

Projet Seine-Aval 5 **HYMOSED**

« Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-
SEDimentaire de l'estuaire de la Seine »

Volet Modélisation

Janvier 2018

Coordination : Florent Grasso

Co-Auteur : Pierre Le Hir

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2
RESUME EXECUTIF	3
SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET	4
PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET	4
RESULTATS	5
Introduction	5
I. Calibration et validation du modèle hydro-sédimentaire	6
II. Dynamique du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine	21
III. Quantification des flux et bilans sédimentaires dans l'estuaire et la baie de Seine	26
IV. Morphodynamique et évolution du substrat sédimentaire dans l'estuaire de Seine	41
Conclusion	73
BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXES	77

RESUME EXECUTIF

Le projet HYMOSED (« Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine ») du programme de recherche Seine-Aval 5 avait pour objectif d'apporter une meilleure compréhension du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine à des échelles de temps événementielle à annuelle. Le travail de modélisation s'est appuyé sur un important effort de validation à partir des nombreux jeux de données récemment acquis en estuaire de Seine.

L'analyse de la dynamique du bouchon vaseux met en évidence une translation de sa position vers l'amont par rapport aux observations des années 1980. Alors que la position du bouchon vaseux est contrôlée par le débit et la marée, sa masse est peu influencée par le débit. En revanche, le phasage tidal (i.e. déchet/revif) influence significativement la position et la masse du bouchon vaseux.

L'étude des flux et bilans sédimentaires, basée sur quatre années hydrométéorologiques caractéristiques des vingt dernières années (années moyenne, sèche, humide et tempétueuse), met en évidence une influence variée des forçages (débit, marée, vagues) en fonction des zones de l'estuaire. Le bilan sédimentaire de l'estuaire aval est relativement à l'équilibre pendant une année hydrométéorologique moyenne alors qu'une année tempétueuse provoque une perte significative de sédiment dû au large export vers le large. En revanche, une année très humide (et peu tempétueuse) a tendance à engraisser l'estuaire aval dû au renforcement de la circulation barocline vers l'amont.

Les résultats de la modélisation morphodynamique de l'estuaire de la Seine montrent les capacités du modèle à reconstituer la plupart des patrons d'érosion/dépôts que l'estuaire connaît dans la période étudiée (autour de 2010). Un dépôt excessif sur le banc du Ratier reste cependant à corriger. La modélisation morphodynamique respecte les performances du modèle relatives au transport en suspension et au bouchon vaseux, et permet de restituer les quantités draguées par les Grands Ports Maritimes du Havre et de Rouen. L'utilisation d'un facteur morphodynamique dans un environnement mixte sable et vase a pu être testée : des limites sont apparues, mais l'intérêt de la démarche pour des simulations long terme est confirmé, compte tenu de l'analogie constatée sur les patrons d'évolution morphologique.

Les résultats du projet HYMOSED ont également permis d'apporter un état des lieux des paramètres environnementaux de l'estuaire aval (hydrodynamique, hydrologie, turbidité) pour les années 2010-2011 et 2014-2015, et ainsi de contribuer à l'étude du fonctionnement écologique de l'estuaire. Dans le cadre du programme Seine-Aval, ces résultats ont directement bénéficié à différents projets (ex. ANPHYECO, ZOOGLOBAL, BARBÈS, SUSPENSE et MEANDRES).

Au volet modélisation est associé un volet mesures du projet qui se décompose en deux axes distincts : le suivi des évolutions morphodynamiques des vasières latérales intertidales et la quantification des matières en suspension (MES) de surface par télédétection couleur de l'eau.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

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

Coordination scientifique : Florent Grasso

Autres chercheurs (ou équivalents) : Matthieu Caillaud, , Pierre Le Hir, Elisabeth Schulz, Bénédicte Thouvenin, Romaric Verney

- **Equipe 2** : UMR M2C, Université de Rouen

Coordination scientifique : Benoît Laignel

Autres chercheurs (ou équivalents) : Valentin Landemaine

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

Personnes ayant contribué au suivi du projet ou ponctuellement à un atelier de travail.

