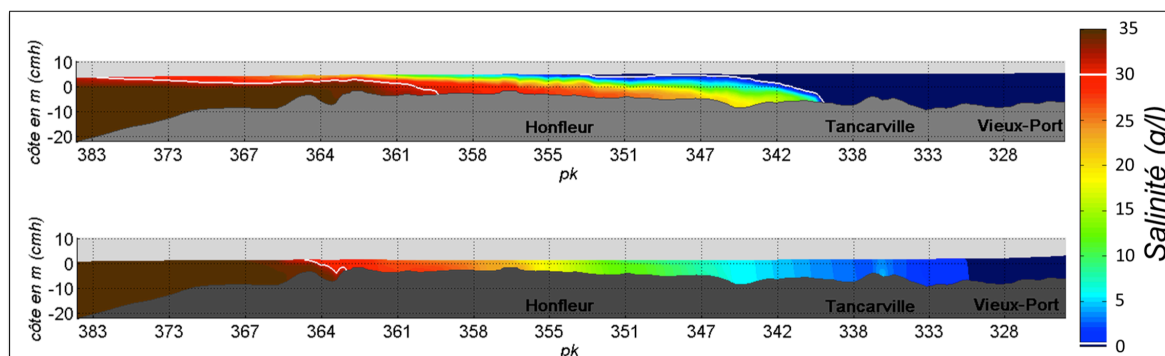


Figure II.13 : Illustration du gradient vertical de salinité pour deux conditions hydrologiques contrastées. En haut : basse mer de morte eau, en crue (débit : $1076 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, coeff. : 29, le 13 mars 2007). En bas : pleine mer de vive eau, en étiage (débit : $248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, coeff. : 94, le 2 août 2007) (Lemoine et al., 2015)

II.1.4.3 Temps de transit ou de renouvellement des eaux douces dans l'estuaire

La Figure II.14 représente le temps nécessaire aux masses d'eau apportées par la Seine en amont pour rejoindre l'embouchure. Cette modélisation a été effectuée pour différents débits de la Seine à Poses (les apports latéraux ne sont pas considérés). En étiage, avec des débits de l'ordre de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, les eaux douces en provenance du bassin versant "amont" mettent 25 jours pour s'écouler jusqu'en baie de Seine ; contre seulement 3 jours en période de crue, pour des débits avoisinant les $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

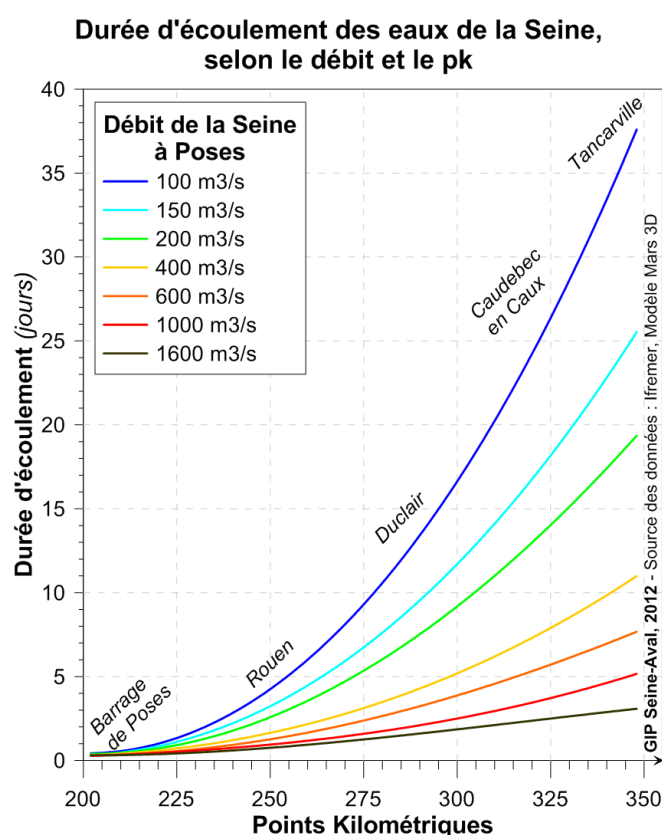


Figure II.14 : Temps de transit des eaux de Poses à l'embouchure pour différents débits de la Seine à Poses (Lemoine et al. 2015)

II.2 Dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Seine

La dynamique sédimentaire peut se décliner à travers les mouvements de sédiments dans la colonne d'eau (§ II.2.2) et leur évolution au sein du "fond" sédimentaire (§ II.2.3). Auparavant il est opportun de rappeler certaines caractéristiques des matières en suspension (§ II.2.1).

II.2.1 Caractéristiques des MES estuariennes

Le terme matières en suspension ou MES désigne les particules solides, de taille supérieure à 0,45µm, qui sont maintenues ou transportées en suspension au sein de la masse d'eau. De caractéristiques variables dans le temps et l'espace, elles se déposent par sédimentation quand les conditions hydrodynamiques ne les maintiennent plus en suspension dans la colonne d'eau. L'estuaire de la Seine, en tant qu'exutoire d'un bassin versant de près de 80 000 km², reçoit une importante quantité de matières en suspension (MES) issue de l'érosion et des activités anthropiques, mais aussi du matériel sédimentaire fin venant de la mer.

En fonction de leurs natures, de leurs origines, les particules en suspension ont des caractéristiques différentes. A l'échelle de l'estuaire de la Seine, les processus hydro-sédimentaires sont à la fois dépendants de la quantité et des propriétés cohésives des matériaux disponibles. La fraction particulaire des sédiments est composée de matériaux d'origines diverses, provenant soit du bassin versant amont ou du milieu marin (on parle de matériaux allochtones) soit de la production intra-estuarienne (autochtone).

L'étude des processus hydro-sédimentaires s'attache principalement aux particules minérales (sédimentaires), caractérisées par leurs propriétés physiques (taille, poids, cohésion). Ainsi l'on distinguera deux grandes familles de sédiments :

- i. les sédiments cohésifs,
- ii. les sédiments non cohésifs

II.2.1.1 Les sédiments cohésifs

Les particules fines ou vases sont communément définies selon un critère de taille, supérieures à 0,45 µm et inférieures à une coupure granulométrique variant selon les écoles scientifiques entre 40 et 100 µm : nous retiendrons la valeur de 63 µm (Poizot, 2009).

Les particules minérales constituant les sédiments fins sont classiquement subdivisées en deux familles :

- les argiles dont la taille est inférieure à 2µm ou 4 µm selon les auteurs. Ces dernières, issues de l'altération des roches, sont les plus abondantes roches sédimentaires, elles représentent environ 69% des sédiments continentaux (Beauchamp, 2005). En fonction du climat et des roches mères, les processus d'érosion donnent naissance à différents types d'argiles tels que illite, chlorite, kaolinite, smectite, etc. La propriété majeure des argiles est leur caractère cohésif, lié à leurs charges surfaciques et aux interactions de Van der Waals. Dans l'estuaire de la Seine, les argiles contiennent de 35 à 40% d'Illite, de 30 à 35 % de Kaolinite, de 20 à 30% de Smectite et quelques traces de Chlorite (Avoine 1981 in Garnaud 2003).
- les silts dont la taille est comprise entre 2 ou 4 µm et 63 µm,

II.2.1.2 Les sédiments non cohésifs

Les sables et sédiments plus grossiers ont une taille supérieure à 63 μ m. Dans la pratique, cette fraction sédimentaire n'a pas de limite supérieure de taille, néanmoins en estuaire, elle est principalement composée de sables, de graviers et de galets.

Les sables dont la taille est comprise en 63 μ m et 2 mm selon la classification de Wentworth peuvent être lithoclastiques (issu de l'érosion de roches détritiques) ou bioclastiques (produit de la désagrégation des coquilles). Ces particules sont de taille suffisante pour que les forces de cohésion deviennent négligeables, leur donnant, ainsi qu'aux sédiments plus grossiers, un comportement non cohésif.

La présence du barrage de Poses, ainsi que les faibles vitesses de courants rencontrées en amont de l'estuaire limitent le flux de sables en provenance de l'amont. A l'aval du barrage, les affluents n'ont pas des débits suffisants pour charrier des sables ou sédiments plus grossiers. Ces apports (amont et latéraux) sont donc considérés comme négligeables.

Les apports en sables et sédiments plus grossiers à l'estuaire sont ainsi soit marins (érosion des fonds de la baie de Seine ou origine bioclastique) soit autochtones (érosion des fonds du lit mineur de la Seine, érosion des berges, phase bioclastique (Lesourd, 2000).

II.2.2 Dynamique des matières en suspension

La dynamique sédimentaire en estuaire est régie par un cycle de processus hydro-sédimentaires (Figure II.15), principalement forcé par la marée sur l'ensemble du continuum estuarien, couplée aux vagues à l'embouchure. Cette cyclicité est modulée saisonnièrement par le régime hydrologique de la Seine (crue/étiage) et les cycles biogéochimiques annuels (production primaire).

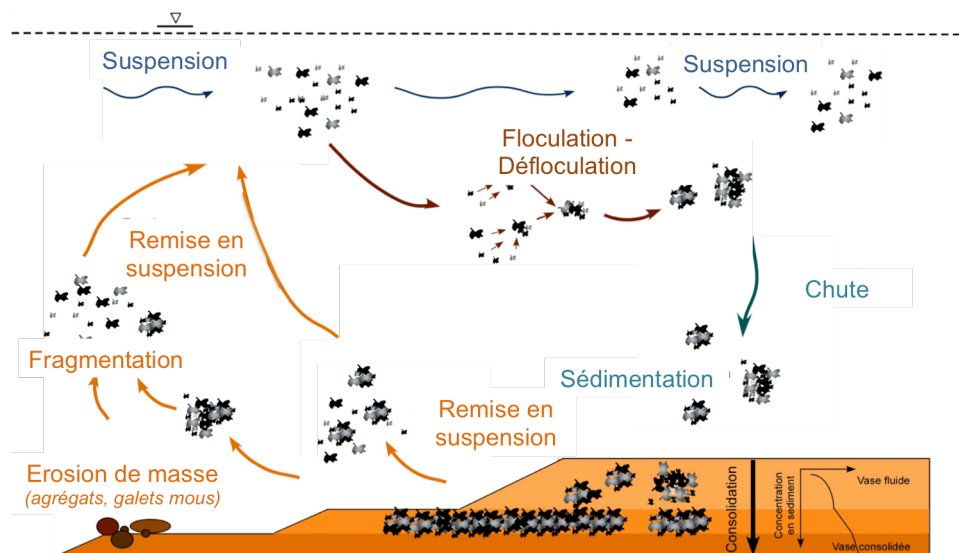


Figure II.15 : Cycle des matières en suspension en estuaire (d'après Maggi 2005 in Verney, 2006)

II.2.2.1 Processus hydro-sédimentaire

Schématiquement la dynamique des matières en suspension dans l'eau est contrôlée par 3 processus majeurs : floculation, sédimentation, advection.

II.2.2.1.1 Floculation/défloculation des MES

Les MES se caractérisent par une forte cohésion qui se traduit, via les processus de floculation/défloculation, par le regroupement dynamique de ces particules sous forme d'agrégats, dont la taille varie de la dizaine de microns à plusieurs millimètres, de forme très diverse et de densité variable (excès de densité ($\Delta\rho$) de quelques dizaines à plusieurs centaines de kg.m^{-3}). Les MES en estuaire sont souvent constituées de particules inférieures à 20 μm . Sous l'action de différents mécanismes détaillés ci-dessous, ces particules s'agrègent sous forme de floes (ou agrégats). En fonction de leurs caractéristiques géométriques et structurales, les floes peuvent être classés en deux populations distinctes : les microflocs et les macroflocs.

Les microflocs sont des agrégats de petite taille (inférieure à 100 ou 150 μm selon les auteurs), constitués de particules élémentaires organo-minérales, quasi sphériques, denses [$\Delta\rho \text{ O}(100 \text{ kg/m}^3)$, O = ordre de grandeur], résistants au cisaillement turbulent. De façon complémentaire, les macroflocs sont des agrégats de grande dimension (supérieure à 100 ou 150 μm), produits de l'agrégation de microflocs, de formes très variables, de faible densité [$\Delta\rho \text{ O}(10 \text{ kg/m}^3)$] et de faible cohésion générale donc fragiles dans un environnement turbulent.

De nombreuses études se sont attachées à décrire les processus de floculation et à identifier les facteurs contrôlant la formation de macroflocs ou leur fragmentation en microflocs, et ainsi déterminer la distribution en classe de taille des agrégats. Ces facteurs peuvent être hiérarchisés comme suit :

- i) la turbulence de l'écoulement constitue le paramètre dominant des processus de floculation : sans turbulence, les particules sont sans mouvement, limitant les collisions et *in fine* la possibilité d'agrégation. Augmenter la turbulence permet pour des valeurs faibles (taux de cisaillement $\text{O}(1 \text{ s}^{-1})$) de favoriser la formation de macroflocs. De forts niveaux de turbulence contribuent à l'inverse à exercer des cisaillements élevés à l'échelle des floes et ainsi à fragmenter les plus fragiles, *i.e.* les macroflocs. Il a été montré que l'échelle de Kolmogorov, représentant la plus petite taille des tourbillons turbulents présents dans l'écoulement, déterminait la taille maximale des agrégats pouvant être potentiellement observés dans le milieu (*e.g.* Verney et al., 2006).
- ii) Les processus de floculation sont favorisés par l'augmentation de la concentration en MES, le nombre de collisions potentielles étant statistiquement corrélé au nombre de particules par unité de volume
- iii) Les forces interparticulaires associées aux charges surfaciques des particules fines forment une barrière d'énergie, qui limite l'agrégation. La salinité tend à réduire cette barrière et ainsi favorise les processus de floculation (Verney et al., 2006) .
- iv) au même niveau que les effets de la salinité, les populations phytoplanctoniques ou bactériennes produisent un mucus organique, substance fortement cohésive participant à la création de macroflocs.

II.2.2.1.2 Vitesse de chute / sédimentation

La vitesse de chute des particules constitue un paramètre déterminant dans la dynamique de transport des MES et de leur devenir dans le système estuarien. Dépendante à la fois de la taille et de la densité des floes, et donc des phénomènes de floculations, la vitesse de chute reste un paramètre difficilement quantifiable.

De nombreuses études se sont consacrées à la quantification des vitesses de chute en estuaire. Dans l'estuaire de la Seine, les observations montrent des vitesses de chute inférieures à 1 mm.s^{-1} pour les microflocs ($D < 200 \mu\text{m}$) et entre 1 et 3 mm/s pour les macroflocs, valeurs légèrement supérieures à la moyenne des valeurs observées sur les autres estuaires (Lafite, 2001 ; Druine, 2018 ; Chapalain, 2019)

II.2.3 Concentrations en matières en suspension

La concentration en MES varie spatialement et temporellement au sein de l'estuaire, en fonction des principaux forçages. On peut distinguer trois compartiments clés de l'estuaire, se distinguant par les ordres de grandeur caractéristiques des MES observées : l'estuaire fluvial amont (de Poses à Caudebec-en-Caux), le panache d'embouchure (à l'aval de l'engainement / bancs d'embouchure) et entre ces deux compartiments une zone d'accumulation turbide, ou bouchon vaseux, dont l'extension et le positionnement varient en fonction des forçages marée/débit. Les taux de MES dans ces trois secteurs sont successivement synthétisés dans les sections qui suivent.

II.2.3.1 MES dans l'estuaire fluvial amont

A l'échelle annuelle, les concentrations en MES dans l'estuaire amont sont principalement régulées par les apports amont liquides et solides (cf § II.1.1 et II.3.1). La Figure II.16, issue des mesures du réseau de mesure en continu de l'estuaire de la Seine SYNAPSES (*SYstème de surveillaNce AutomatiSée de la PhySico-chimie en Estuaire de Seine*), illustre cette dépendance. En période hivernale (entre décembre et janvier), les débits de Seine sont soutenus (supérieurs à 1000 m³/s), associés à des fortes concentrations en MES à Poses (>100 mg/l cf. §I.3.1) et la concentration moyenne journalière dépasse 250 mg/l. A contrario en période d'étiage (août/septembre), les concentrations moyennes mesurées sont comprises entre 50 et 100 mg/l.

A cette cyclicité annuelle se superpose l'influence forte de la marée, avec les cycles semi-diurnes et vive eau /morte eau. Les cycles vive eau / morte eau modulent l'intensité des courants de marée. Ainsi, une vive eau, caractérisée par des courants forts, contribue à remettre en suspension plus de MES qu'une morte eau. Ce forçage à 14 jours est parfaitement visible sur le site de Val-des-Leux, se traduisant par des concentrations maximales en vive eau pouvant dépasser 400 mg/l en crue. A l'opposé, les MES en étiage se caractérisent par des concentrations maximales de l'ordre de 50 mg/l.

A l'échelle diurne, les concentrations en MES sont étroitement corrélées avec les phases de la marée. Ainsi, la charge particulaire est maximale lorsque les vitesses de courants sont maximales et inversement. En particulier, le pic de flot très marqué en estuaire de Seine remobilise les sédiments et augmente de manière significative la concentration en MES. Lors de l'étalement de pleine mer, particulièrement longue en Seine, les MES flocculent et chutent, entraînant une diminution de la concentration en MES. Celle-ci augmentera de nouveau avec les courants de jusant avant de diminuer lors de l'étalement de basse mer.

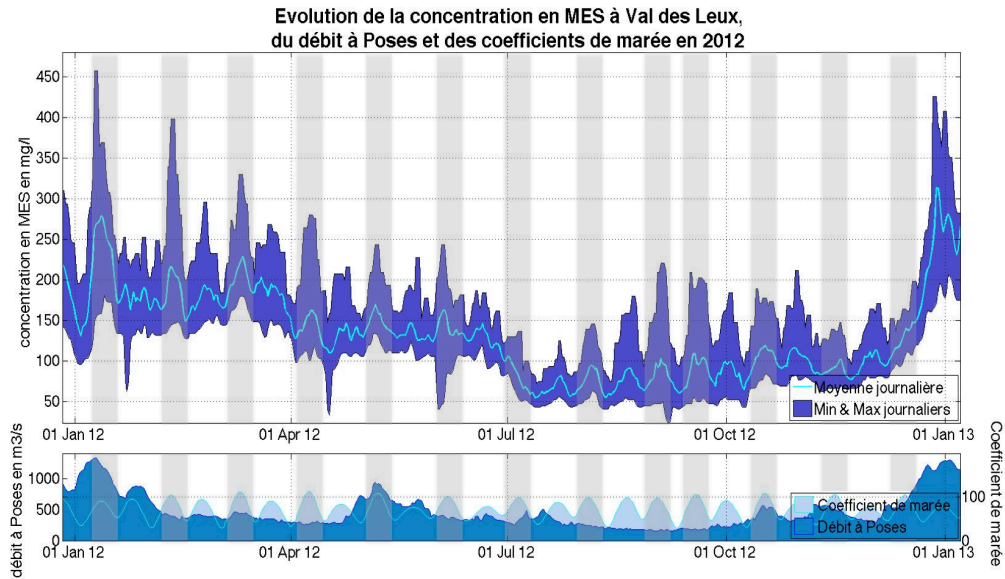


Figure II.16 : Evolution de la concentration en MES à Val-des-Leux, des coefficients de marée et du débit sur l'année 2012 (données SYNAPSES) (les bandes grises correspondent aux périodes de grandes vives eaux)

II.2.3.2 Bouchon vaseux

Comme dans la plupart des estuaires, on observe en Seine une zone d'accumulation de particules appelée bouchon vaseux ou zone de turbidité maximale, générée i/ par l'asymétrie de l'onde de marée et sa propagation dans l'estuaire (cf. II.1.2) et ii/ par la circulation résiduelle induite par la différence de densité existant entre les eaux douces et salées (Brenon, 1997).

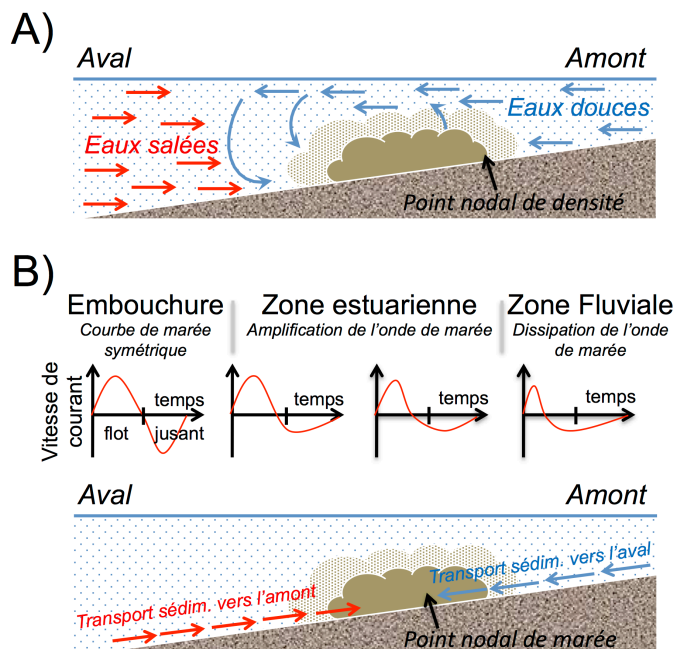


Figure II.17: Mécanismes à l'origine du bouchon vaseux; (A) circulation résiduelle; (B) asymétrie de marée (d'après Dyer et al., 1986 et Allen et al 1980, in Deloffre 2005)

- *Asymétrie et propagation de l'onde de marée*

Lors de sa propagation vers l'estuaire, l'onde de marée se déforme et devient asymétrique avec des durées de flot inférieures à celles de jusant et des courants plus intenses en flot (§ II.1.4). Cette asymétrie de l'onde de marée et les courants qui y sont associés, contribuent à piéger les sédiments en suspension dans l'estuaire aval via i) une érosion préférentielle en flot associé à un transfert des MES vers l'amont ; ii) une sédimentation plus importante durant la longue étale de pleine mer (3h). Les courants de jusant, plus faibles, ne remobilisent qu'une partie de ces sédiments, contribuant à un stockage net plutôt en amont, mais cependant en aval du système fluvial dominant (Figure II.17).

- *Circulation de densité*

A l'embouchure, la stratification haline combinée à l'asymétrie de l'onde de marée génère une circulation résiduelle de densité. Les eaux douces plus légères s'écoulent vers l'aval en surface alors qu'au fond les eaux salées, plus denses, s'écoulent vers l'amont jusqu'au point nodal de densité (Figure II.17). Les matières en suspension transitent ainsi de l'amont vers l'aval en surface. Lorsqu'elles chutent à l'aval du point nodal de densité elles sont entraînées par les courants de fond vers l'amont, créant ainsi une zone d'accumulation de particules.

Dans le cas de l'estuaire de la Seine, Brenon (1997) a caractérisé, avec l'une des premières modélisations 3D du fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, les mécanismes intervenant dans la dynamique du bouchon vaseux. Ses résultats montrent que le bouchon vaseux simulé sans les effets de densité est très proche de celui obtenu avec tous les forçages. Les principaux effets de densité sont de modifier la structure du bouchon vaseux, en l'étirant ou en le resserrant vers le front de salinité. Les mécanismes influençant le comportement du bouchon vaseux de la Seine ont été hiérarchisés comme suit :

- Les effets de l'hydrodynamisme (influence de la marée et de l'écoulement fluvial)
- Les effets du comportement des matériel sédimentaire (vitesse de chute et tension critique d'érosion)
- Les effets de la morphologie et en particulier la localisation des sources sédimentaires (identifiées comme les vasières latérales)
- Enfin les gradients de densité, qui modulent de manière secondaire ces effets.

Ces deux phénomènes conduisent à la formation d'une structure sédimentaire caractéristique des estuaires : le bouchon vaseux. Le bouchon vaseux est ainsi défini comme une zone d'accumulation des MES : il est caractérisé par de forts gradients verticaux et horizontaux et une grande variabilité temporelle.

Comme le montre la Figure II.18, les concentrations caractéristiques du bouchon vaseux sont également fortement variables à l'échelle du cycle vive eau/ morte eau. Les concentrations maximales varient en surface entre 2 g/l en vive eau et 0,05 g/l en morte eau et à 1 m au-dessus du fond entre 4 g/l en vive eau et 0,1 g/l en morte eau.

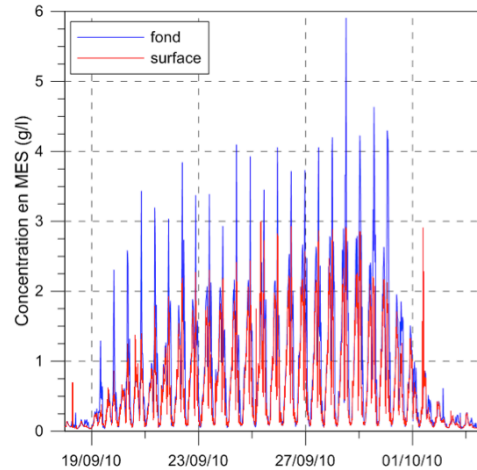


Figure II.18: Évolution de la concentration en MES sur le site de Fatouville du 18/09/2010 au 3/10/2010

La masse du bouchon vaseux est estimée par Grasso entre 20 000 t en morte eau et 250 000 t en vives eaux (Figure II.19). L'estimation de cette masse est extrêmement dépendante de l'emprise de calcul : Grasso et al. considèrent un secteur compris entre les digues submersibles entre les pk 320 et 370. A l'échelle du cycle morte-eau vive-eau, la masse du bouchon vaseux présente une hystérésis, causée par l'inertie induite par la vitesse de chute des particules, en regard de l'amplitude de marée. La masse du bouchon est également positivement corrélée aux débits de la Seine et à l'agitation à l'embouchure (vagues) (Grasso et al. 2018).

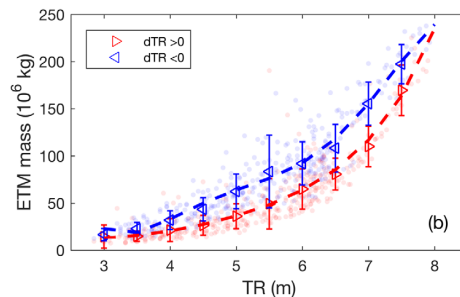


Figure II.19 : Masse du bouchon vaseux simulée en fonction du marnage à l'embouchure. Les triangles rouges représentent les phases de revif, les triangles bleus les phases de déchets. La masse du bouchon vaseux est ici estimée en ne considérant que la zone située entre les digues submersibles (Grasso et al., 2018)

La position du bouchon vaseux est dépendante des conditions hydrodynamiques ; elle oscille avec les phases de la marée, entre les pk 355 et 365 à basse mer et entre les pk 330 et 350 à pleine mer. Cette position moyenne est également modulée par le débit : la position du bouchon vaseux sera d'autant plus en aval que les débits seront forts (Figure II.20). En cas de forte crue, le bouchon vaseux peut même être expulsé en baie de Seine.

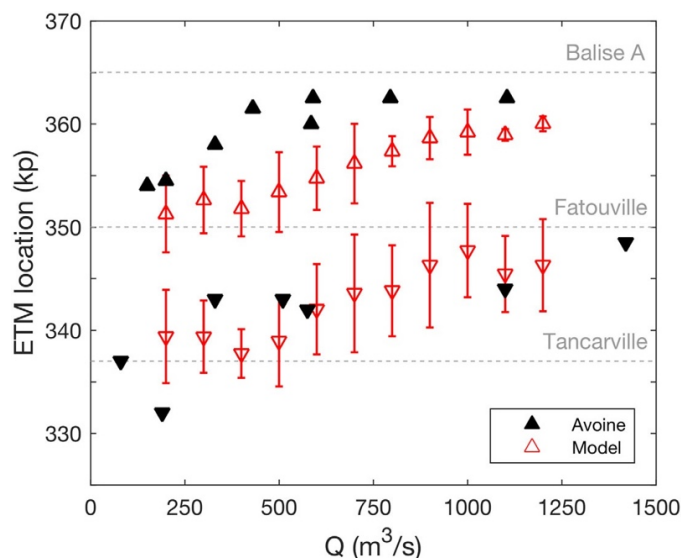


Figure II.20 : Position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine en marée de vive eau. Les triangles pointant vers le haut (resp. vers le bas) représentent les positions à basse mer (resp. à pleine mer). Les triangles noirs correspondent aux estimations faites par Avoine (1981) à partir de mesures in-situ. Les triangles rouges correspondent à la médiane de la concentration en MES simulée de Aout 2014 à aout 2015. Les barres verticales rouges représentent la variabilité de cette position (écart-type) induite par les cycles VE/ME (kp=kilometer point = pk) (Grasso et al., 2018)

II.2.3.3 Panache d'embouchure

L'analyse des images du satellite de couleur de l'eau MODIS (2004-2014) permet l'estimation de la concentration en MES de surface à l'échelle de l'embouchure. Ces images permettent d'identifier qualitativement les structures turbides à l'embouchure et d'évaluer les ordres de grandeurs des concentrations en MES de surface. Ces données, complémentaires des observations aux points fixes des réseaux de mesure et aux résultats de modélisation, permettent une analyse basse fréquence de la variabilité spatiale des MES. Les figures suivantes présentent des exemples de distributions spatiales des MES pour des situations hydrodynamiques et hydrologiques contrastées.

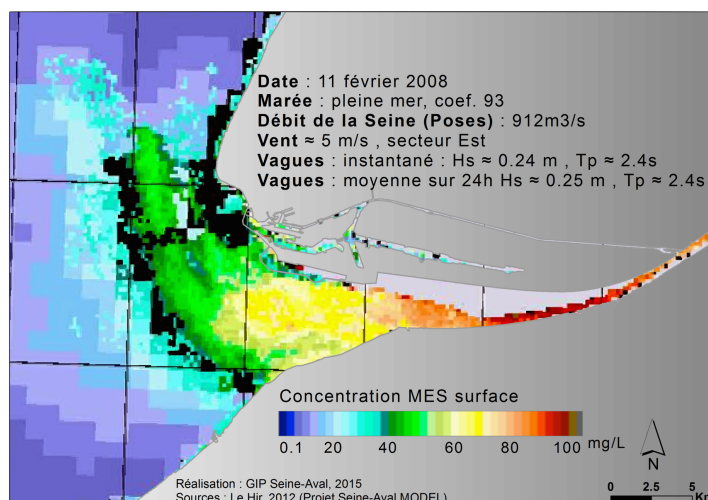


Figure II.21 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 11 février 2008 (données qualitatives) ; marée : pleine mer, débit : $912 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (in Le Hir et al., 2012)

L'image satellite de la Figure II.21 a été réalisée le 11 février 2008 à pleine mer et avec un débit relativement fort de $912 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le maximum de turbidité est alors situé au niveau du Pont de Normandie, on notera le panache de la Seine orienté vers le nord sous l'influence du courant de Verhaule.

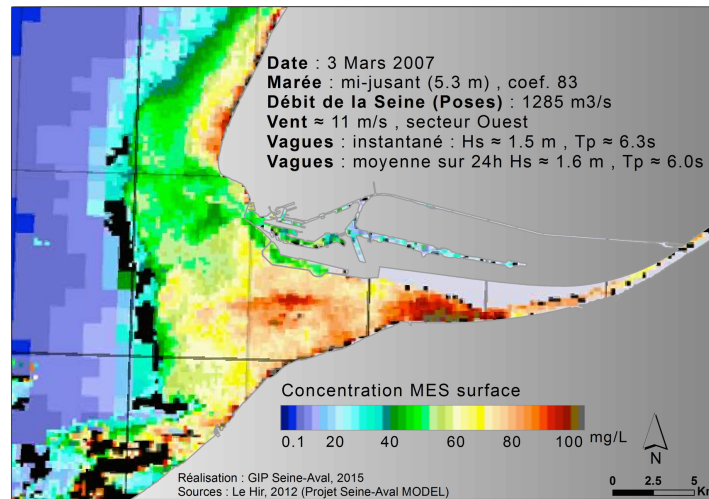


Figure II.22 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 3 mars 2007 (données qualitatives) ; marée : mi-jusant, débit : $1285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (in Le Hir et al., 2012)

L'image satellite de la Figure II.22 a été réalisée le 3 mars 2007 4h avant la basse mer et avec un débit de $1285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mais surtout elle fait suite à une importante tempête relativement importante avec des vagues d'environ 1,50 m à l'embouchure. Le bouchon vaseux est alors situé au niveau de Honfleur. Cette image est particulièrement intéressante, car on peut y voir l'importance des vagues sur la remise en suspension des sédiments au niveau des bancs d'embouchure et au droit du Pays de Caux (Le Hir et al., 2012).

II.2.4 Dynamique du fond sédimentaire

Les sédiments superficiels de l'estuaire de la Seine sont caractérisés par une alternance de faciès sableux, vaso-sableux et vaseux, avec la présence de quelques zones non érodables (Lesourd In Dauvin 2012).

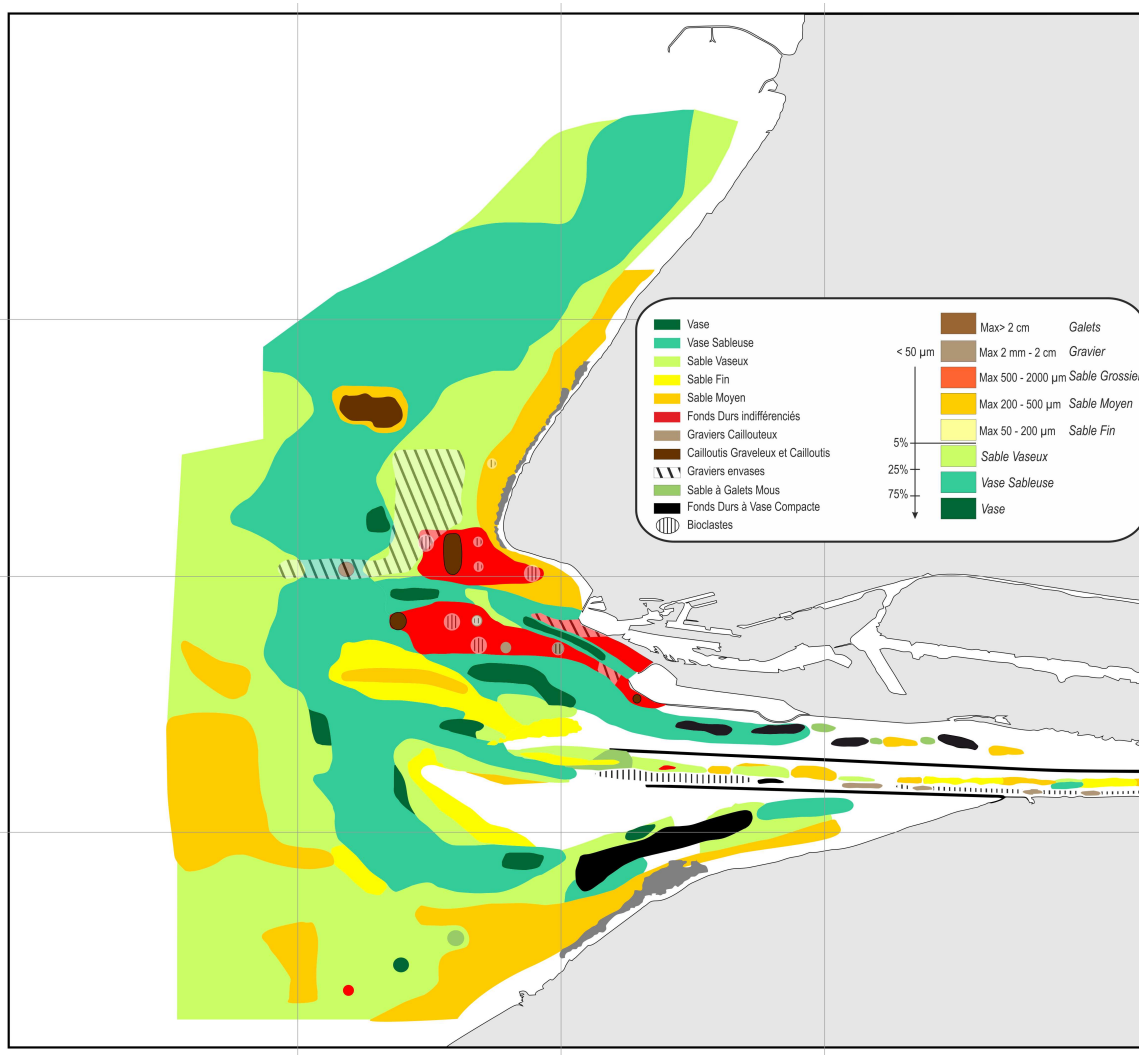


Figure II.23 : Répartition des faciès sédimentaire dans l'embouchure de la Seine en 2009 (échantillonnage 2009-2010) (Lesourd In Dauvin 2012)

Un rappel des principaux processus affectant la dynamique des sédiments déposés sur le fond est fait, suivi d'une discussion sur la rythmicité des érosions/dépôts se produisant au niveau des vasières dans l'estuaire de la Seine. En effet, les vasières intertidales de l'estuaire de la Seine ont fait l'objet d'études approfondies en raison de leur intérêt écologique majeur pour l'estuaire. Nous ne disposons pas du même niveau de connaissance sur la rythmicité des mouvements sableux et des évolutions morphologiques des secteurs subtidiaux de l'estuaire. Les effets à long terme de ces mouvements seront abordés à travers l'évolution morphologique actuelle de l'embouchure, abordée dans le chapitre III lors de la validation du modèle mis en œuvre.

II.2.4.1 Processus morpho-sédimentaires

La dynamique des sédiments sur le fond est contrôlée par 3 processus majeurs : dépôt des matériaux et consolidation, érosion sous l'effet des forçages hydrodynamiques avec divers modes de transport selon ces forçages et la nature des matériaux remaniés.

II.2.4.1.1 Dépôt / tassement-consolidation

Lors de leur chute, les floccs se concentrent près du fond, atteignant des concentrations en MES de l'ordre de 4 g/l ou supérieures. A partir de cette concentration, les floccs entrent en interaction, passant d'une chute libre à un mode de chute entravée : la vitesse de chute diminue avec la concentration. Cette chute se poursuit jusqu'à la formation d'une matrice sédimentaire constituée d'un assemblage d'agrégats, formant alors des entités sédimentaires dont les caractéristiques évoluent au cours du temps, en fonction des contraintes hydrodynamiques.

Dans un premier temps, les sédiments déposés forment une vase fluide (ou crème de vase) constituée d'un mélange eau-sédiment d'une concentration massique supérieure à 100 g/l. Ensuite, si les contraintes générées par les courants à la surface de la crème de vase n'ont pas remis cette dernière en suspension, celle-ci continue de décanter et va perdre sa mobilité, on parle de vase fluide stationnaire (vs. vase fluide mobile). Les concentrations de ce type de corps sédimentaire sont généralement proches de 250g/l. Si l'hydrodynamisme est suffisamment calme, les floccs composant la crème de vase vont sous l'action de leurs poids s'écraser et expulser une partie de l'eau interstitielle pour passer à l'état solide. Cette phase relativement courte, constitue la première phase du tassement (Figure II.24). Il se crée ensuite au sein du sédiment des puits de drainage qui vont permettre à la vase d'évacuer l'eau interstitielle. La dernière phase du tassement, durant laquelle l'eau est éliminée par compression est beaucoup moins rapide, la hauteur de sédiment diminue très lentement. On parle alors de vase consolidée (Lesourd, 2005).

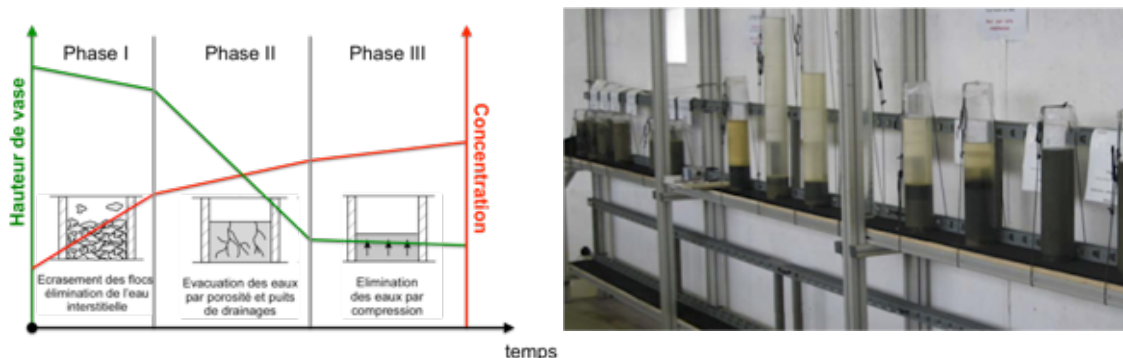


Figure II.24: Illustration des différentes phases du tassement des vases (schéma adapté de Migniot, 1989 in Lesourd (2005) ; à droite : tests de consolidation en laboratoire (photo Bassoullet, in Le Hir et al., 2006)

Dans la pratique les vitesses de tassement des sédiments sont dépendantes de plusieurs paramètres dont la concentration initiale du sédiment, et sa composition granulométrique (présence de sables). La Figure II.25 illustre les expériences de tassements réalisées par Bassoullet (in Le Hir et al., 2006) dans le cadre du programme Seine-Aval 3 à partir de sédiments prélevés dans la vasière nord et le chenal de navigation. Sur cette figure, les courbes associées aux mélanges artificiels 1, 3 et 5 (composition sable/vase à 50% et concentrations initiales différentes), montrent la consolidation primaire (expulsion rapide de l'eau interstitielle) ne se produit que si la concentration initiale est faible. La comparaison des mélanges 2, 3 et 4 (concentration initiale : 400 g/l et composition sable/vase différente) illustre la dépendance de la vitesse de tassement à la granulométrie du mélange ; plus le sédiment est sableux, plus il se tasse rapidement. Ceci s'explique i/ par le rôle drainant du sable vis à vis du mélange et ii/ par la densité plus importante des sables par rapport aux vases, ce qui impose une contrainte normale plus élevée sur l'ensemble des couches sous-jacentes et accélère donc leur consolidation. Ces courbes mettent également en évidence les différentes phases du tassement décrites précédemment (Lesourd, 2000 ; Lesourd, 2005 ; Le Hir et al., 2006, Grasso et al., 2014).

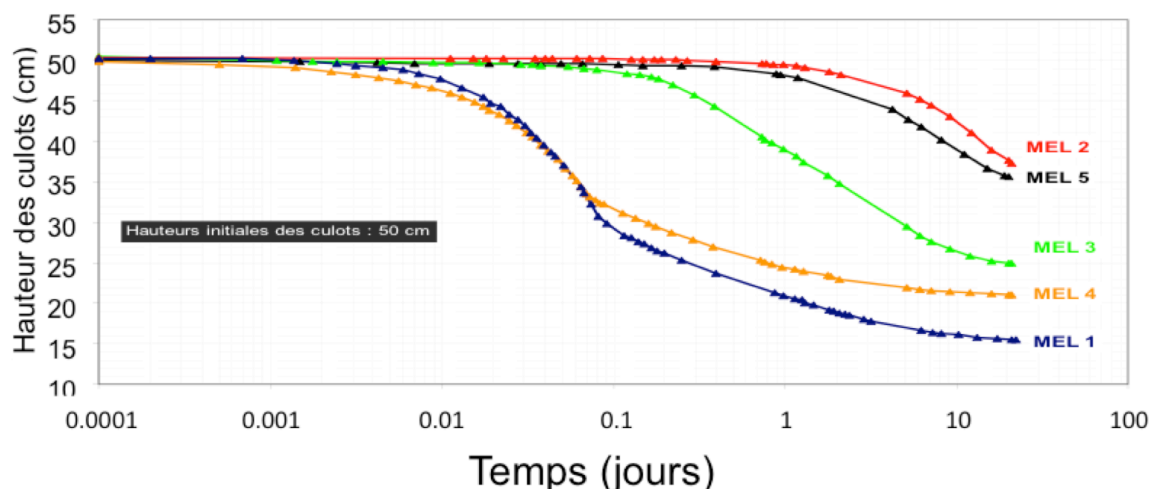


Figure II.25 : Illustration et exemple de résultats issus d'expériences de tassement de différents mélanges sablo-vaseux sur 23 jours (Le Hir et al., 2006). Mélange 1 : 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 200 g/l ; Mélange 2: 80% Vases, 20% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 3: 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 4: 20% Vases, 80% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 5 : 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 600 g/l

II.2.4.1.2 Érosion des sédiments estuariens

L'érosion des sédiments vaseux ou mixtes s'exprime classiquement comme le produit d'une constante d'érosion E_0 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), caractéristique du sédiment, par un excès de cisaillement relatif, traduisant le rapport entre l'excès de contrainte exercée par les forçages hydrodynamiques τ_b au-delà de la résistance du sédiment à l'érosion (appelée contrainte critique d'érosion τ_{ce}) et cette même contrainte critique d'érosion : c'est la relation dite "de Partheniades" : $E = E_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)$

En lien avec les processus de tassement, la contrainte critique d'érosion dépend des caractéristiques du sédiment et en particulier de son état de consolidation (ou concentration massique) et du ratio sable/vase. Pour un sédiment donné, la valeur de la contrainte critique d'érosion est directement corrélée au degré de compaction de la vase, *i.e.* une vase fluide s'érodera plus facilement qu'une vase consolidée. Le ratio sable/vase joue également un rôle particulier sur l'évolution de la loi d'érosion du sédiment. En effet sous un certain seuil de fraction vaseuse, le sédiment peut être considéré comme non-cohésif. Dans ce cas, l'érosion des grains de sables et l'érosion des particules fines sont supposées indépendantes. Par contre, au-delà de ce seuil, le sédiment a un comportement « semi-cohésif », sa contrainte critique d'érosion est dépendante de la teneur en vase. Ce comportement se rapproche alors plus ou moins rapidement du comportement purement cohésif des vases pures (Waeles, 2005 ; Le Hir et al., 2006, 2012 ; Mengual et al., 2017). Cette schématisation de l'évolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la fraction vaseuse du sédiment est représentée sur la Figure II.26.

Cette schématisation, relativement simple des processus d'érosion, ne tient pas compte d'un certain nombre de processus pouvant intervenir dans le sédiment comme la bioturbation, les phénomènes de pavage, l'érosion en masse, etc.

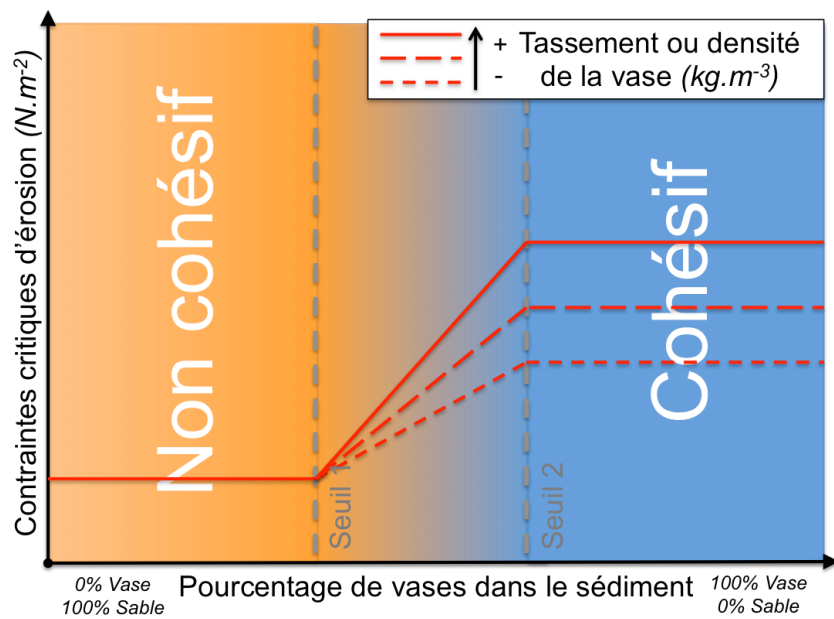


Figure II.26: Évolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la teneur en vase du sédiment (d'après Le Hir et al., 2011)

II.2.4.1.3 Mode de transport des sédiments

Les sédiments fins et les sédiments grossiers, de par leurs différences de tailles et de poids, se différencient par leur mode de transport. De manière générale, les sédiments fins sont transportés en suspension alors que les sédiments grossiers vont adopter des comportements différents en fonctions de leurs densités et des conditions hydrodynamiques du milieu. Les sables se déplacent en saltation (en effectuant des sauts par rapport au fond), les graviers et les éléments plus grossiers roulent sur le fond, on parle de charriage (Figure II.27). Plus les vitesses de courants sont élevées plus la taille des matériaux charriés peut être élevée. S'ils sont mobilisés, les sédiments cohésifs ne sont transportés qu'en suspension, alors que les sédiments non cohésifs ne le sont que s'ils sont suffisamment fins ou que les contraintes de cisaillement sont très élevées.

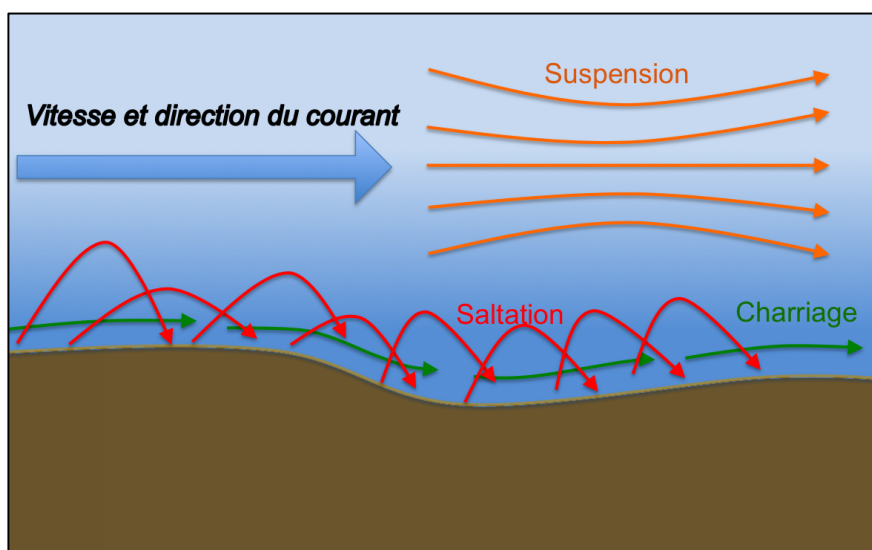


Figure II.27: Illustration des différents modes de transport des sédiments

II.2.4.2 Rythmicité des dépôts/érosions sur les vasières intertidales de l'estuaire de la Seine

Les vasières peuvent être considérées comme des zones de stockage de sédiment de court à long terme, faiblement impactées par les courants de marée. Ce sont préférentiellement des zones latérales intertidales, présentes de façon discontinue le long du linéaire de l'estuaire.

En fonction du secteur de l'estuaire considéré, les forçages dominants diffèrent : par exemple le secteur amont est principalement contrôlé par le débit de la Seine tandis que l'embouchure est également sous l'influence du milieu maritime et donc des tempêtes et des marées. Ainsi, les rythmicités des phénomènes de dépôts/érosions évoluent différemment de l'amont à l'aval de l'estuaire. Les paragraphes suivants visent à expliquer le fonctionnement des vasières de l'estuaire de la Seine en découpant l'estuaire en trois compartiments : l'amont, le secteur intermédiaire et le secteur aval. Il est néanmoins important de préciser que le fonctionnement des vasières évolue de façon continue le long du linéaire estuarien ; les limites géographiques de ces compartiments ne sont donc que des indications et leur caractérisation par leurs forçages dominants est à privilégier.

II.2.4.2.1 Les vasières de l'estuaire amont

Les vasières intertidales dites de l'estuaire amont présentent la particularité d'être submergées quasiment en permanence durant la période des hautes eaux liées aux forts débits de la Seine. Géographiquement cette zone s'étend globalement de l'amont de Rouen au barrage de Poses. Durant la période des crues de la Seine, les vasières telles que la vasière de Oissel sont en sédimentation (la vasière de Oissel, largement étudiée dans le cadre de Seine-Aval, est considérée comme représentative des vasières amont). Cette phase de dépôt est due : i) aux fortes concentrations en MES apportées par les crues de la Seine et ii) au fait que durant cette période les vasières sont continuellement submergées. Les vasières intertidales amont piègent ainsi entre 10 et 30% des sédiments transitant par Poses (Deloffre, 2005).

En période d'étiage, les dépôts hivernaux sont progressivement remaniés et remis en suspension par les courants tidaux. L'érosion de ces vasières est surtout réalisée pendant les marées de vives-eaux et en particulier par les courants associés au flot très brusque dans cette partie de l'estuaire. Le batillage peut également contribuer à éroder partiellement les dépôts récents (Deloffre et al., 2012).

II.2.4.2.2 Les vasières d'embouchure

Les vasières d'embouchure désignent globalement les vasières situées à l'aval du pont de Tancarville. Le fonctionnement de ces vasières est principalement gouverné par i) les conditions d'agitations rencontrées à l'embouchure et ii) le positionnement du bouchon vaseux. Lors de la période hivernale, les forts débits vont déplacer le bouchon vaseux vers l'aval voir l'expulser en baie de Seine, limitant ainsi le stock sédimentaire potentiellement disponible pour alimenter les vasières. De plus, cette saison est concomitante aux périodes des tempêtes en baie de Seine, générant des vagues significatives, qui ont, elles, tendance à éroder les vasières se situant à l'aval du pont de Normandie. Dans ces conditions, jusqu'à 200 000 tonnes de sédiments peuvent être érodées de la vasière nord (Deloffre, 2005).

Ensuite, à la fin des crues, l'absence d'agitation et la position du bouchon vaseux, au droit de la vasière nord, vont rendre la sédimentation possible à l'embouchure. Durant cette période, Deloffre (2005) a estimé que près de 200 000 t de sédiments pouvaient se déposer sur les vasières d'embouchures (Deloffre, 2005).

En revanche durant l'été, les faibles débits vont permettre au bouchon vaseux de remonter en amont du pont de Normandie, limitant de nouveau la sédimentation à l'aval de ce dernier. Durant cette période également caractérisée par une faible agitation (houles + clapots) en baie de Seine, les vasières d'embouchure sont globalement stables tout en restant soumises au processus de tassement.

II.2.4.2.3 Les vasières "intermédiaires"

Positionnées au centre de l'estuaire où les forçages sont mixtes (marins et continentaux), les vasières situées en amont du pont de Tancarville ont aussi une dynamique contrôlée par le débit de la Seine et

l'amplitude des marées. Elles sont également largement impactées par l'activité humaine, en particulier par le batillage. Leur fonctionnement est donc intermédiaire entre celui des vasières amont et aval.

A l'échelle annuelle, les études faites sur les vasières du Trait ou de Petiville démontrent que ces dernières sont stables avec cependant une certaine cyclicité pluriannuelle à mettre en lien avec la variabilité interannuelle des débits de la Seine (Lemoine, 2014). Ces vasières étant principalement alimentées en MES par le bouchon vaseux, leur engraissement ne peut se faire que durant les années sèches, lorsque le bouchon vaseux est suffisamment en amont, et que les concentrations en MES sont suffisantes pour que la sédimentation durant les étales soit prépondérante sur l'érosion du flot. Durant les années sèches, le bouchon vaseux est plus gros que lors des années humides car son expulsion en baie de Seine est généralement moindre, et d'autre part remonte dans l'estuaire du fait des faibles débits. Ainsi, Lemoine (2014) montre que la vasière de Petiville est en sédimentation durant l'étiage lorsque le bouchon vaseux est à l'amont. De manière analogue, la vasière du Trait est en sédimentation lors des étiages prolongés quand le bouchon vaseux est très étendu et positionné très en amont (§ II.2.2.2). La sédimentation sur ces vasières est donc principalement rythmée par le débit de la Seine et son impact sur la position du bouchon vaseux.

Dans cette partie de l'estuaire, l'érosion est gouvernée par les cycles tidaux mais également par les événements de haute énergie que génère le batillage, qui entraînent une érosion brusque du sédiment (Deloffre et al. 2012).

La Figure II.28 représente les évolutions altimétriques de la vasière de Petiville et les conditions hydrologiques associées durant les suivis réalisés dans le cadre de la thèse de Lemoine (2014). En période de fin de crue, (février/mars 2011) on observe un déplacement des dépôts vers la partie basse de l'estran (constaté avec la station piquets A située en bas de vasière et représentée par des triangle verts) et certainement un transfert d'une partie de ces dépôts vers le chenal. En période d'étiage, des dépôts pluri-centimétriques sont observés sur la vasière. En phase montante de de crue (fin de la période représentée), la vasière est relativement stable : des dépôts centimétriques visibles à la fois sur les suivis piquets et altimètre. A l'échelle des cycles vive eau/morte eau, des érosions de plusieurs centimètres se produisent durant les vives eaux exceptionnelles, mais ces derniers se redéposent généralement durant les mortes eaux suivantes.

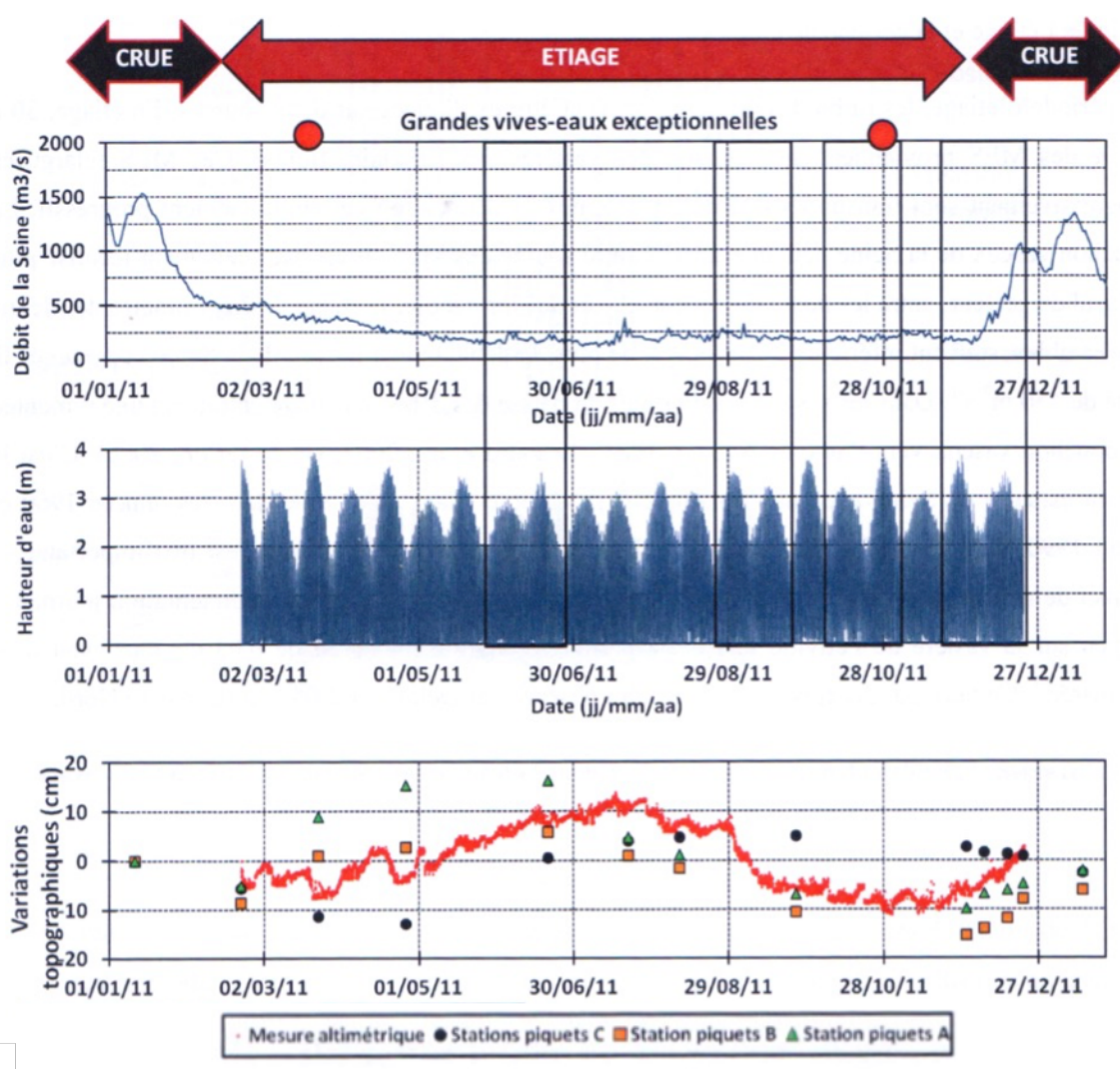


Figure II.28 : Conditions de débit, hauteurs d'eau et variations de topographie enregistrées par des mesures piquets (disques, carrés et triangles) et un altimètre ponctuel (points rouges) mesurées sur la vasière de Petiville (Lemoine, 2014). La localisation de Petiville est indiquée sur le plan général de l'estuaire

II.2.4.2.4 Synthèse à l'échelle de l'estuaire

La Figure II.29 synthétise le fonctionnement des vasières de l'estuaire de l'aval vers l'amont. D'une manière générale, étant données les contraintes hydrodynamiques dues à la marée et aux vagues (houles, mer de vent ou batillage), les dépôts sédimentaires ne sont possibles qu'en présence d'une forte charge particulaire.

A l'amont, les dépôts sur les vasières se font exclusivement durant la période hivernale, lorsque les forts débits de la Seine transportent une importante quantité de MES et que les vasières sont quasiment continuellement submergées. Dans le reste de l'estuaire, la sédimentation sur les zones intertidales va principalement dépendre de la quantité de matière en suspension disponible. A l'aval, la sédimentation ne sera possible que dans des conditions de fortes turbidités : présence du bouchon vaseux, ou de resuspensions induites par des tempêtes. Plus en amont, les vasières dites intermédiaires, ne seront en sédimentation que durant l'étiage quand le bouchon vaseux remonte en amont du pont de Tancarville. Il est important de noter qu'à l'échelle annuelle, l'amplitude des variations topographiques des zones intertidales est au maximum de 15 cm (Deloffre, 2005).

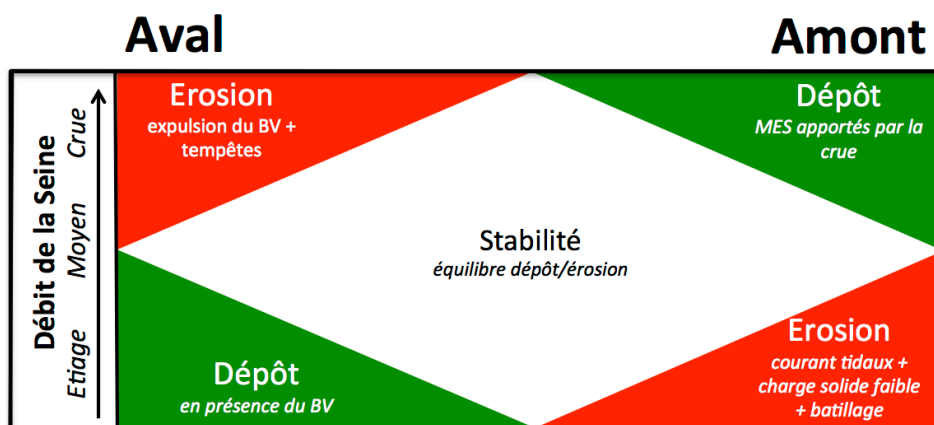


Figure II.29 : Synthèse qualitative du fonctionnement des vasières intertidales de l'aval vers l'amont en fonction du débit de la Seine et des forçages (marée, houle, batillage)

II.3 Les apports sédimentaires à l'estuaire

L'ensemble des forçages décrits au II.1 (marée, débit, vent, vagues) génère des flux sédimentaires à destination ou en provenance de l'estuaire. La mise en regard de l'ensemble de ces apports/exports sédimentaires à l'estuaire permet de dresser le bilan sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Le présent paragraphe (II.3) présente les principales sources de sédiments : les apports continentaux et les apports marins. Les apports de second ordre tels que les productions endogènes, les rejets industriels, présentés dans Lemoine et al. (2015), seront ici négligés.

II.3.1 Les apports continentaux

II.3.1.1 Les apports de la Seine

Les apports issus de l'érosion des 67 000 km² du bassin versant amont et des rejets industriels et domestiques dans le réseau hydrographique constituent la principale source de MES continentales à l'estuaire de la Seine. Ce flux solide est estimé en moyenne entre 500 000 et 700 000 t par an, dont 75 % se font en période de crue et principalement durant la phase ascendante des crues (Avoine, 1985 ; Landemaine, 2017). Durant les années sèches, ce flux se limite à 200 000 t contre 1 000 000 t pour les années humides ; ces flux correspondent à une érosion moyenne du bassin versant amont comprise entre 3 et 10 t.km⁻².an⁻¹ (7,5 t.km⁻².an⁻¹ en conditions moyennes).

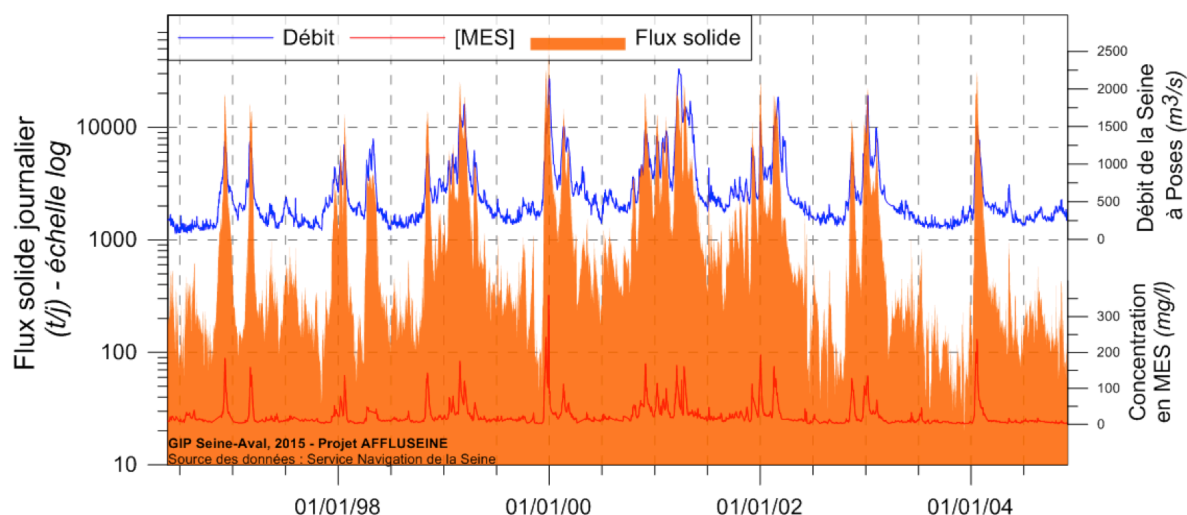


Figure II.30: Evolution quotidienne : des débits fluviaux, des concentrations pondérales de MES calculées et des flux de MES au barrage de Poses (pk 202) entre 1996 et 2004 (Données Service Navigation de la Seine ; retraitées dans le cadre du projet SA5 AFFLUSEINE)

Les travaux d'Avoine (1985), de Cossa *et al.* (1994), de Idlafkih *et al.* (1995), Guezennec (1999), et Landemaine (2017) se sont attachés à caractériser la relation entre le débit liquide et la charge solide de la Seine à Poses. Ces études montrent qu'environ 75% des apports particuliers provenant de l'amont se font en condition de crue et plus particulièrement durant la phase ascendante des crues. Ces phases ascendantes de crues représentent une vingtaine de jours par an, et peuvent transporter jusqu'à 50% des apports amont (Avoine, 1982 ; Avoine, 1985 ; Meybeck and Idlafkih, 1995 in Guezennec, 1999).

Avoine (1985) propose ainsi une formulation à appliquer en dehors des pics de crue et des phases de débits. Cette relation et ses conditions d'applications ont par la suite été modifiées et complétées, *a priori* suite aux mesures réalisées dans les années 90 par le Service Navigation de la Seine (SNS) (Avoine, 1995). Actuellement, ces équations dont les limites ont été démontrées (Grasso in Le Hir *et al.*, 2012) sont utilisées dans les conditions d'applications définies dans Guezennec (1999) (Figure II.31).

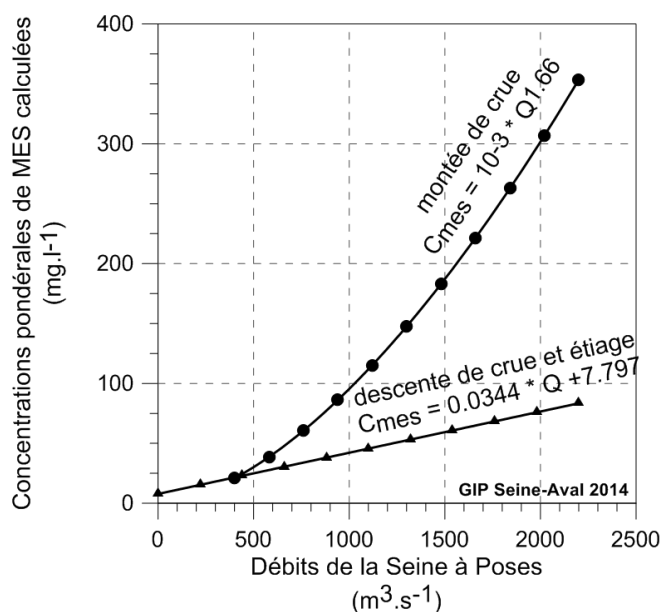


Figure II.31: Relations entre charge solide et débit de la Seine actualisées par Guezennec 1999

Temporellement, le maximum de concentration en MES peut, en fonction du type de crue, être soit en phase, soit en avance ou en retard par rapport au débit ; ces deux derniers cas engendrent des relations débits/charge solide présentant des hystérésis (Figure II.32). Guezennec (1999) montre par exemple que la relation débit/charge solide forme une hystérésis rétrograde si le débit dépasse 1800 m³/s, et que les crues suivantes seront associées à des hystérésis orthogrades. Ces phénomènes s'expliquent par une disponibilité plus importante des MES à la remise en suspension lors de la première crue de la saison par rapport aux crues suivantes pour lesquelles le matériel sédimentaire aura déjà été charrié (Guezennec, 1999 ; Avoine, 1985). Le modèle proposé par Landemaine 2017, considère les évolutions passées du débit et permet de reproduire ce phénomène qui traduit la complexité des écoulements sur le bassin versant amont (Guezennec, 1999).

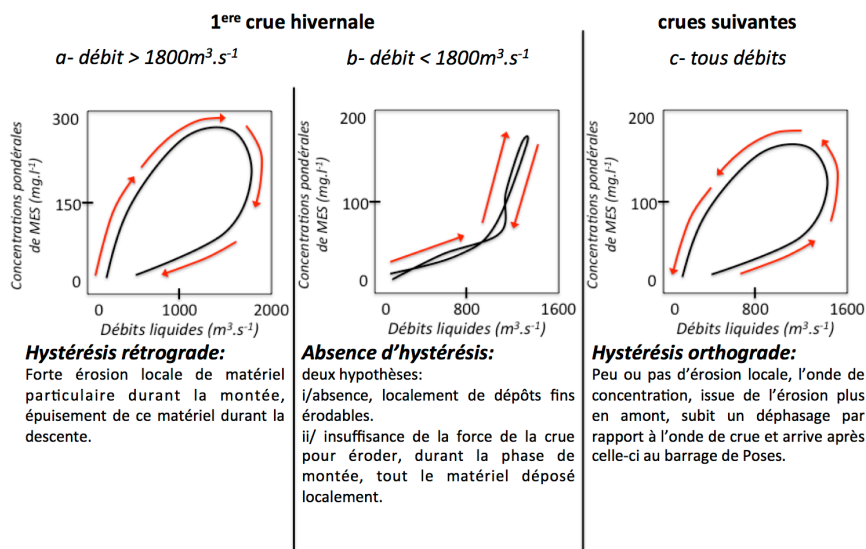


Figure II.32 : Interprétation des relations entre charge solide/débit liquide au barrage de Poses (d'après Guezennec 1999)

II.3.1.2 Les apports intra-estuariens

Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 t.an⁻¹, avec un écart type de 46 600 t.an⁻¹. Ainsi les bassins versants estuariens qui représentent environ 15 % de la surface totale du bassin apportent 10 % de l'ensemble des apports sédimentaires continentaux à l'estuaire de Seine (Landemaine, 2017).

II.3.2 Les apports marins

II.3.2.1 Apports de vases marines

La dynamique des MES dans la baie de Seine est contrôlée par les courants de marée et les épisodes de houles. Ce transport est principalement orienté vers l'estuaire de la Seine et est maximal pendant les épisodes de tempêtes, indépendamment du débit de la Seine (Avoine, 1995). Ces résultats ont été confirmés grâce à des expérimentations réalisées par l'IRSN à l'aide de deux marqueurs radioactifs le cobalt 60 (⁶⁰Co) et le césium 137 (¹³⁷Cs) dans les années 90. Ce suivi de traceurs a permis de retrouver des particules d'origines marines jusqu'au pk 280 à Duclair (Boust, 1997 ; Guézennec *et al.*, 1998 in Guézennec, 1999 ; Dubrulle-Brunaud 2007). La quantification de ce flux constitue un véritable défi scientifique, étant données ses dépendances avec les processus sédimentaires naturels et

anthropiques intra-estuariens telles que l'érosion des sédiments reliques de la baie de Seine ou la remobilisation des sédiments clapés dans la proche baie par les deux Ports. Avoine (1995), en effectuant la différence entre le volume estuarien se comblant annuellement (dans les années 80) et les apports fluviaux, estime que les apports marins vaseux seraient proches de 1.5 million de m³, du même ordre de grandeur que les apports du bassin versant.

II.3.2.2 Apports de sables marins

De la même manière que pour les apports en particules fines, la dynamique des sables est régie par les courants de marée et par la houle. Ainsi, le transport sableux se fait préférentiellement d'ouest en est, en direction de l'estuaire de la Seine, probablement en raison d'une asymétrie du courant de marée en faveur du flot. Ces courants sont à l'origine du développement de structures sédimentaires sableuses longitudinales dont l'orientation est conforme à la direction des courants de marée dominant dans le secteur. Ces structures sableuses s'organisent sous forme de mégarides asymétriques indiquant un transport dominant vers l'estuaire (Avoine, 1995). Ces sables sont issus de l'érosion des fonds de la baie de Seine par les courants locaux. Avoine (1995), en comparant des cartes bathymétriques datant de 1874 et 1913, estime à 1,5 cm/an l'érosion de la baie de Seine orientale soit 2,5 millions de m³/an sur le secteur allant du Havre à Ouistreham.

Les résultats précédents sont principalement issus des travaux réalisés par Avoine dans les années 80 (synthétisés en 1995) et sont ainsi à considérer avec précaution étant données les évolutions de l'estuaire au cours des 20 dernières années, et en prenant également en compte les moyens de mesures de l'époque. En particulier, ces quantifications ont été établies dans une période où l'estuaire était en comblement ; ce qui ne semble plus être le cas (cf. II.5). Néanmoins, la tendance de transport des sables présentée est cohérente avec les résultats obtenus par Garnaud en 2003 et plus récemment par modélisation dans le cadre du projet Seine-Aval Model (Le Hir et al., 2012 ; Schultz et al., 2018). En particulier, en utilisant le modèle développé dans le cadre du projet Seine-Aval 5 HYMOSED, Schultz et al. (2018) ont montré que le flux sédimentaire dirigé vers l'estuaire au niveau d'une limite dite « mouth » reliant le cap de la Hève à Deauville, et passant à l'est immédiat du site de dépôt du Kannik, était de 9 Mt/an dont 3Mt/an de vases. Ce résultat est qualitativement cohérent avec l'estimation proposée par Avoine (1995), mais reste dépendant de la capacité du modèle utilisé à reconstituer les évolutions morphologiques de l'estuaire. Il sera rediscuté section IV.5 lors de l'examen des bilans sédimentaires.

II.4 Les dragages/clapages en estuaire de Seine

La morphologie actuelle de l'estuaire de la Seine reflète les dynamiques HMS précédemment décrites. Il est néanmoins évident que cette morphologie est entièrement artificielle et résulte des travaux d'aménagements entrepris depuis le milieu du XIX^{ème} siècle (Avoine, 1995). Les endiguements et les dragages constituent l'essentiel de ces aménagements. Les premiers enregistrements de dragages dans l'estuaire de la Seine datent du milieu du XIX^{ème} siècle (Foussard et al., 2010). Depuis cette période, l'estuaire n'a cessé d'être dragué afin de garantir des conditions de navigation sûre.

Les sections suivantes présentent les pratiques actuelles de dragage d'entretien réalisées dans l'estuaire par les ports de Rouen et du Havre.

Les dragages d'entretien de l'estuaire peuvent être subdivisés en deux secteurs (Figure II.33)

- Les dragages de l'embouchure ou estuaire aval
- les dragages de l'estuaire en amont de Vieux Port et jusqu'à Rouen

II.4.1 Dragages dans l'estuaire en amont de Tancarville

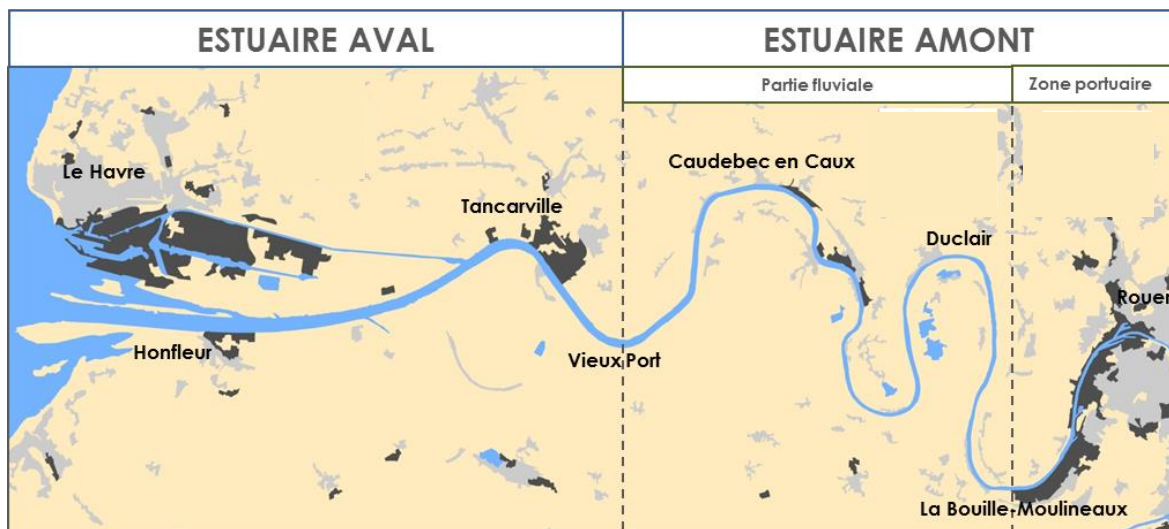


Figure II.33 : Dénomination des zonages principaux de l'estuaire utilisés par le GPM Rouen pour quantifier ses dragages (GPMR & IDRA-Ingénierie, 2014) (GPMR & IDRA-Ingénierie, 2014)

Afin de garantir l'accessibilité de ses terminaux portuaires Rouennais situé à 120 km de la mer, le GPMR réalise des dragages d'entretien jusqu'à Rouen. Ces dragages sont de deux types :

- les dragages de la partie fluviale représentant entre 65 000 t/an et 500 000 t/an (moyenne annuelle estimée à 160 000 t/an de matière sèche).
- les dragages de la zone portuaire représentant entre 160 000 et 520 000 t/an (moyenne annuelle estimée à 325 000 t/an de matière sèche).

Les dragages de la partie fluviale sont de nature variée mais principalement sableux. Ils peuvent contenir des particules fines argileuses ou tourbeuses. Selon les bancs considérés, les dragages sont réalisés selon une périodicité comprise entre 1 et 3 ans. La majeure partie de ces sédiments est gérée à terre et est donc sortie du système.

Les dragages de la zone portuaire sont principalement composés de vases (90% de fines) apportées par les crues. Ces matériaux servent aux remblaiements des ballastières d'Yville (à proximité du pk 285).

Dans ce secteur le nivellement par injection d'eau complète les dragages. Ce type de dragage consiste à injecter de l'eau sous pression dans le sol, qui génère un mélange d'eau et de sédiments en "semi-suspension" (crème de vase). La différence de densité entre ce mélange et l'eau crée un courant de densité qui entraîne les sédiments vers le chenal où ils sont alors transportés par les courants de marée. Le port de Rouen utilise cette technique environ 400 h/an pour déplacer de 50 à 150 000 m³/an (Artelia 2012, Guide méthodologique pour le dragage à injection d'eau). Les volumes déplacés par cette méthode sont largement inférieurs à ceux déplacés par les dragues « conventionnelles ».

N.B. Les dragages de l'estuaire amont représentent moins de 10 % des dragages totaux réalisés par le GPMR, ils ne constituent pas l'objet de notre étude et ne seront pas détaillés par la suite. Notre étude se focalise sur les dragages d'entretien réalisés à l'aval de Tancarville.

II.4.2 Dragages dans l'estuaire aval

II.4.2.1 Localisation des sites de dragage et des sites de clapage

A l'embouchure de l'estuaire, précédemment décrite comme un milieu très dynamique présentant des processus hydro-sédimentaire complexes et intenses, les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre doivent draguer quasiment en continu pour maintenir des conditions de navigations sûres permettant le transit des navires.

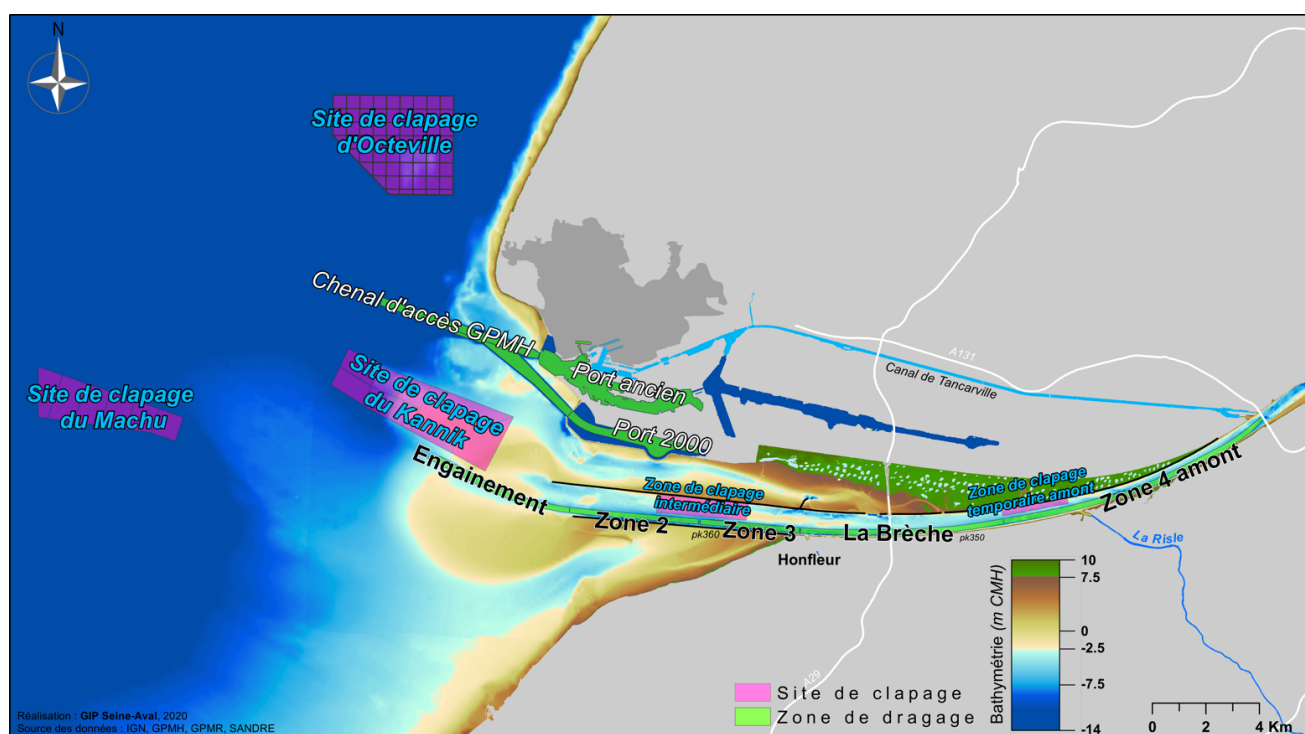


Figure II.34: Localisation des sites de dragages et clapages de l'estuaire de la Seine

II.4.2.1.1 Les zones de dragages/clapages du port de Rouen

A l'aval de l'estuaire, le GPMR entretient un chenal long de près de 35km. Situé entre Tancarville et la mer, ce secteur est subdivisé en 5 zones de l'aval vers l'amont (Figure II.34):

- L'engainement,
- Zone 2
- Zone 3
- La Brèche
- et la Zone 4 amont

Les zones de l'Engainement et de la Brèche constituent les deux principales zones de dragages du GPMR : 94% des masses draguées par le GPMR à l'aval y sont draguées.

Entre 1977 et 2017, les immersions du GPMR étaient principalement réalisées sur le site du Kannik (Figure II.34). Ce site est situé à l'embouchure de l'estuaire de la Seine, en tête du banc d'Amfard, à l'Ouest de la digue basse Nord. Proche de l'Engainement, le site du Kannik permet de minimiser les distances de transport et s'inscrit dans le sens de développement naturel des bancs tout en minimisant le recyclage des matériaux clapés. Les profondeurs rencontrées sur le site sont comprises entre -7 et -13 mCMH. La couverture sédimentaire dans le secteur du Kannik est essentiellement composée de

sables moyens, ce qui confirme les propriétés conservatives du site pour les sables et dispersive pour les vases (GPMR, 2010). Depuis 2012, les clapages sont réalisés jusqu'à la cote -7mCMH.

Depuis 2017, ce site a été remplacé par le site du Machu situé plus au large, 10km à l'Ouest du Kannik. Les profondeurs y sont comprises entre -19 et -13 mCMH. Les sédiments présents sur la zone sont principalement des sables fins et moyens ne comprenant qu'un très faible proportion de vases (<5%) (GPMR, 2015).

Le site du Kannik est considéré dans les chapitre III et IV, le site du Machu dans le chapitre V.

La zone de clapage intermédiaire (Figure II.34) est le lieu secondaire de clapage des sédiments dragués à la Brèche et en amont. Ce site est peu utilisé par le GPMR comparativement au site du Kannik (~7% des clapages). Les clapages n'ont lieu qu'au jusant pour utiliser au mieux les caractéristiques de ce site de dépôt. En effet, cette zone bénéficie d'une résultante de transport vers l'aval permettant aux sédiments qui y sont clapés d'être expulsés vers l'Engainement après avoir transité le long de la digue basse Nord.

La zone temporaire amont (Figure II.34) est utilisée uniquement en cas d'urgence pour la sécurité de la navigation ou en cas de mauvaises conditions météorologiques (vagues > 1.5 m). Entre 10 000 et 30 000 m3 sont clapés chaque année sur ce site.

L'utilisation des deux zones d'immersion situées à l'intérieur de l'estuaire (zone intermédiaire et zone temporaire amont) est principalement associée aux dragages réalisés sur le site de la Brèche situé à proximité. L'utilisation de ces sites par le port de Rouen étant par ailleurs relativement limitée (~ 7% des clapages totaux), elle ne sera pas considérée par la suite.

II.4.2.1.2 Les zones de dragages/clapages du port du Havre

Le port du Havre est situé au nord de la limite aval de l'estuaire de la Seine. Pour assurer son accessibilité, le GPMH drague à la fois ses bassins portuaires (Port Ancien et Port 2000) et leurs chenaux d'accès (Figure II.34). L'essentiel des dragages effectués par le GPMH est situé dans les chenaux d'accès et dans les bassins à marée. Le dragage des zones non soumises à marée est négligeable.

Depuis 1947, les sédiments dragués par le GPMH sont immergés sur le site d'Octeville situé au nord de l'embouchure, à une dizaine de km du port. Sur le site, les profondeurs sont comprises entre -19 et -10 mCMH. En moyenne, sur la période 2004-2013, le pourcentage de fraction fine dans le sédiment superficiel est très faible compte tenu de l'histoire du site: 27% de sédiment fin (<63µm) (GPMH, 2014).

II.4.2.2 Profondeurs maintenues à l'embouchure

Selon les secteurs de l'embouchure, les dragages maintiennent différentes cotes de fond de chenal. Dans les zones du chenal de Rouen, la cote consigne était de - 5.3 mCMH (Cote Marine du Havre, cette référence correspondant au niveau de plus basse marée astronomique) avant les travaux d'approfondissement initiés en 2012. Depuis décembre 2019, et la fin des travaux, la cote cible du fond du chenal de navigation a été portée à - 6,3 mCMH.

N.B. L'objet de notre étude étant l'impact des dragages d'entretien sur le fonctionnement du système estuarien, et le travail étant basé sur la variabilité des dragages en fonction des différents forçages naturels (cf. Chap. III et IV), il a été choisi de ne pas faire varier la cote cible au cours des simulations effectuées. L'ensemble des résultats présentés dans les chapitres III, IV et V considère la cote avant travaux : -5.3 mCMH.

Dans les secteurs à marée du GPMH, 3 différentes cotes sont considérées (hors Antifer) (GPMH, 2014) (Figure II.38) :

- -14.5 mCMH dans les bassins du port historique appelé par la suite Port Ancien (bassins Théophile Ducroq, René Coty et Pacifique)
- -15.5 mCMH dans le chenal d'accès à Port Ancien et son avant-port

- -16 mCMH dans le bassin de Port 2000 et ses accès

Le GPMR et le GPMH surveillent les profondeurs en utilisant des sondeurs bi-fréquence 33 / 210 kHz. Le GPMR ne considère que l'information issue du 33 kHz pour déterminer les interventions des dragues. Cette fréquence ne permet pas de détecter les sédiments dont la concentration est inférieure à 300 g/l (de type crème de vase). Le GPMR détermine donc les cotes d'exploitation du chenal par rapport à des sédiments de concentration supérieure à 300 g/l. Le GPMH utilise quant à lui la fréquence 240 kHz mais les dépôts de crème de vases ne sont que très rarement observés. Les deux ports tolèrent un écart de 30 cm avec la côte consigne. Autrement dit, si la consigne est à -5.30 mCMH, il est possible de trouver des zones à -5 mCMH.