Acteurs de l'estuaire : Patrice Tournier (GPMR), Albert Galicher (GPMR), Jérôme Lacroix (GPMH), Barbara Leroy (AESN)

Scientifiques : Sandric Lesourd (Université de Caen), Nicolas Flipo (Ecole des Mines), Régis Walther (Artelia), Arnaud Huguet (UMR Metis), Francis Orvain (Université de Caen), Pascal Claquin (Université de Caen), Nathalie Niquil (Université de Caen), Jérémy Lobry (IRSTEA), Patrick Meire (Université d'Anvers), Michel Tackx (Université de Toulouse), Gilles Billen (UPMC), Josette Garnier(UPMC).



RESULTATS

Introduction

Ce projet de recherche sur la modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine se place dans la continuité des travaux de modélisation entrepris dans le cadre des programmes Seine-Aval précédents. Le modèle morpho-sédimentaire (SiAM) développé au cours de Seine-Aval I, II, et III, permettait de simuler les courants 3D, la salinité, la turbidité et le transport de sédiments sablo-vaseux pour des forçages hydrodynamiques réalistes liés à la marée, au vent et au fleuve [Brenon et Le Hir, 1999 ; Le Hir et al., 2001]. Le couplage morphodynamique à court et moyen termes (2-5 ans) avait également été mis en place et présentait des résultats satisfaisants, particulièrement pour la simulation des dragages [Waeles et Le Hir, 2006 ; Waeles et al., 2007 et 2008].

Dans l'optique d'augmenter la résolution du modèle (embouchure et biefs amont) ainsi que d'étendre son emprise à l'ensemble de la baie de Seine, le modèle morpho-sédimentaire SiAM a été couplé au modèle hydrodynamique MARS3D [Lazure et Dumas, 2008] en version curviligne non-orthogonale dans le cadre du projet MODEL de Seine-Aval 4 [Kervella et al., 2012]. Cela a également permis de bénéficier des efforts de parallélisation et ainsi d'optimiser le temps de calcul des simulations. Ce modèle, validé en termes d'hydrodynamique et d'hydrologie, permet de simuler la dynamique du bouchon vaseux et de la couverture sédimentaire de manière très cohérente grâce au développement du module de transport de sédiment mixte multi-classes [Le Hir et al., 2011]. Si ce modèle morpho-sédimentaire représente un outil très intéressant pour simuler la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, il nécessitait néanmoins un important effort de validation quantitative des flux sédimentaires et de la morphodynamique à partir de mesures *in situ*.

L'ambition de ce projet était donc de valider et consolider la modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Seine, des échelles de temps événementielle à annuelle, afin de répondre aux questionnements scientifiques et sociétaux associés au fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire. Les mesures réalisées dans le cadre du programme Seine-Aval 4 et antérieures ont été exploitées et associées aux nouvelles acquisitions provenant du réseau de mesure SYNAPSES mis en place en 2014 le long de l'estuaire. Ce travail de validation du modèle hydro-sédimentaire est présenté dans le chapitre I. Une fois qu'un niveau de validation satisfaisant fut atteint, le modèle numérique a été exploité afin :

- d'étudier la dynamique du bouchon vaseux, en particulier en termes de position et de masse [chapitre II] ;
- de quantifier les flux et bilans sédimentaires (sable/vase) pour différents scénarios hydrométéorologiques caractéristiques (années sèche/humide, calme/tempétueuse) [chapitre III] ;
- d'analyser la morphodynamique et l'évolution du substrat sédimentaire dans l'estuaire de la Seine, particulièrement sur les bancs sédimentaires à l'embouchure [chapitre IV].

Ce projet a également bénéficié des résultats du projet AFFLUSEINE (Seine-Aval 5) pour estimer l'influence des apports liquides et solides des tributaires de la Seine à l'aval de Poses sur la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire [chapitre III].