II.4.2.3 Mode opératoire

Les dragage des GPM sont principalement réalisés grâce à des Dragues Aspiratrices en Marche (DAM) (

Figure II.35) Le chargement des dragues s'effectue par aspiration hydraulique via une ou deux élinde. La dépression produite permet d'aspirer une mixture composée de sédiment et d'eau. Le dragage s'effectue à une vitesse réduite de ± 1 m/s. Après son passage l'élinde laisse un sillon d'une profondeur d'environ 0.5 m.

L'essentiel du temps, le GPMR a à sa disposition deux DAM du GIE Dragages-Ports la Daniel Laval (5000 m³) et la Jean Ango (1500 m³) qui peuvent être amenées à travailler 24h/24 et 7j/7. Les opérations de dragages du GPMH sont principalement réalisées par la Gambe d'Amfard (700 m³) et la Samuel de Champlain (8500 m³). La Gambe d'Amfard est présente quasiment toute l'année au GPMH alors que la Samuel de Champlain intervient en moyenne 3 semaines toutes les 10 semaines au GPMH. Il est important de noter que les « grosses porteuses » type Samuel de Champlain effectuent 90 % des dragages du GPMH.



Figure II.35 : Schéma d'une drague aspiratrice en marche à deux élinde (confluence.qpl.nl)

Le dragage est une opération « cyclique » décomposable en 5 phases :

- Remplissage du puits (25 minutes)
- Éventuelle surverse de densification dans le cas des dragages du GPMR (voir plus loin)
- Transport (navigation en charge)
- Clapage (entre 5 à 10 minutes selon la nature des matériaux)
- Retour sur site

Naturellement la durée de ces cycles varie selon la nature des sédiments à draguer, et la localisation des sites de dragage et de clapage. Par exemple, la drague peut effectuer une quinzaine de cycles par

jour si elle ne drague qu'à l'Engainement et ne clappe qu'au Kannik. Dans l'ensemble, ceci implique théoriquement un dragage maximal journalier de l'ordre de 60 000 t/jour de matière sèche clapée sur le site du Kannik. Si les immersions sont réalisées sur Machu, le temps de transport augmente et la capacité maximale journalière diminue (40 000 t/j). Concernant le GPMH, ce chiffre est estimé à 50 000t/j. A noter que ces maxima théoriques ne sont pas représentatifs de l'exploitation moyenne qui est nettement inférieure (d'environ un tiers). (GPMR et GPMH, comm. pers.).

Pour optimiser chaque cycle et maximiser le poids de sédiment transporté, les dragues travaillant pour le GPMR peuvent être amenées à pratiquer ce que l'on appelle la surverse. Cette opération consiste à densifier la mixture eau/sédiment transportée en laissant s'évacuer par surverse les eaux surnageantes du puits de la drague. La surverse provoque une évacuation partielle de la fraction la plus fine de la mixture. L'expérience montre qu'un sédiment fin sera moins sensible à cette opération qui sera, en revanche, plus efficace pour un sédiment plus grossier. Ainsi, par exemple, avec la DAM Daniel Laval, un accroissement de 400 tonnes par chargement peut être obtenu à l'Engainement alors qu'il peut être de 800 tonnes par chargement à la Brèche (GPMR, 2010). Au Havre, les fortes teneurs en fines ne permettent pas de faire de surverses. *Ce processus de second ordre sera négligé par la suite.*

II.4.2.4 Quantités draguées

II.4.2.4.1 Dragages du GPMR à l'embouchure

La majeure partie des dragages effectués par le GPMR est localisée dans l'estuaire aval. Sur ce secteur, qui est subdivisé en 5 zones (Figure II.34) en moyenne 5,2 millions de tonnes par an (Mt/an) sont dragués sur la période 2003-2019 (Figure II.36)

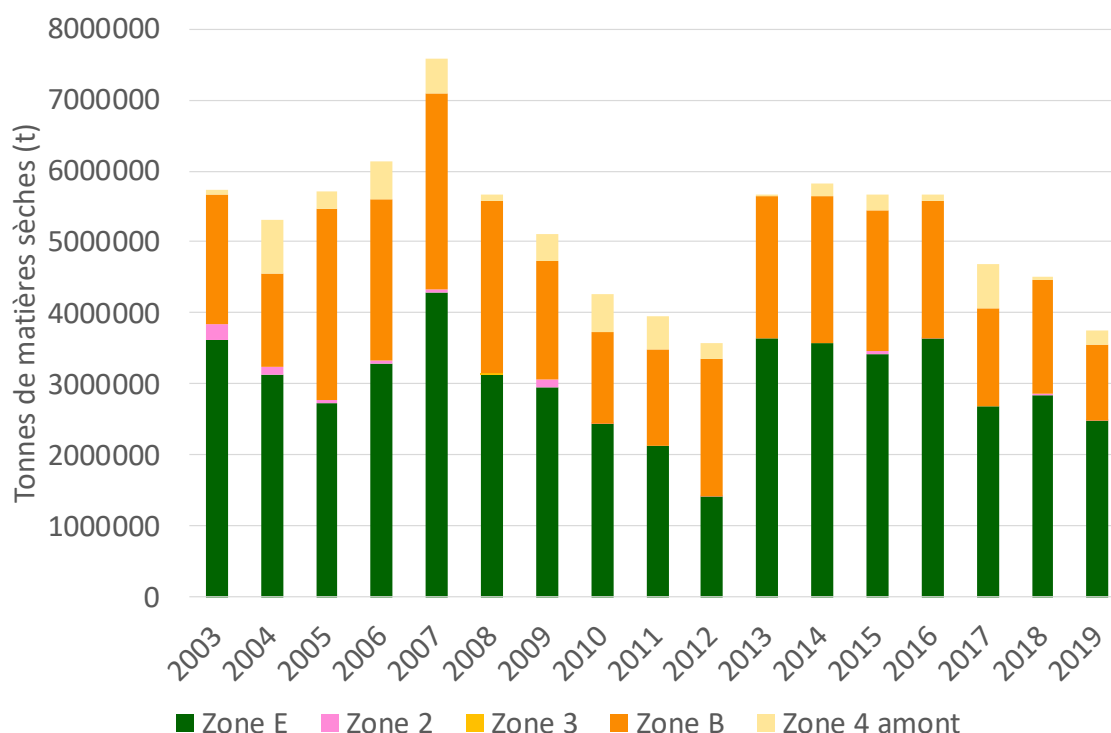


Figure II.36 : Évolution des masses draguées par le GPMR dans le cadre des dragages d'entretien de l'estuaire aval. Les quantités sont exprimées en tonnes de matières sèches (Données GPMR). n.b. à partir de mai 2017 les clapages ne sont plus réalisés sur le site du Kannik mais sur celui de Machu.

Parmi ces 5 zones, les zones E et B correspondant aux lieux dits de l'Engainement et de la Brèche représentent les principaux sites de dragages. Sur la période 2003-2019, 58% des dragages sont

localisés à l'Engainement, 38% au niveau de la brèche et 6% au niveau de la zone 4 amont (Figure II.36).

Selon le port de Rouen, les variations observées sur la Figure II.36 résultent des impacts des aménagements liés à la construction de Port 2000 et des contraintes opérationnelles liées aux dragages. La hausse observée entre 2005 et 2007 serait induite par les réajustements morphologiques consécutifs à la mise en place de Port 2000. La diminution entre 2010 et 2012 s'expliquerait quant à elle par une moindre disponibilité des dragues et par les travaux d'approfondissement (non comptabilisés sur la Figure II.36) qui ont dragué une partie des dépôts durant cette période.

II.4.2.4.2 Dragages du GPMH

Depuis la mise en service de Port 2000, le GPMH drague environ 1,7 Mt/an. En moyenne sur la période 2006-2019, les dragages de Port 2000 représentent près de 60 % des volumes dragués (Figure II.37).

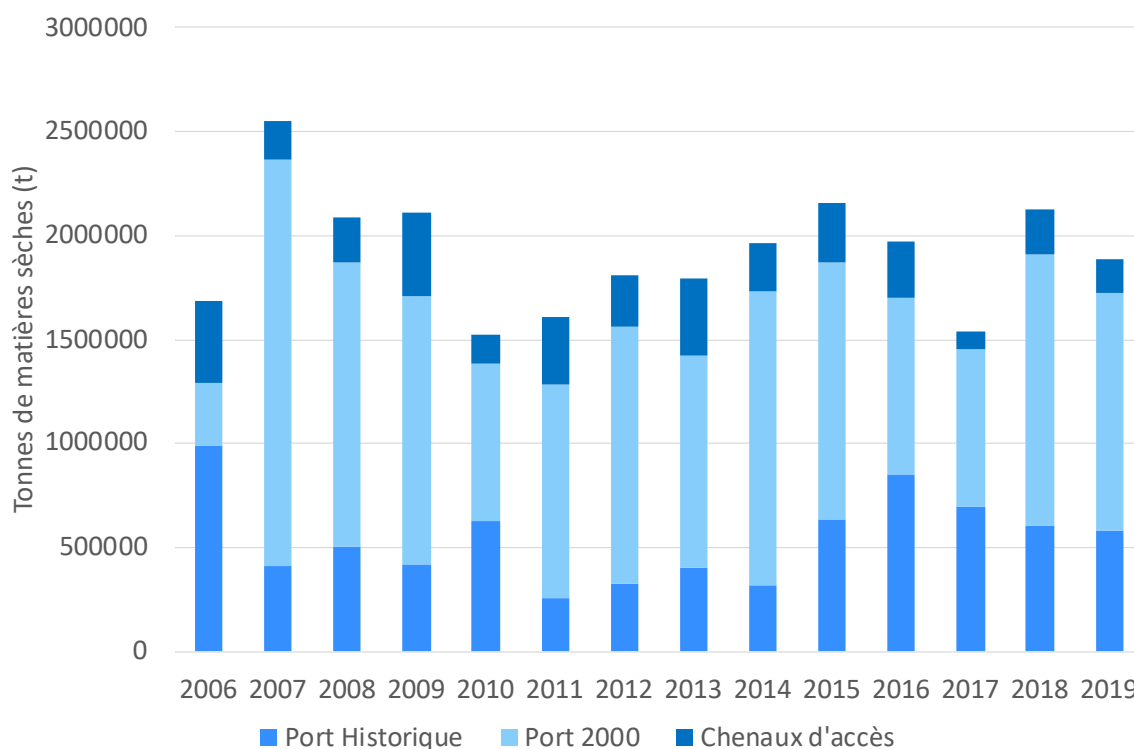


Figure II.37: Évolution des masses draguées par le GPMH dans le cadre des dragages d'entretien. Les quantités sont exprimées en tonnes de matières sèches (Données GPMH)

L'essentiel des dragages effectués par le GPMH est situé dans les chenaux d'accès (Port Ancien et Port 2000) et dans les bassins à marée. La sédimentation est également plus intense dans l'entrée des bassins que dans les parties plus en amont. Le dragage des zones non soumises à marée est négligeable (Figure II.38).

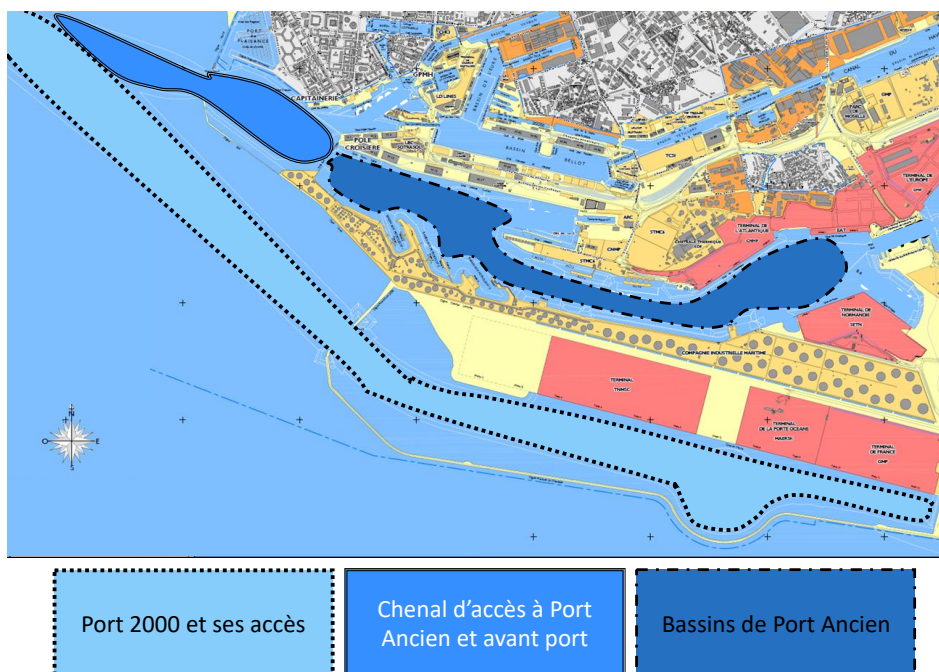


Figure II.38 : Localisation des différents secteurs dragués du GPMH (GPMH, 2014)

II.4.2.5 Variabilité des besoins en dragages

D'une manière générale, les chroniques de masses draguées à l'embouchure ne montrent pas de relation avec les forçages (débits et vagues). De fait, les variabilités observées sur ces chroniques sont principalement induites par les capacités et disponibilités des dragues (Figure II.39). En effet, la puissance de dragage ne permet pas de maintenir la cote en permanence sur l'ensemble du linéaire. Par exemple en crue les dragages du GPMR sont en retard à l'engainement, tandis qu'en étiage ils sont en retard à la Brèche. Le critère utilisé par le port de Rouen pour définir la localisation des travaux de dragage est d'intervenir sur "le site présentant la cote la plus dégradée" ; autrement dit les dragages sont prioritairement réalisés dans les secteurs présentant le désaccord le plus important avec la cote consigne.

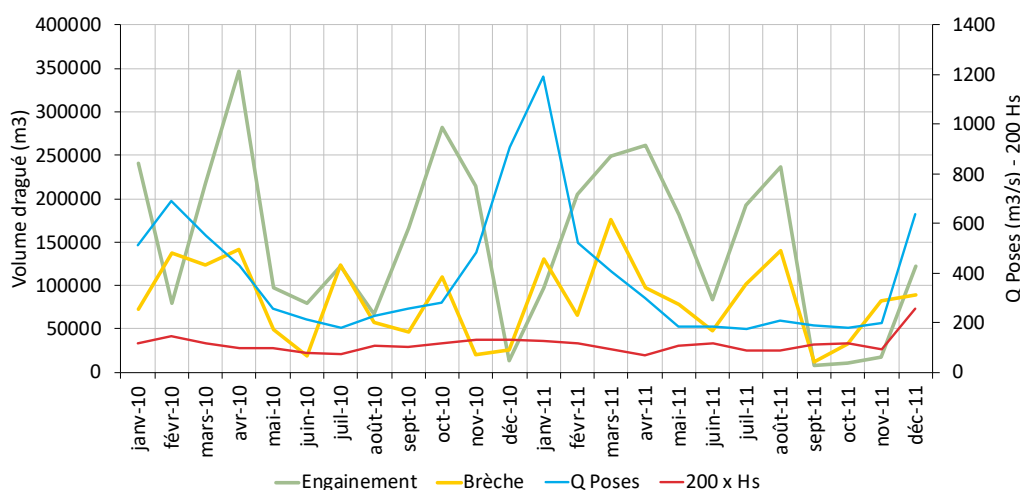


Figure II.39 : a) Exemple d'évolution des volumes dragués à la Brèche et à l'Engainement de janvier 2010 à décembre 2011 (rapport de suivi des activités de clapage et dragage de sédiments de l'estuaire aval du GPMR, années 2010 et 2011) (GPMR comm. pers.)

II.4.2.6 Granulométrie des sédiments dragués

A l'échelle de l'embouchure, la granulométrie des sédiments dragués par le GPMR semble relativement stable avec en moyenne sur la période 2005-2011 66 % de vase, 27 % de sablon et 6 % de sable fin. La granulométrie des sédiments prélevés dans le puits des dragues sur les sites de l'Engainement et de la Brèche a été suivie par le GPMR (Figure II.40):

- Les sédiments de l'Engainement sont constitués, pour majeure partie, de vase et de sables très fins (particules < 125 µm), le reste étant constitué de sables fins. La répartition moyenne est la suivante : 60 % de vase (diamètre < 50 µm), 20 % de sables très fins et de sablons (diamètres compris entre 50 et 125 µm) et 20 % de sables fins (diamètres compris entre 125 et 250 µm).
- A la Brèche, les sédiments sont généralement plus grenus et la proportion de vase est plus variable, de 2 % à 80 %. La granulométrie moyenne des sédiments est la suivante : vase : 45 %, sable très fins : 20 %, sables fins : 25 %, sables moyens (diamètre compris entre 250 et 500 µm) : 10 %.

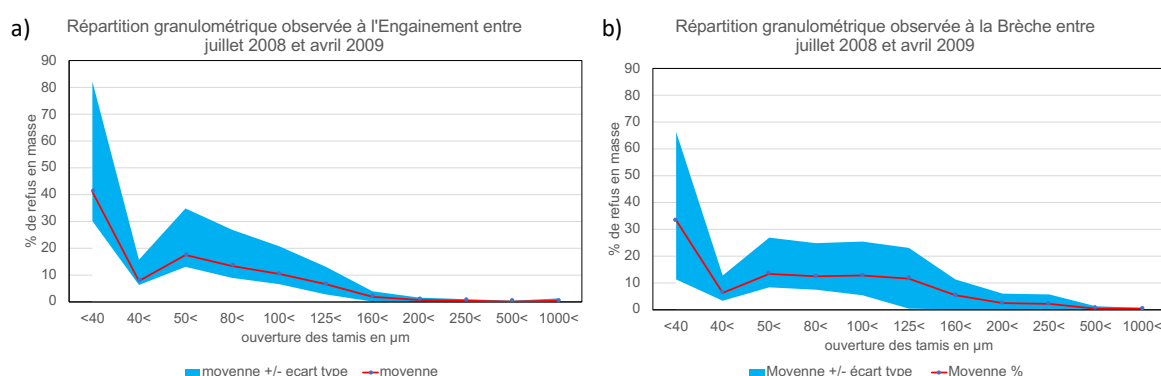


Figure II.40: Granulométrie moyenne des sédiments des zones de l'Engainement et de la Brèche en 2014 (GPMR, 2015)

Les sédiments dragués par le GPMH sont très vaseux. Les mesures réalisées sur la période 2006-2015 montrent que les sédiments dragués contiennent 88% de vases, environ 10% de sables et 2% de graviers (GPMH, 2014, ARTELIA, 2016)

II.4.3 Immersions en mer

La grande majorité des sédiments dragués à l'embouchure par les ports de Rouen et du Havre est immergée en mer. Cette phase de vidange du ou des puits de dragues s'effectue par l'ouverture du fond (soit par ouverture de la coque fendable du navire soit par des soupapes situées sur le fond de la coque, selon la conception de la drague). Cette opération est généralement réalisée pendant que la drague est en mouvement, afin de profiter de la dépression sous le navire qui génère une rapide descente des matériaux vers le fond et d'étaler le panache de particules fines. En milieu côtier, tel que dans le voisinage des sites de clapage en baie de Seine, la faible hauteur de chute limite l'expansion du nuage turbide (Boutin, 1999).

II.4.3.1 Immersions du GPMR

Depuis 1974, l'immersion des produits de dragage du GPMR est principalement ($\pm 90\%$) réalisée sur le site du Kannik. Depuis 2017, les clapages sont effectués sur le site de Machu. Le taux de stabilité, égal au ratio entre le volume de sédiments clapés restant sur le site et le volume total de sédiments clapés sur le site, est en moyenne de l'ordre de 60% au Kannik, avec des variations interannuelles liées

principalement à la variabilité des conditions d'agitation à l'embouchure (50 % l'hiver / 75 % l'été) (Figure II.41).

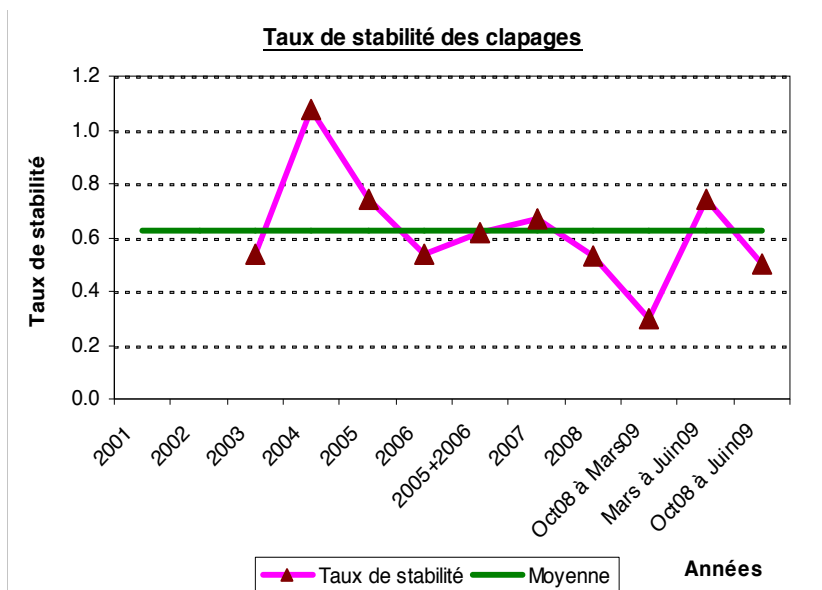


Figure II.41 : Taux de stabilité des sédiments clapés dans la zone du Kannik (GPMR, 2010)

II.4.3.2 Immersions du GPMH

Le terme “casier de clapage” (ou casier) désigne une emprise géographique sur laquelle un port réalise ses immersions ; dans le cas du GPMH il s'agit de zones carrées de 500 m x 500 m découpant le site d'Octeville (Figure II.42).

Jusqu'en 2013, ces derniers étaient concentrés sur un nombre de casiers limité. Les taux de stabilité étaient élevés (de l'ordre de 50 %) et les élévations annuelles par casier assez importantes (jusqu'à 2m). Depuis 2013, le GPMH a revu sa stratégie afin de favoriser la dispersion et limiter les élévations annuelles. Pour chaque campagne de dragage, les dépôts sont répartis chaque jour sur 9 casiers différents. Ces casiers sont différents d'une campagne à une autre. Depuis la mise en œuvre de cette méthode, les taux de stabilité ont largement chuté et avoisinent les 10%. Conjointement, les élévations annuelles sont plus limitées (de l'ordre de 30 cm).

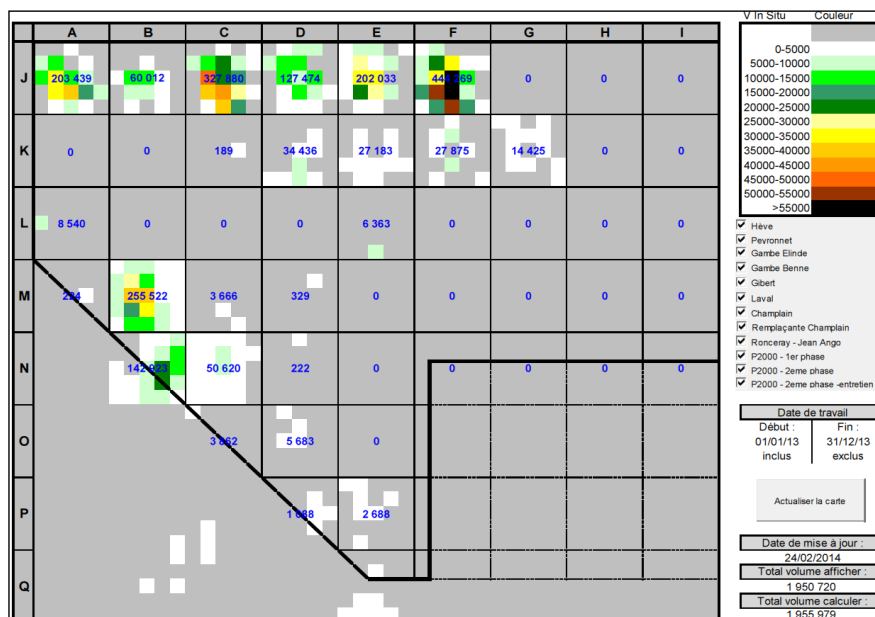


Figure II.42: Représentation des casiers de clapages du GPMH et répartition des volumes clapés (en couleur) (d'après GPMH 2014)

II.5 Importance des dragages dans l'estuaire de la Seine

L'ordre de grandeur des masses draguées dans l'estuaire, en aval de Tancarville (7 Mt/an par les deux ports) apparaît comme étant dix fois supérieur aux apports continentaux (de l'ordre de 700 000 t/an). De plus, à l'échelle journalière, les masses draguées (~ 20 000t) sont comparables à la masse du bouchon vaseux. Les dragages à l'embouchure de la Seine sont donc susceptibles de jouer un rôle important dans le fonctionnement hydro sédimentaire de l'estuaire et en particulier dans la dynamique des MES. Les effets du dragages sur les concentrations en MES et notamment sur le bouchon vaseux seront analysés au chapitre IV.

Les évolutions de l'estuaire et notamment de sa morphologie sont directement liées au bilan sédimentaire de l'estuaire : si les apports sont plus élevés que les exports, l'estuaire se comble ; dans le cas contraire, l'estuaire est en érosion. L'analyse des évolutions morphologiques de l'embouchure sur la période 2015-2010 montre que, sur la période actuelle, le bilan sédimentaire de l'estuaire apparaît comme étant quasiment à l'équilibre, avec un faible volume érodé de seulement 40 000 m³/an en moyenne. Ce pseudo équilibre morphologique est cependant associé à des évolutions morphologiques relativement intenses : en effet les volumes des secteurs en accrétion et des secteurs en érosion sont annuellement de l'ordre de 6 Mm³/an chacun (Figure II.43). Ces 6 millions de m³ s'avèrent par ailleurs équivalents à la somme des volumes dragués par les ports (Lemoine et al., 2016).

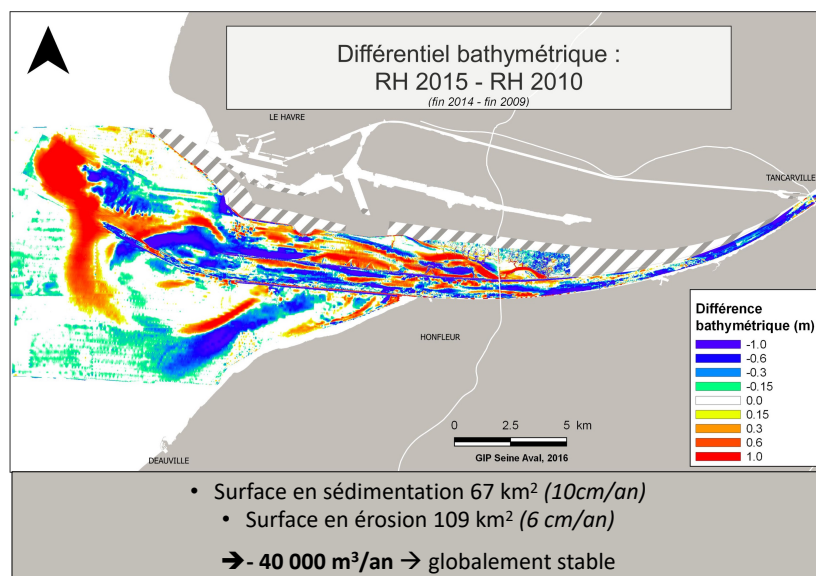


Figure II.43: Différentiel bathymétrique 2015-2010 à l'embouchure de la Seine et quantification des surfaces/volumes en dépôt et érosion (d'après Lemoine et al., 2016)

Finalement, ce constat révèle l'actualité des conclusions formulées par Avoine (1995) : "...L'influence des dragages d'entretien du chenal de navigation, d'un volume annuel moyen de 4 à 5 millions de m³, n'est sans doute pas négligeable sur la sédimentation et les bilans sédimentaires dans l'estuaire. Toutefois, on ne dispose pas à l'heure actuelle de données précises sur l'impact des rejets, en dehors de l'exhaussement des fonds qu'ils induisent dans l'embouchure..."

Les dragages d'entretien pratiqués par le GPMR et le GPMH sont donc du même ordre de grandeur que les érosions nettes et les dépôts nets constatés en différents secteurs de l'embouchure. La question du rôle des dragages en tant que flux sédimentaires anthropiques dans le bilan sédimentaire de l'estuaire reste entière, et sera discutée dans le chapitre IV à l'aide des résultats de la modélisation mise en œuvre pour l'étude des dragages, qui sera quant à elle présentée au chapitre III.

Chapitre III : Modélisation des dragages et analyse de leurs variabilités

Plan du chapitre :

III.1	Variabilités attendues des dragages	75
III.2	Modèle de simulation des dragages	76
III.2.1	Module de dragage	76
III.2.2	Ajustement et calibration du modèle : couplage des longueurs de rugosité	79
III.3	Validation du modèle	81
III.3.1	Hydrodynamique	81
III.3.2	Dynamique des MES	83
III.3.3	Évolutions morphologiques à l'embouchure	87
III.4	Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing	92
III.4.1	Introduction	93
III.4.2	The Seine Estuary and connected ports	95
III.4.3	Material and methods : The hydro-morpho-sedimentary model of the Seine Estuary	96
III.4.4	Dredging variabilities and relations with hydro-meteorological forcing	103
III.4.5	Discussion	115
III.4.6	Conclusions	118
III.5	Rappel des conclusions du III.4	120



III.1 Variabilités attendues des dragages

Les caractéristiques hydro-morpho-sédimentaires de l'estuaire présentent de fortes variabilités en réponse aux forçages hydrométéorologiques (Chapitre II). Ces variabilités sont observables à la fois dans l'eau et dans le sédiment. Le bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine, dont la dynamique est régie par la marée, les apports en eau douce et les tempêtes, présente ainsi une dynamique complexe, caractéristique du fonctionnement estuarien. Sa masse, sa position et son étendue varient donc selon différentes échelles temporelles (e.g. Grasso 2018). A l'échelle de l'estuaire, la dynamique des fonds, en termes d'évolutions bathymétriques ou de faciès sédimentaires, est plus lente mais présente également des cyclicités allant de l'échelle tidale à pluriannuelle (Deloffre, 2005 ; Lesourd, 2000). De manière générale, le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire des différents secteurs de l'estuaire présente des cyclicités :

- i) Semi-diurnes, induites par la variabilité des courants tidaux,
- ii) Bimensuelles selon les cycles vive-eau/morte-eau et leurs effets sur l'amplitude de marée,
- iii) Saisonnière, selon la variabilité annuelle des débits de la Seine et des conditions de tempête à l'embouchure,
- iv) Pluriannuelle, selon les effets des oscillations climatiques sur le climat du bassin versant de la Seine (Massei et al. 2010).

Les impacts de ces cyclicités sur le fonctionnement HMS sont plus ou moins marquées selon les zones de l'estuaire considérées et leurs expositions à ces différents forçages (Guezennec, 1999 ; Deloffre, 2005).

La sédimentation dans les zones naviguées, à l'origine des dragages de maintenance, présente logiquement ces mêmes variabilités spatio-temporelles. Dans le contexte de notre étude, la connaissance de ces variabilités est une étape préalable à l'étude des effets du dragage sur le fonctionnement hydro-sédimentaire du système estuarien. La connaissance de cette variabilité doit en particulier permettre d'identifier les conditions durant lesquelles les dragages et leurs effets sur la dynamique estuarienne sont potentiellement maximaux.

Dans la réalité, la temporalité et l'intensité des dragages varient principalement en fonction de la capacité et de la disponibilité des dragues. Les ports affirment: « *être toujours en retard sur la nature* » ; en d'autres termes, la cote cible n'est que très rarement atteinte sur l'ensemble des zones entretenues et les dragages sont ainsi priorisés selon les critères de sécurité de la navigation. Les données de quantité et de nature des sédiments dragués, mesurées par les dragues, ne peuvent donc pas servir de base à l'analyse de la variabilité des dragages au regard des forçages. L'utilisation d'un modèle numérique, considérant les dragages comme un processus répondant au fonctionnement HMS et à des contraintes morphologiques imposées pour la navigation, permet de s'affranchir de ces contraintes opérationnelles et d'étudier la variabilité des besoins de dragage.

Ce thème est l'objet d'un article soumis pour publication à *Estuarine and Coastal Shelf Science*, intitulé "Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing". Il est entièrement reproduit dans la section III.4. La présentation du modèle et des développements qui lui ont été consacrés est succincte dans cet article ; de plus, la validation du modèle qui y est incluse concerne uniquement la simulation des dragages, et non le modèle en lui-même. Les sections qui suivent portent donc successivement sur ces deux aspects. L'article étant rédigé en anglais, les principales conclusions sont rappelées dans une dernière section du chapitre.

III.2 Modèle de simulation des dragages

III.2.1 Module de dragage

Pour les besoins de notre étude, le module de dragage initialement mis en place par Grasso et al. (2018), sur la base des travaux de Waeles et Le Hir (2006), a été revu afin de simuler de la manière la plus réaliste possible les dragages d'entretien de l'estuaire de la Seine.

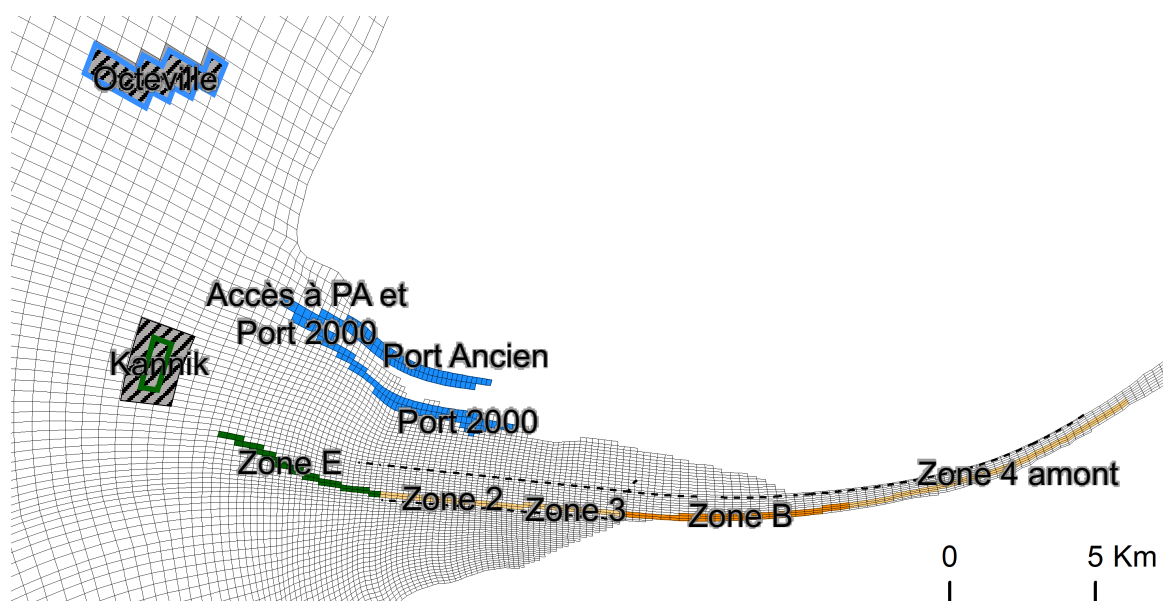
L'article soumis à ECSS (cf. § III.4) présente l'ensemble du modèle hydro-morpho-sédimentaire utilisé pour notre étude ; néanmoins la présente section propose une description plus détaillée et en français du module de dragage.

Afin de caractériser les effets du dragage sur le fonctionnement du système, il est impératif que dans le modèle, comme dans la réalité, les dragages soient conditionnés par les évolutions de la bathymétrie. En effet, dans certaines modélisations, le dragage est "forcé" temporellement et/ou quantitativement (e.g. Maerker and Malcherek, 2010 ; Van Maren, 2015) : ce type d'approche n'est pas adapté dans notre cas car il ne permet d'étudier, ni les effets des forçages ni les effets d'un changement de stratégie de dragage ou de clapage sur le dragage lui-même. Dans certaines études, dragages et clapages sont dé-corrélés (e.g. Van Kessel, 2015 dans l'estuaire de l'Escaut ; Walther, 2015 en estuaire de Seine). Les quantités clapées sont imposées et ne correspondent pas nécessairement aux quantités implicitement draguées (telles qu'elles peuvent être déduites des excès de dépôt simulés dans les zones où la cote du fond est maintenue) : i/ le modèle "drague" des dépôts simulés dans les zones draguées qu'ils soient supérieurs ou inférieurs aux dragages réalisés *in-situ* (le plus souvent inférieurs) ; ii/ le modèle considère le clapage comme un forçage et les quantités immergées correspondent aux quantités immergées dans la réalité (indépendamment des quantités implicitement draguées dans le modèle). Dans ce cas, le dragage/clapage numérique biaise le bilan sédimentaire du système modélisé. Si les dragages sont supérieurs aux clapages alors le dragage/clapage génère un déficit sédimentaire, et inversement. Cette approximation n'est sans doute pas problématique à court terme ; en revanche, elle peut compromettre les analyses du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire global à moyen terme (5-10 ans).

Dans notre approche, les dragages sont conditionnés par les évolutions morphologiques simulées par le modèle et les masses clapées correspondent exactement aux masses draguées (Figure I.7).

- *Méthode de dragage*

La méthode de dragage numérique proposée par Waeles et Le Hir (2006) permet de prendre en compte le dragage comme un processus sédimentaire initié lorsque la cote du fond n'est plus conforme aux profondeurs maintenues par les ports. Cette méthode avait été codée par Grasso et al. (2018) dans le nouveau modèle de l'estuaire de la Seine qui sera présenté plus loin. En cohérence avec les pratiques des ports de Rouen et du Havre, plusieurs zones de dragages, disposant de leurs propres cotes de dragage (cf. §II.4) ont été définies dans le modèle. Chacune de ces zones dispose de sa propre cote cible (Figure III.1). Par ailleurs, en lien avec la prise en compte des phénomènes de consolidation au sein du modèle sédimentaire et en accord avec les pratiques portuaires, le dragage n'est initié que lorsque la cote du sédiment déjà dense (excluant la vase fluide superficielle), dépasse la cote cible : ce sédiment suffisamment dense est défini comme ayant une concentration totale supérieure à 300 g.l⁻¹.



		Zones	Nombre de mailles	Surface (ha)	Cote cible (m CMH)
Dragage	GPMR	Zone E	50	142,8	5,3
		Zone 2	50	90,1	5,3
		Zone 3	36	64,1	5,3
		Zone B	71	161,2	5,3
		Zone 4 amont	102	204,3	5,3
	GPMH	Port Ancien	54	189	14,5
		Accès PA et avant port	22	136,2	15,5
		Port 2000	62	221,5	16
		Accès Port 2000	26	124,3	16
Clapage	GPMR	Kannik	6 (30)	99,4 (454,5)	x
	GPMH	Octeville	14	579 (579)	x

Figure III.1 : Localisation et caractéristiques des zones de dragage et clapage prises en compte dans le modèle. Les sites de clapages sont entourés en vert et bleu (GPMR & GPMH resp.). Les zones hachurées à proximité des sites de clapages et les chiffres entre parenthèses dans le tableau correspondent aux emprises considérées dans le calcul de stabilité des sites présenté au chapitre IV

En lien avec cette prise en compte de la consolidation dans les dragages, le modèle vérifie la conformité des zones draguées avec les cotes cibles, et donc simule une opération de dragage, à chaque actualisation de la consolidation, soit toutes les 10 minutes. Des tests de sensibilité à la fréquence des dragages (de 10 min à plusieurs jours) ont été réalisés lors de la calibration du modèle : à l'échelle annuelle, les masses draguées ne sont pas sensibles à ce paramètre.

Lorsque des mailles ne respectent pas la cote cible, alors le modèle drague d'une part la couche superficielle non-consolidée (lorsqu'elle existe, et quelle que soit son épaisseur) et d'autre part 50 cm de sédiment consolidé (de manière équivalente à ce que font les dragues) (Figure III.2). Une fois l'ensemble des mailles vérifiées et, si nécessaire, draguées, les masses draguées de chaque classe de sédiment sont alors sommées par zone de dragage. Cette masse draguée est ensuite clapée sur le site d'immersion associé à la zone draguée, au cours du même pas de temps du modèle.

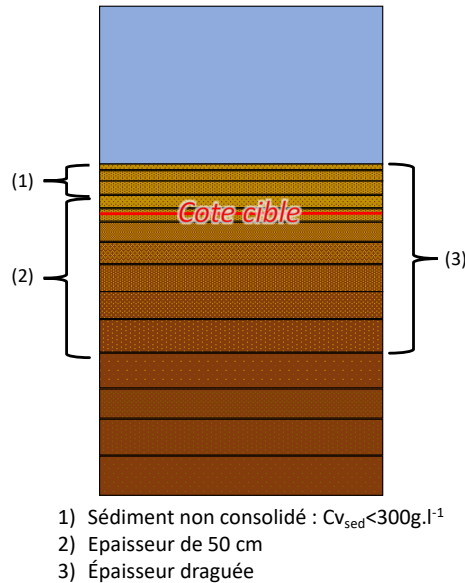


Figure III.2: Illustration de l'épaisseur de sédiment draguée selon les différents couches du modèle sédimentaire

- **Méthode de clapage**

Les sédiments devant être dragués sont retirés de la zone naviguée pour être ensuite injectés dans la colonne d'eau, au niveau du site d'immersion associé à la zone draguée. Dans le calcul de référence, les sédiments dragués dans les zones du GPMR sont immergés au Kannik ; ceux dragués dans les zones du GPMH sont immergés à Octeville (Figure III.1). Dans le modèle, les immersions sont schématiquement réparties uniformément sur toutes les mailles constituant les sites d'immersion, tandis que dans la réalité, l'emprise de chacune des immersions est de l'ordre de l'hectare. Pour les clapages réalisés par le GPMR dans le modèle, les casiers de clapage du Kannik considérés dans notre étude sont définis à partir de 6 mailles soit une surface de 99,4 ha. Pour le Havre, les immersions sont schématiquement réparties sur tous les casiers supérieurs du site, sur 14 mailles soit une surface de 579 ha. Ceci constitue une simplification forte de la réalité. C'est en particulier le cas pour le GPMH où dans la mesure du possible, chaque immersion est réalisée sur un casier de dépôt différent, non voisin du précédent. Les travaux de Boutin (1999) et Nguyen et al. (2012) montrent que lors des clapages réalisés par le fond des dragues (coque fendable ou à soupape de vidange) la chute des matériaux vers le fond est très rapide ; l'essentiel des matériaux sableux est ainsi rapidement retrouvé à proximité du fond tandis que les matériaux vaseux se distribuent dans la partie inférieure de la colonne d'eau. En cohérence avec ces résultats, les sables sont injectés dans la couche la plus proche du fond et les sédiments fins dans les 5 couches d'eau les plus proches du fond (la colonne d'eau est discrétisée en 10 couches de même épaisseur). Ces spécificités seront discutées au IV.3 lors de l'analyse de la dynamique de ces sites.

L'information des masses draguées (et donc clapées) est sauvegardée par classes sédimentaires (vases, sables, et gravier) et zone par zone, à une fréquence définie par l'utilisateur : dans notre cas toutes les deux heures. Cette information permet d'étudier les évolutions temporelles des dragages et notamment de confronter leur intensité aux conditions météo-océaniques.

- **Remarques sur les développements réalisés dans la thèse non valorisés dans le cadre du manuscrit**

La version du module de dragage décrite dans les paragraphes précédents constitue la version de référence utilisée pour tous les résultats présentés dans ce manuscrit (sauf mention contraire).

Des versions plus complexes, plus proches des pratiques réelles, du module de dragage/clapage ont cependant été développées et testées. Ces versions du module permettaient en particulier de gérer individuellement (zone par zone) la fréquence de contrôle et les dragages (notamment en termes de

quantité draguée quotidiennement). Ces développements visaient à reproduire les pratiques réelles et par exemple le fait que le GPMH ne dispose des dragues qu'environ 3 semaines par trimestre. Nous avons également programmé la possibilité de conditionner les immersions aux conditions de profondeurs et de courants, et de les décaler spatialement en cas de conditions non conformes (*exemple* : les clapages au Kannik réalisés sous -7 mCMH, ou encore les immersions en estuaire effectuées en jusant seulement).

Par ailleurs, avec une version du modèle sédimentaire antérieure à celle finalement utilisée, le modèle simulait des dépôts excessifs dans les chenaux d'accès au port du Havre. Afin de limiter cette sédimentation excessive, nous avons ajouté avec succès un terme représentant les augmentations de courant induites par le passage des navires par faibles profondeurs dans le calcul de la tension critique d'érosion. Sur la base de la formulation proposée dans Hoffmans & Verheij (2008), une composante de vitesse supplémentaire reproduisant le renforcement des courants à proximité du fond sous l'effet du passage des hélices des navires était prise en compte dans le calcul de la tension critique d'érosion. Cette formulation très schématique prenait en compte la fréquence et le sens de passage des navires ainsi que les caractéristiques moyennes des navires en termes de tirant d'eau et de taille d'hélice (Galichon, comm. pers.).

Il s'est toutefois avéré que ces raffinements n'amélioraient pas significativement le niveau de validité du modèle (en particulier dans le cas de l'utilisation de la version basée sur Mengual et al., 2020) mais qu'au contraire, l'ajout de variables supplémentaires complexifiait inutilement l'interprétation des résultats. La version simplifiée a été privilégiée pour la présente étude. Ces développements restent néanmoins disponibles et utilisables à l'avenir.

La possibilité de draguer à "l'américaine" a également été codée. Cette technique consiste à rejeter directement hors de la drague les sédiments extraits (potentiellement uniquement en jusant). Des simulations longues ont été réalisées avec cette méthode. Ces dernières tendent à montrer qu'à long terme cette technique est à réserver aux environnements vaseux ou à combiner à d'autres techniques. En effet, dans nos simulations, au bout d'un certain temps (1 à 3 ans selon les zones), les besoins en termes de dragage augmentent de façon irréaliste, en raison du dépôt quasi immédiat des sables, dans la zone même où ils ont été dragués et où il est donc nécessaire de les re-draguer au pas de temps suivant : créant ainsi un emballement (numérique dans notre cas) des besoins de dragages.

III.2.2 Ajustement et calibration du modèle : couplage des longueurs de rugosité

Pour les besoins de notre étude, le modèle MARS3D-MUSTANG couplé au modèle de vagues WWIII développé dans les précédentes phases du programme Seine-Aval a été ajusté afin de reproduire de manière satisfaisante les dragages dans les différents secteurs dragués de l'estuaire de la Seine. Les principaux ajustements réalisés ont concerné l'initialisation sédimentaire et la mise en place d'un couplage hydro-sédimentaire supplémentaire consistant à actualiser les longueurs de rugosité (et le calcul du frottement qui en résulte) en fonction des évolutions sédimentaires. Les caractéristiques de l'initialisation sédimentaire sont indiquées dans la section III.4.

La longueur de rugosité considérée pour le calcul des contraintes de cisaillement sur le fond dans le modèle hydrodynamique est actualisée lors du couplage morpho-dynamique en fonction du diamètre moyen du sédiment superficiel.

$z_{0\text{hydro}}$ est défini en fonction d'une rugosité physique K_s , avec $z_{0\text{hydro}} = K_s/30$, en accord avec les résultats de Nikuradse. Cette rugosité physique doit rendre compte de la rugosité de forme, donc des éventuelles macro-rugosités liées aux rides qui se forment sous l'effet des courants ou des vagues, lorsque le sédiment est non cohésif. Soit H_r et λ la hauteur et la longueur d'onde des rides. S'inspirant des propositions de Nielsen (1992) et Grant & Madsen (1986) (*in* Le Hir, 2008) qui expriment la rugosité en fonction de la hauteur et de la cambrure des rides, on peut écrire :

$$K_s = k \cdot H_r (H_r/\lambda)$$

avec k un coefficient de proportionnalité entre 8 et 30.

On a donc :

$$z_{0\text{hydro}} = K_s/30 = (k/30) \text{ Hr } (\text{Hr}/\lambda)$$

Pour simplifier, et considérant que les rides sont majoritairement générées par les courants de marée dans l'estuaire de la Seine, les caractéristiques des rides sont inspirées des formulations de Yalin (1977) (*in* Le Hir, 2008): $\lambda = 1000 \text{ D}$ et $\text{Hr}/\lambda \approx 0.1$, avec D le diamètre du sable. On en déduit $\text{Hr} = 100 \text{ D}$. Le diamètre représentatif du sédiment superficiel est choisi comme le diamètre moyen du sédiment superficiel calculé sur 1 cm d'épaisseur ($\text{D}_{\text{mean1cm}}$).

Finalement on peut écrire :

$$z_{0\text{hydro}} = (k/30) \text{ Hr } (\text{Hr}/\lambda) = k/3 \cdot \text{D}_{\text{mean1cm}} = \text{CoefZ}_{0\text{coupl}} \cdot \text{D}_{\text{mean1cm}},$$

avec $\text{CoefZ}_{0\text{coupl}}$ une constante comprise entre 2,66 et 10. Dans notre application, $\text{CoefZ}_{0\text{coupl}}$ a été calibré à 3,5. Pour du sable très fin ($\text{D} = 100 \mu\text{m}$) on obtient $z_{0\text{hydro}} = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Si le sédiment superficiel (1cm) contient plus de 30 % de vases, le fond est supposé lisse et l'on retient $z_{0\text{hydro}} = 10^{-4} \text{ m}$.

Ces paramètres et en particulier la valeur de $\text{CoefZ}_{0\text{coupl}}$ ont été définies par itération lors de la phase de calibration du modèle. Les résultats du modèle se sont avérés sensibles à ce couplage. La Figure III.3 illustre les effets de ce paramètre sur les quantités draguées avec l'ancienne version du code sédimentaire (Grasso et al., 2018). Il apparaît que les quantités draguées diminuent quasi linéairement avec Coef_Z0_coup , montrant que plus les courants sont forts (faible frottement), plus les dragages sont importants. Ces résultats ont été intégrés dans le nouveau modèle sédimentaire utilisé par la suite (Mengual et al. 2020).

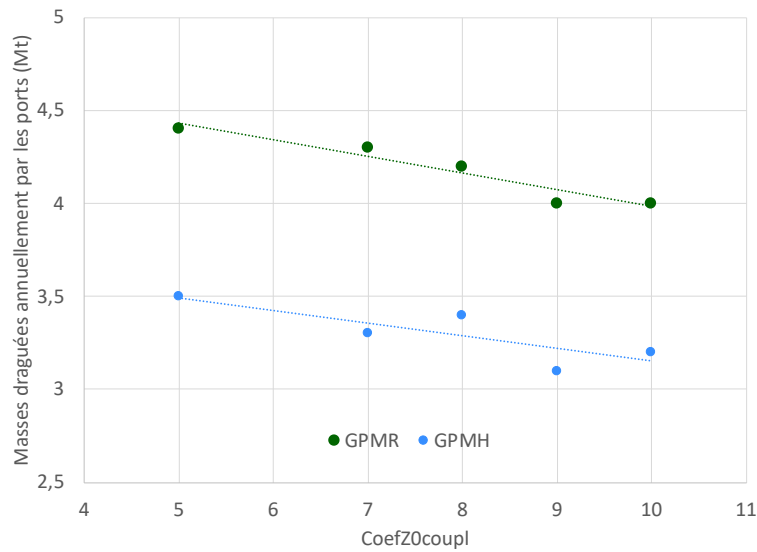


Figure III.3 :Évolution des masses draguées par le GPMR et le GPMH en fonction de la valeur de $\text{CoefZ}_{0\text{coupl}}$. Ces résultats sont issus de simulation réalisées avec une ancienne version du modèle sédimentaire et ne sont pas directement comparables aux résultats présentés dans le reste du manuscrit

La longueur de rugosité $z_{0\text{sed}}$ est utilisée pour évaluer la contrainte de cisaillement de peau qui contrôle les processus sédimentaires d'érosion et de dépôt. Dans la présente version du modèle elle est également réactualisée lors du calcul des contraintes de peau sur le fond, en fonction des évolutions des fonds sédimentaires. Se basant sur une rugosité de peau $K_s = 2 \cdot \text{D}$ pour les sables, $z_{0\text{sed}}$ est donnée par

$$z_{0\text{sed}} = \max(z_{0\text{sedmin}}, \text{D}_{\text{mean surf}}/15)$$

avec $z_{0\text{sedmin}} = 1.10^{-5}$ m et $D_{\text{mean surf}}$ le diamètre moyen du sédiment dans la couche de surface du modèle.

Ces couplages impactent à la fois le calcul des courants par le terme de frottement hydrodynamique, et la simulation des processus sédimentaires par l'évaluation de la contrainte de cisaillement de peau, avec des effets opposés. Un fond rugueux intensifie le frottement hydrodynamique et a tendance à réduire les courants. Au contraire, les contraintes de peau, qui sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant, augmentent sur les fonds rugueux qui présentent un coefficient de frottement fort.

III.3 Validation du modèle

La validation du modèle porte sur la simulation i/ de l'hydrodynamique (hauteurs d'eau, courants et vagues à l'embouchure), ii/ de la dynamique des MES, iii/ des dragages, iv/ des évolutions morphologiques de l'estuaire et enfin v/ de la dynamique des sites d'immersions.

La validation des quantités draguées sera décrite dans la section III.4, tandis que la stabilité simulée des zones de clapage sera discutée dans le chapitre IV.

III.3.1 Hydrodynamique

Notre étude se base sur le modèle hydro-sédimentaire Mars3D-Mustang couplé au modèle de vagues WWIII développé dans le cadre des travaux de l'Ifremer sur l'estuaire de la Seine, en particulier les projets Seine-Aval 4 MODEL (Kervella et al., 2012), Seine-Aval 5 HYMOSED (Grasso et al., 2016) et plus récemment Seine-Aval 6 ARES (Bismuth et al., 2020) et MORPHOSEINE (Grasso et al., 2020).

Pour simplifier, la validation hydrodynamique du modèle est ici représentée par la propagation de la marée dans l'estuaire. La Figure III.4 présente les hauteurs d'eau simulées par le modèle et mesurées par le GPMR. Les données modélisées sont sauvegardées à une fréquence de 2h (pour nos besoins vis-à-vis des dragages), alors que les mesures sont réalisées toutes les 5 minutes, ce qui altère légèrement la comparaison sans empêcher de voir les tendances. Les hauteurs d'eau simulées par le modèle sont satisfaisantes, en particulier dans le secteur amont en fin de propagation, mais les niveaux de basse mer sont sous-estimés à Fatouville Tancarville, et Caudebec. Il est important de souligner que ce niveau de validation est obtenu avec le couplage des longueurs de rugosité décrit précédemment. Or ce dernier a été calibré avec un objectif morpho-sédimentaire : la reproduction des masses draguées et des évolutions morphologiques dans tout le secteur d'embouchure. Une réduction des frottements sur le tronçon Tancarville-Caudebec permettrait vraisemblablement de restituer de meilleurs niveaux de basse mer dans ce secteur.

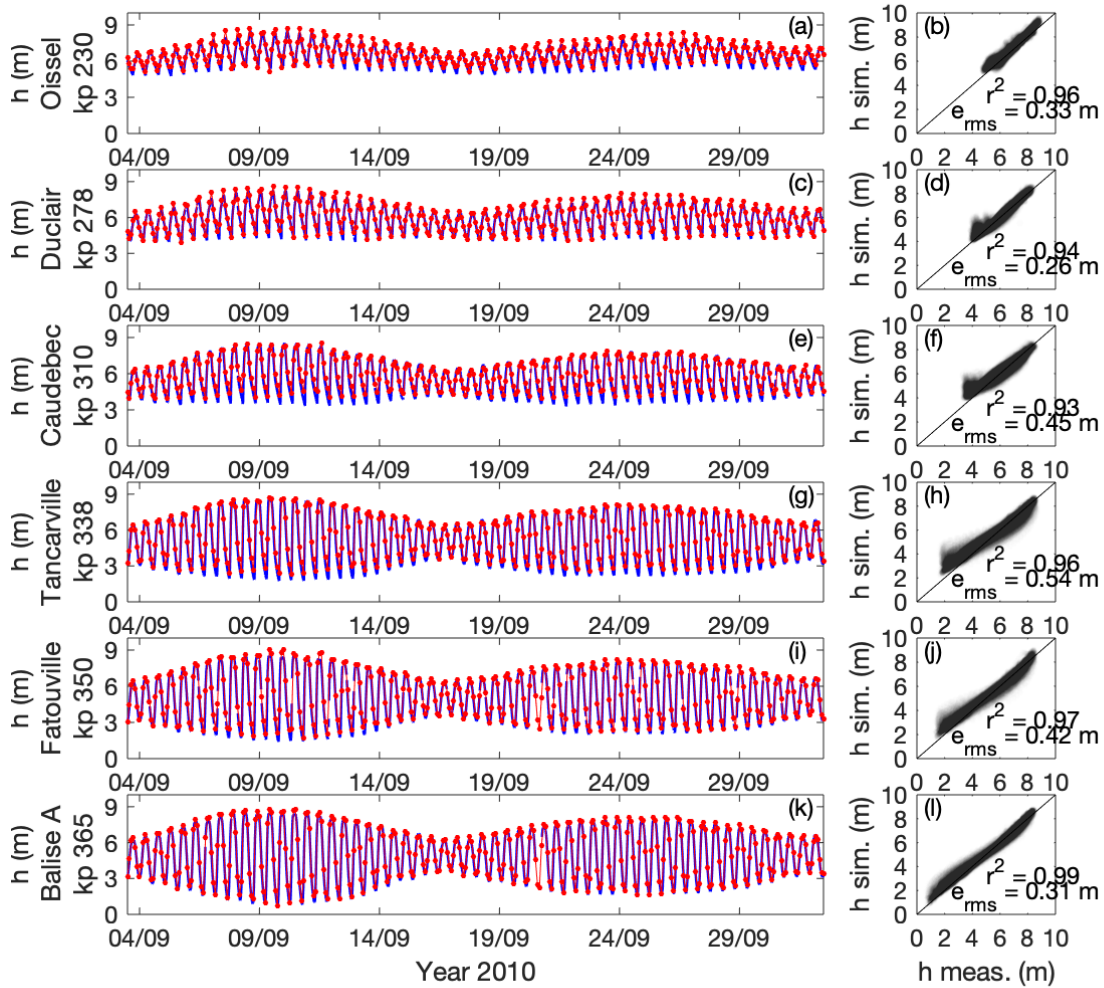


Figure III.4 : Hauteurs d'eau simulées (en rouge) et mesurées (en bleu) du 14 au 22 septembre 2010 sur les sites de Oissel (a,b), Duclair (c,d), Caudebec en Caux (e,f), Tancarville (g,h), Fatouville (i,j) et balise A (k,l). à gauche : évolutions temporelles ; à droite Hauteurs d'eau simulées versus hauteurs mesurées avec le coefficient de détermination r^2 et l'erreur quadratique moyenne e_{rms} . Les points rouges représentent les sorties du modèles ($dt=2h$)

Le couplage MARS3D-MUSTANG avec WWIII a été mis en place dans le cadre du projet Seine-Aval MORPHOSEINE. La Figure III.5 issue de ce projet présente la comparaison entre les vagues simulées et modélisées au niveau du banc des Ratelets durant le mois de septembre 2010. Dans l'ensemble le niveau de validation du modèle WWIII est jugé très satisfaisant.

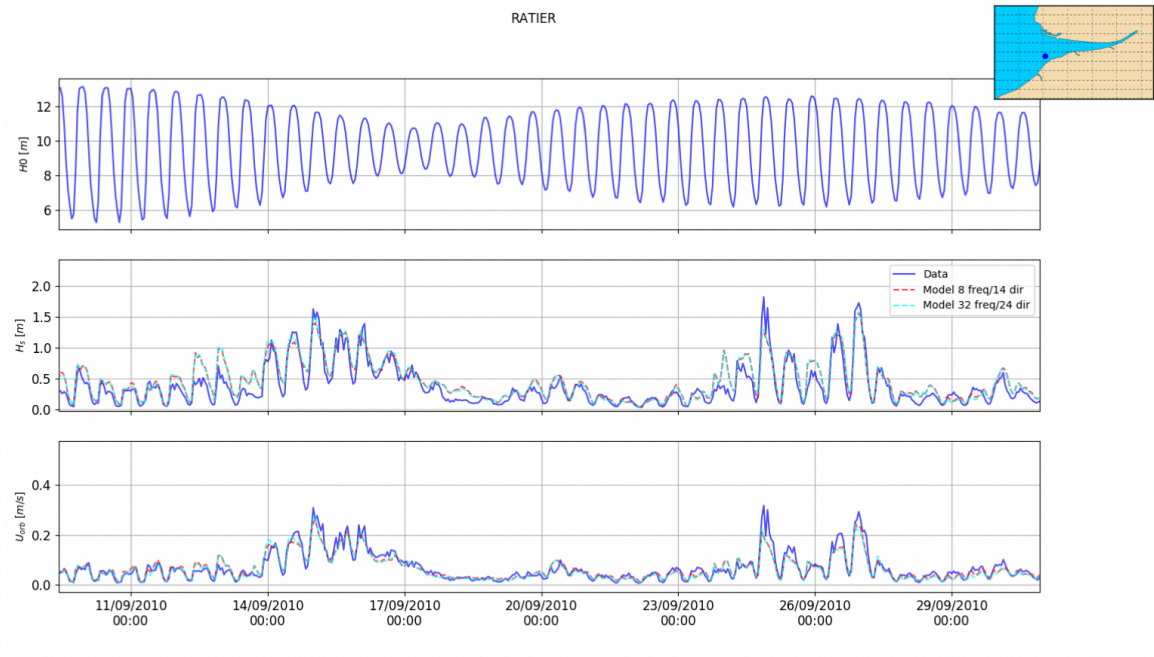


Figure III.5 : Comparaison entre vagues calculées et vagues observées (Hauteur significative H_s et vitesse orbitale U_{orb}) à l'ouest du banc du Ratier (Ratelets) (d'après Mengual, 2018)

III.3.2 Dynamique des MES

En relation avec le projet Seine-Aval MorphoSeine, les capacités du modèle à simuler le comportement des sédiments en suspension ont été évaluées. Les résultats de notre configuration de référence ont été confrontés avec les données mesurées sur les stations SYNAPSES de fond de Fatouville, Tancarville et Balise A (Lemoine et al., 2013). La Figure III.6 compare ainsi les concentrations médianes par cycle de marée en MES observées au fond par SYNAPSES (à une fréquence de 5 min) et simulées par le modèle (à une fréquence de 120 min) sur l'année hydrologique 2014/2015. Les données de turbidités du réseau SYNAPSES ont été transformées en MES sur la base des résultats de Druine et al. (2018). Les données du modèle ont été moyennées sur 5x5 mailles afin de filtrer la variabilité spatiale potentiellement induite par la résolution du modèle à proximité des berges (Grasso et al., 2018). A l'échelle annuelle cette comparaison montre que le modèle sous-estime fortement les concentrations médianes par marée des MES, cette sous-estimation entraine un biais normalisé pouvant atteindre 60% sur les sites de Fatouville et Tancarville (Grasso et al., 2020).

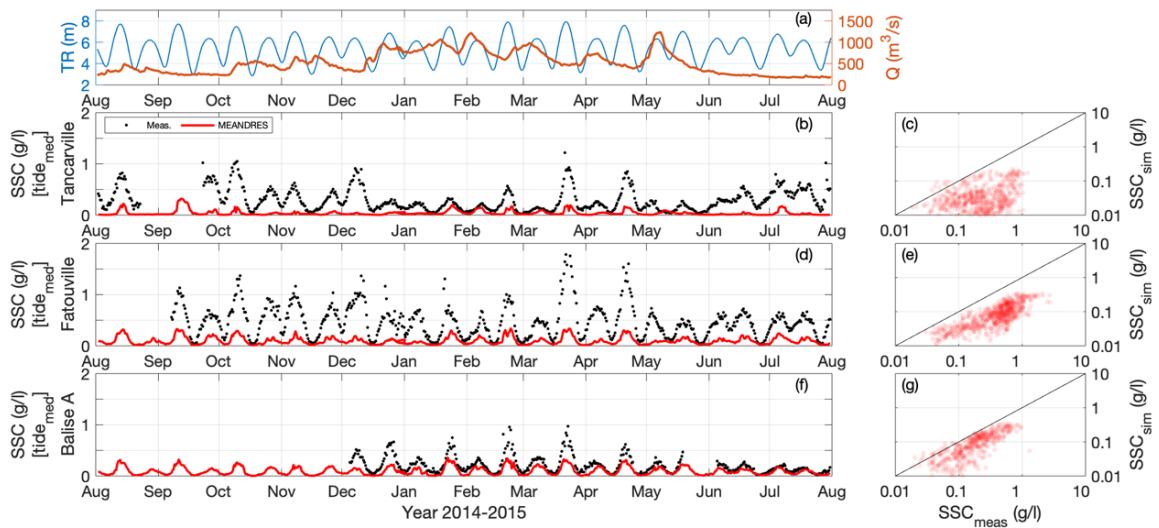


Figure III.6: (a) Marnage (TR) au Havre (bleu) et débit de la Seine (Q) à Poses (orange). Concentrations médianes en MES (SSC) par cycle de marée d'août 2014 à août 2015, aux stations de Tancarville (b, c), Fatouville (d, e) et Balise A (f, g). (b, d, f) : séries temporelles mesurées (noir) et simulées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

Il convient de porter un regard critique sur cette comparaison entre le modèle et les mesures des stations SYNAPSES au fond. La Figure III.7 donne une image plus fine des concentrations au cours d'un cycle de marée. Sur ces figures, des mesures réalisées depuis le Cote de la Manche (Verney et al., *comm pers.*) simultanément aux mesures SYNAPSES mais de l'autre côté du chenal de navigation permettent d'évaluer la représentativité limitée des stations SYNAPSES pour décrire les concentrations et les flux transitant dans le chenal.

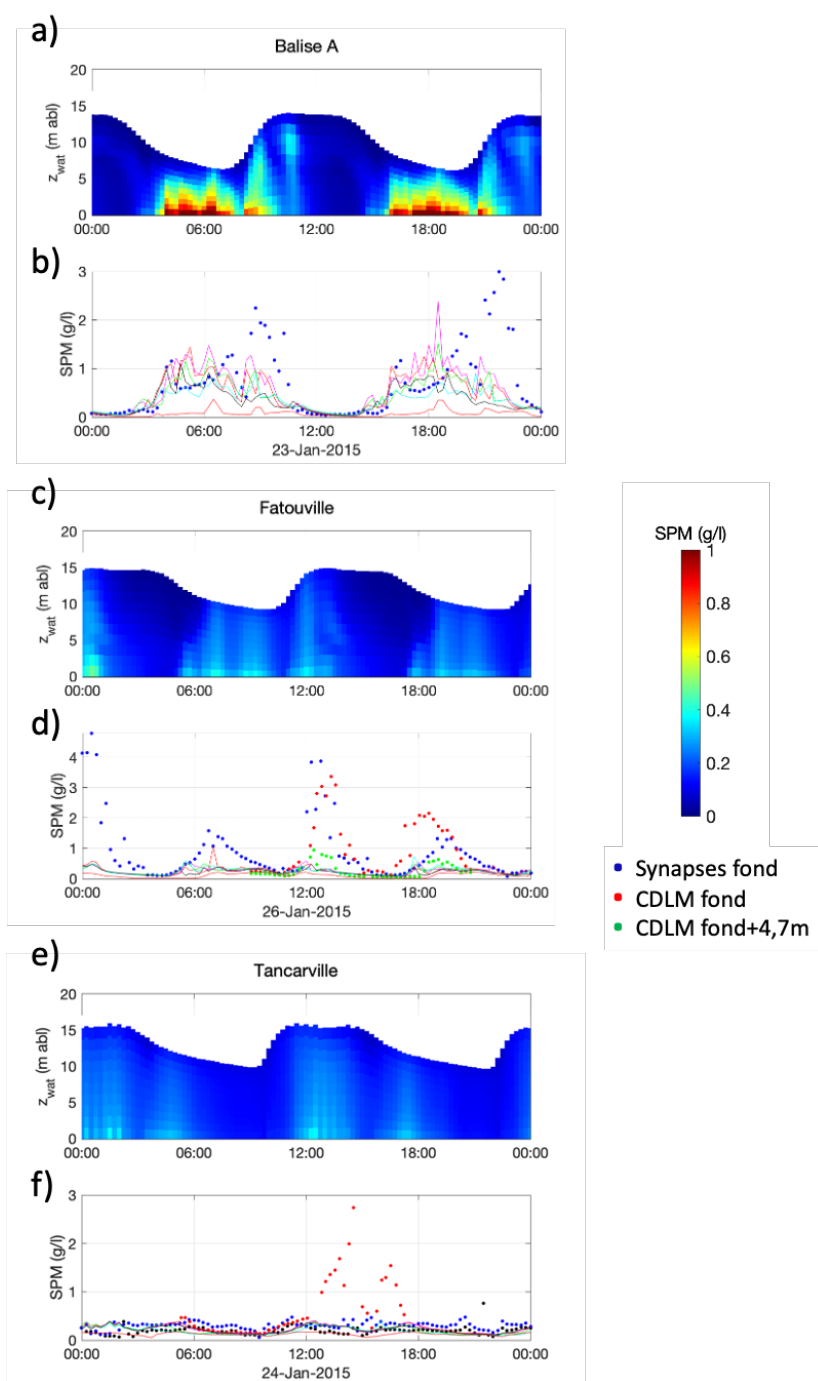


Figure III.7 : Évolution des concentrations en MES simulées sur l'ensemble de la colonne d'eau (a, c, e) et comparaison des concentrations en MES simulées à 1m au-dessus du fond à proximité des stations de mesures (plusieurs lignes continues en couleur, correspondant à des mailles voisines selon une direction transverse au chenal) avec les mesures réalisées par le réseau de mesures SYNAPSES (bleu) et dans le cadre des campagnes océanographiques à bord du Cote de la Manche (CDLM) (vert et rouge (b, d, f)) pour les stations Balise A (a, b), Fatouville (c, d) et Tancarville (e, f)

Au niveau de la station balise A, la Figure III.7.a montre que les valeurs modélisées et mesurées sont cohérentes, à l'exception des phases de flot où le modèle sous-estime les concentrations en MES. A Fatouville (Figure III.8.b), le modèle sous-estime les pics de flot et de jusant, que les mesures révèlent contrastés de part et d'autre du chenal de navigation. En dehors des périodes de pic, le niveau de turbidité simulé se situe bien dans la gamme des mesures de la station SYNAPSES ou acquises depuis

le Cote de la manche (CDLM). Ces dernières montrent d'ailleurs que le maximum de turbidité s'atténue fortement à distance du fond (différence entre mesures à 1 m et à 4.7 m du fond). Au niveau de Tancarville (Figure III.7.c), à l'exception des concentrations très élevées observées uniquement au fond depuis le CDLM en fin d'été de pleine mer, modèle et mesure sont cohérents. Cette augmentation assez marquée, mesurée uniquement au fond par le CDLM, mais non perçue par SYNAPSES correspond vraisemblablement à la limite amont du bouchon vaseux ce jour-là (occurrence en fin de pleine mer), apparemment localisée au sein de la section transversale.

Dans l'ensemble les Figure III.6 et Figure III.7 mettent en avant une sous-estimation des MES simulées par le modèle. La Figure III.7 montre qu'à l'échelle de la marée cette sous-estimation n'est pas continue ; à l'aval il semblerait que le modèle sous-estime la remise en suspension induite par le flot, tandis qu'à Tancarville le modèle ne semble pas voir les remontées extrêmes du bouchon vaseux. La Figure III.8 illustre l'échelle des variabilités spatiales naturelles pouvant impacter la représentativité des mesures *in-situ*. Ce type de variabilité, non reproductible avec la résolution de notre maillage, peut biaiser les comparaisons modèles/mesures, et conduire à une sous-estimation des concentrations simulées par rapport à celles mesurées.



Figure III.8: Image satellite de la station SYNAPSES Fatouville prise le 22 août 2015 illustrant la présence d'un panache turbide (Google Earth)

Afin d'évaluer la capacité du modèle à simuler la dynamique des MES à moyen terme et à l'échelle de l'embouchure, les variations de la masse et de la position du bouchon vaseux ont été étudiées sur la période 2009-2018 (Figure III.17 de l'article, section III.4). En cohérence avec Grasso et al. (2018), 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 III.14 au § III.4). Le modèle présente une très bonne capacité à simuler et maintenir le bouchon vaseux sur 10 ans, attestant de la robustesse de la simulation morpho-dynamique. La dynamique du bouchon vaseux répond au forçage tidal de manière similaire aux résultats du projet HYMOSED (Grasso et al., 2018). Cependant, la masse moyenne du bouchon vaseux (40 kt) est sous-estimée d'environ 40 % dans notre simulation par rapport à la simulation de Grasso et al., (2018) (68 kt), en cohérence avec la sous-estimation des MES observées à Fatouville et Tancarville (Figure III.6). Par ailleurs, la position du bouchon vaseux définie comme le centre de gravité de ce dernier est centré sur le pk 357, soit un peu en aval de la position indiquée par Grasso et al. (2018), tout en présentant des variations très analogues. L'écart peut provenir de notre méthode d'estimation de la position du bouchon vaseux, différente de celle de Grasso et al. (2018) : cette dernière passe par une étape intermédiaire qui reconstitue un transect longitudinal des moyennes transversales des concentrations en MES, avant d'en rechercher le centre de gravité. Notre approche donne plus d'importance aux masses situées à l'aval de l'estuaire où les largeurs du chenal entre les digues sont plus grandes. Il en résulte une position du centre de gravité plus aval qu'en considérant des moyennes transversales des concentrations en MES.

III.3.3 Évolutions morphologiques à l'embouchure

Afin de valider les capacités du modèle à étudier les effets des dragages sur la dynamique du système, et en particulier sur la morphologie de l'estuaire, les évolutions morphologiques simulées sur la période 2009-2016 ont été comparées aux évolutions morphologiques mesurées par le GPMR (Figure III.9, d'après Grasso et al., 2020), en traçant le différentiel bathymétrique au cours de cette période de 8 ans.

Les observations ainsi que la simulation montrent (se reporter à la carte volante de situation des noms de lieux en estuaire de Seine) :

- des dépôts de sédiment à proximité de la zone d'immersion du Kannik,
- une légère érosion du banc d'Amfard
- l'accrétion des zones intertidales inférieures de la fosse nord (banc de la Passe et vasière nord),
- une érosion relativement importante du secteur situé entre les digues submersibles et allant de l'Engainement à Tancarville
- une légère accrétion au niveau du banc du Ratier
- une érosion de la fosse sud amont

Dans l'ensemble, ces évolutions bathymétriques semblent qualitativement bien simulées par le modèle. Néanmoins, il semble que ce dernier surestime l'érosion dans le chenal principal en aval de la Brèche. En amont de la Risle le modèle ne simule pas d'érosion alors que celle-ci est constatée dans la réalité. Par ailleurs le modèle restitue mal la progradation du banc du Ratier au niveau des Ratelets (flanc ouest du banc).

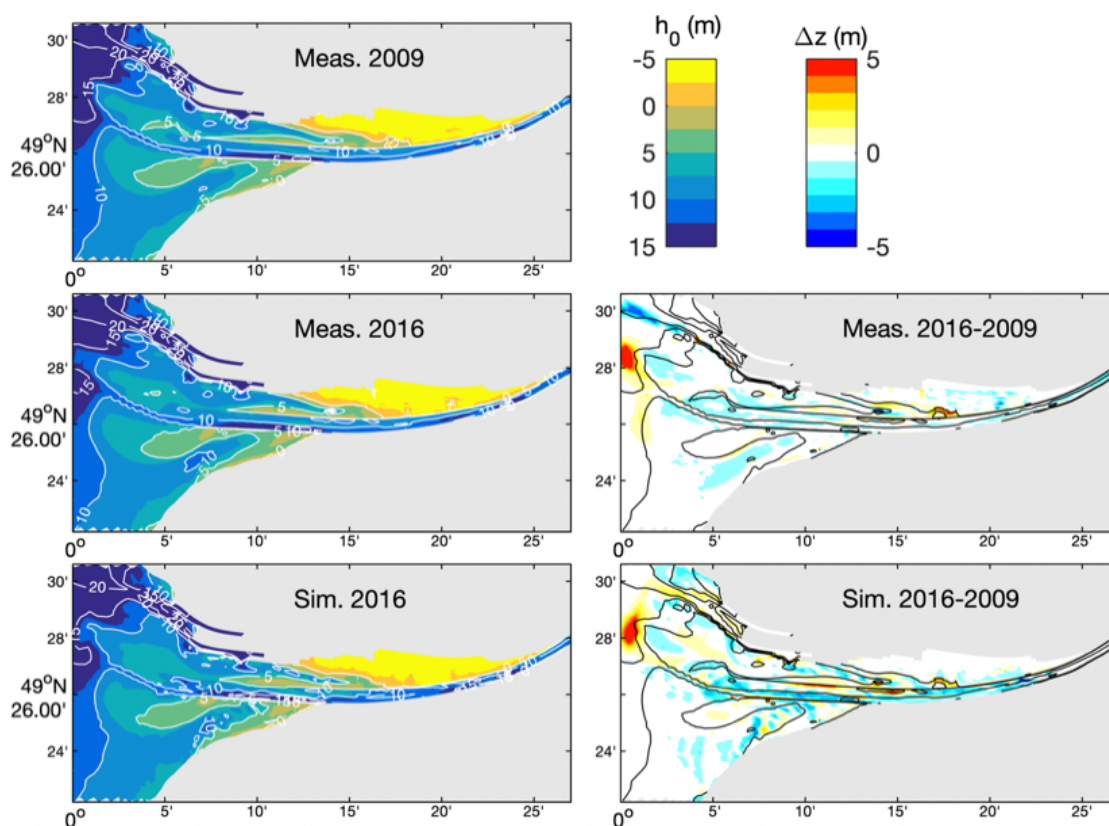


Figure III.9: Évolution morphologique de l'estuaire aval entre 2009 et 2016. A Gauche : Bathymétries h_0 (cote relative au niveau moyen de la mer); à droite : différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés (d'après Grasso et al, 2020)

- *Évolution temporelle des cubatures de l'estuaire*

La validation a également été réalisée en confrontant les évolutions bathymétriques *in-situ* et modélisées, intégrées sous forme de variations de volumes sédimentaires (cubatures) en 10 zones de l'estuaire (Figure III.10). La Figure III.11 représente l'évolution au cours du temps (t) des volumes sédimentaires (V) intégrés en chacune des 10 zones (z) représentées, à partir des volumes de référence calculés en 2009 (i.e. $V(z,t) - V(z,t=2009)$). Les mesures, déduites d'observations bathymétriques sous SIG (Walther et al., 2015) 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, en raison de l'incertitude sur les mesures bathymétriques estimée à ± 10 cm (Grasso et al., 2020).

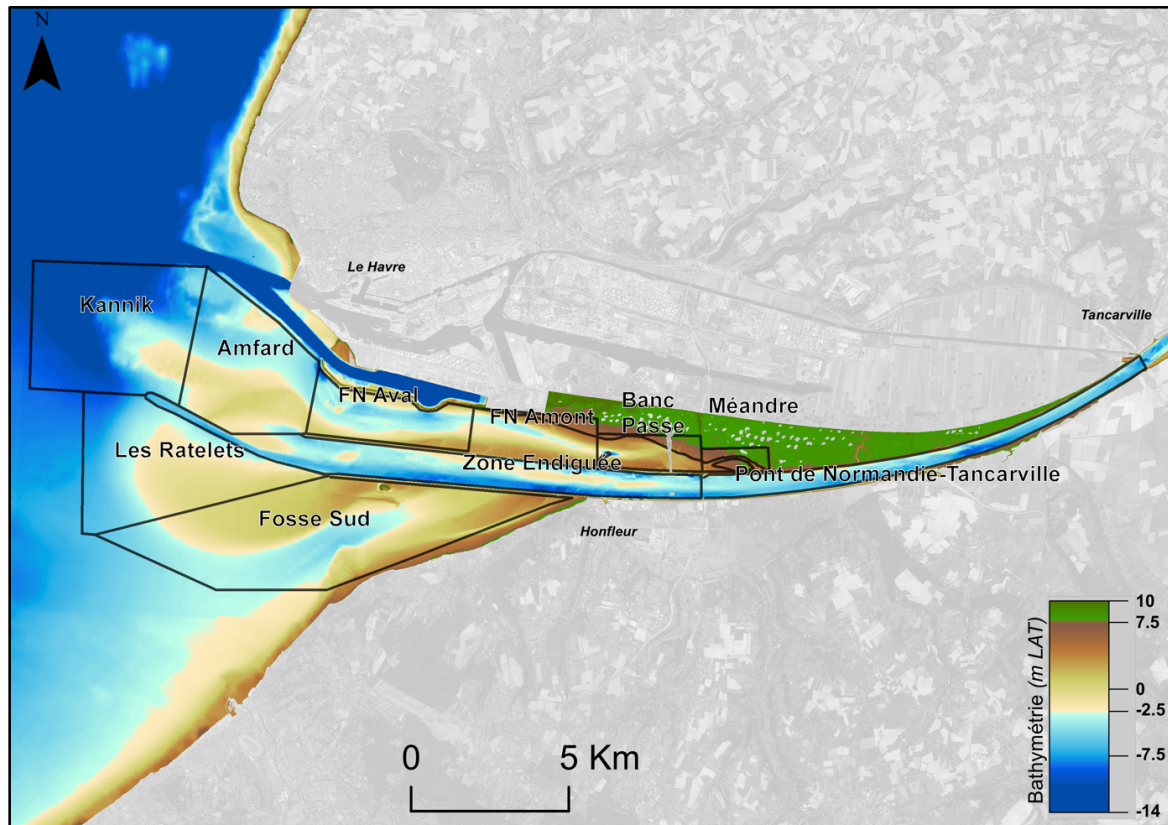


Figure III.10 : Emprises des zones de cubatures considérées dans la Figure III.11 (d'après Walther et al., 2015). FN : fosse nord

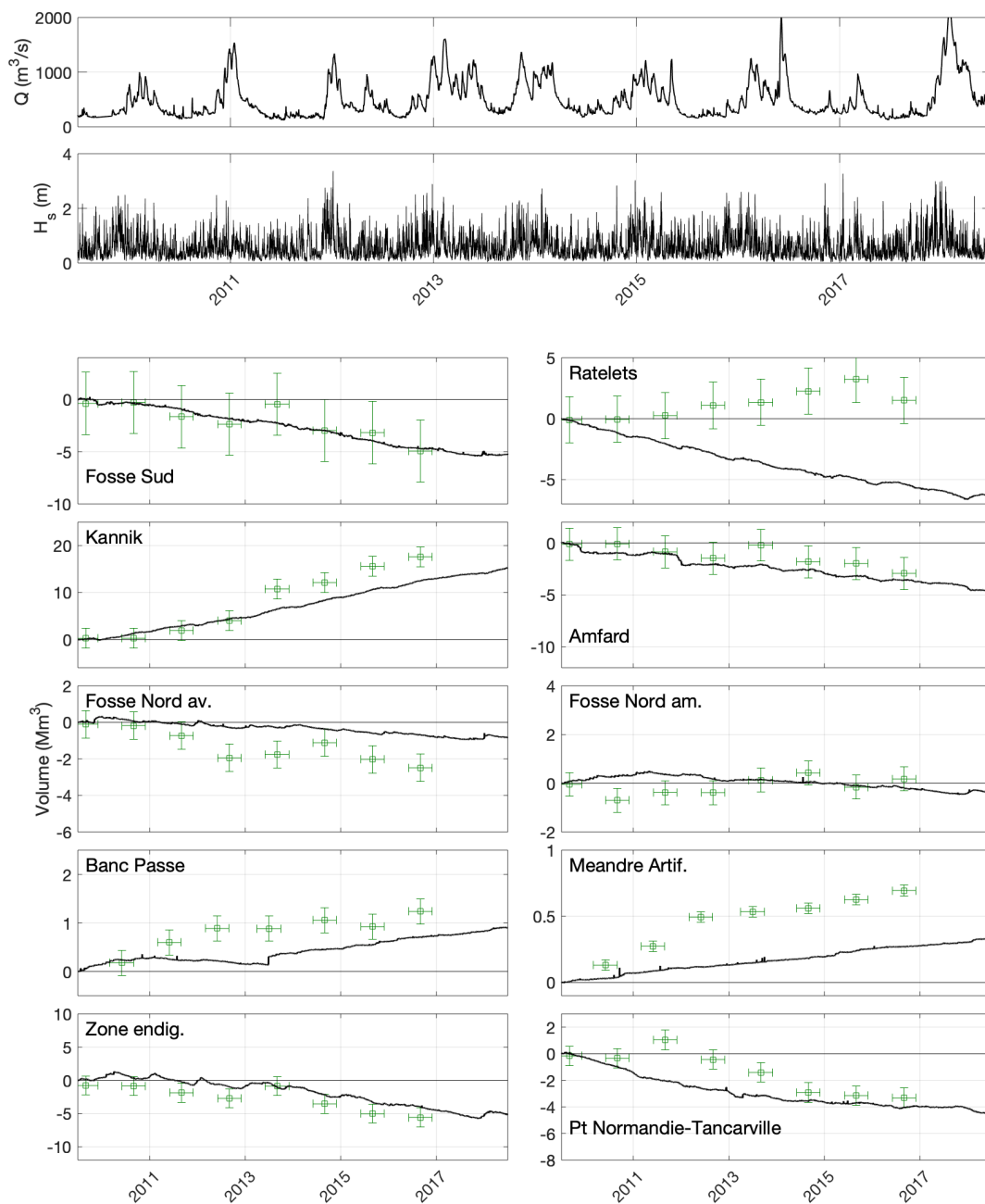


Figure III.11: Évolutions des volumes de sédiment (cubatures) intégrés en 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure III.10), d'après les observations bathymétriques du GPMR analysées par Artelia (symboles) ou simulées par le modèle (lignes noires)

L'érosion de la Fosse Sud au cours de la période 2009-2015 ($-5 \pm 3 \text{ Mm}^3$) est relativement bien simulée par le modèle ($-4,8 \text{ Mm}^3$). En revanche, l'accrétion observée sur la zone des Ratelets ($+2,7 \pm 1,9 \text{ Mm}^3$) n'est pas reproduite par le modèle qui à l'inverse simule une érosion de $-4,5 \text{ Mm}^3$. Cette accrétion nette observée *in-situ* est en fait la résultante de l'érosion du banc au nord et de son accrétion/progradation vers l'ouest. La Figure III.9 illustre cela et montre que le modèle simule effectivement l'érosion évoquée mais ne reproduit quasiment aucune progradation du banc vers l'ouest. La complexité de la dynamique sédimentaire sur ces bancs à l'embouchure (courants de marée + vagues) a déjà été mise en avant par Grasso et al. (2016).

En ce qui concerne la zone du Kannik, jusqu'en 2013 l'accrétion constatée *in-situ* ($+5,2 \pm 2,1 \text{ Mm}^3$) est bien simulée ($+5,5 \text{ Mm}^3$). Par contre une accentuation momentanée du dépôt est observée dans les mesures entre 2013 et 2014 et serait associée à un déplacement des immersions vers les zones plus profondes situées à plus à l'ouest (GPMR, *comm pers.*), où la stabilité des dépôts est supérieure. Ce déplacement du site de rejet n'est pas pris en compte dans la modélisation, ce qui pourrait expliquer l'écart constaté entre observations et modèle.

Dans la zone d'Amfard, l'érosion observée ($-3 \pm 1,5 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par le modèle ($-3,5 \text{ Mm}^3$).

L'érosion de la Fosse Nord aval ($-2,5 \pm 0,7 \text{ Mm}^3$) est sous-estimée par le modèle ($-0,9 \text{ Mm}^3$). Dans la Fosse Nord Amont, les mesures montrent une érosion durant les premières années puis une sédimentation qui permet d'obtenir une évolution nette quasiment nulle sur la période. En revanche, le modèle simule une accrétion durant les premières années puis une très légère érosion pour tendre vers un bilan quasiment nul également.

Dans les zones intertidales du banc de la Passe ($+1,2 \pm 0,3 \text{ Mm}^3$) et du méandre artificiel ($+0,7 \pm 0,1 \text{ Mm}^3$) le modèle sous-estime la sédimentation d'environ 50 % ($+0,7 \text{ Mm}^3$ et $+0,3 \text{ Mm}^3$ *resp.*). Ces zones présentent de forts gradients bathymétriques qui ne sont probablement pas suffisamment bien représentés par le maillage curviligne du modèle (résolution de l'ordre de 50 à 100 m dans ce secteur). Il est à noter que les résultats du modèle au niveau du banc de la Passe sont surprenants : le modèle simule une sédimentation conforme aux observations pendant les deux premières années, puis une très légère érosion de 2011 à fin 2013 alors qu'un pic de sédimentation est observé à ce moment. A partir de 2014, le modèle simule une sédimentation comparable à celle observée *in-situ*.

Dans la zone endiguée de la Seine, le modèle simule une érosion de l'ordre de 4 Mm^3 comparable aux 5 Mm^3 observés dans la réalité. Enfin, l'érosion observée entre le Pont de Normandie et Tancarville ($-3 \pm 0,7 \text{ Mm}^3$) est bien simulée par le modèle (-4 Mm^3), malgré le fait que la fluctuation observée en 2011-2012 ne soit pas restituée par le modèle.

Dans l'ensemble, le modèle représente de manière satisfaisante les évolutions temporelles des cubatures de l'estuaire sur la période étudiée. Les principales limites du modèle se situent au niveau du banc des Ratelets, où le modèle sous-estime la sédimentation.

III.3.3.2 Hypsométrie de l'estuaire

Les capacités du modèle à reproduire les évolutions morphologiques ont également été analysées via les évolutions des surfaces hypsométriques. L'analyse a porté sur une zone appelée "estuaire interne" (secteur en rouge, Figure III.12). La configuration de "l'estuaire interne" permet de délimiter la zone la plus dynamique de l'estuaire de la Seine tout en s'affranchissant des effets directs du site du Kannik (à l'ouest immédiat) sur le fonctionnement de l'estuaire. A l'amont, cette zone est limitée au niveau de Tancarville qui constitue également la limite amont des secteurs dragués dans le modèle. La figure III.12 représente les variations de surface par classes bathymétriques entre 2009 et 2016, déduites des cartes topo-bathymétriques ou issues du modèle (dont l'hypsométrie de départ est celle mesurée en 2009).

Le modèle simule remarquablement bien les évolutions des classes bathymétriques comprise entre -10 et -5 mCMH, en nette augmentation (modèle environ supérieur de 1 % par rapport aux observations). Entre les niveaux -5 mCMH et 0 mCMH, modèle et observations s'accordent sur une légère réduction globale, mais résultant d'un accroissement de surface entre -5 et -2.5 mCMH et d'une diminution entre -2.5 et 0 mCMH pour les observations, et le contraire pour le modèle. Ce dernier aurait tendance à adoucir les pentes en domaine subtidal très peu profond (*i.e.* sur la tranche -5 à 0 mCMH). Pour les classes intertidales inférieures (de 0 à + 5 mCMH), modèle et mesures sont en accord (erreurs inférieures à 2%), et indiquent une nette réduction de surface entre les cotes 0 et 2.5 mCMH. Concernant les classes intertidales supérieures : le modèle surestime de 5 % l'augmentation des surfaces comprises entre 5 et 7,5 mCMH, en revanche il simule parfaitement la légère diminution de la classe entre 7,5 et 10 mCMH. Enfin, dans les zones profondes (entre -20 et -10 mCMH), peu représentées dans l'estuaire interne, les observations montrent une très légère extension. Le modèle surestime celle-ci de 7% : en effet le modèle réduit la surface de la tranche inférieure à 15 mCMH (il s'agit des fosses et des accès

au port du Havre), qu'il compense en partie par une augmentation plus forte de la tranche au-dessus (- 15 à -10 mCMH).

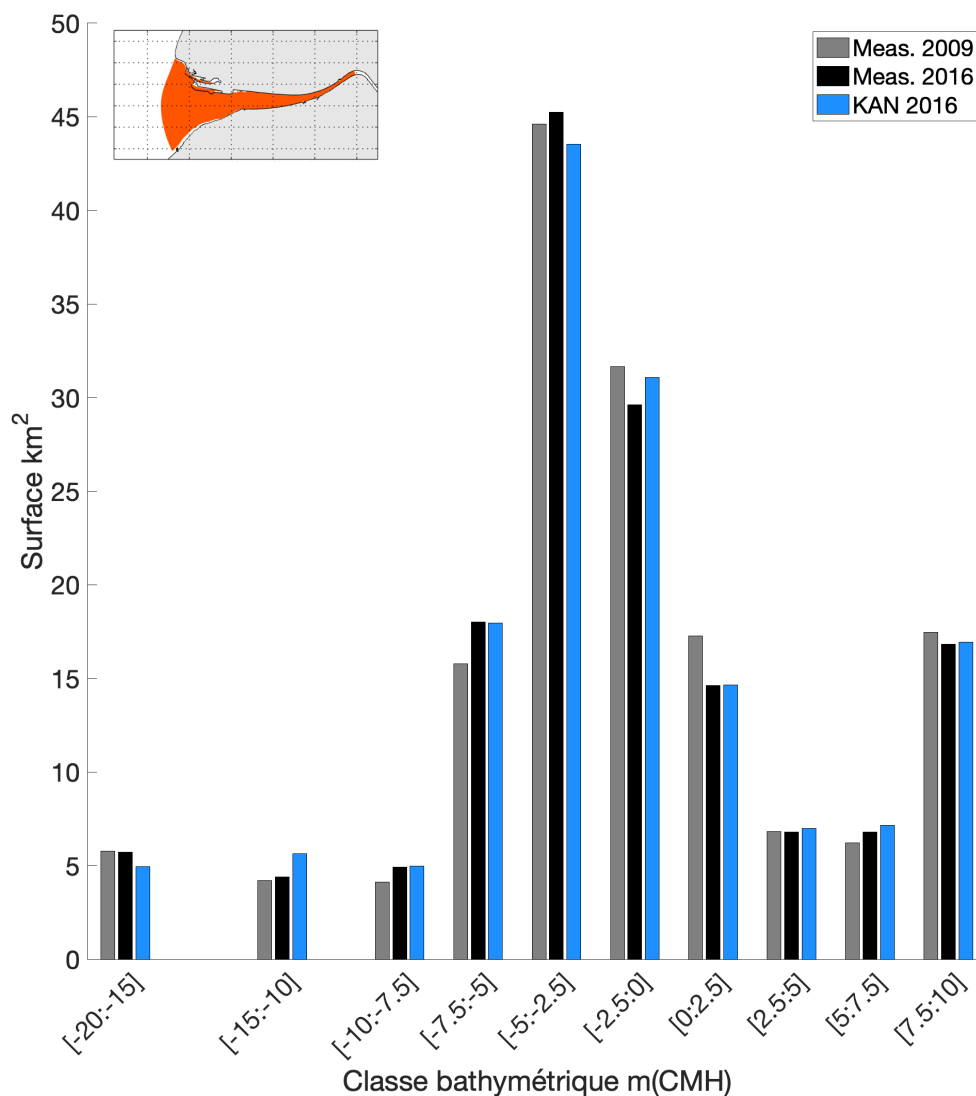


Figure III.12 : Distribution des surfaces par classes bathymétriques h_0 (mCMH) mesurées et simulées sur les périodes de septembre 2009 à septembre 2016. L'emprise de calcul est indiquée sur la carte miniature

A l'échelle de l'embouchure et vis-à-vis des trois approches de validation illustrées précédemment, il apparaît que le modèle reproduit de manière plutôt satisfaisante les évolutions morphologiques de l'estuaire sur la période 2009-2016.

III.4 Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing

Soumis à la revue Estuarine and Coastal Shelf Sciences, en révision mineure le 19 octobre 2020

Maintenance dredging in a macrotidal estuary: modelling and assessment of its variability with hydro-meteorological forcing

J.P. Lemoine^{1*}; P. Le Hir²

¹ : GIP Seine-Aval, Hangar C - Espace des Marégraphes, Quai de Boisguilbert, 76000 Rouen, France ; jplemoine@seine-aval.fr (*corresponding author)

² : IFREMER – DYNECO/DHYSED, Centre de Bretagne, 29280 Plouzané, France

III.4.1 Introduction

Historically ports were developed in sheltered areas naturally protected from coastal storms, such as estuaries. However these areas are affected by important siltation, requiring maintenance dredging for port activities. Port development and deepening of fairways which occurred in the last 50 years increased the sediment trap effect of harbors and thus the need for maintenance dredging (as illustrated by Byrnes et al., 2011). For international ports, the annual maintenance dredging masses are often counted in millions of tons per year, an impressive example being the Yangtze estuary deep channel where annual dredging volume can almost reach 100 M.m³/year (Liu and Zhang, 2019). This leads to the development of an entire industry: in fact world maintenance dredging cost was estimated in 2011 at 2.5 billions € (IADC, 2011).

Dredging by definition affects environmental functioning by hindering natural morphological evolutions. This impact is all the more important that the related anthropogenic sediment fluxes have similar amplitude as natural fluxes (Zhao et al., 2018). It is the case of the Seine Estuary where annual dredged quantities are i/ of the same order of magnitude as the maritime sediment input, ii/ ten times the Seine River sediment supply (Lemoine et al., 2015). In addition, this anthropization of sediment fluxes alters natural sediment dynamic which can also contribute to enhance the mobility and diffusion of contaminants and pollutants already present in the silted sediments. In this context, and given the increase of marine environmental protection policies, port authorities need to optimize dredging so that their activity remains sustainable either from an economic or from an environmental point of view.

Dredging optimization can mainly be achieved i/ by dredging technique improvement and ii/ by a better understanding of sediment dynamics variability and its implications on dredging. Our research focuses on the latter point and aims to trigger the forcing conditions in which siltation in the dredged areas of the Seine Estuary occurs. In-situ data gathered by port authorities appear to be inhomogeneous over a period of time long enough to assess these dependencies. In fact, field observations variabilities are mainly due to the volume of sediment that can be extracted under given operating conditions. On the other hand, hydro-morpho-sedimentary process-based models have progressed for recent years, becoming more and more realistic, while their computational costs reduced. Since these models allow for considering different forcing, their use for studying relationships between dredged masses and physical forcings is straightforward. This is all the more true as numerical simulations may not account for operational constraints.

Literature about dredging mainly focuses on dredging impact assessment either on morpho-sedimentologic evolutions of the seafloor or on ecological habitat (benthic and pelagic) (e.g. Duclos, 2012; Newell et al., 1998). Among these studies, dredging modelling were mainly either in sandy environments (e.g. Dam et al., 201) or in muddy ones (e.g. van Kessel et al., 2015). Literature considering the dredging of sand/mud mixture is poor, but this subject is getting more and more interest as the advance of hydro-morpho-sedimentary models gives access to a knowledge almost inaccessible from in-situ data (Martelo et al., 2019). Nevertheless, to the authors knowledge, no study related to dredging variabilities in response to hydro-meteorological forcing was published, although there might be an abundant grey literature given the strong coastal engineering aspect associated to this subject.

The present work deals with the mouth of the Seine Estuary (France) which is submitted to the maintenance dredging of two major ports, Le Havre Port close to the mouth, and Rouen Port localized more upstream. Within the so-called Seine-Aval Scientific Program, a process-based model for hydrodynamics, sediment transport and morphological evolution has been developed for many years

(Grasso et al., 2018; Grasso and Le Hir, 2019; Lemoine et al., 2020) and recently upgraded (Mengual et al., 2020). The interest of the modeling approach lies in the possibility to explore many physical processes likely to impact dredging quantities. In particular, the above mentioned model is a 3D process-based model which considers several sediment classes (cohesive and non-cohesive) and their interactions, different transport processes (bed load and suspension) and accounts for multiple hydro-meteorological forcings (tide, river discharge, wind and waves). Consolidation and sediment classes distribution are monitored within a multilayer bed model and morpho-dynamic coupling is respected for both hydrodynamics and wave computations. Moreover, computing performance enables the simulation of long periods, representative of the mid-term natural variability (10 years). Based on the approach proposed by Waeles and Le Hir, (2006) a dredging module was introduced in the Seine Estuary model by Grasso et al. (2018). This module considers dredging as a process responding to simulated morpho-sedimentary evolutions of the sea bed.

Based on the use of a realistic 3D process-based model, this study aims to assess dredging variabilities in response to hydro-meteorological forcings in the macro-tidal estuary of the Seine River. Section two briefly describes the Estuary and the importance of dredging in its functioning. The hydro-morpho-sedimentary configuration of the model is shortly reminded in section 3 together with the validation of dredged quantities with the available in-situ measurement dataset. Section 4 presents the results in term of dredging variabilities and proposes relationship between the Daily Dredged Masses (DDM) and hydro-meteorological forcings. Results and model limits will be discussed in section 5. Conclusions constitute the last section..

III.4.2 The Seine Estuary and connected ports

The Seine Estuary, located in the Northern part of France can be classified as a tide dominated estuary (Dalrymple et al., 1992) with a tidal range reaching 8 m at Le Havre. It is 170 km long from the mouth to its upstream limit, the Poses weir. The mean Seine River discharge is 467 m³.s⁻¹ with minimum below 100 m³.s⁻¹ and maximum around 2500 m³.s⁻¹. Salinity gradients and the Estuarine Turbidity Maximum zone (ETM) are located in the lower 50 km of the estuary (area represented on Figure III.13). The ETM position and mass are mainly driven by the river discharge and the spring/neap tidal cycle respectively, its mass can reach 250 000 tons during spring tide (e.g. Grasso et al., 2018).

As many estuaries, the Seine Estuary was shaped by engineering works to improve the accessibility of marine vessels to Rouen port located 110 km upstream Honfleur (Figure III.13), and to Le Havre port close the mouth (e.g. Avoine et al., 1981; Lesourd et al., 2003). In particular, two submersible dikes, almost 10 km long, were built in the 1960's (dashed lines on Figure III.13). These dikes were designed to enhance ebb currents and thus to limit siltation in the navigation channel, located between these dykes (e.g. Le Hir et al., 2001). Navigation channels of both Rouen and Le Havre port were significantly deepened to -6.3 m and -15.5 m below lowest astronomic tide, respectively. These engineering works induce extensive maintenance dredging in order to maintain a constant nautical depth in both fairways.

Rouen navigation channel stretches from Honfleur to Rouen, but most of its maintenance dredging activity is located in the lowermost 20 km of the estuary (85%). In this downstream estuary, more than 90% of the dredged mass is extracted in two areas: one is located at the seaward end of the submersible dykes, and for this reason is named with the French word "engainement" (hereafter mentioned as zone E, Figure III.13), while the other is 20 km upstream, right south of a breach in the northern dyke where intense sediment exchanges occur between the northern channel and the navigation channel (Delinares et al., 2015), and is called zone B hereafter (Figure III.13). Characterized by strong tidal currents reaching 2 m.s⁻¹ on spring tides, these two areas respectively correspond to the extreme seaward position of the Seine ETM and to its central position (Grasso et al., 2018). Dredging upstream from Tancarville is not in the scope of the present study.

Despite strong local hydrodynamics and currents exceeding 2 m.s⁻¹, siltation in this part of the navigation channel of Rouen Harbor is important. Around 2 million tons of sediment, equally composed of sand and mud, are dredged each year in zone B while in zone E, the dredged material is sandy mud (65% in weight) and amounts to 3 million tons. Dredging of Rouen port is operated continuously by at least one trailing suction hopper dredger. Prior to 2017, these sediments were released on a disposal site called Kannik, located just at the mouth in a very dynamic area (Figure III.13). Nowadays these sediments are dumped more offshore (see section 3.3).

Le Havre port is dredging an annual volume of around 2 million tons in its basins and navigation fairways (hereafter called zone LH). As tidal currents are low in these areas, and as waves remain moderate in the deep navigation channels, sediment dredged is mainly muddy (90% of mud). These sediments are released on the disposal site of Octeville located north from the mouth of the estuary (Figure III.13). Sediment dumped on both Kannik and Octeville are likely to be partly redistributed towards the estuary.

Analyzing the actual sediment budget of the Seine Estuary and confronting natural sediment inputs to the annually dredged masses shows that the total dredged mass (7 million tons) is much higher than the continental sediment input (0.55 million tons per year; Landemaine, 2016) and has the same order of magnitude as the marine natural sediment input (4 million tons per year estimated from bathymetric surveys; Avoine, 1995).

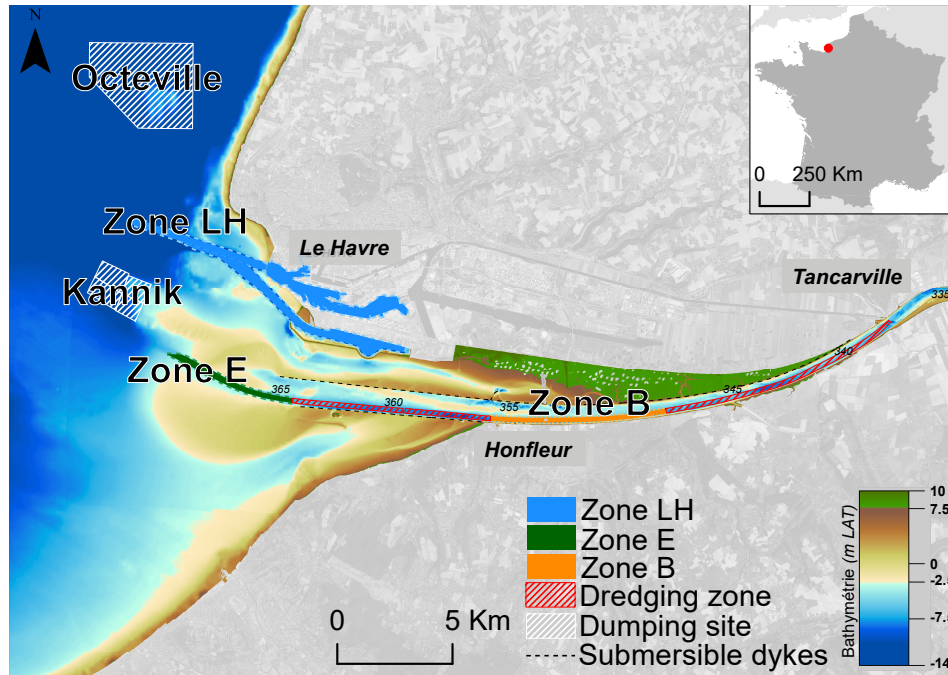


Figure III.13: bathymetry of the area of interest with dredging and dumping areas and submersible dykes. The dredged zones LH, E and B are represented in blue, green and orange respectively. Other dredged zone are represented in hatched red.

III.4.3 Material and methods : The hydro-morpho-sedimentary model of the Seine Estuary

Our approach relies on the use of the hydrodynamic model MARS-3D (Lazure and Dumas, 2008), coupled to the process based morpho-sediment model of Le Hir et al. (2011). A detailed description of the model set-up and the validation of both hydro and sediment dynamics can be found in Grasso et al. (2018). This model of the Seine Estuary was also used by Grasso and Le Hir (2019) to study the influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in the Seine Estuary from 1960 to 2010.

Recently, Mengual et al., (2020) updated the sediment model mainly regarding three points:

- explicit computation of bedload fluxes, accounting for slope effects,
- improved management of sediment resuspension in the non-cohesive regime,
- better representation of porosity in sediment layers, depending on grain sizes.

For the needs of our study, this new version of the model was fitted and a dedicated calibration was sought in order to reproduce the siltation observed in the navigation channels without compromising the validation level demonstrated by Grasso et al. (2018). Sediment is dredged and dumped according to specific rules given by port authorities. Main model characteristics are shortly reminded in sections 3.1 (hydrodynamics) and 3.2 (sediment dynamics), while detailed can be found in Mengual et al. (2020). The methodology for computing sediment dredging and release is detailed in section 3.3. Characteristics of the simulated period are described in section 3.4. Finally, validation of dredging results is presented in section 3.5.5

III.4.3.1 Hydrodynamic models

The MARS-3D flow model solves the Navier-Stokes equation under hydrostaticity assumption and Boussinesq approximation, using a finite difference method (Lazure and Dumas, 2008). The model runs on a curvilinear non-orthogonal grid in order to have boundary conditions farther without increasing computation time and also to fit the shape of the estuary. Grid resolution ranges from 2x2 km² in the bay of Seine to 30x100 m² in the estuary mouth (area of interest). The 10x10m bathymetric data acquired in 2009 and provided by port authorities of Rouen and Le Havre were interpolated on this grid (Figure III.14). The vertical discretization compounds 10 sigma layers equally distributed.

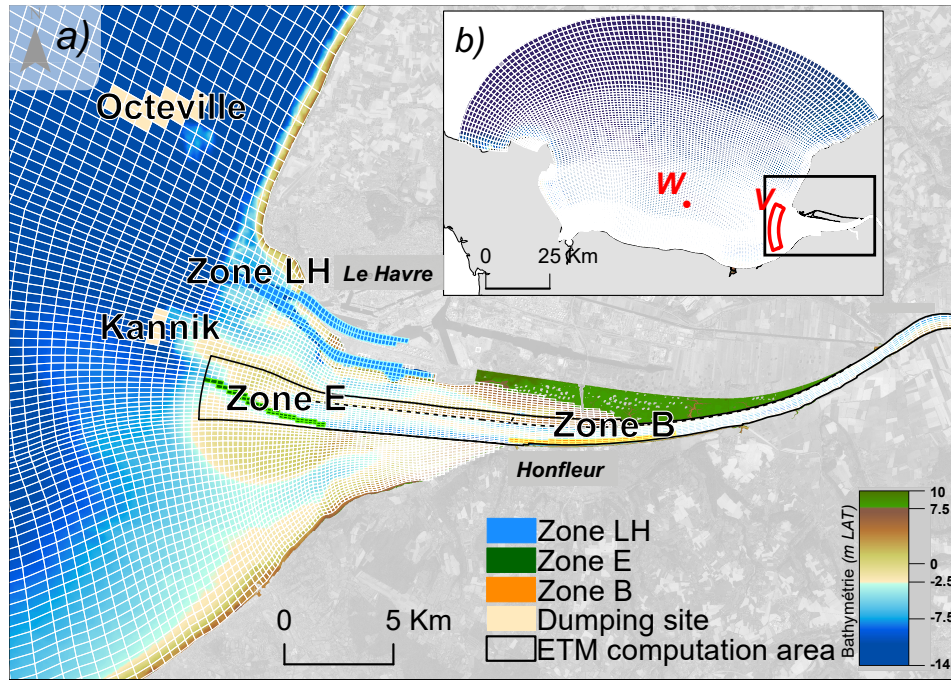


Figure III.14 : Computational grid and bathymetry of the Seine Estuary numerical model and zoom in the area of interest for this study (a) and in the bay of Seine (b). Cells of the three dredged zones (LH, E and B), studied in section 4 are represented in blue, green and orange resp. Cells of the dumping sites Octeville and Kannik are represented in beige. Cells considered to compute the ETM dynamics accordingly to Grasso et al. 2018 are surrounded by a solid black line. On the bay of Seine map (b), the area designated by the letter V represent the area considered to define wave data (cf. 2.4). Point W correspond to the location of the wind data used in section 4

The hydrodynamic model is forced by realistic tidal components at its northern open boundary. Diurnal Seine River and intra-estuarine tributary discharges are imposed at their confluence with the estuary. Meteorological forcings are constituted by wind and pressure gradients resulting from the AROME model developed by Meteo-France (Seity et al., 2011). Waves are simulated by the WaveWatch III code which is coupled to the MARS-3D flow model. The wave model is locally forced by the same wind information than MARS3D within the domain and by results from a large-scale model of the Atlantic Ocean along the open boundary (Roland and Arduin, 2014). In return, WWIII model provides to MARS-3D the parameters needed to compute the wave induced skin stress τ_w , following the Jonsson, (1966) formulation with a wave friction factor f_w expressed according to Soulsby et al. (1993). The computation of wave plus current bottom shear stress follows Soulsby (1997). In order to account for morpho dynamics coupling, bathymetry is regularly updated in the circulation model and in wave computations. To improve the feedback of sediment evolution on sediment resuspension and mixing, a variable skin roughness length z_0 is used. It depends on the simulated representative diameter of the non-cohesive fraction of surficial sediments $D_{gravsan}$, $z_0 \text{ skin (m)} = \max(D_{gravsan}/15, 10^{-5})$; the minimum value (10⁻⁵ m) is defined in accordance with the finest sand class, and is also used in case the surficial sediment is cohesive]. The form bottom roughness length z_0 form used for computing the bed shear stress in the momentum equation is also dynamic and directly proportional to the averaged diameter of non-cohesive

sediment within the first centimeter of the sediment ($D_{gravsan1cm}$, updated by the multi-class sediment model), using the following relationship: $z_0 \text{ (m)} = K_{z0} \cdot D_{gravsan1cm}$, where K_{z0} is a calibration coefficient (set at 3.5) that accounts for the probable occurrence of bedforms.

III.4.3.2 Sediment model

The hydrodynamic model is coupled to the process-based sediment model for sand and mud mixtures MUSTANG (MUD Sand TRANsport modellinG) (Grasso, 2015; Le Hir et al., 2011; Mengual et al., 2017; Mengual et al., 2020). This multi-class sediment model computes both transport in suspension and bedload for different sediment classes ranging from mud (only transported in suspension) and sand (transported in suspension and as bedload) to pebble/gravel (bedload only).

As detailed in Mengual et al. (2020) the model simulates bedload according to Wu and Lin (2014) and distinguishes the three erosion regimes described in Le Hir et al. (2011): non-cohesive, transition from non-cohesive to cohesive, and cohesive, depending on the surficial mud fraction. The threshold mud fraction between non-cohesive and transition increases with the averaged non-cohesive sediment diameter to represent the decreasing ability of the mud to impede sand or gravel movement. In order to better fit field and experimental observations, a transition varying exponentially with mud fraction was introduced (Mengual et al., 2017). Slope effects on fresh sediment deposition are also considered using a schematic approach which consists in transferring a fraction of the depositing material into adjacent computation cells proportionally to the bottom slope. Such slope effect appears to play a significant role on deposition in deep channels and consecutive dredging, as in zone LH.

Suspended sediment transport is simulated by solving an advection/diffusion equation for different sediment types ranging from mud to fine and medium sand (Le Hir et al., 2011). Flocculation processes are accounted for by a variation of the mud settling velocity with mud concentration and turbulent intensities, following Van Leussen (1994). In the application to the Seine Estuary, five representative classes of sediment are considered: one "mud", three "sands" (100, 210 and 800 μm) and one "gravel" (10 mm). These classes have been selected from dominant sizes observed in the area (see also Grasso et al., 2018).

A multi-layered bed model is associated to the hydrodynamics model, with the same horizontal computation grid. The vertical discretization of the sediment enables to account for the variable sediment distribution and consolidation processes. Layers thickness varies according to erosion and deposition events, between a minimum value (1 μm) and a maximum (5 mm), so that changes of sediment composition can be preserved. In case deposition in excess implies an increase of the number of layers above a maximum (100 in the present application), a buffer layer with unlimited thickness is constituted at the bottom of the sediment. Consolidation of sand and mud mixtures is solved according to a modified Gibson equation (Grasso et al., 2015).

The initialization of sediment constitutes a major input of the model, as sediment dynamics depend on the surficial sediment characteristics. Initializing sediment means setting its thickness, the 3D distribution of the five sediment classes, and the spatial distribution of porosity. For the sake of simplicity, a uniform vertical distribution of sediment classes is assumed, together with a vertically uniform porosity. Similarly, a uniform thickness of 3 m is considered, based on the maximum erosion which is likely to occur in the mouth of the Seine Estuary, along a 10 years simulation. Then the adopted strategy for the horizontal distribution of initial sediment is twofold. In the large area of the Bay of Seine, where sediment is mainly coarse sand due to strong tidal currents, the time scale to get an equilibrium sediment cover from a uniform distribution is supposed to be very long. It is then assumed that the initial sediment reflects the bottom shear stress gradients. A positive relationship between the range of higher shear stresses (percentile 80 of the current induced shear stress along a whole year) and typical sediment facies (from fine to coarse) is assumed, and fitted to field samples compiled by Vaslet et al. (1978) (in Blanpain, 2009). On the other hand, in the small and highly dynamic area of the estuary, a uniform sediment cover is preferred, following the proof of concept published by Grasso and Le Hir (2019) who showed that the model could simulate a realistic sediment cover after a spin-up period of one year. After some trial and errors tuning, the initial sediment in approximately the area zoomed in Figure III.14 (i.e. the whole area of interest) is composed of 40% mud, 60% sand (100 μm : 15%, 210 μm : 30%, 800 μm :

15%) and 5%. In addition, areas known to be non-erodible are initialized without sediment in order to prevent excessive local erosions and their possible morphodynamic consequences.

Continental sediment supply from the Seine is imposed at the upstream limit of the model: a relationship between river discharge and suspended solids concentration (SSC) is assumed, based on Avoine et al. (1981). Although low, the sediment supply from intra-estuarine tributaries is also considered using the model proposed by Landemaine (2016). More essential for long term simulations, water masses entering the computational domain from the open sea may be slightly turbid, inducing non negligible input as water fluxes are considerable there. A constant and uniform concentration of mud equal to 2 mg.l⁻¹ is imposed at the ocean open boundary, qualitatively in agreement with observations in the English Channel, as described by e.g. Blanpain (2009).

III.4.3.3 Dredging procedure

One original feature of our model is not to force dredged quantities provided by observations, but to simulate them according to the same rules as in real life: typically, when deposition makes the sediment exceed nautical depth, the deposited mass in excess is removed and released in the water column above the dumping sites (Lemoine et al., 2020). Nevertheless, it should be noted that dredging is operated continuously in all maintained areas in the model, while it depends on the dredger availability in reality.

Three dredging rules were defined to schematized dredging as it is operated by port authorities. The first rule is the nautical depth which can be specified for each dredged area. A second rule is the minimum sediment density considered to define the nautical depth. As bathymetric surveys in the Seine Estuary are conducted using a 33 kHz sonar which cannot measure mud deposition below 300 kg.m⁻³, this concentration was considered as a threshold to compute the sediment thickness. The third rule is related to the "nominal" dredged thickness: it corresponds to the sediment depth concerned by a dredging operation. In our application, this thickness does not include the height of unconsolidated sediment (i.e. < 300 kg.m⁻³, cf. rule 2), so that when a cell is dredged, the total dredged height is equal to the sum of the nominal dredged thickness and the surficial unconsolidated sediment. Our realistic run considers a nominal dredged thickness of 50 cm in accordance with real dredging practice. Nevertheless to assess dredging variabilities regarding hydrometeorological forcings and especially to minimize the delay between the sediment influx induced by any forcing and the actual dredging operation, a specific simulation was set up, with a nominal dredged thickness of only 1 cm. Comparisons between this so-called quasi-continuous dredging run (QCD run, dredged thickness =1 cm) and the realistic one (dredged thickness = 50 cm) will be specifically discussed in section 4 (results). In addition, the form bottom roughness length z_0 form is fixed (0.1 m) in dredged areas, in order to account for a roughness enhanced by dredgers.

Following these rules, sediment is removed from the sea bed of dredged areas when the bed elevation exceeds the nautical depth specified by port authorities. Then it is instantaneously released above the dumping site of Kannik (resp. Octeville) for sediment dredged by the port of Rouen (resp. Port of Le Havre). In coherence with results from Nguyen et al., (2012), gravel is released on the sea floor while sand and mud are released in suspension uniformly in the lower half of the water column where they experience the same dynamic as the background suspension. During the release process, deposition is affected by the hydrodynamic conditions and especially turbulence. If dumping is occurring at slack tide, with low level of turbulence, most of the released sediment deposits. On the contrary during the ebb or flood, the net deposition rate is lower and a larger part of dredged sediment remains in suspension.

Results of the dredging procedure are stored as time series of dredged masses of each class of sediment (mud, sands and gravel) per dredging area, with a period of 2 hours.

III.4.3.4 Characteristics of the simulated period and forcing data

A spin-up period of 1 year, corresponding to the actual forcing of year 2009 is first conducted without morphological coupling to preserve the initial bathymetry. This spin-up initiates the estuarine sediment

dynamic, redistributes sediment to get a more realistic surficial sediment cover and builds up a representative estuarine turbidity maximum. Then the model is re-started on January the 1st, 2009 with initial conditions corresponding to the end of the spin up period. 2009 results presented hereafter correspond to the first year after the spin-up period.

Results shown hereafter come from retrospective simulations starting in January 2009 and ending in December 2018. This 10 years period covers the whole range of variation of the considered forcings. Seine River discharges over this period are characterized by a low run off equal to 146 m³.s⁻¹ (percentile 1), a high run off of 1600 m³.s⁻¹ (percentile 99), and a median (resp. average) one of 354 m³.s⁻¹ (resp. 477 m³.s⁻¹). This is fully representative of the variability over last 50 years which are characterized by a first percentile of 110 m³.s⁻¹, a last percentile of 1647 m³.s⁻¹ and a median value of 354 m³.s⁻¹ (average: 467 m³.s⁻¹). Similarly, the whole range of variation of wind and wave regimes can be observed during the 10 years of this simulation. It can be noted that year 2018 is characterized by the occurrence of a very high run off reaching 2120 m³.s⁻¹, and a strong storm with waves of 3.6 m at the entrance of Le Havre port.

Dredging variability will be assessed in regard to four forcings: river discharge, tide, waves, and winds. Seine River discharges and tidal data correspond to the model inputs (cf. 2.1). Waves data were extracted from our simulation as a spatial average over the zone V presented on Figure III.14. Wind data used for the comparison were extracted at point W (Figure III.14) from the Meteo-France AROME model used to force our hydrodynamic and wave models.

III.4.3.5 Model Validation

Hydro-sedimentary validation of the model in term of water level, wave propagation, SPM dynamics and morphological evolutions is provided in Grasso et al (2018) and Mengual et al. (2020). However, the few adjustments operated on bottom friction coupling (section 3.1) have slightly modified some validation scores. For instance, although the tide propagation and attenuation remains well simulated up to the upstream limit of the estuary, the squared correlation coefficient on tide elevation is 0.99 instead of 1 and the root-mean-square error 0.31m instead of 0.15 m in the estuary mouth when compared to Grasso et al. (2018) results. Waves validation is similar to previous results (root-mean-square error of 0.2 m on Hs; Grasso et al., 2018).

Suspended sediment concentrations had been thoroughly validated by Grasso et al. (2018), but a slight change of parameterization had been introduced by Mengual et al. (2020) in order to get a better agreement on morphological changes at the time scale of several years (see also Grasso et al., 2020). As a result, the agreement between the model and observed bathymetric evolution is quite reasonable: when splitting the 150 km² of the mouth into 7 boxes, model results and observations can be compared in terms of global sediment accretion or erosion: only one box shows opposite results. Among the other ones, four are in erosion (total observations: 19.3 Mm³, total simulations: 17.5 Mm³), while two of them experience accretion (total observations: 19.9 Mm³, total simulations: 13.7 Mm³). The drawback of this morphological performance is some degradation of the suspended matter concentration, which becomes underestimated. While the normalized root-mean-square error was between 0.2 and 0.4 in previous modeling when computed on one year comparison in three locations (Grasso et al., 2018), it is now in the range 0.3 - 0.6 in our modeling and the normalized bias is about -0.5 in the area of interest (Grasso et al., 2020).

Validation results presented here mainly highlight the capacity of the model to reproduce dredging variabilities.

Port authorities of Le Havre and Rouen provided both qualitative and quantitative information to validate model dredging results. Considering the important variabilities induced by human and technical constraints, reference for in-situ data were established as yearly-averaged mass of dredged sand and mud. Higher frequency data and even yearly quantities are more influenced by the availability of dredging ships than by a variability of needs for maintenance dredging.

In the downstream part of Rouen fairway, dredging is operated along 32.3km but 94% of the dredging is done along the 13.1km corresponding to zones E and B (Figure III.13). Model results present a good

agreement with this distribution, since 88% of the numerical dredging is also achieved in zones E and B. As for the dredging zones of Le Havre port and fairways, given their simple schematization in the model, and for the sake of clarity, they have been compiled in a unique compartment "zone LH". Validation and results will therefore relate to these 3 zones : zone LH, E and B.

III.4.3.5.1 Composition of dredged sediments

Dredged masses are routinely measured and recorded by the trailing suction hopper dredgers which operate in the Seine estuary . Sediment grain size is not routinely measured but some measurements were done between 2008 and 2009 by Rouen port. Samples were not collected directly on the seafloor but between the suction pipe and the hold of the dredger, so that the resulting mud fraction can be expected to be somehow underestimated. Figure III.15 represents the average grain sizes observed and computed for the dredged zone E (panel a) and B (panel b) . At E, in-situ and computed dredged sediments have nearly the same composition. The highest difference concerns very fine sands which tend to be underestimated by our model. At B model results also present a fairly good agreement with observations, with some underestimation of sand classes that will be discussed further.

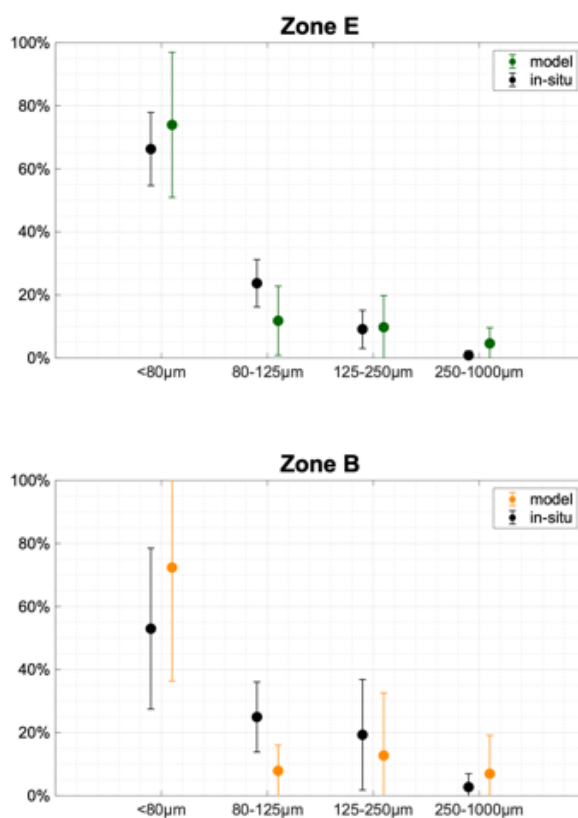


Figure III.15: Grain size comparison between in situ data and model results averaged over the 10 years period in zones E (a) and B (b).

For zone LH, the only data provided by port authorities are an average mud fraction of 88% over the years 2007 to 2014. The simulated mud fraction in sediment dredged in zone LH is 92% on average, quite in agreement with observations.

III.4.3.5.2 Quantification of dredged sediments

In the following, the model capacity to reproduce dredging in the three main dredging zone is evaluated regarding the yearly dredged masses of mud and sand (Figure III.16).

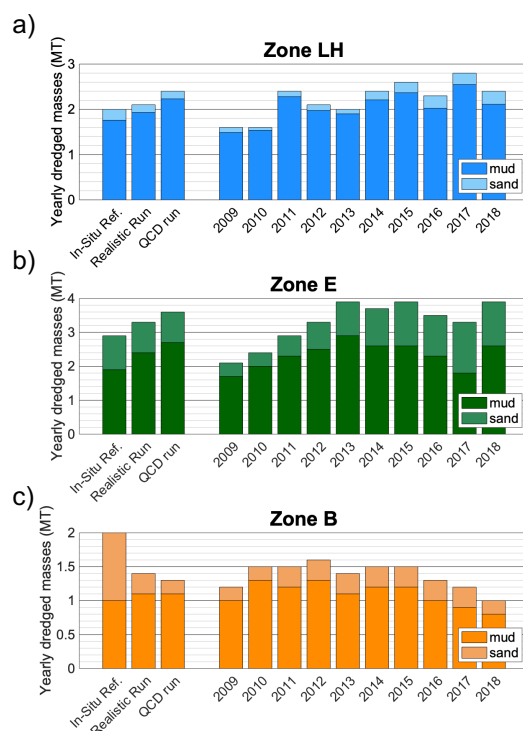


Figure III.16: Comparison of yearly dredged masses of mud and sand between in-situ reference and model results for the reference run over the simulated period (from January 1st 2009 to December 31st 2018), on the three main dredged areas Zone LH (a), Zone E (b) and Zone B (c). First column represents the in-situ reference, while the second and third column represent the results of simulations averaged over 10 years for the realistic and QCD runs respectively. The other 10 columns represent the yearly results of the realistic run.

For zone LH, model results (2.2 Mt with 92% of mud on average) are quite in agreement with in situ reference data provided by port authorities (2 Mt with 88% of mud). However, regarding the known interannual variability of ± 0.4 Mt (Le Havre Port Authorities, pers. comm.), simulated dredged masses seem to increase a bit too much along the simulated period. Regarding the mud content, there is a good agreement between in situ data and model results. It is concluded that results in zone LH are representative of the reality.

Zone E reference is set at 2.9 Mt of sandy mud (65% of mud content) with a variability of almost 1Mt depending on the yearly regime of hydro-meteorological forcing. Model results on this site (Figure III.16) are satisfactory, with a mean computed dredged mass equal to 3.3 Mt of sandy mud (72% mud content). On this site the model seems to be able to reproduce the inter-annual variability as qualitatively reported by port of Rouen.

Model results on zone B are not as good as on the two other sites (located downstream). The sand deposition calculated in this area seems to be underestimated by a factor 2 in our model. This may be due to some underestimation of sand exchanges between the northern channel and the navigation channel through the breach. Except from this, mud deposition is well reproduced.

On a daily scale the daily dredged masses in the model can reach 30,000t/day for each of the two ports (Figure III.17). These quantities are compatible with the dredging capacity of the two ports whose vessels

operate 24 hours a day, 7 days a week. For example, the dredging vessel "Samuel de Champlain" has a carrying capacity of 13,000t.

Averaged results over the ten years period are similar in the realistic run (with 50 cm dredged thickness) and the QCD run (with 1 cm dredged thickness). Nevertheless both local dredged masses and mud ratios present a better agreement with in-situ data in the realistic case (Figure III.16). Differences between these two runs will be further discussed in section 4.2.

An interesting result of these simulations is the ability of the model to simulate and maintain a realistic ETM over 10 years (Figure III.17). In particular, the simulated ETM dynamic remains steady and its seasonal variation is in accordance with results over an hydrological year showed by Grasso et al. (2018). In particular, the dependence of the ETM mass on the tidal range is clearly visible. Integrated over the same area as the one proposed by Grasso et al. (2018) and reminded in Figure III.14, the simulated ETM mass is 40 kT in average, lower than the one (68kT) computed by Grasso et al. (2018).

Overall, dredging validation is satisfactory in terms of quantities of both mud and sand over the decadal period. Considering dredging as one of the validation criteria for modeling sediment transport, it can be noted that our model is able to reproduce mid-term sediment dynamic without any distortion of the SPM dynamics. This level of validation allows a thorough analysis of relationships between dredging and the intensity of different hydro-meteorological forcings, as developed in section 4

III.4.4 Dredging variabilities and relations with hydro-meteorological forcing

III.4.4.1 Temporal variabilities

Beyond the indicators used to validate the model, the outputs over the simulated 10 years period offer a rich spectrum of information to evaluate dredging variabilities and responses to natural forcings (Figure III.17).

Firstly, the model reproduces the continuous dredging needed to maintain nautical depths. In coherence with in-situ data and model results presented in Mengual et al. (2020), this fact illustrates that these zones of the estuary are prompt to accretion while the morphological evolution over the whole estuary appears to be in a quasi-equilibrium at this time-scale (ARTELIA, 2018). This continuous siltation might be favored by maintenance dredging itself, as the latter prevents local morphological evolutions. Thus by inhibiting a possible equilibria, maintenance dredging also maintains the sediment trapping character of over-deepened channels.

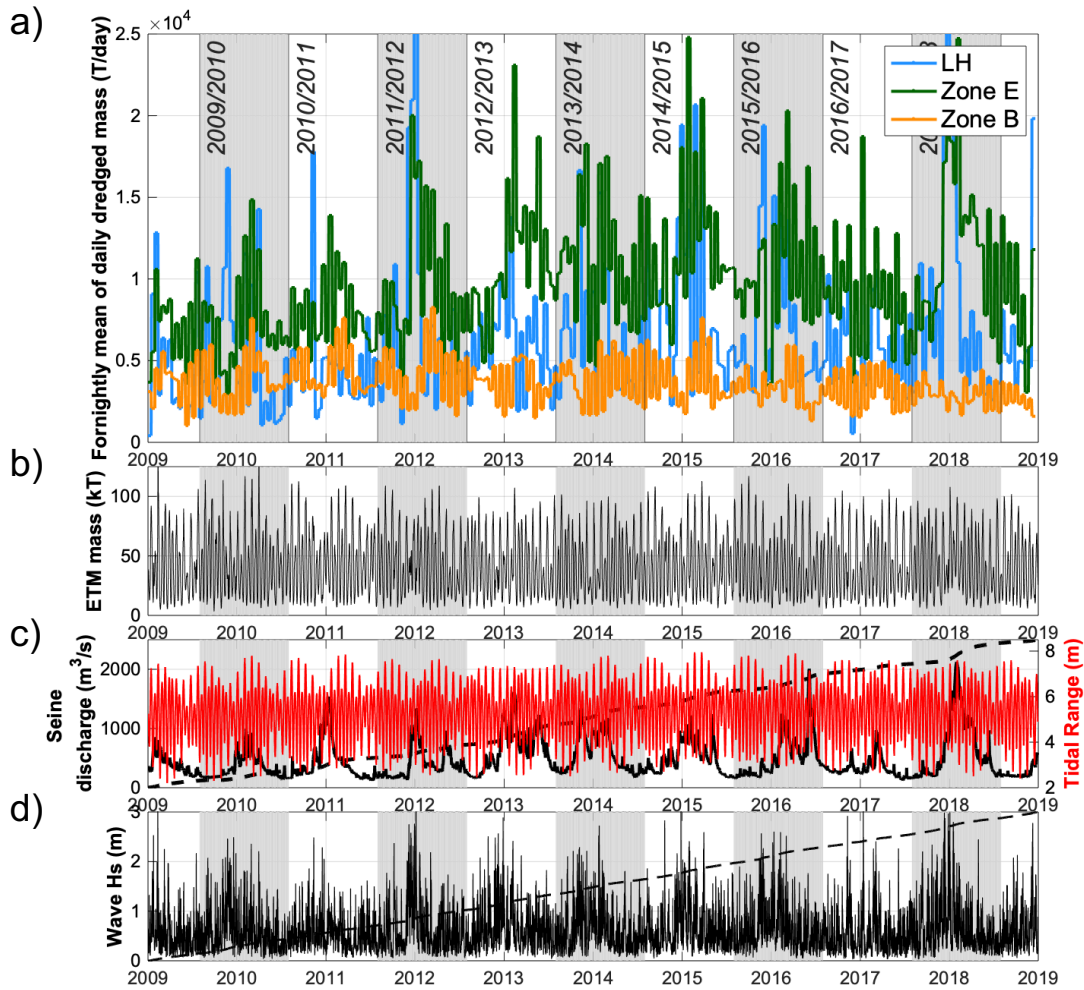


Figure III.17 :Chronological overview of the dataset from January 2009 to December 2018: Fortnightly averaged dredged masses for zone LH, E and B (a), ETM mass calculated in the area specified on Figure III.14 (b); tidal range and river discharge (daily and cumulated) (c), and waves hourly and cumulated) Hs (d). Cumulated river discharge and cumulated wave Hs were scaled to reach maximum of their respective daily data. The alternance of grey and white areas in the background highlights each hydrological years (from august 1st to July 31st).

Over the decadal period presented on Figure III.16, daily dredged quantities present important variations. Periodic increases of dredged material correspond to winter periods when the system is dynamic.

Figure III.17 presents a zoom over the period august 2017 to august 2018. Relations between dredging and forcings can be perceived from the comparison of the dredged activity on panel a, b and c with the intensity of the forcings on panel d, e and f. At this scale the tidal induced variability of DDM is highlighted. For zones LH and E, this cyclicity in the DDM appears to be modulated by a seasonal variation, related to higher river discharge but also more frequent winter wave events. Compared to these two areas, zone B appears to be less sensitive to this stormy period and dredging there remains mainly driven by tidal variabilities.

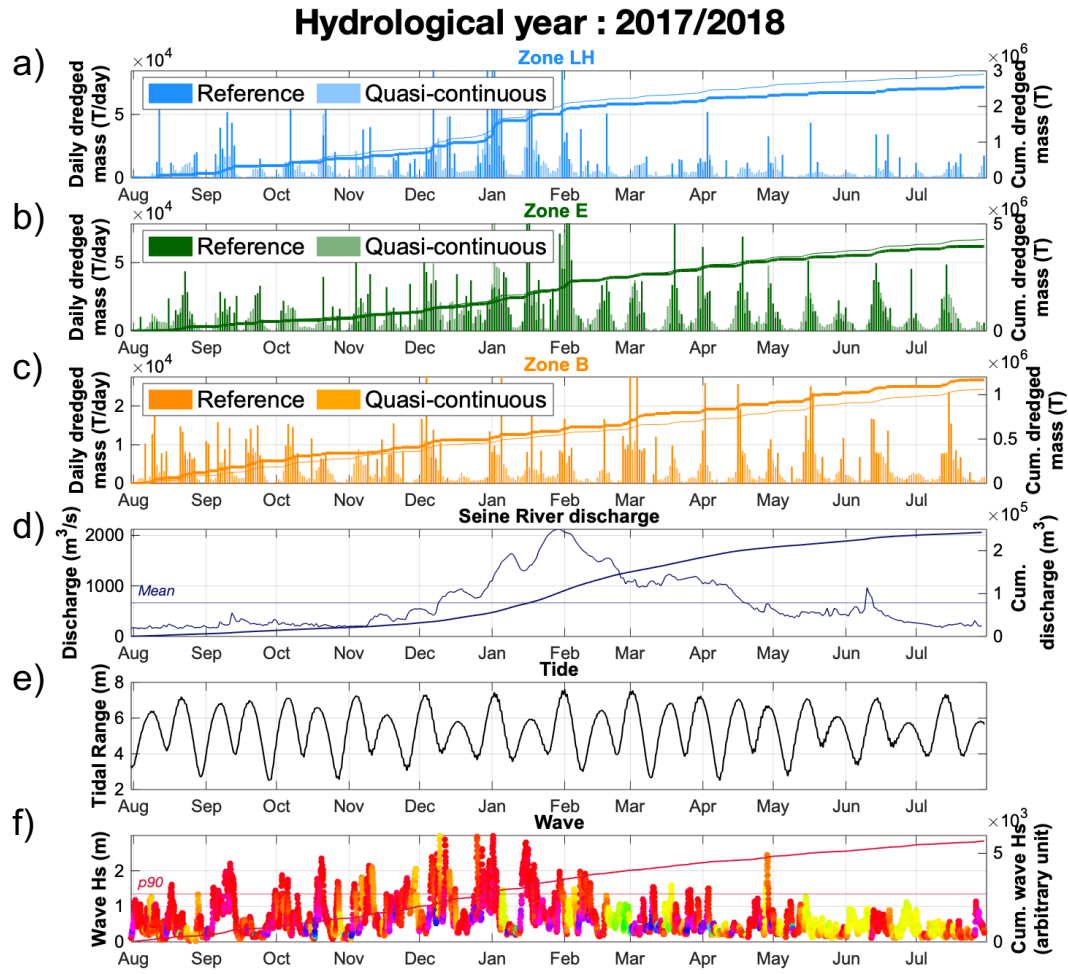


Figure III.18: Daily and cumulated dredged masses along the hydrological year 2017-2018 for the 3 sites zone LH (a), zone E (b) and zone B (c) together with daily and cumulated river discharge (d), tidal range (e) and hourly waves significant height H_s (f). Waves direction are represented by colors as indicated in the circular legend, and the cumulated sum of wave H_s are superimposed on the wave plot in order to highlight seasonal trends. Daily and cumulated dredged masses are provided for the reference run (dark color) and the quasi continuous run (light color).

III.4.4.2 Comparison of the Realistic run and quasi-continuous dredging run

The realistic run differs from the QCD run by only one parameter value: the dredged thickness of consolidated sediment (i.e. $> 300 \text{ kg.m}^{-3}$). In the realistic run dredging is conducted realistically by layers of 50 cm while in the QCD run it is operated by layers of 0.01 m, thus more frequently. Results of both runs over 10 years are comparable. Nevertheless, dredging quantities of both sand and mud present a better agreement with field data in the realistic case.

Figure III.18 presents results of both realistic and QCD runs in terms of dredging over the hydrological year 2017/2018. As anticipated, DDM variability is much smoother and more responsive in the QCD case than in the realistic run. Interestingly, cumulated dredged masses are slightly larger with the QCD run for zones LH and E but not for zone B. Actually Zone B is more upstream and protected from the waves. The downstream zones, which are exposed to waves, might receive transitory sediment deposition, a part of which is likely to be naturally eroded before a thickness of 50 cm has been reached, which would not be the case in the quasi-continuous dredging run. On the contrary, the larger dredged mass observed on zone B in the reference run might be explained by a stronger trapping effect induced by the 50 cm hole constituted after dredging, which does not happen in the QCD procedure.

These observations reveal the limited effect of the dredged thickness on sediment dynamic in the vicinity of dredged areas. In fact, in the realistic case there could be either i/ more dredging as removing a rather large thickness of sediment generates a more effective sediment trap or ii/ less dredging as dredging is operated less frequently, increasing the quantities of few consolidated sediment which can be eroded naturally by strong currents (instead of being dredged).

Overall, the QCD procedure minimizes the accretion needed to trigger dredging and thus enables a better estimation of the relation between the hydrometeorological forcings and dredging. Therefore the quasi-continuous dredging run is used hereafter.

III.4.4.3 Dependence of daily dredged sediment mass and composition on hydro-meteorological conditions

To better estimate relationships between DDM and forcings, each DDM (or fortnightly averaged DDM) and its associated mud fraction can be correlated to each forcing (Figure III.19). Regarding the Seine River discharge, which is measured upstream of the Seine Estuary, and considering the time lag between the river discharge at the measurement location and the response of the estuarine system, especially at the mouth, it has been chosen to average both DDM and river discharge over a period of 14 days. This time averaging filters out the fortnightly tidal variations, and also corresponds to some mean value of the river flow propagation time along the estuary. On the opposite, for investigating responses to tides, each daily dredged mass is considered, in order to characterize the tidal range, and even distinguish periods from neap to spring and spring to neap. By this way a possible hysteresis generated by the delay of deposition after resuspension by spring tidal currents can be sought. Last, for the wave forcing, the maximum wave H_s during the same day as DDM was selected. Considering river discharge and waves height, it is important to keep in mind that there are few occurrences of extreme values (e.g. discharge $> 1250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and wave $H_s > 2 \text{ m}$), so that uncertainties associated to these ranges are higher

III.4.4.3.1 River discharge

Regarding the Seine River discharge, a strong variability is observed but a global DDM increase with discharge can be seen for *zone LH and E*. In addition mud fraction seems to slightly decrease with river discharge: this topic will be further discussed in 4.4. In *zone B*, DDM slightly decreases with river discharge.

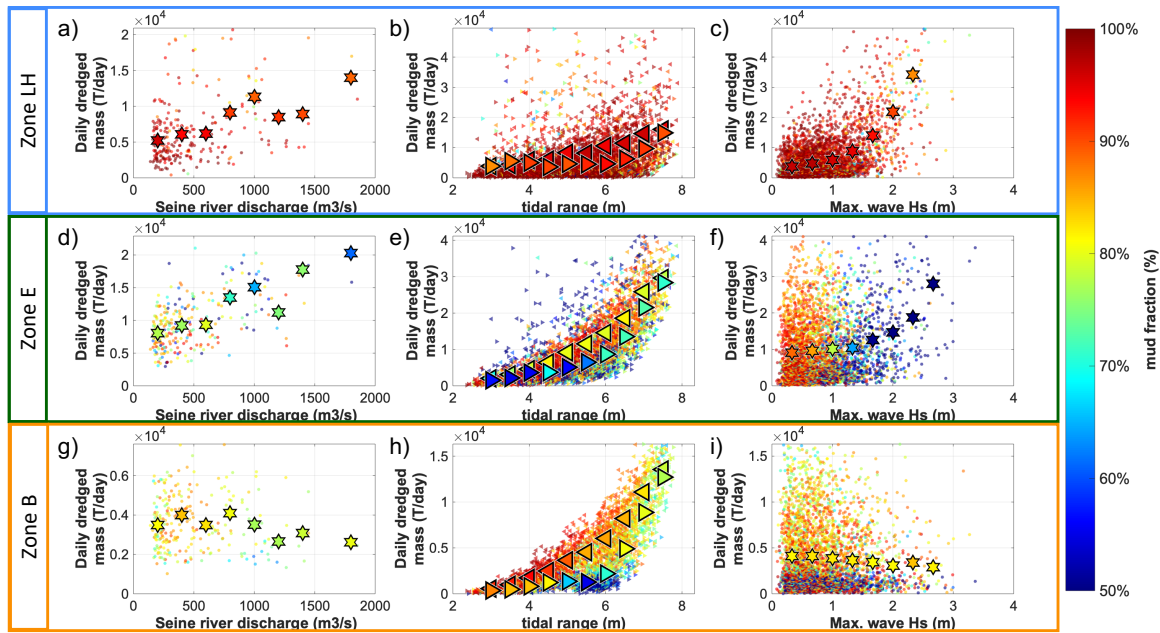


Figure III.19: Daily dredged mass (DDM) and associated mud fraction (color) in response to river discharge, tidal range, and wave conditions for the three zones: LH (blue frame), E (green frame) and B (yellow frame). First column represents the fortnightly averaged DDM vs river discharge, the second column DDM vs tidal range (with distinct symbols according to its sign of variation : > between neap to spring and < spring to neap tide phase), and the third column DDM vs daily maximum wave Hs. Large symbols are used to represent DDM averaged over successive ranges of forcing values.

The variability observed around the trend induced by each forcing is largely explained by the other forcing effects. In fact river discharge presents the smallest temporal variability of the three considered forcings and thus its effects on DDM are likely to be blurred by forcings presenting higher temporal variability. Even if tidal currents are stronger on spring tides, model results demonstrate that counter-intuitively siltation in dredged areas is also higher during spring tide, probably because sediment transport is intensified globally. For example, at 500 m³.s⁻¹ the average DDM in zone E is 10 kT/day but it can reach 35kT/day during spring tides.

III.4.4.3.2 Tide effect

Graphs b, e and h of Figure III.19 focus on the tide induced variability. On these 3 graphs spring to neap (s2n) and neap to spring (n2s) tidal phases are plotted distinctly. Interestingly, a counter clockwise hysteresis is observed for the DDM of all three areas and especially in zone B and E where tidal currents are stronger than in zone LH. These model results also demonstrate that counter-intuitively siltation in dredged areas is higher on spring tides when currents are larger, because sediment transport is intensified globally.

Dredged sediment in zone LH stays very muddy during the neap/spring cycle with a slightly higher mud content for intermediate tidal range (+10%), while in zone E and B, the mud fraction in dredged sediment can vary up to 40% at a fortnightly scale. The maximum mud fraction in zone E is observed during the s2n phase when tidal range is about 4 to 5 meters, while in zone B the mud fraction is maximum for the smallest tidal range..

III.4.4.3.3 Storms effect

it is not possible to study their respective effect using the realistic retrospective simulation (Figure III.20). In fact high wind speed, in particular from west, are associated with high wave conditions. Therefore storm effects are analyzed in two steps, i/ by analyzing the 10 years hindcast simulation considering

wave H_s as the indicator of stormy conditions and ii/ by using a theoretical simulation in which wind could contribute to wave generation, but was not accounted for in the momentum equation: by this way, there was no effect of wind on circulation.

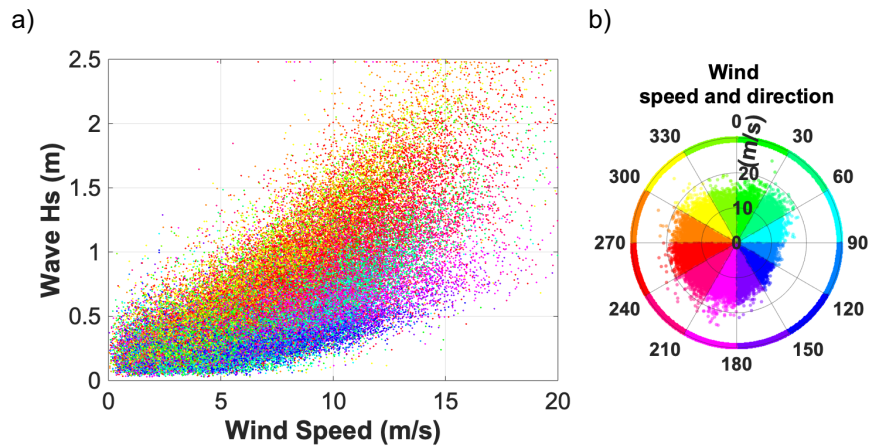


Figure III.20: a). Wind and waves correlation during the simulated period. b) Wind speed and direction during the simulated period. Waves and wind data were respectively extracted at zone V and point W specified on Figure III.14 (cf. section 3.4).

Storms affect zone LH and E which are directly exposed to waves. In these two zones, waves appear to increase dredging in a non-linear way (Figure III.19.c and f). The wave effect is more spectacular in zone LH, where for instance the DDM associated with 2 m waves is 4 times higher than with 1 m waves while the corresponding ratio is only 2 for zone E. Such non-linearities suggest that a unique storm is likely to generate intense dredging requirement, but the detailed infilling process when the storm is passing by was not investigated, being out of the scope of this study.

In zones LH and E, the dredged sediment nature also varies with wave height: mud fraction decreases with wave height. This feature is particularly visible at E, where the respective contributions of sand and mud are more balanced.

Wind effect

A specific simulation of the hydrological year August 2017 to August 2018 was set up using the QCD procedure. In this test case, wind effect on waves generation was considered so that waves conditions are the same as in the QCD run, but wind effect on circulation was not. The comparison of these two simulations enables to study the impact of wind induced circulation on dredging. Results of this test case present a significant increase in zone E where dredged masses are 57% larger without wind-induced circulation (Figure III.21), corresponding to a 70% increase of dredged mud and 33% increase of dredged sands. Interestingly, these differences are all the more important as wind speed increases, demonstrating the importance of wind induced circulation on sediment dynamics. Given the correlation between westerly winds and waves conditions it is plausible that these winds enhance flood currents and thus favor upwards and northward fine sediment transport. This is coherent with Le Hir et al. (1985) who demonstrated that in the eastern Bay of Seine, westerly winds induce a northern flow component around zone E (but probably not in zone LH which is located right south of the coast). This additive northward component hinders mud deposition in zone E. No significant changes were observed in zone B dredging.

Hydrological year : 2017/2018

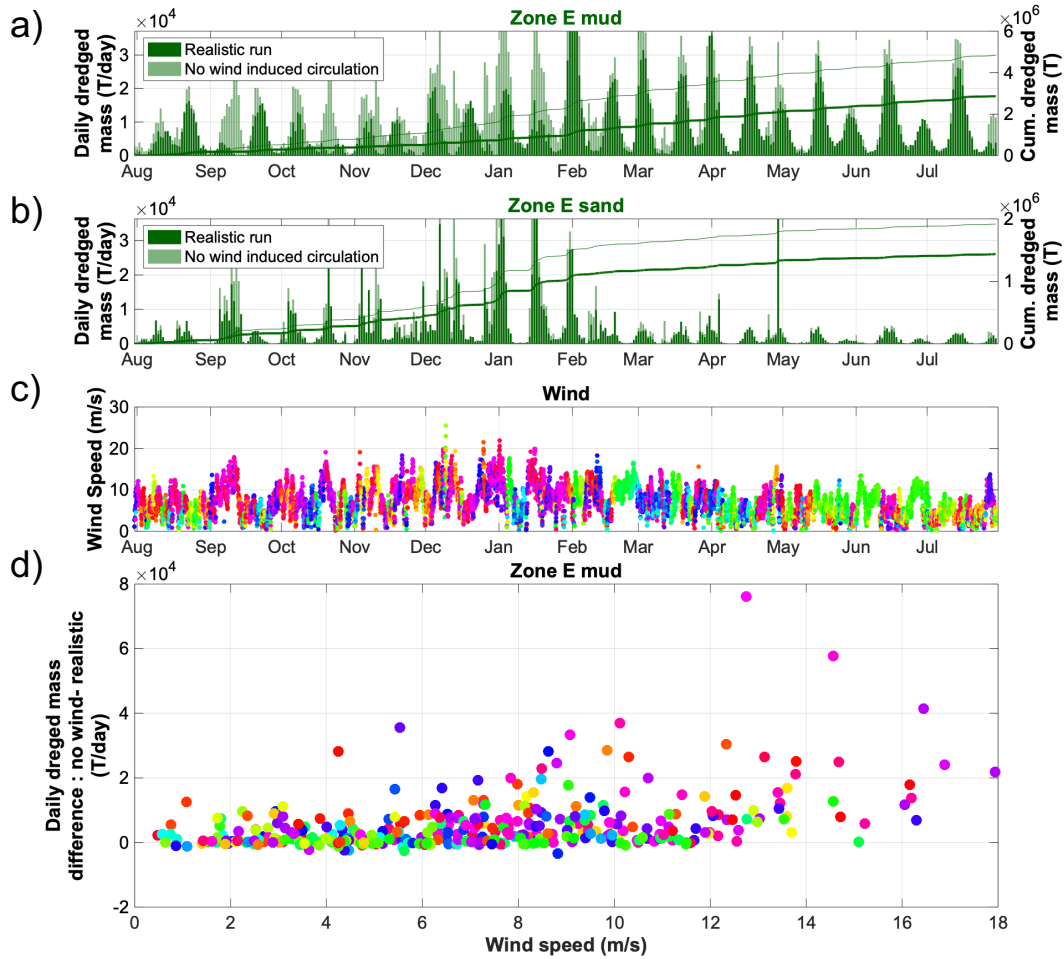


Figure III.21 : Effect of wind-induced circulation on dredged masses during the hydrological year 2017-18. (a) daily and cumulated dredged mud in zone E, computed with (dark green) or without (light green) wind effect on circulation; (b) daily and cumulated dredged sand in zone E, computed with (dark green) or without (light green) wind effect on circulation; (c) wind speed and direction (color, same code as in Figure III.21.b);. d) difference between total DDM computed in zone E without and with wind effects on circulation, versus wind speed and direction (color).

Finally, the three studied dredged areas present three contrasted sensitivities to the main forcing:

- Zone LH appears to be primarily affected by waves
- Zone E dredging is affected by all forcings in terms of mass and sediment nature.
- Zone B seems to be mainly related to tides (tidal range and phase of spring/neap tidal cycle)

III.4.4.4 Distinctive responses of mud and sand dredged masses to hydro-meteorological forcings

To further analyze DDM variabilities, mud and sand are being studied separately : Mud (resp. sand) dredging designates the muddy (resp. sandy) part of the dredged quantities. For each zone DDM are averaged according to different ranges of each of the three studied forcings. In relevant cases, second order polynomial regressions between each DDM and each of the three forcings - river discharge, n2s and s2n tides, and waves (including wind effects) - are established separately for sand and mud (Figure III.22). Aside from the polynomial regression, it is interesting to focus on the associated coefficient of

determination (R2) to have a qualitative insight on the effect of the considered forcing on DDM (Table III.1).

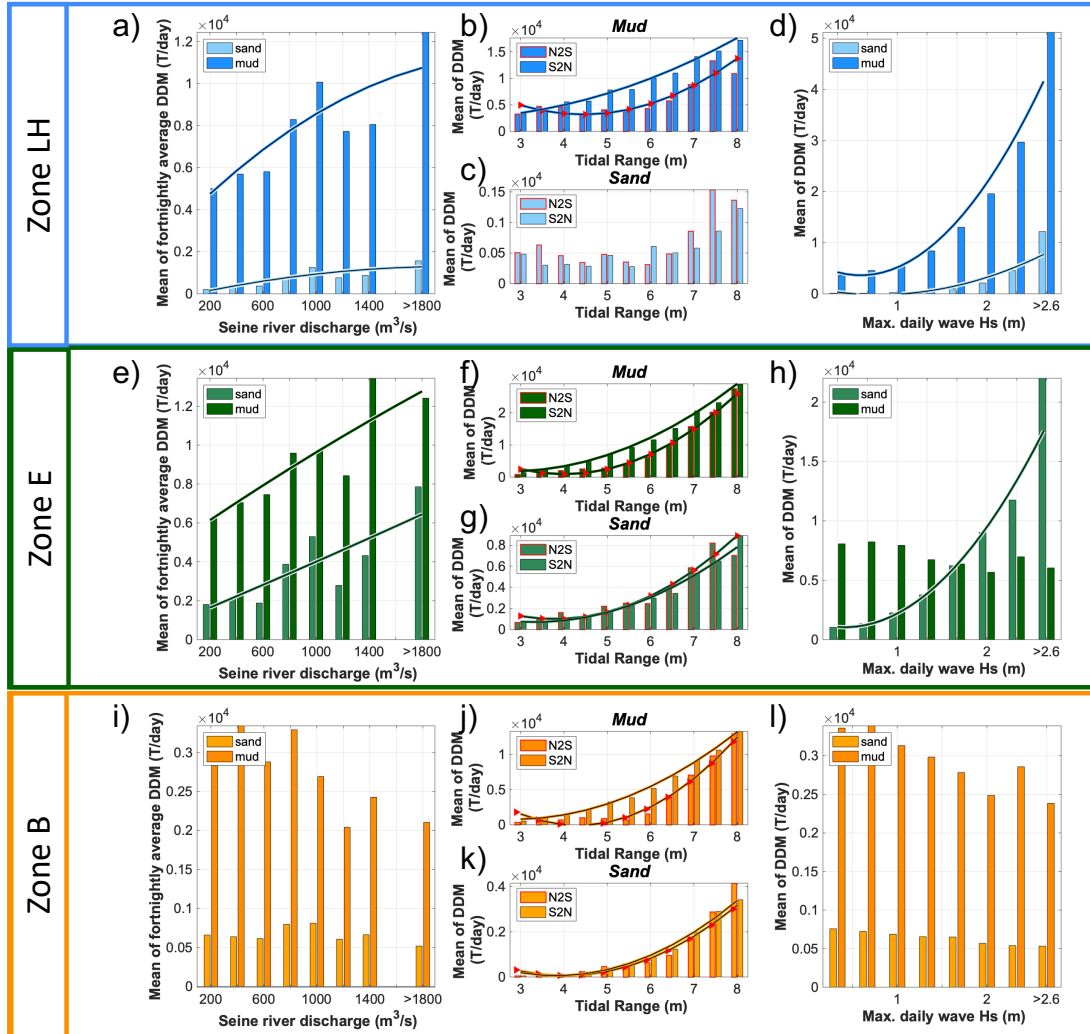


Figure III.22: Relations between daily dredged masses and forcing using the same layout as Figure III.19. Bars represent the DDM of sand (light color) and mud (dark color), averaged for different ranges of the three forcings (abscissa): river discharge, tidal range and wave intensity. Lines represent the polynomial regression over the whole data set (i.e. not the class-averaged DDM represented by the bars). Polynomial regressions are not represented when the associated coefficient of determination R^2 is close to zero (table 1).

III.4.4.4.1 Zone LH

In zone LH, correlations between maximum daily wave Hs and DDM demonstrate that theoretically waves explains 42% and 43% of DDM variability for mud and sand respectively. This representation also highlights that sand dredging at LH only occurs under stormy conditions. High river discharges slightly increase dredging needs but in this case the polynomial regression only explains 12% and 15% of DDM variability for mud and sand respectively. Given the shape of the correlation and the uncertainties associated with the higher river discharge classes, barplots of Figure III.22.a show that DDM at LH does not vary with the river flow below 600 m³.s⁻¹, but increases significantly above, potentially revealing two regimes of sediment dynamics in the vicinity of zone LH (cf. discussion in section 5). Tides only contribute to the variability of mud DDM, but in a lesser extent ($R^2=0.08$).

III.4.4.4.2 Zone E

In zone E, the second line of Figure III.22 illustrates that sand and mud DDM present a similar sensitivity to river discharge but distinctive response to tidal range and waves. On this site, both sand and mud dredging increase almost linearly with river discharge, the associated regressions explaining almost 20% of DDM variabilities. Dependencies to tidal range and in particular the distinction between n2s and s2n period is interesting on this site as it demonstrates that sand dredging increases with tidal range similarly during s2n and n2s while mud dredging presents an hysteresis. Regressions between DDM and tidal range explain respectively 60% and 13% of mud and sand dredging variability, proving that mud deposition in zone E is mainly related to the tidal dynamic. Regarding waves effect on DDM at zone E, this analysis shows that waves are the main driver of sand accretion as the regression explains 40% of sand dredging variability. On the contrary, mud dredging appears to be independent of wave conditions but as shown in the previous section this might be due to the circulation induced by winds (accompanying wave episodes) which transport and maintain in suspension the mud eroded by waves.

III.4.4.4.3 Zone B

In zone B, DDM variabilities of both sand and mud appear to be mainly explained by the tidal range variations. The regressions between DDM and tidal range (s2n and n2s) explain almost 75% of both mud and sand DDM variabilities. Also, as observed in zone E, sand dynamic affects dredging similarly in s2n and n2s phases, while mud DDM presents an hysteresis. Otherwise no significant correlation between DDM and both river discharges and waves conditions are demonstrated (Table III.1). Nevertheless, bar plots show that increases in river discharge or wave condition tend to decrease mud DDM.

Table III-1: Coefficient of determination R^2 associated to the second order polynomial regression between DDM and river discharge, tidal range and wave Hs. Regression are shown on Figure III.22. R^2 associated to tidal range is the average of the R^2 associated to N2S and S2N polynomial regressions.

		River Discharge	Tidal Range	Waves
Zone LH	mud	0,12	0,08	0,42
	sand	0,15	0,00	0,43
Zone E	mud	0,20	0,62	0,00
	sand	0,18	0,13	0,40
Zone B	mud	0,02	0,73	0,00
	sand	0,00	0,74	0,00

III.4.4.5 Toward a quantification of daily dredged masses: parametric model set up

When the coefficients of determination of the polynomial regressions set up in the previous section are not too low, it is conceivable to describe DDM (resulting from the process based model) as a polynomial function of the related forcing. Such a parametric model remains dependent on the validation and predictive capacity of the process-based model, but can be interesting from an operational point of view, as it can provide straightforwardly some quantification of dredging needs, without running the process-based model. In addition it would be likely to be used by stakeholders or by port authorities, without any required skill for running sophisticated models. According to the coefficients of determination listed in table 1, such a modeling exercise was attempted for zones E and B, but for conciseness purpose only zone E is presented hereafter.

For mud dredging in zone E, a first regression is fitted between DDM_{mud} and TR, distinguishing $n2s$ and $s2n$ phases. Then residuals are correlated to river discharge, following a second order polynomial function. The resulting parametric model writes:

$$DDM_{mud} = 1.56 \cdot 10^6 TR^2 - 1.25 \cdot 10^7 TR - 0,23 Q^2 + 4.49 \cdot 10^3 Q + 2.37 \cdot 10^7 \text{ during } n2s \text{ phase}$$

$$DDM_{mud} = 9.78 \cdot 10^5 TR^2 - 5.34 \cdot 10^6 TR - 0,23 Q^2 + 4.49 \cdot 10^3 Q + 6.71 \cdot 10^6 \text{ during } s2n \text{ phase}$$

where Q is the fortnightly averaged river discharge.

Regarding sand dredging in zone E, it appears that dredging is more sensitive to waves than to tidal range (with R^2 of 0.4 and 0.13). However the regression with tide is so clear (Figure III.22.f and g) and the tidal forcing is so periodic and predictable that tide was selected as the first forcing to define the regression with. Here too, the two phases of the hysteresis have been considered apart. Then the residual (difference between the initial DDM and the approximated tide-induced DDM) is correlated to the wave index (representative H_s in the mouth). Last, the new residual is correlated to the third forcing, here river discharge. The full parametric model can be expressed:

- during neap to spring tidal phase:

$$DDM_{sand} = 4.47 \cdot 10^5 TR^2 - 3.38 \cdot 10^6 TR + 3.44 \cdot 10^6 H_s^2 - 2.89 \cdot 10^6 H_s - 0.42 Q^2 + 531 Q + 5,99 \cdot 10^6$$

- during spring to neap tidal cycle:

$$DDM_{sand} = 3,25 \cdot 10^5 TR^2 - 2.16 \cdot 10^6 TR + 3.44 \cdot 10^6 H_s^2 - 2.89 \cdot 10^6 H_s - 0.42 Q^2 + 531 Q + 4,13 \cdot 10^7$$

where H_s is the representative wave significant height. Figure III.23 presents the performance of this parametric model.

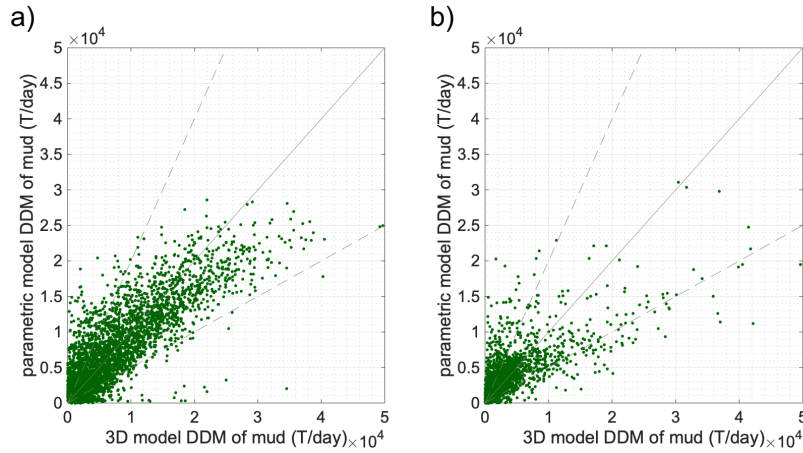


Figure III.23: Daily dredged masses of mud (a) and sand (b) at zone E computed with the parametric model vs total DDM provided by the process-based model, for the 9 simulated years.

On Figure III.23, targeted results are represented by the line 1/1, while dashed lines represent the limits between which the parametric model restitutes the results of the process-based model within a factor 2. The parametric model performs relatively well in both cases although large DDM values tend to be underestimated. It is reminded that possible effects of transitory stages of each forcing, as well as their history, are not accounted for in the proposed simple parametric model. The underestimation of large DDM can come from the impossibility for the model to account for i/ effects of cumulated intense forcing in relation with seasonal trends and ii/ nonlinear DDM increase when several influent forcings occur simultaneously. To tackle with interactions between hydro-meteorological forcings, a multivariate nonlinear analysis should be better appropriate, but is out of the scope of the present study.

III.4.4.6 Weight of each forcing at the annual time scale

Knowing the variability of dredging activity in the Seine Estuary, it is interesting to assess how much each forcing contributes on average to the annual cumulated dredged masses, when its own probability distribution is accounted for.

Regarding the Seine River discharge effects, Figure III.24.a shows that even if dredging in zones LH and zone E increases with the Seine River discharge, almost 70% of dredging is achieved with moderate discharge between 100 and 700 m³.s⁻¹. Nevertheless due to the sensibility of these two sites to high river discharges it appears that discharges above 700 m³.s⁻¹, observed 20% of the time, induce 30% of dredged masses over a long period (here 10 years).

While Figure III.22 illustrated the strong relationships between dredging in zones E and B and tidal range, Figure III.24.b shows that these relations have an important impact over the whole simulated period, all the more that the tidal amplitude distribution is not Gaussian. Almost $\pm 70\%$ of dredging are executed during spring tides with tidal range higher than 6 m which corresponds to 40% of time. In zone LH, even if the relation with tidal range is not so pronounced, $\pm 50\%$ of dredging is achieved during these 40% of time.

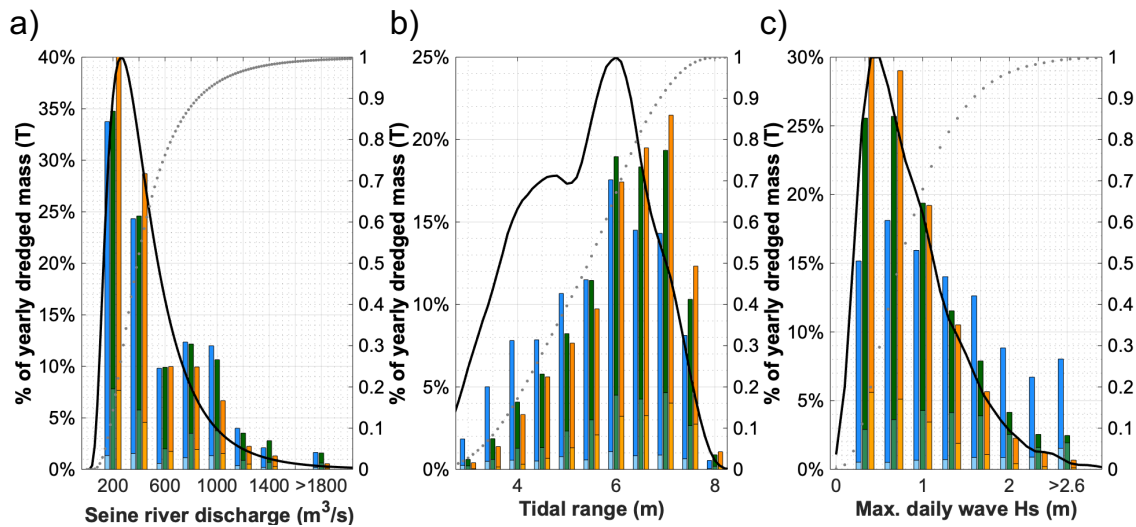


Figure III.24: Total distribution of dredged masses of sand (light colors) and mud (dark colors) versus hydro-meteorological forcings : a) river discharge, b) tidal range and c) maximum daily wave Hs, over the 10 years simulated period. Colors represent the dredged zone : LH in blue, E in green and B in yellow. The probability density function of each forcing during the simulated period is represented as a solid black line and the associated cumulative density function as a dashed gray line (right axis). Each probability density function is scaled to get its maximum = 1 as the cumulative density function.

Concerning the wave impact on the long-term dredging activity, results presented on Figure III.24.c highlight the major role of waves on zone LH dredging. Actually almost 60% of dredging activity is due to waves higher than 1.3 m which are observed only 20% of time. In zone E wave impact is lower but still 30% of dredging activity is due to these stormy periods. Furthermore, this representation illustrates the independence of dredging in zone B to high waves, as the distribution of DDM exactly follows the probability density function of waves.

III.4.4.7 Inter-annual variability

As the storm probability and the hydrological cycle are likely to vary along successive years, it is interesting to focus on the interannual variability. In fact yearly dredged masses variability can exceed

50 % during the simulated period (Figure III.16). For example in zone E, 4.5 MT were dredged during the hydrological year 2014/2015, but only 2.8 MT in 2010/2011.

To understand these interannual variabilities, the 9 hydrological years represented on Figure III.17 were characterized by their annual mean river discharge, which provides an indicator of the flood intensity, and by the percentile 95 of wave Hs to represent the intensity/frequency of the storms. Figure III.25 illustrates the variability of dredged masses in the 3 zones as a function of these indicators. The yearly-averaged Seine River discharge vary up to $\pm 40\%$ around its average of $488 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ during the 9 hydrological years. Storms also present an important variability, 40 % for the percentile 95 of wave Hs.

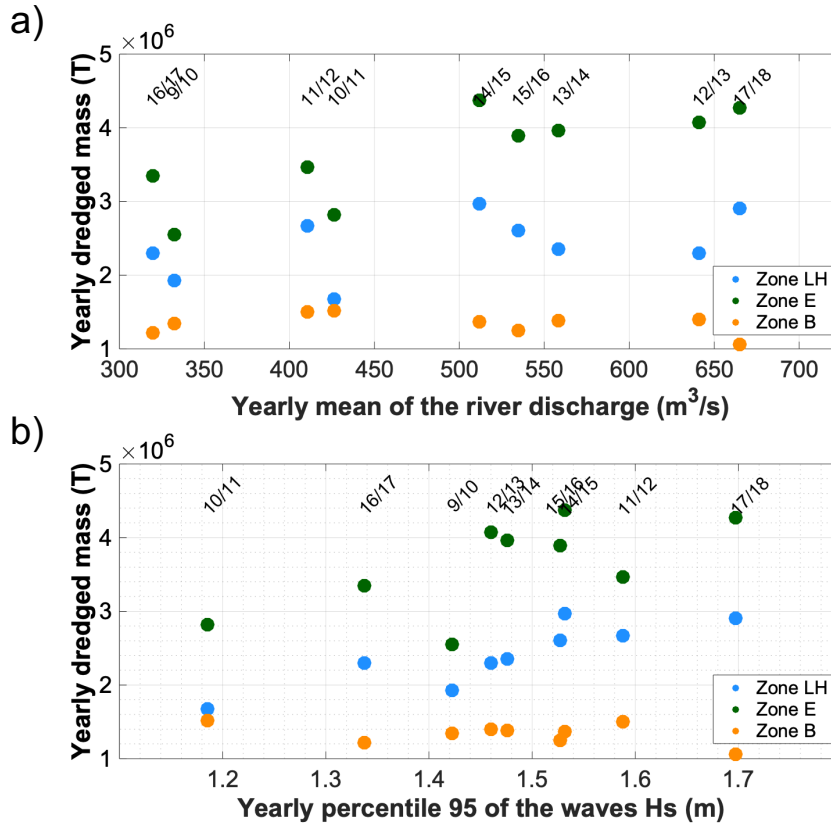


Figure III.25: Interannual variability of the hydrometeorological forcings and yearly dredged masses for the 9 hydrological years from august 2009 to august 2018. Hydrometeorological forcings are characterized by the yearly mean river discharge (a) and the yearly percentile 95 of the wave Hs (b). Zone LH, E and B are represented using blue, green and orange resp. Hydrological years are indicated at the top of each figure, using the last digits of concerned year (for instance 11/12 for the year mid-2011 / mid-2012).

In zone LH this representation highlights the important role of storm on the dredging masses as the highest yearly percentile 95 of waves Hs are associated to the highest yearly dredged mass (120% of the mean annual dredged mass) (Figure III.25.b). At zone E, the highest annual dredged masses are associated with the highly energetic years with important flood and storms. Previous results indicated that the variability of dredging in zone B was few related to waves and river discharge. However, it is interesting to note that during the year 2017-2018 which is the most intense year for both river discharge and waves conditions, dredging in zone B is minimum, in accordance with the slight DDM decrease in response to both river discharges and wave conditions observed on Figure III.22.

III.4.5 Discussion

III.4.5.1 Performance of the modeling exercise

Dredged masses were evaluated by using a process-based model and assigning a navigation depth in specific areas, as in reality. This means that theoretically there is no specific parameter added to simulate dredging. The validation of dredged quantities (both masses and sediment composition) constitute an additional validation of the global hydro-sedimentary model.

In the case of the Seine Estuary, dredging simulations are actually validated, except for the sand extracted in one of the 3 major areas of dredging (zone B). On this site, the simulated sand mass dredged appears to be 3 times smaller than in-situ, and does not vary seasonally although Rouen port authority observes an increase in winter. Actually this concentrated area of deposition in the navigation channel is likely to be nourished by the so-called Northern Channel, north of the northern submersible dyke (Figure III.13), which communicates with the navigation channel through a breach very close to the dredging location. This Northern Channel is characterized by flood dominance and an eastward sand transport (e.g. Le Hir et al., 2001). We think that the discrepancy between model and field observations could come from the crude resolution of our model in this area characterized by strong bathymetric gradients. However, the difficulty to simulate sand deposition in this area was also reported by Walther et al. (2015) who used a finite element model and a computational grid with higher resolution.

Regarding the methodology for studying the variability of dredging needs and its relation with forcing, an alternative strategy could have been chosen. For instance and for the sake of simplicity, series of short term runs with specific tide, wave, wind and river discharge conditions, possibly steady, could be processed. But such simulations would have been far from reality, as nonlinear effects of forcing addition and effects of transitional hydro-meteorological environments are likely to strongly influence sediment transport and dredging needs.

The 10 years duration of the runs allows to look for some effect of the morphological change on dredging needs. This has not been investigated so far, and any variation of dredged quantities on the long term should be interpreted cautiously, because of a possible consequence of the initial sediment condition. For instance, in zone E, the increase of dredged masses along the first 5 years for both sand and mud (Figure III.16) can be induced by a change of surficial sediment in the surroundings. These features may also hinder the interpretation of the inter-annual variability as developed in section 4.7.

III.4.5.2 Links between dredging and sediment processes

A number of dredging results are straightforwardly linked to sediment processes, which are different for sands and mud.

Sand deposition is mainly controlled by the divergence of horizontal fluxes. In a macrotidal environment, tidal asymmetry may play an important role. Such process has been evoked for zone B right upstream the northern channel, and is clearly relevant for sand dredging in zone E, where a strong gradient of tidal residual sand transport tendencies, computed as the integration of u_5 along a tidal cycle, is predicted (Le Hir et al., 2001): upstream zone E, the residual flow and sediment transport is clearly seawards, as a result of the submersible dykes, while downstream the trend of residual sediment transport is negligible. Net deposition results in between, in deeper parts that correspond to the maintained navigation channel, in zone E. The process may be reinforced by the estuarine density-induced circulation which takes place in the same area on high river discharge (Schulz et al., 2018). The latter process explains the positive correlation of sand deposition with river discharge illustrated in Figure III.22.e.

Muddy particles have a much lower settling velocity so that their transport in suspension lasts longer. As a result, mud transport is more influenced by wind-induced currents: this is clearly illustrated by Figure III.21 which shows that when the effect of wind on circulation is neglected, although there is no significant difference on sand deposition in zone E after stormy periods, mud trapping is different in the

same area: even if resuspension remains strongly controlled by waves, when wind-induced circulation is accounted for, it deviates the trajectory of mud particles and significantly reduces mud deposition in zone E.

Still because of the low settling velocity, mud transport is also influenced by time lags between resuspension and sedimentation. This results in a marked hysteresis during the tidal cycles, and at the time scale dredged masses are explored, during the fortnightly tidal cycle. On spring, resuspension is maximum, inducing an increase of concentration, and a maximum deposition in dredged areas few days later, as clearly shown on Figures III.22.b, f and j for the 3 dredged zones. On the opposite, sand trapping (and dredging) is maximum on spring tides (Figures III.22. c, g and k), in phase with higher resuspension.

A similar hysteresis cycle also occurs for the Seine estuary ETM as described by Grasso et al. (2018). Actually the ETM is located in the vicinity of zone B for intermediate river discharges, and close to zone E (then also closer to zone LH) for high river run off, but upstream of both zones during low river discharges. Then one can wonder whether the proximity of the ETM, with its own hysteresis, is likely to influence mud trapping in dredged areas. According to Figure III.26, this seems the case. A quasi-linear correlation between mud DDM and ETM mass is observed for zones E and B, which is understandable as both quantities strongly depend on the tidal range. But the ratio between mud DDM and the ETM mass depend on the tide-averaged position of the ETM. For instance, at zone E, this ratio is much higher when the ETM is located downstream (yellow and red points on Figure III.26.b), then close to the dredged zone. This feature is the simple explanation of the increase of mud dredging with river discharge demonstrated on Figure III.22.d.

Similarly, at zone B (Figure III.26.c) mud DDM is maximum when the ETM is located around pk355, in the vicinity of zone B, and minimum when the ETM is downstream. Regarding zone LH, the increase of mud DDM is also clear when ETM is downstream (high river discharge , in Figure III.22.a), while DDM seems independent of the ETM mass in other cases (Figure III.26.a).

In conclusion, the presence of the ETM seems to impact mud dredging, all the more that the simulated ETM mass is in the same order of magnitude as total dredging in only one day for all zones: about 60 000 tons on spring tide, if we except largest mud DDM in zone LH which are generated by waves (Figure III.26).