I. Calibration et validation du modèle hydro-sédimentaire

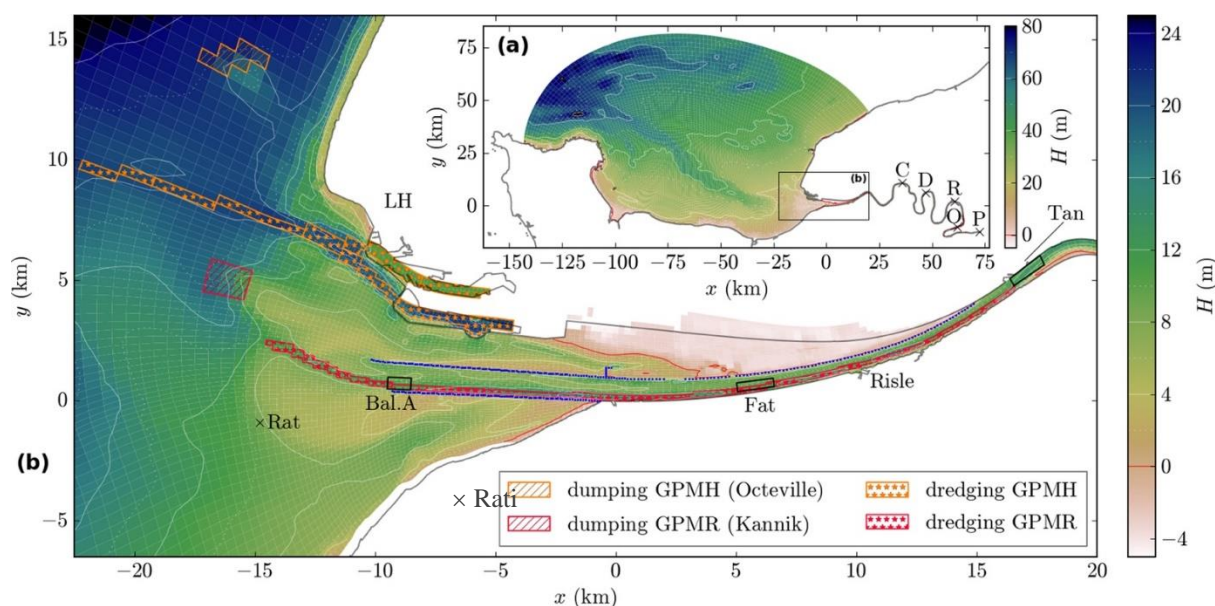


Figure 1. Bathymétrie du modèle MARS3D curviligne de l'estuaire de Seine : (a) allant de la baie de Seine au barrage de Poses 'P' avec (b) un zoom sur la partie aval de l'estuaire. Les étoiles (resp. hachures) représentent les zones de dragage (resp. clapage) du GPMH (orange) et du GPMR (rouge). Les boîtes noires à Balise A 'Bal.A', Fatouville 'Fat' et Tancarville 'Tan' représentent les zones de comparaison entre les SSC simulés et mesurés. Positions spécifiques : Le Havre 'LH', Ratelets 'Rat', Ratier 'Rati', Caudebec-en-Caux 'C', Duclair 'D', Rouen 'R' et Oissel 'O'.

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

Le modèle hydrodynamique est couplé au modèle sédimentaire multi-couches, multi-classes (sable/vase) MUSTANG [Le Hir et al., 2011], prenant en compte les processus d'érosion, suspension, dépôt et consolidation [Grasso et al., 2015]. Cinq classes de sédiment sont initialement distribuées selon les cartes de faciès sédimentaires de l'estuaire de Seine [Lesourd et al., 2015] : un gravier (diamètre médian $d_{50} = 5$ mm), trois sables ($d_{50} = 800$ μ m, $d_{50} = 210$ μ m, $d_{50} = 100$ μ m) et une vase ($d_{50} = 20$ μ m) de vitesse de chute variable $w_{s,mud} = [0,1-1,5$ mm/s] [Van Leussen, 1994]. Cependant, les classes de sédiments grossiers ne prennent pas en compte la présence de débris coquilliers, comme cela peut être observé en nature. Le modèle prend en compte les zones draguées par les Grands Ports Maritimes du Havre (GPMH) et de Rouen (GPMR) (Figure 1) en enlevant les sédiments lorsque que la cote