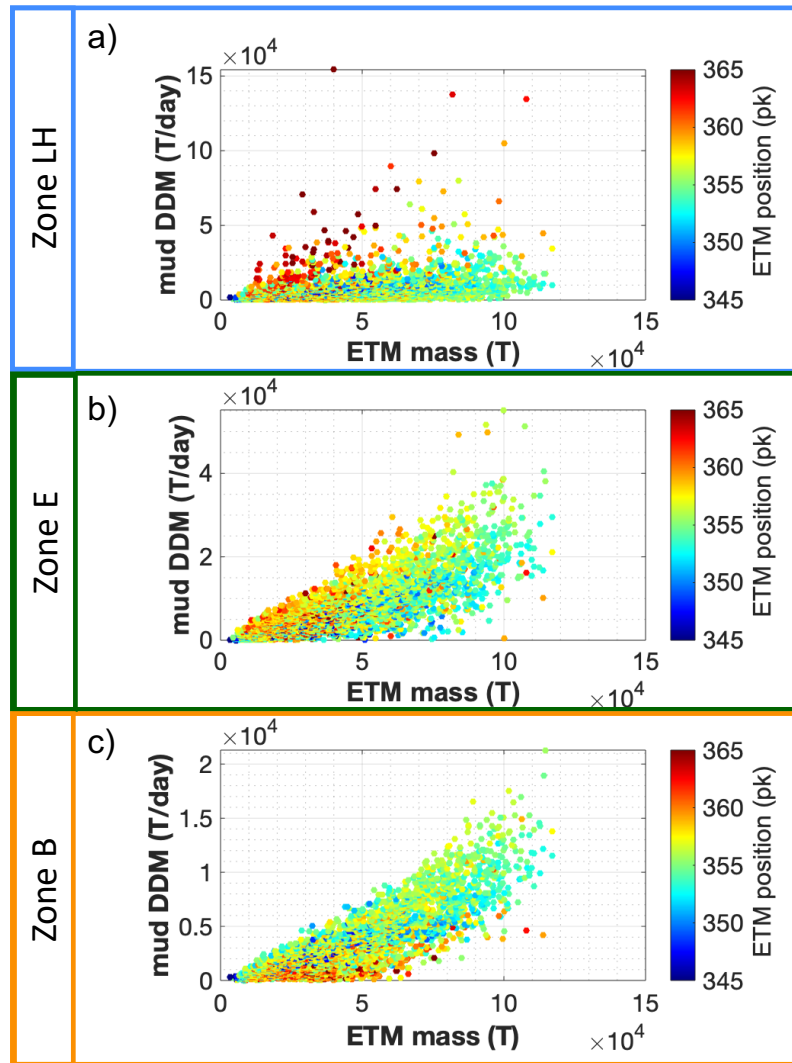


Figure III.26: Relation between the ETM (daily maximum mass and daily median position) and mud DDM simulated on the three zones: a) zone LH; b) zone E; c) zone B. Position units (pk) are distance from Paris (in km), represented on Figure III.13.

III.4.5.3 Role of forcing concomitance

In section 4.3.3, we investigated the co-occurrence of high waves and influent winds on dredged masses. Actually, these two forcings are somehow correlated, and their common effect is quite different from the effect of each forcing. Among the dominant forcings, another concomitance may occur: the temperate and oceanic climate in the region of the Seine Estuary often generates strong rains in the watershed, accompanying storms with westerly winds and waves in the Bay of Seine. Results prove that when river discharge is high, waves are more often high, and these occurrences correspond to maximal DDM in zone E, demonstrating an effect of the forcing concomitance on dredging. On the other hand, a reduction of DDM is observed at zone B more probably due to the downwards shift of the ETM than to a reduction of sediment trapping during storms.

III.4.6 Conclusions

This study demonstrates the capacity of the Mars3D-Mustang-WWIII process-based model of the Seine Estuary, developed by Grasso et al. (2018), Mengual et al. (2020) and fitted in the frame of this study, to reproduce the Seine Estuary functioning and in particular its maintenance dredging over 10 years. In fact, the model which considers real forcings (river discharge, tides, wind and waves) simulates a realistic ETM and reproduces the 3 main features of dredging:

i/ continuous dredging needs;

ii/ localization at the estuarine mouth, with more than 90% of dredging concentrated in the three areas discussed in section 4 and

iii/ dredged sediment composition varying with space and time, as the model is considering 5 different sediment classes.

Two types of simulations were conducted, considering two different dredging thickness. The level of validation is similar for both runs, but the realistic one (dredging thickness of 50 cm) is in better agreement with field data. Differences between the realistic and QCD run (dredging thickness of 1 cm) demonstrated that the morphological effect of each dredging operation are not affecting dredged quantities significantly.

Depending on their exposure to waves and currents, the three studied dredging zones have different sensibilities to the considered forcings. Dredging requirements in zone LH are mainly induced by storms. In zone E, sand accretion is primarily related to storms but also to river discharges and tidal range. However on this same site mud deposition is firstly related to tidal conditions and then to river discharges, but is independent of storms. In order to distinguish wind and waves contributions, which are correlated in the Seine Estuary, a theoretical simulation that considers wind effect on waves but not on circulation was set up. Comparisons of this theoretical test with the regular run over one year demonstrates that during storms, resuspended mud is transported out of zone E by the wind induced circulation, explaining a low effect of storms on mud dredging in this area, in opposition to sand dredging. The nice relationships between DDM and forcings allow us to propose a parametric polynomial model which straightforwardly gives a reasonable estimation of the daily dredging needs in response to forcing values. In zone B, mud deposits appear to be mainly induced by tidal dynamic, while sand accretion is underestimated by the model.

In relation with the low mud settling velocity and the resulting delay between erosion and siltation, mud dredging on the three zones presents a counter clockwise hysteresis in response to the tidal range fortnightly cycle. Also these dredging zones which are in the vicinity of the ETM are affected by its dynamic. On each site mud DDM increases when the ETM is nearby, which explains the mud dredging increase (resp. decrease) in zones LH and E (resp. zone B) associated to high river discharges that shift the ETM downstream. Moreover, in zone E and B which are in the direct vicinity of the ETM, dredging increases almost linearly with the ETM mass which constitutes a major source of fine sediment.

Regarding sand dredging in zones exposed to waves (zone LH and E), it appears to increase in a quadratic way with wave H_s , in analogy with the resuspension rate. However, sand deposition in dredged areas may also be dependent on the river discharge, as the latter influences the location of the near bottom density-induced circulation which takes place in estuaries.

Overall, this analysis shows that dredging increases with the resuspension induced by each forcing. It demonstrates that at annual scale most of the dredging requirements are induced by the highest intensities of the considered forcings. Finally, given each forcing temporal variabilities and the potential co-occurrences of high river discharges and storms, dependencies between dredging and hydrometeorological forcings can lead to 50% interannual variability of dredging requirements.

In terms of perspective, the model is being used (1) to analyze the role of maintenance dredging in the physical functioning of the Seine Estuary, regarding suspensions, surficial sediment evolution and morphological trends, and (2) to test the effect of alternative dredging strategies (e.g. use of different dumping site). The methodology we set up for the Seine Estuary in order to predict dredging

requirements according to natural forcing could be applied in other areas submitted to extensive maintenance dredging

III.5 Rappel des conclusions du III.4

Pour quantifier les relations entre les forçages et les dragages, une configuration spécifique du module de dragage dans le modèle a été mise en place (cf. section III.3.3). Cette version du modèle appelée "Quasi Continuous Dredging" se distingue de la version de référence par l'épaisseur de sédiment draguée qui est de 1 cm contre 50 cm pour la version de référence (et dans la réalité). Cette faible épaisseur diminue la quantité de dépôt nécessaire au déclenchement d'un nouveau dragage, ce qui conduit à des dragages plus fréquents et surtout plus réactifs aux variations induites par les forçages. A l'échelle annuelle, les deux versions présentent un niveau de validité équivalent démontrant la quasi indépendance des quantités totales draguées vis-à-vis des épaisseurs de sédiments draguées à chaque fois.

L'analyse présentée dans la section III.4 illustre les relations entre les dragages et les forçages pour les 3 principales zones de dragages de l'embouchure de la Seine : Le secteur du port du Havre (Zone LH), l'Engainement (Zone E) et la Brèche (Zone B). Ces trois sites présentent des dynamiques distinctes :

- i) La zone LH est particulièrement sensible à la houle : 75 % des dragages sont réalisés suite à des épisodes de houle ($H_s > 1$ m).
- ii) La sédimentation à l'engainement est dépendante de chacun des forçages, mais il est intéressant de noter que les fractions sableuse et vaseuse répondent différemment. Les dragages de sables sont principalement induits par les vagues (houle et mer de vent) et par l'accroissement du débit de la Seine. Alors que la sédimentation vaseuse apparaît comme principalement liée à la dynamique tidale et au débit de la Seine. Une simulation spécifique négligeant les effets du vent sur les courants a par ailleurs permis de montrer qu'en condition de tempête (vent et houle d'Ouest), l'absence de dépôt vaseux pouvait être expliquée par une advection des sédiments fins en suspension par les courants générés par le vent.
- iii) A la Brèche, la variabilité des dragages de sable et de vases est quasiment uniquement corrélée à l'amplitude de marée. Cependant, l'analyse des dragages de sables est sujette à caution dans la mesure où les dragages de sable simulés varient peu, et ne représentent que 30 % des dragages réalisés *in-situ*.

D'une manière générale, les dragages augmentent avec le remaniement sédimentaire induit par l'augmentation de chacun des forçages. La mise en regard des masses draguées quotidiennement avec la dynamique du bouchon vaseux complète ce diagnostic et montre que pour les deux zones exposées au bouchon vaseux (Zone E et B), les dragages sont maximaux durant les périodes où la masse en suspension est maximale (vive eau et/ou déchet). De manière analogue à la masse du bouchon vaseux, les quantités de vases draguées présentent une hystérésis selon le cycle vive eau morte eau. Celle-ci représente une inertie de la masse en suspension par rapport à l'amplitude des remaniements sur le fond liés à la marée : les quantités en suspension augmentent rapidement durant le revif, tandis qu'elles diminuent plus lentement avec la sédimentation lors de la phase de déchet, en raison de la faible vitesse de chute des vases. Par ailleurs la position du maximum de turbidité, principalement corrélée au débit, (Grasso et al., 2018) a également un impact sur les dragages qui augmentent avec la proximité du maximum de turbidité, et déphase ainsi les dragages à la Brèche (dragages plus importants en étiage) et ceux de l'Engainement (dragages plus importants en crue). Les zones du GPMH ne sont pas directement exposées au bouchon vaseux mais le sont aux re-suspensions induites par les tempêtes. Étant donné la saisonnalité similaire des tempêtes et des débits (Figure III.26.a), ces re-suspensions peuvent être aussi, et pour partie, associées à des matériaux sédimentaire issus de l'expulsion du bouchon vaseux. Dans l'ensemble, la variabilité du débit de la Seine, et ses effets sur la position du bouchon vaseux et sur la circulation résiduelle estuarienne, déplace les zones préférentielles de dépôts. Les forts débits sont ainsi favorables aux dragages des zones E et LH situées à l'aval.

Afin d'étudier l'effet des dragages/clapages sur la dynamique du système, il était important d'identifier les différentes échelles temporelles de variation des dragages. Les résultats développés dans le III.4 révèlent des dragages quantitativement liés aux cycles VE/ME, avec des dragages maximaux pour les forts marnages (Figures III.19 et III.22). A cette échelle, l'analyse ne montre pas de longue période sans dragage (Figure III.16). A l'échelle saisonnière, les besoins en dragage sont maximaux durant les périodes hivernales et/ou de forte agitation, en lien avec la variabilité des débits et des conditions météo-océaniques. A l'échelle interannuelle, la variabilité des débits de crue et des tempêtes hivernales peut

conduire à une variabilité des quantités draguées de l'ordre de 50 % (Figure III.25). L'année 2018, dernière année de la simulation, est marquée par une crue présentant un débit supérieur à $2000\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, la tempête Eleanor et plus de 40 jours de concomitance crue/tempêtes ($Q > 700\text{ m}^3/\text{s}$, $H_s > 1,3\text{ m}$) (Figure IV.9) : elle constitue de fait l'année durant laquelle les dragages sont maximaux.

Globalement, il ressort de cette analyse que les dragages et potentiellement leurs effets sont maximaux lorsque le système est le plus dynamique. Les immersions étant conditionnées par les dragages, il est vraisemblable que leurs effets augmentent également dans les mêmes conditions, mais à priori avec un certain déphasage et lissage temporel.

Chapitre IV : Effets des dragages sur le fonctionnement HMS de l'estuaire de la Seine

Plan du chapitre :

IV.1	Introduction : Le fonctionnement HMS et les dragages	125
IV.2	Méthodologie	126
IV.2.1	Scénarios simulés	126
IV.2.2	Marquage numérique	127
IV.3	Dynamique des sites de dépôts de dragage	130
IV.4	Les effets des dragages d'entretien sur les indicateurs HMS	134
IV.4.1	Matière en suspension et bouchon vaseux	135
IV.4.2	Impact des dragages sur la couverture sédimentaire	141
IV.4.3	Devenir de l'ensemble des sédiments clapés	144
IV.4.4	Impact des dragages sur la morphologie de l'estuaire	152
IV.4.5	Impact sur les dragages	157
IV.5	Les effets des dragages sur les flux et bilans sédimentaires	161
IV.5.1	La remobilisation sédimentaire : intense et non impactée par le dragage	161
IV.5.2	A l'origine des effets des dragages : les flux sédimentaires	162
IV.5.3	Effets des dragages sur les bilans sédimentaires	171
IV.6	Zoom sur la fosse nord	173
IV.7	Synthèse et discussion	176
IV.7.1	Synthèse des effets des dragages d'entretien sur les indicateurs HMS	176
IV.7.2	Synthèse des effets des dragages d'entretien sur les flux et bilans sédimentaires	180



IV.1 Introduction : Le fonctionnement HMS et les dragages

Le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire d'un estuaire résulte des interactions entre les processus hydrodynamiques et sédimentaires. Ces interactions réciproques interviennent à différentes échelles spatio-temporelles et se manifestent par un couplage générant des évolutions morphologiques : il s'agit du couplage morpho-dynamique. En effet, les transits sédimentaires, à l'origine de ces évolutions, sont dépendants de l'hydrodynamisme (vagues et courants) induit par les forçages (météo, marées, débit du bassin versant) et par la morphologie. Les transits sédimentaires, en modifiant la morphologie, modifient à leur tour l'hydrodynamisme, d'où la notion de "couplage". En lien avec la variabilité temporelle des forçages, la variabilité spatiale des effets de chaque forçage, et les caractéristiques morpho-sédimentaires de l'estuaire, ce couplage induit une dynamique Hydro-Morpho-Sédimentaires (HMS) estuarienne complexe et intense. Cette dernière se traduit par des remaniements sédimentaires importants, sur des échelles de temps courtes, générant d'importantes remises en suspension à l'origine de la formation du bouchon vaseux, structure caractéristique des estuaires. Sur des échelles de temps plus longues, les flux sédimentaires induits par ces interactions engendrent des évolutions de la nature des sédiments superficiels et des évolutions morphologiques.

Dans l'estuaire de la Seine, ce fonctionnement HMS est complexifié par l'entretien des chenaux ayant été régulièrement approfondis durant le siècle dernier pour permettre l'accès aux zones portuaires à des navires de grand tirant d'eau. Ces secteurs artificiellement approfondis réduisent généralement l'hydrodynamisme local favorisant ainsi les dépôts sédimentaires. Ces dépôts sont alors dragués afin de maintenir l'accès aux terminaux portuaires. Les quantités ainsi draguées sont comparables à celles déplacées par la nature (cf. chapitre II). Les dragages d'entretien peuvent être considérés comme un processus sédimentaire en opposition aux évolutions naturels. Ceci se traduit par un flux sédimentaire anthropique qui s'ajoute aux flux naturels. Ces flux conduisent via le couplage morpho-dynamique aux évolutions morphologiques de l'estuaire.

Quel est l'impact de ces flux sédimentaires anthropiques sur le fonctionnement HMS de l'estuaire et ses évolutions morphologiques?

- *Les indicateurs HMS : turbidités, faciès, morphologie, dragage*

Le fonctionnement HMS structure l'environnement estuarien et ses caractéristiques hydrodynamiques (vagues et courants), sédimentaires (nature du sédiment superficiel, conditions de turbidité), et morphologiques (par exemple, l'hypsométrie et le régime de submersion). D'une manière générale, ce fonctionnement conditionne l'ensemble du fonctionnement écologique estuarien (Elliott et Wolanski, 2015).

Dans ce contexte, les dragages d'entretien peuvent avoir des répercussions sur l'ensemble du fonctionnement écologique estuarien, de ses composantes physiques et biogéochimiques jusqu'aux composantes biologiques.

L'analyse des effets des dragages d'entretien que nous proposons repose sur des indicateurs HMS impactés par les opérations de dragages et caractérisant le fonctionnement global des estuaires. Quatre groupes de paramètres ont été sélectionnés:

- i. les conditions de turbidité à l'embouchure et plus particulièrement dans le bouchon vaseux,
- ii. la nature des sédiments superficiels
- iii. les évolutions morphologiques
- iv. les dragages : en effet la bibliographie montre que les quantités draguées peuvent dépendre des stratégies de dragage et de clavage en mer des sédiments dragués (le cas échéant).

D'un point de vue purement physique, ces paramètres caractérisent le transport sédimentaire et la morpho-dynamique associée. Leur complémentarité permet en particulier de replacer les effets des dragages dans l'ensemble du fonctionnement HMS de l'estuaire. De plus, ces paramètres structurent le fonctionnement global de l'estuaire. En effet, d'après l'inventaire des paramètres HMS proposé par

Foussard et al. (2011) qui cherchaient à caractériser les indicateurs hydro-morpho-sédimentaires du Bon Etat Ecologique et à les appliquer aux estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde, les trois premiers paramètres proposés précédemment influencent directement au minimum 3 compartiments biologiques. Ces paramètres apparaissent comme étant tout aussi structurants que les courants, la salinité, la concentration en oxygène dissous ou encore la température.

En lien avec les éléments présentés dans les chapitres précédents, l'originalité de notre approche pour étudier les effets des dragages d'entretien sur la dynamique HMS de l'estuaire, repose sur :

- L'utilisation d'un modèle validé en termes d'hydrodynamique (Chapitre III , Kervella et al., 2012, Mengual, 2018), de simulation du transport en suspension (Chapitre III , Grasso et al., 2018), d'évolution morphologique (Chapitre III , Grasso et al., 2020) et de dragage (Chapitre III ; Lemoine et al., *en révision*.)
- la prise en compte des interactions sables/vases, de l'agitation (vagues) et du couplage morpho-dynamique
- l'analyse des effets du dragage sur une période représentative des variabilités naturelles (*i.e.* 9 ans : chap.III ; voir aussi Massei, 2010),
- l'analyse conjointe de l'effet des dragages sur le compartiment pélagique et benthique (l'eau et le sédiment).

IV.2 Méthodologie

Le modèle présenté au chapitre 3, peut servir à caractériser le rôle des dragages dans le fonctionnement HMS de l'estuaire de la Seine. Le modèle est en particulier utilisé pour simuler des scénarios avec et sans dragage permettant d'identifier les effets des dragages sur les indicateurs décrits précédemment. Par ailleurs, de nouvelles variables sédimentaires ont été introduites dans le modèle afin de tracer le devenir des sédiments immergés suite aux opérations de dragage.

IV.2.1 Scénarios simulés

Afin de pouvoir caractériser les effets des dragages d'entretien sur le fonctionnement naturel du système à moyen terme, et d'évaluer la variabilité pluriannuelle des dragages, il est rappelé que les règles définissant le dragage sont choisies constantes sur la période simulée. En particulier le changement de site d'immersion du Grand Port Maritime de Rouen du Kannik vers Machu n'est pas pris en compte. L'effet de ce changement sera analysé dans le chapitre V. De la même manière, afin de ne pas ajouter de variabilité supplémentaire, les travaux d'approfondissements du GPMR réalisés sur la période 2012-2017 sont négligés. La configuration de référence décrite au chapitre III est utilisée pour modéliser un scénario intitulé KAN, dans lequel les dragages du port de Rouen sont immergés au Kannik et ceux du port du Havre à Octeville.

Pour identifier spécifiquement le rôle des dragages dans la dynamique HMS de l'estuaire, nous proposons de comparer notre scénario de référence KAN, à un scénario sans dragage intitulé NOD (NO Dredging). Pour caractériser spécifiquement le rôle des immersions de sédiments dragués dans le fonctionnement HMS, une simulation sans clapage a été réalisée. Dans ce scénario NOC (NO Clapage), les dragages des deux ports sont réalisés selon les mêmes règles que pour la référence, mais les sédiments ne sont pas clapés. Dans la réalité, ce scénario correspondrait à la mise à terre de 100 % des sédiments dragués. La comparaison de ce scénario avec la référence permet d'évaluer le rôle du rejet des produits de dragage à proximité de l'estuaire, et de leur devenir dans le système.

Chacun de ces scénarios a été modélisé en prenant en compte les forçages réalistes sur la période juillet 2009 - juillet 2018 (cf. Chapitre III). Les seules différences entre chacun de ces scénarios

concernent les dragages/clapages. En cohérence avec l'approche développée dans le chapitre 3, les résultats des simulations sont obtenus après une année de *spin-up* durant laquelle le couplage morphodynamique est désactivé. Nous avons fait le choix de réaliser un *spin-up* distinct par scénario respectant la stratégie de dragage/clapage du scénario étudié. L'inter-comparaison de ces trois scénarios nous permet d'identifier l'effet des dragages/clapages (comparaison KAN / NOD), l'effet des immersions (comparaison KAN /NOC) et l'effet des dragages (comparaison NOC /NOD) (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 : Scénarios modélisés et effets mis en avant par les comparaisons

	KAN (référence)	NOC (sans clapage)	NOD (sans dragage)
KAN (référence)		Effets des immersions	Effets des dragages/clapages
NOC (sans clapage)			Effets des dragages

IV.2.2 Marquage numérique

Le marquage ou traçage sédimentaire numérique consiste à identifier un sédiment spécifique, par exemple un matériel particulaire dont l'origine est particulière, ou encore un matériel qui a connu une histoire spécifique, ou un processus particulier. Les variables tracées possèdent exactement les mêmes caractéristiques que les 5 variables sédimentaires de base du modèle (une classe de vase et 4 classes de sédiment non cohésif, cf. Chapitre III). Leurs dynamiques sont donc les mêmes que celles des variables initiales. Néanmoins, leur identification numérique permet de suivre spécifiquement leurs dynamiques au sein du domaine modélisé. Cette technique est analogue aux techniques de traçages *in-situ* utilisant des isotopes radioactifs tels que ceux employés en Seine dans les années 80 par Hoslin et al. (1989). A noter que le choix de marquer certains types de sédiment augmente le nombre de variables d'état du modèle, et donc les temps de calcul des simulations.

Dans notre cas, afin de relativiser l'effet des dragages dans la dynamique de l'estuaire les marquages concernent :

- i/ les apports sédimentaires naturels
 - Les apports en matériaux fins de la Seine, dont le flux est imposé à la limite amont du modèle (cf. description du modèle), qui sont tracés par l'utilisation d'une variable spécifique mud S. Les affluents intra-estuariens ont été considérés afin de ne pas biaiser le bilan sédimentaire de l'estuaire. En revanche, étant donné leur faible contribution au bilan sédimentaire (cf. II.3.) et le coût en termes de temps de calcul du traçage, ces derniers ne sont pas tracés.
 - Les apports sédimentaires du large, liés à la turbidité des masses d'eau entrant dans le domaine au niveau de la frontière marine ; ils sont suivis sous le nom de la variable mud O (pour "offshore").
- ii/ le dragage

Pour suivre le devenir des sédiments clapés par les deux ports, deux duplicatas des 5 variables sédimentaires de base ont été créés. Numériquement chaque type de sédiment est donc dupliqué deux fois, une fois pour chacun des deux ports.

Cette procédure porte le nombre de variables sédimentaires total à 17 (Tableau IV-2):

- les 5 variables initiales constituant les fonds de l'estuaire à l'initialisation du modèle,
- les 2 vases apportées par la Seine et la frontière marine,
- et les 2x 5 variables permettant de tracer les immersions des deux ports.

Tableau IV-2 : Listes des différentes variables sédimentaires utilisées dans les simulations avec traçage numérique

	Types de sédiment	Variables
1	Graviers	Graviers Initiaux
2		Graviers Rouen
3		Graviers Le Havre (LH)
4	Sables grossiers	Sables grossiers Initiaux
5		Sables grossiers Rouen
6		Sables grossiers LH
7	Sables fins	Sables fins Initiaux
8		Sables fins Rouen
9		Sables fins LH
10	Sables très fins (tf)	Sables tf Initiaux
11		Sables tf Rouen
12		Sables tf LH
13	Vases	Vases Initiales
14		Vases Seine
15		Vases Offshore
16		Vases Rouen
17		Vases LH

Pour tracer les immersions des deux ports, les règles qui définissent le dragage et le clapage sont inchangées : en fonction de la zone draguée les sédiments sont immergés sur le site d'immersion associé, en suivant les règles décrites au chapitre III. Le marquage numérique se fait après dragage, juste avant de procéder au clapage du sédiment par un port : tout le matériau immergé devient instantanément "marqué", en respectant la distribution totale des différentes classes sédimentaires (Figure IV.1). A noter donc que la simulation NOC (et bien sûr la simulation NOD) n'a pas de sédiment marqué par le dragage. Les masses de sédiments associées aux variables qui n'étaient pas déjà du matériel marqué correspondant au port réalisant le dragage sont ainsi numériquement supprimées et transformées en masses de sédiment marqué (via les variables de traçage dédiées).

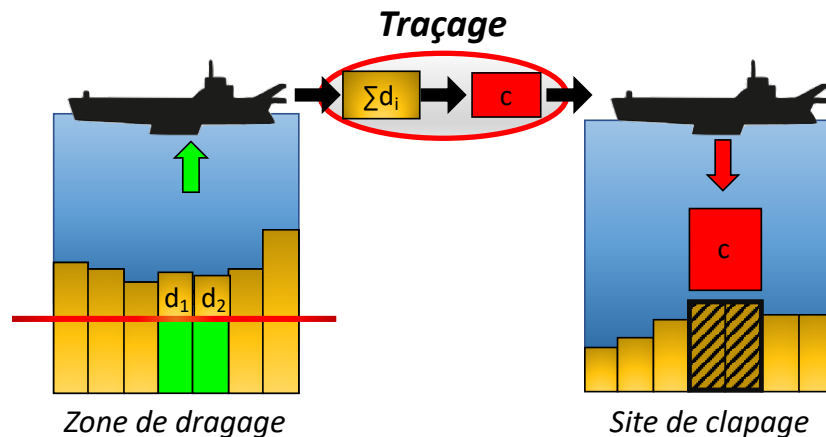


Figure IV.1 : Schéma du processus de traçage numérique des dragages. Les zones en verts représentent les mailles draguées avec la côte consigne en rouge. Les zones hachurées représentent les mailles du sites d'immersion. Sur cet exemple deux dragages d_1 et d_2 sont effectués. Les masses de sédiment draguées en d_1 et d_2 sont rejetées sous la forme d'une masse de sédiment marquée et diluée dans la moitié de la colonne d'eau au niveau des sites d'immersions.

⇒ Exemple : si le port de Rouen drague un mélange composé de 1 t de sables fins, 2 t de vases initialement présentes dans le système, 0.5 t de vases apportées par la Seine au cours de la simulation (mud S), 0.2 t de vases venant du large (mud O), 0.05 t de vases qui avaient déjà été clapées par ce port et 0.03 t de vases qui avaient déjà été clapées à Octeville par le port du Havre : alors il rejettera au Kannik 1 t de sables fins marqués Rouen et 2,78 t de vases marquées Rouen (2 + 0.5 + 0.2 + 0.05 + 0.03).

Cette technique ne permet pas de comptabiliser le nombre de fois où une masse donnée de sédiment est draguée. En effet dans l'exemple précédent, le modèle rejette la somme des masses des différentes vases draguées 2.78 t dont 0.08 t ayant déjà été marquées. Cette méthode est conservative : la création d'une masse marquée "Rouen" ou "Le Havre" se fait au détriment des masses correspondantes qui ont été retirées du sédiment par dragage.

Afin de relativiser les résultats issus du traçage il est nécessaire de considérer la masse totale de sédiment marqué ayant été générée depuis le début de la simulation. A chaque opération de dragage/clapage, l'incrément de masse totale de sédiment marqué P par le port P (ΔM_{MP}) est égal à la masse de sédiment effectivement draguée par le port P (M_{DP}), moins les masses déjà marquées P re-draguées par l'un des deux ports (M_{MPDP} $M_{MPDP'}$). Pour un type de sédiment donné, ΔM_{MP} peut donc être calculé à chaque épisode de dragage/clapage comme étant :

$$\Delta M_{MP} = M_{DP} - M_{MPDP} - M_{MPDP'}$$

avec M_{DP} la masse totale draguée par le port P (pour le type de sédiment donné), M_{MPDP} la masse totale marquée par le port P et draguée par le port P et $M_{MPDP'}$ la masse totale marquée par le port P et draguée par l'autre port P' (pour chaque classe de sédiment donné). Si le port P drague du sédiment marqué P ou P' (comptabilisé dans M_{DP}), il rejette ce sédiment sans augmenter la quantité de sédiment marqué.

Si le port P' drague du sédiment marqué P ($M_{MPDP'}$), cette quantité ne portera plus le marquage P mais P', écrasant ainsi le marquage P.

⇒ Dans l'exemple ci-dessus, le port de Rouen rejette 2,78 t de vases marquées Rouen. Il crée ainsi 2.73 t de nouvelle vase Rouen (2.78 - 0,05). En revanche, la masse de sédiments marqués Le Havre aura elle diminué de 0.03 t.

M_{MP} est principalement déterminée par M_{DP} , les termes M_{MPDP} et $M_{MPDP'}$ sont de second ordre et représentent la part des sédiments marqués re-dragués par les ports (cf. IV.3.4). La Figure IV.2 représente l'évolution simultanée des dragages et de M_{MP} pour les vases et les sables dragués par Rouen et Le Havre (Les masses des sables très fins, fins et grossiers ont été sommées, tandis qu'il n'y a pas de graviers effectivement dragués). En lien avec la récurrence des dragages et les variabilités illustrées dans le chapitre III, les valeurs de M_{MP} présentent une légère variabilité saisonnière. A l'échelles des 9 années hydrologiques simulées (hors *spin-up*, car le marquage n'est alors pas activé), elles augmentent de façon quasi-linéaire. Mais on voit que la vase marquée Rouen ne représente que 77 % des vases draguées par Rouen, tandis que les sables marqués Rouen représentent à peu près la totalité des sables dragués par Rouen. .

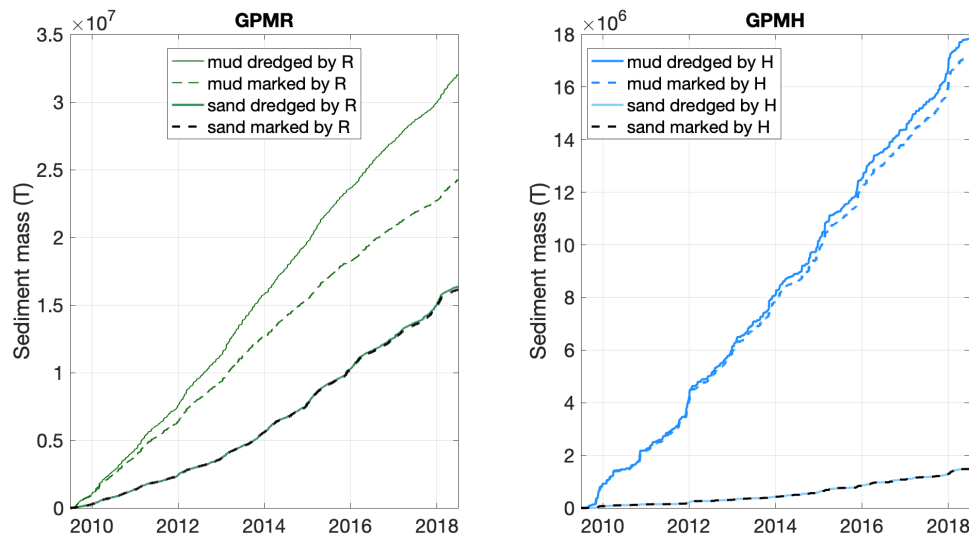


Figure IV.2: Évolution temporelle des masses de sédiments dragués et marqués dans le modèle, pour le GPMR et le GPMH, dans le cas du scénario tendanciel KAN

Dans la suite nous avons analysé conjointement la dynamique des trois sables. Les marquages indiqués sand R ou sand H correspondent donc aux sommes des sables fins, très fins et grossiers des ports de Rouen et du Havre.

Il convient d'insister sur le fait que les marquages ne concernent que la dynamique en cours de simulation. Ainsi le sédiment initial dont la remise en suspension génère l'essentiel de la turbidité ne contient aucun sédiment marqué. Les sédiments marqués le sont pendant la durée de la simulation : les apports de la Seine ou du large au cours de la simulation, les matériaux clappés au Kannik ou à Octeville depuis le début de la simulation. Il est donc normal que la distribution dans l'embouchure de sédiments marqués augmente au cours du temps, quelle que soit leur nature.

IV.3 Dynamique des sites de dépôts de dragage

Afin de caractériser et suivre le fonctionnement morpho-sédimentaire des sites d'immersions, les ports suivent la stabilité des dépôts effectués sur les sites. L'indicateur de stabilité est le rapport entre le volume de sédiment restant sur le site et le volume de sédiment déposé sur le site.

Le volume de sédiment déposé est déduit de la masse de sédiment draguée en faisant une hypothèse de densité moyenne *in-situ* du sédiment déposé, qui dépend de sa nature, et en particulier de son spectre granulométrique. Le volume de sédiment restant sur le site est estimé à partir des cartes bathymétriques, en intégrant les volumes sur une emprise permettant de constater les dépôts (GPMR, comm. pers.). Un site est dit conservatif si le taux de stabilité est proche de 1. Au contraire, si le taux de stabilité est faible, proche de zéro, le site est dit dispersif. Le site d'immersion du GPMR, le Kannik, présente un taux de stabilité de 0.6 ; le site d'Octeville, utilisé par le GPMH, est plus dispersif, son taux de stabilité est estimé à 0.1 (cf. chapitre II). Cette information est importante dans l'estimation des effets des immersions.

Dans le modèle, l'ajustement de l'emprise de dépôt est nécessairement réalisé sur des mailles entières. Pour le site d'Octeville qui présente une surface importante, seules les mailles où sont déposés les sédiments sont considérées. Pour le site du Kannik (5 fois plus petit et recevant 2,5 fois plus de

sédiment), l'emprise a été élargie par rapport au secteur de dépôt, d'une maille à l'Est et à l'Ouest, et de deux mailles au Nord et au Sud. Ces emprises sont représentées sur la Figure III.2.

Concernant les données de volumes déposés, les ports transforment les masses de sédiment clapées et mesurées par les dragues, en faisant une hypothèse sur la densité des sédiments en place (sur les sites de dépôt). Une densité constante et égale à 1,8 (masse volumique de 1,8 t.m⁻³) est considérée pour les sédiments sablo-vaseux du GPMR, une densité de 1,4 (masse volumique de 1,4 t.m⁻³) pour les sédiments vaseux du GPMH.

La stabilité du site estimée par les ports entre $t_{début}$ et t_{fin} peut ainsi s'écrire :

$$stabilité_{in-situ} = \frac{Vol_dépot_I_{t_{fin}} - Vol_dépot_I_{t_{début}}}{Masse_clapée_I \div densité_{in-situ}}$$

avec Volume_dépot_I (I pour *in-situ*) les volumes des sites de dépôts mesurés *in-situ*, Masse_clapée_I les masses clapées *in-situ* et densité_{in-situ} l'hypothèse de densité constante prise par chacun des ports.

La stabilité ainsi estimée, est directement dépendante de l'hypothèse de densité retenue. Ces dernières correspondent à des densités représentatives de fonds sédimentaires moyennement consolidés. L'indicateur de stabilité doit donc être interprété à moyen-long terme ; en effet lors de leurs arrivées sur le fond les sédiments présentent des densités beaucoup plus faibles et donc des volumes plus importants.

Dans l'ensemble cet indicateur permet de caractériser les évolutions morphologiques du site, néanmoins il ne rend pas compte des potentiels effets de tassement et/ou des érosions et dépôts naturels (en opposition aux dépôts de matériaux dragués). Il faut souligner que cet indicateur de stabilité présente une incertitude élevée, principalement liée i/ aux levés bathymétriques et en particulier à l'emprise considérée pour mesurer le volume déposé mais également ii/ à l'hypothèse de densité indiquée précédemment.

Avec le modèle, la stabilité modélisée peut être quantifiée sans recourir à une hypothèse sur la densité des sédiments en place. Le modèle et la technique de traçage décrite au IV.2.3 permettent en particulier de connaître la masse de sédiment clapée présente sur le site à chaque instant. Ce qui permet de définir la stabilité effective : stabilité_E entre $t_{début}$ et t_{fin} comme :

$$stabilité_E_{modélisée} = \frac{Masse_sed_M_D_{t_{fin}} - Masse_sed_M_D_{t_{début}}}{\sum_{t_{début}}^{t_{fin}} Masse_clapée_M}$$

avec Masse_clapée_M (M pour modélisée) les masses clapées dans la modélisation, Masse_Sed_M_D_t la masse totale de sédiment marquée par les dragages du port considéré, présente sur l'emprise de calcul de stabilité définie Figure III.2, à l'instant t. Ce calcul est réalisable en distinguant les vases et les sables clapés.

Contrairement aux mesures réalisées *in-situ*, la stabilité_E permet de quantifier la proportion de sédiment clapé restant sur la zone de calcul de stabilité sans comptabiliser de potentiels dépôts naturels.

Il est également possible de calculer une stabilité apparente : stabilité_A, prenant en compte la masse sédimentaire totale du site et donc cette fois-ci de potentiels effets d'érosions ou dépôts naturels :

$$stabilité_A_{modélisée} = \frac{Masse_sed_M_{t_{fin}} - Masse_sed_M_{t_{début}}}{\sum_{t_{début}}^{t_{fin}} Masse_clapée_M}$$

avec Masse_Sed_M_t la masse totale de sédiment présente sur l'emprise de calcul de stabilité définie Figure III.2, à l'instant t. Cette stabilité apparente est plus proche de la stabilité_{in-situ} mesurée par les ports, tout en s'affranchissant de l'hypothèse de densité des sédiments en place. A noter que cette hypothèse de densité peut être confrontée à la densité simulée partout en tout instant par le modèle.

La différence entre stabilité_A et stabilité_E permet de déterminer l'effet des mouvements naturels de sédiment sur les sites d'immersions et leurs proximités.

Afin de comparer les stabilités modélisées et mesurées par les ports nous pouvons calculer à partir des sorties du modèle une stabilité apparente en volume : stabilité_V, en transformant les masses clapées modélisées avec la même hypothèse de densité des sédiments en place que celle utilisée par les ports :

$$stabilité_V_{modélisée} = \frac{Vol_sed_M_{t_{fin}} - Vol_sed_M_{t_{début}}}{\sum_{t_{début}}^{t_{fin}} Masse_clapée_M_t \div densité_{in-situ}}$$

avec Vol_sed_Mt les volumes sédimentaires modélisés sur les surfaces définies Figure III.2 à l'instant t, Masse_clapée_Mt les masses clapées dans la modélisation et densité_{in-situ} l'hypothèse de densité constante prise par les ports.

Les calculs de stabilité_V et stabilité_{in-situ} sont comparables, toutefois les volumes considérés dans les deux cas ne peuvent pas être intégrés sur des surfaces identiques (principalement en raison de la discrétisation horizontale du modèle).

Comme indiqué plus haut le modèle permet d'estimer la densité moyenne du dépôt sédimentaire. Cette densité est estimée selon :

$$Densité_{modélisée} = \frac{Masse_sed_M_{t_{fin}} - Masse_sed_M_{t_{début}}}{Vol_sed_M_{t_{fin}} - Vol_sed_M_{t_{début}}}$$

Tableau IV-3: Stabilité in-situ et modélisée ainsi que densité modélisée (valeurs moyennes sur la période janvier 2014- juillet 2018), estimée selon les différentes méthodes de calcul citées section IV.3, pour les sites du Kannik et Octeville. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiment clapé (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant les mêmes densités du sédiment que celles utilisées par les ports (1,8 pour Kannik ; 1,4 pour Octeville)

	Kannik	Octeville
Stabilité constatée in-situ	60%	10%
Stabilité Apparente	55%	16%
Stabilité Effective vases	19%	0,2%
Stabilité Effective sables	91%	20%
Stabilité Effective totale	48%	2%
Stabilité Volumique Apparente	62%	11%
Densité modélisée (t/m3)	1,58	1,9

Moyennes sur la deuxième
moitié de la simulation
(jan 2014 --> jul 2018)

Le Tableau IV-3 présente les stabilités calculées par le modèle sur la deuxième moitié de la période simulée pour les deux sites ainsi que les références établies par les ports. Les calculs de stabilité ont été effectués sur la deuxième moitié de la simulation afin de s'affranchir des variations de volumes potentiellement induites par le tassement de la condition initiale (épaisseur initiale du sédiment de 3 m) durant les premières années modélisées.

Sur le site du Kannik, le modèle simule une stabilité effective de 19% pour les vases clapées, et de 91% pour les sables clapés. 48% des masses de sédiment immergées par clapage (vases et sables) restent à proximité du site sur l'emprise précisée figure III.2. En considérant la masse totale de sédiment présente sur site (et non plus seulement les sédiments clapés), alors la stabilité apparente est de 55 %, cette différence entre stabilité effective et apparente démontrant la présence de dépôts naturels sur le site. Enfin, si la stabilité est calculée de manière analogue à l'indicateur calculé par les ports, à partir du volume des évolutions morphologiques du site et selon une hypothèse de densité constante à 1,8, la stabilité apparente volumique ainsi simulée vaut 62 %.

Si les dépôts sédimentaires modélisés présentaient effectivement une densité moyenne de 1,8 au Kannik, stabilités apparentes massique et volumique seraient égales. Ce n'est pas le cas, dans le modèle le dépôt du Kannik présente une densité de 1,58. La prise en compte de cette densité de 1,58 à la place de 1,8 dans les quantités clapées génère une variation de la stabilité de - 12 % : $\text{stabilité}_{\rho=1,5} = (1,58/1,8) \cdot \text{stabilité}_{\rho=1,8}$. La prise en compte de cette densité (1,58) dans les calculs effectués par le GPMR diminuerait la stabilité *in-situ* du site du Kannik à 53 % contre 60 % actuellement (avec une densité =1,8).

Sur le site d'Octeville, la stabilité effective modélisée est très faible : seuls 2 % des sédiments clapés sur le site restent sur l'emprise de calcul. La distinction sable/vase permet de montrer qu'une part infime des vases clapées reste sur le site (0,2 %), alors que 20 % des sables clapés restent. En termes de stabilité apparente simulée, celle-ci est étrangement élevée et égale à 16 %. Cet important écart entre stabilité apparente et stabilité effective totale témoigne d'apports sédimentaires naturels important sur le site dans notre modélisation. Il n'est cependant pas possible de valider ces chiffres qui peuvent paraître surestimés. Enfin, l'analyse des évolutions morphologiques du site et la conversion des masses draguées en volume en considérant une densité de 1,4, montre que la stabilité apparente volumique modélisée du site vaudrait 11 %. Notre simulation indique que la densité de 1,4 ne correspond pas du tout à la densité des sédiments modélisés au niveau du site d'Octeville (sur lequel les vases déposées ne restent pas) : le modèle y simule une densité de 1,9. Cette densité n'est à priori pas réaliste pour transformer la masse de sédiments dragués en "pseudo-volume" de sédiments dragués, car les sédiments clapés sont essentiellement vaseux. Néanmoins il apparaît que cette densité n'est pas incohérente avec la couverture sédimentaire *in-situ* du site qui ne contient que 27% de fines.

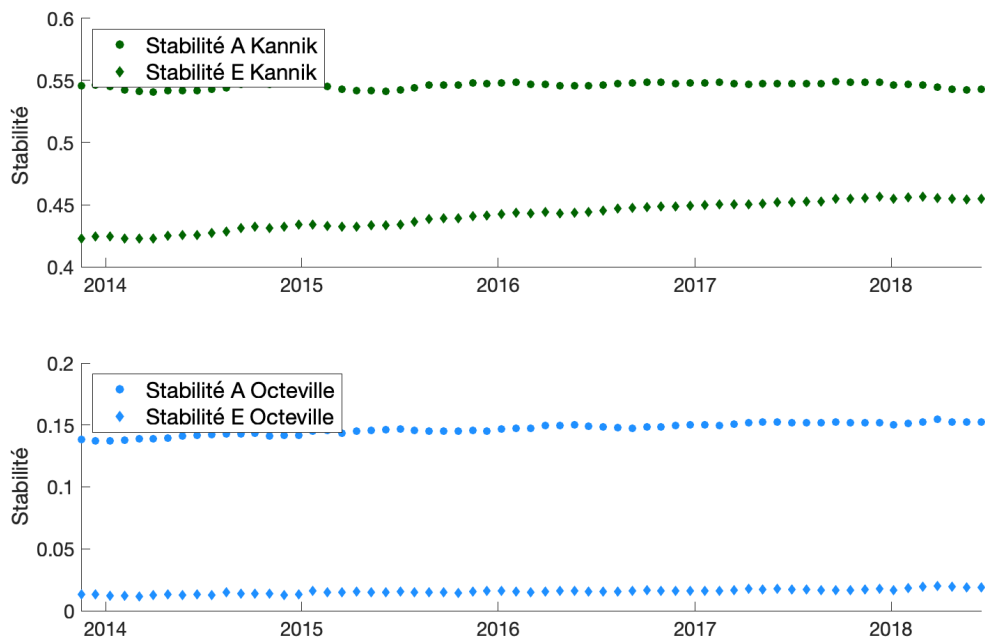


Figure IV.3 : Évolution des stabilités apparentes et effectives totales (i.e. vases et sables) des dépôts sur les sites de Kannik et Octeville de janvier 2014 à juillet 2018

La stabilité apparente résulte de l'intensité des quantités clapées, maximales en hiver (cf. chapitre III), et des érosions/dépôts sur les sites induits par la variabilité saisonnière des forçages (cf. chapitre II). La Figure IV.3 illustre la faible variabilité interannuelle des taux de stabilité. Ces derniers présentent toutefois de légères variations saisonnières avec des maximaux hivernaux lorsque les clapages sont maximaux et ceci indépendamment des érosions pouvant être générées par l'agitation hivernale. Par ailleurs, une sensible augmentation de la stabilité effective est observée au Kannik, alors que cette dernière est stable à Octeville. Sur les deux sites, les stabilités apparentes sont constantes.

Les immersions simulées par le modèle sont très schématiques comparées aux pratiques réelles. Dans le modèle, les sédiments dragués sont immergés sur l'ensemble de la surface des sites de clapage : dans la réalité, les vidanges des dragues sont beaucoup plus localisées. En effet, la surface des sites se compte en centaines d'hectares, alors que l'emprise d'un clapage réel est de l'ordre de grandeur de l'hectare. Cette différence peut expliquer pourquoi la stabilité effective des vases est si faible sur le site d'Octeville. Cependant, cette dernière n'est pas incohérente avec les observations granulométriques réalisées par le GPMH qui montrent qu'après plus de 60 ans d'immersions de plusieurs dizaines de millions de tonnes de sédiments vaseux, la couverture sédimentaire ne contient que 27% de fines (GPMH, 2014). Cette discussion montre toute la difficulté de faire un calcul rigoureux de stabilité des sédiments déposés dans la réalité : rigoureusement il faudrait pouvoir évaluer la masse et non le volume des sédiments clapés qui restent sur le site.

A moyen terme, et à l'échelle des sites, les stabilités simulées sur les sites de Kannik et Octeville sont finalement cohérentes avec les stabilités estimées par les ports. Il est important de souligner que ces valeurs de stabilités simulées n'ont fait l'objet d'aucune calibration particulière. Ces résultats ont été obtenus directement à partir des hypothèses sur les conditions d'immersion, inspirées des résultats de Boutin (1999) : injection des vases uniformément distribuée dans la moitié inférieure de la colonne d'eau et injection des sables sous forme d'une suspension concentrée dans la couche de fond de la colonne d'eau (1/10 de la hauteur d'eau).

Au-delà de la stabilité du site, l'utilisation du marquage numérique (cf. IV.2.2) permet de tracer le devenir des sédiments clapés sur les sites d'immersion. Il est alors tentant de confronter les dispersions simulées par le modèle avec celles mesurées *in-situ* à l'aide de traceurs radioactifs par Hoslin en 1989. Toutefois, les spécificités de ces expérimentations rendent quasiment impossible la réalisation d'une comparaison quantitative avec les résultats de notre modèle. En particulier, les évolutions morphologiques importantes du secteur du Kannik entre 1989 et 2009 et aussi l'injection de sables traceurs en quantité limitée à un moment précis est difficilement reproductible avec le modèle. Néanmoins qualitativement, les structures de dispersion des sables observés par Hoslin sont comparables à celles modélisées, tant en termes d'amplitude que de direction (Figure IV.16)

IV.4 Les effets des dragages d'entretien sur les indicateurs HMS

L'estuaire de la Seine est aménagé pour les besoins de la navigation depuis plus d'un siècle, sa morphologie et son fonctionnement sont donc déjà largement impactés par les aménagements et les dragages d'entretiens. Notre connaissance du fonctionnement de l'estuaire de la Seine intègre ces effets, sans qu'il soit pour autant possible de les identifier individuellement. L'objectif de cette partie est de quantifier et individualiser les effets des dragages dans le fonctionnement morpho-sédimentaire actuel, sur la base des 3 scénarios simulés pendant une durée de 9 ans.

La dernière année de la période simulée, l'année hydrologique allant de juillet 2017 à juillet 2018 est l'année présentant les conditions hydrodynamiques les plus intenses de la période simulée (Figure IV.4). Cette année est caractérisée par la crue la plus importante de la période simulée ($> 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et le passage de la tempête Eleanor ($H_s > 3,6 \text{ m}$). En lien avec les résultats du chapitre III cet hydrodynamisme intense en fait l'année durant laquelle les dragages et potentiellement leurs effets sont maximaux. L'année hydrologique 2017/2018 fera l'objet d'une analyse approfondie par la suite.

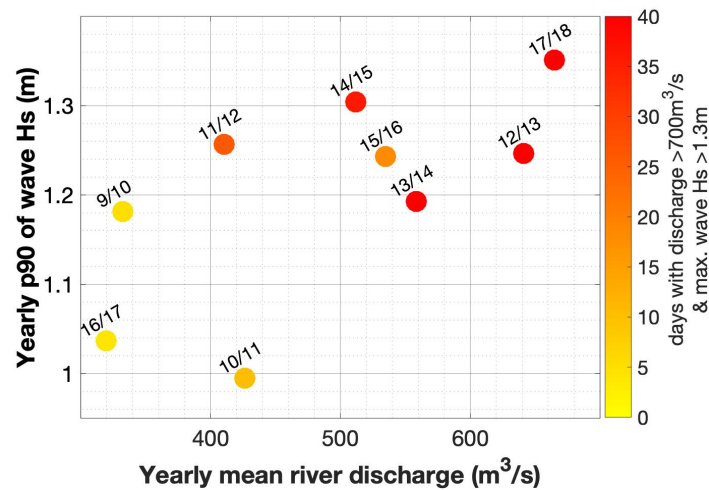


Figure IV.4 : Caractérisation des 9 années simulées en fonction du débit moyen annuel mesuré à Poses, du percentile 90 des hauteurs de vagues observées à l'embouchure et du nombre de jour présentant concomitamment une crue ($Q > 700 \text{ m}^3/\text{s}$) et une tempête ($H_s > 1,3 \text{ m}$)

IV.4.1 Matière en suspension et bouchon vaseux

IV.4.1.1 Matière en suspension à l'échelle de l'embouchure

A l'échelle de l'estuaire et à l'échelle annuelle, la dynamique spatiale des MES (vases seules) peut être caractérisée par la médiane des concentrations de MES moyennées sur la profondeur. Les Figure IV.5.a et .b sont issues du calcul de référence KAN sur l'année hydrologique 2017/2018 : la Figure IV.5.a représente les médianes des concentrations en MES moyennées sur la profondeur, tandis que la Figure IV.5.b représente la médiane des concentrations en MES issues des sédiments préalablement clapés au Kannik et à Octeville, également moyennées sur la profondeur. Les MES draguées sont calculées comme la somme des MES marquées par le GPMR et le GPMH. Enfin, les comparaisons entre les simulations KAN/NOD, KAN/NOC et NOC/NOD de ces médianes sur la même période sont représentées Figure IV.5 c d et e.

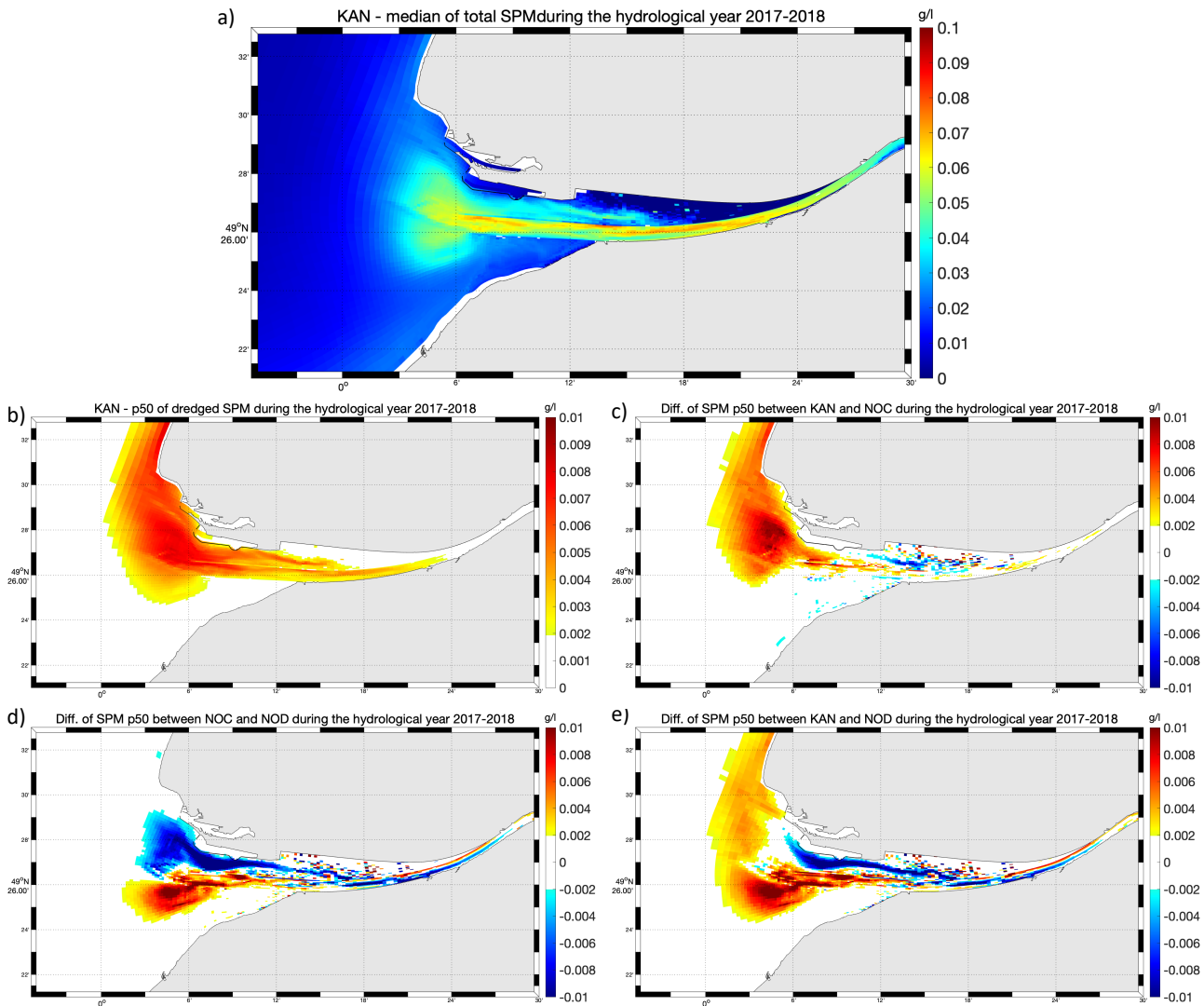


Figure IV.5 : a) distribution des concentrations médianes de MES sur l'année 2017-2018, pour le scénario de référence KAN ; b) Médiane sur l'année 2017/2018 des concentrations en MES issues des sédiments déjà dragués et clapés (Rouen et Le Havre) ; c) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et NOC (concentration KAN - concentration NOC) : effets des clapages ; d) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios NOC et NOD (concentration NOC - concentration NOD) : effets des dragages ; e) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et NOD (concentration KAN - concentration NOD) : effets combinés des dragages et des clapages

Les effets des clapages, illustrés par la comparaison KAN/NOC (Figure IV.5.c), apparaissent principalement à proximité du site d'immersion du Kannik. A l'échelle annuelle, le clapage peut générer dans cette zone une augmentation de la médiane de concentration en MES d'environ 10 mg/l. Cette augmentation, induite par l'immersion régulière de sédiment sur le Kannik décroît rapidement à distance du site. On remarque aussi une forte dispersion vers le nord, à la faveur des circulations résiduelles impactées par le courant de Verhaule (fin de flot). Des concentrations médianes plus importantes sans clapage sont observées en fosse nord amont. A l'échelle de l'estuaire, les clapages influencent les concentrations de matière en suspension à proximité du site de dépôt, dans un rayon d'environ 3 km. Cette figure peut être mise en relation avec la Figure IV.5.b. Ces deux figures sont remarquablement similaires en termes d'amplitude des concentrations et en termes d'emprise des différences à l'embouchure et le long du littoral Havrais. Ceci veut dire que le surplus de MES observé au sud et à l'ouest de Port 2000 lorsqu'il y a clapage au Kannik provient essentiellement de la resuspension des vases clapées. Néanmoins entre les digues, dans le secteur du bouchon vaseux, du matériel sédimentaire préalablement marqué est retrouvé en quantité significative (Fig. IV.5.b) alors que très

peu de différence apparaît sur la comparaison des médianes de turbidités de ces deux scénarios (Fig.IV.5.c). Ceci indique qu'entre les digues, dans la zone du bouchon vaseux, les valeurs des concentrations en MES ne sont pas influencées par les clapages, même si elles contiennent du matériel clapé en quantité non négligeable.

Les différences entre les simulations NOC et NOD permettent de quantifier l'effet des dragages seuls sur les concentrations en MES. Les zones en bleu sur la Figure IV.5.d présentent des concentrations plus fortes en l'absence de dragage, alors que les zones en rouge présentent des concentrations plus fortes avec dragage (et sans clapage). Les concentrations en fosse nord et à l'amont du pont de Normandie sont donc plus élevées sans dragage qu'avec. En revanche les concentrations sont plus fortes sur les Ratelets et en fosse sud et entre les digues en présence de dragage. Quantitativement ces différences (de l'ordre de 10 mg/l) sont inférieures aux concentrations médianes (de l'ordre de 50 mg/l) (Figure IV.5.a)

La comparaison KAN/NOD illustre les effets combinés des dragages et clapages (Figure IV.5.d). Les concentrations en MES dans le cas KAN sont plus importantes dans le secteur endigué (de l'engainement à Honfleur), dans la zone Ratelets/fosse sud et au nord du Kannik ainsi qu'au droit du littoral Havrais. En revanche, des turbidités plus importantes sont observées en fosse Nord et en amont du pont de Normandie en l'absence de dragage. Dans l'ensemble, les différences observées sont de l'ordre de 5 mg/l ; ce qui peut représenter jusqu'à 20% d'écart par rapport à la référence dans les secteurs cités précédemment. L'analogie entre les différences des scénarios NOC et NOD (avec ou sans dragage) et celles des scénarios KAN et NOD (avec ou sans dragage plus clapage) montrent clairement que l'effet des clapages sur les MES est nettement plus faible que celui des dragages, sauf au nord et à l'est immédiat du site d'immersion.

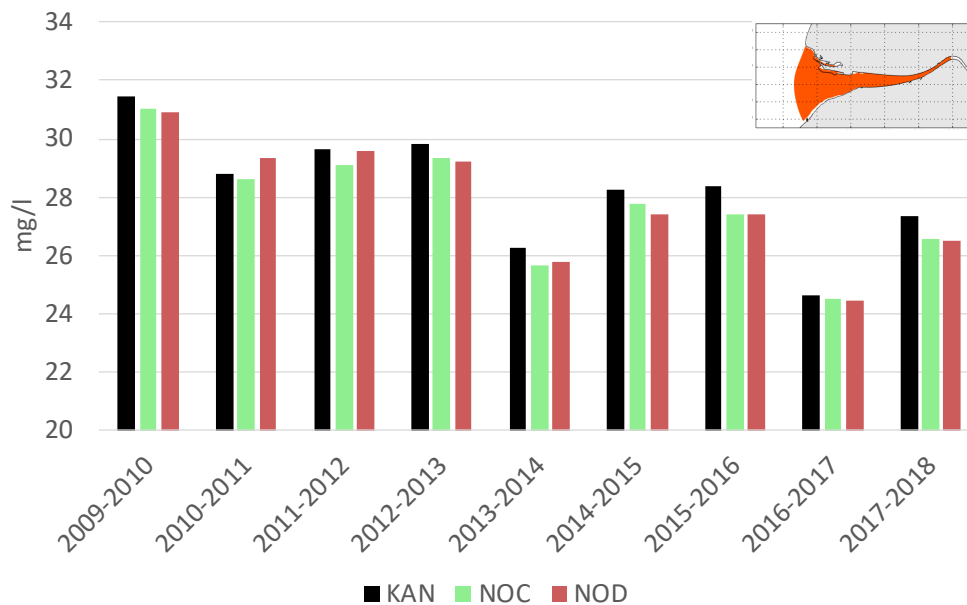


Figure IV.6: Moyenne sur l'estuaire interne des médianes annuelles de concentrations en MES (moyennées sur la profondeur) dans l'estuaire interne durant les 9 années hydrologiques simulées pour les configurations KAN / NOC / NOD. L'emprise "estuaire interne" considérée est indiquée sur la carte en vignette

L'évolution durant les 9 années simulées de la moyenne sur l'estuaire interne des médianes annuelles des MES moyennées sur la profondeur est représentée en Figure IV.6. Pour les 3 configurations, une légère diminution des médianes de concentration en MES est observée sur la période. Il est néanmoins intéressant d'observer que cette décroissance n'est pas constante. En effet, les années présentant des débits importants et/ou des conditions marines agitées présentent des concentrations médianes en hausse par rapport aux années précédentes (Figure IV.4). Ceci est particulièrement visible entre 2016-2017 et 2017-2018. Concernant les différences entre les 3 scénarios, les concentrations observées sur

le scénario KAN sont globalement toujours légèrement plus élevées (de l'ordre de 2%) que celles des scénarios NOC et NOD.

Est-ce que ces effets sur les concentrations à l'échelle de l'embouchure ont des répercussions sur le bouchon vaseux ?

IV.4.1.2 Bouchon vaseux

Le bouchon vaseux de l'estuaire est caractérisé par sa masse maximale par cycle de marée et la position médiane de son centre de gravité par marée, en intégrant les masses en suspension sur l'emprise définie sur la Figure III.14. La Figure IV.7 représente les évolutions des masses et position du bouchon vaseux sur la période 2009-2018 pour les scénarios KAN, NOC et NOD, ainsi que les variations des forçages débits, marées et vagues.

Les 3 simulations présentent des dynamiques de bouchons vaseux très similaires, avec des variations de masses et de positions saisonnières quasiment identiques. La plus grande différence en termes de masse du bouchon vaseux est observée durant la dernière année entre les configurations KAN (40,5 kt) et NOD (37,2 kt). A l'échelle des 9 ans, la simulation KAN présente la masse moyenne de bouchon vaseux la plus élevée avec 40.5 kt, contre 38,7 kt pour NOC et 39.2 kt pour NOD. Concernant les positions, ces dernières sont très proches avec une position moyenne pour la référence KAN au pk 357,7, au pk 358 pour NOC et au pk 357,9 pour NOD. Ces différences, même concernant les masses, restent faibles au regard des incertitudes existantes sur la simulation du bouchon vaseux (cf. IV.2.1.).

Le traçage numérique permet de quantifier la contribution des différentes vases marquées (cf. IV.2.3.) à la masse totale du bouchon vaseux. La Figure IV.8 représente l'évolution de ces contributions en pourcentage de la masse totale, pour les scénarios KAN (a), NOC (b) et NOD (c), ainsi que les forçages débit de la Seine, marée (d) et vagues (e) sur la période simulée.

Dans le cas KAN, l'utilisation du marquage permet de quantifier la contribution des sédiments dragués/clapés à la masse du bouchon vaseux (Figure IV.8.a). En lien avec les conclusions du chapitre III, il est intéressant de voir que les taux de vases draguées par les ports de Rouen et du Havre présentent des variations saisonnières. En revanche, étant donné l'augmentation quasi linéaire au cours du temps des quantités marquées illustrées par la Figure IV.2, il est surprenant de voir qu'elles n'augmentent pas de manière continue au cours de la période simulée. En effet, ces taux sont maximaux en fin de cinquième année/début de sixième année, où les vases marquées par Rouen représentent environ 10 % de la masse du bouchon vaseux. Au-delà, les fractions de sédiments clapés (pour l'essentiel les vases clapées au Kannik) oscillent saisonnièrement autour d'une moyenne stable à 8-10 %. En moyenne sur la période simulée, les vases clapées par le GPMR contribuent à 8 % de la masse du bouchon vaseux, celles clapées par le GPMH à environ 0.5 %. La somme de ces contributions (3,5 kt) est plus importante que la différence de masse du bouchon vaseux observée entre les simulations KAN, NOC et NOD (Figure IV.7). Cet écart montre que la disponibilité du matériel sédimentaire (ici mud R et mud H) n'est pas le seul facteur limitant la masse du bouchon vaseux dans le cas NOC. Les évolutions des masses du bouchon vaseux induites par l'absence de clapage et l'absence de dragage ne sont donc pas uniquement directement liées au clapage ; elles peuvent être induites par une évolution de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire.

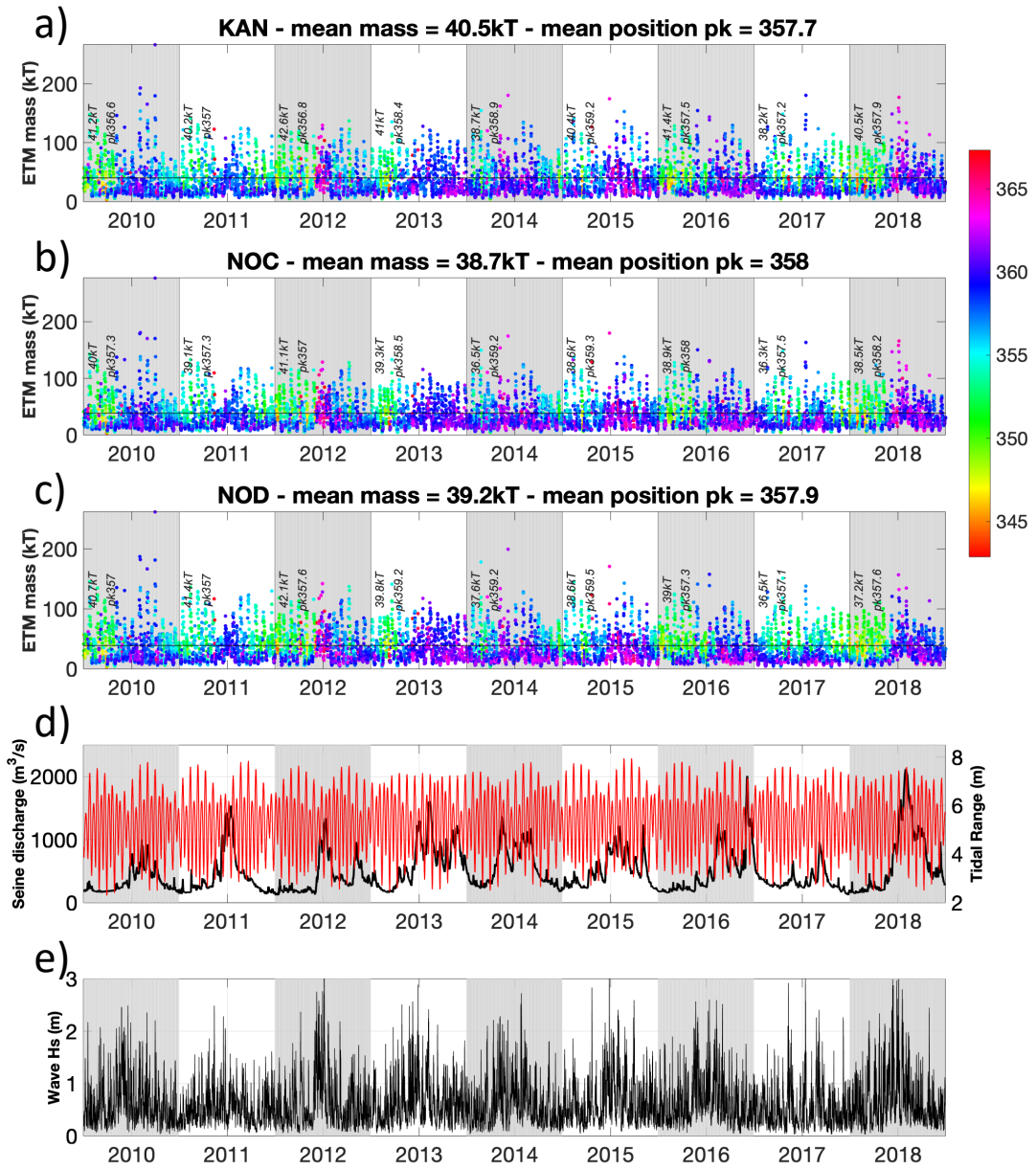


Figure IV.7: Évolution de la masse maximale par marée et de la position médiane par marée (couleur) du bouchon vaseux au regard des forçages en débits de Seine et marées (d) et vagues (e) pour les scénarios KAN (a), NOC (b) et NOD (c). Pour chaque scénario la moyenne de la masse maximale par marée et la moyenne de la position médiane sur les 9 ans simulés est indiquée dans le titre de la figure. Les moyennes annuelles des masses et positions du bouchon vaseux sont indiquées pour chaque année en noir

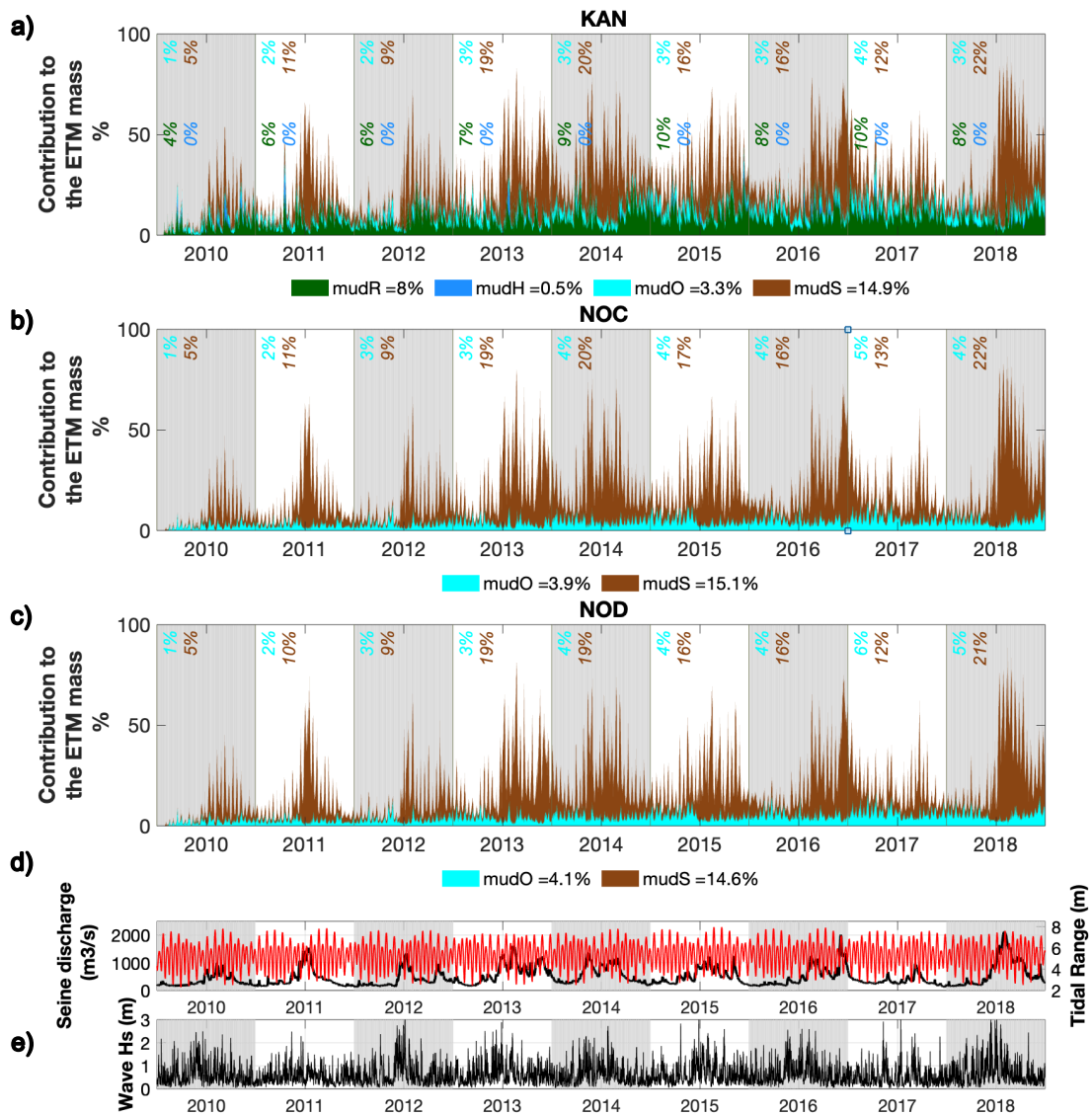


Figure IV.8: Contribution des sédiments marqués à la masse du bouchon vaseux pour les scénarios KAN (a) , NOC (b) et NOD (c) au regard des forçages marée/débit (d) et vagues (e). Pour chaque année hydrologique, la moyenne de la contribution de chaque vase est indiquée en italique en respectant la couleur de la légende. Sur la légende, le pourcentage représente la contribution moyenne sur les 9 ans

La comparaison des Figure IV.8.a.b.c montre que les taux de vases provenant du large (mud O) et provenant de la Seine (mud S) présentent des variations saisonnières quantitativement équivalentes pour les trois scénarios. De manière analogue aux vases clapées, ces contributions semblent augmenter durant les premières années pour ensuite se stabiliser. Le sédiment initial de l'embouchure de la Seine ne contenant ni de la vase de Seine ni de la vase venant du large apportées pendant la simulation, leurs augmentations au cours des premières années de simulation est normale. Le fait d'atteindre un palier relatif (car il demeure une variabilité saisonnière et interannuelle) après seulement 4 ou 5 ans est intéressant. Il semble qu'on obtienne une stabilisation de la fraction du bouchon vaseux représentée par les vases de Seine ou du large, les premières variant beaucoup avec le débit de Seine (de 10 % en étiage à plus de 60 % en crue). Cette stabilité dynamique rejoint celle constatée pour les fractions clapées par les ports, confirmant l'atteinte d'un régime d'équilibre dynamique de la composition du bouchon vaseux, après un temps relativement court d'environ 5 ans.

En moyenne sur la période, mud O et mud S contribuent à hauteur de 4 % et 15 % à la masse du bouchon vaseux. Ces valeurs, du même ordre de grandeur que la contribution des sédiments clapés,

permettent de relativiser l'importance des dragages dans les concentrations en suspensions. Il serait toutefois intéressant d'étudier si cette augmentation observée durant les premières années est induite par la variabilité des forçages entre le début et la fin de la simulation (4 dernières années intenses Figure IV.4) ou bien par la durée de la simulation, et l'atteinte d'un potentiel régime stationnaire dans la simulation des dynamiques sédimentaires, ou encore une combinaison des deux. Une première tentative de corrélation avec les indicateurs de la Figure IV.4 n'a pas permis de conclure.

IV.4.2 Impact des dragages sur la couverture sédimentaire

IV.4.2.1 Effets des dragages/clapages sur les faciès sédimentaires

En lien avec la variabilité des forçages et ses répercussions sur le fonctionnement morpho-sédimentaire des estuaires, les faciès sédimentaires superficiels sont très variables, spatialement et temporellement. Ces variabilités marquées, y compris à l'échelle des cycles ME/VE créent d'importantes incertitudes dans l'établissement des cartes de faciès sédimentaires. Ces incertitudes sur les données terrains combinées aux hypothèses du modèle sédimentaire, en particulier sur i/ la discrétisation granulométrique, ii/ la discrétisation verticale du sédiment, et iii/ l'initialisation sédimentaire du modèle, limitent la pertinence de confronter le modèle aux données *in-situ*. A défaut de données de faciès *in-situ* sur la période simulée, l'hypothèse est faite que la simulation des évolutions des faciès sédimentaires reste réaliste avec les incertitudes qui viennent d'être évoquées. Compte-tenu de l'incidence de la condition initiale du sédiment, cette vraisemblance de la couverture sédimentaire devrait être d'autant meilleure que la profondeur d'investigation dans le sédiment est faible et que la dynamique locale est intense. A l'inverse, la variabilité temporelle (dépendance selon les événements d'érosion/dépôt sera accentuée, et donc fastidieuse à décrire. A titre de compromis, les faciès sédimentaires sont étudiés sur la base des moyennes mensuelles des pourcentages de vases sans les 5 premiers centimètres du sédiment.

La Figure IV.9.a représente le pourcentage de vase dans le sédiment superficiel observé avec la configuration de référence pour le dernier mois de la simulation (juillet 2018). Cette répartition est qualitativement conforme à notre connaissance des faciès dans l'estuaire de Seine, les zones de sédimentation fine des bancs d'embouchure (Amfard, Ratelets) et de la fosse nord (Banc aval, banc de la Passe, vasière nord) sont représentées par le modèle. On notera toutefois que l'empreinte de la délimitation Ouest du faciès uniforme appliqué à toute l'embouchure lors de l'initialisation sédimentaire du modèle (cf. chapitre III) est toujours visible. Cette observation, après 9 ans de simulation (+1 an de *spin-up*) est valable pour tous les scénarios ; ceci indique que les mouvements sédimentaires naturels à l'ouest de l'embouchure ne sont pas suffisants pour modifier le substrat superficiel sur une épaisseur de 5 cm. Par ailleurs, la fraction de vase dans le secteur de la vasière nord du Havre paraît faible : cela résulte du fait que les dépôts vaseux, bien simulés par le modèle, restent faibles en intensité (rythme de submersion assez peu fréquent) et concernent donc une faible épaisseur, inférieure à 5 cm. C'est très différent pour les bassins et chenaux d'accès au port du Havre, qui deviennent vite vaseux car la dynamique y est plus forte.

Les Figure IV.9 c d et e représentent les différentiels de pourcentage de vase dans le sédiment superficiel entre les configurations KAN/NOC (%^{age} vase KAN - %^{age} vase NOC), NOC/NOD (NOC - NOD) et KAN/NOD (KAN - NOD) respectivement. La comparaison KAN/NOC montre, de manière analogue à l'observation faite sur les concentrations en MES, qu'à l'échelle de l'embouchure, les effets des clapages sur les faciès sédimentaires (couleurs chaudes) se font principalement ressentir à proximité immédiate du site d'immersion du Kannik (Figure IV.9.c), au nord/nord-est plus précisément. Les immersions au Kannik génèrent ainsi une augmentation des teneurs en vases comprise entre +30 et +50 %. Ce changement de nature sédimentaire correspond à un dépôt de sédiment préalablement clapé au-dessus du Kannik, comme le montre la distribution dans le sédiment superficiel de ces matériels clapés (Figure IV.9.b). Il est aussi frappant de voir que le maximum de cette distribution (en noir sur la figure IV.9.b) se positionne au niveau du site d'immersion et est de nature sableuse (Figure IV.9.c) : ce résultat illustre le taux de transport plus faible du sable, comparé à celui de la vase. Dans la simulation de référence (KAN), des faciès sensiblement plus vaseux (jusqu'à +30%) sont observés dans certaines parties des bancs de la Passe et du Ratier, en particulier sur le tombant des Ratelets. Dans

le reste de l'estuaire, la comparaison ne met pas en avant de différence significative (une forme de bruit est observé).

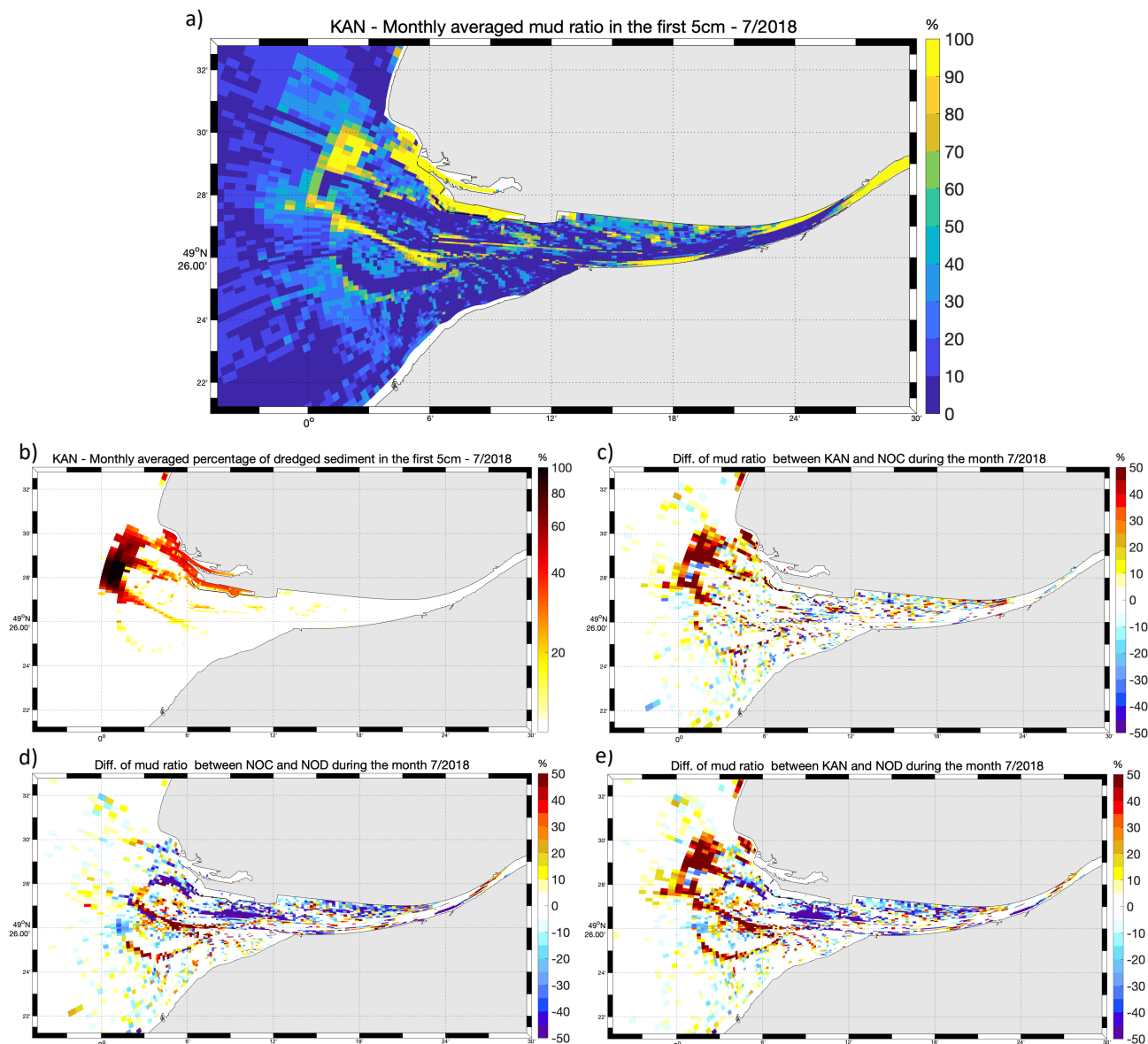


Figure IV.9 : Teneur en vase du sédiment superficiel après 9 ans de simulation. a) distribution de la teneur en vase du sédiment superficiel (5cm) moyennée au cours du mois de juillet 2018, pour le scénario de référence KAN ; b) proportion (pourcentage) de vases préalablement clapées par les ports de Rouen et du Havre (état en juillet 2018) ; c) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios KAN et NOC (% KAN - % NOC) : effets des clapages ; d) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios NOC et NOD (% NOC - % NOD) : effets des dragages ; e) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios KAN et NOD (% KAN - % NOD) : effets combinés des dragages et clapages. Les valeurs de c), d) et e) sont établies pour une épaisseur de 5 cm et moyennées pendant le mois de juillet 2018

La comparaison NOC/NOD illustre les effets des dragages (sans clapages) sur les faciès sédimentaires (Figure IV.9.d). Les couleurs chaudes (resp. froides) représentent des teneurs en vase plus fortes en présence de dragage (resp. en l'absence de dragage). Des variations significatives des teneurs en vases dans le sédiment superficiel sont observées à l'échelle de l'estuaire, y compris à distance des zones de dragages. Les secteurs naturellement vaseux de la fosse nord (en particulier le banc aval) apparaissent encore plus vaseux en l'absence de dragage. A l'inverse, l'extrémité ouest du banc d'Amfard, le banc du Ratier et en particulier son pourtour sud apparaissent comme plus vaseux avec

dragage (entre +30 % et +40 % de teneur en vases). En lien avec les conclusions du chapitre III concernant le rôle classique de piège à sédiment des zones de dragages, Il est intéressant de noter que les sédiments superficiels semblent moins vaseux à l'engainement après 9 ans sans dragage.

Globalement, après 9 ans sans dragage, la fosse nord de l'estuaire apparait comme plus vaseuse, alors que le pourtour du banc du Ratier ainsi que le site de dépôt du Kannik et son voisinage nord apparaissent comme plus sableux que dans le scénario avec dragage/clapage. Si l'on écarte l'effet direct du clapage au Kannik, les contrastes sont plus marqués dans le différentiel NOC/NOD que dans le différentiel KAN/NOC : il apparait que la réalisation ou non des dragages influence plus la nature du sédiment superficiel dans l'embouchure, que le fait de claper ou non les matériaux de dragage.

Une illustration complémentaire des différences entre les scénarios KAN, NOC et NOD en termes de faciès sédimentaire est la comparaison directe des surfaces cumulées associées à différentes classes de teneur en vases. La Figure IV.10 représente ce calcul pour l'emprise de l'estuaire interne à la fin de la simulation en juillet 2018 et également la condition initiale du modèle KAN 2009 (pour rappel : après un an de *spin-up*, en partant d'une teneur en vase uniforme de 40 %). Les répartitions des surfaces sont relativement proches entre les 3 scénarios, néanmoins 3 éléments ressortent :

- Les trois scénarios ont évolué de la même manière par rapport à l'initialisation : une diminution de la classe 20-40 % au profit de la classe 0-20%. Cette forte évolution résulte du caractère très schématique de la condition initiale (obtenue après un an de *spin-up* sans couplage morphodynamique sur la base d'une couverture sédimentaire uniforme contenant 40 % de vases), et ne doit pas donner lieu à interprétation, si ce n'est qu'un réajustement assez rapide de la couverture sédimentaire est constaté (voir aussi Le Hir et Grasso, 2018 : Projet Seine-Aval Anphyeco)
- La simulation NOC, en vert, présente globalement les plus faibles teneurs en vases dans le sédiment superficiel.
- Les surfaces vaseuses (> 60 %) sont légèrement plus importantes dans le cas NOD que dans les autres cas (environ + 5 km²).

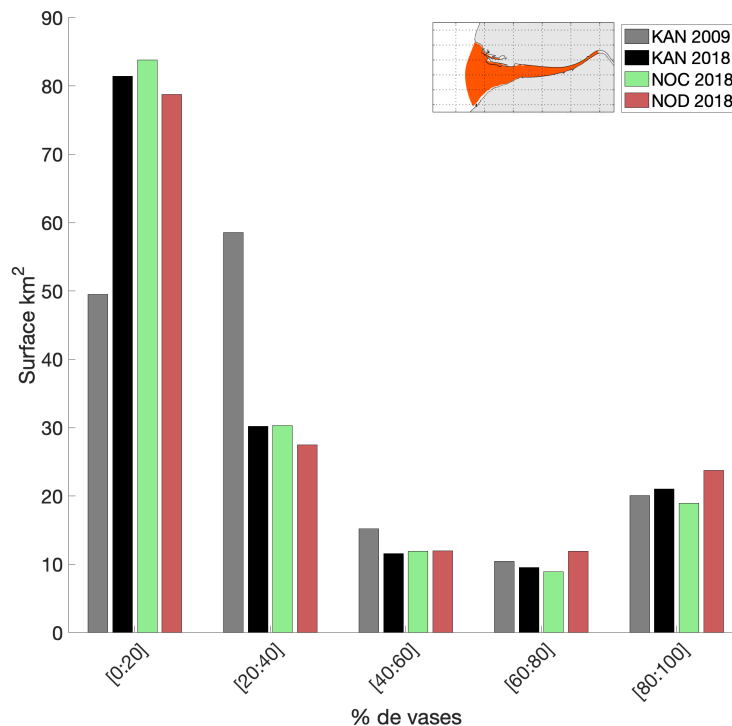


Figure IV.10 : Cumuls des surfaces associées à différentes classes de teneur en vases de 0 à 100 % du sédiment superficiel (5 cm) en fin d'initialisation du modèle (KAN 2009) et en fin de simulation (juillet 2018) pour les scénarios KAN, NOC et NOD. L'emprise d'intégration des surfaces est indiquée dans la vignette

Afin d'étudier la dynamique temporelle de ces évolutions, la Figure IV.11 présente l'évolution des moyennes mensuelles dans l'estuaire interne (cf. vignette sur le graphique) des teneurs en vases dans les 5 cm superficiels pour les 3 scénarios KAN/NOC/NOD. Comme au paragraphe précédent, la délimitation de la zone estuaire interne a été choisie de manière à exclure le site de dépôt de dragage du Kannik et ses effets directs sur les teneurs en vases.