de fond dépasse une cote de dragage et les redéposant dans la couche de fond de la colonne d'eau dans les zones de clapage.

Le modèle hydro-sédimentaire ainsi que son paramétrage sont davantage détaillés dans l'article de Grasso *et al.* [under review], joint en Annexe V. Les fichiers de paramétrages utilisés pour les simulations des chapitres I, II et III (configuration « SE14-curv_V905_mars2016 ») sont disponibles sur : /home1/pilos/fgrasso/SEINE/Ref_HYMOSED/.

Hydrodynamique et hydrologie

La validation hydrodynamique et hydrologique du modèle MARS3D curviligne avait été réalisée dans le cadre du projet MODEL (Seine-Aval 4). Les résultats sont ici rappelés pour la période d'août 2010 à août 2011 représentative d'une année hydrologique moyenne (débit annuel moyen de 426 m³/s), caractéristique des vingt dernières années (débit annuel moyen de 450 m³/s entre 1995 et 2015 ; cf. Annexe V).

La propagation de la marée est très bien simulée, comme illustré sur la Figure 2 représentant l'élévation de la surface libre aux marégraphes de Balise A, Fatouville, Tancarville, Caudebec-en-Caux, Duclair et Oissel. Le renforcement de l'asymétrie de marée est clairement observé lors de sa propagation vers l'amont de l'estuaire.

Les gradients de salinité horizontaux et verticaux, entre les apports en eau douce du fleuve et l'eau salée marine, sont des éléments essentiels à l'hydrodynamique estuarienne et influencent fortement la dynamique du bouchon vaseux. La salinité de fond et de surface a donc été comparée à Fatouville, emplacement où les gradients de salinité sont particulièrement importants avec des variations au cours d'un cycle de marée de 0 psu à plus de 20 psu autant au fond qu'en surface (Figure 3). Les simulations sont en bon accord avec les observations sur l'ensemble de l'année 2010-2011. On note cependant une tendance du modèle à surestimer la salinité au fond en période de vives eaux (VE).