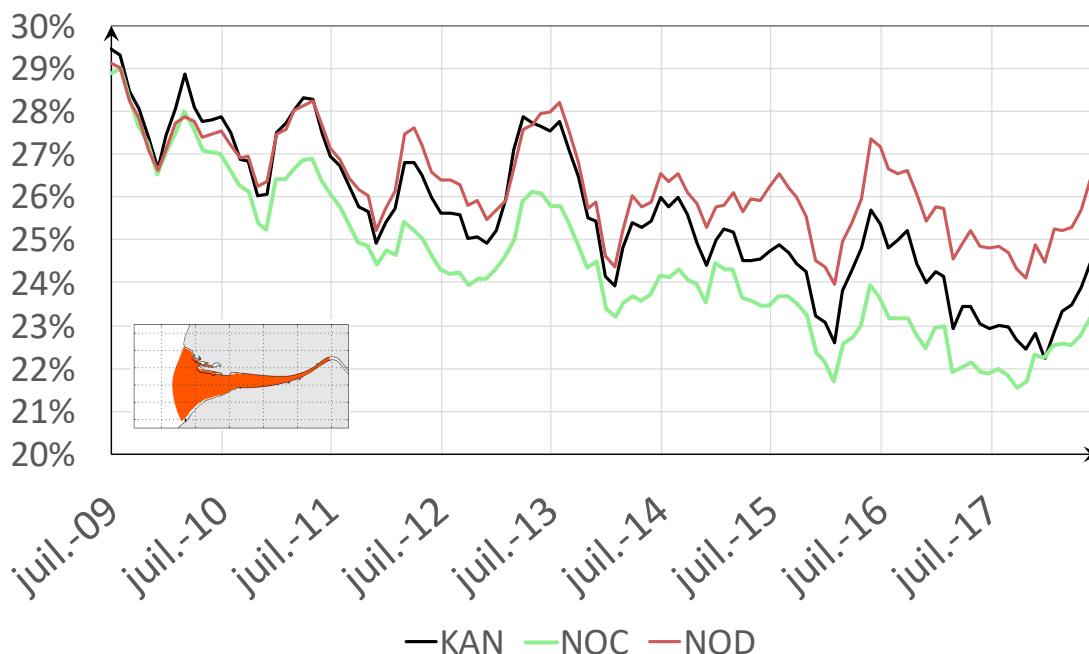


Figure IV.11 : Évolution des moyennes mensuelles des teneurs en vases dans les 5 cm superficiels pour les 3 scénarios KAN/NOC/NOD sur la période 2009-2017. L'emprise de calcul des moyennes est indiquée en orange dans la vignette

En lien avec les apports de la Seine, et la remobilisation des sédiments de l'embouchure par les tempêtes, le modèle simule une couverture sédimentaire plus vaseuse durant la période hivernale que pendant l'été, ce qui est cohérent avec les observations de Lesourd (2000). Par ailleurs, une diminution de la teneur en vases est observée durant les 5 premières années, avant de tendre vers une relative stabilité à partir de la fin 2013. Cette diminution peut être mise en lien avec celle observée pour les concentrations en suspension, et l'ambiguïté de l'origine de cette réduction demeure : variation des forçages et/ou persistance des effets de l'initialisation du modèle.

La Figure IV.11 montre que dès les premières années, les extractions de sédiments réalisées dans la simulation NOC conduisent à un appauvrissement en vase des fonds de l'estuaire d'environ 2 % comparativement à la situation de référence avec clapage au Kannik. Les résultats des configurations KAN et NOD sont relativement similaires durant les 6 premières années ; passé cette sixième année, les teneurs en vases observées pour ces deux simulations divergent, avec des valeurs supérieures d'environ 2 % dans le cas sans dragage à la fin de la simulation.

IV.4.3 Devenir de l'ensemble des sédiments clapés

De la même manière que dans la colonne d'eau (cf. IV.3.1), le marquage numérique des sédiments immergés par les ports permet de suivre leur répartition sur le fond. La Figure IV.12 présente l'évolution de la répartition sur le fond de l'ensemble des sédiments clapés par les deux ports durant les neuf années simulées (vases et sables confondus). Les sédiments immergés sont dispersés par les courants, et en particulier par le pompage tidal dans quasiment tout l'estuaire. En cohérence avec les

observations faites par Boust (1997) avec des isotopes radioactifs, des dépôts de sédiments clapés sont observés jusqu'à Tancarville. Des dépôts sont également observés vers le nord, en direction de la côte d'Albâtre. Il est intéressant de noter que ces figures mettent aussi en avant le retour important des sédiments dragués vers les zones de dragages de Rouen et du Havre.

Dans l'ensemble les masses par unité de surface les plus importantes sont situées :

- à proximité des deux sites d'immersions de Kannik et Octeville et
- sur les zones de sédimentation connues de l'estuaire (vasière nord, banc de la passe, banc d'Amfard et pourtour ouest et sud des bancs des Ratelets et du Ratier), mais aussi les zones draguées qui sont des sites préférentiels de dépôt (chenal de Rouen, accès et bassins du Havre)..

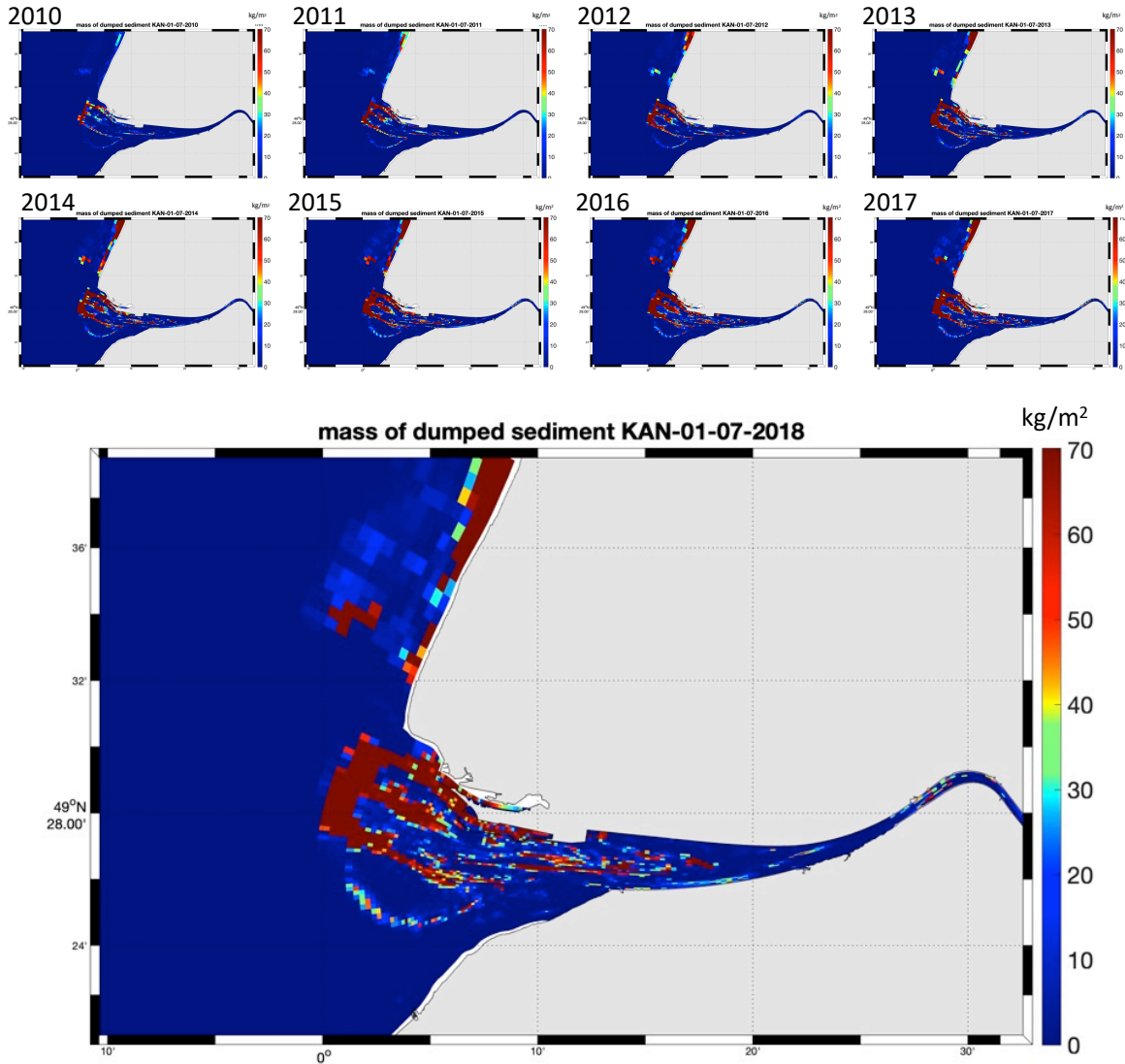


Figure IV.12 : Répartition dans les fonds sédimentaires des moyennes durant le mois de juin des masses de sédiments (vases et sables) immergés par le port de Rouen au Kannik et par le port du Havre à Octeville. (les échelles de couleurs sont strictement identiques sur chacune des cartes)

La Figure IV.12 met en avant une augmentation des masses de sédiments marqués déposées sur le fond durant les 9 années simulées (le gradient de couleur unique met en avant cette augmentation en particulier sur les 5 premières années). Cette augmentation des masses déposées est à corrélérer à l'augmentation des quantités de sédiments marqués dans le modèle, illustrée sur la Figure IV.2. En effet, les dragages étant continus sur la période simulée (cf. chapitre III), les masses draguées/clapées

et donc marquées croissent dans le temps, principalement au détriment des sédiments " initiaux " (cf. IV.2.3.). Cette augmentation des sédiments marqués révèle leur disponibilité croissante parmi les sédiments "mobiles" de l'estuaire. La Figure IV.13 illustre cette augmentation et sa variabilité dans les 5 cm superficiels à l'échelle de l'estuaire interne. De manière assez similaire aux observations faites dans le bouchon vaseux (IV.3.1.2), l'augmentation est marquée durant les premières années puis semble se stabiliser. A la fin des 9 années simulées, les sédiments dragués constituent environ 3,5% du sédiment superficiel. Cette stabilité témoigne de l'atteinte d'un équilibre pour la proportion de sédiments dragués par rapport aux sédiments "naturels" se déposant sur le fond. Cet équilibre est intéressant à relever, en particulier au regard de l'augmentation du stockage de sédiments dragués illustrée Figure IV.12.

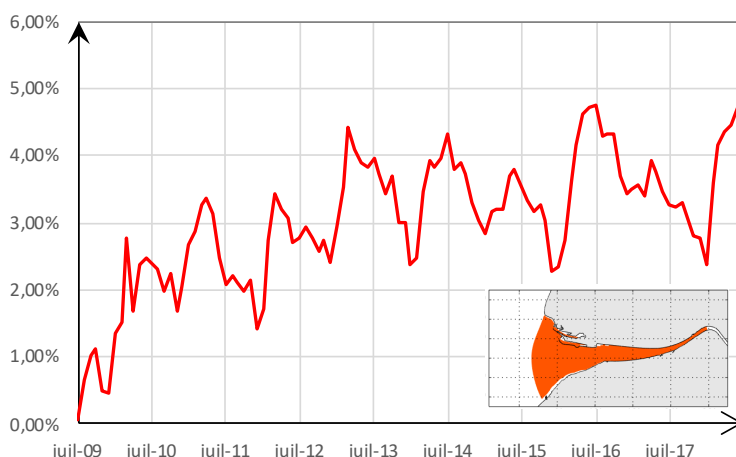


Figure IV.13 : Évolution des moyennes mensuelles dans l'estuaire interne (cf. vignette) des teneurs en sédiments marqués par les dragages/clapages de Rouen et du Havre dans le sédiment superficiel (5 cm) au cours de la période 2009-2017 (Scénario KAN)

Afin de tenter de s'affranchir de cette dépendance à la durée de la simulation, nous avons relativisé les dépôts de masses de sédiments marqués, sur toute l'épaisseur de sédiment, par rapport à la quantité totale de sédiments marqués de la classe considérée (Figure IV.2). Les Figures IV.14, IV.15, IV.16 et IV.17 présentent respectivement ces distributions relatives des masses clapées, moyennées sur le mois de juin de chaque année, en distinguant les vases clapées par Rouen et Le Havre, et les sables clapés par Rouen et Le Havre, pour les 9 années hydrologiques traitées.

Sur les Figure IV.14 et IV.15, les distributions relatives des vases marquées par le GPMR et le GPMH apparaissent comme quasiment constantes sur la période simulée. Cette stationnarité, observée dès la première année démontre qu'en moins d'un an, la répartition spatiale des dépôts des vases clapées par les grands ports est représentative des dépôts potentiellement observés à plus long terme. En revanche, la Figure IV.16, représentant la distribution relative des sables immergés par le GPMR (~ 1,5 Mt/an) montre que la distribution relative de ces derniers varie au cours de l'ensemble de la période simulée, en s'étendant progressivement vers l'intérieur de l'estuaire. Dans ce cas, la durée simulée de 9 ans ne semble pas suffisante pour quantifier la distribution finale des sables clapés au Kannik. La Figure IV.17, représentant les sables immergés par le GPMH (~ 0.2 MT/an) illustre également cette dispersion des sables clapés à Octeville, plus lente que celle des vases. Dans ce cas, une augmentation de la distribution relative vers le nord des sables clapés à Octeville est observée durant les premières années. Les années suivantes, celle-ci se stabilise, la durée de 9 ans semble ainsi suffisante pour estimer la distribution finale des sables immergés à Octeville.

Ces figures sont particulièrement intéressantes pour comprendre où se déposent finalement les sédiments naturellement déposés dans les zones draguées, après qu'ils ont été dragués puis clapés. Les 4 paragraphes suivants décrivent ainsi le devenir dans les sédiments des matériaux clapés par les grands ports sur la base des distributions relatives évaluées après chaque année hydrologique.

IV.4.3.1 Cas des vases clapées par le GPMR sur le site du Kannik

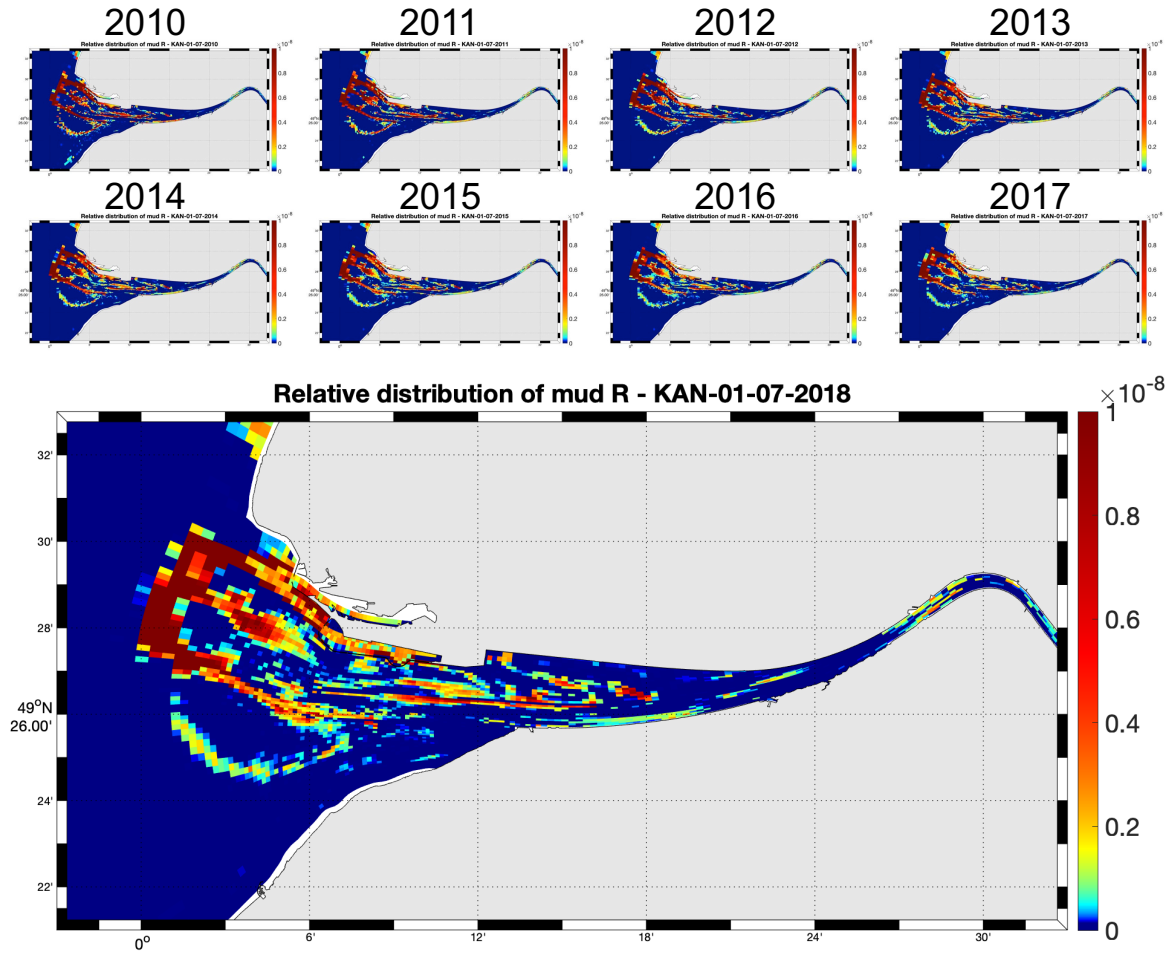


Figure IV.14 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des vases immergées par le GPMR au Kannik de juillet 2009 à juillet 2018 (en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{kg}$). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes

Les vases clapées par le port de Rouen au Kannik sont naturellement retrouvées à proximité du Kannik mais également dans tout l'estuaire, tout particulièrement la fosse nord et le pourtour des bancs Ratelets-Ratier. En lien avec l'hydrodynamisme local, des quantités particulièrement fortes sont observées au nord-est immédiat du site. Un important retour des vases immergées au Kannik vers les secteurs dragués par le port de Rouen mais aussi ceux du Havre est également observé.

IV.4.3.2 Cas des vases clapées par le GPMH sur le site d'Octeville

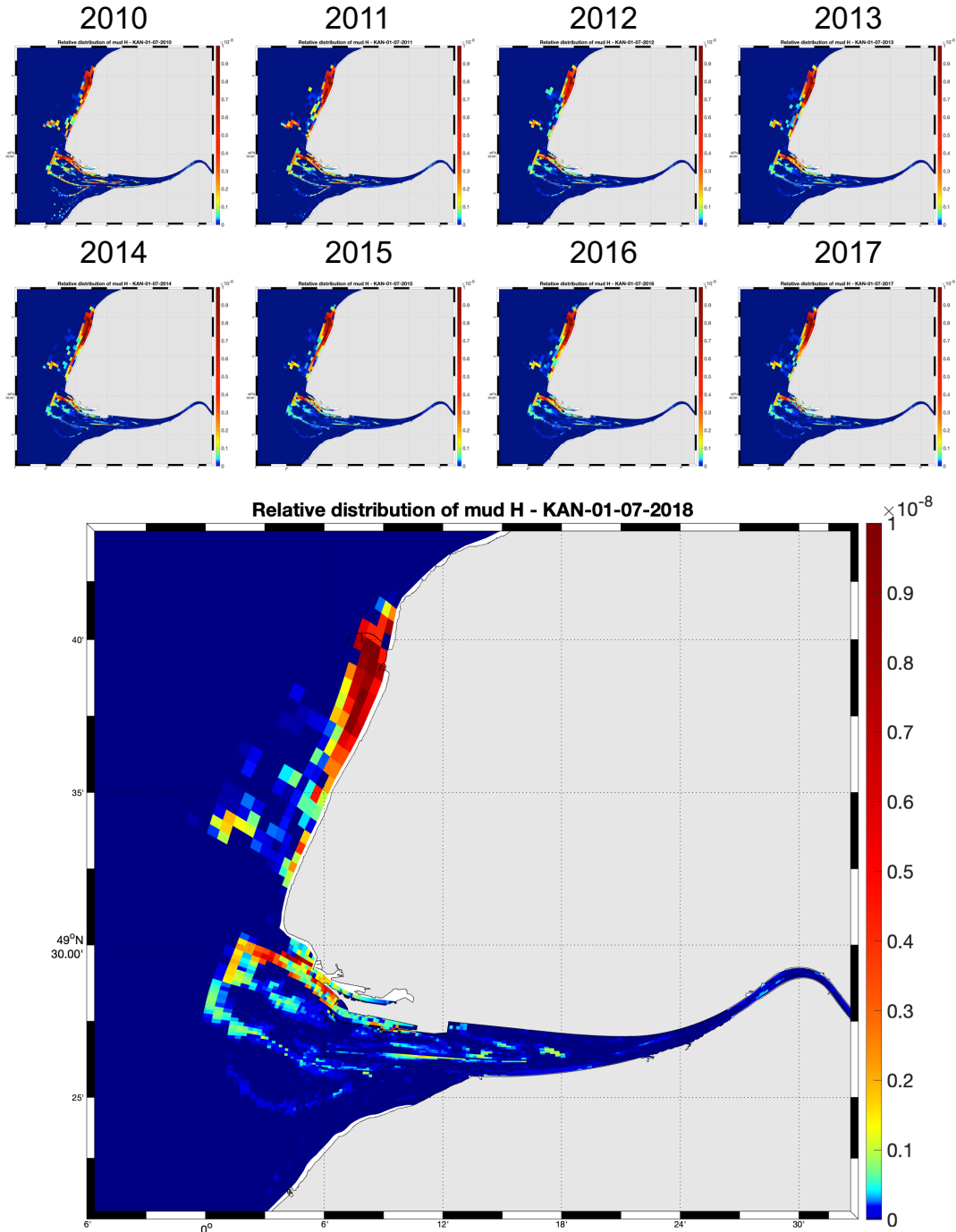


Figure IV.15 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des vases immergées par le GPMH à Octeville de juillet 2009 à juillet 2018 (en $\text{kg/m}^2/\text{kg}$). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes

Remarque : Les dépôts de vases observés entre le cap de la Hève et le port d'Antifer semblent surestimés comparativement aux observations réalisées par le GPMH. Nous avons tenté en vain de limiter ces dépôts en amplifiant de façon simpliste les contraintes de cisaillement induites par les vagues

en conditions de déferlement. Ces dépôts peuvent être dus à la faible résolution horizontale de notre modèle dans cette zone qui ne permet pas de représenter les gradients bathymétriques locaux.

Le site d'immersion d'Octeville est très dispersif (cf. IV.3), les vases clapées à Octeville ne restent donc quasiment pas sur le site. Comme l'illustre la Figure IV.15, les vases clapées à Octeville sont dispersées vers le nord et vers l'estuaire. Vers le nord, le modèle simule une importante zone de dépôt de ces vases au sud du port d'Antifer. Le dépôt des vases dans le port d'Antifer est tout à fait plausible en revanche l'extension de ce dépôt vers le sud semble surestimée, sans doute en raison de l'insuffisance de la dynamique des vagues simulée sur la côte du Pays de Caux. En estuaire, les dépôts des vases du GPMH sont nettement moindres que ceux des vases du GPMR, néanmoins les zones de sédimentation sont comparables. Un retour vers les chenaux d'accès aux bassins du Havre est clairement observé.

IV.4.3.3 Cas des sables clapés par le GPMR sur le site du Kannik

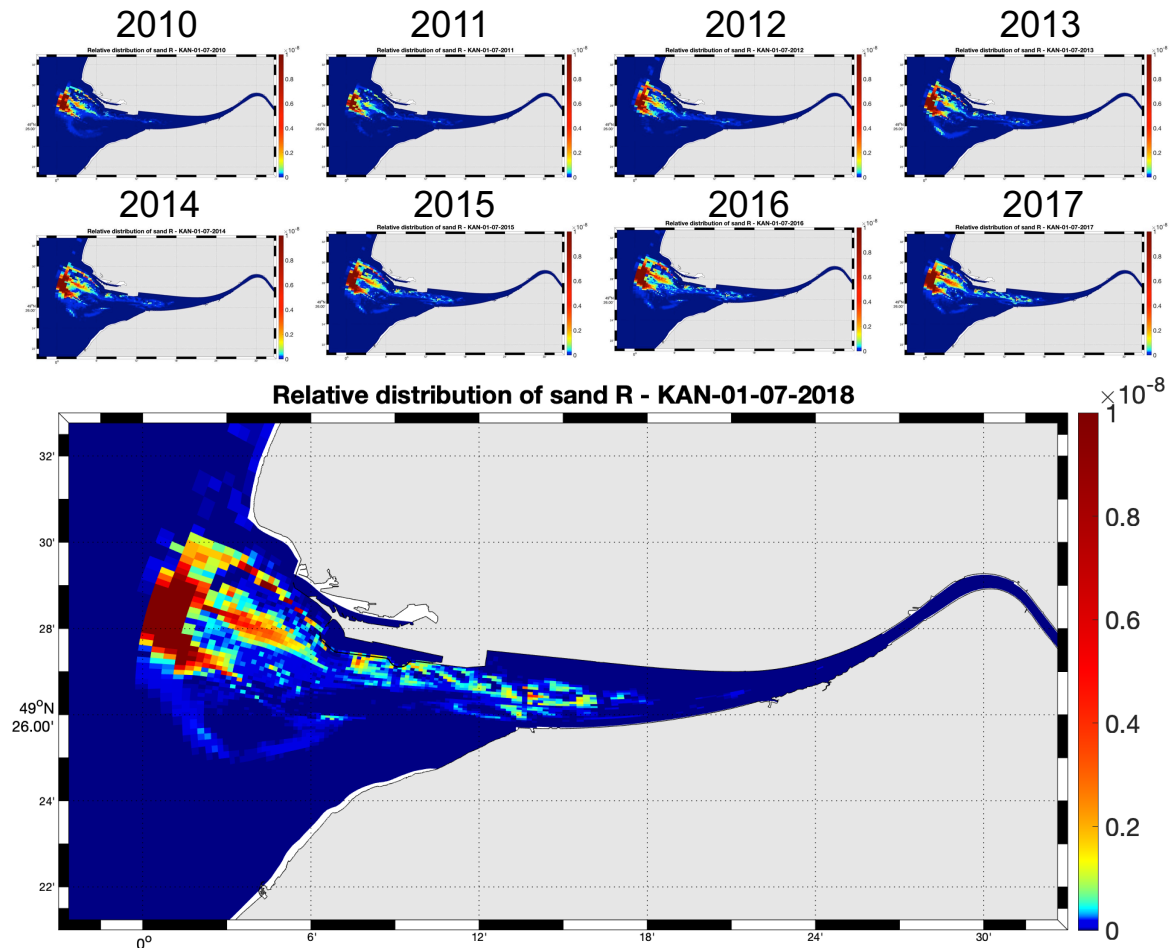


Figure IV.16 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des sables immergés par le GPMR au Kannik de juillet 2009 à juillet 2018 (en $\text{kg/m}^2/\text{kg}$). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes

Après 9 ans de marquage, les sables immergés au Kannik semblent présents dans quasiment toute l'embouchure (Figure IV.16). En lien avec la discussion du chapitre III (section III.4.5), une part

importante de ces sables rejoint la fosse nord et des dépôts relativement importants apparaissent entre l'épi et la brèche de la digue basse nord. Il serait intéressant de voir si, en poursuivant la simulation, la contribution de ces sables immergés au Kannik aux dragages réalisés à la Brèche augmente.

IV.4.3.4 Cas des sables clapés par le GPMH sur le site d'Octeville

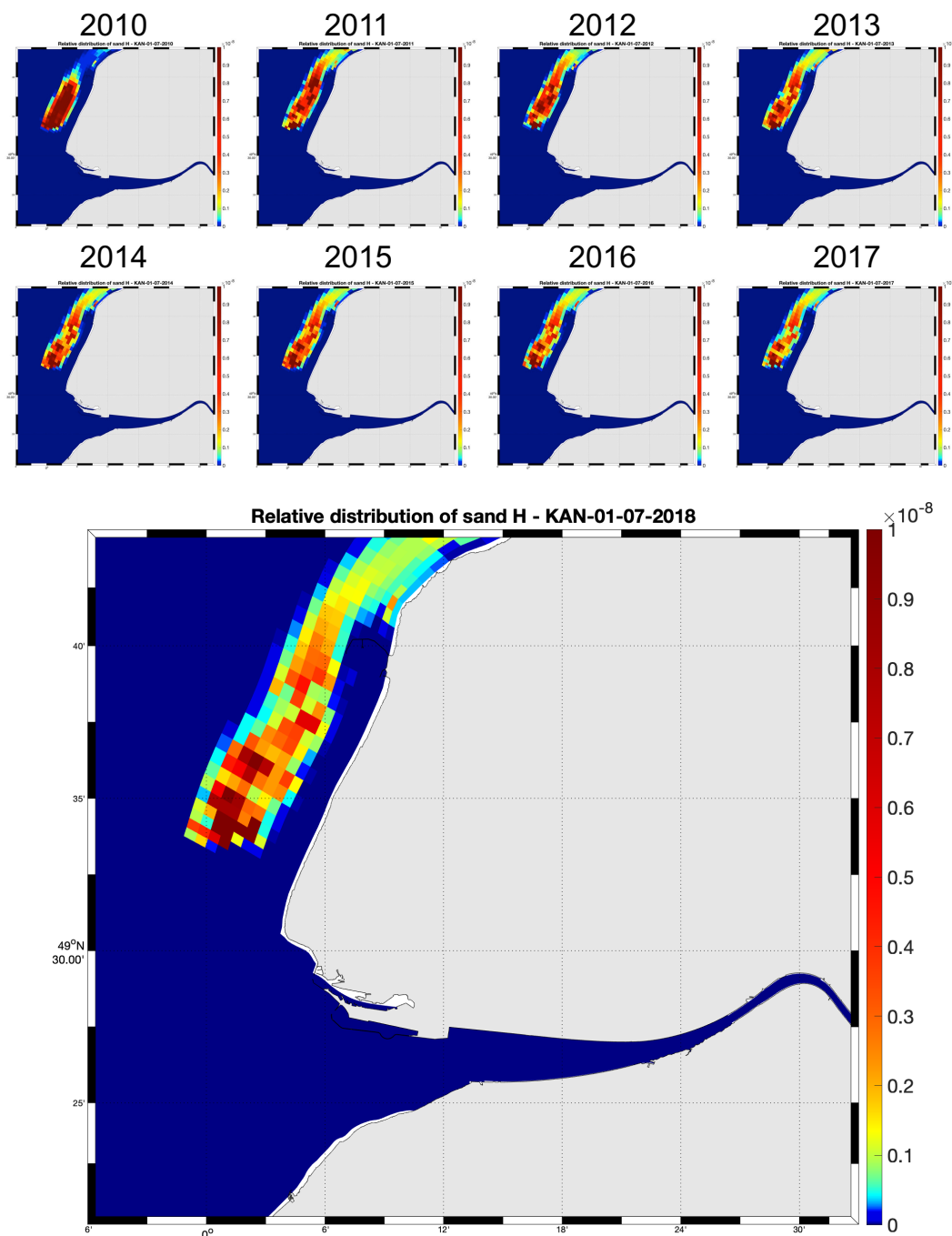
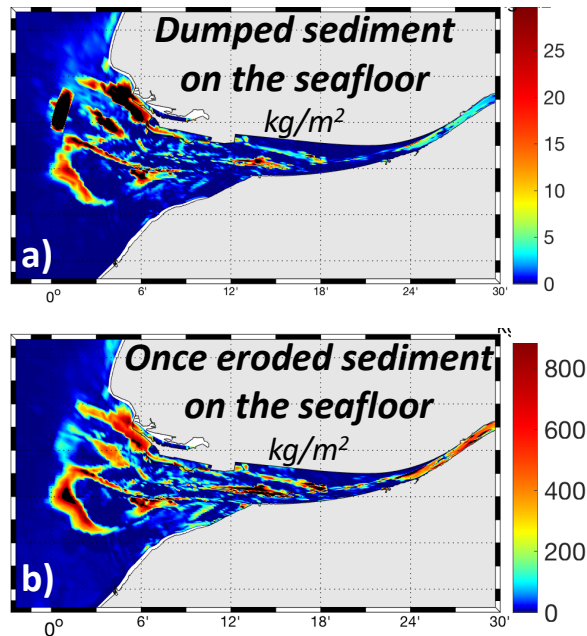


Figure IV.17 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des sables immergés par le GPMH à Octeville de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²/kg). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes

Les dragages du GPMH sont principalement vaseux, néanmoins les 10 % de sables immergés à Octeville sont exclusivement transportés vers le nord. Il est intéressant de remarquer que contrairement aux vases, les sables se retrouvent dans le sédiment au large du port d'Antifer (Figure IV.17).

IV.4.3.5 Comparaison de la dynamique des sédiments marqués et de la dynamique des sédiments déjà en place

Afin de comparer les motifs de sédimentation globaux (matériel non dragué) et ceux des sédiments clapés, une simulation spécifique traçant le devenir des sédiments mobiles a été réalisée sur une précédente configuration du modèle, en les distinguant du sédiment déjà en place. Dans cette simulation, nous avons défini les masses de sédiments mobiles comme les masses de matériel sédimentaire ayant subi le processus d'érosion au moins une fois. La Figure IV.18 issue de Lemoine et al. (2020) compare les dépôts des sédiments mobiles (*once eroded*) et les dépôts des sédiments immergés par le GPMR au Kannik (sables et vases). A l'exception de la proximité immédiate du site de clapage, les motifs de dépôts sont remarquablement similaires. Ceci démontre que les sédiments clapés par les ports contribuent à la sédimentation au même titre que tous les autres sédiments (sables et vases). Sur cette figure, réalisée après 3 ans de simulation, la contribution des sédiments dragués aux dépôts apparaît comme très faible (20 à 50 fois inférieure à celle des sédiments mobiles).



IV.4.4 Impact des dragages sur la morphologie de l'estuaire

IV.4.4.1 Évolution de la bathymétrie

La comparaison des évolutions morphologiques sur la période simulée pour les 3 scénarios permet de mettre en avant les effets des dragages et des clapages sur la morphodynamique de l'estuaire. La Figure IV.19 représente les différentiels bathymétriques simulés entre 2018 et 2009 pour les scénarios KAN (référence), NOC et NOD. Pour rappel, le *spin-up* étant réalisé sans couplage morpho-dynamique, les trois scénarios démarrent sur une bathymétrie identique. Les trois différentiels ont donc une référence commune.

Dans l'ensemble ces trois différentiels sont comparables : si l'on exclut le chenal de navigation dragué et le secteur du Kannik, les zones en dépôt et les zones en érosion sont les mêmes : seule l'amplitude des évolutions varie. Cette figure est complétée par la Figure IV.20 constituée de 3 différentiels réalisés à partir de ceux de la Figure IV.19. Il s'agit des différentiels entre les évolutions morphologiques des scénarios KAN-NOC, NOC-NOD et KAN-NOD. La mise en regard de la Figure IV.19 et de la Figure IV.20 permet de mettre en avant les différences d'amplitude des dépôts et des érosions.

La comparaison des Figure IV.19.a et b et de la Figure IV.20.a renseigne sur les effets des clapages sur les évolutions morphologiques. En cohérence avec les observations faites sur les concentrations en MES et sur les faciès sédimentaires, à l'échelle de la période simulée (9 ans), les clapages affectent principalement la proximité du site d'immersion. Des dépôts compris entre 20 et 30 cm sont toutefois observés au niveau du pied du banc des Ratelets (relativement proche du Kannik). Les zones en érosion situées entre les digues face à Honfleur et en fosse sud au large de la plage de Honfleur présentent également de sensibles différences (dans le dernier cas, il pourrait s'agir de dunes générées par le modèle, qui seraient décalées entre les deux scénarios). En dehors de ces zones, les évolutions entre le scénario KAN et le scénario NOC sont comparables, on notera toutefois une sédimentation sensiblement plus importante sur les zones en sédimentation dans le cas avec clapage (zones jaunes très claires : 10 cm). Les autres différences s'avèrent ressembler à une forme de bruit induit par des différences dans la localisation des dépôts et des érosions.

Les Figure IV.19.b et IV.19.c et la Figure IV.20.b illustrent les effets des dragages (sans clapage) sur les évolutions morphologiques. Contrairement au clapage, les dragages ont des effets importants sur toute l'emprise de l'estuaire. Dans l'ensemble, le scénario sans dragage conduit à des dépôts significatifs, dans les zones draguées mais également en fosse nord et sur le pourtour du banc d'Amfard. Sur la période de 9 ans simulée, ces dépôts dépassent les 2 m dans les zones draguées ; ils atteignent 1 m en fosse nord aval et sur le "banc aval". En revanche, le banc des Ratelets présente une sédimentation plus importante en présence de dragage ; jusqu'à 1 m de sédiment se dépose en plus lorsque les dragages sont pratiqués.

Enfin, les figures IV.19.a et IV.19.c et la Figure IV.20 c mettent en avant les effets combinés des dragages et des clapages.

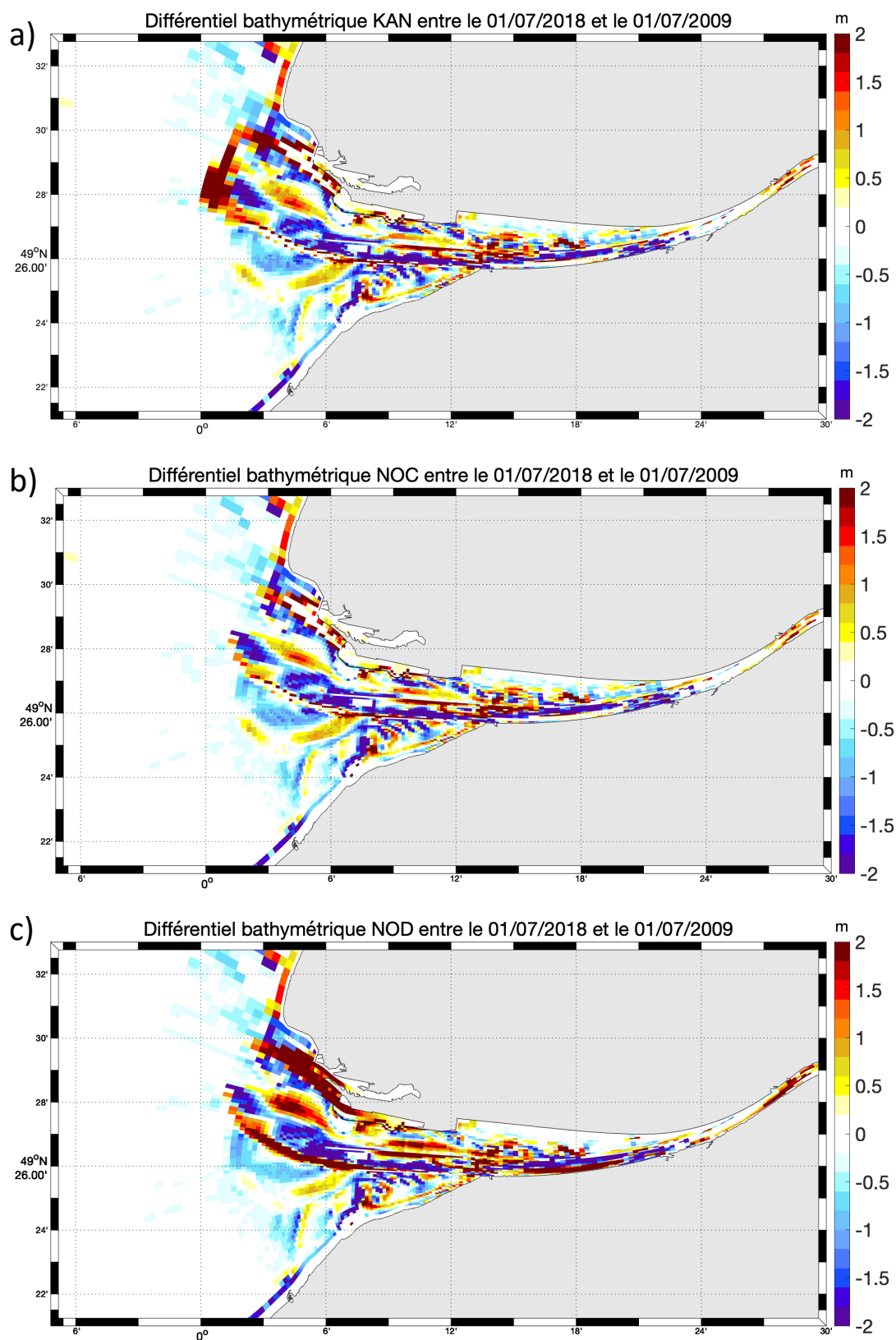


Figure IV.19 : Différentiels bathymétriques simulés pour les trois scénarios KAN (a), NOC (b) et NOD (c). Les érosions résiduelles sont en couleurs froides, les dépôts résiduels sont en couleurs chaudes

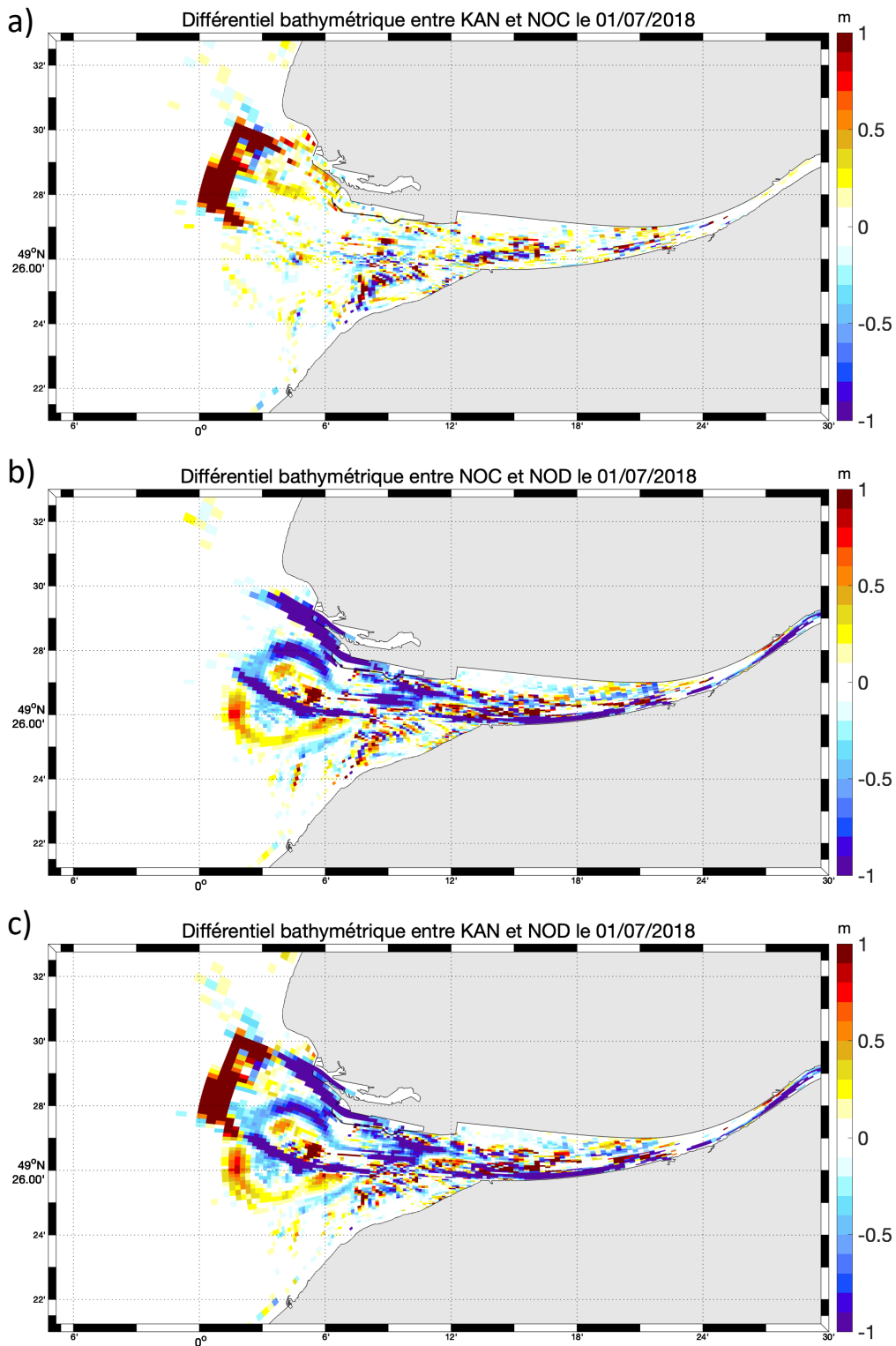


Figure IV.20 : Différentiels des évolutions bathymétriques associées aux scénarios (a) KAN et NOC (i.e. évolution KAN - évolution NOC), (b) NOC et NOD (i.e. évolution NOC - évolution NOD), et (c) KAN et NOD (i.e. évolution KAN - évolution NOD), sur la période juillet 2009 – juillet 2018. Une couleur chaude indique plus de dépôt ou moins d'érosion dans le premier scénario que dans le deuxième, une couleur froide le contraire

IV.4.4.2 Bilans volumétriques par zones caractéristiques de l'estuaire

Afin d'évaluer l'évolution des cubatures de l'estuaire, la Figure IV.21, construite sur le modèle de la figure III.11. illustre les évolutions des cubatures de l'estuaire pour les trois scénarios KAN, NOC et NOD et ceci pour 10 zones clés de l'estuaire.

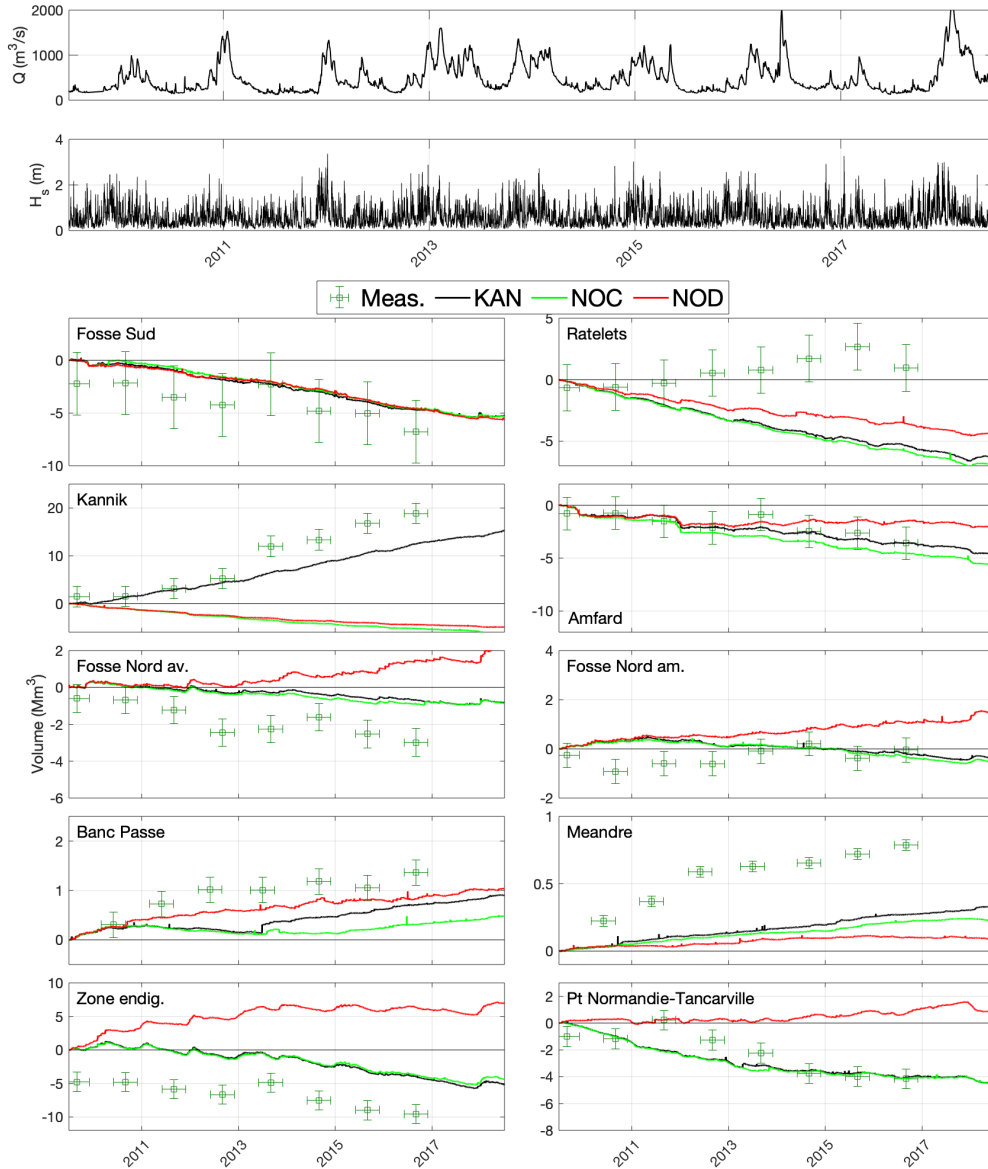


Figure IV.21 : Évolution des volumes de sédiments (cubatures) pour 10 secteurs de l'estuaire et pour les 3 configurations KAN, NOC, NOD, en regard des évolutions des forçages, débit et vagues sur la période 2009-2018. Les croix vertes représentent les évolutions des cubatures mesurées par le GPMR et les incertitudes associées. Les secteurs sont présentés sur la Figure III.10

En Fosse Sud, les 3 scénarios présentent la même tendance érosive, quasi-constante sur la période simulée. Dans la zone des Ratelets, l'érosion globale simulée par le modèle dans le scénario de référence est largement atténuée en l'absence de dragage, alors que les observations montrent une accrétion dominante. Cependant, l'analyse des différentiels bathymétriques montre un peu plus de sédimentation dans le scénario avec dragage. Ce résultat paradoxal est probablement dû à l'intégration dans la zone de calcul de secteurs plus en érosion dans ce scénario avec dragages : le nord des bancs

du Ratier et des Ratelets, voire la proximité du chenal de navigation. Au Kannik, l'arrêt des immersions dans les scénarios NOC et NOD génère une tendance érosive évaluée à -5 M.m^3 contre une accrétion de $+15 \text{ M.m}^3$ en présence de clapage sur la période 2009-2018. L'érosion constatée dans les simulations est globalement stable sur la période étudiée, on notera toutefois de légères oscillations saisonnières potentiellement liées aux variations saisonnières des conditions de houle. Une comparaison avec les masses de sédiment présentes devra permettre d'évaluer la contribution éventuelle du tassement dans cette érosion apparente. Sur le secteur Amfard, le scénario de référence reproduit bien l'érosion observée ; en l'absence de clapage celle-ci est légèrement renforcée alors que sans dragage l'érosion globale résiduelle est deux fois moins intense (-2.5 M.m^3 contre -5 M.m^3). En Fosse Nord (amont et aval), les résultats avec et sans clapage sont similaires. Par contre, en l'absence de dragage, une sédimentation de quasiment 4 M.m^3 est observée sur la période. Durant les premières années, cette zone apparaît comme stable, la sédimentation démarre environ 4 ans après l'arrêt des dragages (ce qui reflète effet morpho-dynamique). Cette sédimentation présente des variations saisonnières cohérentes avec celles décrites au chapitre II : un engraissement durant la période hivernale lorsque le bouchon vaseux est situé à l'aval. Au niveau du "banc de la passe" et du "méandre artificiel", les résultats sont globalement très proches. On observe toutefois une sédimentation plus faible du méandre artificiel en l'absence de dragage, probablement parce que le secteur du banc de la passe (immédiatement à l'ouest) et la fosse nord ont alors piégé nettement plus de sédiment.

La zone endiguée et la zone située entre le pont de Normandie et le pont de Tancarville sont toutes deux en érosion en présence de dragage : -5 M.m^3 sur la période pour chacune des zones. En l'absence de dragage, ce secteur se comble de près de 8 M.m^3 .

IV.4.4.3 Effets sur les surfaces hypsométriques

La Figure IV.22 présente les répartitions des surfaces hypsométriques pour les classes bathymétriques situées entre -20 mCMH et $+10 \text{ mCMH}$ au lancement des simulations ("Init. 2009") et après 9 ans pour les scénarios KAN/ NOC /NOD.

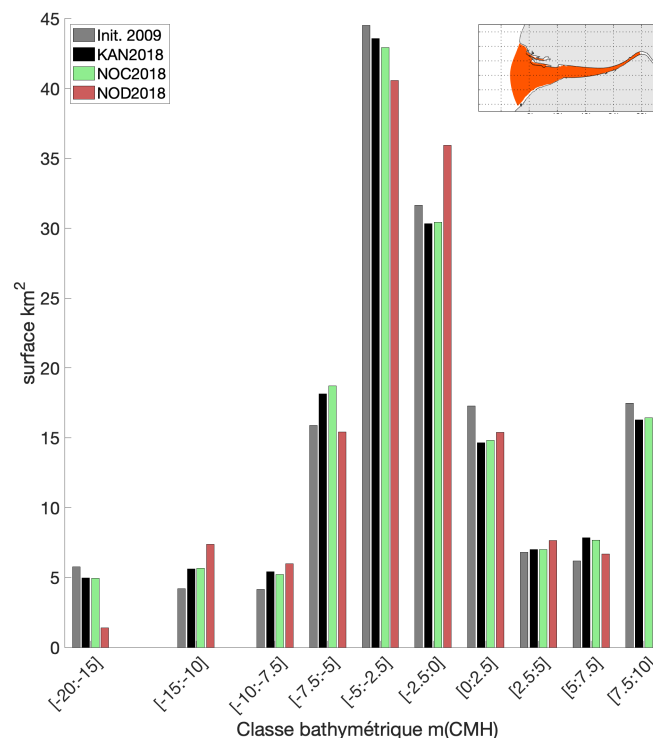


Figure IV.22 : Évolutions des surfaces hypsométriques de l'estuaire modélisées pour les scénarios KAN (noir) , NOC (vert) et NOD (rouge). Les surfaces hypsométriques initiales sont rappelées en gris. L'emprise d'intégration des surfaces est indiquée dans la vignette

La comparaison des barres noires (KAN) et vertes (NOC) montre qu'à l'échelle de l'estuaire interne, les effets des clapages sur les surfaces hypsométriques sont minimes devant les évolutions de ces dernières sur la période simulée.

En revanche, la comparaison des barres noires (KAN) et des barres rouges (NOD) montre qu'en 9 ans sans dragage, la répartition des surfaces hypsométriques de l'estuaire interne évolue. Cette évolution concerne principalement les milieux subtidiaux. La sédimentation dans les accès du port du Havre est bien illustrée par la diminution de près de 4 km² des surfaces comprises entre -20 et -15 mCMH. Cette diminution engendre naturellement une augmentation de la classe suivante (-15 à -10 mCMH). Comparativement aux simulations avec dragage, une diminution des surfaces comprises entre -7,5 et -5 mCMH est observée : cette classe bathymétrique comprend les profondeurs entretenues par le GPMR à -5.3 mCMH. Les milieux subtidiaux peu profonds sont les plus représentés en estuaire ; les classes bathymétriques correspondantes sont les plus impactées par le dragage. Ainsi, comparativement à la simulation avec dragage, le modèle simule une augmentation des surfaces comprises entre -2,5 et 0 mCMH d'environ 5 km² en l'absence de dragage. Cette augmentation est accompagnée d'une diminution des surfaces entre -5 et 2,5 mCMH qui traduit un comblement des milieux subtidiaux très peu profonds. Enfin, les milieux compris entre 0 et 10 mCMH présentent des variations moindres en termes d'amplitude. Toutes les classes bathymétriques intertidales à l'exception de la classe 5 à 7,5 mCMH augmentent d'environ 5 et 10 % en l'absence de dragage. La classe intertidale supérieure comprise entre 5 et 7,5 mCMH présente une augmentation moindre en l'absence de dragage : 8% sans dragage contre 26 % avec. Dans l'ensemble, cette comparaison met en avant une augmentation marquée des secteurs entre -2.5 et 10 mCMH traduisant un comblement relatif de l'estuaire comparativement au scénario KAN de référence. Le bilan sédimentaire de l'estuaire sera discuté section IV.5.3.

IV.4.5 Impact sur les dragages

IV.4.5.1 Sensibilité des quantités draguées au clapage

La comparaison des simulations KAN et NOC permet d'estimer l'impact des clapages sur les dragages, et en particulier de quantifier les dragages induits par les immersions. Les Figure IV.23.a et b représentent les masses de sables et de vases draguées annuellement sur les sites du Havre, de l'Engainement et de la Brèche pour les scénarios KAN et NOC respectivement (cf Chapitre III pour la définition des sites). La Figure IV.23.c représente le ratio entre les masses de vases ou de sables draguées dans les scénarios NOC et KAN (NOC/KAN).

Les Figure IV.23.a et b montrent que les dragages sur les trois sites présentent des variations inter-annuelles comparables avec et sans clapage. A l'exception du site de la Brèche, les masses draguées annuellement diffèrent d'un scénario à l'autre, et globalement les dragages sont plus importants dans le scénario de référence KAN qu'en l'absence de clapage.

En moyenne sur la période, les dragages de vases apparaissent comme plus impactés par les clapages que les dragages de sables, ce qui est logique puisque les sables se déplacent beaucoup moins loin. Pour le Havre, en l'absence de clapage, les dragages de vases sont réduits de plus de 20 % quand les dragages de sables ne sont réduits que de 10 %. A l'Engainement, sans clapage, les dragages de vases diminuent de 15 %, ceux de sables de 5 %. A la Brèche, en moyenne sur les 9 ans simulés les dragages ne semblent pas affectés par les clapages, néanmoins sur les 4 dernières années les dragages semblent diminuer. Cette tendance à la diminution sur la fin de la période simulée, en l'absence de clapage peut être vue sur les 3 sites. Il est étonnant de constater sur la Figure IV.23.c que certaines années (par exemple : 10/11, 12/13 et 13/14 pour le GPMH ; 09/10, 10/11, 11/12 à l'Engainement ; 09/10, 10/11 et 13/14 pour la Brèche), les dragages de sables sont plus importants en l'absence de clapage.

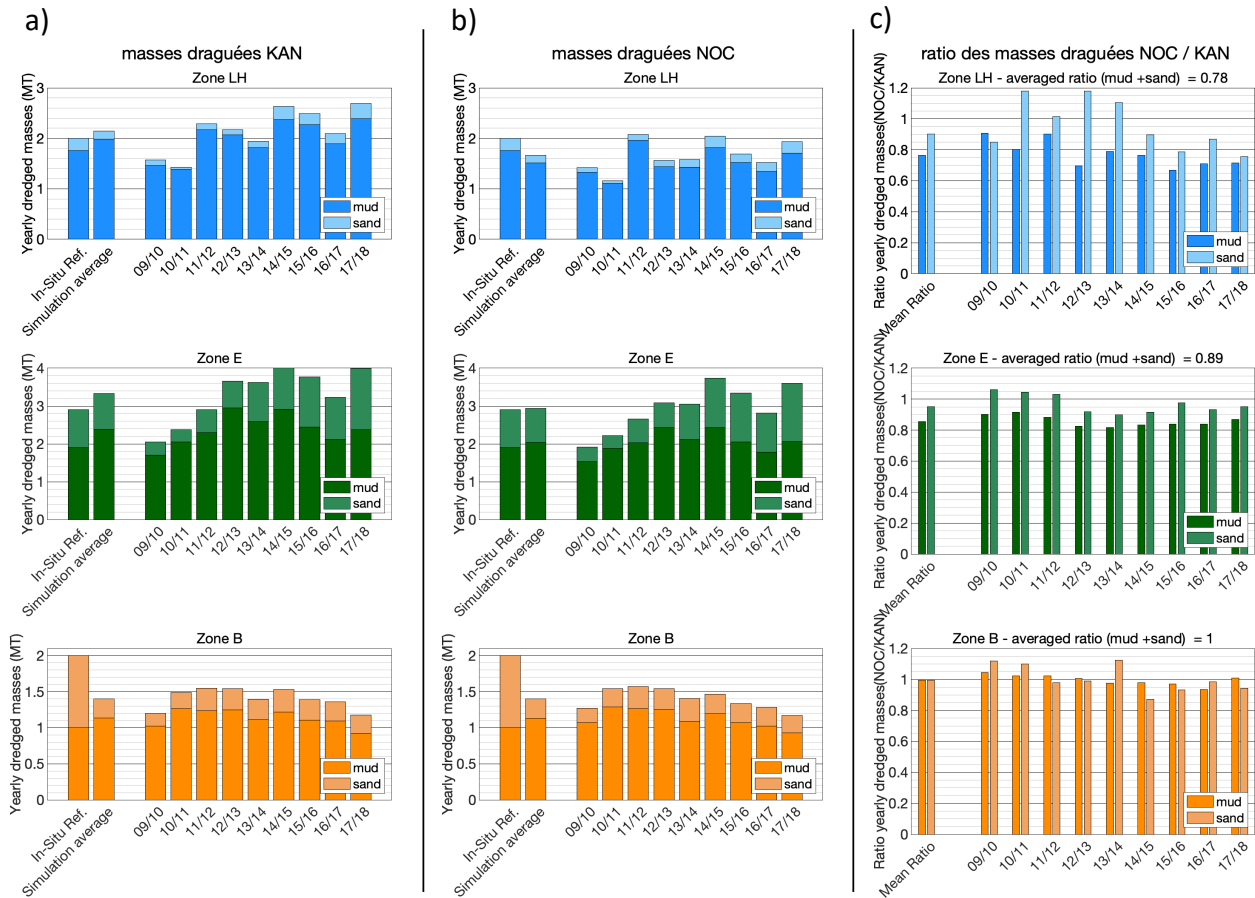


Figure IV.23: Évolution annuelle des dragages simulés pour les scénarios KAN et NOC (a et b respectivement). Les valeurs de référence in-situ sont rappelées à gauche sur chaque graphe (In-situ réf), suivies des simulations moyennes sur la période juillet 2009 / juin 2018, puis des valeurs annuelles simulées. Les quantités de sables (vases) draguées sont indiquées par des couleurs pâles (saturées). Le panneau c) présente le ratio entre les masses de sables et de vases draguées dans le scénario NOC et celles du scénario KAN. Le ratio moyen du total sable + vase est indiqué dans le titre

IV.4.5.2 Origine des sédiments dragués

L'utilisation du marquage réalisé sur les simulations KAN et NOC permet de caractériser la composition des sédiments dragués selon les différentes classes indiquées au IV.1.3. La Figure IV.24 représente l'évolution temporelle des quantités draguées, pour chaque classe de sédiment, simulée dans les scénarios KAN et NOC, et pour les 3 sites de dragages étudiés au chapitre III (GPMH, Engainement, La Brèche).

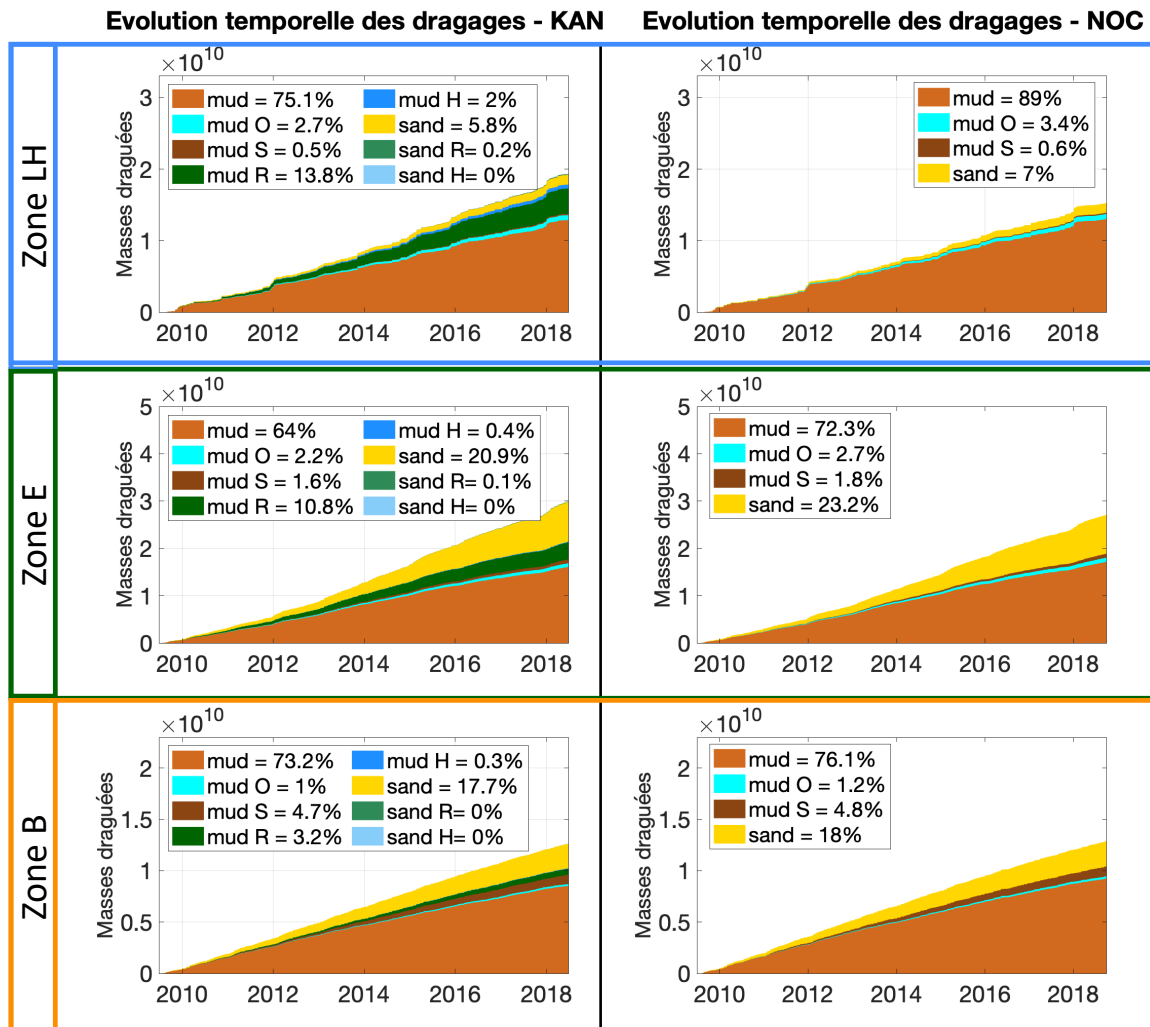


Figure IV.24 : Évolution temporelle des contributions des différentes sources sédimentaires marquées aux dragages dans les bassins et chenaux d'accès du port du Havre (Zone LH), à l'Engainement (Zone E) et dans le secteur de la Brèche (Zone B) sur la période juillet 2009 – juillet 2018. Les pourcentages moyens sur la période de chaque classe par rapport à la masse totale draguée (sable + vase) sont indiqués dans la légende

La diminution des quantités draguées sur les sites du GPMH et de l'engainement, illustrée sur la figure précédente, est également visible sur cette figure. Concernant la zone du Havre, les teneurs en sédiments préalablement dragués par le GPMR sont relativement importantes : en moyenne sur la période 13,8 % de mud R et 0,2 % de sand R avec également 2 % de mud H . La somme de ces masses (16 %) peut être mise en regard de la diminution des dragages induite par l'absence de clapage dans le cas du scénario NOC (22 %). En moyenne sur la période étudiée, à l'engainement, le GPMR drague environ 11,5 % (10,8 % de mud R + 0,1 % de sand R + 0,4 % de mud H) de sédiments déjà dragués/clapés. Ce chiffre est très proche de la diminution des dragages constatée sur ce site en l'absence de clapage (11 %). A la brèche les quantités de sédiments préalablement dragués retrouvés dans les dragages sont faibles (3,2 % de mud R, 0,3 % de mud H), à noter que sur ce site aucune diminution n'a été observée en l'absence de clapage. Ces calculs révèlent un recyclage substantiel des sédiments clapés au Kannik, aussi bien dans les secteurs dragués du chenal d'accès à Rouen que ceux du port du Havre.

Les écarts entre les valeurs de sédiments marqués retrouvés dans les dragages et les diminutions des dragages, induite par l'absence de clapage, constatées dans les zones du Havre et à l'engainement, peuvent être associés aux répercussions potentiellement induites par l'extraction du système de

plusieurs millions de tonnes de sédiment par an dans le cas NOC : ceci sera discuté dans la section suivante.

Les quantités de sédiments apportés par la Seine au cours de la simulation (mud S) ou venant du large (mud O), retrouvées dans les dragages, ne sont naturellement pas significativement affectées par les clapages. Leurs contributions aux masses draguées présentent cependant un gradient amont-aval relativement logique : plus de sédiments de la Seine sont retrouvés à la Brèche que sur les deux zones situées à l'aval. A l'inverse des quantités plus importantes de sédiments du large sont retrouvées sur les zones du GPMH et de l'engainement qu'à la Brèche. Par ailleurs, il est important de noter qu'en moyenne à l'échelle des 3 zones draguées et de la période simulée, les sédiments préalablement immergés par les ports contribuent plus que les apports naturels extérieurs au système à la sédimentation dans les zones draguées.

IV.5 Les effets des dragages sur les flux et bilans sédimentaires

Paradoxalement, les dragages ont des effets limités sur la dynamique des MES mais des effets relativement importants sur les évolutions morphologiques de l'estuaire. Pour essayer d'expliquer ce paradoxe deux analyses complémentaires ont été menées :

- les échanges entre le fonds et la colonne d'eau ont été quantifiés sur la dernière année simulée
- les flux en suspension et bilans sédimentaires associés ont été quantifiés pour les 3 scénarios.

IV.5.1 La remobilisation sédimentaire : intense et non impactée par le dragage

L'estuaire macrotidal de la Seine est soumis à des conditions hydrodynamiques intenses, en particulier dans son secteur d'embouchure exposé aux vagues de tempête et caractérisé par des courants de marée importants. Ces conditions hydrodynamiques varient naturellement avec ces différents forçages et dépendent du débit de la Seine (cf. chapitre II). Cette variabilité et cette intensité des conditions hydrodynamiques sont à l'origine d'importants mouvements sédimentaires, susceptibles de se compenser au fil du temps de telle sorte que leurs résultantes à moyen/long terme peuvent ne pas se manifester par des évolutions morphologiques. La quantification des échanges sédimentaires à l'interface eau/sédiment permet de caractériser le dynamisme sédimentaire et en particulier la mobilité du fond sédimentaire. La sommation au cours du temps des dépôts à l'interface eau/sédiment permet d'estimer cette "remobilisation sédimentaire". Cet indicateur que nous proposons aurait également pu être calculé en sommant temporellement les quantités quittant le fond sédimentaire (érosion). L'écart entre ces deux méthodes d'estimation renseigne sur le dépôt net ou l'érosion nette de sédiment qui s'avèrent être le plus souvent très faibles devant les échanges totaux. La Figure IV.25 présente la remobilisation totale, vases et sables (intégrant le charriage) pour les scénarios KAN et NOD, intégrée sur l'emprise de l'estuaire interne d'une part, et sur les zones draguées d'autre part, ainsi que le cumul des masses draguées (vases et sables) par les deux ports sur l'année 2017-2018.

La Figure IV.25 montre qu'après 9 ans, à l'échelle de l'estuaire interne la mobilité des fonds sédimentaires n'est pas significativement affectée par les dragages. Cette similitude dans les échanges eau/sédiment, avec ou sans dragage, révèle pourquoi les concentrations en MES et le bouchon vaseux s'avèrent être si peu sensibles au dragage : ces échanges étant similaires, les quantités de MES résultantes de ces échanges le sont aussi. Par ailleurs, la mise en regard des masses draguées avec la remobilisation sédimentaire, intégrée sur la zone de l'estuaire interne ou sur l'emprise des zones draguées, permet de relativiser l'importance des dragages dans la dynamique sédimentaire de l'estuaire. En effet, il apparaît que les masses draguées annuellement sont environ 200 fois moins importantes que les échanges eau/sédiment au niveau de ces zones draguées. Autrement dit, avant qu'une tonne de sédiment soit draguée, 200 t de sédiment ont été échangées entre l'eau et le fond. De plus, à l'échelle de l'estuaire interne, les masses draguées annuellement sont environ 10 000 fois moins importantes que les masses de sédiments remobilisées, justifiant aussi la quasi indépendance des remobilisations vis-à-vis des dragages.

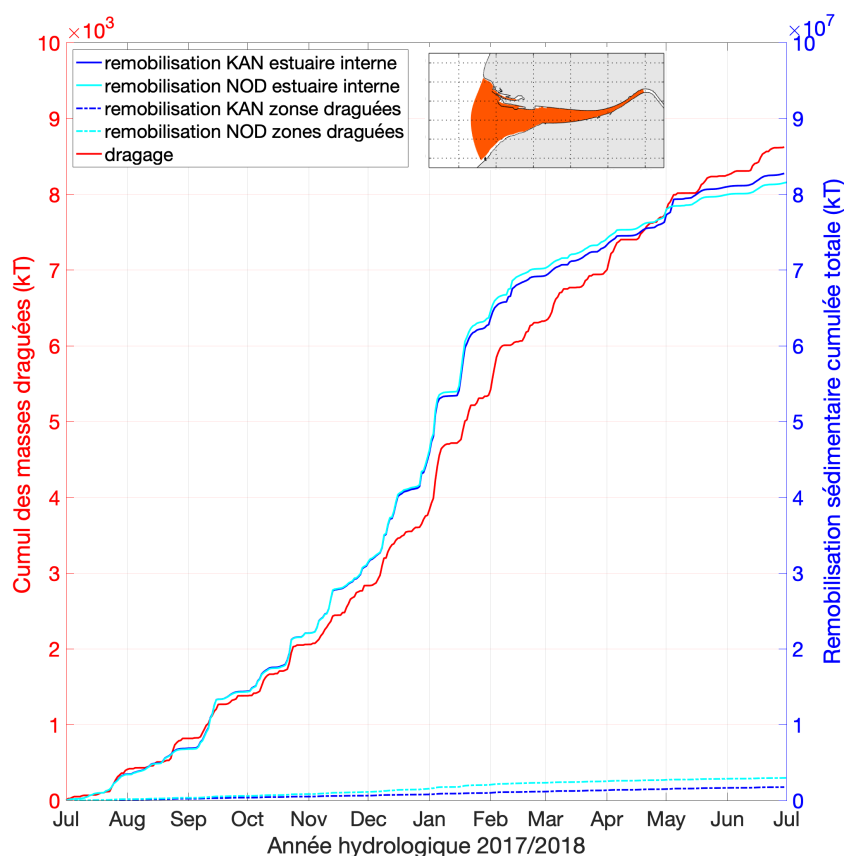


Figure IV.25: Évolution temporelle i/ de la remobilisation sédimentaire cumulée totale (sables et vases) intégrée sur la zone de l'estuaire interne (ligne pleine) et au niveau des zones draguées (ligne tiretée), et ii/ du cumul des masses draguées par les deux ports (sables et vases) (rouge) sur l'année hydrologique 2017/2018 pour les scénarios KAN (bleu) et NOD (cyan). L'emprise de l'estuaire interne est rappelée dans la vignette

Par ailleurs, en l'absence de dragage, les remobilisations sédimentaires au niveau des zones de dragage sont presque deux fois plus importantes. Cette augmentation des remobilisations est à mettre en lien avec les réajustements morphologiques et en particulier le comblement des zones draguées se produisant sans dragage. Ceci corrobore le rôle de piège à sédiments constitué par les zones draguées, constaté au chapitre III : en l'absence de dragage ces zones deviennent plus dynamiques et moins sujettes à la sédimentation nette. On peut noter que la divergence des courbes de remobilisation dans les zones draguées (Figure IV.25) se produit lorsque la remobilisation est globalement plus intense, pendant l'hiver (tempêtes et fort débit).

IV.5.2 A l'origine des effets des dragages : les flux sédimentaires

Les dragages d'entretien peuvent être considérés comme des flux anthropiques de sédiment, déplaçant les sédiments se déposant dans les zones naviguées vers les sites d'immersions. En réponse aux flux sédimentaires naturels, ces flux déplacent plusieurs millions de tonnes de sédiments vaseux et sableux par an. Étant donné les fortes modifications morphologiques induites par les dragages et constatées à distance des zones directement impactées, il apparaît essentiel d'étudier les effets des dragages sur les flux sédimentaires estuariens.

Les flux sédimentaires en suspension ont été quantifiés pour chaque classe sédimentaire modélisée et dans le cas des scénarios KAN, NOC et NOD. Pour des raisons techniques, les flux présentés ici n'intègrent pas les flux charriés. Mengual et al. (2020) ont étudié ces derniers et démontré que les flux sédimentaires étaient principalement réalisés en suspension, les flux charriés pouvant localement contribuer au maximum à 38 % des flux totaux. Par la suite, les flux de sables sont présentés en intégralité pour les 3 classes sableuses, néanmoins il est à noter que dans l'embouchure de la Seine, les sables fins (200 μm) et très fins (110 μm) sont majoritaires. D'après nos simulations, plus de 60% des flux sableux sont associés aux sables très fins. **Les flux sédimentaires évoqués par la suite ne considèrent que les flux de sédiments transportés en suspension.**

IV.5.2.1 Variations interannuelles des flux et confrontation aux estimations existantes

La Figure IV.26 présente les variations interannuelles des flux sédimentaires en suspension de vases et de sables, pour les 4 années hydrologiques de juillet 2014 à juillet 2018, à l'embouchure (limite aval de la zone de l'estuaire interne), et au niveau de Tancarville (limite amont de la zone de l'estuaire interne). Les 4 années ont été volontairement choisies à la fin de la période simulée, pour s'éloigner de l'initialisation du modèle, plusieurs indicateurs (teneur totale en vase et fraction marquée dans le sédiment superficiel, fraction marquée dans les suspensions du bouchon vaseux) montrant qu'un équilibre relatif semble s'établir après 5 à 6 ans.

La Figure IV.26.a présente également les apports en vases imposés à la frontière amont du modèle à Poses (pk 200). La comparaison de ces apports avec le flux de vases transitant à Tancarville (pk 335) montre qu'une partie des apports est piégée sur les 140 km qui séparent Poses de Tancarville. En moyenne sur les 4 années, ce sont près de 360 kt qui sédimentent dans l'estuaire amont. Ce piégeage moyen d'environ 60 % peut être comparé d'une part aux évaluations du piégeage réalisées par Guezennec (1999) qui montrait qu'en crue, entre 16 % et 27 % des apports était piégés entre les pk 200 et 265 (Val des Leux), et d'autre part aux dragages réalisés par le GPMR à l'amont de Tancarville, d'environ 485 kt (matière sèche). Ces comparaisons démontrent que le piégeage simulé par le modèle entre Poses et Tancarville est qualitativement réaliste et qu'ainsi le flux de vases transitant à Tancarville est plausible.

A l'embouchure, pour le scénario KAN, les flux vaseux et sableux sont respectivement de l'ordre de 2,5 et 1,5 Mt/an et tous dirigés vers l'amont de l'estuaire. En accord avec les résultats de Schultz et al. (2018), ces flux sont plus importants pour les années présentant des conditions de débits forts et de vagues importantes. En lien avec la variabilité des forçages (Figure IV.4) et celle des dragages rappelée Figure IV.26.c, les flux des années intenses 2014-2015, 2015-2016 et 2017-2018 sont plus forts que ceux de l'année très calme 2016-2017. Ces variabilités peuvent toutefois sembler faibles comparativement à la variabilité des forçages considérés, illustrant ainsi l'importance du forçage tidal dans les flux à l'embouchure. Les flux calculés par Schultz et al. (2018), à proximité de notre section embouchure sont supérieurs, environ d'un facteur 2, à nos estimations : ces différences sont discutées ci-après.

A Tancarville, les flux en suspension sableux sont quasiment nuls. En revanche, les flux vaseux sont dans l'ensemble dirigés vers l'aval. La forte crue de février 2018, explique l'important export sédimentaire de vase, proche de 800 kt, observé sur l'année hydrologique 2017-2018. A l'inverse, l'année 2016-2017, année présentant les plus faibles débits de la période simulée (330 m^3/s), révèle un flux dirigé vers l'amont très faible pour les scénarios avec dragage (KAN et NOC) mais étonnamment élevé pour le scénario sans dragage (230 kt vers l'amont). Au niveau de cette section, Schultz et al. (2018) estiment que les flux vaseux avoisinent les 1,5 Mt/an et sont curieusement dirigés vers l'amont pour tous les scénarios à l'exception du scénario "crue". Ces flux moyens de 1,5 Mt/an importés par l'estuaire en amont de Tancarville nous paraissent irréalistes.

La comparaison avec les résultats publiés dans Schultz et al. (2018) révèle des différences marquées. Celles-ci sont à mettre en lien avec les différences méthodologiques existantes entre nos approches :

- L'objectif de notre configuration est de reproduire l'ensemble du fonctionnement HMS de l'estuaire en particulier les dépôts sédimentaires dans les zones draguées mais aussi les évolutions morphologiques de l'estuaire à moyen terme. Pour y parvenir, le paramétrage décrit

dans Grasso et al. (2018) et utilisé par Schultz et al. (2018) a été adapté dans nos simulations. Les flux d'érosion/dépôt ont en particulier dû être limités, sans quoi les évolutions morphologiques simulées étaient beaucoup trop fortes. Cette limitation des flux verticaux a eu pour conséquence directe de diminuer les concentrations en MES simulées par le modèle (cf. IV.2.1), dégradant ainsi le niveau de validation obtenu par Grasso et al. (2018) sur ce paramètre. La discussion sur la validation des matières en suspension exprimée au chapitre III nous empêche de conclure à ce sujet. Il est clair que cette imprécision affecte directement les flux en suspension.

- En lien avec les travaux de Mengual et al. (2020), notre modèle simule explicitement les processus de charriage. Le modèle de Schultz et al. (2018) était calibré de manière à ce que le transport en suspension reproduise le transport total (suspension + charriage). Ainsi, pour comparer rigoureusement les deux estimations des flux, il serait nécessaire d'intégrer la composante des flux charriés à notre estimation. Mengual et al. (2020) ont en effet montré, avec le même modèle sédimentaire que celui que nous utilisons, que le transport sédimentaire par charriage n'était pas dominant mais qu'il représentait entre 17 % et 38 % du transport en suspension résiduel des sables.
- Schultz et al. (2018) extraient leurs résultats de simulations annuelles (après une année de spin up). Nos résultats sont extraits d'une unique simulation de 9 ans (après une année de *spin-up*). La durée de notre simulation, 9 fois plus longue, peut conduire à une atténuation des flux sédimentaires potentiellement trop intenses après seulement une année de *spin-up*. En effet, nos résultats sur les concentrations en MES (Figure IV.11) et sur les teneurs en vases du sédiment superficiel (Figure IV.13) tendent à montrer une stabilisation des processus sédimentaires après environ 5 ans. Il n'est toutefois pas possible d'affirmer dans l'état si cette évolution de la dynamique est due soit à la durée de la simulation qui permet de s'affranchir de conditions initiales potentiellement déséquilibrées d'un point de vue HMS (incohérence bathymétrie/couverture sédimentaire, cf. discussion du chapitre III), soit à l'évolution des forçages, en particulier pendant les années hydro-dynamiquement intenses 2014-2015 et 2015-2016.
- Contrairement aux simulations de Schultz et al. (2018), nos simulations considèrent le couplage morpho-dynamique ; or sans ce couplage, les flux sédimentaires n'ont pas les mêmes répercussions sur le fonctionnement HMS de l'estuaire. Cette absence d'interaction entre les flux sédimentaires et la morphologie de l'estuaire empêche toute rétroaction pouvant limiter les flux sédimentaires si ces derniers s'avèrent être initialement excessifs.
- La validation des quantités draguées dans notre scénario de référence est meilleure que dans les simulations de Schultz et al. (2018).

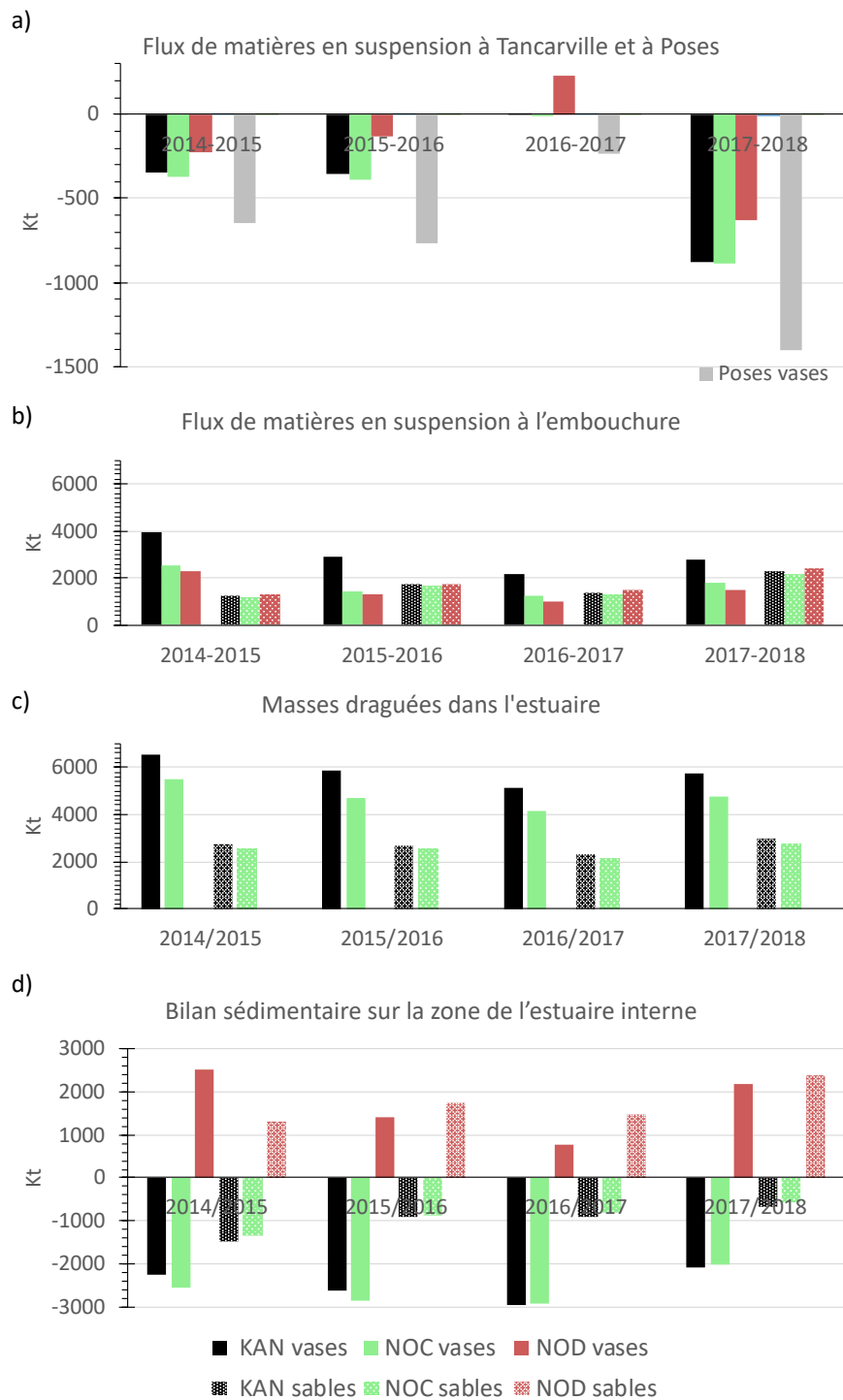


Figure IV.26: Variations interannuelles des flux sédimentaires, des masses draguées et du bilan sédimentaire de l'estuaire interne, distinguant vases et sables, pour les 4 dernières années hydrologiques simulées, de juillet 2014 à juillet 2018 et pour les trois scénarios KAN, NOC, NOD. a et b : flux sédimentaires en suspension au niveau de Tancarville (limite amont de la zone de l'estuaire interne) et à Poses (a), et à l'embouchure de l'estuaire (limite aval de la zone de l'estuaire interne)(b). c : variation interannuelle des masses draguées dans l'ensemble de l'estuaire. d : Bilan sédimentaire sur la zone de l'estuaire interne. Les flux sont positifs lorsqu'ils sont dirigés vers l'amont. Les flux à Poses sont identiques pour les 3 scénarios. Les bilans sont positifs en cas de sédimentation nette en moyenne, négatifs en cas d'érosion nette en moyenne. Les sections et zones considérées sont indiquées Figure IV.28

L'estimation d'un flux annuel net à partir de mesures directes *in situ* des flux sédimentaires à travers une section de plusieurs km, caractérisée par de forts gradients et une grande variabilité, est encore hors de portée. La validation directe des capacités d'un modèle numérique à simuler les flux sédimentaires à l'échelle d'un estuaire et à des échelles temporelles pluriannuelles est donc encore impossible.

Les flux qui sont ici obtenus restent cohérents avec un certain nombre d'indicateurs dont les évolutions morphologiques et les quantités draguées. Ces quantités conservent une incertitude importante, mais nous aident à mieux comprendre la dynamique sédimentaire de l'estuaire. Les différences obtenues entre les 3 scénarios testés avec le même modèle sont aussi plus fiables, et permettent de comprendre le rôle des dragages dans les flux sédimentaires estuariens.

Les Figure IV.27.a et b illustrent les flux modélisés au niveau des frontières Offshore Ouest et Nord (représentées Figure IV.28). En raison de la très grande section de ces frontières et de l'hydrodynamisme intense de la proche baie de Seine, ces flux sont très importants (de l'ordre 10 Mt/an) et présentent une variabilité interannuelle (~10 %) moins marquée que les flux au voisinage de l'estuaire interne. Cette variabilité moindre met en avant l'importance des flux induits par la dynamique tidale comparativement aux effets des débits et tempêtes. Les flux au niveau des sections Offshore Ouest et Nord, sont composés de près de 75 % de vases. Il est frappant de constater que ces flux sont du même ordre de grandeur, quel que soit le type de sédiment : il y a une "entrée" des sables et des vases vers l'estuaire depuis le milieu de la baie de Seine et une "sortie" de ces sédiments vers la Manche orientale le long du pays de Caux. En effet, en lien avec les courants de marée asymétriques, les circulations résiduelles et en particulier la force du courant de Verhaule en fin de flot, un export net de sédiment est observé au niveau de la frontière Offshore Nord. Les bilans sédimentaires associés à ces flux seront commentés dans la section IV.5.3.

IV.5.2.2 Rôle des dragages dans les flux sédimentaires estuariens

Les flux sédimentaires transportés en suspension à l'embouchure (Figure IV.26.b, localisation Figure IV.28), à l'amont immédiat du Kannik, présentent la même sensibilité au dragage/clapage durant les 4 années représentées, ce qui est remarquable. Les flux de vase à l'embouchure varient selon nos estimations entre 1 et 4 Mt/an, les effets des dragages/clapages sur ces flux sont assez nets :

- les clapages génèrent une augmentation de près de 70 % des flux de vase en moyenne sur les 4 années représentées (comparaison KAN/NOC).
- les flux de vase sont plus importants lorsque les dragages sont pratiqués, même si les matériaux dragués ne sont pas rejetés en mer : en moyenne sur la période, 15 % de plus pour le scénario NOC comparativement à NOD.
- en moyenne sur la période, les flux de vase avec dragages/clapages (scénario KAN) sont deux fois supérieurs aux flux de vase sans dragage (NOD), quel que soit le cycle hydrologique.

Les flux de sable à l'embouchure sont moins importants que les flux de vase et s'avèrent moins sensibles aux dragages/clapages :

- ces flux de sable sont 5 % plus importants avec clapage (comparaison KAN/NOC).
- en revanche, les dragages tendent à faire diminuer ces flux de près de 10 % (comparaison NOC/NOD).
- dans l'ensemble les dragages et clapages au Kannik atténuent légèrement les flux sableux transitant à l'embouchure : - 3 % sur la période (comparaison KAN/NOD).

Au niveau de Tancarville où les flux de sable sont pratiquement inexistant (un peu d'export pour l'année très humide 2017-2018), les flux de vase ne sont pas significativement impactés par les clapages (NOC = KAN +5 %). En revanche, une augmentation significative des flux vers l'aval, de 200 kt/an en moyenne, peut être associée au dragage.

Plus au large, les flux sédimentaires en provenance de l'Ouest, présentés Figure IV.27.a ne sont pas significativement affectés par les dragages. En revanche les flux sédimentaires dirigés vers le Nord atteignent 13,5Mt/an avec les immersions des deux ports (scénario KAN), alors qu'ils sont de l'ordre de 10 Mt/an en l'absence d'immersion (scénario NOC et NOD). Ceci démontre l'effet important des dragages sur les flux sédimentaires vers le système Manche : les dragages et immersions associées induisent une augmentation nette de l'export de vase (+35 %), les flux de sables restent peu impactés.

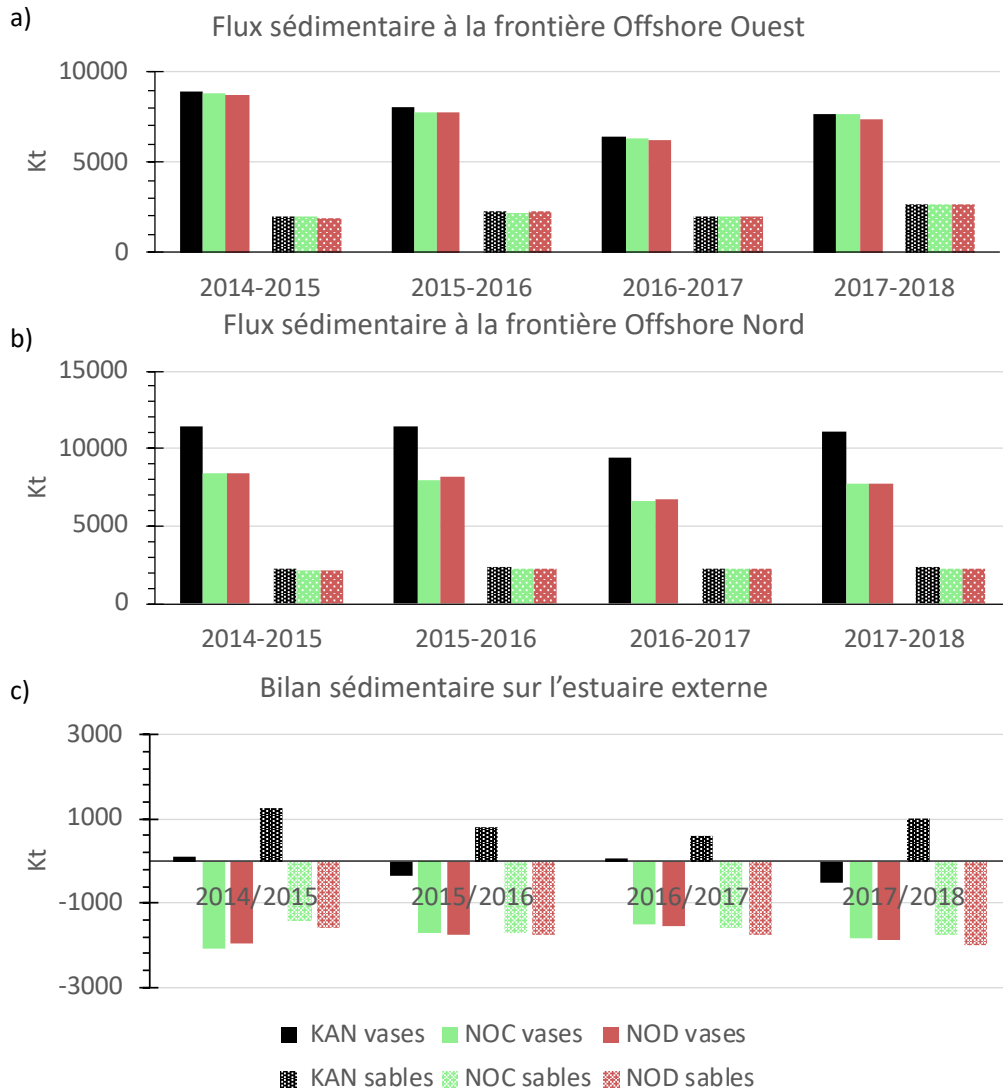


Figure IV.27 : Variations interannuelles des flux sédimentaires, des masses draguées et du bilan sédimentaire de l'estuaire externe, distinguant vases et sables, pour les 4 dernières années hydrologiques simulées, de juillet 2014 à juillet 2018 et pour les trois scénarios KAN, NOC, NOD. a et b : flux sédimentaires en suspension (a) au niveau de la section Offshore Ouest, et au niveau de la section Offshore Nord (b). c : bilan sédimentaire sur la zone de l'estuaire externe, calculé en considérant les flux a et b ainsi que les flux à l'embouchure et les dragages (Figure IV.26). Les flux en frontière ouest sont positifs lorsqu'ils sont orientés vers l'est, ceux de la frontière nord sont positifs lorsque orientés vers le nord. Les sections et zones considérées sont indiquées Figure IV.28

- Flux de sédiments marqués

Pour mieux caractériser le rôle des dragages et des clapages, il est intéressant de distinguer différentes sections au sein de l'estuaire interne, et de quantifier les contributions des différents sédiments

marqués. Sur l'année hydrologique 2017-2018, les flux de sédiments en suspensions ont été calculés à travers 8 sections clés de l'estuaire, représentées Figure IV.28 :

- 1) à la frontière Offshore Ouest
- 2) à la frontière Offshore Nord
- 3) à l'embouchure (limite aval de la zone de l'estuaire interne)
- 4) à travers la fosse sud
- 5) à l'entrée du chenal (entre les deux digues submersibles)
- 6) à l'entrée de la fosse nord
- 7) au niveau de Fatouville
- 8) au niveau de Tancarville

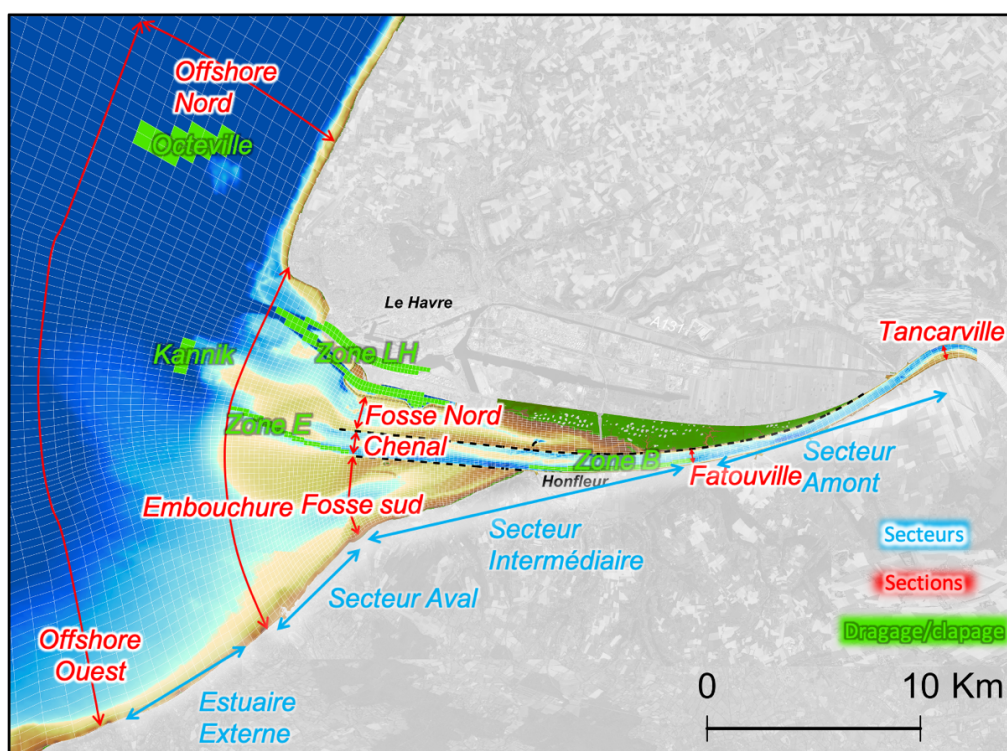


Figure IV.28: Localisation des sections considérées pour les calculs de flux en suspension (rouge), emprises des secteurs de l'estuaire considérés pour l'établissement des bilans sédimentaires (bleu) et localisation des zones de dragages (LH, E et B) et de clapages du Kannik et d'Octeville (vert). L'emprise de l'estuaire interne est définie comme la somme des secteurs aval, intermédiaires et amont

Le Tableau IV-4 présente les valeurs de ces flux pour les sables, les sables dragués puis clapés (par le GPMR et le GPMH), les vases, les vases draguées puis clapées (par le GPMR et le GPMH), les vases apportées par la Seine, les vases du large (offshore) et les totaux de sables et de vases. Les quantités draguées sur la période, pour les regroupements de sédiments précédemment cités sont également indiqués par zones de dragage (à des fins de simplification, la Zone B présentée ici regroupe les dragages réalisés par le GPMR en amont de la Zone E ; pour rappel sur ce secteur, les dragages sont dans une grande majorité réalisés au niveau de la zone B). Pour éviter toute confusion, il est reprécisé que les sédiments marqués "offshore" sont ceux entrant par la limite externe du modèle, selon une frontière indiquée sur la figure III.14.b, donc bien plus au large que les limites "Offshore Ouest" et "Offshore Nord" considérées ici (Figure. IV.28).

Tableau IV-4 : Flux sédimentaires calculés pendant l'année hydrologique 2017/2018 au niveau des sections Offshore Ouest, Offshore Nord, Embouchure, Fosse Sud, Chenal, Fosse Nord, Fatouville et Tancarville et quantités draguées dans les trois zones de dragage, sur la même période, pour différents regroupements des classes sédimentaires modélisées dans le cadre des scénarios KAN, NOC et NOD. Les flux sont comptés positivement vers le nord et vers l'est. La classe "vases" correspond aux vases présentes à l'initialisation du modèle

			Sables	Sables clapés	Vases	Vases clapées	Vases Seine	Vases offshore	Sables totaux	Vases totales
Flux en suspension (kT)	Offshore Ouest	KAN	2695,7	0,0	5191,6	378,2	4,6	2080,5	2695,74	7654,9
		NOC	2668,0		5608,3		5,4	2085,2	2668,0	7698,9
		NOD	2653,3		5275,2		6,9	2089,3	2653,3	7371,5
	Offshore Nord	KAN	2168,1	196,1	5481,6	3800,3	135,5	1704,7	2364,3	11122,1
		NOC	2223,9		5837,9		139,2	1722,1	2223,9	7699,1
		NOD	2225,1		5856,3		146,7	1747,5	2225,1	7750,5
	Embouchure	KAN	2133,0	160,7	1217,2	1391,9	-142,7	314,2	2293,6	2780,6
		NOC	2198,3		1607,8		-129,0	342,2	2198,3	1820,9
		NOD	2416,0		1311,6		-137,7	316,6	2416,0	1490,6
	Fosse Sud	KAN	1061,7	0,5	3134,8	283,1	181,1	257,6	1062,2	3856,6
		NOC	1095,8		3550,8		186,9	282,2	1095,8	4019,8
		NOD	1294,2		3193,8		161,4	297,5	1294,2	3652,7
	Chenal	KAN	-745,1	-0,5	-4282,2	-339,3	-677,5	-233,4	-745,5	-5532,4
		NOC	-652,8		-4374,8		-636,8	-243,3	-652,8	-5254,9
		NOD	-747,0		-4420,7		-640,7	-274,2	-747,0	-5335,7
	Fosse Nord	KAN	334,4	30,4	219,6	203,3	-12,1	24,6	364,8	435,4
		NOC	392,3		157,0		-20,6	25,4	392,3	161,7
		NOD	351,9		1157,4		127,7	70,2	351,9	1355,2
	Fatouville	KAN	-284,9	0,3	-305,0	-2,3	-821,6	0,1	-284,6	-1128,7
		NOC	-356,8		-209,3		-815,1	2,1	-356,8	-1022,2
		NOD	-273,5		45,8		-762,8	5,8	-273,5	-711,1
	Tancarville	KAN	-0,2	0,0	-25,1	-0,3	-824,8	0,2	-0,2	-849,9
		NOC	0,2		-12,6		-822,0	0,5	0,2	-834,1
		NOD	0,3		154,4		-778,0	7,8	0,3	-615,8
			Sables	Sables dragués	Vases	Vases draguées	Vases Seine	Vases offshore	Sables totaux	Vases totales
Dragage (kT)	Zone LH	KAN	251,6	48,6	1673,5	569,1	41,3	108,0	300,1	2391,8
		NOC	227,3		1584,9		25,6	98,6	227,3	1709,2
	Zone E	KAN	1590,4	29,0	1633,9	411,2	226,2	101,2	1619,4	2372,4
		NOC	1540,6		1747,9		204,1	113,0	1540,6	2065,0
	Zone B	KAN	1041,4	1,9	748,1	67,1	122,6	23,6	1043,3	961,4
		NOC	950,6		811,6		133,9	28,0	950,6	973,5
	Total	KAN	2883,4	79,4	4055,4	1047,3	390,2	232,8	2962,8	5725,6
		NOC	2718,4		4144,3		363,6	239,7	2718,4	4747,6

- *Effets des dragages sur les flux de sable en suspension*

Au niveau de la frontière Offshore Ouest, les dragages n'ont naturellement pas d'effets sur les flux de sables. En revanche, au niveau de la frontière Offshore Nord, ce calcul démontre qu'une quantité non négligeable de sable clapé, transporté en suspension, transite vers le nord (196,1 kt à comparer au 300,1 kt dragués sur la même période). Cette observation est cohérente avec la dispersion des sables illustrée Figure IV.17.

A l'embouchure, les dragages/clapages impactent directement les flux de sables en suspension : environ 7 % du flux de sables transitant au niveau de l'embouchure a déjà été dragué dans la configuration KAN. Mais surtout, le flux de sable entrant est nettement plus fort (+ 12 %) lorsqu'il n'y a pas de dragage.

En fosse sud, les effets des dragages sur les flux sableux sont relativement importants : l'absence de dragage génère une augmentation de ce flux de l'ordre de 20 %, alors que les clapages sont sans effet. Dans le chenal, le fait de draguer n'a pas d'impact apparent sur les flux de sables (comparaison KAN/NOD), qui sont dans le sens d'une exportation vers la baie (effet voulu d'un chenal de jusan

favorisé par la construction des digues submersibles). Cependant si les matériaux dragués ne sont pas clapés au Kannik, le flux de sable transporté en suspension diminue d'environ 13 % (comparaison KAN/NOC). Cela signifie que les dragages génèrent une réduction du flux de sable, compensée par une augmentation exactement du même ordre provoquée par le clapage au Kannik.

A l'entrée de la fosse nord, le flux résiduel de sable, vers l'amont, est renforcé de plus de 10 % en présence de dragages (comparaison NOC/NOD), mais les clapages compensent largement cette augmentation puisque le flux est réduit de 3,6 % lorsqu'il y a dragage puis clapage (comparaison entre KAN et NOD). Le même phénomène se déroule à Fatouville en direction de l'aval, mais de façon plus accentuée (NOC-NOD : + 28 %, KAN-NOD : + 4 %). Les évolutions des flux de sables constatées mettent en avant une redistribution spatiale des flux sableux en l'absence de clapage. L'absence d'information sauvegardée sur les flux entre la fosse nord et le chenal nous empêche de préciser cette redistribution. Toutefois, ces différences peuvent être associées aux variations de la teneur en vases observées sur la Figure IV.9.e, et en particulier à l'augmentation du pourcentage de vase dans le sédiment superficiel constatée en fosse nord en l'absence de dragage.

- *Effets des dragages sur les flux de vase en suspension*

Au niveau de la frontière Offshore Ouest, les dragages n'ont pas un effet significatif (~4 %) sur les flux de vases. Toutefois, il est intéressant de noter qu'en l'absence d'immersion (lorsque que le dragage génère un déficit d'environ 5 Mt/an de vase), le flux des vases (issues de l'érosion de la baie de Seine) augmente de 7 % (différence NOC-NOD). A l'inverse, lorsque les clapages sont effectués on note un flux net positif de vases préalablement clapés à travers la frontière Offshore Ouest (378,2 kt) : ce flux peut être associé aux exports vers la baie réalisés par la frontière Offshore Nord, signifiant une recirculation partielle au sein de la baie de Seine. En effet, dans le scénario KAN près 3,8 Mt de vases draguées sont exportées vers le nord, vers la baie où elles peuvent re-entrer dans le système au gré des courants tidaux. Au niveau de la frontière Offshore Nord il est intéressant de souligner la faible importance relative du flux de vases en provenance de la Seine (apports réalisés durant la période simulée cf. IV.2.2) comparativement au flux de vase total (~1 %).

A l'embouchure, en lien avec la position du site du Kannik et les résultats de dispersion illustrés en particulier Figure IV.14, plus de 50 % des vases transitant de la baie vers l'estuaire interne ont déjà été dragués !

En fosse sud, les immersions génèrent une diminution des flux vaseux d'environ 4 % (comparaison KAN/NOC), mais ces flux seraient nettement plus réduits (10 %) s'il n'y avait pas de dragage (comparaison NOC/NOD), contrairement à ce qui se passait pour les sables. Au final, les dragages/clapages génèrent une augmentation du flux de vases vers l'amont de l'ordre de 5 % (comparaison KAN/NOD).

Dans le chenal, les effets des dragages/clapages se traduisent aussi par une augmentation du flux de vase (de 3,6 %), mais en sens inverse (vers l'aval) .

En fosse nord, les effets des dragages/clapages sur les flux vaseux sont très marqués. Les clapages génèrent une augmentation du flux vaseux d'un facteur supérieur à 2,5 (compa. KAN/NOC). En l'absence de dragage les flux vaseux en fosse nord seraient nettement plus importants : 8 fois supérieurs à la situation dragage sans clapage. Les clapages au Kannik augmentent les flux vers l'amont mais beaucoup moins que s'il n'y avait pas de dragage.

Au niveau de Fatouville, les flux vaseux sont également impactés : -37 % en l'absence de dragage/clapage (comparaison KAN/NOD), contre - 10 % si les sédiments sont dragués mais non clapés au Kannik (comparaison KAN/NOC).

Les flux de matériaux dragués présentés dans le Tableau IV-4 permettent de préciser les résultats de la section IV.4.3 au sujet du retour des sédiments clapés vers l'estuaire. Les estimations des flux révèlent que dans le scénario KAN, après 9 ans de traçage sédimentaire, 50 % des flux vaseux transitant du milieu marin vers l'estuaire, au niveau de la section "embouchure", située immédiatement en amont du Kannik, sont composés de vases ayant été préalablement dragués au moins une fois. Comparativement au cas KAN, il est intéressant de noter qu'en l'absence de clapage une plus grande quantité de vase "naturelle" rentre dans l'estuaire au niveau de l'embouchure (+390,6 kt). Cette augmentation est néanmoins largement inférieure au flux de vases marquées lorsqu'il y a clapage

(1391,9 kt). Ces différences dans les flux totaux de vases entre les scénarios KAN et NOC à l'embouchure témoignent d'une augmentation du flux induite par le clapage. En ce qui concerne les flux sableux, la Figure IV.16 a montré que le transport de ces derniers vers l'estuaire était plus lent ; néanmoins après 9 ans, 7 % des sables rentrant dans l'estuaire avaient déjà été dragués/clapés. La comparaison des flux à la frontière embouchure avec la somme des flux aux sections Fosse Sud, Chenal et Fosse Nord, démontre que l'essentiel des sédiments dragués (90 % des vases, 80 % des sables) restent dans le secteur aval (son emprise est indiquée Figure IV.28). Néanmoins, au niveau de l'entrée de la fosse nord, 50 % des vases transitant ont déjà été dragués. Concernant les sédiments apportés par la Seine, leur traçage révèle que plus de 80 % des sédiments exportés à Tancarville restent dans le secteur de l'estuaire interne à l'échelle annuelle (différence entre flux à Tancarville et flux à l'embouchure, quel que soit le scénario). Ils y connaissent une certaine recirculation puisque leur flux en fosse sud est orienté vers l'amont.

Il est également intéressant de souligner l'importance des apports sédimentaires venant du large. Après 9 ans de traçage, ces apports contribuent à plus de 10 % des apports en sédiments fins transitant au niveau de la frontière "embouchure". Ce flux peut également être comparé aux apports de la Seine : ainsi pour 2017-2018 qui est une année présentant une forte crue et une forte tempête, les apports du large dans l'estuaire interne représentent quasiment 40 % des apports de la Seine à Tancarville. Ceci souligne l'intérêt de prendre en compte cette source sédimentaire dans les simulations à moyen et long terme.

IV.5.3 Effets des dragages sur les bilans sédimentaires

IV.5.3.1 Bilan sédimentaire de l'estuaire interne

La mise en regard des flux en suspension entrant à l'embouchure et à Tancarville et des exports réalisés par dragage permet de proposer une estimation du bilan sédimentaire de l'estuaire interne (Figure IV.26.d). Concernant les sables, notre objectif étant la comparaison des bilans selon les scénarios de dragage/clapage, nous faisons l'hypothèse que i/ les flux charriés sont de second ordre comparés aux flux en suspension à l'embouchure (Mengual et al., 2020) et ii/ que les effets des dragages/clapages ne sont pas significativement différents sur les flux charriés et sur les flux en suspension.

Cette représentation illustre le rôle prépondérant des dragages dans le bilan sédimentaire de l'estuaire interne. Le bilan de vase de la simulation de référence KAN apparaît comme largement déficitaire, en moyenne 2,5 Mt/an, à comparer aux apports de la Seine à Poses (0,4 Mt/an). Pour les sables, un déficit est également observé mais il est plus limité : 1 Mt/an en moyenne sur la période. Ce déficit est en outre largement supérieur aux apports de sable transitant au niveau de l'embouchure.

En l'absence de clapage, les apports sédimentaires à l'embouchure diminuent de près de 5% pour les sables et de près de 30% pour les vases Figure IV.26.b. Cette diminution des apports s'accompagne d'une diminution des dragages (-244 kt, soit 8 % en moins pour les sables, 978 kt, soit 17 % en moins, pour les vases) (Figure IV.26.c). Il résulte de ces deux diminutions (apports à l'embouchure et exports par dragage) que les bilans sédimentaires des simulations avec et sans clapage (KAN et NOC) sont très proches que ce soit pour les sables ou les vases (Figure IV.26.d). Cette relative stabilité des bilans sédimentaires avec dragage (scénario KAN et NOC) au regard de la variabilité marquée des forçages sur la période signifie que les flux à la limite embouchure et les quantités draguées varient de façon analogue avec les conditions hydrologiques et hydrodynamiques (débits et vagues) : ces variations de flux sont qualitativement similaires à celles décrites par Schultz et al. (2018), tandis que les variations de dragages ont été commentées dans le chapitre III.

Par exemple, lors des années à fort hydrodynamisme comme 2014-2015 ou 2017-2018, les flux entrant dans l'estuaire interne et les exports induits par dragage sont importants. Il y a cependant un effet pluriannuel, sans doute lié à la disponibilité du matériel sédimentaire, qu'il conviendrait de quantifier. En effet, les flux observés en 2017/2018 sont inférieurs à ceux observés en 2014/2015 malgré des conditions hydrodynamiques plus intenses. Comme discuté précédemment, il n'est pour l'instant pas possible d'estimer l'origine de cette différence. Celle-ci est soit i/ liée à la simulation et aux hypothèses du modèle auquel cas il pourrait s'agir d'une forme de dépendance aux conditions initiales qui s'atténue

au fil de la simulation, soit ii/ réelle et s'explique par des phénomènes réels comme l'intensité des forçages sur les dernières années simulées.

En l'absence de dragage, les résultats sont contrastés : le bilan sédimentaire de l'estuaire présente un excédent d'en moyenne 1,7 Mt/an de vases et 1,7 Mt/an de sables. Dans l'ensemble, ces comparaisons soulignent le rôle majeur des dragages (indépendamment des immersions) dans le bilan sédimentaire de l'estuaire interne.

IV.5.3.2 Bilan sédimentaire de l'estuaire externe

De manière analogue aux flux Offshore Ouest et Nord, le bilan sédimentaire de l'estuaire externe (emprise représentée Figure IV.28, limitée par les sections Offshore Ouest, Nord et embouchure) est relativement stable à l'échelle des 4 années hydrologiques 2014/2015 à 2017/2018 (Figure IV.27.c). Dans le cas du scénario de référence KAN, le bilan apparaît être excédentaire en sable mais déficitaire en vase. Ce déficit est surprenant ; il peut être rapproché de l'important déficit sédimentaire observé dans la validation des cubatures sur la zone des Ratelets (Fig. IV.21). Par ailleurs, ce résultat en masse n'est comparable à aucune mesure *in-situ* existante. Ces résultats renforcent nos interrogations vis-à-vis de la dépendance des résultats à l'initialisation sédimentaire. En particulier dans cette zone où les évolutions morphologiques sont beaucoup plus lentes que dans l'estuaire, il est possible qu'une seule et unique année de *spin-up* ne soit pas suffisante pour équilibrer la couverture sédimentaire vis-à-vis de la morphologie et des conditions hydrodynamiques locales. Nous n'excluons pas que ce déficit constaté après la simulation de 10 années (*spin-up* compris) soit imputable à ce déséquilibre « morpho-sédimentaire » induit par la condition sédimentaire initiale. Pour ces raisons, les bilans sédimentaires de l'estuaire externe ne seront pas analysés individuellement. En revanche, leurs différences relatives (par inter-comparaison des scénarios) peuvent nous renseigner qualitativement sur les effets des dragages/clapages sur le bilan de cette zone.

La comparaison des bilans sédimentaires associés aux trois scénarios montre que les immersions réalisées dans le scénario de référence KAN permettent de limiter le déficit sédimentaire. Les clapages, qui s'élèvent à 6 Mt de vase et 2 Mt de sable (Fig. IV.26.c), conduisent à une sédimentation différentielle dans l'estuaire externe d'environ 2 Mt de vase et 2 à 2,5 Mt de sable (Fig. IV.27.c). Le quasi-équilibre du bilan sédimentaire qui résulte des immersions de sédiments dragués simulés dans cette zone souligne le rôle majeur des immersions sur le bilan sédimentaire de l'estuaire externe.

• Bilan sédimentaire des sous-secteurs de l'estuaire interne

A partir des flux en suspension et des masses draguées sur l'année 2017/2018 présentés dans le Tableau IV-4, le même type de bilan sédimentaire peut être proposé à l'échelle des sous-zones de l'estuaire interne délimitées par les frontières utilisées précédemment (Figure IV.28) . Le tableau IV-5 rappelle les bilans sédimentaires de l'estuaire interne et de l'estuaire externe, et présente les bilans sédimentaires des 3 sous domaines délimités par les sections intermédiaires Fosse Sud + Chenal + Fosse Nord d'une part, Fatouville d'autre part.

Tableau IV-5 : Bilans sédimentaires (en kt) établis à partir des flux sédimentaires en suspension et des dragages sur l'année 2017/2018 pour l'estuaire externe et interne ainsi que les 3 secteurs de l'estuaire interne présenté Figure IV.28

	Estuaire externe		Estuaire interne		Secteur Aval		Secteur Intermédiaire		Secteur amont	
	Sables totaux	Vases totales	Sables totaux	Vases totales	Sables totaux	Vases totales	Sables totaux	Vases totales	Sables totaux	Vases totales
KAN	1000,7	-522,2	-669,0	-2095,2	-307,4	-743,3	-77,2	-1073,1	-284,4	-278,8
NOC	-1754,1	-1821,2	-520,4	-2092,6	-404,9	-879,8	241,5	-1024,7	-357,0	-188,2
NOD	-1987,8	-1869,6	2415,7	2106,4	1516,9	1818,3	1172,6	383,4	-273,8	-95,3

Cette comparaison permet de mieux comprendre les effets des dragages et clapages sur les flux sédimentaires et leurs répercussions à l'origine des évolutions morphologiques des différents secteurs de l'estuaire. Dans le scénario de référence KAN, les déficits sédimentaires sableux et vaseux ne sont pas répartis également : le secteur aval et le secteur amont présentent les déficits sableux les plus

importants (resp. -307,4 kt et -284,4 kt), alors que le secteur intermédiaire accuse la moitié du déficit en vases : -1073,1 kt (contre -743,3 kt et -278,8 kt sur les secteurs aval et amont respectivement).

En l'absence de clapage, le déficit de sables est accentué dans les secteurs aval et amont, mais il est remplacé par un excédent dans le secteur intermédiaire (241,5 kt). Les déficits en vases sont quant à eux semblables à ceux observés avec les immersions (KAN).

Les résultats du scénario NOD, sans dragage, sont très différents. Le bilan sédimentaire de l'estuaire interne dans son ensemble est inversé, pour les sables comme pour les vases (Figure IV.26.d). 2,1 Mt de vases sont accumulées, dont l'essentiel (1,8 Mt) dans le secteur aval, le reste dans le secteur intermédiaire. Une masse encore plus importante de sable est accumulée (2,4 Mt), plutôt bien répartie (1,5 Mt dans le secteur aval et 1,2 Mt dans le secteur intermédiaire). Naturellement un bilan plus complet en sables devrait considérer aussi les flux résiduels de sables charriés, minoritaires dans cette partie de l'estuaire où les sables fins et très fins dominent. Il est intéressant d'observer que, quel que soit le scénario, avec ou sans dragage ou clapage, le secteur amont présente un bilan sédimentaire déficitaire pour les sables et les vases.

L'ensemble de ces observations, sur les flux et bilans sédimentaires, est parfaitement cohérent avec les observations réalisées sur les évolutions morphologiques en réponse aux différents scénarios. Les dragages en tant que flux sédimentaires anthropiques ont des interactions fortes avec les flux sédimentaires naturels. Les exports réalisés par dragage ne sont pas totalement compensés par les variations des flux induites par le dragage, que celui-ci s'accompagne ou non du clapage des matériaux dragués. Le dragage est ainsi à l'origine d'un déficit dans le bilan sédimentaire, remarquablement semblable qu'il y ait clapage ou non. Ces variations du bilan sédimentaire sont à l'origine des évolutions morphologiques constatées dans la section IV.3. Les faibles écarts d'évolutions morphologiques entre les scénarios KAN et NOD s'expliquent par l'adaptation compensée des flux et des dragages avec ou sans immersion et les bilans sédimentaires résultants qui sont finalement très proches (sauf bien sûr dans l'estuaire externe). A l'inverse, les évolutions morphologiques très contrastées observées sur les scénarios KAN et NOD s'expliquent par des bilans sédimentaires opposés : déficitaire de 2,76 Mt dans le scénario de référence (KAN) ou de 2,61 Mt sans clapage, et excédentaire de 4,5 Mt dans le cas sans dragage.

IV.6 Zoom sur la fosse nord

L'ensemble des résultats et les calculs de flux sédimentaires en suspension tendent à montrer que la zone Fosse Nord présente une réponse plus marquée que le reste de l'estuaire aux dragages/clapages. D'une manière générale, nos résultats présentés à l'échelle de l'estuaire peuvent masquer cette potentielle sensibilité. La Figure IV.29 présente ainsi spécifiquement pour la fosse nord et pour chaque scénario i/ les variations au cours du temps des concentrations en MES, ii/ la répartition des surfaces par classes de teneur en vase, iii/ les évolutions des volumes de sédiments de la fosse nord et iv/ la répartition des surfaces hypsométriques.

Concernant les concentrations médianes annuelles en MES, les résultats des différents scénarios sont très proches durant les 5 premières années. Cependant à partir de la 6^{ième} année, les concentrations en MES du scénario sans dragage (NOD) divergent sensiblement de celles observées sur les scénarios KAN et NOC (qui restent semblables). Durant les deux dernières années, les concentrations observées en fosse nord sont 10 % plus importantes sans dragage qu'avec dragage ; pour rappel, à l'échelle de l'estuaire interne, les concentrations en MES ne présentent pas de variabilité significative selon les dragages (écart KAN/NOD max. = 3 %).

En lien avec l'augmentation des turbidités, l'analyse des surfaces par gammes de teneurs en vases (Figure IV.29.b) met en avant l'envasement de la fosse nord observé sans dragages (voir aussi figure IV.13). Cette caractérisation permet de chiffrer ce qui était visible sur la Figure IV.9. Ainsi une augmentation de près de 6 km² des surfaces présentant une teneur en vases supérieure à 60 % est

observée. Cette augmentation est importante comparée à la surface de la zone d'étude : 36 km², qui d'ailleurs n'inclut pas tout le schorre à l'est du port du Havre.

En l'absence de dragage, la fosse nord se comble d'environ 0,5 Mm³ par an. Ce comblement n'est pas constant et ses variations présentent la même temporalité que celle observée dans la simulation de référence : il se produit principalement pendant les épisodes de fort débit/vagues intenses au large. Cependant les épisodes de sédimentation semblent amplifiés en raison de la disponibilité du matériel sédimentaire ; alors que les épisodes érosifs semblent atténués (Figure IV.29.c).

En termes d'hypsométrie (Figure IV.29.d), les évolutions de la fosse nord sont assez fortes après 9 ans d'arrêt des dragages (scénario NOD). Comparativement aux scénarios KAN et NOC, on observe une diminution de la classe bathymétrique -7,5 à -5 mCMH, qui augmentait dans le scénario tendanciel (KAN 2018). Aucune évolution significative n'apparaît entre -5 et +2,5 mCMH. En revanche, les classes intertidales supérieures à 2,5 mCMH évoluent, avec des augmentations d'environ 1 km² des classes 2,5 à 5 mCMH et > 7,5 mCMH. En termes de surface, ces augmentations sont compensées par les diminutions des surfaces associées à la classe 5 à 7,5 mCMH et à la classe subtidale -7,5 à -5 mCMH évoquée précédemment. Ces évolutions sont du même ordre de grandeur que les évolutions constatées entre l'initialisation et la situation simulée après 9 ans par le scénario de référence. Il semble donc qu'après 9 ans sans dragage (scénario NOD), la fosse nord soit plus vaseuse, connaisse une turbidité légèrement accrue et une évolution morphologique différente, avec une légère réduction du secteur subtidal et un engraissement inégal de l'intertidal.

Les illustrations précédentes confirment ce qui pouvait être supposé à la lecture de la section IV.4 : la fosse nord est particulièrement sensible au dragage/clapage.

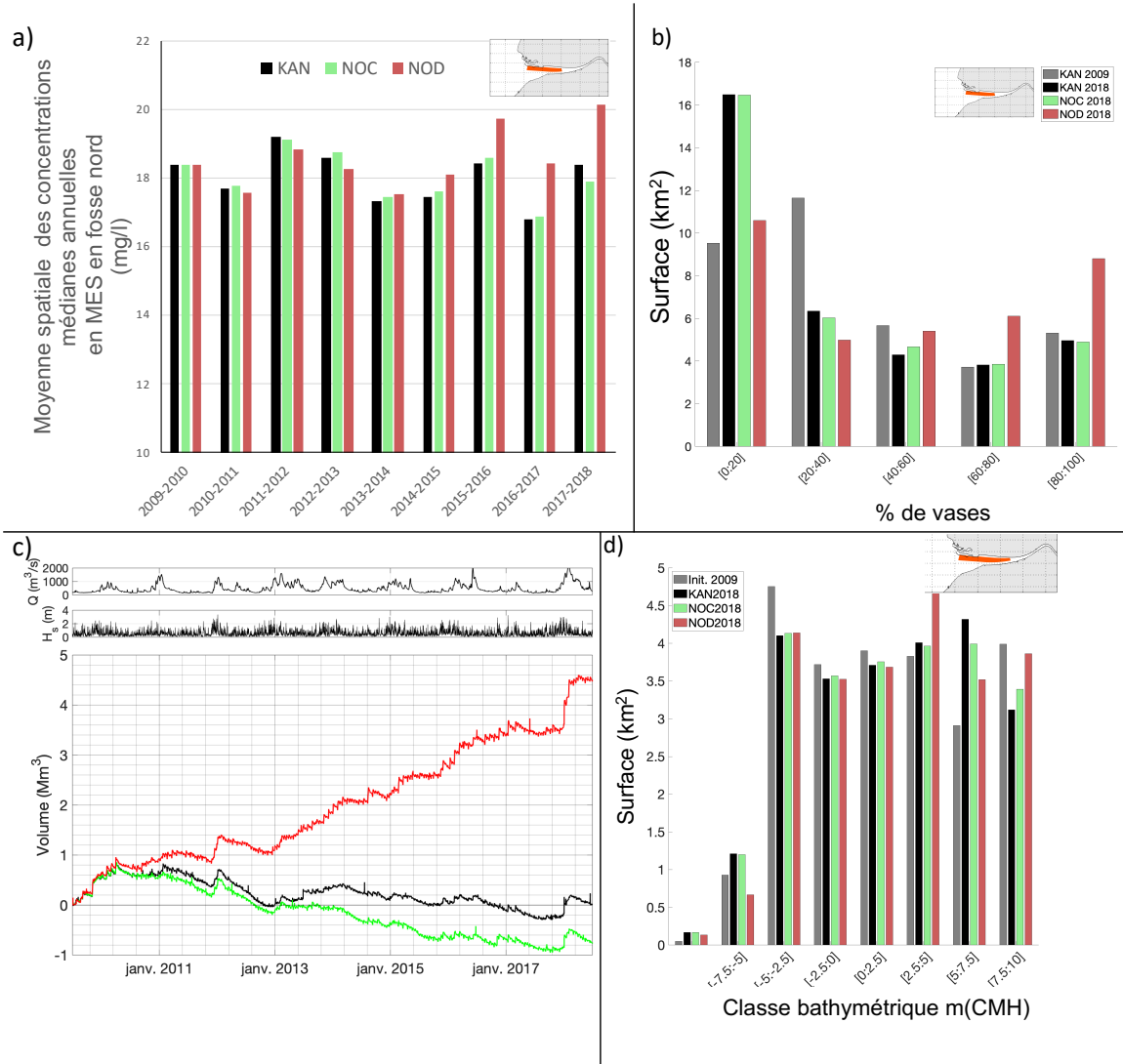


Figure IV.29: Focus sur les effets des dragages/clapages dans la Fosse Nord. a) Évolution sur la période 2009/2018 de la moyenne à l'échelle de la fosse nord (zone en rouge sur la vignette) des médianes annuelles de turbidité pour les scénarios KAN/NOC/NOD. b et d : répartition des surfaces par classes de teneur en vases (b) ou par classes hypsométriques (d), à l'échelle de la fosse nord, à l'initialisation du modèle (juillet 2009, en gris) et à la fin de la simulation (juillet 2018) pour les trois scénarios KAN/NOC/NOD. c) évolution des volumes de sédiments dans la fosse nord pour les 3 configurations KAN, NOC, NOD, en regard des évolutions des forçages (débit et vagues) sur la période 2009-2018. Les cubatures de la fosse nord sont définies comme la somme des cubatures des zones fosse nord amont, fosse nord aval, banc de la passe et méandre (Figure III.10)

IV.7 Synthèse et discussion

IV.7.1 Synthèse des effets des dragages d'entretien sur les indicateurs HMS

IV.7.1.1 Effets des clapages

La comparaison des scénarios avec et sans clapage montre qu'à l'échelle des 9 ans simulés, la masse et la position du bouchon vaseux sont peu affectées par les clapages. Ce résultat pourrait surprendre car i/ le bouchon vaseux contient près de 10 % de sédiment ayant déjà été dragué puis clapés (en moyenne sur les 9 ans de la simulation) dans le scénario de référence KAN), et ii/ près de 50 Mt (en cumulé sur les 9 années + spin up) de vases remobilisables sont extraites de l'embouchure dans la simulation sans clapage. Par ailleurs, les contributions des sédiments du large ou apportés par la Seine restent semblables, et voisines de 18,5 %. Le déficit sédimentaire généré par les extractions n'apparaît donc finalement pas significatif par rapport à l'importante quantité de matériaux vaseux, potentiellement remis en suspension par l'hydrodynamique de l'embouchure pour constituer le bouchon vaseux.

Cette faible sensibilité de la dynamique des MES aux immersions doit être mise en regard de la sensibilité des zones d'accumulations des sédiments fins aux clapages. Spatialement, la Figure IV.18 montre qu'à l'exception de la proximité immédiate des sites d'immersions, les sédiments clapés s'accumulent dans les mêmes zones que l'ensemble des sédiments mobiles, selon les mêmes patrons de dépôt. La Figure IV.10 montre ainsi que les immersions n'ont pas un impact significatif sur les surfaces présentant une forte teneur en vases. *In fine*, ces zones constituant des sources de sédiments fins, remobilisées par les courants de marée pour former les structures turbides estuariennes et notamment le bouchon vaseux, ne varient pas significativement avec les clapages. Il n'est donc pas surprenant que les turbidités à l'échelle de l'estuaire et du bouchon vaseux ne soient que faiblement impactées par les immersions. Dans l'ensemble, les effets des immersions, sur i/ la dynamique des MES, ii/ la couverture sédimentaire et iii/ les évolutions morphologiques de l'estuaire sont limités à la proximité des sites d'immersions.

- *Sensibilité des dragages aux immersions*

Par ailleurs, les quantités draguées s'avèrent être sensibles aux clapages et dépendre du retour des sédiments clapés. En l'absence de clapage, les quantités draguées en estuaire diminuent d'environ 15 % sur la dernière année simulée, avec une diminution remarquable de plus de 25 % pour les dragages du Havre. Cette diminution des dragages de 1,2 Mt constatée sur la simulation sans clapage sur l'année hydrologique 2017/2018 s'explique par la diminution de 1,1 Mt des apports sédimentaires à l'estuaire interne modélisée sur la même période en l'absence de clapage ; mais cette réduction du flux à l'embouchure correspond aussi à la quantité de matériaux préalablement clapés retrouvés dans les dragages de cette même année dans le cas d'une immersion au Kannik : 1,1 Mt également.

Après 9 ans de traçages des sédiments clapés par les ports, près de 20 % des sédiments s'avèrent avoir été dragués une fois. La Figure IV.2 a montré que les quantités totales de sédiments marqués par dragage augmentaient au cours de la simulation en lien avec la continuité des dragages durant les 9 années simulées. La Figure IV.24 a montré que dans les dragages, la part de vases marquées augmentait au cours du temps. En effet, plus il y a de sédiment marqué dans le modèle, plus la quantité de sédiment marqué susceptible de se déposer dans les zones de dragages, augmente. Pour tenter de quantifier l'évolution temporelle de ce retour des sédiments clapés vers les zones de dragage tout en s'affranchissant de la quantité de vases marquées (dépendante de la durée de la simulation), il est possible de calculer le pourcentage de la masse totale de sédiments marqués retrouvés dans les masses draguées :

$$\text{Pourcentage de sédiments marqués redragués} = 100 \times \frac{\text{Masse de sédiment marqué redragué}}{\text{Masse totale de sédiment marqué}}$$

Étant donné la vitesse moindre de transport des sables illustrée Figure IV.16 et Figure IV.17, comparée à la dispersion rapide des vases dans l'estuaire illustrée Figure IV.14 et Figure IV.15, ce calcul a été réalisé pour la somme des vases marquées par Rouen et par le Havre. La Figure IV.30 représente l'évolution au cours du temps de la masse totale de vases marquées (Rouen et Le Havre), de la masse de vases marquées retrouvée dans les dragages et enfin du pourcentage de la masse totale de vases marquées retrouvée dans les vases draguées. En cohérence avec les résultats distinguant les vases marquées Rouen et marquées Le Havre déjà présentés, la masse totale de vases marquées (Rouen et Le Havre) augmentent quasi linéairement au cours de la simulation. En revanche, la masse de vases marquées retrouvée dans les dragages présente un accroissement non linéaire au cours de la simulation. Le pourcentage de la masse totale de vases marquées retrouvée dans les vases draguées, qui correspond au ratio des deux masses citées précédemment, présente une augmentation d'allure logarithmique (Figure IV.30.b). On observe ainsi une augmentation rapide de ce rapport durant les premières années, qui diminue ensuite. L'extrapolation de cette tendance permet d'estimer, au-delà de la durée simulée, la proportion de sédiment déjà dragués/clapés, qui sera re-dragué au moins une fois. Ainsi après 20 ans de dragages de l'estuaire, avec les immersions réalisées au Kannik et à Octeville : près de 25 % des sédiments dragués devraient l'avoir déjà été au moins une fois.

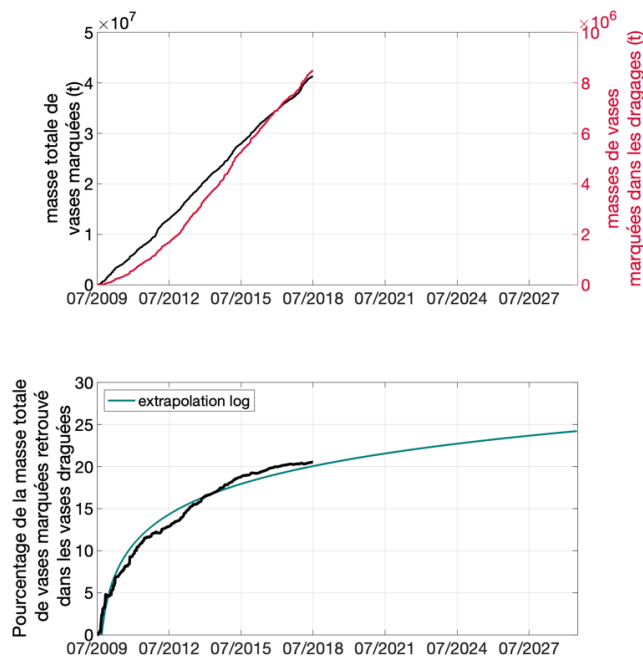


Figure IV.30 : a) Évolution de la masse totale de vases marquées (Rouen + Le Havre) et évolution des masses de vases préalablement clapées retrouvées dans les dragages ; b) évolution du pourcentage de vases marquées présent dans les masses de vases draguées (pour la totalité Rouen + Le Havre). Calcul réalisé sur le cas KAN : immersion des dragages du GPMR au Kannik et immersion des dragages du GPMH à Octeville

Les résultats détaillés pour chacune des zones draguées présentés section IV.4.5.2 montrent que ce sont presque exclusivement les vases clapées au Kannik qui retournent vers les secteurs dragués, et principalement vers les secteurs dragués du port du Havre.

IV.7.1.2 Effets des dragages

Dans l'ensemble, les comparaisons entre le scénario sans dragage NOD et le scénario sans clapage NOC d'une part, et entre le scénario de référence KAN et le scénario sans clapage NOC d'autre part montrent que les effets des dragages sont relativement importants et plus diffus que ceux des immersions. D'un côté, les immersions sont localisées sur deux zones (7 km²), alors que les dragages concernent un linéaire et une surface de l'estuaire beaucoup plus importants (16 km² répartis dans toute l'embouchure). La comparaison KAN-NOD montre que les concentrations de matières en suspension sont plus élevées en fosse nord en l'absence de dragage. Ceci peut sembler contre-intuitif car les

immersions étant réalisées à l'entrée de la fosse nord, des concentrations plus fortes auraient pu être observées en présence de la source de sédiment fins représentée par la zone de clapage. Ce n'est pas le cas, et des concentrations plus faibles sont observées en fosse nord lorsque les dragages sont pratiqués, avec ou sans immersion. Cette augmentation des concentrations en MES observées en fosse nord en l'absence de dragage rejoint les conclusions de Van Maren 2015 et Van Kessel 2015, qui montrent une augmentation des turbidités en l'absence de bassins portuaires, ces derniers jouant selon ces auteurs un rôle de piège à sédiment dans l'Escaut et l'Ems. Dans notre cas, les zones draguées de Rouen et du Havre n'étant plus draguées dans le cas NOD, le piégeage des sédiments est moindre : au bout de 9 ans, il en résulte une plus grande disponibilité du matériel sédimentaire notamment pour les suspensions. En revanche, les concentrations observées au niveau du banc des Ratelets apparaissent étonnamment plus fortes en présence de dragage (avec ou sans clapage).

Malgré ces différences de répartition localisées (écarts maximaux d'environ 20 %) dans les concentrations en MES, la masse du bouchon vaseux n'est pas significativement affectée par le dragage. La masse et la position du bouchon vaseux restent semblables, avec une réduction de 3.25 % en moyenne sur la période simulée en l'absence de dragage (Figure IV.7). Cependant, on peut noter que l'écart entre les masses du bouchon vaseux des scénarios KAN et NOD augmente au cours du temps : cet écart est très faible en début de simulation (et s'inverse même les deux premières années), tandis qu'il devient maximal en fin de période : -6.5 % sur les 2 dernières années, en l'absence de dragage. Ces évolutions sont vraisemblablement liées aux évolutions morphologiques différentes avec et sans dragages (Figure IV.20) et à leurs répercussions sur l'hydrodynamisme de l'embouchure.

La diminution que nous observons dans la masse du bouchon vaseux (calculée entre les digues submersibles) pourrait résulter des effets des dragages sur la morphologie de la zone endiguée. Ce constat est cohérent avec les constats faits par d'autres auteurs, dans d'autres estuaires Européen. Van Maren et al. (2015), ont notamment montré que dans l'Ems, les dragages en maintenant des profondeurs élevées, favorisent le pompage tidal et induisent une augmentation des concentrations en suspension. Sur des échelles de temps plus longues que celle de notre étude, les dépôts sédimentaires vaseux associés à cette augmentation de concentration en MES, peuvent initier un changement de régime ("regime shift"), en faisant chuter la dissipation d'énergie par frottement sur le fond (fond vaseux lisse). Ce changement de régime initie alors un emballement du système avec une augmentation des vitesses de courant, du marnage et par conséquent des concentrations en MES (Winterwerp et al., 2013a). Selon Winterwerp et al (2013b), les aménagements menés dans les estuaires de l'Ems (Allemagne) et de la Loire ont déclenché cet effet boule de neige, conduisant ces deux estuaires à des conditions dites hyper turbides avec la formation d'importantes zones de vases fluides ("crème de vase"), de concentrations comprises entre 30 et 300 g/l. Dans l'estuaire de la Seine, les aménagements réalisés depuis le XIXème siècle n'ont heureusement pas eu de telles conséquences et les niveaux de turbidités observés ne sont pas si extrêmes.

Les effets des dragages sur la couverture sédimentaire sont cohérents avec les effets sur les médianes de concentrations en MES. En effet, les teneurs en vases présentent une sensibilité au dragage spatialement similaire à celle des concentrations en MES (Figure IV.5.e et Figure IV.9.e). On observe en particulier des concentrations en MES et des teneurs en vases dans le sédiment superficiel, plus élevées en fosse nord en l'absence de dragage ; alors qu'en présence de dragage l'aval du secteur endigué et le pourtour du banc des Ratelets est plus vaseux (MES et sédiment superficiel). Ces différences peuvent localement atteindre des valeurs relativement importante de l'ordre +/- 30% (Figure IV.9.e). Une légère augmentation des surfaces vaseuses est observée en l'absence de dragage (Figure IV.10 et Figure IV.11). Cette augmentation est progressive au cours du temps, mais prend quelques années à se mettre en place, ce qui suggère l'idée que cette dérive des turbidités serait une conséquence d'une divergence de la morphodynamique de l'estuaire, selon que les dragages sont pratiqués ou non.

En termes d'impact sur la morphologie, les effets des dragages sont marqués et ne se limitent pas à la proximité des zones draguées (Figures IV.19 et IV.20). Pendant les 9 années sans dragage (scénario NOD), la morphologie de l'embouchure semble se réadapter à l'arrêt des dragages :

- les zones draguées se comblent, des dépôts supérieurs à 2 m sont observés,
- la zone situées entre les digues, en érosion en présence de dragage, se stabilise voir se comble, rapidement pendant les 4 premières années à l'aval ($\sim +7 \text{ Mm}^3$), mais plus tardivement (à partir de 2014) et plus lentement à l'amont du pont de Normandie ($\sim +1 \text{ Mm}^3$) (Figure IV.21).

- La fosse nord, en équilibre en présence de dragage se comble significativement,
- Le banc des Ratelets s'érode nettement moins (sachant que la simulation dans ce secteur reste entachée d'erreur)
- En revanche la tendance érosive de la fosse sud ne semble pas changer.

Via le couplage morpho-dynamique, les évolutions morphologiques induites par les dragages sont associées (et même couplées) à des évolutions de l'hydrodynamisme de l'embouchure. A titre d'exemple, la Figure IV.30 illustre les différences des courants maximaux modélisés entre les scénarios KAN et NOD sur la période septembre 2017 à juillet 2018. Il est intéressant de noter que les courants maximaux présentent des différences marquées, et ceci après seulement 9 ans sans dragage. En lien avec les observations faites en fosse nord section IV.7, des vitesses de courants maximales plus importantes sont observées sans dragage en fosse nord (mais pas au niveau du schorre au-dessus de la vasière nord du Havre). Cette augmentation de vitesse pourrait résulter de la tendance au comblement de la fosse nord, si le débit qui y passe est maintenu ; elle semble insuffisante pour empêcher la sédimentation qui pourrait être due à l'augmentation des MES et surtout du flux de vase entrant par l'ouest (tableau IV-4). L'augmentation des vitesses en fosse nord peut aussi s'expliquer par la réduction des vitesses entre les digues submersibles, où la tendance est à l'élévation des fonds, ce qui générerait une meilleure répartition des débits entre chenal central et fosse nord. Par ailleurs, il est intéressant de noter l'effet de l'arrêt des dragages à proximité de l'engainement avec des vitesses moindres au niveau de l'ancien chenal de navigation qui était dragué et des vitesses plus élevées de part et d'autre. Là encore, une réduction des gradients transversaux de bathymétrie entraîne une homogénéisation des courants.

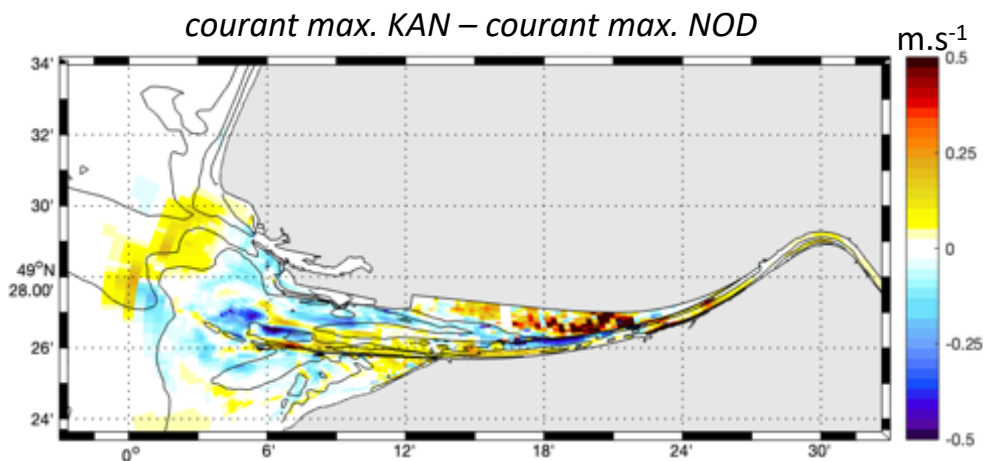


Figure IV.31: Différence des intensités des vitesses barotropes maximales entre les scénarios KAN et NOD (KAN - NOD). Calcul sur la période du 20 sept 2017 au 21 juin 2018. Les isobathes représentées correspondent à la bathymétrie du scénario NOD en sept 2017

Dans l'ensemble, nous pouvons retenir qu'à l'échelle de l'estuaire et de la période simulée, courte vis-à-vis des échelles de temps morpho-dynamiques, les effets des dragages sur les évolutions morphologiques et sur la couverture sédimentaire sont importants comparativement aux effets sur la dynamique des MES.

IV.7.2 Synthèse des effets des dragages d'entretien sur les flux et bilans sédimentaires

L'analyse des flux sédimentaires réalisée au IV.5 permet de mieux comprendre le rôle des dragages dans le fonctionnement HMS de l'estuaire. D'une part, l'analyse de la remobilisation sédimentaire a montré en particulier qu'à l'échelle de l'estuaire, les remises en suspensions sont largement supérieures aux quantités draguées ; et ne sont pas significativement impactées par les dragages/clapages. Cette comparaison permet de comprendre l'absence d'effets significatifs des dragages/clapages sur les concentrations en MES.

Enfin l'analyse et la comparaison des flux sédimentaires en suspension avec les quantités draguées a permis de réaffirmer le constat réalisé au chapitre II : les dragages génèrent des flux sédimentaires du même ordre de grandeur que les flux sédimentaires naturels. Les différents flux sédimentaires analysés présentent aussi des variations interannuelles comparables à celles des dragages et clapages. Si dans l'ensemble, les clapages semblent avoir peu d'effets sur les indicateurs HMS, ces derniers ont des répercussions relativement importantes sur les flux sédimentaires : à l'embouchure près de 50 % des sédiments vaseux qui rentrent dans l'estuaire sont des sédiments déjà dragués puis clapés (au Kannik essentiellement).

La mise en regard des flux sédimentaires en suspension avec les flux sédimentaires induits par les dragages a permis de proposer des bilans sédimentaires pour différents secteurs de l'estuaire, avec et sans dragage. La Figure IV.32 synthétise ces flux et bilans sédimentaires pour les cas avec et sans dragage. D'une manière générale tous les flux apparaissent comme amplifiés par les dragages d'entretien. Au niveau de l'estuaire interne (Figure IV.28), secteur vers lequel les flux "*Embouchure*" et "*Tancarville*" convergent, l'augmentation des flux induite par les dragages ne suffit pas à compenser l'export réalisé par ces derniers vers l'estuaire externe. Le bilan sédimentaire de l'estuaire interne est donc en déficit à cause des dragages. Plus globalement, il ressort que les dragages, en maintenant des conditions de sédimentation (zones profondes hydro-dynamiquement calmes) dans les zones draguées, font converger les flux sédimentaires vers ces dernières. Ceci est par exemple le cas au niveau de Tancarville où en présence de dragage, une augmentation du flux sédimentaire vers l'aval de près de 200 kt est simulée, en moyenne sur les 4 années hydrologiques de 2014 à 2018. En fosse nord, en lien avec les évolutions morphologiques (Figure IV.29) et les évolutions de l'hydrodynamisme (Figure IV.31), les flux sédimentaires augmentent en l'absence de dragage.

Il est important de replacer l'ensemble de ces résultats dans le contexte de l'estuaire de la Seine. En effet, nos simulations démarrent en 2009 sur une bathymétrie qui résulte de plus de 50 ans d'interactions entre fonctionnement naturel et aménagements anthropiques, dragages inclus ; nos résultats sur une période de 9 ans ne nous donnent ainsi qu'une vision partielle, à court/moyen terme des effets des dragages sur la morphologie actuelle de l'estuaire.

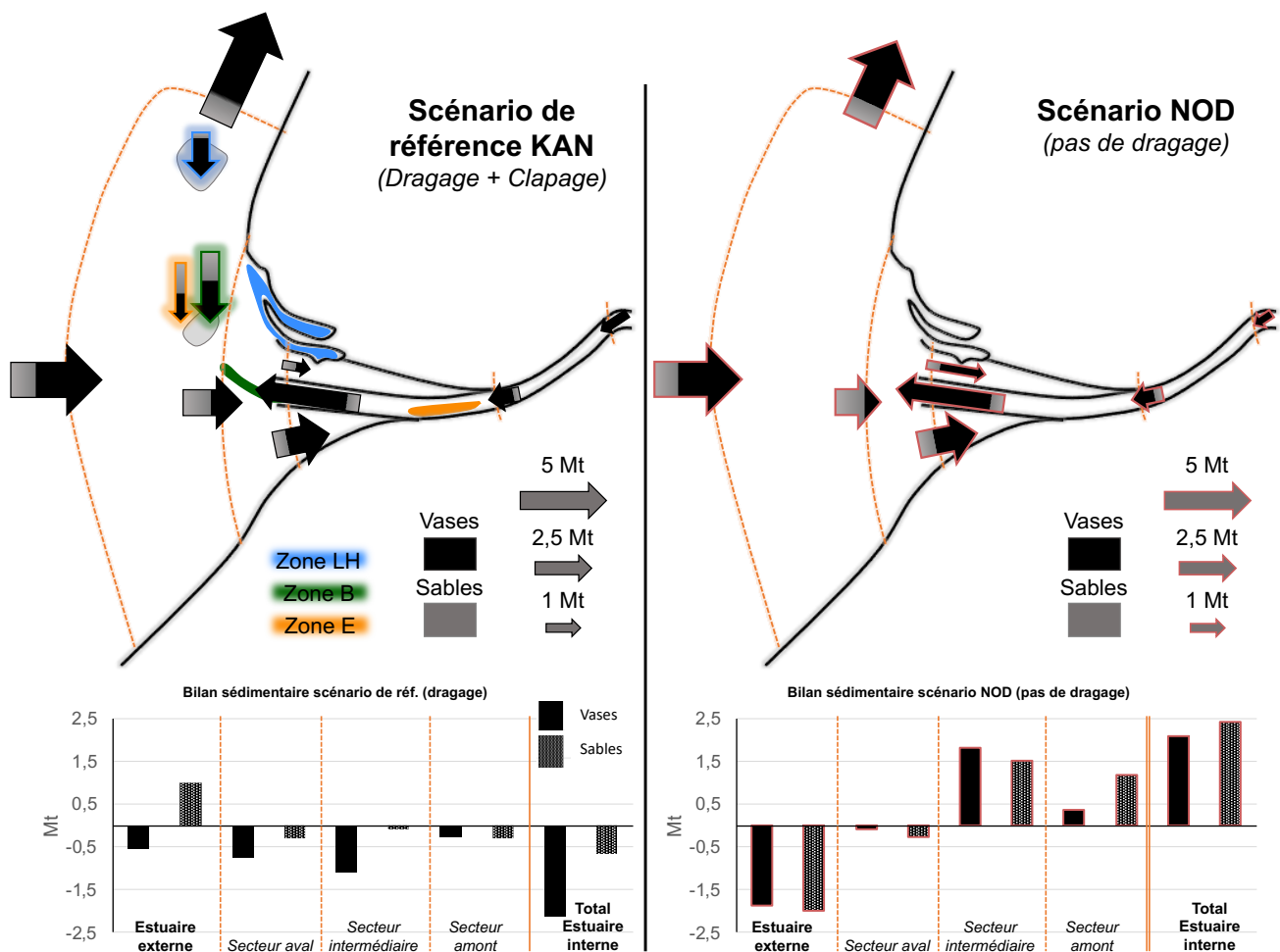


Figure IV.32 : Synthèse des flux sédimentaires et dragages modélisés sur l'année hydrologique 2017/2018 (haut) et effets sur les bilans sédimentaires de l'estuaire (bas) pour les scénarios avec dragages et immersions au Kannik (KAN, à gauche) et scénario sans dragage (NOD, à droite). Les parties noires et grises des flèches correspondent respectivement au taux de vases et de sables dans les flux en suspension considérés. Les flèches entourées en bleu, vert et orange correspondent aux immersions des sédiments dragués respectivement sur les sites du port du Havre, à l'Engainement et à la Brèche. Les sites de dragage sont représentés en utilisant les mêmes couleurs. En bas, les bilans sédimentaires déduits de ces flux sont représentés en distinguant vases (noir) et sables (hachurés)

La comparaison des bilans sédimentaires avec et sans dragage tend à montrer que dans la situation actuelle, les dragages entraînent une érosion résiduelle de l'estuaire interne. En l'absence de dragage, l'estuaire se comblerait de 4 à 5 Mt/an, confirmant les tendances à long terme constatées sur les estuaires naturels. La poursuite des simulations sur des périodes plus longues permettrait de déterminer si cette tendance se poursuivrait ou si les rétroactions morpho-dynamiques permettraient d'atteindre un état d'équilibre présentant des atterrissements limités. S'agissant de la fosse nord, l'absence de dragage favoriserait son envasement, ce qui pourrait constituer un intérêt environnemental (restauration des fonctionnalités écologiques des vasières), à condition qu'un comblement progressif de cette même fosse nord ne vienne pas irréversiblement condamner ce faciès de vasière intertidale au profit du schorre.

Dans l'état, nos résultats montrent que les dragages d'entretien semblent ralentir la tendance géologique naturelle de comblement, ceci est particulièrement visible en fosse nord. Cependant la morphologie de l'estuaire apparaît comme particulièrement contrainte par les aménagements (digues submersibles nord et sud, digue en épi, digues de Port 2000, endiguements en amont du pont de Normandie). La chenalisation de l'énergie hydrodynamique induite par ces aménagements rend

toutefois délicate la transposition de nos observations à des estuaires moins anthropisés où les chenaux peuvent évoluer librement et s'adapter au comblement naturel.

Chapitre V : Simulation de l'impact potentiel d'un changement de site de clapage

Plan du chapitre :

V.1	Introduction au chapitre V	185
V.2	Dynamique des sites d'immersions	186
V.2.1	Machu : présentation du site et dynamique modélisée	186
V.2.2	Octeville R : présentation du site et dynamique modélisée	188
V.3	Effets des immersions à Machu ou Octeville R pour les sédiments dragués par le GPMR comparativement au cas d'un rejet au Kannik	189
V.3.1	Dispersion des sédiments clapés par le GPMR depuis les différents sites	189
V.3.2	Effets sur les concentrations en MES	191
V.3.3	Effets sur la morphologie de l'estuaire	195
V.3.4	Effets de la position des clapages sur les quantités draguées	198
V.3.5	Flux sédimentaires en suspension	201
V.3.6	Bilans sédimentaires	203
V.4	Synthèse et discussion	206



V.1 Introduction

L'objectif du chapitre V est de discuter des effets potentiels d'un changement de site d'immersion des matériaux dragués par le GPMR. Cette problématique opérationnelle est au cœur des préoccupations des ports de l'estuaire de la Seine ces dernières années et est notamment à l'origine du présent sujet de thèse. En effet, le GPMR exploitait depuis les années 70 le site d'immersion du Kannik ; ce dernier étant arrivé à saturation, le GPMR a dû changer de site d'immersion en 2017. Parmi les sites alternatifs envisagés par le GPMR, deux sites aux caractéristiques hydro sédimentaires contrastés se distinguent : Machu et Octeville (Figure II.33).

Selon le GPMR (2014), le site d'Octeville n'a pas été sélectionné notamment en raison i/ des risques pour la navigation (passage des dragues au travers des chenaux d'accès au GPMH), ii/ de potentielles interactions entre les immersions du GPMR et du GPMH et iii / du surcoût engendré par son éloignement des zones draguées du GPMR. Cependant la dynamique de ce site est connue grâce à l'expérience du GPMH. Son caractère dispersif, et l'orientation vers le nord du devenir des sédiments qui y sont déposés (Cf. Chapitre IV) confèrent à ce site un intérêt potentiel qu'il a paru pertinent de considérer au travers du présent travail à caractère académique.

Le site du Machu a été sélectionné en raison de plusieurs critères (écologique, économique et technique) (GPMR, 2014) : les caractéristiques du site ont fait l'objet de plusieurs études, et ses modalités d'exploitation ont été définies, notamment suite aux travaux de Marmin et al. (2014). Le GPMR (2015) a montré que le site du Machu présentait un fort taux de recyclage des sédiments ,vers l'estuaire. Le site du Machu est exploité depuis mi 2017, date à laquelle les immersions au Kannik ont par ailleurs été stoppées. Le GPMR a l'autorisation de claper sur ce site jusqu'en 2027 (10 ans).

Le changement de site d'immersion des sédiments dragués par le GPMR, intervenant après près de 50 ans d'immersion sur le Kannik, soulève des questions scientifiques et opérationnelles pour l'avenir de l'estuaire :

- i. Quels seront les effets de l'arrêt des immersions au Kannik ?
- ii. Quels seront les effets des immersions sur un autre site que le Kannik ?
- iii. Ces changements auront-ils des répercussions sur les évolutions de l'estuaire ?
- iv. Les dragages, en termes de quantités et de nature des matériaux dragués, seront-ils impactés par ces changements ?

Le modèle présenté au chapitre III permet d'étudier les effets potentiels d'un changement de site d'immersion pour les sédiments dragués par le GPMR vers les sites de Machu et Octeville. Le site d'Octeville pris en compte ici est accolé au nord du site d'Octeville du GPMH : ce nouveau site est appelé Octeville R par la suite (Figure V.2). Deux simulations de 9 ans, strictement analogues aux simulations présentées au chapitre IV, ont ainsi été réalisées : MAC (immersion à Machu) et OCT (immersion à Octeville R). Le paramétrage de ces simulations est strictement identique à celui de la simulation de référence KAN, présentée au chapitre III, seule la position des immersions des matériaux dragués du GPMR diffère. Dans les deux nouveaux scénarios les immersions des sédiments dragués par le GPMH sont inchangées et réalisées à Octeville. Les forçages considérés (débit, marée, vent, vagues, apports solides) sont également strictement identiques.

Dans un premier temps, la dynamique de ces sites d'immersions en termes de stabilité sera analysée (cf. IV.2.3). Puis sur la base de la méthode de traçage présentée au chapitre IV, la dispersion des sédiments en provenance de ces deux sites, dans le sédiment et dans l'eau sera établie. En lien avec les conclusions du chapitre IV, les effets sur les concentrations en MES et sur la morphologie de l'estuaire en réponse aux changements de site d'immersion seront analysés. Enfin, les flux et bilans sédimentaires associés à ces scénarios seront comparés à ceux modélisés avec des immersions réalisées sur le Kannik.

V.2 Dynamique des sites d'immersions

Le modèle présenté au chapitre III est utilisé pour modéliser l'effet des immersions du GPMR sur les sites de Machu et Octeville R. En lien avec la méthodologie présentée au IV.2.3, la dynamique des sites d'immersion et en particulier leur stabilité respective est déterminée.

V.2.1 Machu : présentation du site et dynamique modélisée

V.2.1.1 Présentation du site et de la stratégie de clapage

Le site du Machu occupe une surface de 715 ha, il est situé 10 km à l'ouest du site du Kannik. Avant les premières immersions, la bathymétrie sur le site était comprise entre -19 et -13 mCMH (Figure V.1). Les sédiments présents sur la zone sont principalement des sables fins et moyens ne comprenant qu'une très faible proportion de vases (< 5 %) (GPMR, 2015).

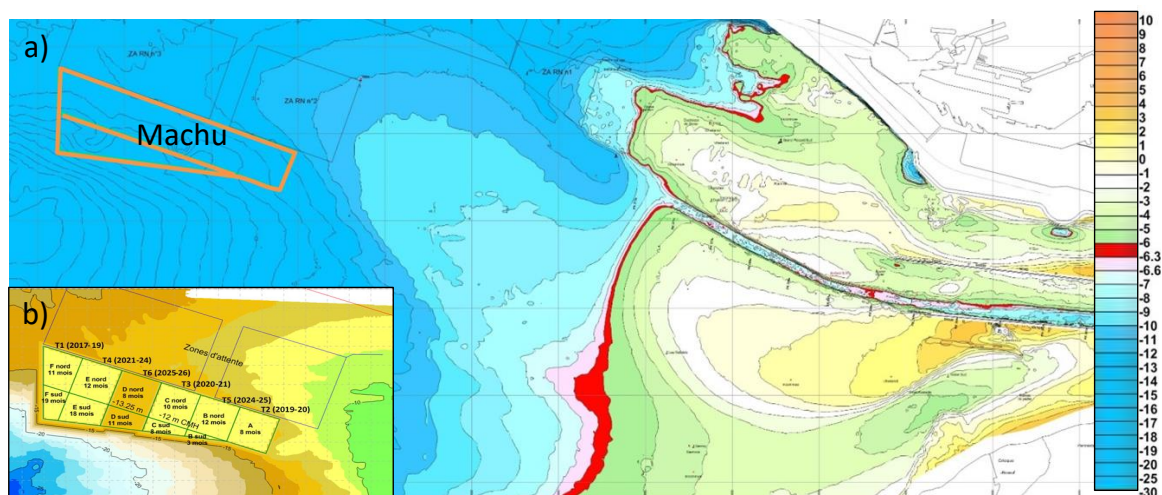


Figure V.1 : a) Localisation du site du Machu et bathymétrie mesurée avant le début des immersions (mai 2017) ; b) emprise des casiers de clapage définis par le GPMR pour les immersions sur le site du Machu des sédiments dragués dans l'estuaire aval (d'après GPMR, 2015)

Les études d'impact menées par le GPMR et notamment la thèse de Marmin (2014) ont conduit à l'adoption d'une stratégie de clapage dite par bande alternée, de façon à permettre la recolonisation par le zoobenthos assez rapidement après "exploitation" d'une bande. Le clapage est réalisé sur des casiers définis pour la période d'exploitation 2017-2027 (Figure V.1.b). L'exploitation des bandes s'effectue jusqu'à atteindre une hauteur maximale de dépôt de 5 m. Les casiers utilisés successivement sont volontairement disjoint de manière à limiter les effets sur les organismes benthiques (GPMR, 2015). Ce raffinement spatial dans la gestion des immersions n'a pas été introduit dans notre stratégie de simulations, qui se fait comme pour les immersions sur les sites du Kannik et d'Octeville : les sédiments sont répartis sur le site du Machu sur un ensemble continu de 6 mailles (~ 240ha) représenté Figure V.2.

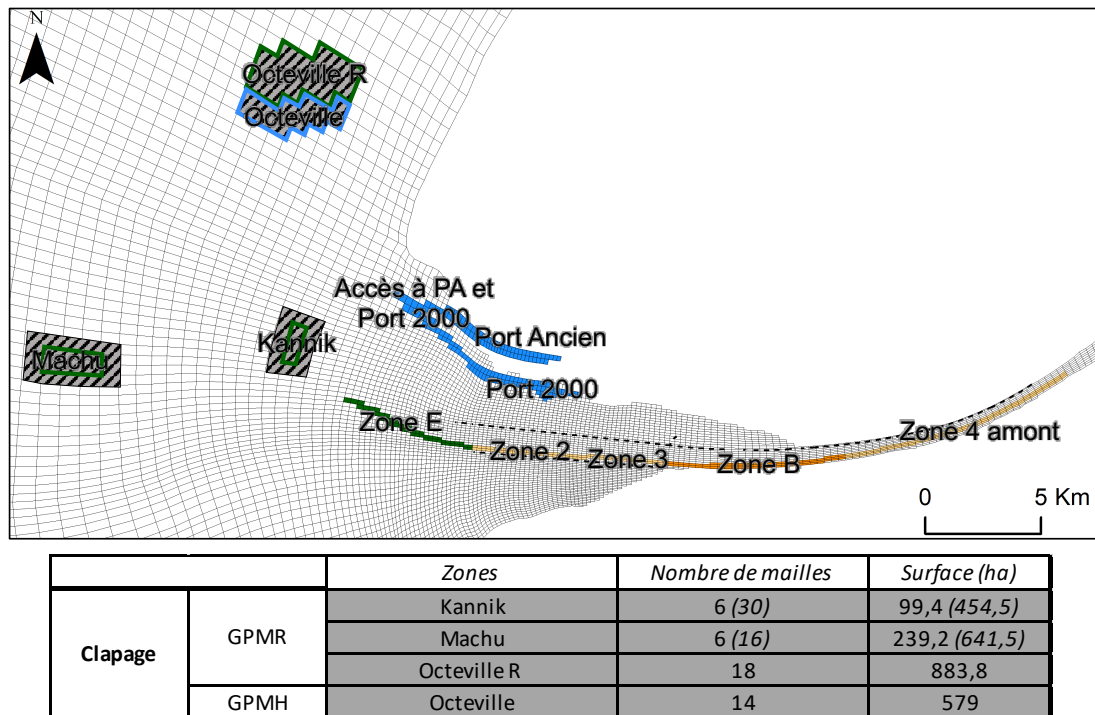


Figure V.2 : Localisation et caractéristiques des zones de dragage et de clapage prises en compte dans le modèle. Les sites de clapage sont entourés en vert et bleu (GPMR & GPMH resp.). Les zones hachurées à proximité des sites de clapage et les chiffres entre parenthèses dans le tableau correspondent aux emprises considérées pour le calcul de stabilité des sites. Les zones Kannik et Octeville sont rappelées afin de faciliter la comparaison. (PA : Port Ancien)

V.2.1.2 Stabilité des immersions simulées sur le site du Machu

Un calcul analogue à celui réalisé pour les sites du Kannik et d'Octeville et détaillé section IV.2.3 a été réalisé sur le site du Machu. L'emprise considérée pour ces calculs est précisée Figure V.2 ; le Tableau V-1 présente ces résultats. La stabilité effective totale du site dans nos simulations vaut 34% ; elle n'est que de 2% pour les vases, alors qu'elle vaut 91% pour les sables. Dans nos simulations, le site du Machu apparaît comme extrêmement dispersif pour les vases, alors que les sables semblent en majorité rester sur le site et sa proximité. La stabilité apparente du site vaut 36 % dans nos simulations. La stabilité volumique apparente simulée de 34 % apparaît toutefois très faible comparée à celle estimée par le port de Rouen (70 %).

Cette différence de stabilité provient vraisemblablement de la simplification du processus de clapage réalisée dans le modèle : les immersions sont diluées sur une surface importante et dans de grandes profondeurs (entre -13 et -19 mCMH), comparativement à ce qui était réalisé sur le site du Kannik (entre -12 et -7 mCMH). Les répercussions de cette dilution sur la dispersion des vases et le taux de stabilité effective associé, sont évidentes. Dans l'ensemble, nous retiendrons que le modèle surestime la dispersion des vases immergés à Machu. Cette sous-estimation de la stabilité n'est pas de nature à empêcher l'exploitation des résultats, mais doit être considérée dans l'analyse de ces derniers.

Tableau V-1 : Stabilités in-situ et modélisée ainsi que densité modélisée, en valeur moyenne sur la période janv. 2014- juil.2018, évaluées selon les différentes méthodes de calculs citées section IV.3, pour le site du Machu. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiments clapés (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant une densité du sédiment constante égale à 1,8

	Machu
Stabilité constatée in-situ	70%
Stabilité Apparente	36%
Stabilité Effective vases	2%
Stabilité Effective sables	91%
Stabilité Effective totale	34%
Stabilité Volumique Apparente	34%
Densité modélisée (t/m3)	1,87

Moyennes sur la deuxième
moitié de la simulation
(jan 2014 --> jul 2018)

V.2.2 Octeville R : présentation du site et dynamique modélisée

Le site Octeville R (pour Octeville Rouen) que nous proposons d'étudier serait situé au nord immédiat du site d'Octeville utilisé par le GPMH (Figure V.2). Le scénario associé à l'utilisation de ce site par le GPMR a pour objectif de déterminer les effets sur le fonctionnement HMS de l'estuaire, de l'utilisation par le port de Rouen d'un site présentant un taux de retour des sédiments vers l'estuaire à priori très faible comparé aux sites de Kannik et Machu.

L'emprise considérée pour réaliser les immersions dans le modèle est très grande (880 ha) et les profondeurs comparables aux profondeurs du site de Machu (entre -13 et -19 mCMH). Le clapage y est réalisé de la même manière que pour les autres simulations : injection des vases uniformément distribuées dans la moitié inférieure de la colonne d'eau et injection des sables sous forme d'une suspension concentrée dans la couche de fond de la colonne d'eau (1/10 de la hauteur d'eau).

Un calcul analogue à celui réalisé pour les sites du Kannik et d'Octeville et détaillé section IV.2.3 a été réalisé sur le site d'Octeville R. L'emprise considérée pour ces calculs est précisée Figure V.2 ; le Tableau V-2 présente ces résultats. La stabilité effective totale du site dans nos simulations vaut 19 % (50 % pour les sables seuls). En revanche, 100 % des vases sont dispersées. La stabilité apparente du site vaut 31 % dans nos simulations. La stabilité volumique apparente simulée vaut 30%. Comparativement au taux de stabilité des immersions du GPMH contenant 90 % de vases, estimé à 10 %, le taux de stabilité des immersions du GPMR (~ 60 % de vases) simulé sur le site d'Octeville R semble réaliste, malgré l'absence de donnée pour le valider.

Tableau V-2 : Stabilité modélisée ainsi que densité modélisée, en valeurs moyennes sur la période janv. 2014-juil.2018, évaluée selon les différentes méthodes de calculs citées section IV.3, pour le site du Machu. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiments clapés (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant une densité du sédiment constante égale à 1,8

	Octeville R
Stabilité constatée in-situ	
Stabilité Apparente	31%
Stabilité Effective vases	0%
Stabilité Effective sables	50%
Stabilité Effective totale	19%
Stabilité Volumique Apparente	30%
Densité modélisée (t/m3)	1,86

Moyennes sur la deuxième
moitié de la simulation
(jan 2014 --> jul 2018)

V.3 Effets des immersions à Machu ou Octeville R pour les sédiments dragués par le GPMR comparativement au cas d'un rejet au Kannik

V.3.1 Dispersion des sédiments clapés par le GPMR depuis les différents sites

La technique de marquage présentée au IV.2.2 permet de suivre la dispersion des sédiments clapés par les ports. Cette technique est ici mise en œuvre pour comparer la dispersion des sédiments immergés sur les sites de Kannik, Machu et Octeville R.

V.3.1.1 Dispersion des sables sur le fond

La Figure V.3 présente la répartition des sables clapés sur chacun des 3 sites Kannik, Machu et Octeville R au mois de juillet 2018, après 9 années d'immersion.

Malgré un taux de stabilité proche de 50 %, les sables clapés à Machu sont largement dispersés en direction de l'embouchure de l'estuaire. Des quantités relativement élevées sont en particulier retrouvées sur le pourtour des bancs des Ratelets/Ratiers, au niveau de la gambe d'Amfard mais également à proximité des zones draguées par le GPMR (Engainement) et le GPMH. Comparativement au Kannik, de plus faibles quantités sont retrouvées en estuaire. Cependant les évolutions temporelles de la dispersion des sables clapés au Kannik présentés Figure IV.16 ont montré qu'après 9 ans d'immersions la distribution des sables évolue toujours. Il est donc fort probable que les répartitions observées dans le scénario MAC, après 9 ans de simulation continuent également d'évoluer, et qu'à plus long terme les sables clapés à Machu soient dispersés dans toute l'embouchure de l'estuaire.

Concernant les immersions de sables réalisées à Octeville R, de manière analogue à ce qui était observé Figure IV.17, ces derniers sont dans leur grande majorité transportés vers le nord, notamment du fait de l'asymétrie des courants de marée et de la force du courant de Verhaule.

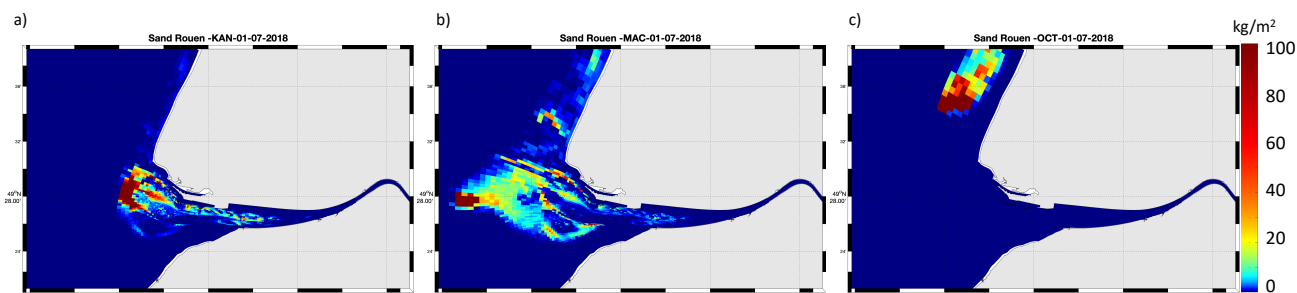


Figure V.3 : Moyenne pendant le mois de juillet 2018 des distributions sur le fond des sables immergés par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) ou Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m^2)

V.3.1.2 Dispersion des vases

- *Dispersion des vases sur le fond*

La Figure V.4 présente la répartition des vases clapées sur les 3 sites Kannik, Machu et Octeville R au mois de juillet 2018, après 9 années d'immersion.

En lien avec l'observation faite sur la Figure IV.18, montrant la similitude des dépôts de sédiments clapés et des sédiments mobiles, la répartition des vases clapées au Kannik et Machu sont, à l'exception de la proximité immédiates des sites d'immersion, très similaires. Les vases clapées à Octeville R sont quant à elle principalement dispersées vers le nord, de manière analogue aux sables, et pour partie piégées par la digue d'Antifer, comme l'étaient les vases du port du Havre clapées à Octeville. On observe toutefois un retour d'une partie de ces vases vers l'estuaire et les zones de sédimentation, mais ce retour apparaît être inférieur d'un ordre de grandeur à celui observé dans les cas Kannik et Machu.

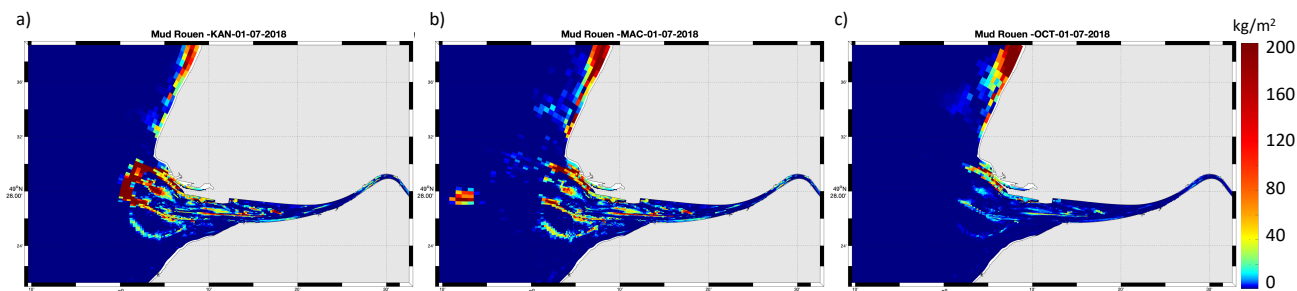


Figure V.4 : Moyenne pendant le mois de juillet 2018 des distributions sur le fond des vases immergées par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) ou Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m^2)

- *Dispersion des vases marquées en suspension*

La Figure V.5 présente les médianes sur l'année 2017/2018 des concentrations en suspensions des vases préalablement clapées sur les sites de Kannik, Machu et Octeville R. En estuaire, les répartitions des vases préalablement clapées sur les sites de Kannik et Machu sont très similaires spatialement et quantitativement. Dans le cas Kannik, des concentrations plus élevées sont observées à proximité du site d'immersion (cf. section IV.4.1). Que l'immersion soit réalisée sur le site de Machu ou sur celui du Kannik, des concentrations médianes de l'ordre de 5 mg/l sont observées dans l'estuaire interne. Du fait de la position du site de Machu, une différence relativement marquée est cependant observée au

large de la côte d'Albâtre : dans ce cas une quantité plus importante de sédiment semble transiter vers le nord.

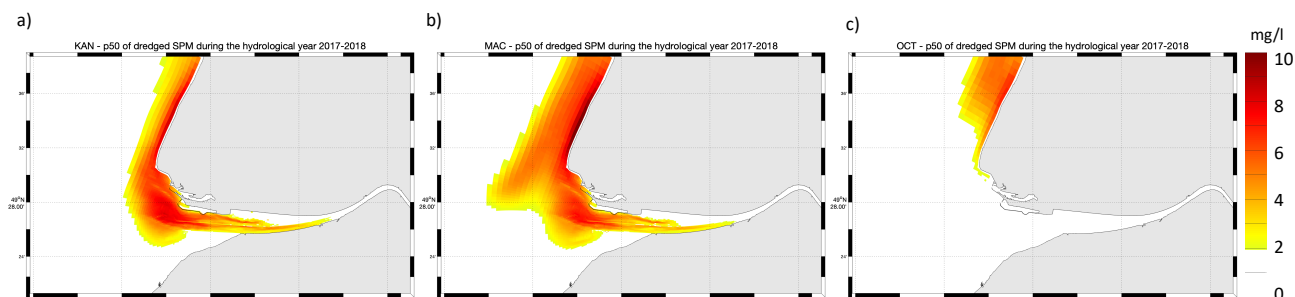


Figure V.5 : Médiane sur l'année 2017/2018 des concentrations de vases en suspension préalablement clapées par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) et Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en mg/l)

Dans le cas où les dragages du GPMR sont immergés à Octeville R, le panache est dirigé vers le nord et les concentrations en suspension de matériaux dragués sont imperceptibles dans l'estuaire (avec la même échelle de couleur que pour les cas Kannik et Machu).

V.3.2 Effets sur les concentrations en MES

V.3.2.1 Effets sur les concentrations à l'échelle de l'embouchure

Les comparaisons réalisées au chapitre IV entre le scénario avec immersions du GPMR au Kannik et du GPMH à Octeville et le scénario NOC sans immersion ont montré que les immersions au Kannik n'avaient pas un effet significatif sur la turbidité à l'échelle de l'estuaire ; les effets des immersions se font principalement sentir à proximité des sites de clapage. Les sites de Machu et Octeville R présentent des caractéristiques différentes de celles du Kannik en termes de position relative à l'estuaire et de profondeur, d'environnement hydrodynamique (et stabilité associée) ; par ailleurs l'estuaire et sa morphologie peuvent évoluer différemment durant les simulations KAN, MAC et OCT : il est donc intéressant de rechercher l'impact éventuel de ces différences sur les concentrations en MES dans ces trois scénarios.