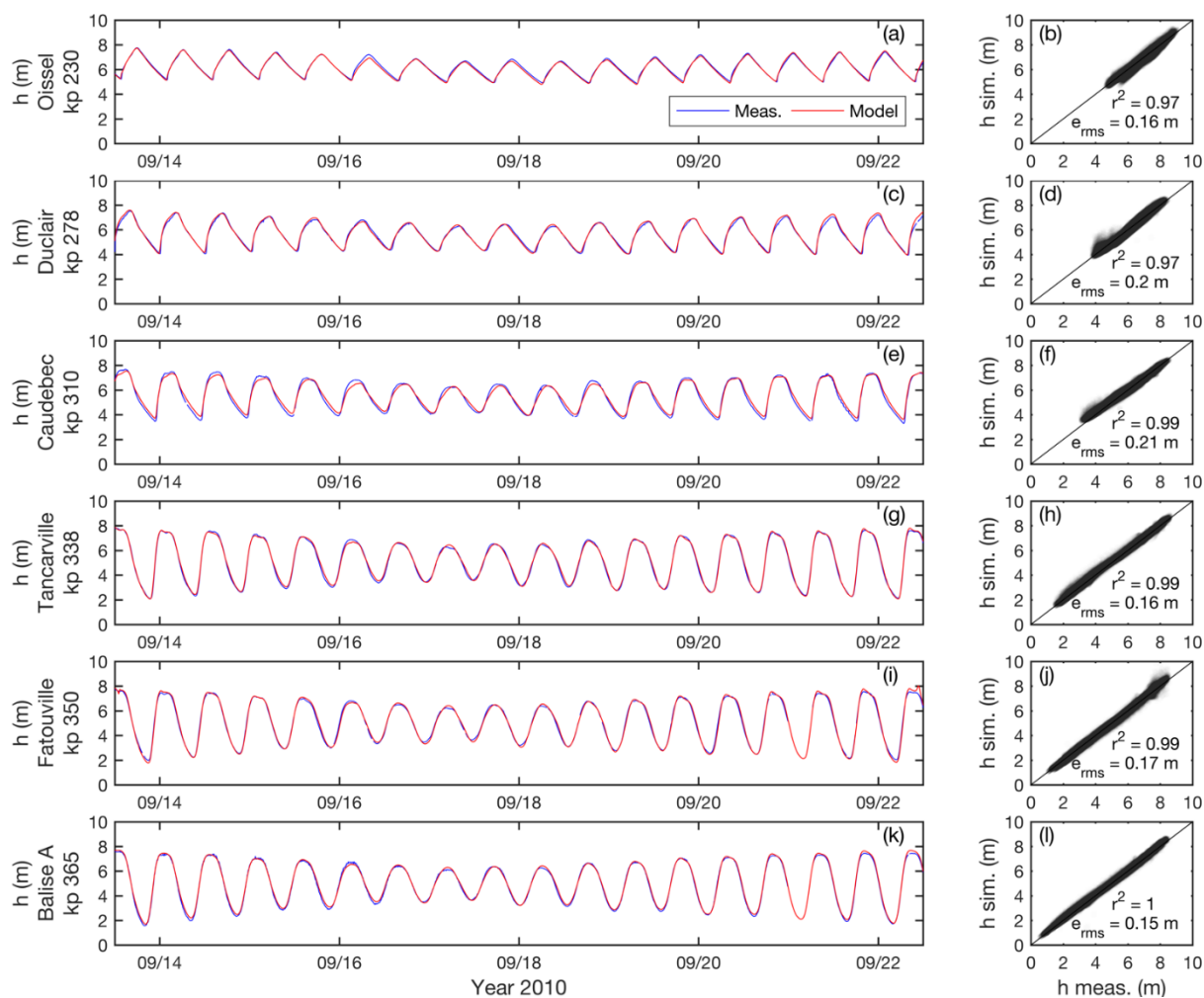


Figure 2. Elévation de la hauteur d'eau h à (a, b) Oissel, (c, d) Duclair, (e, f) Caudebec-en-Caux, (g, h) Tancarville, (i, j) Fatouville et (k, l) Balise A (voir positions sur la Figure 1). (A gauche) Mesures (bleu) et simulations (rouge) du 14 au 22 septembre 2010. (A droite) simulations versus mesures d'août 2010 à août 2011, avec le coefficient de corrélation au carré r^2 et l'erreur quadratique e_{rms} . kp représente le point kilométrique le long de la Seine, défini à 0 à Paris.