La Figure V.6 présente les différences de concentrations en suspensions médianes annuelles (année hydrologique 2017/2018) entre les scénarios Kannik et Machu et entre les scénarios Kannik et Octeville R. La différence KAN-MAC met en avant des concentrations plus élevées dans le cas Machu dans un secteur s'étendant du site Machu vers le Nord-Nord-Est jusqu'au pays de Caux, de façon analogue au panache visible sur la Figure V.5. Mais une augmentation des MES est également visible au sud du banc des Ratelets. En Fosse Nord, des concentrations sensiblement plus élevées sont aussi observées lors des clapages à Machu.

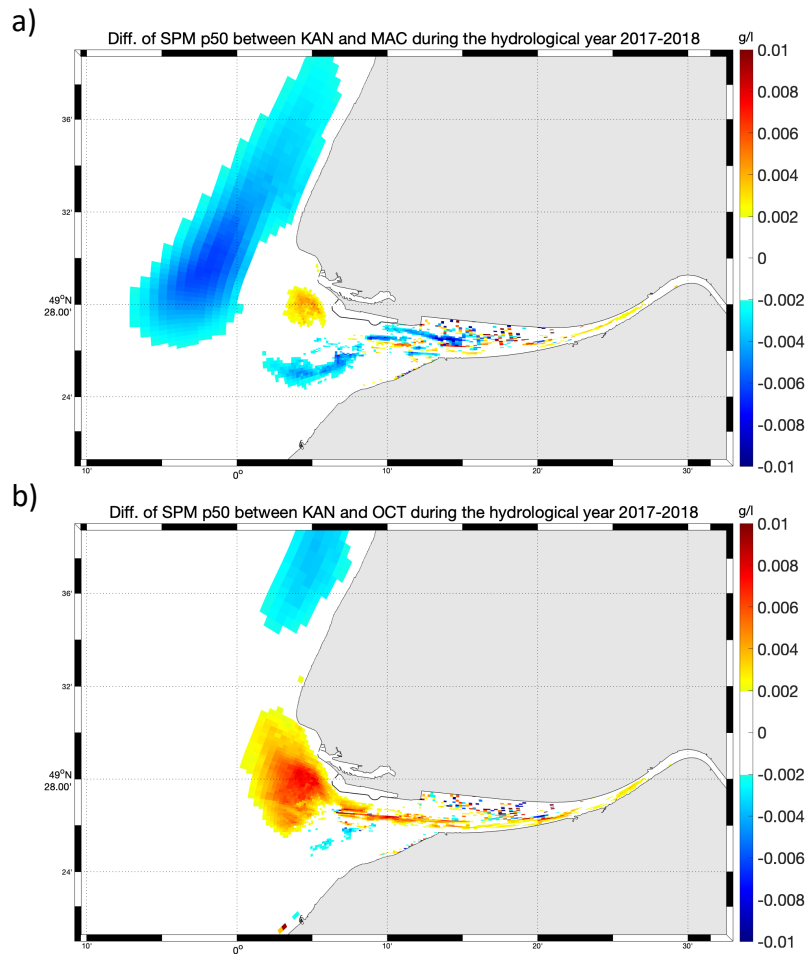


Figure V.6 : a) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et MAC (concentration KAN - concentration MAC); b) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et OCT (concentration KAN - concentration OCT) pendant l'année de simulation juillet 2017 - juin 2018

Les concentrations médianes annuelles apparaissent au contraire plus fortes dans le cas Kannik qu'Octeville R, et pas seulement à proximité du site de Kannik. En raison du panache de dispersion orienté vers le nord dans le cas Octeville, les différences de MES entre les scénarios KAN et OCT sont, en estuaire, très similaires aux différences observées entre les scénarios Kannik et NOC (sans clapage), illustrées Figure IV.5.c.

V.3.2.2 Effets des immersions sur le bouchon vaseux

Sur le modèle de la Figure IV.7, la comparaison des Figure V.7 a.b.c permet d'estimer les effets des immersions sur les sites de Machu et Octeville R comparativement au site du Kannik. Les dynamiques de bouchons vaseux simulées dans les 3 cas sont très similaires, avec des variations de masses et de positions saisonnières quasiment identiques. Dans le cas Machu, une diminution moyenne de 2,5 % de la masse du bouchon vaseux est simulée. Dans le cas Octeville R, une diminution moyenne de 4,5 % est observée : dans ce cas, la masse et la position du bouchon vaseux, en moyenne sur la période simulée, sont les mêmes que celles simulées dans le cas sans clapage NOC.

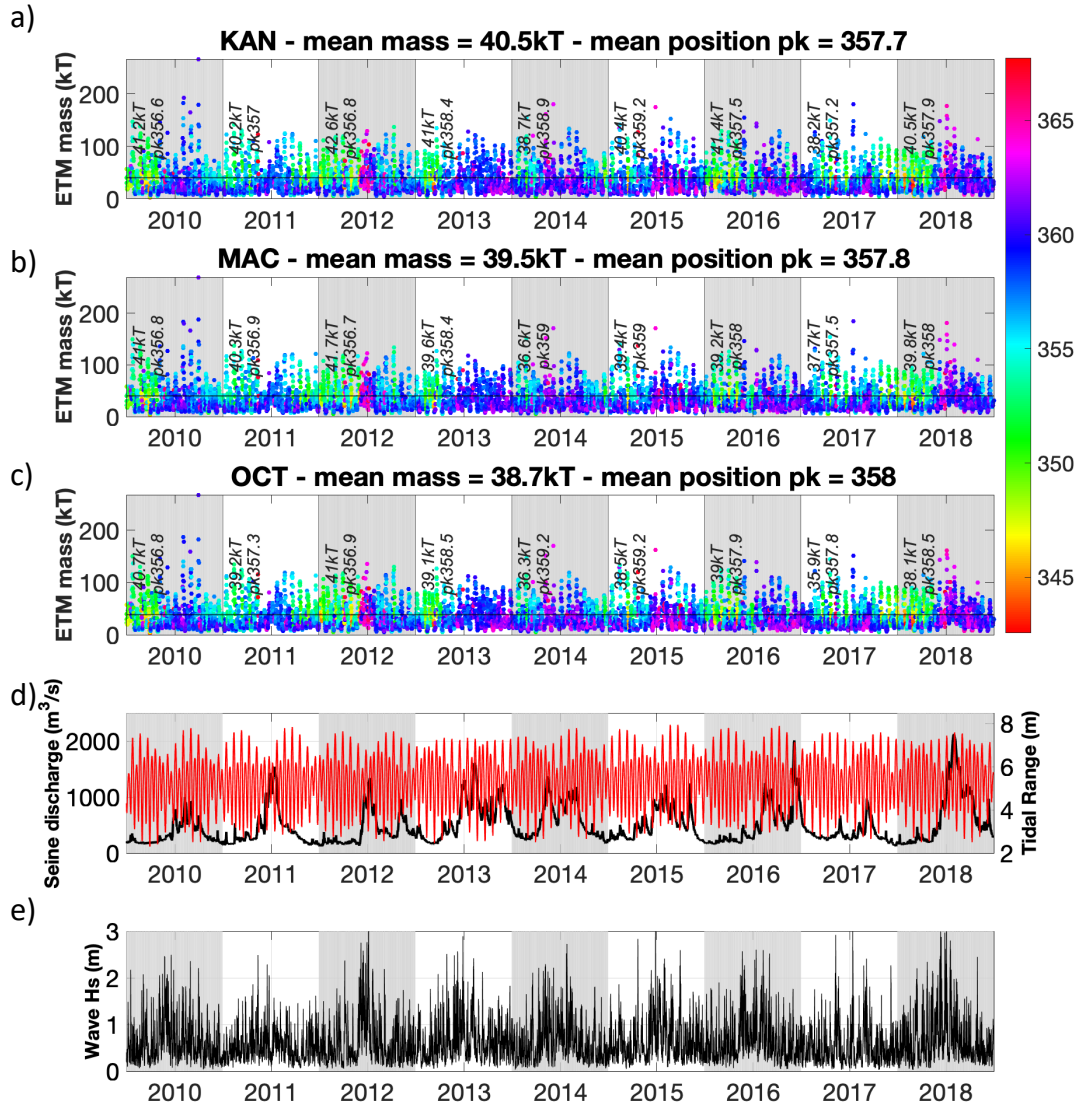


Figure V.7 : Évolution de la masse maximale par marée et de la position médiane par marée (couleur) du bouchon vaseux au regard des forçages débits, marées (d) et vagues (e) pour les scénarios Kannik (a), Machu (b) et OctevilleR (c). Pour chaque scénario la moyenne de la masse maximale par marée et la moyenne de la position médiane sur les 9 ans simulés est indiquée dans le titre de la figure. Les moyennes annuelles des masses et positions du bouchon vaseux sont indiquées pour chaque année en noir

En termes de contribution au bouchon vaseux des différentes sources sédimentaires marquées, les variations saisonnières constatées sur le cas KAN au chapitre IV, et induites par la variabilité des forçages et des dragages mise en avant au chapitre III, sont visibles pour tous les scénarios (Figure V.8). La variabilité des contributions des vases de Seine et des vases venant du large apparaît naturellement comme indépendante de la position des clapages du GPMR, et reste, pour les scénarios MAC et OCT, conforme à la description réalisée au chapitre IV pour les scénarios KAN, NOC et NOD. Les clapages effectués par le GPMH étant quasiment invariants entre ces 3 simulations, leur contribution à la masse du bouchon vaseux l'est également (la variabilité des dragages selon les scénarios d'immersions est présentée section V.3.4)

En revanche, la contribution des vases marquées par les dragages/clapages du GPMR (mud R) à la masse du bouchon vaseux, est significativement impactée par la position du site d'immersion. Dans le cas où les clapages du GPMR sont réalisés à Machu, la contribution de mud R à la masse du bouchon vaseux est très proche de celle observée lorsque les clapages sont réalisés au Kannik (7,6 % pour Machu, 8 % pour Kannik). Cette observation est cohérente avec le retour constaté des vases draguées par le GPMR vers l'estuaire, illustré sur les Figure V.4 et Figure V.5.

Lorsque les clapages du GPMR sont réalisés sur Octeville R, les vases sont dispersées vers le nord (Figure V.4 et Figure V.5) et la contribution de mud R à la masse du bouchon vaseux passe de 8 % à 1,6 %. Comme observé au chapitre IV entre KAN et NOC, il apparait que les contributions des sédiments clapés à la masse du bouchon vaseux dépassent les différences de masse totale du bouchon vaseux entre les scénarios KAN, MAC et OCT. Par exemple, entre les scénarios KAN et OCT, l'écart entre les contributions des sédiments clapés aux masses du bouchon vaseux est de l'ordre de 2,6 kt alors que les différences de masses du bouchon vaseux sont en moyenne de 1,8 kt. Ce constat rappelle la robustesse de la masse du bouchon vaseux indépendamment de la stratégie de dragage et de clapage, comme cela a été souligné dans le chapitre IV.

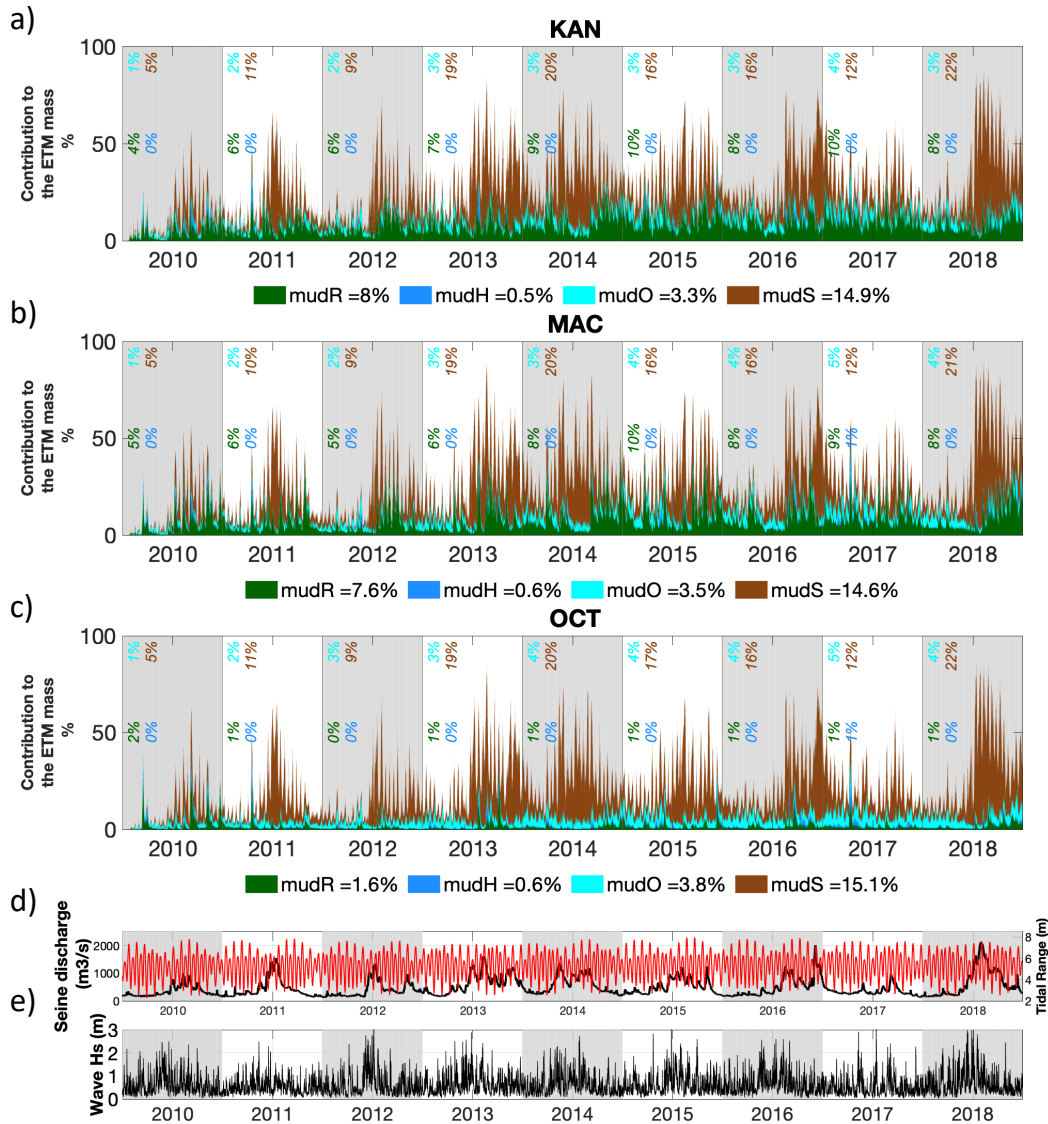


Figure V.8 Contribution des sédiments marqués à la masse du bouchon vaseux pour les scénarios Kannik (a) , Machu (b) et Octeville R (c) au regard des forçages marée/débit (d) et vagues (e). Pour chaque année hydrologique, la moyenne de la contribution de chaque vase est indiquée en italique en respectant la couleur de la légende. Sur la légende, le pourcentage représente la contribution moyenne sur les 9 ans

V.3.3 Effets sur la morphologie de l'estuaire

Au chapitre IV, il est apparu que, comparativement aux dragages, les immersions n'avaient pas un effet majeur sur la morphologie de l'embouchure (différences d'évolutions de l'ordre de 20 cm sur 9 ans), à l'exception des sites de dépôts eux-mêmes. Étant donné le fort taux de retour des sédiments vers l'estuaire observé pour les scénarios KAN et MAC (Figure V.3, V.5 et V.6), il est toutefois tentant de vérifier ce constat et de comparer les évolutions morphologiques simulées par le modèles en fin de simulation, après 9 ans de changement de site d'immersion.

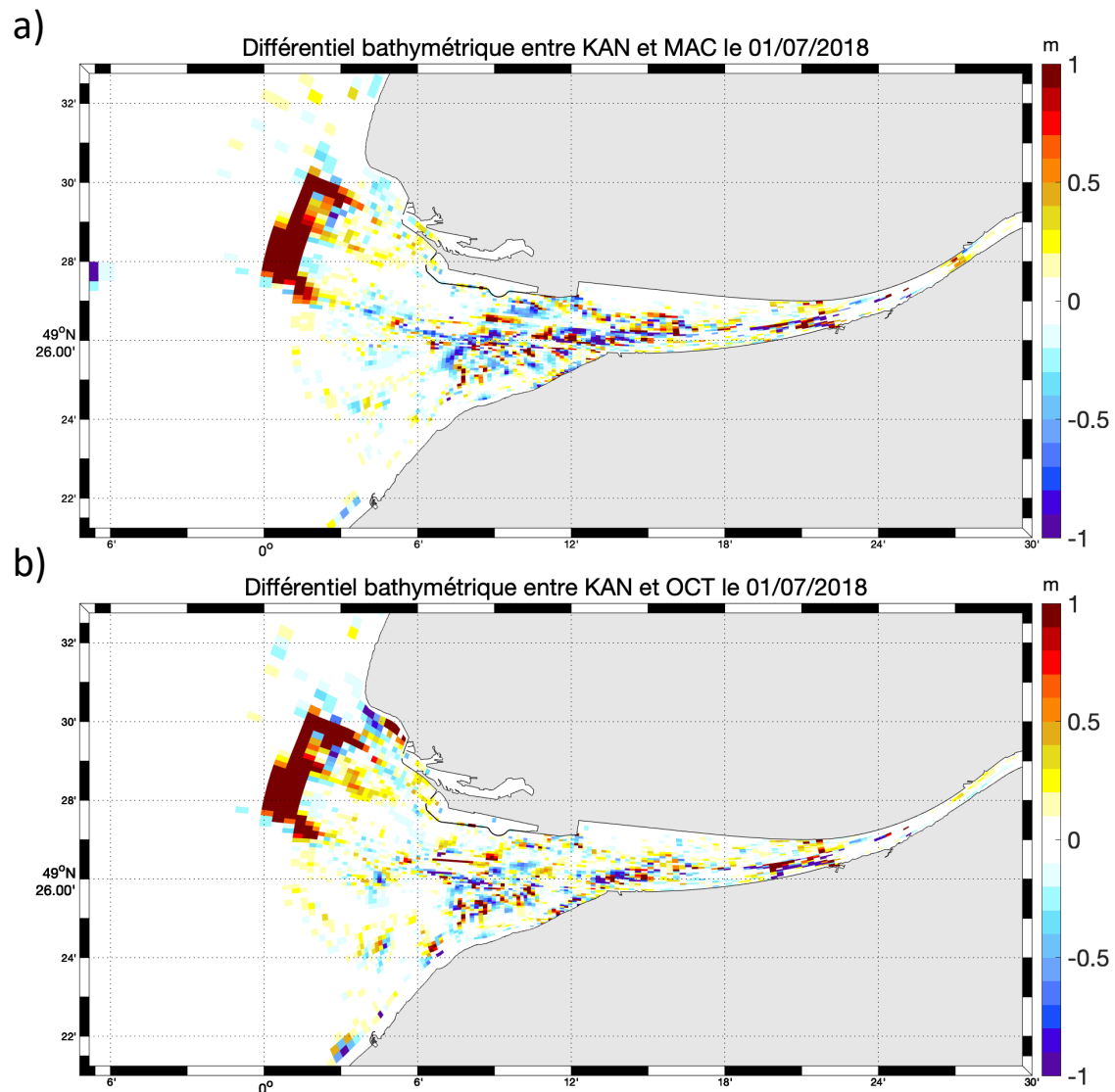


Figure V.9: Différentiels des évolutions bathymétriques sur la période 2009-2018, a) associés aux scénarios KAN et MAC (i.e. évolution KAN - évolution MAC), et b) aux scénarios KAN et OCT (i.e. évolution KAN - évolution OCT)

La Figure V.9 met en avant les différences d'évolutions morphologiques constatées après 9 ans de simulation entre les scénarios avec immersions au Kannik et à Machu d'une part, et entre les scénarios avec immersions au Kannik et à Octeville d'autre part. Les couleurs chaudes (resp. froides) témoignent d'un niveau bathymétrique plus élevé (plus de dépôt ou moins d'érosion) dans le scénario de référence KAN (resp. dans les scénarios MAC ou OCT). Ces deux figures s'avèrent être très similaires à la Figure

IV.20.a représentant les différences d'évolutions morphologiques constatées sur la même période entre les scénarios avec immersion au Kannik et sans immersions (NOC). On notera que les écarts dans la comparaison KAN / NOC (Figure IV.20) situés en fosse sud au large de la plage de Honfleur et entre les digues face à Honfleur sont encore visibles et semblent même renforcés dans le cas de la comparaison Kannik et Machu (Figure V.9.a) tandis que les différences entre KAN et OCT sont très semblables à celles entre KAN et NOC. Les différences entre scénarios sont toutefois d'un ordre de grandeur inférieures aux évolutions simulées pour chaque scénario sur la période de 9 ans, confirmant ainsi qu'à moyen terme, les clapages n'affectent pas significativement les évolutions morphologiques de l'estuaire.

Afin de vérifier la représentativité temporelle des résultats précédents obtenus en fin de simulation, les évolutions sur la période simulée des volumes de sédiment sur 5 secteurs de l'estuaire sont présentées Figure V.10. Cette figure est construite sur le modèle de la Figure III.11, en regroupant quelques secteurs pour simplifier l'interprétation. Elle démontre que, pour les trois scénarios, chaque secteur de l'estuaire suit la même tendance. Les évolutions des secteurs Amfard, Fosse Nord élargie (en incluant le banc de la Passe et la zone Méandre) et Zone endiguée, présentent toutefois des différences significatives, croissantes à partir de la moitié de la simulation. Ces différences peuvent être une répercussion indirecte de l'arrêt des immersions sur le banc du Kannik.

Une analyse plus détaillée montre des différences entre les scénarios KAN et OCT: dans le cas d'une immersion à Machu, des différences avec le scénario KAN apparaissent plus tôt (vers 2014), sous la forme d'une moindre érosion de la zone entre digues, et au contraire d'une érosion accrue du banc d'Amfard, et dans une moindre mesure de la fosse nord. Ces écarts par rapport à la référence s'estompent dans les années futures, et *in fine* les scénarios MAC et KAN se retrouvent équivalents dans la fosse nord (et à Amfard) après 9 ans. Au contraire, le scénario OCT génère une moindre érosion (diminution de l'ordre de 1 Mm³) dans le secteur entre digues, et une érosion du secteur Amfard et de la fosse nord par rapport au scénario KAN. Globalement, il semblerait que l'immersion à Machu renforcerait l'apport de sédiment dans l'estuaire (dont bénéficierait principalement la zone endiguée), tandis que l'immersion à Octeville aurait le même effet dans la zone endiguée mais s'accompagnerait en plus d'une légère érosion au nord (zones Amfard + fosse nord élargie) (également de l'ordre de 1 Mm³),

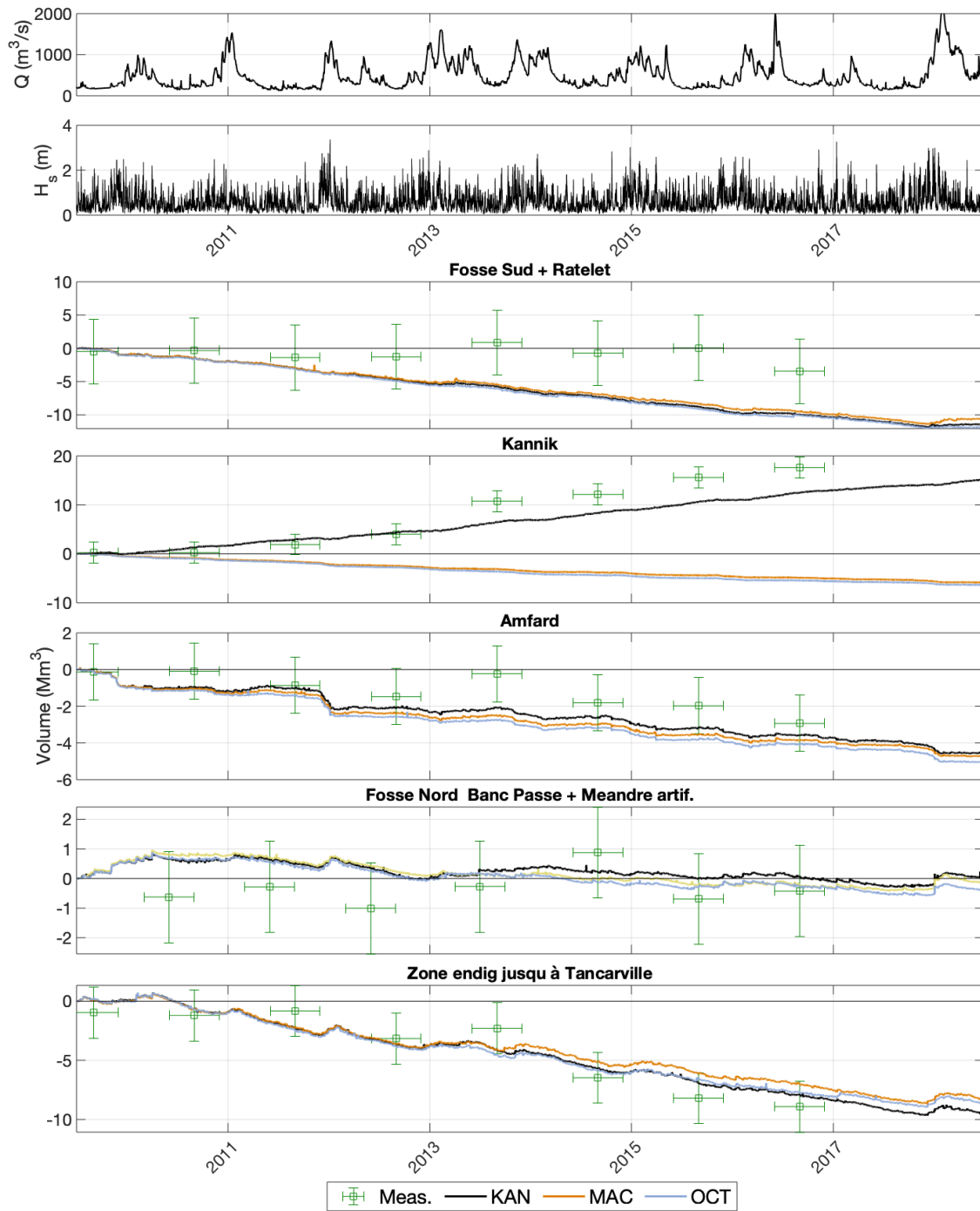


Figure V.10 : Évolution des volumes de sédiments pour 5 secteurs de l'estuaire et pour les 3 configurations KAN, MAC, OCT, en regard des évolutions des forçages (débit et vagues) sur la période 2009-2018. Les croix vertes représentent les évolutions des cubatures mesurées par le GPMR et les incertitudes associées. Les secteurs indiqués dans le titre indiquent les regroupements effectués sur la base des secteurs présentés sur la figure III.10

Toujours sur la base des indicateurs développés dans les chapitres III et IV, les Figure V.11 a et b illustrent les effets de l'utilisation des sites d'immersion du Kannik, de Machu et d'Octeville R sur les surfaces hypsométriques de l'estuaire interne et de la zone fosse nord (cf. IV.6). Dans l'ensemble ces deux figures montrent que la position des immersions réalisées par le GPMR n'ont que très peu d'effets sur l'hypsométrie de l'estuaire. En fosse nord, les différences entre les 3 scénarios restent faibles, inférieures aux évolutions constatées sur la période simulée. Néanmoins, il est intéressant de noter que

les répartitions hypsométriques des scénarios MAC, et en particulier OCT, apparaissent être très proche de celle du scénario NOC.

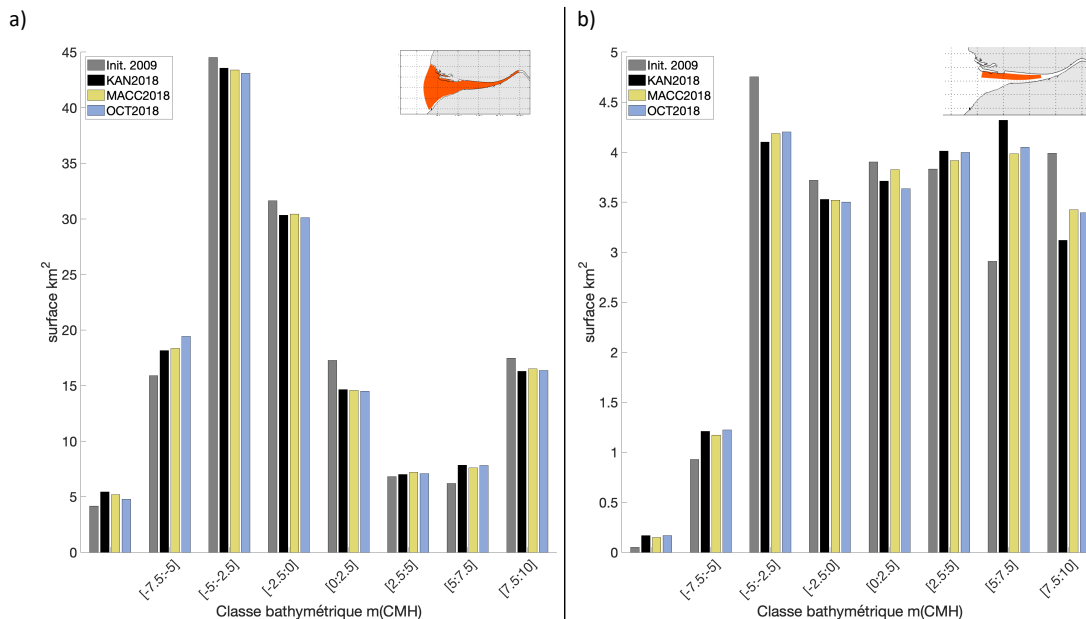


Figure V.11 : Évolutions des surfaces hypsométriques de l'estuaire interne (a) et de la fosse nord (b) modélisées après 9 ans pour les scénarios KAN (noir), MAC (jaune) et OCT (bleu). Les surfaces hypsométriques initiales sont rappelées en gris. Les emprises d'intégration des surfaces sont indiquées par les vignettes

V.3.4 Effets de la position des clapages sur les quantités draguées

Le chapitre IV a permis de montrer que le retour des sédiments clapés par le GPMR au Kannik et par le GPMH à Octeville, vers les zones draguées, contribuait de manière non négligeable aux dragages d'entretien. L'application de la méthodologie développée au IV.4.5 permet de quantifier l'effet d'un changement de site d'immersion sur les masses draguées. Étant donné les enjeux économiques et écologiques associés aux dragages et aux immersions associées, et le récent changement de site d'immersion du GPMR, cette quantification constitue une information intéressante pour évaluer les différents sites potentiels d'immersion de sédiments dans l'estuaire de la Seine.

La Figure V.12 rappelle les quantités draguées lorsque les immersions du GPMR sont réalisées sur le site du Kannik et celles du GPMH à Octeville (panneau a). Les panneaux b et c montrent les effets sur ces quantités draguées d'un changement de Kannik vers Machu (b) et de Kannik vers Octeville R (c). Chacune des zones de dragage présente une sensibilité différente aux changements de sites d'immersions (Machu ou Octeville R). En lien avec les différences de dispersion entre sables et vases illustrées Figure V.3 et Figure V.4, ces différences ne sont pas les mêmes pour les quantités de sables et de vases draguées.

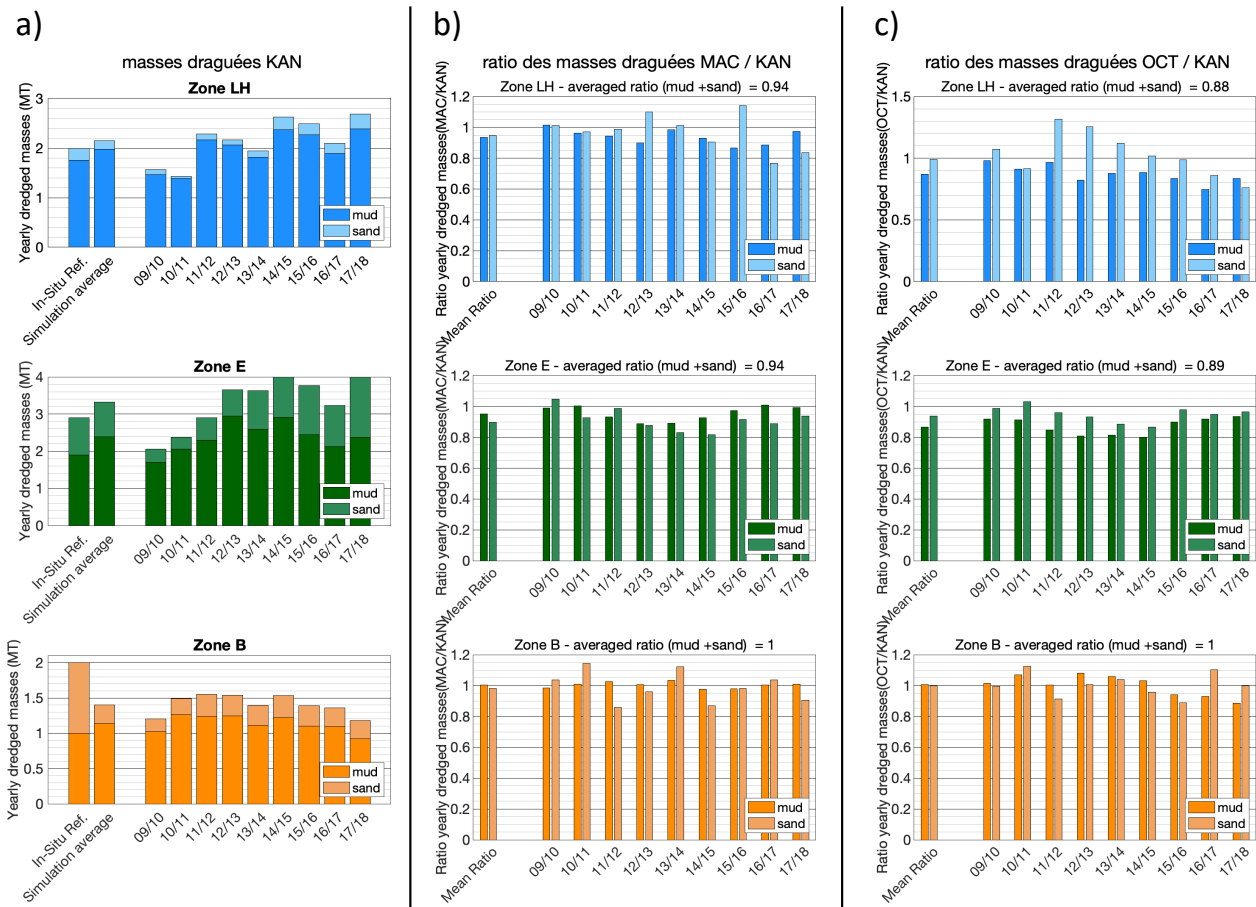


Figure V.12 : a) : Évolution annuelle des dragages simulés pour le scénario avec immersion au Kannik pour les trois sites (Le Havre en bleu , Engainement en vert et Brèche en orang, idem Figure IV.23.a). Les valeurs de référence in-situ sont rappelées à gauche sur chaque graphe (In-situ réf.), suivies des simulations moyennes sur la période juillet 2009 / juin 2018, puis des valeurs annuelles. Les quantités de sables (vases) draguées sont indiquées par des couleurs pâles (saturées). Les panneaux b et c) présentent les ratio entre les masses de sables et de vases draguées dans les scénarios MAC (b) ou OCT (c) et celles du scénario KAN (b : MAC/KAN ; c : OCT/KAN). Les ratios moyens sur la période sont indiqués en premier, avant les ratios annuels. Le ratio moyen du total sable+vase est indiqué dans le titre

L'utilisation du site de Machu à la place de Kannik engendre une diminution moyenne sur la période simulée de 6 % des dragages sur les zones de dragages du GPMH et de l'engainement (Figure V.12.b). Temporellement, la diminution ne présente pas de tendance particulière pour le site de l'Engainement. En revanche, une diminution au cours des 9 années simulées peut être observée sur les zones du Havre . Pour le secteur du Havre, les diminutions des quantités de sables et vases dragués sont en moyenne équivalentes (à 1 % près). Sur le site de l'Engainement, la diminution est plus marquée pour les sables (-10 %) que pour les vases (-4 %). Étant donné la nature des sédiments dragués sur ces deux sites, et la différence de dispersion des vases et des sables, ces différences de sensibilités sont cohérentes. Les dragages simulés sur le site de la Brèche sont légèrement affectés par les immersions, mais en moyenne sur la période simulée, les masses draguées sont équivalentes, que les immersions soient réalisées sur les sites de Kannik ou Machu. Il convient toutefois de rappeler les limites du modèle vis-à-vis de la simulation des dragages sur ce secteur (cf. Chapitre III).

Lorsque les immersions des dragages du GPMR sont réalisées à Octeville R au lieu de l'être au Kannik, comme les cartes de dispersions le laissaient entrevoir, le retour des sédiments dragués vers les zones draguées est très faible et les dragages diminuent. Comme dans le cas où les immersions sont réalisées à Machu, une tendance à la diminution des dragages est observée au Havre, tandis que sur les autres zones aucune tendance n'apparaît. La diminution simulée pour les dragages est en moyenne de 11% pour l'Engainement (Figure V.12.c). Au Havre, où les dragages sont composés à 90 % de vases, la

diminution est légèrement plus marquée pour ces dernières (-12 %). Étant donné la faible quantité de sables dragués au GPMH, la représentation relative par rapport aux quantités draguées dans le cas KAN amplifie des différences (très visibles de 2011 à 2014) entre des quantités très faibles, et donc peu significatives. En moyenne sur la période, les dragages de sables au GPMH ne diminuent que de 1%. A l'engainement, les dragages de vases diminuent également plus que ceux de sables (respectivement -13 % et -6 %).

La Figure V.13 présente les évolutions sur la période simulée des dragages des différentes variables sédimentaires tracées dans le modèle pour les scénarios avec immersions sur les sites de Kannik, Machu et Octeville R. Globalement, dans les deux scénarios MAC et OCT, les contributions des sédiments déjà dragués puis clapés par le port de Rouen (mud R, sand R) aux dragages des trois zones diminuent comparativement à KAN. Les contributions aux dragages des sédiments clapés par le GPMH n'évoluent guère.

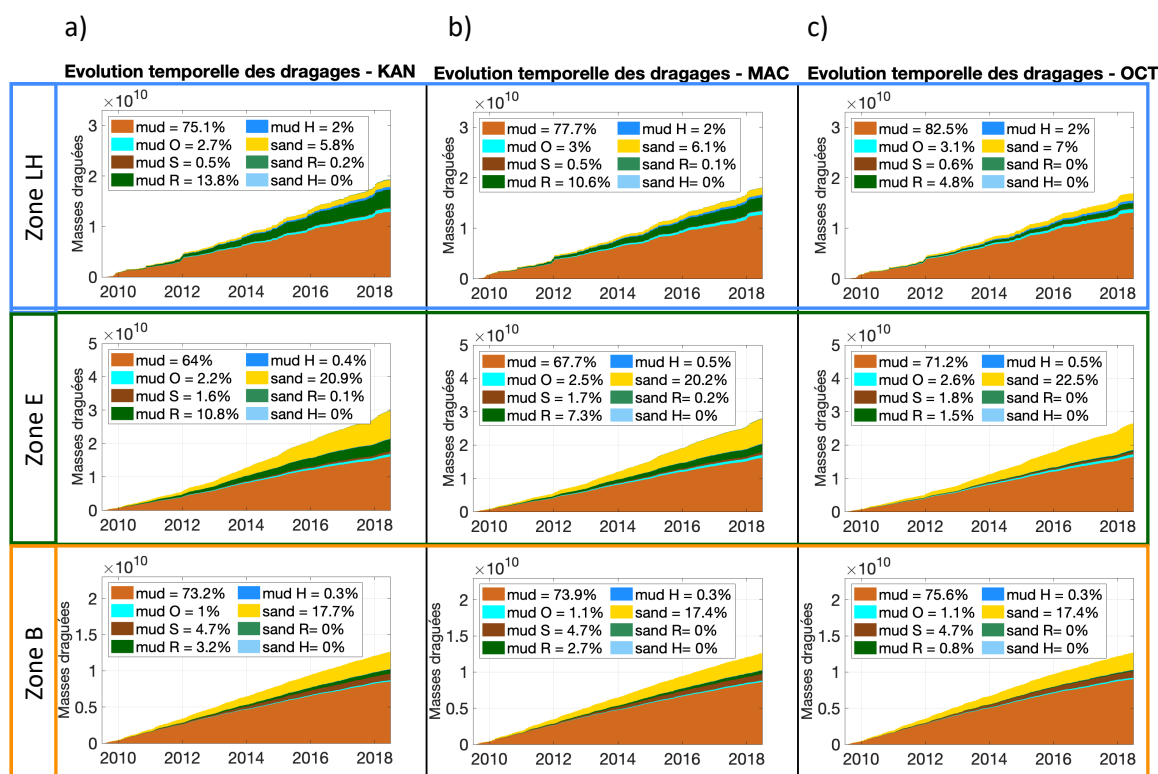


Figure V.13 : Évolution temporelle des contributions des différentes sources sédimentaires marquées aux dragages dans les bassins et chenaux d'accès du port du Havre (Zone LH), à l'Engainement (Zone E) et dans le secteur de la Brèche (Zone B) sur la période juillet 2009- juillet 2018 pour les trois scénarios KAN, MAC et OCT. Dans la légende des couleurs, les moyennes sur la période des pourcentages de chaque classe par rapport à la masse totale draguée (sable + vase) sont indiqués dans la légende

La diminution du retour des sédiments dragués par le port de Rouen dans les scénarios MAC et surtout OCT est visible sur les trois zones de dragage. Lorsque les immersions du GPMR sont réalisées au Kannik, en moyenne sur la période 14 % des sédiments dragués par le GPMH proviennent du Kannik (13,8 % de mud R), avec l'exploitation de Machu ce taux est de 10,7% (10,6% de mud R), et chute à 4,8 % si les immersions étaient réalisées à Octeville R. A l'Engainement, les évolutions des teneurs en sédiments marqués Rouen sont du même ordre de grandeur : 10,9% de sédiments dragués en moyenne sur la période avec les immersions au Kannik (essentiellement mud R), ramenés à 7,5 % avec immersion à Machu, et à 1,5 % avec immersion à Octeville R. Dans ce dernier cas, même les dragages de vases clapées par le GPMR sont fortement réduits à la Brèche.

Dans l'ensemble les taux de retour sont relativement importants pour les sites de Kannik et Machu, comparativement à Octeville où la dispersion est principalement dirigée vers le nord. La Figure V.3 tend à montrer qu'au bout des 9 ans, le retour des sables en provenance de Machu n'a pas atteint son maximum : on peut donc raisonnablement penser que le taux de retour des sables clapés à Machu risque d'augmenter sur une échelle temporelle plus longue.

A l'échelle de toutes les zones de dragages et de tous les clapages, et en reprenant la méthode décrite au IV.7.1.1 pour réaliser la Figure IV.30.b, il est possible de quantifier et d'extrapoler l'évolution temporelle du pourcentage de vase déjà draguée qui serait re-draguée au minimum une fois pour les trois scénarios KAN, MAC et OCT. Les clapages du GPMH étant constants entre les trois scénarios, les variations de ce pourcentage d'un scénario à l'autre sont uniquement liées aux effets du changement de site de clapage du GPMR. La Figure V.14 montre qu'après 20 ans d'immersion :

- i. au Kannik, près de 25% des sédiments dragués auraient déjà été dragués une fois,
- ii. à Machu, près de 18% des sédiments dragués auraient déjà été dragués une fois,
- iii. à Octeville R, près de 6% des sédiments dragués auraient déjà été dragués une fois,

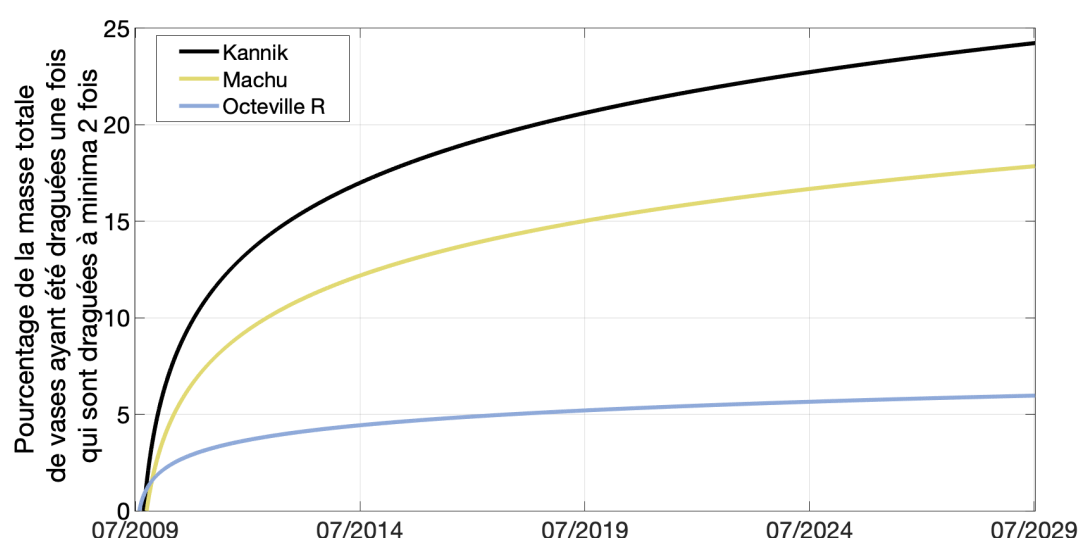


Figure V.14 : Évolution du pourcentage de la masse totale de vases marquées (donc déjà draguée puis clapée par le GPMR et/ou le GPMH) présente dans les masses de vases draguées. Calcul réalisé sur 3 scénarios : immersion des dragages du GPMR au Kannik (noir), Machu (jaune) et Octeville R (bleu) ; l'immersion des dragages du GPMH reste à Octeville

V.3.5 Flux sédimentaires en suspension

Au chapitre IV, la quantification des flux sédimentaires en suspension à l'embouchure de l'estuaire a montré que les dragages d'entretien constituaient des flux sédimentaires anthropiques comparables en intensité aux flux sédimentaires naturels. En particulier, cette quantifications des flux a montré que les dragages exportent vers la Baie de Seine une quantité de sédiment comparable à celle qui rentre naturellement au niveau de la frontière "embouchure". De plus, lorsque les immersions sont réalisées au Kannik, les résultats ont mis en avant que 50 % des vases entrant dans l'estuaire auraient déjà été dragués au minimum une fois.

Le site du Kannik est relativement stable et situé à proximité de l'estuaire interne (Figure IV.28). Étant donné le flux sédimentaire associé aux immersions du GPMR (~ 6 Mt sur l'année 2018), le déplacement des immersions vers les sites de Machu ou potentiellement Octeville R, ne devrait pas être sans répercussion sur les flux sédimentaires estuariens.

L'application de la méthodologie développée pour caractériser les effets des dragages et immersions au Kannik au IV.5.2 permet d'estimer ces répercussions. Étant donné la représentativité de l'année 2017-2018 illustrée section IV.5.2.1, cette analyse n'a été réalisée que sur cette année hydrologique. Le Tableau V-3, présente les flux en suspension calculés pour les simulations avec immersion au Kannik (KAN), Machu (MAC) ou Octeville R (OCT) au niveau des sections définies Figure IV.28. Ce tableau construit sur le modèle du Tableau IV.4 propose ici une quantification distincte des flux en suspension de vases draguées par Rouen et le Havre, afin de caractériser, spécifiquement les effets des immersions du GPMR. Les flux de vase de Seine et de vase venant du large (offshore) ne sont pas significativement impactés par la position des sites d'immersions.

Tableau V-3 : Flux de sédiments en suspension calculés pendant l'année hydrologique 2017/2018 au niveau de différentes sections (Figure IV.28) et quantités draguées dans les trois zones de dragage, sur la même période, pour différents regroupements des classes sédimentaires modélisées dans le cadre des scénarios KAN, MAC et OCT. Les flux sont comptés positivement vers le nord et vers l'est. La classe "vases" correspond aux vases présentes à l'initialisation du modèle

			Sables	Sables clapés	Vases	Vases R	Vases H	Vases Seine	Vases offshore	Sables totaux	Vases totales
Flux en suspension (kt)	Offshore Ouest	KAN	2695,7	0,0	5191,6	51,1	327,1	4,6	2080,5	2695,7	7654,9
		MAC	2596,7	255,9	5290,9	3598,9	285,2	3,9	2079,1	2852,7	11258,1
		OCT	2665,1	0,0	5243,9	639,2	179,5	3,5	2067,4	2665,1	8133,5
	Offshore Nord	KAN	2168,1	196,1	5481,6	1260,7	2539,5	135,5	1704,7	2364,3	11122,1
		MAC	2109,0	238,9	5554,4	2359,5	2348,4	122,4	1700,5	2348,0	12085,2
		OCT	1523,6	1160,4	5555,8	3265,7	1991,7	134,4	1695,0	2683,9	12642,6
	Embouchure	KAN	2133,0	160,7	1217,2	1213,6	178,3	-142,7	314,2	2293,6	2780,6
		MAC	2163,5	111,1	1628,5	1121,7	155,3	-121,4	350,7	2274,7	3134,8
		OCT	2156,0	0,0	1510,0	308,0	162,0	-132,0	346,0	2156,0	2194,0
	Fosse Sud	KAN	1061,7	0,5	3134,8	263,6	19,5	181,1	257,6	1062,2	3856,6
		MAC	1072,6	8,3	3181,9	414,7	25,8	165,2	272,9	1080,9	4060,5
		OCT	1050,0	0,0	3310,0	46,4	28,7	181,0	272,0	1050,0	3838,1
	Chenal	KAN	-745,1	-0,5	-4282,2	-311,3	-28,0	-677,5	-233,4	-745,5	-5532,4
		MAC	-635,2	-1,3	-4037,4	-369,8	-30,4	-633,2	-240,3	-636,5	-5311,0
		OCT	-791,0	0,0	-4540,0	-68,7	-36,1	-688,0	-253,0	-791,0	-5585,8
	Fosse Nord	KAN	334,4	30,4	219,6	176,6	26,7	-12,1	24,6	364,8	435,4
		MAC	345,9	10,1	231,3	107,8	23,4	-13,8	24,9	356,0	373,7
		OCT	351,4	0,0	410,0	53,7	25,4	-1,7	36,8	351,4	524,2
	Fatouville	KAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		MAC	-284,9	0,3	-305,0	-2,1	-0,1	-821,6	0,1	-284,6	-1128,7
		OCT	-504,6	0,1	-261,8	0,4	-0,3	-834,9	0,5	-504,5	-1096,1
	Tancarville	KAN	-335,0	0,0	-284,0	0,1	-0,2	-832,0	0,3	-335,0	-1115,9
		KAN	-0,2	0,0	-25,1	-0,3	0,0	-824,8	0,2	-0,2	-849,9
		MAC	0,0	0,0	-54,7	-1,0	-0,2	-841,2	-0,3	0,0	-897,4
	OCT	-0,1	0,0	-67,2	-0,3	-0,2	-839,0	-0,6	-0,1	-907,3	
Dragage (kt)			Sables	Sables clapés	Vases	Vases R	Vases H	Vases Seine	Vases offshore	Sables totaux	Vases totales
	Zone LH	KAN	251,6	48,6	1673,5	493,2	75,9	41,3	108,0	300,1	2391,8
		MAC	231,6	19,5	1754,5	337,1	80,7	37,2	118,3	251,1	2327,7
		OCT	228,3	0,0	1680,8	112,4	66,0	32,9	110,4	228,3	2002,5
	Zone E	KAN	1590,4	29,0	1633,9	391,5	19,6	226,2	101,2	1619,4	2372,4
		MAC	1483,6	36,8	1694,3	304,3	28,7	211,8	115,0	1520,4	2354,1
		OCT	1563,9	0,0	1805,4	52,4	18,6	226,0	114,8	1563,9	2217,2
	Zone B	KAN	1041,4	1,9	748,1	122,6	23,6	61,4	5,7	1043,3	961,4
		MAC	862,5	9,8	777,7	136,7	29,1	57,0	6,8	872,3	1007,2
		OCT	961,4	0,0	685,5	114,2	23,8	10,7	4,1	961,4	838,3
	Total	KAN	2883,4	79,4	4055,4	1007,4	119,1	328,9	214,9	2962,8	5725,6
		MAC	2577,7	66,1	4226,5	778,2	138,4	305,9	240,1	2643,8	5689,0
OCT		2753,6	0,0	4171,7	279,1	108,4	269,7	229,3	2753,6	5058,1	

Au niveau de la frontière Offshore Ouest, située à l'Est immédiat du site de Machu, les flux de sables (256 kt) et de vases (3598,9 kt) marqués en provenance du Machu vers la zone de l'estuaire externe sont importants comparés aux flux naturels vers l'estuaire de 10 Mt (sable + vase). L'utilisation du site d'Octeville R n'influence pas significativement les flux à cette frontière.

A la frontière Offshore Nord, située au nord immédiat des sites Octeville et Octeville R, les flux de sables et vases sont modifiés par les potentiels changements de site d'immersions. Comparativement au cas KAN, une augmentation du flux de vase est observée avec une immersion à Machu ; pour une immersion à Octeville R, cette augmentation est encore plus forte et s'applique aussi aux sables. Ces augmentations du flux de vase sont induites directement par les flux de sédiments clapés. Dans le cas OCT, il est intéressant de noter que l'augmentation des flux de sables marqués s'accompagne d'une diminution forte du flux de sables préalablement en place, de telle sorte que le flux total de sable,

probablement lié à la capacité de transport du système, n'est pas trop augmenté. Au final, le flux total des sédiments dragués vers le nord, vers la Manche, est très important sur l'année 2017/2018 : 42% du flux total dans le cas OCT, 34% dans le cas MAC et 30% avec Kannik.

A l'embouchure, les effets des immersions à Machu et Octeville R sont contrastés par rapport aux effets constatés lorsque les immersions sont réalisées au Kannik. Dans le cas Machu, une augmentation du flux de vases de 12 % est observée, alors que le flux de sables ne varie pas significativement. Il est intéressant de noter que cette augmentation ne provient pas d'une augmentation du flux de sédiments préalablement clapés mais de celle du flux de sédiments "naturels" (vases initialement sur le fond, principalement). Cette augmentation pourrait résulter des conséquences sur la morphologie de la zone de l'absence d'immersions sur le site du Kannik. En effet la Figure V.9 montre que l'immersion des sédiments sur le site du Kannik forme une singularité morphologique conséquente, environ 1 m de haut sur près de 3 km de long, et orientée nord-sud (absente des cas MAC et OCT). Cette "barre" de sédiment clapée peut alors potentiellement limiter le courant de flot, et le flux sédimentaire associé, à l'entrée de l'estuaire comparativement aux cas MAC et OCT.

Au niveau de la section Fosse Sud, les variations des flux induites par les changements de sites d'immersions ont des répercussions principalement sur les flux vaseux, même si un flux de 8 kt de sables dragués apparaît uniquement dans le cas Machu. Concernant les vases, dans le cas Octeville, la diminution prévisible du flux de vases dragués par le GPMR s'accompagne d'une augmentation du flux naturel qui la compense presque. En revanche lorsque les immersions sont réalisées à Machu, le flux de vases préalablement clapés par le GPMR augmente de 56 % (+ 151 kt/an), mais le flux de vase initialement dans les fonds sédimentaires augmente aussi (+ 47 kt/an). Une telle augmentation du flux "naturel" était aussi observée dans la simulation NOC (tableau IV.4).

Au niveau du chenal de navigation, globalement peu de différences sont observées entre les cas avec immersion au Kannik ou à Octeville. La diminution du flux de vases clapés par Rouen et compensée par l'augmentation du flux de vases non clapés (initialement dans le fond sédimentaire), décrite en fosse sud, est également constatée entre les digues. L'idée d'une capacité à transporter une quantité donnée de MES pourrait être évoquée et discutée. Lorsque les immersions sont réalisées à Machu, les flux totaux de sables et de vases dirigés vers l'Ouest sont plus faibles que dans les cas KAN et OCT. Cette variation est toutefois difficile à expliquer : il s'agit peut-être de l'effet combiné de la morphologie de la zone Kannik sans immersion et de l'augmentation des flux en fosse sud observée simultanément.

Au niveau de la Fosse Nord, les effets sont une nouvelle fois contrastés. Comparativement à KAN, une diminution des flux vers l'est est observée dans le cas MAC ; alors qu'une augmentation conséquente des flux vaseux est observée dans le cas OCT (+20 %). Cette dernière est en fait la combinaison d'une diminution du flux de vases dragués par Rouen et d'un doublement du flux de vases "naturelles" (non préalablement clapés). Ce constat de compensation de la diminution du flux de vase draguée par une augmentation du flux de vases naturelles est également constaté dans le cas MAC mais dans une moindre mesure.

A Fatouville, les variations sont faibles et surprenantes : dans les cas MAC et OCT une augmentation du flux de sables et une diminution des flux vaseux sont constatées comparativement au scénario KAN. A Tancarville, des variations sont également observées : les flux vaseux dirigés vers l'aval augmentent d'environ 6 % dans les deux cas MAC et OCT. Ces différences, indépendantes des flux de matériaux préalablement clapés résultent probablement des évolutions des flux cités précédemment et des réajustements morphologiques constatés (Figure V.9).

V.3.6 Bilans sédimentaires

La mise en regard des flux en suspension décrits précédemment avec les masses draguées présentées dans le Tableau V-3 permet de caractériser les effets des immersions (au Kannik, à Machu ou à Octeville) sur les bilans de l'estuaire interne et de l'estuaire externe (emprises indiquées Figure IV. 28). Ces bilans sédimentaires sont établis sur l'année hydrologique 2017/2018 après 8 années de simulation dans chaque cas, et ignorent les flux de sables charriés, *a priori* minoritaires. Les différences constatées dans ces bilans (Tableau V-4) résultent donc à la fois des effets des immersions sur l'année étudiée

mais également des effets indirects induits par l'utilisation des différents sites d'immersions pendant les 8 premières années de la simulation, en particulier les potentiels effets sur la morphologie de l'estuaire et l'hydrodynamisme associé.

Tableau V-4 : Bilans sédimentaires (en kt) associés aux scénarios KAN, NOC, NOD, MAC et OCT établis à partir des flux sédimentaires en suspension et des dragages sur l'année 2017/2018 pour l'estuaire externe et l'estuaire interne (cf. emprises Figure IV.28). Ces bilans ne tiennent pas compte des flux de sables charriés, a priori minoritaires

		Estuaire externe		Estuaire interne	
		Sables totaux	Vases totales	Sables totaux	Vases totales
Bilan (kt)	KAN	1000,7	-522,2	-669,0	-2095,2
	NOC	-1754,1	-1821,2	-520,4	-2092,6
	NOD	-1987,8	-1869,6	2415,7	2106,4
	MAC	-1770	-3843	-369	-1657
	OCT	579	-1514	-597	-1957

La zone de l'estuaire externe reçoit les immersions de sédiments dragués dans le cas des immersions au Kannik et à Octeville ; le site de Machu est situé à l'extérieur de cette zone. Cette délimitation discutable, biaise la comparaison du bilan sédimentaire du scénario MAC avec les autres. Toutefois il est évident que déplacer les immersions hors de cette zone impacte son bilan sédimentaire : contrairement au cas KAN et OCT, l'ensemble des sédiments restant sur le site de Machu n'alimente pas le bilan sédimentaire de l'estuaire externe. Lorsque les immersions sont réalisés à Machu, le bilan sédimentaire de l'estuaire externe est alors déficitaire (-5,6Mt) alors qu'il est excédentaire dans le cas Kannik (0,48Mt). Pour le cas Octeville, la comparaison est également discutable en raison de la proximité de la frontière offshore nord avec les sites d'Octeville. Néanmoins, le fort taux de dispersion vers le nord des sites d'Octeville sont à l'origine d'un déficit plus marqué sur la zone estuaire externe, lorsque les immersions sont réalisées sur ce site. Comparativement au Kannik, l'accumulation de sable est divisée par 2, et le déficit de vases multiplié par 3.

L'estuaire interne est le siège des dragages, les différences de bilan sédimentaire constatées sur ce site résultent conjointement des changements des flux sédimentaires et des dragages induits par le changement de site d'immersion du GPMR. Dans le cas où les sédiments sont immergés à Machu ou à Octeville, les bilans sédimentaires apparaissent moins déficitaire que dans le cas Kannik. Dans le cas Machu les différences sont relativement nettes : différentiel de +300 kt pour les sables (*i.e.* perte de sable divisée par 2) et de +438 kt pour les vases (*i.e.* perte de 2,1 Mt de vase ramenée à 1,7 Mt), comparativement au cas KAN. Ceci peut s'expliquer pour les sables par la diminution de la masse de sables dragués (tableau V-3), et pour les vases par l'augmentation du flux de vase entrant à l'embouchure et la diminution des dragages de vase. Dans le cas où les sédiments sont immergés à Octeville, en lien avec les variations des dragages et des flux, la différence de bilan sédimentaire de l'estuaire interne est moindre, avec un déficit réduit de 72 kt pour les sables et 138 kt pour les vases.

La Figure V.15 propose une synthèse de ces relations entre flux sédimentaires, dragages, et bilans sédimentaires associés. Les bilans sédimentaires pour les sous-secteurs de l'estuaire interne (emprises précisées Figure IV.28) sont représentés. Cette représentation met en avant le rôle des immersions dans le bilan sédimentaire de l'estuaire externe, avec en particulier le déficit important constaté dans le cas Machu en raison de la position du site d'immersion. Le détail des bilans sédimentaires de l'estuaire montre que les différents secteurs sont impactés, plus ou moins selon les scénarios et la fraction sédimentaire considérés. On notera en particulier une évolution assez franche du bilan sédimentaire sableux du secteur intermédiaire qui apparaît comme excédentaire dans le cas Machu alors qu'il est déficitaire dans les deux autres scénarios.

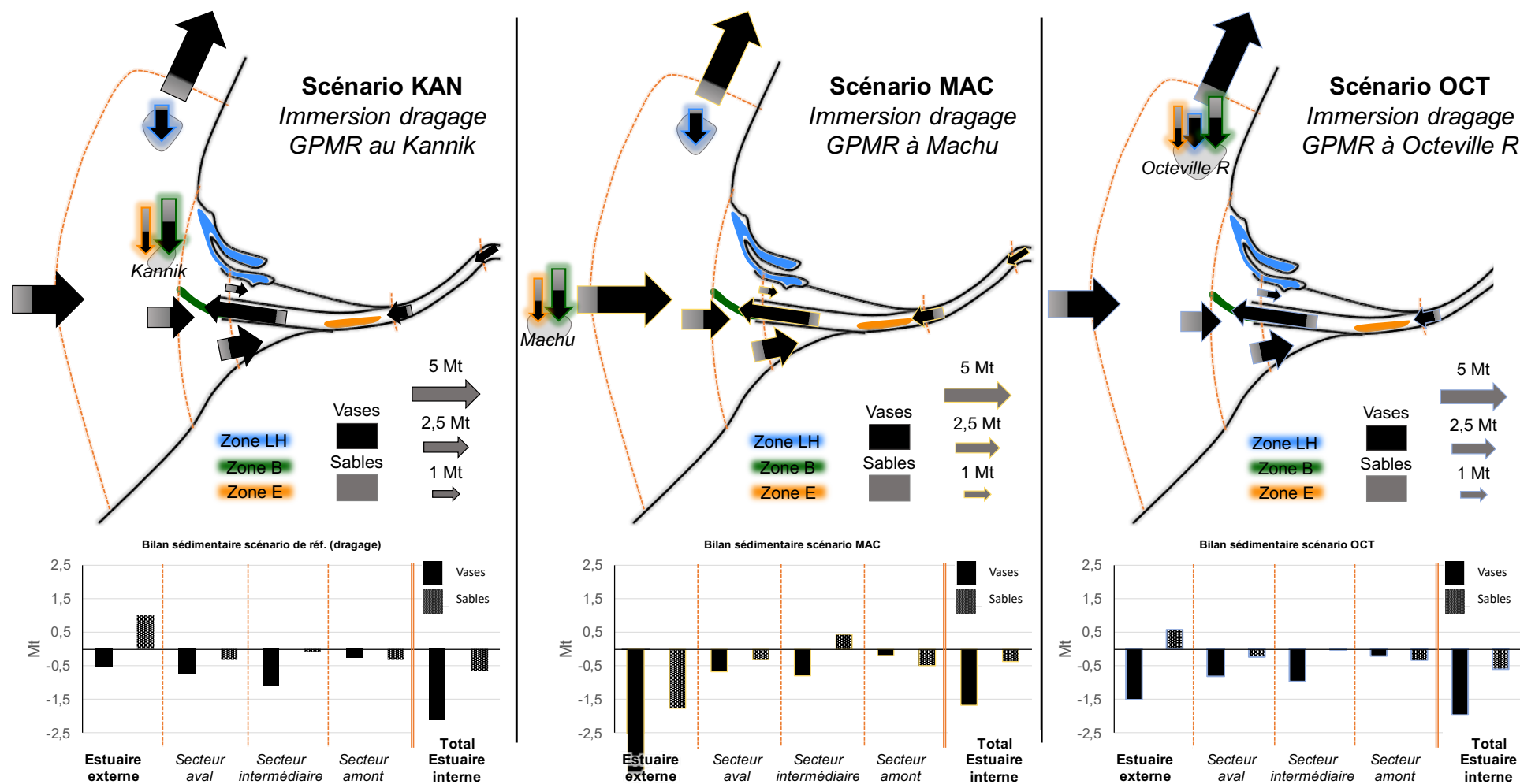


Figure V.15: Synthèse des flux de sédiments en suspension et dragages modélisés sur l'année hydrologique 2017/2018 (haut) et bilans sédimentaires de l'estuaire (bas) pour les scénarios avec immersion des sédiments dragués par le GPMR au Kannik (KAN) (gauche), à Machu (milieu) ou à Octeville R (droite). Les parties noires et grises des flèches correspondent respectivement aux proportions de vases et de sables dans les flux en suspension considérés. Les flèches entourées en bleu, vert et orange correspondent aux immersions des sédiments dragués respectivement dans les zones du port du Havre, à l'Engainement et à la Brèche. Les zones de dragage sont représentées en utilisant les mêmes couleurs. En bas, les bilans sédimentaires déduits de ces flux en suspension sont représentés en distinguant vases (noir) et sables (hachurés)

V.4 Synthèse et discussion

Le modèle MARS3D-MUSTANG de l'estuaire de la Seine présenté et utilisé aux chapitres III et IV a été utilisé pour simuler des scénarios réalistes de changement dans les pratiques de dragages des ports, et en particulier du GPMR. Deux scénarios ont ainsi été paramétrés, un scénario avec immersion sur le site de Machu et l'autre au voisinage du site d'immersion du GPMH, Octeville R.

La dynamique de ces sites d'immersion alternatifs à celui du Kannik a été évaluée et comparée aux données disponibles dans le cas Machu, que le port de Rouen a commencé d'exploiter en 2017. Même si l'expérience du port de Rouen est en encore limitée vis-à-vis de la dynamique à moyen long terme du site de Machu, nos résultats semblent sous-estimer la stabilité du site. Cette sous-estimation s'explique peut-être par les simplifications que nous avons opérées dans la gestion des immersions comparativement à la réalité. Dans le modèle, les sédiments sont répartis sur une surface très grande comparée à la réalité, favorisant ainsi la dispersion des sédiments les plus mobiles. Ce paramétrage est toutefois strictement identique à celui utilisé pour simuler les immersions sur les autres sites, ce qui facilite les comparaisons inter-scénarios. Numériquement, plusieurs pistes sont envisageables pour améliorer la validation du modèle sur ce paramètre : par exemple une diminution de la surface et de la hauteur d'eau considérées pour la dilution des sédiments dragués. Globalement, cette sous-estimation des stabilités sur Machu engendre dans nos résultats une potentielle surestimation des flux de vases marquées Rouen.

La méthode de traçage numérique décrite section IV.2.2 a été utilisée pour quantifier la dynamique des sédiments clapés, et en particulier quantifier leur retour dans l'estuaire et les flux exportés vers le milieu marin. La comparaison des flux de sédiments marqués aux frontières offshore selon les différents scénarios, avec et sans dragage et selon différentes stratégies de gestion des sédiments dragués, permet en particulier de quantifier la contribution des dragages et des sédiments dragués aux flux exportés.

Comme cela a été montré dans le chapitre IV, à l'échelle des 9 ans simulés, la position et les conditions hydrodynamiques au voisinage des sites d'immersion ont des effets sur la dispersion des sédiments.

Les flux de la baie de Seine vers l'estuaire externe sont maximaux avec l'exploitation du site du Machu (+36 % par rapport au scénario Kannik), mais sont aussi supérieurs (+ 4 % par rapport au Kannik) lorsque les immersions sont réalisées à Octeville, suggérant que les immersions réalisées sur Kannik pendant 9 ans génèrent une barre de sédiment suffisamment volumineuse pour affecter les flux à l'embouchure, et ainsi diminuer le pompage tidal. On peut d'ailleurs noter un flux de sédiments marqués clappés par Rouen ou Le Havre entrant à travers la frontière "offshore ouest" : ces matériaux ne peuvent provenir que d'une sortie à travers la frontière "offshore nord".

En ce qui concerne les exports de sédiments fins vers la Manche, ces derniers sont maximaux lorsque les immersions sont réalisées sur le site dispersif d'Octeville (+12 % par rapport au Kannik) et Machu (+7 % par rapport au Kannik). La comparaison des résultats à la frontière Offshore Nord, soit dans la configuration actuelle avec utilisation de Machu par le GPMR et d'Octeville par le GPMH, soit dans une hypothétique situation sans dragage et/ou sans clapage (équivalents en terme de flux) montre que les dragages induisent une augmentation du flux exporté vers la Manche de 44 %.

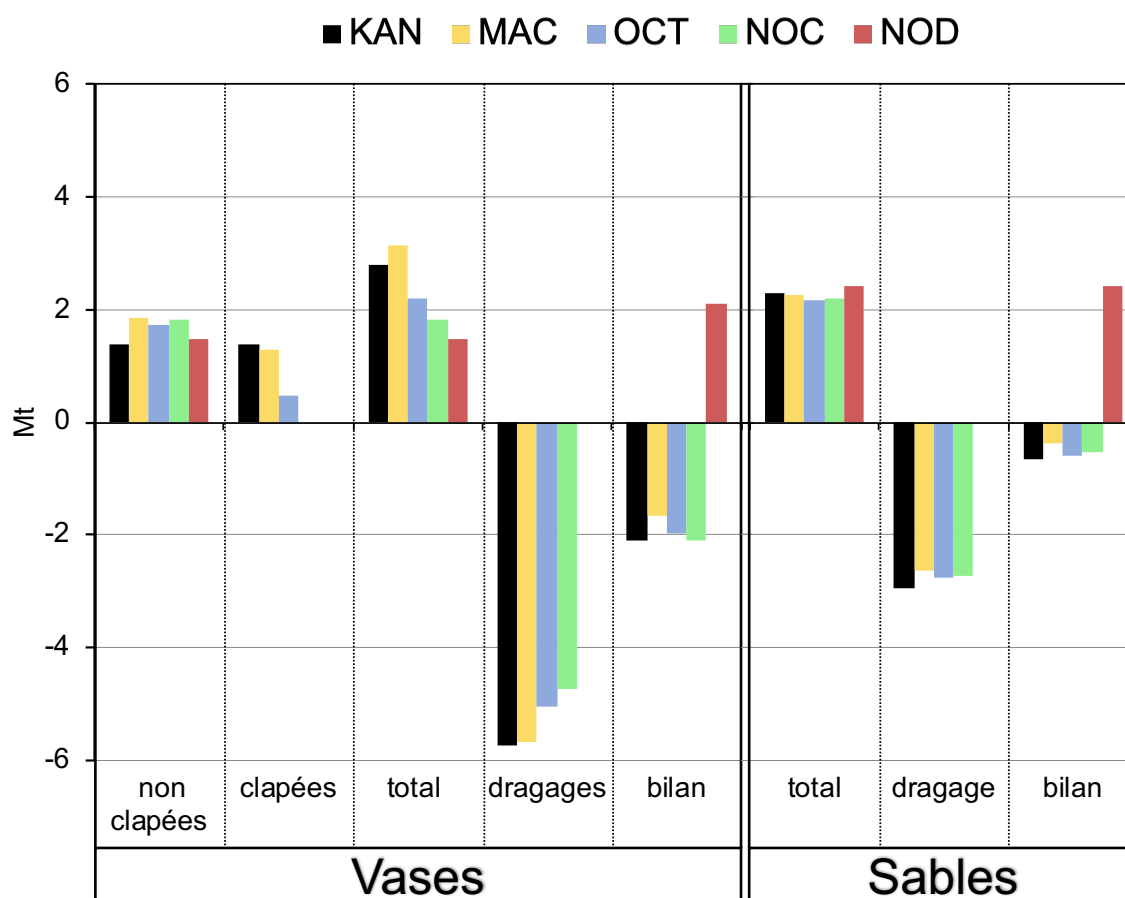


Figure V.16: Flux (en suspension) à l'embouchure (sédiments non dragués, dragués et totaux), quantités draguées et bilans sédimentaires dans l'ensemble de l'estuaire interne, simulés au cours de l'année hydrologique 2017-2018, distinguant sables et vases pour les 5 scénarios de dragage/clapage. Les dragages en tant que flux exportant les sédiments hors de l'estuaire interne sont représentés négativement

Au niveau de l'estuaire interne, les flux en suspension à l'embouchure et les flux anthropiques générés par les dragages peuvent être comparés, et mis en regard du bilan sédimentaire de l'estuaire interne (Figure V.16). Quelle que soit la stratégie de clapage, tous les scénarios avec dragage sont déficitaires, surtout en vases (c'est le contraire quand il n'y a pas de dragage). Les apports de vase sont eux très contrastés selon les scénarios, avec un maximum atteint pour le scénario Machu. On peut noter que dans l'ensemble le scénario "immersion GPMR à Octeville" (OCT) est proche du scénario sans clapage (NOC), tandis que le scénario "immersion GPMR à Machu" (MAC) est plus proche du scénario de référence KAN (immersion GPMR au Kannik).

Les effets de ces flux sur les concentrations en MES à l'échelle de l'embouchure et sur le bouchon vaseux sont cependant moindres. En effet, en moyenne sur la période simulée, la masse du bouchon vaseux diminue de 2,5 % lorsque les immersions sont réalisées à Machu et de 4,5 % lorsqu'elles sont réalisées à Octeville R.

Concernant les évolutions morphologiques potentiellement induites par les variations de flux résultant des changements de site d'immersion, celles-ci s'avèrent être relativement faibles comparativement aux évolutions constatées au chapitre IV avec le scénario sans dragage. Elles sont toutefois très similaires aux évolutions constatées avec le scénario sans clapage.

Ces faibles effets sur les évolutions morphologiques à l'échelle de l'embouchure pour la période simulée contrastent avec les effets constatés sur les dragages, qui eux sont nettement impactés par la position des sites d'immersions. Lorsque les immersions du GPMR sont réalisées à Machu, malgré

l'augmentation des apports sédimentaires constatés au niveau de la section embouchure (Figure V.18, et pour la localisation : Figure IV.28), les dragages au niveau des zones de l'Engainement et du GPMH diminuent en moyenne sur la période simulée de 6 % (masse totale draguée sables et vases). Lorsque les immersions sont réalisées à Octeville, la diminution est plus forte : en moyenne 12 % pour les dragages du GPMH et 11 % à l'Engainement (masse totale draguée sables et vases). Si les diminutions des dragages s'avèrent ne pas être corrélées aux flux totaux rentrant en estuaire, il est surprenant de remarquer qu'elles le sont avec les variations du retour des sédiments dragués vers l'estuaire interne. Les retours les plus importants sont obtenus dans le cas KAN, mais restent importants dans le cas MAC (Figure V.15). L'analyse de la variabilité temporelle de ces retours a permis de montrer que le pourcentage de sédiments préalablement clapés et re-dragués augmente selon une tendance logarithmique. L'extrapolation de cette tendance permet de se projeter dans l'évolution du retour des sédiments marqués. Dans la configuration actuelle avec utilisation de Machu par le GPMR et d'Octeville par le GPMH : en 2037 après 20 ans d'exploitation du site de Machu, les vases draguées devraient être composées de près de 18 % de vases ayant déjà été immergées au minimum une fois depuis 2017 à Machu ou Octeville (pour les clapages du GPMH).

Dans l'ensemble, les analyses menées sur les trois simulations de 9 ans, avec différents sites d'immersion des sédiments dragués par le GPMR, permettent d'entrevoir les effets à moyen terme d'un changement de site. Toutefois, plusieurs indicateurs montrent que les évolutions induites par ces changements sont toujours en cours. En effet, la morphologie actuelle de l'estuaire résulte de plus de 50 ans d'immersions des sédiments dragués au Kannik. Par ailleurs les bilans sédimentaires de l'estuaire interne et externe restent déséquilibrés (principalement en déficit) quel que soit le scénario concernant les sédiments après dragage, ce qui implique nécessairement des évolutions morphologiques de l'estuaire (principalement érosives). Il serait nécessaire de poursuivre nos calculs sur des périodes plus longues pour estimer si une certaine forme d'équilibre morpho-dynamique peut-être atteinte tout en maintenant les dragages ; et si tel est le cas, au bout de combien de temps.

Conclusions et Perspectives

Conclusions

Le sujet de cette thèse a été défini après avoir réalisé l'importance potentielle des dragages dans l'estuaire de la Seine et la faible connaissance du déterminisme et des répercussions de ces flux d'origine anthropiques (Lemoine, 2015). L'objectif de ce travail est ainsi de :

Mieux comprendre le rôle des dragages dans le fonctionnement hydro morpho sédimentaire et les évolutions de l'estuaire de la Seine.

Cette question de recherche, est au centre des préoccupations actuelles des acteurs de l'estuaire, et notamment du Grand Port Maritime de Rouen qui a récemment changé de site d'immersion après avoir exploité pendant près de 50 ans le site du Kannik. Ce projet a par ailleurs été réalisé dans le cadre du programme de recherche Seine-Aval 6 et contribue à l'amélioration de la connaissance des interactions entre le fonctionnement naturel et les usages de l'estuaire.

Pour répondre à cette question scientifique, et également contribuer directement aux réflexions des acteurs de l'estuaire sur les impacts environnementaux des dragages d'entretien des deux grands ports maritime de l'estuaire, notre approche s'est faite en 4 temps :

- i. adaptation de la modélisation HMS de l'estuaire de la Seine à l'étude des dragages d'entretien
- ii. analyse du déterminisme des dragages
- iii. caractérisation de l'effet des dragages sur le fonctionnement HMS global de l'estuaire
- iv. analyse de l'effet de potentiels changements de site d'immersion par l'un des deux ports

L'étude se base sur l'outil de modélisation MARS3D-MUSTANG développé dans le cadre du programme Seine-Aval, et plus spécifiquement sur la dernière version issue des développements réalisés dans les projets HYMOSED (Grasso et al. 2018) et MORPHOSEINE (Mengual et al. 2020 ; Grasso et al. 2020). Pour les besoins de notre projet, ce modèle qui considère l'ensemble des forçages (débits liquides et solide de la Seine et ses affluents, marées dynamiques au large, vagues à l'embouchure, conditions de vents et pressions) a été ajusté afin de reproduire les dragages des deux ports à l'embouchure, en terme de répartition spatiale et de nature du sédiment dragué. Cette validation a été réalisée sur la base d'immersions du GPMR sur le site du Kannik et d'immersion du GPMH sur le site d'Octeville. En effet, nous avons estimé qu'il était préférable de valider le modèle sur ce cas pour lequel nous disposons d'une plus grande expérience et connaissance, comparativement au cas Machu (exploité par le GPMR depuis mai 2017). Le travail de calibration, partiellement retranscrit dans le présent manuscrit, s'est avéré être très délicat. En effet, la reproduction de la sédimentation nette dans les zones draguées est un paramètre de validation intégrateur de l'ensemble de la dynamique HMS estuarienne. Cette phase de calibration a révélé la sensibilité des résultats à l'initialisation sédimentaire (stock sédimentaire initialement présent au lancement de la simulation) et à la mise en place du couplage entre les paramètres de frottement (longueurs de rugosité, dépendantes de la nature du sédiment superficiel et des macro rugosités qui peuvent le caractériser) et les évolutions morpho-sédimentaires de l'embouchure de la Seine.

La validation a été réalisée sur la période 2009-2018, période jugée représentative de la variabilité des forçages et des évolutions du système. Le modèle présente un niveau de validation en hauteur d'eau jugé satisfaisant. Le modèle reproduit et maintient un bouchon vaseux réaliste sur la période. En particulier, il est intéressant de noter que la masse du bouchon vaseux est stable et ne présente aucune dérive sur la période de 10 ans simulées. Toutefois, les comparaisons avec des mesures au point fixe montrent que globalement le modèle sous-estime les concentrations en MES. Les évolutions morphologiques de l'embouchure sont, à l'exception de la zone des Ratelets, bien reproduites par le modèle. A l'échelle des 16 km² de zones draguées, la simulation de la répartition des dragages et de la nature des sédiments dragués présente un bon accord avec la réalité : le modèle reproduit 96 % des masses draguées annuellement. On notera toutefois que le modèle sous-estime les dépôts de sables sur le secteur dit de la Brèche (Zone B). La stabilité des sites d'immersions simulée par le modèle est tout à fait conforme aux observations réalisées par les ports. Le paramétrage décrit au chapitre III constitue le meilleur compromis que nous ayons pu obtenir entre reproduction du fonctionnement HMS de l'estuaire (niveau d'eau, concentration en MES, évolutions morphologiques) et reproduction des dragages (nature du sédiment dragué et répartition spatiale des dragages).

Afin d'analyser la variabilité des dragages selon les forçages hydrodynamiques de l'estuaire une configuration spécifique appelée "Quasi Continuous Dredging" (QCD) a été développée sur la base de la configuration de référence. Dans cette version, l'épaisseur draguée est réduite à 1 cm (contre 50 cm dans la configuration de référence), afin de rendre les dragages simulés plus réactifs à la sédimentation induite par la variabilité des forçages (moindre quantité de dépôt nécessaire pour déclencher le dragage). A l'échelle annuelle, il est intéressant de noter que cette version donne des résultats de dragage (quantité et nature) très proches et donc présente le même niveau de validation que la version de référence (la version de référence reste toutefois plus réaliste notamment en terme de temporalité des dragages/clapages). Une simulation sur la période janvier 2009 - décembre 2018 a ainsi été réalisée avec la configuration QCD. Conformément à la réalité, les simulations de référence et QCD montrent qu'à l'échelle de l'année, il n'y pas de longue période (~1 semaine) durant laquelle les conditions de navigation ne nécessitent pas d'être maintenues par dragage.

L'analyse de la variabilité des dragages simulés selon ce scénario QCD a montré qu'à l'échelle de l'estuaire les dragages augmentent de la même façon que le remaniement sédimentaire induit par chacun des forçages. De manière analogue à la masse du bouchon vaseux, les quantités de vases draguées présentent une hystérésis selon le cycle vive eau morte eau, avec des dragages maximaux pour les grandes amplitudes de marée et en période de déchet. La mise en regard des dragages quotidiens avec la dynamique du bouchon vaseux a permis de montrer que pour les zones draguées du GPMR, exposées au bouchon vaseux, les dragages augmentaient avec la proximité de ce dernier. Concernant les zones du GPMH, même si celles-ci ne sont pas directement exposées au bouchon vaseux, la sédimentation peut y être induite par la remobilisation de sédiment issus de l'expulsion du bouchon vaseux lors des crues. Finalement, les dragages dans les zones situées à l'aval de l'estuaire (Engainement et zones du GPMH) présentent une saisonnalité similaire à celle des débits et des tempêtes. Les dragages réalisés plus à l'amont, sur la zone de la Brèche, semblent quant à eux favorisés par une position du bouchon vaseux situé plus à l'amont et donc associés à des conditions de débits moins élevés. Au final, à l'échelle interannuelle, la variabilité des débits de crue et des tempêtes hivernales peut engendrer à une variabilité des quantités draguées annuellement de l'ordre de 50 %.

L'effet des dragages sur le fonctionnement HMS de l'estuaire a été étudié en comparant les résultats de la simulation de référence (KAN) avec deux simulations théoriques : i/ un scénario sans dragage (NOD) et ii/ un scénario sans clapage (NOC), correspondant à la mise à terre de 100 % des sédiments dragués. Ces 3 simulations ont été réalisées en considérant les mêmes forçages réalistes sur les 9 années hydrologiques de juillet 2009 à juillet 2018. De plus, pour cette analyse, les sédiments clapés par les ports (cas KAN) sont numériquement tracés : ceci permet de suivre leurs devenir après immersion et de quantifier leurs répercussions sur les différents processus estuariens. La comparaison des résultats de ces trois scénarios a permis d'estimer l'effets des dragages sur les concentrations en MES, la nature du sédiment superficiel, les évolutions morphologiques et les flux sédimentaires. Les comparaisons entre le scénario de référence KAN et le scénario sans clapage NOC montrent que globalement les effets des immersions sur les paramètres cités précédemment sont limités et affectent principalement la proximité immédiate des sites d'immersion. En revanche, les effets des dragages influencent nettement la dynamique HMS de toute l'embouchure.

Dans l'ensemble l'analyse des concentrations en MES simulées dans les scénarios KAN et NOD montrent que les dragages ont des répercussions sur les concentrations en MES et sur le bouchon vaseux. A l'échelle de la période simulée la masse du bouchon vaseux présente un écart de 3,25 % en faveur du cas avec dragage (KAN), comparativement au cas sans dragage (NOD). Cet écart semble toutefois croître sur la fin de la période et atteint 6,5 % sur les deux dernières années. Cet impact peut sembler relativement faible, notamment après avoir fait le constat que les masses draguées chaque jour étaient du même ordre de grandeur que la masse du bouchon vaseux. Ce faible écart s'explique par l'analyse du cumul annuel des masses sédimentaires remobilisées (à l'échelle de l'estuaire interne (emprise Figure IV.28). Cet indicateur permet de quantifier les échanges eau-sédiment, à l'origine des concentrations en MES : il n'est pas significativement affecté par les dragages. A l'échelle annuelle, le cumul des masses remobilisées naturellement apparaît être 10 000 fois plus important que le cumul des masses draguées en estuaire.

Les faciès sédimentaires présentent une sensibilité au dragage relativement similaire à celle des concentrations en MES, avec des concentrations en vases dans le sédiment superficiel (5 cm) plus élevées en fosse nord en l'absence de dragage, et plus élevées à proximité des Ratelets en présence de dragage. Néanmoins, ces différences s'avèrent quantitativement plus importantes sur les faciès sédimentaires que sur les MES : les teneurs en vases moyennes annuelles peuvent localement présenter des écarts supérieurs à 20 %. Concernant les effets des dragages sur la morphologie il est intéressant de noter qu'à l'échelle des 9 années étudiées, la trajectoire d'évolution morphologique de l'embouchure semble changer suite à l'arrêt des dragages dans le cas NOD. De façon naturelle, les zones qui ne sont plus draguées se comblent, et même l'ensemble du secteur situé entre les digues submersibles est soumis à sédimentation. La fosse nord, qui semble à l'équilibre lorsque les dragages sont pratiqués, se comble également en l'absence de dragage, tandis que la dynamique de la fosse sud (en érosion) est inchangée.

L'analyse des flux en suspension et la détermination des bilans sédimentaires associés a permis de démontrer l'importance des dragages:

A l'échelle de l'estuaire interne, les dragages en tant que flux sédimentaires anthropiques génèrent des exports sédimentaires supérieurs aux apports naturels.

Les dragages d'entretien apparaissent ainsi être à l'origine de l'érosion globale de l'embouchure de la Seine constatée dans nos simulations et dans la réalité. En présence de dragage, les zones draguées apparaissent constituer de véritables pièges à sédiment et font ainsi converger (une partie) des flux sédimentaires. Cette convergence des flux sédimentaires vers les zones draguées (que nous associons à une forme de macro érosion régressive induite par le dragage autour des zones draguées) limite la quantité de sédiment disponible à la sédimentation en fosse nord, expliquant ainsi la stabilité observée dans le scénario KAN, au contraire du scénario sans dragage.

Les clapages contribuent fortement aux apports sédimentaires à l'estuaire. En effet, lorsque les immersions de sédiments sont réalisées au Kannik, après 9 ans de simulation, près de 50 % des sédiments vaseux qui rentrent dans l'estuaire s'avèrent être des sédiments préalablement clapés (au Kannik essentiellement). Néanmoins, Il est intéressant de remarquer que la différence de flux entrants, entre le scénario avec immersions et le scénario sans immersion, est inférieure à la quantité de sédiment clapé rentrant en estuaire en raison d'un apport plus important de sédiment "non clapés" dans le cas où les clapages ne sont pas réalisés. Cette augmentation des apports "naturels" dans le cas sans clapage peut être associée à la notion de capacité de transport sédimentaire.

La diminution des apports sédimentaires constatée en l'absence de clapage est associée à une diminution relativement forte des dragages (-18 %). Cette diminution n'est pas homogène selon les sites et la nature de sédiment considérés. En effet, les quantités de vases draguées diminuent respectivement de 20% et 15 % sur les zones du GPMH et à l'Engainement ; tandis que les quantités de sables draguées diminuent respectivement de 10% et 5 % sur ces mêmes sites.

Au final, les diminutions conjointes des apports précédemment cités et des exports par dragage se compensent, de telle sorte que les bilans sédimentaires de l'estuaire apparaissent très proches, avec ou sans clapage.