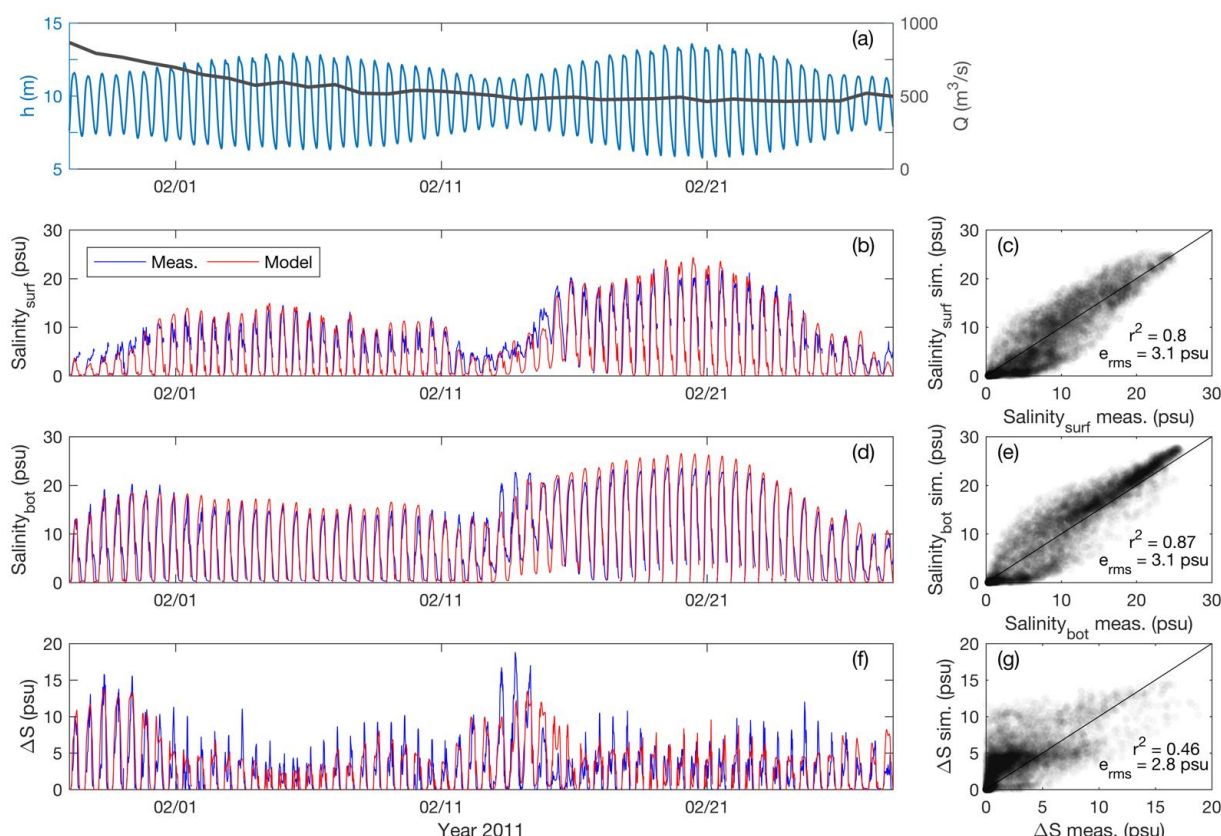


Figure 3. (a) Hauteur d'eau h simulée à Fatouville (bleu) et débit de la Seine Q mesuré à Poses (gris foncé). (b-c) Salinité de surface, (d-e) salinité de fond et (f-g) gradient de salinité ΔS à Fatouville. (b, d, f) Salinité mesurée (bleu) et simulée (rouge) du 28 janvier au 28 février 2011. (c, e, g) Simulations versus mesures de septembre 2010 à mai 2011.

Vagues

Les simulations du modèle WW3 prennent en compte la houle venue du large simulée par un modèle de plus grande emprise (Atlantique Nord) puis forcée aux limites du modèle, ainsi que les vagues générées localement en baie de Seine par le vent. Le modèle de propagation des vagues prend ensuite en compte les variations de la surface libre (XE) et la réfraction par les courants, issus du modèle MARS3D. Cela implique que le modèle MARS3D hydrodynamique doit d'abord être lancé pour générer les champs de XE et de courant forçant le modèle WW3. Une fois les simulations de vagues obtenues, le modèle MARS3D hydro-sédimentaire peut être lancé en considérant l'influence des vagues sur la contrainte de frottement au fond.