Afin d'évaluer la sensibilité du fonctionnement HMS à l'emplacement des zones d'immersions et leurs caractéristiques en terme de stabilité et de dispersion, deux simulations comparables au scénario de référence ont été réalisées. Dans ces scénarios, les immersions du GPMR (~5 Mt/an) sont dans un cas sur le nouveau site du GPMR, le Machu dans l'autre elles sont réalisées à Octeville (dans le cas de réf. elles sont réalisées au Kannik). Les trois sites étudiés sont situés dans des environnements hydrodynamiques différents, le devenir des sédiments immergés sur ces sites est donc différent dans les trois cas. Ces deux scénarios permettent de compléter le diagnostic sur les effets des immersions, réalisé à partir du scénario

Les résultats montrent que malgré la distance séparant le site de Machu de l'embouchure, les vases clapées sur ce site n'y restent pas retournent en grande partie vers l'estuaire (les calculs de validation de la stabilité simulée pour le site de Machu montrent que l'instabilité du site est peut-être surestimée). Les sédiments immergés sur le site d'Octeville, réputé très dispersif, sont transportés vers le nord ; leur retour vers l'estuaire est très faible, mais non nul, révélant d'ailleurs une recirculation partielle dans la

baie de Seine. En cohérence avec les observations faites sur la simulation sans clapage (NOC), les concentrations en MES et les évolutions morphologiques ne sont pas, à l'échelle de la période simulée, significativement impactées par la position des immersions du GPMR.

Cependant les apports en sédiment (clapés et non clapés) vers l'estuaire diffèrent. Il est intéressant de noter qu'après 9 ans sans immersion sur le site du Kannik les flux de sédiments non clapés entrant en estuaire sont plus importants, probablement en raison d'un niveau plus faible du banc du Kannik et de ses abords en comparaison de sa configuration après 9 ans dans le scénario d'immersion au Kannik. En ce qui concerne les retours des matériaux clapés vers l'estuaire, comparés à ceux obtenus dans le cas d'une immersion au Kannik, ils sont légèrement inférieurs dans le cas d'une immersion à Machu, et beaucoup plus faibles (facteur 3) dans le cas d'une immersion à Octeville. L'extrapolation des retours de sédiments simulés dans les 3 scénarios permet de dire qu'après 20 ans d'exploitation de Kannik près de 25 % des sédiments dragués auront déjà été dragués une fois, contre 18 % pour le cas Machu et seulement 6 % pour le cas Octeville. Les différences dans les apports ont également des répercussions sur les dragages. Lorsque les immersions du GPMR sont réalisées à Machu, les dragages à l'Engainement et dans les zones du GMPH diminuent d'environ 6 % sur la période simulée (aucun effet constaté sur le site de la Brèche) ; lorsque ces immersions sont réalisées à Octeville les diminutions des dragages constatées à l'Engainement et dans les zones du GMPH sont respectivement de 11 et 12%.

L'ensemble des analyses réalisées sur le scénario de référence, les scénarios théoriques (sans clapage et sans dragage) et sur les scénarios alternatifs réalistes (immersions à Machu ou Octeville des sédiments dragués par le GPMR) ont permis de caractériser les effets à moyen terme des dragages selon différentes modalités de gestion des sédiments dragués sur le fonctionnement HMS de l'estuaire de la Seine. Ces résultats montrent que les dragages ont un rôle majeur dans le fonctionnement de l'estuaire et dans ses évolutions morphologiques, qu'ils sont en particulier responsables de l'érosion générale constatée actuellement dans l'estuaire interne. En effet, les flux des zones draguées vers les sites d'immersion contrarient la tendance naturelle au comblement de l'estuaire qui est constatée sans dragage. Un autre effet majeur est l'affinement granulométrique de la couverture sédimentaire de la fosse nord dans le cas où les dragages seraient interrompus, ce qui peut présenter de l'intérêt vis-à-vis d'une reconquête des fonctionnalités de l'estuaire (intérêt des vasières). Mais ce processus s'accompagne d'une tendance au comblement de la fosse nord, qui pourrait finalement venir contrarier sur le long terme le gain environnemental découlant de l'affinement granulométrique du sédiment. Tous ces résultats mériteraient des modélisations à plus long terme pour permettre de conclure.

Il faut d'ailleurs recontextualiser nos résultats, obtenus sur des simulations de 9 ans, vis-à-vis de l'historique des dragages de l'estuaire de la Seine. En effet, la morphologie initiale de tous les scénarios simulés se base sur la bathymétrie de l'estuaire mesurée en 2009, après plusieurs décennies de dragages et clapages sur les sites du Kannik et d'Octeville. Nos résultats permettent ainsi d'appréhender les effets de différentes pratiques de dragage, pendant 9 ans, sur la trajectoire actuelle d'évolution de l'estuaire.

Perspectives

- *Poursuivre l'exploitation du jeu de données constitué dans le cadre de la thèse*

De manière simplifiée, notre modèle simule la dynamique spatio-temporelle des sédiments sablo-vaseux (gravier, 3 sables, 3 vases, plus 10 variables tracées) dans l'estuaire de la Seine, en réponse aux forçages naturels et anthropiques pendant 9 ans et pour 5 scénarios de gestion des dragages différents. Le nombre d'analyses possibles sur la base de ce jeu de données est extrêmement élevé. Dans le cadre de cette thèse, nous nous avons dû limiter le champ d'investigation possible et nous concentrer sur des variables HMS et des types d'analyses que nous avons estimé être les plus

pertinentes pour répondre à la question initiale. De nombreuses analyses complémentaires pourraient être réalisées, par exemple l'étude de la dynamique de chacune des trois tailles de sables considérés.

Les flux que nous avons analysés ont été déterminés uniquement en considérant les flux de sédiments transportés en suspension. Bien que Mengual et al. (2020) aient montré que l'essentiel du transport sédimentaire se faisait en suspension dans le secteur de l'embouchure de la Seine, il serait nécessaire d'analyser les flux transportés par charriage et de les prendre en compte dans les bilans sédimentaires.

Il serait par ailleurs intéressant de compléter l'analyse des flux par la quantification de ces derniers à travers d'autres sections. Par exemple, l'ajout de sections longitudinales au niveau des digues submersibles permettrait de mieux comprendre les dynamiques respectives des 3 secteurs fosse Nord, zone endiguée, fosse Sud au sein de l'estuaire interne, et d'éventuelles recirculations.

La variabilité verticale des caractéristiques du sédiment mériterait d'être explorée notamment pour évaluer les effets du tassement sur les évolutions morphologiques. En lien avec nos incertitudes concernant l'initialisation du sédiment nous nous interrogeons en particulier sur les répercussions morphologiques d'un potentiel tassement en début de simulation. Si la consolidation initiale du sédiment n'est pas cohérente avec la réalité, ceci peut biaiser les évolutions morphologiques simulées : une consolidation insuffisante peut conduire à un approfondissement exagéré soit par tassement soit par érosion ; alors qu'une consolidation initiale trop forte peut limiter les érosions.

- *Caractériser les effets des dragages sur le fonctionnement écologique de l'estuaire*

A court terme, nous projetons d'utiliser nos résultats pour définir les impacts des dragages d'entretien sur le fonctionnement écologique, et dans un premier temps sur la répartition des habitats de certaines espèces de poissons emblématiques de l'estuaire de la Seine comme la sole et le bar. Ce travail se basera sur la méthodologie utilisée dans Muntoni (2020).

- *Simuler différentes stratégies de gestion des sédiments*

Les performances du modèle, en terme de reproduction de la sédimentation dans les zones draguées de l'estuaire, mériteraient d'être exploitées pour tester l'effet d'autres stratégies/techniques de dragages. La tentative de modélisation des dragages "à l'américaine" a montré les limites à moyen terme d'une stratégie basée uniquement sur cette technique (augmentation forte des besoins en dragage en raison de la re-sédimentation rapide des sables dans les zones draguées). Sur la base de cette expérience, il serait intéressant de définir un scénario mêlant dragage "à l'américaine" et dragage conventionnel. Nous pourrions imaginer draguer "à l'américaine" les fonds présentant une faible teneur en sable et recourir aux immersions en mer dans le cas contraire.

La bibliographie met en avant l'essor des dragages par injection d'eau. Le travail de synthèse réalisé sur les pratiques de dragages dans les estuaires de l'Escaut, du Humber, de la Weser, et de l'Elbe (BIOCONSULT & NLWKN, 2013) fait apparaître que les effets de ce mode de gestion sur le fonctionnement HMS des estuaires est méconnu. Ce mode de dragage pourrait être implémenté dans le modèle, ce qui permettrait d'en étudier les effets sur la dynamique estuarienne.

Le récent approfondissement du chenal du GPMR n'est pas considéré dans nos simulations : il serait intéressant de tester si cet approfondissement a des répercussions sur les différentes métriques que nous avons analysées et notamment sur les besoins en termes de dragage.

- *Raffiner le modèle*

La résolution du maillage apparaît un peu grossière pour représenter les forts gradients bathymétriques de certaines zones de l'estuaire, en particulier les zones draguées elles-mêmes. Peuvent être cités les

bassins du GPMH, la courbure de la zone de dragage de l'Engainement, ou encore le voisinage de la brèche dans la digue basse nord par lequel nous supposons que les sables transitent pour rejoindre la zone de dragage voisine. Il serait intéressant de tester si l'utilisation d'un maillage plus fin améliorerait le niveau de validité du modèle et en particulier si cela permettrait de mieux reproduire les dragages (sableux) sur le site de la Brèche.

La calibration a montré à quel point l'ensemble des résultats HMS était sensible aux conditions d'initialisation du modèle sédimentaire (notion de stock sédimentaire initial). Après de nombreux essais, le choix a été fait d'utiliser un protocole d'initialisation "simple" : une année de *spin-up* sans couplage morpho-dynamique sur un sédiment uniforme à l'embouchure de l'estuaire. Dans ce cas, le stock sédimentaire initial est défini par sa quantité (masse et volume), le sédiment qui le compose (proportion de chacune des classes considérées) et son niveau de consolidation. Il serait intéressant de réaliser une analyse de sensibilité à ces paramètres qui conditionnent tous nos résultats.

La procédure de dragage et clapage que nous utilisons est minimaliste et néglige un certain nombre de processus de second ordre induits par les dragages. Le modèle de dragage pourrait par exemple être raffiné et simuler les effets de l'extraction sur la rigidité du fond (déstructuration du sédiment) et sur les concentrations en MES (re-suspensions induites par le bec d'écluse ou par la surverse). Les clapages pourraient également être revus afin d'être plus fidèles aux stratégies de clapage mises en œuvre par les ports. L'emprise de chaque immersion pourrait être limitée (d'autant plus si le maillage est raffiné), et changer régulièrement de position. Il serait intéressant de tester si la prise en compte de ces processus améliorerait le niveau de validité du modèle.

- *Améliorer le niveau de validité de la modélisation*

La validation des hauteurs d'eau a montré que le modèle surestimait quelque peu les niveaux de basse mer sur les sites de Fatouville/Tancarville et Caudebec. Il est vraisemblable qu'une diminution localisée des longueurs de rugosités (ou du coefficient de couplage CoefZ0coupl) dans ce secteur améliorerait la reproduction des niveaux de basses mers. Cette potentielle amélioration mériterait d'être rapidement testée.

A certains moments de la marée, les concentrations en MES simulées apparaissent être fortement sous-estimées par rapport aux mesures du réseau SYNAPSES. Étant donné le niveau de validité du modèle sur les autres paramètres que nous ciblons (évolutions morphologiques et dragages), nous pensons qu'il sera difficile d'améliorer la reproduction des concentrations en MES sans dégrader ces autres paramètres. Cependant, une analyse plus approfondie des résultats du modèle et des mesures du réseau SYNAPSES permettrait certainement de mieux comprendre l'origine des différences modèle/mesures. En particulier, une meilleure caractérisation des gradients horizontaux et verticaux des concentrations en MES simulées et mesurées pourrait permettre d'identifier le/les processus responsables de cette sous-estimation.

Le modèle reproduit de manière satisfaisante l'ensemble des évolutions morphologiques de l'embouchure à l'exception de la progradation vers l'ouest du banc des Ratelets. Ce problème localisé pourrait provenir d'une spécificité du banc non prise en compte par le modèle. Des campagnes de mesures ADCP ont été réalisées dans le cadre du projet MORPHOSEINE, ces données pourront être mobilisées pour valider l'hydrodynamisme du site. S'il s'avère que l'hydrodynamisme du site est correctement reproduit (la validation des hauteurs de vagues a été faite sur cette zone cf. Figure III.5), il faudra alors envisager d'autres campagnes de mesures. D'une manière générale, les stocks sédimentaires re-mobilisables à l'embouchure et à proximité ne sont pas bien connus. En lien avec la sensibilité des résultats au stock sédimentaire initial évoquée précédemment, nous pensons que la réalisation de carottages sur ce site et à proximité (à l'Ouest, en raison des flux sédimentaires orientés de l'Ouest vers l'Est dans ce secteur) permettrait de caractériser les sédiments re-mobilisables contribuant à la progradation de ce banc. D'une manière générale l'acquisition de données caractérisant le stock sédimentaire de l'estuaire bénéficierait à la modélisation des évolutions de la couverture sédimentaire et des évolutions morphologiques.

Grasso et al. (2020) ont démontré la possibilité d'utiliser le facteur d'accélération morphologique (MF) pour simuler les évolutions bathymétriques de l'estuaire de la Seine sur 50 ans. Ces travaux ont été

réalisés avec une configuration du modèle quasi identique à la nôtre. Il serait intéressant de poursuivre ces travaux notamment pour déterminer si l'utilisation de MF ne dégrade pas la simulation des dragages. Si tel était le cas, l'utilisation de MF faciliterait l'étude des effets des dragages sur le long terme (> 10 ans).

- *Investiguer le plus long terme pour mieux anticiper les évolutions morphologiques de l'estuaire et leurs sensibilités aux dragages*

Les simulations de 9 ans ont permis d'évaluer les effets des dragages sur les tendances évolutives de l'estuaire. L'amélioration du niveau de validité du modèle (objet du point précédent) permettrait de réaliser des simulations sur des périodes plus longues avec un bon niveau de confiance. En effet, il serait intéressant de poursuivre les calculs au-delà de 9 ans pour confirmer les premières analyses et déterminer si les rétroactions morpho-dynamiques génèrent un infléchissement des tendances ou si les évolutions se poursuivent. Ce travail permettrait en particulier d'anticiper le devenir de la fosse nord, notamment en condition de non dragage, pour laquelle un envasement et une sédimentation ont été constatés dans nos simulations. Dans ce cas, il serait intéressant, tant d'un point de vue purement HMS qu'environnemental, de voir si une certaine forme de stabilité morphologique serait atteinte et sous quelle forme : quelle proportion de slikke par rapport au schorre ?

La comparaison de la simulation sans dragage avec le scénario de référence a mis en avant un impact morphologique fort des dragages sur les évolutions morphologiques de l'estuaire. Cette simulation mériterait particulièrement d'être poursuivie, parce que la condition initiale de cette simulation résulte de plusieurs décennies de dragages et d'aménagements dans l'estuaire. En complément de cette prolongation de simulation, il paraît intéressant de réaliser une nouvelle simulation avec dragage, démarrant sur une morphologie plus "naturelle", moins impactée par les dragages. Cette bathymétrie initiale pourrait être celle de l'estuaire de la Seine en 1975 ou celle issue de la poursuite du scénario sans dragage. Contrairement à la simulation sans dragage qui permet finalement d'estimer l'effet d'un arrêt des dragages pendant 9 ans sur la morphologie d'un estuaire jusque-là dragué, cette simulation permettrait de compléter le diagnostic sur l'effet des dragages.

- *Progresser dans la compréhension des processus HMS estuarien*

Dans le cadre des scénarios modélisés mais surtout durant la phase de calibration, notamment celle du couplage des longueurs de rugosité à la nature du sédiment superficiel, les valeurs des concentrations en MES et en particulier les masses du bouchon vaseux simulées se sont avérées relativement stables vis-à-vis des modifications de paramétrage testées. Cette stabilité de la masse du bouchon vaseux mériterait d'être explorée. L'utilisation d'une modélisation de type estuaire schématique (Le Hir et al., 2017) permettrait de disposer d'un cas d'étude plus simple, plus facile à interpréter que celle d'un estuaire réel. Il est permis de penser que cette stabilité pourrait être interprétée comme résultant de la capacité de l'estuaire et des forçages considérés à remettre les sédiments en suspension. Cette potentielle capacité pourrait être étudiée en mettant en regard i/ la teneur en vase du sédiment superficiel, ii/ l'énergie tidale et sa dissipation par les frottements lors de sa propagation en estuaire et iii/ la masse du bouchon vaseux.

Les bilans sédimentaires de l'estuaire interne se sont avérés relativement stables vis-à-vis des stratégies d'immersion des sédiments dragués (pour rappel : en l'absence de clapage, le flux de sédiments "non dragués" entrant en estuaire augmente, les exports par dragage diminuent et le bilan sédimentaire résultant est quasiment inchangé). L'augmentation des apports en sédiments "non dragués", constatée lorsqu'il n'y a pas de retour de sédiments clappés, témoignerait d'une potentielle capacité de transport sédimentaire de l'estuaire, indépendante des exports de sédiments par dragage/clapage. Cette capacité de transport pourrait être étudiée dans le même cadre que la capacité de remise en suspension évoquée au paragraphe précédent.

Bibliographie

- Alzieu, C. (1999). Dragages et environnement marin. État des connaissances. Ifremer, 1–209.
- ARTELIA. (2012). Expertise sur la fosse nord de l'estuaire de la Seine. Rapport d'étude pour le compte du Grand Port Maritime du Havre 88p.
- ARTELIA., GIP Seine-Aval. (2013). Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine – Rapport de l'objectif A : Définition des périodes de retour des événements jouant un rôle dans les inondations. 131p. et annexes.
- ARTELIA. (2014). Réhabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine – Développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire 3D de l'estuaire. Rapport d'étude pour le compte du Grand Port Maritime du Havre 184p.
- ARTELIA. (2016). Réhabilitation des vasières de l'estuaire de la Seine - Développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire 3D. Rapport 171 3203 NA14, 33(0).
- ARTELIA. (2018). Réhabilitation des vasières de la Seine: Mise en place d'indicateurs de suivi des évolutions morpho-sédimentaire. 33(0).
- ARTELIA. (2019). Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. 0, 33.
- ARTELIA., GPMB. (2018). Dragage d'entretien du chenal de navigation, des ouvrages portuaires et de leurs accès et gestion des sédiments dragués - dossier d'évaluation des incidences NATURA 2000 pour le Grand Port Maritime de Bordeaux. 33(0).
- Avoine, J., Allen, G. P., Nichols, M., Salomon, J. C., 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. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(81\)90046-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(81)90046-3)
- Avoine, J. (1985). Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. Actes de colloques n°4 GRECO-MANCHE, p117-124.
- Avoine, J. (1995). Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine – Partie 2 – Sédimentologie. Synthèse des connaissances réalisée par l'Ifremer à la demande du Port Autonome du Havre, 191p.
- Baux, N. (2018). Dynamique d'habitats benthiques sous contraintes anthropiques : le cas du site de dépôt de dragage d'Octeville. Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie <http://www.theses.fr/2018NORMC243/document>
- BIOCONSULT., Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN). (2012). Sediment Management Strategies in the Weser Estuary – Study in the framework of the Interreg IVB project TIDE Long version. Rapport Projet Interreg IVB TIDE, December, 56.
- Beauchamp, J. (2005). Cours de pédologie - université de Picardie
- Blanpain, O. (2009). Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche. <http://www.theses.fr/2009ROUES036>
- Bonnefille, R. (1976). Cours d'hydraulique maritime. Support de cours de l'école nationale supérieure de techniques avancées. 161p.
- Boutin, R. (1999). Amélioration des connaissances sur le comportement des rejets en mer de produits de dragage de type vase : phénomènes à court terme et dans le champ proche. <http://www.theses.fr/1999ISAL0079>
- Boust, D. (1997). Etude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de la Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels. Rapport Scientifique du programme Seine-Aval 1. 12p.
- Brenon, I. (1996). Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 179p.
- Brenon, I., Le Hir, P. (1999). Modelling turbidity maximum in the Seine estuary: Capacity and limits of a two-dimensional horizontal model. *Comptes Rendus de l'Académie de Sciences - Série IIa: Sciences de La Terre et Des Planètes*, 328(5), 327–332. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80125-6](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80125-6)
- CEREMA. (2015). Enquête nationale sur les dragages des ports maritimes.
- 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. <https://doi.org/10.1051/lhb/1964031>

- Cox, J. (2018). Effects of dredging and dumping in laboratory scale experiments of estuaries. Master Thesis - Universiteit of Utrecht, March.
- Craig, A., Valcke, S., Coquart, L. (2017). Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT-3.0. *Geoscientific Model Development*, 10(9), 3297–3308. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3297-2017>
- Cugier, P., Le Hir P. (2002). Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55 (5), 673-695
- Cuvilliez, A., Deloffre, J., Lafite, R., Bessineton, C. (2009). Morphological responses of an estuarine intertidal mudflat to constructions since 1978 to 2005: The Seine estuary (France). *Geomorphology*, 104(3–4), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.010>
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., Boyd, R. (1992). Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62(6), 1130–1146. <https://doi.org/10.1306/D4267A69-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Dam, G., Poortman, S.E., Blik, A.J., Plancke, Y. (2013). Long-term modeling of the impact of dredging strategies on morpho- and hydrodynamic developments in the Western Scheldt. 20th World Dredging Congress and Exhibition 2013 (WODCON XX). The Art of Dredging. Brussels, Belgium, 3-7 June 2013, 739.
- De Jonge, V.N. (1983). Relations Between Annual Dredging Activities, Suspended Matter Concentrations, and the Development of the Tidal Regime in the Ems Estuary. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(S1), s289–s300. <https://doi.org/10.1139/f83-290>
- De Jonge, V.N., Schuttelaars, H.M., van Beusekom, J.E.E., Talke, S.A., De Swart, H.E. (2014). The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.030>
- Deloffre, J. (2005). La sédimentation fine sur les vasières intertidales en estuaires macrotidaux, processus, quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 227p.
- Deloffre, J., Lafite R., Blanpain O., Fournier M., Simon M., Lemoine M., Mesquita J., Callaud D., David L., Gomit G. (2012). Projet IBIS : Investigation du batillage en Seine. Rapport scientifique Seine-Aval 4, 73p.
- De Vriend, H.J., Wang, Z. B., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., Ding, P. (2011). Eco-morphological problems in the yangtze estuary and the western scheldt. *Wetlands*, 31(6), 1033–1042. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0239-7>
- Delinares, M., Walther, R., Schaguene, J., Cyrielle, 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. 25–26.
- Delsinne, N. (2005). Évolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. In PhD Thesis, University of Caen Normandy (Vol. 1).
- Druine, F. (2018). Flux sédimentaires en estuaire de Seine : Quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesures de turbidité (réseau SYNAPSES). Thèse de doctorat, Université de Rouen Haute-Normandie, 287p.
- Dubrule–Brunaud, C. (2007). Les sédiments fins dans un système macrotidal actuel (Continuum Seine Baie de Seine) : caractérisations géochimiques et minéralogiques, identification des sources. Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 341p.
- Ducharme, A., Habets, F., Oudin, L., Gascoin, S., Sauquet, E., Viennot, P., Hachour, A., Deque, M., Martin, E., Page C., Terray L., Thierry D. (2010). Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF : «Risques inondation en Ile de France», Paris, 24-25 mars 2010.
- Duclos, P.A. (2012). Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats marins. Application au bassin oriental de la Manche. Thèse de doctorat, Université de Rouen Haute-Normandie, 287p.
- Dupont, J.P., Flipo, N., Pennequin, D. (2017). Projet Seine-Aval Echanges : Interaction entre les différentes masses d'eau estuariennes et bilan hydrique de l'estuaire 47p.
- Elineau, S. (2013). Le risque naturel côtier sur la communauté d'agglomération du Havre (Haute-Normandie) : une

- évaluation des aléas. <http://www.theses.fr/2013LEHA0014/document>
- Even, S., Thouvenin, B. (2007). Modélisation et bilans de carbone en estuaire de Seine (synthèse CYMES). Le Modèle MOSES (Modèle de Matière Organique Simplifié en Estuaire de Seine). Ecole des Mines de Paris / Centre de Géosciences, Ifremer / Département Biogéochimie et Ecotoxicologie. 18, Rapport Seine- Aval.
- Foussard, V., Cuvilliez, A., Fajon, P., Fisson, C., Lesueur, P., Macur, O. (2010). Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. Fascicule Seine-Aval, 2.3, 1–44.
- Foussard, V., Sottolichio A. (2011). Caractérisation d'indicateurs hydromorpho-sédimentaires de Bon Etat écologique des estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde – Partie 2 : Synthèse de la démarche et des résultats. Projet LITEAU - BEEST, 55p.
- Garnaud, S. (2003). La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : La baie de Seine Sud-Orientale (France). Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 378p.
- GIP Loire Estuaire. (2011). Les dragages d'entretien dans l'estuaire de la Loire. 1–4.
- Gower, G.L. (1968). 1. A history of dredging. In *Dredging (1967 conf)* (pp. 3–11). Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/doi:10.1680/d1967c.44777.0002>
- Grand Port Maritime du Havre. (2014). Demande de renouvellement de l'autorisation de dragage et de l'immersion des produits de dragages d'entretien du GPMH. Demande de Renouvellement.
- Grand Port Maritime de Rouen. (2010). Dragages d'entretien du chenal d'accès au port de Rouen et immersion des produits de dragage - Dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau.
- Grand Port Maritime de Rouen. (2010). Dossier d'enquête publique, Projet d'amélioration des accès maritimes du port de Rouen. Dossier d'enquête publique. 526p.
- Grand Port Maritime du Havre. (2014). Dossier de demande de renouvellement de l'autorisation des dragages d'entretien du GPMH et de l'immersion des produits y afférents au titre de l'article R214-20 du Code de l'Environnement. 2014-080-A.)
- Grand Port Maritime de Rouen, IDRA Ingénierie. (2015). Dossier de demande d'autorisation unique pour les dragages d'entretien du chenal de navigation et des installations portuaires de l'estuaire aval et immersions des sédiments sur les sites de Machu, zone intermédiaire et zone temporaire amont. Etude d'impact allant document d'incidence au titre des articles L214-1 et suivant code de l'environnement. Dossier d'autorisation unique. 506p.
- Grand Port Maritime de Rouen, IDRA-Ingénierie. (2014). Analyse multi-critère pour le choix du site d'immersion du GPMR.
- Grand Port Maritime de Rouen. (2018). Dragages d'entretien et immersion de sédiments de dragage sur les sites de Machu, zone intermédiaire et zone temporaire amont. 168p.
- Grasso, F., Le Hir, P., Bassoullet, P. (2015). Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics* 65(4), 607–616.
- Grasso, F., Caillaud, M., Le Hir, P., Schulz, E., Thouvenin, B., Verney, R., Lemoine, J.P., Landemaine V. (2016). Rapport du projet Seine-Aval 5 HYMOSED – Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine. 62p.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1233-x>
- Grasso, F., Verney, R., Le Hir, P., Thouvenin, B., Schulz, E., Kervella, Y., Khojasteh Pour Fard, I., Lemoine, J.P., Dumas, F., Garnier, V. (2018). Suspended Sediment Dynamics in the Macrotidal Seine Estuary (France): 1. Numerical Modeling of Turbidity Maximum Dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(1), 558–577. <https://doi.org/10.1002/2017JC013185>
- Grasso, F., Mengual, B., Le Hir, P., Walther, R. (2020). Rapport du projet Seine-Aval 6 Morphoseine – Modélisation de l'évolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Seine. 74p.
- Guezennec, L. (1999). Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). Thèse de doctorat, Université de Rouen, 254p.

- Idlafkih Z., Cossa D., Meybeck M. (1995). Comportement des contaminants en trace dissous et particulaires (As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) dans la Seine. *Hydroécologie appliquée* Tome 7 Vol1-2, pp127-150.
- HAROPA. (2020). Rapport d'activité 2019 l'essentiel.
- Hibma, A., Wang, Z. B., Stive, M.J.F., & De Vriend, H.J. (2009). Modelling Impact of Dredging and Dumping in Ebb-Flood Channel Systems. *Transactions of Tianjin University*, 15(1), 70–74. <https://doi.org/10.1007/s12209>
- Hoffmans, G., & Verheij, H. (2008). Three dimensional scour. *Proceedings of the Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008*, 2, 128–133.
- Hoslin, R., Brisset, P., Massias, J., Pogi, A., Sannie, G. (1989). tude, au moyen de traceurs radioactifs, de l'évolution des dépôts de dragage situés dans l'estuaire de la Seine – Zone de dépôt intermédiaire et du vidage aval. Rapport d'étude Du Commissariat à l'Energie Atomique.
- HPA & WSW. (2008). River Engineering and Sediment Management Concept for the Tidal River Elbe. June, 1–39.
- HPA & WSW. (2012). Work package 5 “ Measures ” Dredging and Disposal Strategies Inhalt - River Elbe. Rapport Projet Interreg IVB TIDE.
- IADC. (2011). Dredging In figures 2011. International Association of Dredging Companies Annual Review.
- IADC. (2014). Dredging the facts : Trailing Suction Hopper Dredgers. brochure de l' International Association of Dredging Companies. 5p..
- Ides, S., Plancke, Y. (2013). Disposal strategy to create ecological valuable habitats in the Western Scheldt estuary. MARID 2013: Fourth International Conference on Marine and River Dune Dynamics. Bruges, Belgium, 15-17 April 2013, 65(April), 141–147. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Jeuken, M.C.J.L., Wang, Z. B. (2010). Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems. *Coastal Engineering*, 57(6), 553–566. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.004>
- Jonsson, I.G. (1966). WAVE BOUNDARY LAYERS AND FRICTION FACTORS. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(10 SE-Conference Proceedings). <https://doi.org/10.9753/icce.v10.9>
- 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, Cherbourg, 89–100. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2012.010-K>
- Khojasteh Pour Fard, I. (2015). Modélisation des échanges dissous entre l'estuaire de la Loire et les baies côtières adjacentes. In PhD Thesis, University of Bordeaux.
- Lafite, R., Dupont, J. P., Lamboy, M. (1986). Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine. IFREMER, Actes de Colloques, January 1985, 135–144.
- Landemaine, V. (2016). Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. PhD Thesis, University of Rouen Normandy, 235.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>
- Le Floch, J.F. (1961). Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine-Maritime. Thèse de doctorat, centre de recherches et d'études océanographiques de Paris, 578p.
- Le Hir, P. (1980). Calcul par modélisation numérique de la structure verticale des courants et application à la baie de Seine. Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale, 122 p.
- Le Hir, P., Silva Jacinto, R., Thouvenin, B., Guézennec, L., Bassoulet, P., Cugier, P., Le Boulenger, F., Hocdé, R., Lesueur, P., Romana, L. A. (2001). Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. Fascicule Seine-Aval, 1.2(1), 1–31.
- Le Hir, P., Bassoulet P., Cann P. (2006). Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine – Adaptation du modèle tassement/érodabilité et expérimentations en laboratoires. Rapport scientifique Seine-Aval 3, 46p.
- Le Hir, P., Ficht, A., Jacinto, R. S., Lesueur, P., Dupont, J. P., Lafite, R., Brenon, I., Thouvenin, B., Cugier, P. (2001). Fine sediment transport and accumulations at the mouth of the Seine estuary (France). *Estuaries*, 24(6),

- 950–963. <https://doi.org/10.2307/1353009>
- Le Hir, P. (2008). Aide méoïre de dynamique sédimentaire – Rapport Ifremer. 74P.
- Le Hir, P., Cayocca, F., Waeles, B. (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. *Shelf Research*, 31. 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.009>
- Le Hir P., Bassoullet P., Cann P., Jestin H., Kervella Y., Le Berre D. Thouvenin B., Verney R., Grasso F., Lafite R., Deloffre J., Simon M., Lemoine M. (2012). Projet MODEL : Modélisation validée de l'hydro-morpho-sédimentologie, base physique d'une modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine. Rapport scientifique Seine-Aval 4, 144p.
- Le Hir, P., Walther, R., Cayocca, F., Bioret, F., Sawtschuk, J., Vareilles, J., Bayard, E. (2017), Projet C3E2 Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires – Rapport d'études pour le Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique.
- Lemoine, M. (2014). Rôle des affluents intra-estuarien et des vasières intertidales dans le bilan sédimentaire – Cas de l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 206p.
- Lemoine, J.P., Deloffre, J., Lafite, R., Macur, O., Hervé, G., Guillon, C. (2013). SYNAPSES Système de surveillance automatisée de la physico-chimie de l'estuaire de la Seine. Acte du colloque SHF Hydrométrie 2013. 8p.
- Lemoine, J.P., Verney, R., Cayrol, C., Deloffre, J., Fisson, C., Grasso, F., Guézennec, L., Hamm, L., Landemaine, V., Lesourd, S. (2015). Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine. Fascicule Seine-Aval 3.3, 64p.
- Lemoine J.P., Verney R., Le Hir P., Grasso F. (2016). Bilan sédimentaire de l'estuaire de Seine : état des connaissances - Colloques SHF : Gestion des sites à fortes sédimentations Le Havre 8 et 9 novembre 2016.
- Lemoine, J.P., Le Hir, P., Grasso, F. (2020). Numerical Study of Sediment Transport in the Seine Estuary: Contribution of Dredging. In K. D. Nguyen, S. Guillou, P. Gourbesville, & J. Thiébot (Eds.), *Estuaries and Coastal Zones in Times of Global Change* (pp. 241–255). Springer Singapore.
- Lesourd, S. (2000). Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 319p.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Brun-Cottan, J.C., Garnaud, S., Poupinet, N. (2003). Seasonal variations in the characteristics of superficial sediments in a macrotidal estuary (the Seine inlet, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1), 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00340-2](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00340-2)
- Lesourd, S., Brun-Cottan J.C., Lesueur P., Deloffre J., Lafite R., Caillaud J., Philippe S. (2005). Le tassement des vases de l'estuaire de la Seine. Rapport scientifique Seine-Aval 3, 50p.
- Liu, M., Zhang, H.W. (2019). Correction of the Artificial Influence on Dredging Volume in the Yangtze Estuary Deep-water Channel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/2/022004>
- Lonsdale, J., Manson, S., Jeynes, T. (2013). Sediment Management in the Humber Estuary : Dredging and Disposal Strategies – Study in the framework of the Interreg IVB project TIDE. Rapport Projet Interreg IVB TIDE, March, 62.
- Luan, H. L., Ding, P. X., Wang, Z.B., Ge, J.Z., Yang, S.L. (2016). Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects. *Geomorphology*, 265, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.022>
- Maerker, C., Malcherek, A. (2010). The simulation tool DredgeSim – Predicting dredging needs in 2- and 3-dimensional models to evaluate dredging strategies, *River Flow 2010 – Ditttrich, Koll, Aberle & Geisenhainer* (eds), Bundesanstalt Für Wasserbau ISBN 978- 3-939230-00-7
- Marmin, S. (2013). Impacts biosédimentaires des expérimentations de clapages en baie de Seine sur la communauté des sables moyens propres à *Nephtys cirrosa* [Université de Caen Basse-Normandie]. <https://hal-normandie-univ.archives-ouvertes.fr/tel-01922183>
- Marmin, S., Dauvin, J.C., & Lesueur, P. (2014). Collaborative approach for the management of harbour-dredged sediment in the Bay of Seine (France). *Ocean and Coastal Management*, 102(PA), 328–339.
- Martelo, A. F., Trombetta, T.B., Lopes, B.V., Marques, W.C., Möller, O. (2019). Impacts of dredging on the hydromorphodynamics of the Patos Lagoon estuary, southern Brazil. *Ocean Engineering*, 188(June),

- Massei, N., Fritier, N. (2010). Quantification de l'évolution spatiotemporelle de la contribution de la nappe de la Craie au débit de la Seine Aval. Rapport scientifique Seine-Aval 4, 62p.
- Meersschaut, Y., Parker, W.R., Peters, J.J., & Plancke, Y. (2004). A dredging and disposal strategy for managing the Western Scheldt's morphology and ecology. Dredging in a Sensitive Environment: Proceedings of the World Dredging Congress XVII, Hamburg, Germany, 27 September–1 October 2004, 1–11.
- Mengual, B., Hir, P. Le, Cayocca, F., Garlan, T. (2017). Modelling fine sediment dynamics: Towards a common erosion law for fine sand, mud and mixtures. *Water (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/w9080564>
- Mengual, B. (2018). Rapport de Post-doctorat effectué dans le cadre du projet Seine-Aval MorphoSeine. 44p.
- Mengual, B., Le Hir, P., Rivier, A., Caillaud, M., Grasso, F. (2020). Numerical modelling of bedload and suspended load contributions to morphological evolutions of the Seine estuary (France). *International Journal of Sediment Research*.
- Muntoni, M. (2020). Rapport du projet PROPOSE : Potentialités de RestauratiOn des habitats clés pour les Poissons dans l'estuaire de la SEine. GIP Seine-Aval , 84p.
- Newell, R.C., Seiderer, L. J., Hitchcock, D.R. (1998). The impact of dredging works in coastal waters: A review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed. *Oceanography and Marine Biology*, 36(July), 127–178.
- Nguyen, D.H., Levy, F., Pham Van Bang, D., Guillou, S., Nguyen, K.D., Chauchat, J., Florence, L., Pham Van Bang, D., Sylvain, G., Dan, N., Julien, C. (2012). Simulation of dredged sediment releases into homogeneous water using a two-phase model. *Advances in Water Resources*, 48, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.009>
- Peters, J., Wens, F. (1991). Maintenance dredging in the navigation channels in the Zaïre river inner delta. Proceedings of the Third International conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Mombassa, September 1991., 975–988.
- Poizot, E. (2009). La dynamique sédimentaire au travers de la géostatistique et des systèmes d'informations géographiques. Thèse de doctorat de l'université de Perpignan, 263p.
- Rhoads, D.C., McCall, P.L., Yingst, J.Y. (1978). Disturbance and Production on the Estuarine Seafloor: Dredge-spoil disposal in estuaries such as Long Island Sound can be managed in ways that enhance productivity rather than diminish it. *American Scientist*, 66(5), 577–586. <http://www.jstor.org/stable/27848852>
- Roland, A., Ardhuin, F. (2014). On the developments of spectral wave models: Numerics and parameterizations for the coastal ocean Topical Collection on the 7th International Conference on Coastal Dynamics in Arcachon, France 24-28 June 2013. *Ocean Dynamics*, 64(6), 833–846. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0711-z>
- Salomon, J.C. (1976). Modèle mathématique de la propaga- tion de la marée en estuaire et des transports sableux asso- ciés; application aux estuaires de la Loire et de la Seine. Thèse de l'université de Bretagne occidentale, 257 p.
- Salomon, J. C., Le Hir, P. (1980). Etude de l'estuaire de la Seine - Modélisation numérique des phénomènes physiques.
- 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. <https://doi.org/10.1002/2016JC012638>
- Seity, Y., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Shukla, V.K., Konkane, V.D., Nagendra, T., Agrawal, J.D. (2015). Dredged Material Dumping Site Selection Using Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 116(Apac), 809–817. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.368>
- Silva Jacinto, R., (2005). Action des vagues sur les estrans et vasières Application à l'estuaire de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 207p.

- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Telford. <http://site.ebrary.com/id/10868638>
- Soulsby, R.L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R.R., Thomas, G.P. (1993). Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21(1–3), 41–69. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90045-A](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90045-A)
- Taal, M. D. (2012). ' Sand ' Balance Approach - Assessing sediment budgets and transports using bathymetric data. Rapport Projet Interreg IVB TIDE, 18.
- Talke, S.A., De Swart, H.E. (2006). Hydrodynamics and Morphology in the Ems estuary Review of Models , Measurements , Scientific Literature , and the Affects of Changing Conditions. Review Literature And Arts Of The Americas, February, 1–76.
- Thomas, C.G., Spearman, J.R., Turnbull, M.J. (2002). Historical morphological change in the Mersey Estuary. *Continental Shelf Research*, 22(11–13), 1775–1794. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00037-7)
- Thouvenin B., Gonzales J.L., Chiffolleau J.F., Boutier B., Le Hir P., (2007). Modelling Pb and Cd dynamics in the Seine estuary. *Hydrobiologia*, 588, 109–124.
- Van Kessel, T., Vanlede, J., Van Holland, G. (2015). Human versus natural mud fluxes in the Scheldt estuary: are they significant and if so, how can they best be optimised? Scheldt Estuary: Physics and Integrated Management - Special Session on of the 36th IAHR WORLD CONGRESS, 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands, 1, 34–37.
- Van Leussen, W. (1994). Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport = Macrovlokken en hun bijdrage aan de slijbtransporten in estuaria. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, National Institute for Coastal and Marine Management (RIKZ).
- Van Maren, D.S., van Kessel, T., Cronin, K., Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95(October), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>
- Vaslet, D., Larssonneur, C., & Auffret, J. (1978). Les sédiments superficiels de la Manche 1/500 000. Carte Géologique de La Marge Continentale Française. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Centre National Pour l'Exploitation Des Océans.
- Verney R. (2006). Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs, mesures in-situ, mesures expérimentales et modélisation, application à l'estuaire de Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 330p.
- Viennot P., Ducharne A., Habets F., Lamy F., Ledoux E. (2009). Hydrogéologie du bassin de la Seine. Programme PIREN-Seine, Fascicule 2. 55p.
- Vos, G., Plancke, Y., Ides, S., De Mulder, T., Mostaert, F. (2012). Sediment relocation to shallow water near Walsoorden sandbar Alternative relocation strategy Westerschelde Relocation test Walsoorden . Final evaluation of relocation test 2006. November.
- Waeles, B., (2005). Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie, 225p.
- Waeles, B., Le Hir, P. (2006). Simulation des activités de dragage et de leur impact sédimentaire à l'aide d'une modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. 471–481. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2006.046-w>
- Walther, R., Delinares, M., Hamm, L., Galichon, P., Scherrer., P. (2015). Développement d'un modèle numérique 3D morphodynamique de l'estuaire de la Seine. ECSA – Le Havre.
- Wang, Z.B., Winterwerp, J.C. (2001). Impact of dredging and dumping on the stability of eeb-flood channel systems. *Proceedings of the 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 3, 3–12.
- Wildish, D.J., Thomas, M.L. (1985). Effects of Dredging and Dumping on Benthos of Saint John Harbour, Canada. 15, 45–57.
- Winterwerp, J.C., Wang, Z.B., Stive, M.J.F., Arends, A., Jeuken, M.C.J. L., Kuijper, C., Thoolen, P.M.C. (2001). A new morphological schematization of the western Scheldt estuary, the netherlands. In *Proceedings of the 2nd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Winterwerp, J.C., & Wang, Z. B. (2013). Man-induced regime shifts in small estuaries - I: Theory. *Ocean Dynamics*, 63(11–12), 1279–1292. <https://doi.org/10.1007/s10236-013-0662-9>
- Wu, W., & Lin, Q. (2014). Nonuniform sediment transport under non-breaking waves and currents. *Coastal Engineering*, 90, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.006>
- Zhao, J., Guo, L., He, Q., Wang, Z. B., van Maren, D. S., & Wang, X. (2018). An analysis on half century morphological changes in the Changjiang Estuary: Spatial variability under natural processes and human intervention. *Journal of Marine Systems*, 181(February), 25–36.

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure I.1: Illustration des différents types de dragage. a) dragage mécanique: drague stationnaire à benne; b) dragage hydraulique: drague aspiratrice en marche rejetant dans l'air la mixture eau-sédiment ("rainbowing") ; c) dragage par injection d'eau : l'Ostrea, drague du GIE -Dragages-Ports utilisées par le port de Bordeaux. (sources des illustrations précisées sur les photos)	15
Figure I.2 : Localisation des zones de dragages et clapages dans l'estuaire de la Loire et technique de dragage utilisée selon les secteurs (GIP Loire Estuaire 2011)	16
Figure I.3:Cartographie de l'estuaire de l'Elbe avec les ports de Cuxhaven, Brunsbüttel et Hamburg et zoom sur le piège à sédiment (HPA/WSW 2012)	17
Figure I.4 : Localisation des zones de dragages et de clapages de l'Escaut utilisées depuis 2010 avec la technique flexible dumping. Les zones hachurées représentent les zones de clapages. Les zones avec une étoile correspondent aux sites sur lesquels des immersions utilisant la technique morphological dredging sont réalisées (VNSC 2016 in Cox, 2018)	18
Figure I.5: Carte de l'estuaire de la Seine de Poses à l'embouchure. (pk : point kilométrique, la référence des points kilométriques (pk 0,00) se situe au Pont Marie à Paris)	20
Figure I.6 : Principaux flux sédimentaires naturels et anthropiques en estuaire, quantifiés d'après la bibliographie. Les flux sédimentaires induits par les dragages du GPMH et du GPMR sont indiqués en orange et en vert respectivement. Simplifié d'après Lemoine et al. (2015)	22
Figure I.7 : Schéma de la prise en compte du dragage parmi les processus hydro-morpho-sédimentaires	25
Figure II.1: Statistiques journalières sur les débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013 avec superposition des hydrogrammes de l'année humide 2001 et de l'année sèche 1990	32
Figure II.2 :Évolution des débits moyens mensuels des affluents intra-estuariens et de la Seine à Poses calculés à partir des débits journaliers de 1996 à 2006 (Lemoine et al., 2015)	32
Figure II.3: Évolution des hauteurs d'eau dans l'estuaire de la Seine (données mesurées par le GPMR)	34
Figure II.4: Statistiques des vents en baie de Seine entre 1995 et 2011 calculées à partir du modèle Météo-France Arpège (D'après rapport final du projet Seine-Aval MODEL)	34
Figure II.5 :Illustration de la propagation d'une houle d'ouest dans la baie de Seine, représentation de la hauteur significative des vagues le 1 ^{er} mars 2008 (simulation WaveWatch3 projet Seine-Aval MODEL)	35
Figure II.6 : Rose des vagues à l'embouchure calculée à partir des données de la bouée Metzinger entre février 2011 et Mai 2012 (Données Candhis CETMEF)	36
Figure II.7: Illustration de la propagation d'une houle d'ouest à l'embouchure, Représentation de la hauteur significative des vagues le 1 ^{er} mars 2008 (simulation WaveWatch3, projet Seine-Aval MODEL)	36
Figure II.8: Calcul des agitations en baie de Seine orientale, pour différentes phases d'une marée de vive-eau. Les flèches représentent le courant de marée (d'après Jacinto in Le Hir et al., 2001)	37
Figure II.9: Répartition des vitesses de courants au niveau de l'embouchure pour différents moments de la marée en conditions moyennes (débit : $397\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, coeff. de marée 83) vitesses moyennées sur la hauteur d'eau – Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)	38
Figure II.10: Répartition des vitesses résiduelles de courants barotropes pour l'année 2010 - Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)	39

Figure II.11 : Variation de la salinité en lien avec la marée à l'embouchure (site de Fatouville). Données mesurées dans le cadre du Projet Seine-Aval 4 MODEL (Le Hir, 2012)	40
Figure II.12: Représentation des salinités moyennes à l'embouchure pour l'année 2010 – Modélisation MARS 3D (Lemoine et al., 2015)	40
Figure II.13 : Illustration du gradient vertical de salinité pour deux conditions hydrologiques contrastées. En haut : basse mer de morte eau, en crue (débit : $1076 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, coeff. : 29, le 13 mars 2007). En bas : pleine mer de vive eau, en étiage (débit : $248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, coeff. : 94, le 2 août 2007) (Lemoine et al., 2015)	41
Figure II.14 : Temps de transit des eaux de Poses à l'embouchure pour différents débits de la Seine à Poses (Lemoine et al. 2015)	41
Figure II.15 : Cycle des matières en suspension en estuaire (d'après Maggi 2005 in Verney, 2006)	43
Figure II.16 : Evolution de la concentration en MES à Val-des-Leux, des coefficients de marée et du débit sur l'année 2012 (données SYNAPSES) (les bandes grises correspondent aux périodes de grandes vives eaux)	46
Figure II.17: Mécanismes à l'origine du bouchon vaseux; (A) circulation résiduelle; (B) asymétrie de marée (d'après Dyer et al., 1986 et Allen et al 1980, in Deloffre 2005)	46
Figure II.18: Évolution de la concentration en MES sur le site de Fatouville du 18/09/2010 au 3/10/2010	48
Figure II.19 : Masse du bouchon vaseux simulée en fonction du marnage à l'embouchure. Les triangles rouges représentent les phases de revif, les triangles bleus les phases de déchets. La masse du bouchon vaseux est ici estimée en ne considérant que la zone située entre les digues submersibles (Grasso et al., 2018)	48
Figure II.20 : Position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine en marée de vive eau. Les triangles pointant vers le haut (resp. vers le bas) représentent les positions à basse mer (resp. à pleine mer), Les triangles noirs correspondent aux estimations faites par Avoine (1981) à partir de mesures in-situ. Les triangles rouges correspondent à la médiane de la concentration en MES simulée de Août 2014 à août 2015. Les barres verticales rouges représentent la variabilité de cette position (écart-type) induite par les cycles VE/ME (kp=kilometer point = pk) (Grasso et al., 2018)	49
Figure II.21 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 11 février 2008 (données qualitatives) ; marée : pleine mer, débit : $912 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (in Le Hir et al., 2012)	49
Figure II.22 : Distribution spatiale des concentrations en MES de surface mesurée par le satellite MODIS le 3 mars 2007 (données qualitatives) ; marée : mi-jusant, débit : $1285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (in Le Hir et al., 2012)	50
Figure II.23 : Répartition des faciès sédimentaire dans l'embouchure de la Seine en 2009 (échantillonnage 2009-2010) (Lesourd In Dauvin 2012)	51
Figure II.24: Illustration des différentes phases du tassement des vases (schéma adapté de Migniot, 1989 in Lesourd (2005) ; à droite : tests de consolidation en laboratoire (photo Bassoullet, in Le Hir et al., 2006)	52
Figure II.25 : Illustration et exemple de résultats issus d'expériences de tassement de différents mélanges sablo-vaseux sur 23 jours (Le Hir et al., 2006). Mélange 1 : 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 200 g/l ; Mélange 2: 80% Vases, 20% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 3: 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 4: 20% Vases, 80% Sables, concentration initiale : 400 g/l ; Mélange 5 : 50% Vases, 50% Sables, concentration initiale : 600 g/l	53

Figure II.26: Évolution de la contrainte critique d'érosion en fonction de la teneur en fine du sédiment (d'après Le Hir et al., 2011)	54
Figure II.27: Illustration des différents modes de transport des sédiments	54
Figure II.28 : Conditions de débit, hauteurs d'eau et variations de topographie enregistrées par des mesures piquets (disques, carrés et triangles) et un altimètre ponctuel (points rouges) mesurées sur la vasière de Petiville (Lemoine, 2014). La localisation de Petiville est indiquée sur le plan général de l'estuaire	57
Figure II.29 : Synthèse qualitative du fonctionnement des vasières intertidales de l'aval vers l'amont en fonction du débit de la Seine et des forçages (marée, houle, batillage)	58
Figure II.30: Evolution quotidienne : des débits fluviaux, des concentrations pondérales de MES calculées et des flux de MES au barrage de Poses (pk 202) entre 1996 et 2004 (Données Service Navigation de la Seine ; retraitées dans le cadre du projet SA5 AFFLUSEINE)	59
Figure II.31: Relations entre charge solide et débit de la Seine actualisées par Guezennec 1999	59
Figure II.32 : Interprétation des relations entre charge solide/débit liquide au barrage de Poses (d'après Guezennec 1999)	60
Figure II.33 : Dénomination des zonages principaux de l'estuaire utilisés par le GPM Rouen pour quantifier ses dragages (GPMR & IDRA-Ingénierie, 2014) (GPMR & IDRA-Ingénierie, 2014)	62
Figure II.34: Localisation des sites de dragages et clapages de l'estuaire de la Seine	63
Figure II.35 :Schéma d'une drague aspiratrice en marche à deux élinde (confluence.qpl.nl)	65
Figure II.36 : Évolution des masses draguées par le GPMR dans le cadre des dragages d'entretien de l'estuaire aval. Les quantités sont exprimées en tonnes de matières sèches (Données GPMR). n.b. à partir de mai 2017 les clapages ne sont plus réalisés sur le site du Kannik mais sur celui de Machu.	66
Figure II.37: Évolution des masses draguées par le GPMH dans le cadre des dragages d'entretien. Les quantités sont exprimées en tonnes de matières sèches (Données GPMH)	67
Figure II.38 : Localisation des différents secteurs dragués du GPMH (GPMH, 2014)	68
Figure II.39 : a) Exemple d'évolution des volumes dragués à la Brèche et à l'Engainement de janvier 2010 à décembre 2011 (rapport de suivi des activités de clapage et dragage de sédiments de l'estuaire aval du GPMR, années 2010 et 2011) (GPMR comm. pers.)	68
Figure II.40: Granulométrie moyenne des sédiments des zones de l'Engainement et de la Brèche en 2014 (GPMR, 2015)	69
Figure II.41 :Taux de stabilité des sédiments clapés dans la zone du Kannik (GPMR, 2010)	70
Figure II.42: Représentation des casiers de clapages du GPMH et répartition des volumes clapés (en couleur) (d'après GPMH 2014)	71
Figure II.43: Différentiel bathymétrique 2015-2010 à l'embouchure de la Seine et quantification des surfaces/volumes en dépôt et érosion (d'après Lemoine et al., 2016)	72
Figure III.1 : Localisation et caractéristiques des zones de dragage et clapage prises en compte dans le modèle. Les sites de clapages sont entourés en vert et bleu (GPMR & GPMH resp.). Les zones hachurées à proximité des sites de clapages et les chiffres entre parenthèses dans le tableau correspondent aux emprises considérées dans le calcul de stabilité des sites présenté au chapitre IV	77
Figure III.2: Illustration de l'épaisseur de sédiment draguée selon les différents couches du modèle sédimentaire	78

- Figure III.3 : Évolution des masses draguées par le GPMR et le GPMH en fonction de la valeur de CoefZ0coup. Ces résultats sont issus de simulation réalisées avec une ancienne version du modèle sédimentaire et ne sont pas directement comparables aux résultats présentés dans le reste du manuscrit _____ 80
- Figure III.4 : Hauteurs d'eau simulées (en rouge) et mesurées (en bleu) du 14 au 22 septembre 2010 sur les sites de Oissel (a,b), Duclair (c,d), Caudebec en Caux (e,f), Tancarville (g,h), Fatouville (i,j) et balise A (k,l). à gauche : évolutions temporelles ; à droite Hauteurs d'eau simulées versus hauteurs mesurées avec le coefficient de détermination r^2 et l'erreur quadratique moyenne e_{rms} . Les points rouges représentent les sorties du modèles (dt=2h) _____ 82
- Figure III.5 : Comparaison entre vagues calculées et vagues observées (Hauteur significative H_s et vitesse orbitale U_{orb}) à l'ouest du banc du Ratier (Ratelets) (d'après Mengual, 2018) _____ 83
- Figure III.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 Tancarville (b, c), Fatouville (d, e) et Balise A (f, g). (b, d, f) : séries temporelles mesurées (noir) et simulées (rouge) ; (c, e, g) : corrélations entre MES simulées et MES mesurées (rouge) _____ 84
- Figure III.7 : Évolution des concentrations en MES simulées sur l'ensemble de la colonne d'eau (a, c, e) et comparaison des concentrations en MES simulées à 1m au-dessus du fond à proximité des stations de mesures (plusieurs lignes continues en couleur, correspondant à des mailles voisines selon une direction transverse au chenal) avec les mesures réalisées par le réseau de mesures SYNAPSES (bleu) et dans le cadre des campagnes océanographiques à bord du Cote de la Manche (CDLM) (vert et rouge (b, d, f)) pour les stations Balise A (a, b), Fatouville (c, d) et Tancarville (e, f) _____ 85
- Figure III.8: Image satellite de la station SYNAPSES Fatouville prise le 22 aout 2015 illustrant la présence d'un panache turbide (Google Earth) _____ 86
- Figure III.9: Évolution morphologique de l'estuaire aval entre 2009 et 2016. A Gauche : Bathymétries h_0 (cote relative au niveau moyen de la mer); à droite : différentiels bathymétriques Δz , mesurés et simulés (d'après Grasso et al, 2020) _____ 87
- Figure III.10 : Emprises des zones de cubatures considérées dans la Figure III.11 (d'après Walther et al., 2015). FN : fosse nord _____ 88
- Figure III.11: Évolutions des volumes de sédiment (cubatures) intégrés en 10 zones de l'estuaire aval (définies sur la Figure III.10), d'après les observations bathymétriques du GPMR analysées par Artelia (symboles) ou simulées par le modèle (lignes noires) _____ 89
- Figure III.12 : Distribution des surfaces par classes bathymétriques h_0 (mCMH) mesurées et simulées sur les périodes de septembre 2009 à septembre 2016. L'emprise de calcul est indiquée sur la carte miniature _____ 91
- Figure III.13: bathymetry of the area of interest with dredging and dumping areas and submersible dykes. The dredged zones LH, E and B are represented in blue, green and orange respectively. Other dredged zone are represented in hatched red. _____ 96
- Figure III.14 : Computational grid and bathymetry of the Seine Estuary numerical model and zoom in the area of interest for this study (a) and in the bay of Seine (b). Cells of the three dredged zones (LH, E and B), studied in section 4 are represented in blue, green and orange resp. Cells of the dumping sites Octeville and Kannik are represented in beige. Cells considered to compute the ETM dynamics accordingly to Grasso et al. 2018 are surrounded by a solid black line. On the bay of Seine map (b), the area designated by the letter V represent the area considered to define wave data (cf. 2.4). Point W correspond to the location of the wind data used in section 4 _____ 97
- Figure III.15: Grain size comparison between in situ data and model results averaged over the 10 years period in zones E (a) and B (b). _____ 101
- Figure III.16: Comparison of yearly dredged masses of mud and sand between in-situ reference and model results for the reference run over the simulated period (from January 1st 2009 to December

31st 2018), on the three main dredged areas Zone LH (a), Zone E (b) and Zone B (c). First column represents the in-situ reference, while the second and third column represent the results of simulations averaged over 10 years for the realistic and QCD runs respectively. The other 10 columns represent the yearly results of the realistic run. _____ 102

Figure III.17 :Chronological overview of the dataset from January 2009 to December 2018: Fortnightly averaged dredged masses for zone LH, E and B (a)), ETM mass calculated in the area specified on Figure III.14 (b); tidal range and river discharge (daily and cumulated) (c), and waves hourly and cumulated) Hs (d). Cumulated river discharge and cumulated wave Hs were scaled to reach maximum of their respective daily data. The alternance of grey and white areas in the background highlights each hydrological years (from august 1st to July 31st). _____ 104

Figure III.18: Daily and cumulated dredged masses along the hydrological year 2017-2018 for the 3 sites zone LH (a), zone E (b) and zone B (c) together with daily and cumulated river discharge (d), tidal range (e) and hourly waves significant height Hs (f). Waves direction are represented by colors as indicated in the circular legend, and the cumulated sum of wave Hs are superimposed on the wave plot in order to highlight seasonal trends. Daily and cumulated dredged masses are provided for the reference run (dark color) and the quasi continuous run (light color). _____ 105

Figure III.19: Daily dredged mass (DDM) and associated mud fraction (color) in response to river discharge, tidal range, and wave conditions for the three zones: LH (blue frame), E (green frame) and B (yellow frame). First column represents the fortnightly averaged DDM vs river discharge, the second column DDM vs tidal range (with distinct symbols according to its sign of variation : > between neap to spring and < spring to neap tide phase), and the third column DDM vs daily maximum wave Hs. Large symbols are used to represent DDM averaged over successive ranges of forcing values. _____ 107

Figure III.20: a).Wind and waves correlation during the simulated period. b) Wind speed and direction during the simulated period. Waves and wind data where respectively extracted at zone V and point W specified on Figure III.14 (cf. section 3.4). _____ 108

Figure III.21 :Effect of wind-induced circulation on dredged masses during the hydrological year 2017-18. (a) daily and cumulated dredged mud in zone E, computed with (dark green) or without (light green) wind effect on circulation; (b) daily and cumulated dredged sand in zone E, computed with (dark green) or without (light green) wind effect on circulation; (c) wind speed and direction (color, same code as in Figure III.21.b);. d) difference between total DDM computed in zone E without and with wind effects on circulation, versus wind speed and direction (color). _____ 109

Figure III.22: Relations between daily dredged masses and forcing using the same layout as Figure III.19. Bars represent the DDM of sand (light color) and mud (dark color), averaged for different ranges of the three forcings (abscissa): river discharge, tidal range and wave intensity. Lines represent the polynomial regression over the whole data set (i.e. not the class-averaged DDM represented by the bars). Polynomial regressions are not represented when the associated coefficient of determination R^2 is close to zero (table 1). _____ 110

Figure III.23: Daily dredged masses of mud (a) and sand (b) at zone E computed with the parametric model vs total DDM provided by the process-based model, for the 9 simulated years. _____ 112

Figure III.24: Total distribution of dredged masses of sand (light colors) and mud (dark colors) versus hydro-meteorological forcings : a) river discharge, b) tidal range and c) maximum daily wave Hs, over the 10 years simulated period. Colors represent the dredged zone : LH in blue, E in green and B in yellow. The probability density function of each forcing during the simulated period is represented as a solid black line and the associated cumulative density function as a dashed gray line(right axis). Each probability density function is scaled to get its maximum =1 as the cumulative density function. _____ 113

Figure III.25: Interannual variability of the hydrometeorological forcings and yearly dredged masses for the 9 hydrological years from august 2009 to august 2018. Hydrometeorological forcings are characterized by the yearly mean river discharge (a) and the yearly percentile 95 of the wave Hs (b). Zone LH, E and B are represented using blue, green and orange resp. Hydrological years are indicated at the top of each figure, using the last digits of concerned year (for instance 11/12 for the year mid-2011 / mid-2012). _____ 114

- Figure III.26: Relation between the ETM (daily maximum mass and daily median position) and mud DDM simulated on the three zones: a) zone LH; b) zone E ; c) zone B. Position units (pk) are distance from Paris (in km), represented on Figure III.13. _____ 117
- Figure IV.1 : Schéma du processus de traçage numérique des dragages. Les zones en verts représentent les mailles draguées avec la côte consigne en rouge. Les zones hachurées représentent les mailles du sites d'immersion. Sur cet exemple deux dragages d_1 et d_2 sont effectués. Les masses de sédiment draguées en d_1 et d_2 sont rejetées sous la forme d'une masse de sédiment marquée et diluée dans la moitié de la colonne d'eau au niveau des sites d'immersions. _____ 128
- Figure IV.2: Évolution temporelle des masses de sédiments dragués et marqués dans le modèle, pour le GPMR et le GPMH, dans le cas du scénario tendanciel KAN _____ 130
- Figure IV.3 : Évolution des stabilités apparentes et effectives totales (i.e. vases et sables) des dépôts sur les sites de Kannik et Octeville de janvier 2014 à juillet 2018 _____ 133
- Figure IV.4 : Caractérisation des 9 années simulées en fonction du débit moyen annuel mesuré à Poses, du percentile 90 des hauteurs de vagues observées à l'embouchure et du nombre de jour présentant concomitamment une crue ($Q > 700 \text{ m}^3/\text{s}$) et une tempête ($H_s > 1,3 \text{ m}$) _____ 135
- Figure IV.5 : a) distribution des concentrations médianes de MES sur l'année 2017-2018. pour le scénario de référence KAN ; b) Médiane sur l'année 2017/2018 des concentrations en MES issues des sédiments déjà dragués et clapés (Rouen et Le Havre) ; c) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et NOC (concentration KAN - concentration NOC) : effets des clapages ; d) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios NOC et NOD (concentration NOC - concentration NOD) : effets des dragages ; e) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et NOD (concentration KAN - concentration NOD) : effets combinés des dragages et des clapages _____ 136
- Figure IV.6: Moyenne sur l'estuaire interne des médianes annuelles de concentrations en MES (moyennées sur la profondeur) dans l'estuaire interne durant les 9 années hydrologiques simulées pour les configurations KAN / NOC / NOD. L'emprise "estuaire interne" considérée est indiquée sur la carte en vignette _____ 137
- Figure IV.7: Évolution de la masse maximale par marée et de la position médiane par marée (couleur) du bouchon vaseux au regard des forçages en débits de Seine et marées (d) et vagues (e) pour les scénarios KAN (a), NOC (b) et NOD (c). Pour chaque scénario la moyenne de la masse maximale par marée et la moyenne de la position médiane sur les 9 ans simulés est indiquée dans le titre de la figure. Les moyennes annuelles des masses et positions du bouchon vaseux sont indiquées pour chaque année en noir _____ 139
- Figure IV.8: Contribution des sédiments marqués à la masse du bouchon vaseux pour les scénarios KAN (a) , NOC (b) et NOD (c) au regard des forçages marée/débit (d) et vagues (e). Pour chaque année hydrologique, la moyenne de la contribution de chaque vase est indiquée en italique en respectant la couleur de la légende. Sur la légende, le pourcentage représente la contribution moyenne sur les 9 ans _____ 140
- Figure IV.9 : Teneur en vase du sédiment superficiel après 9 ans de simulation. a) distribution de la teneur en vase du sédiment superficiel (5cm) moyennée au cours du mois de juillet 2018, pour le scénario de référence KAN ; b) proportion (pourcentage) de vases préalablement clapés par les ports de Rouen et du Havre (état en juillet 2018) ; c) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios KAN et NOC (% KAN - % NOC) : effets des clapages ; d) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios NOC et NOD (% NOC - % NOD) : effets des dragages ; e) différence de teneur en vase (en %) du sédiment superficiel entre les scénarios KAN et NOD (% KAN - % NOD) : effets combinés des dragages et clapages. Les valeurs de c), d) et e) sont établies pour une épaisseur de 5 cm et moyennées pendant le mois de juillet 2018 _____ 142
- Figure IV.10 : Cumuls des surfaces associées à différentes classes de teneur en vases de 0 à 100 % du sédiment superficiel (5 cm) en fin d'initialisation du modèle (KAN 2009) et en fin de simulation

- (juillet 2018) pour les scénarios KAN, NOC et NOD. L'emprise d'intégration des surfaces est indiquée dans la vignette _____ 143
- Figure IV.11 : Évolution des moyennes mensuelles des teneurs en vases dans les 5 cm superficiels pour les 3 scénarios KAN/NOC/NOD sur la période 2009-2017. L'emprise de calcul des moyennes est indiquée en orange dans la vignette _____ 144
- Figure IV.12 : Répartition dans les fonds sédimentaires des moyennes durant le mois de juin des masses de sédiments (vases et sables) immergés par le port de Rouen au Kannik et par le port du Havre à Octeville. (les échelles de couleurs sont strictement identiques sur chacune des cartes) _____ 145
- Figure IV.13 : Évolution des moyennes mensuelles dans l'estuaire interne(cf. vignette) des teneurs en sédiments marqués par les dragages/clapages de Rouen et du Havre dans le sédiment superficiel (5 cm) au cours de la période 2009-2017 (Scénario KAN) _____ 146
- Figure IV.14 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des vases immergées par le GPMR au Kannik de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²/kg). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes _____ 147
- Figure IV.15 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des vases immergées par le GPMH à Octeville de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²/kg). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes _____ 148
- Figure IV.16 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des sables immergés par le GPMR au Kannik de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²/kg). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes _____ 149
- Figure IV.17 : Moyenne pendant le mois de juillet de chaque année des distributions relatives sur le fond des sables immergés par le GPMH à Octeville de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²/kg). Chaque année, la distribution relative est obtenue en divisant les masses par unité de surface par la masse totale clapée depuis le début. L'échelle de couleur est la même pour toutes les cartes _____ 150
- Figure IV.18 : Répartition des sédiments marqués sur le fond après 3 ans : a) sédiments clapés par le port de Rouen et b) sédiment mobile ("once eroded"), après 3 ans de simulation _____ 151
- Figure IV.19 : Différentiels bathymétriques simulés pour les trois scénarios KAN (a), NOC (b) et NOD (c). Les érosions résiduelles sont en couleurs froides, les dépôts résiduels sont en couleurs chaudes _____ 153
- Figure IV.20 : Différentiels des évolutions bathymétriques associées aux scénarios (a) KAN et NOC (i.e. évolution KAN - évolution NOC), (b) NOC et NOD (i.e. évolution NOC - évolution NOD), et (c) KAN et NOD (i.e. évolution KAN - évolution NOD), sur la période juillet 2009 – juillet 2018. Une couleur chaude indique plus de dépôt ou moins d'érosion dans le premier scénario que dans le deuxième, une couleur froide le contraire _____ 154
- Figure IV.21 : Évolution des volumes de sédiments (cubatures) pour 10 secteurs de l'estuaire et pour les 3 configurations KAN, NOC, NOD, en regard des évolutions des forçages, débit et vagues sur la période 2009-2018. Les croix vertes représentent les évolutions des cubatures mesurées par le GPMR et les incertitudes associées. Les secteurs sont présentés sur la Figure III.10 _____ 155
- Figure IV.22 : Évolutions des surfaces hypsométriques de l'estuaire modélisées pour les scénarios KAN (noir) , NOC (vert) et NOD (rouge). Les surfaces hypsométriques initiales sont rappelées en gris. L'emprise d'intégration des surfaces est indiquée dans la vignette _____ 156

- Figure IV.23: Évolution annuelle des dragages simulés pour les scénarios KAN et NOC (a et b respectivement). Les valeurs de référence in-situ sont rappelées à gauche sur chaque graphe (In-situ réf), suivies des simulations moyennes sur la période juillet 2009 / juin 2018, puis des valeurs annuelles simulées. Les quantités de sables (vases) draguées sont indiquées par des couleurs pâles (saturées). Le panneau c) présente le ratio entre les masses de sables et de vases draguées dans le scénario NOC et celles du scénario KAN. Le ratio moyen du total sable + vase est indiqué dans le titre _____ 158
- Figure IV.24 : Évolution temporelle des contributions des différentes sources sédimentaires marquées aux dragages dans les bassins et chenaux d'accès du port du Havre (Zone LH), à l'Engainement (Zone E) et dans le secteur de la Brèche (Zone B) sur la période juillet 2009 – juillet 2018. Les pourcentages moyens sur la période de chaque classe par rapport à la masse totale draguée (sable + vase) sont indiqués dans la légende _____ 159
- Figure IV.25: Évolution temporelle i/ de la remobilisation sédimentaire cumulée totale (sables et vases) intégrée sur la zone de l'estuaire interne (ligne pleine) et au niveau des zones draguées (ligne tiretée), et ii/ du cumul des masses draguées par les deux ports (sables et vases) (rouge) sur l'année hydrologique 2017/2018 pour les scénarios KAN (bleu) et NOD (cyan). L'emprise de l'estuaire interne est rappelée dans la vignette _____ 162
- Figure IV.26: Variations interannuelles des flux sédimentaires, des masses draguées et du bilan sédimentaire de l'estuaire interne, distinguant vases et sables, pour les 4 dernières années hydrologiques simulées, de juillet 2014 à juillet 2018 et pour les trois scénarios KAN, NOC, NOD. a et b : flux sédimentaires en suspension au niveau de Tancarville (limite amont de la zone de l'estuaire interne) et à Poses (a), et à l'embouchure de l'estuaire (limite aval de la zone de l'estuaire interne)(b). c : variation interannuelle des masses draguées dans l'ensemble de l'estuaire. d : Bilan sédimentaire sur la zone de l'estuaire interne. Les flux sont positifs lorsqu'ils sont dirigés vers l'amont. Les flux à Poses sont identiques pour les 3 scénarios. Les bilans sont positifs en cas de sédimentation nette en moyenne, négatifs en cas d'érosion nette en moyenne. Les sections et zones considérées sont indiquées Figure IV.28 _____ 165
- Figure IV.27 :Variations interannuelles des flux sédimentaires, des masses draguées et du bilan sédimentaire de l'estuaire externe, distinguant vases et sables, pour les 4 dernières années hydrologiques simulées, de juillet 2014 à juillet 2018 et pour les trois scénarios KAN, NOC, NOD. a et b : flux sédimentaires en suspension (a) au niveau de la section Offshore Ouest, et au niveau de la section Offshore Nord (b). c : bilan sédimentaire sur la zone de l'estuaire externe, calculé en considérant les flux a et b ainsi que les flux à l'embouchure et les dragages (Figure IV.26). Les flux en frontière ouest sont positifs lorsqu'ils sont orientés vers l'est, ceux de la frontière nord sont positifs lorsque orientés vers le nord. Les sections et zones considérées sont indiquées Figure IV.28 _____ 167
- Figure IV.28: Localisation des sections considérées pour les calculs de flux en suspension (rouge), emprises des secteurs de l'estuaire considérés pour l'établissement des bilans sédimentaires (bleu) et localisation des zones de dragages (LH, E et B) et de clapages du Kannik et d'Octeville (vert). L'emprise de l'estuaire interne est définie comme la somme des secteurs aval, intermédiaires et amont _____ 168
- Figure IV.29: Focus sur les effets des dragages/clapages dans la Fosse Nord. a) Évolution sur la période 2009/2018 de la moyenne à l'échelle de la fosse nord (zone en rouge sur la vignette) des médianes annuelles de turbidité pour les scénarios KAN/NOC/NOD. b et d : répartition des surfaces par classes de teneur en vases (b) ou par classes hypsométriques (d), à l'échelle de la fosse nord, à l'initialisation du modèle (juillet 2009, en gris) et à la fin de la simulation (juillet 2018) pour les trois scénarios KAN/NOC/NOD. c) évolution des volumes de sédiments dans la fosse nord pour les 3 configurations KAN, NOC, NOD, en regard des évolutions des forçages (débit et vagues) sur la période 2009-2018. Les cubatures de la fosse nord sont définies comme la somme des cubatures des zones fosse nord amont, fosse nord aval, banc de la passe et méandre (Figure III.10) _ 175
- Figure IV.30 : a) Évolution de la masse totale de vases marquées (Rouen + Le Havre) et évolution des masses de vases préalablement clapées retrouvées dans les dragages ; b) évolution du pourcentage de vases marquées présent dans les masses de vases draguées (pour la totalité

Rouen + Le Havre). Calcul réalisé sur le cas KAN : immersion des dragages du GPMR au Kannik et immersion des dragages du GPMH à Octeville _____ 177

Figure IV.31: Différence des intensités des vitesses barotropes maximales entre les scénarios KAN et NOD (KAN - NOD). Calcul sur la période du 20 sept 2017 au 21 juin 2018. Les isobathes représentés correspondent à la bathymétrie du scénario NOD en sept 2017 _____ 179

Figure IV.32 : Synthèse des flux sédimentaires et dragages modélisés sur l'année hydrologique 2017/2018 (haut) et effets sur les bilans sédimentaires de l'estuaire (bas) pour les scénarios avec dragages et immersions au Kannik (KAN, à gauche) et scénario sans dragage (NOD, à droite). Les parties noires et grises des flèches correspondent respectivement au taux de vases et sables dans les flux en suspension considérés. Les flèches entourées en bleu, vert et orange correspondent aux immersions des sédiments dragués respectivement sur les sites du port du Havre, à l'Engainement et à la Brèche. Les sites de dragage sont représentés en utilisant les mêmes couleurs. En bas, les bilans sédimentaires déduits de ces flux sont représentés en distinguant vases (noir) et sables (hachurés) _____ 181

Figure V.1 : a) Localisation du site du Machu et bathymétrie mesurée avant le début des immersions (mai 2017) ; b) emprise des casiers de clapage définis par le GPMR pour les immersions sur le site du Machu des sédiments dragués dans l'estuaire aval (d'après GPMR, 2015) _____ 186

Figure V.2 : Localisation et caractéristiques des zones de dragage et de clapage prises en compte dans le modèle. Les sites de clapage sont entourés en vert et bleu (GPMR & GPMH resp.). Les zones hachurées à proximité des sites de clapage et les chiffres entre parenthèses dans le tableau correspondent aux emprises considérées pour le calcul de stabilité des sites. Les zones Kannik et Octeville sont rappelées afin de faciliter la comparaison. (PA : Port Ancien) _____ 187

Figure V.3 : Moyenne pendant le mois de juillet 2018 des distributions sur le fond des sables immergés par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) ou Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²) _____ 190

Figure V.4 : Moyenne pendant le mois de juillet 2018 des distributions sur le fond des vases immergées par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) ou Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en kg/m²) _____ 190

Figure V.5 : Médiane sur l'année 2017/2018 des concentrations de vases en suspension préalablement clapées par le GPMR au Kannik (a), à Machu (b) et Octeville R (c) de juillet 2009 à juillet 2018 (en mg/l) _____ 191

Figure V.6 : a) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et MAC (concentration KAN - concentration MAC); b) Différence des concentrations médianes de MES entre les scénarios KAN et OCT (concentration KAN - concentration OCT) pendant l'année de simulation juillet 2017 - juin 2018 _____ 192

Figure V.7 : Évolution de la masse maximale par marée et de la position médiane par marée (couleur) du bouchon vaseux au regard des forçages débits, marées (d) et vagues (e) pour les scénarios Kannik (a), Machu (b) et OctevilleR (c). Pour chaque scénario la moyenne de la masse maximale par marée et la moyenne de la position médiane sur les 9 ans simulés est indiquée dans le titre de la figure. Les moyennes annuelles des masses et positions du bouchon vaseux sont indiquées pour chaque année en noir _____ 193

Figure V.8 Contribution des sédiments marqués à la masse du bouchon vaseux pour les scénarios Kannik (a) , Machu (b) et Octeville R (c) au regard des forçages marée/débit (d) et vagues (e). Pour chaque année hydrologique, la moyenne de la contribution de chaque vase est indiquée en italique en respectant la couleur de la légende. Sur la légende, le pourcentage représente la contribution moyenne sur les 9 ans _____ 194

Figure V.9: Différentiels des évolutions bathymétriques sur la période 2009-2018, a) associés aux scénarios KAN et MAC (i.e. évolution KAN - évolution MAC), et b) aux scénarios NOC et NOD (i.e. évolution KAN - évolution NOC) _____ 195

- Figure V.10 : Évolution des volumes de sédiments pour 5 secteurs de l'estuaire et pour les 3 configurations KAN, MAC, OCT, en regard des évolutions des forçages (débit et vagues) sur la période 2009-2018. Les croix vertes représentent les évolutions des cubatures mesurées par le GPMR et les incertitudes associées. Les secteurs indiqués dans le titre indiquent les regroupements effectués sur la base des secteurs présentés sur la figure III.10 _____ 197
- Figure V.11 : Évolutions des surfaces hypsométriques de l'estuaire interne (a) et de la fosse nord (b) modélisées après 9 ans pour les scénarios KAN (noir), MAC (jaune) et OCT (bleu). Les surfaces hypsométriques initiales sont rappelées en gris. Les emprises d'intégration des surfaces sont indiquées par les vignettes _____ 198
- Figure V.12 : a) : Évolution annuelle des dragages simulés pour le scénario avec immersion au Kannik pour les trois sites (Le Havre en bleu , Engainement en vert et Brèche en orang, idem Figure IV.23.a). Les valeurs de référence in-situ sont rappelées à gauche sur chaque graphe (In-situ réf.), suivies des simulations moyennes sur la période juillet 2009 / juin 2018, puis des valeurs annuelles. Les quantités de sables (vases) draguées sont indiquées par des couleurs pâles (saturées). Les panneaux b et c) présentent les ratio entre les masses de sables et de vases draguées dans les scénarios MAC (b) ou OCT (c) et celles du scénario KAN (b : MAC/KAN ; c : OCT/KAN). Les ratios moyens sur la période sont indiqués en premier, avant les ratios annuels. Le ratio moyen du total sable+vase est indiqué dans le titre _____ 199
- Figure V.13 : Évolution temporelle des contributions des différentes sources sédimentaires marquées aux dragages dans les bassins et chenaux d'accès du port du Havre (Zone LH), à l'Engainement (Zone E) et dans le secteur de la Brèche (Zone B) sur la période juillet 2009- juillet 2018 pour les trois scénarios KAN, MAC et OCT. Dans la légende des couleurs, les moyennes sur la période des pourcentages de chaque classe par rapport à la masse totale draguée (sable + vase) sont indiqués dans la légende _____ 200
- Figure V.14 : Évolution du pourcentage de la masse totale de vases marquées (donc déjà draguée puis clapée par le GPMR et/ou le GPMH) présente dans les masses de vases draguées. Calcul réalisé sur 3 scénarios : immersion des dragages du GPMR au Kannik (noir), Machu (jaune) et Octeville R (bleu) ; l'immersion des dragages du GPMH reste à Octeville _____ 201
- Figure V.15: Synthèse des flux de sédiments en suspension et dragages modélisés sur l'année hydrologique 2017/2018 (haut) et bilans sédimentaires de l'estuaire (bas) pour les scénarios avec immersion des sédiments dragués par le GPMR au Kannik (KAN) (gauche), à Machu (milieu) ou à Octeville R (droite). Les parties noires et grises des flèches correspondent respectivement aux proportions de vases et de sables dans les flux en suspension considérés. Les flèches entourées en bleu, vert et orange correspondent aux immersions des sédiments dragués respectivement dans les zones du port du Havre, à l'Engainement et à la Brèche. Les zones de dragage sont représentées en utilisant les mêmes couleurs. En bas, les bilans sédimentaires déduits de ces flux en suspension sont représentés en distinguant vases (noir) et sables (hachurés) _____ 205
- Figure V.16: Flux (en suspension) à l'embouchure (sédiments non dragués, dragués et totaux), quantités draguées et bilans sédimentaires dans l'ensemble de l'estuaire interne, simulés au cours de l'année hydrologique 2017-2018, distinguant sables et vases pour les 5 scénarios de dragage/clapage. Les dragages en tant que flux exportant les sédiments hors de l'estuaire interne sont représentés négativement _____ 207

Liste des Tableaux

Tableau II-1: Période de retour de l'intensité du vent mesuré au cap de la Hève (vent moyen en m.s-1 sur 3h réduit à 10m d'altitude) (ARTELIA, 2013)	35
Table III-1: Coefficient of determination R2 associated to the second order polynomial regression between DDM and river discharge, tidal range and wave Hs. Regression are shown on Figure III.22. R2 associated to tidal range is the average of the R2 associated to N2S and S2N polynomial regressions.	111
Tableau IV-1 : Scénarios modélisés et effets mis en avant par les comparaisons	127
Tableau IV-2 : Listes des différentes variables sédimentaires utilisées dans les simulations avec traçage numérique	128
Tableau IV-3: Stabilité in-situ et modélisée ainsi que densité modélisée (valeurs moyennes sur la période janvier 2014- juillet 2018), estimée selon les différentes méthodes de calcul citées section IV.3, pour les sites du Kannik et Octeville. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiment clapé (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant les mêmes densités du sédiment que celles utilisées par les ports (1,8 pour Kannik ; 1,4 pour Octeville)	132
Tableau IV-4 : Flux sédimentaires calculés pendant l'année hydrologique 2017/2018 au niveau des sections Offshore Ouest, Offshore Nord, Embouchure, Fosse Sud, Chenal, Fosse Nord, Fatouville et Tancarville et quantités draguées dans les trois zones de dragage, sur la même période, pour différents regroupements des classes sédimentaires modélisées dans le cadre des scénarios KAN, NOC et NOD. Les flux sont comptés positivement vers le nord et vers l'est. La classe "vases" correspond aux vases présentes à l'initialisation du modèle	169
Tableau IV-5 : Bilans sédimentaires (en kt) établis à partir des flux sédimentaires en suspension et des dragages sur l'année 2017/2018 pour l'estuaire externe et interne ainsi que les 3 secteurs de l'estuaire interne présenté Figure IV.28	172
Tableau V-1 : Stabilités in-situ et modélisée ainsi que densité modélisée, en valeur moyenne sur la période janv. 2014- juil.2018, évaluées selon les différentes méthodes de calculs citées section IV.3, pour le site du Machu. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiments clapés (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant une densité du sédiment constante égale à 1,8	188
Tableau V-2 : Stabilité modélisée ainsi que densité modélisée, en valeurs moyennes sur la période janv. 2014- juil.2018, évaluée selon les différentes méthodes de calculs citées section IV.3, pour le site du Machu. La stabilité effective totale est calculée en considérant la masse totale de sédiments clapés (vases et sables). La stabilité volumique est estimée en considérant une densité du sédiment constante égale à 1,8	189
Tableau V-3 : Flux de sédiments en suspension calculés pendant l'année hydrologique 2017/2018 au niveau de différentes sections (Figure IV.28) et quantités draguées dans les trois zones de dragage, sur la même période, pour différents regroupements des classes sédimentaires modélisées dans le cadre des scénarios KAN, MAC et OCT. Les flux sont comptés positivement vers le nord et vers l'est. La classe "vases" correspond aux vases présentes à l'initialisation du modèle	202
Tableau V-4 : Bilans sédimentaires (en kt) associés aux scénarios KAN, NOC, NOD, MAC et OCT établis à partir des flux sédimentaires en suspension et des dragages sur l'année 2017/2018 pour l'estuaire externe et l'estuaire interne (cf. emprises Figure IV.28). Ces bilans ne tiennent pas compte des flux de sables charriés, a priori minoritaires	204

Titre : Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : rôle des dragages d'entretien

Mots clés : fonctionnement hydro-sédimentaire, estuaire, dragage d'entretien, modélisation, Seine

Résumé : Le maintien des conditions de navigation dans les ports d'estuaires et leurs accès nécessite des dragages d'entretien récurrents. Dans l'estuaire de la Seine, les dragages réalisés par les ports de Rouen et du Havre génèrent des flux sédimentaires du même ordre de grandeur que les évolutions morphologiques et 10 fois supérieurs aux apports continentaux.

Un modèle numérique d'hydrodynamique 3D, couplé à un modèle de vagues, simulant la dynamique des sables et des vases a été adapté pour simuler les dragages comme un processus. Les matériaux déposés au-dessus d'une cote imposée sont extraits puis immergés au-dessus de sites de dépôt. Le modèle restitue les quantités de sédiments dragués à 10% près et sans dérive, leur répartition en sable et vase, et la dynamique des zones de rejet.

Des simulations réalistes pendant 10 ans montrent que les dragages sont maximaux durant la période hivernale, lorsque le débit de la Seine et les vagues sont intenses. La réponse aux différents forçages diffère selon la nature

du sédiment : dans le chenal de navigation de la Seine les dragages de vase sont corrélés à l'amplitude de marée et secondairement au débit fluvial, s'intensifiant lorsque le bouchon vaseux est proche, tandis que les dragages de sable croissent avec les vagues. Les fluctuations interannuelles des débits et des tempêtes sont à l'origine d'une variabilité des besoins annuels en dragages pouvant atteindre 50%.

Lorsque les dragages sont pratiqués, le bilan sédimentaire de l'estuaire est en déficit (-2.8 Mt/an), malgré l'augmentation des flux de sédiments marins vers l'estuaire, quel que soit le mode d'immersion testé. Ce dernier influence le taux de recyclage de sédiments dragués, ici quantifié par marquage numérique. Sans dragage, l'estuaire tend à se combler (+4,5 Mt/an) et les faciès sédimentaires sont légèrement plus vaseux. En raison de l'intensité des remobilisations sédimentaires naturelles, la dynamique des MES semble peu impactée par les dragages d'entretien.

Title : Morpho-sedimentary dynamics of the Seine estuary: the role of maintenance dredging

Keywords : hydro-sedimentary functioning, estuary, maintenance dredging, modelling, Seine

Abstract : Maintaining navigational conditions in estuarine ports and their accesses requires regular maintenance. In the Seine estuary, dredging carried out by port authorities of Rouen and Le Havre induces sediment fluxes of the same order of magnitude as the natural morphological changes and 10 times greater than continental sediment inputs.

A 3D hydrodynamic model, coupled to a wave model, simulating the dynamics of sand and mud has been adapted to simulate dredging as a process. In dredged areas, sediments deposited above an elevation threshold are extracted and then dumped above deposition sites. The model simulates the right quantities of dredged sediments (within 10% and without drift), their distribution as sand and mud, and the dynamics of disposal areas.

10-year simulations show that dredging is at its maximum during the winter period, when river discharge is high and waves are intense. The response to different forcing differs according to the sediment nature.

In the Seine navigation channel, mud dredging is positively correlated to the tidal amplitude and to the river flow, particularly when the estuarine turbidity maximum is close, while sand dredging increases with the waves. Interannual fluctuations in river flows and storms cause a variability in annual dredging requirements of up to 50%.

When maintenance dredging is carried out, despite the increased fluxes of marine sediment in the estuary, the sediment balance of the estuary is in deficit (-2.8 Mt/year) whatever the immersion strategy. The latter influences the recycling rate of dredged sediments, here quantified by numerical marking. Simulations without dredging show that the estuary tends to fill up (+4.5 Mt/year) and sediment facies become slightly muddier. Due to the intensity of natural sediment remobilization, the dynamics of suspended sediments seem little affected by maintenance dredging.



Dynamique morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine : Rôle des dragages d'entretien



Résumé : Le maintien des conditions de navigation dans les ports d'estuaires et leurs accès nécessite des dragages d'entretien récurrents. Dans l'estuaire de la Seine, les dragages réalisés par les ports de Rouen et du Havre génèrent des flux sédimentaires du même ordre de grandeur que les évolutions morphologiques et 10 fois supérieurs aux apports continentaux.

Un modèle numérique d'hydrodynamique 3D, couplé à un modèle de vagues, simulant la dynamique des sables et des vases a été adapté pour simuler les dragages comme un processus. Les matériaux déposés au-dessus d'une cote imposée sont extraits puis immergés au-dessus de sites de dépôt. Le modèle restitue les quantités de sédiments dragués à 10% près et sans dérive, leur répartition en sable et vase, et la dynamique des zones de rejet.

Des simulations réalistes pendant 10 ans montrent que les dragages sont maximaux durant la période hivernale, lorsque le débit de la Seine et les vagues sont intenses. La réponse aux différents forçages diffère selon la nature du sédiment : dans le chenal de navigation de la Seine les dragages de vase sont corrélés à l'amplitude de marée et secondairement au débit fluvial, s'intensifiant lorsque le bouchon vaseux est proche, tandis que les dragages de sable croissent avec les vagues. Les fluctuations interannuelles des débits et des tempêtes sont à l'origine d'une variabilité des besoins annuels en dragages pouvant atteindre 50%.

Lorsque les dragages sont pratiqués, le bilan sédimentaire de l'estuaire est en déficit (-2.8 Mt/an), malgré l'augmentation des flux de sédiments marins vers l'estuaire, quel que soit le mode d'immersion testé. Ce dernier influence le taux de recyclage de sédiments dragués, ici quantifié par marquage numérique. Sans dragage, l'estuaire tend à se combler (+4,5 Mt/an) et les faciès sédimentaires sont légèrement plus vaseux. En raison de l'intensité des remobilisations sédimentaires naturelles, la dynamique des MES semble peu impactée par les dragages d'entretien.