La calibration du modèle de vagues WW3 a permis de nettement améliorer l'estimation des vagues, et des vitesses orbitales associées U_w , entraînant une meilleure estimation des contraintes de frottement au fond induites par les vagues ($\tau_w = 0,5 \cdot \rho \cdot f_w \cdot U_w^2$), avec $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ la densité de l'eau et f_w le paramètre de friction des vagues. De plus, l'interaction entre la direction de propagation des vagues et la direction du courant a été prise en compte pour calculer la contrainte de frottement totale τ selon Soulsby [1997 ; Eqs. 69-70]. La hauteur significative des vagues H_s et la vitesse orbitale U_w simulées par WW3 ont été comparées aux mesures des stations des Ratelets et du Ratier (resp. 'Rat' et 'Rati' sur la Figure 1) collectées au cours du projet MODEL entre septembre 2010 et février 2011 (Figure 4). La dynamique est bien simulée par le modèle avec des coefficients de corrélation au carré

très satisfaisant ($r^2 = 0,72-0,81$) et des erreurs quadratiques moyennes de l'ordre de $e_{rms} = 3,7-4,8$ cm/s. Les dispersions observées sur les figures de corrélation (Figure 4c, e, g et i) peuvent s'expliquer par des déferlements bathymétriques se produisant à très faible profondeur (marée basse), plus délicats à calibrer.

Afin d'évaluer la nécessité de forcer la simulation des vagues avec les données de XE et courant (gain de temps de calcul), un test de sensibilité a été effectué en comparant les simulations de H_s et U_w aux Ratelets avec et sans prise en compte de XE et du courant calculés par MARS3D (figures en Annexe II). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 1. Il ressort que l'augmentation de l'erreur quadratique pour les simulations de U_w sans prise en compte de XE et du courant n'est pas si forte (+15%) par rapport aux simulations de référence. Pour des simulations morphodynamique à long terme, il pourrait donc être fait le choix de simuler les vagues sans forçage provenant du modèle MARS3D et ainsi de gagner en temps de calcul.

Tableau 1. Comparaisons entre les mesures et les simulations de vagues (WW3) aux Ratelets avec/sans prise en compte des forçages de surface libre (XE) et de courant simulés par MARS3D, de septembre à décembre 2010 (figures en Annexe II).

		Forçage : avec XE et courant (référence)	Forçage : avec XE, sans courant	Forçage : sans XE, sans courant
Hauteur significative H_s	r^2	0,83	0,81	0,79
	e_{rms} (cm)	19,5	20,5	21,8
Vitesse orbitale U_w	r^2	0,83	0,80	0,77
	e_{rms} (cm/s)	4,7	5,0	5,4

Dynamique des sédiments en suspension

L'analyse de la dynamique des sédiments en suspension, comme l'étude du bouchon vaseux (Partie II) et la quantification des flux et bilans sédimentaires (Partie III), s'est basée sur le modèle hydro-sédimentaire sans couplage morphodynamique. C'est-à-dire que les évolutions altimétriques du lit sédimentaire, résultant des processus d'érosion/dépôt, ne sont pas prises en compte pour réactualiser la bathymétrie. Cette hypothèse est valable dans la mesure où les variations altimétriques sont relativement faibles par rapport à la hauteur d'eau et ne modifient donc pas l'écoulement hydrodynamique. Cela est le cas pour l'étude des environnements estuariens à l'échelle annuelle [e.g. *Amoudry et al.*, 2014 ; *Yu et al.*, 2014 ; *Bi and Toorman*, 2015 ; *Toublanc et al.*, 2016]. Cependant, pour l'étude de l'évolution hydro-sédimentaire de l'estuaire à des échelles de temps plus longues (>2-5 ans), il est nécessaire de prendre en compte les évolutions bathymétriques à travers un couplage morphodynamique. Ceci fait l'objet de la Partie IV. Le travail de calibration et de validation des sédiments en suspensions présenté ci-dessous s'appuie sur le modèle sans couplage morphodynamique, dit de « référence ». Les simulations des sédiments en suspension issues du modèle avec couplage morphodynamique sont également comparées aux mesures et aux simulations du modèle de référence.

Le travail de calibration et de validation du transport sédimentaire en suspension s'est appuyé sur les jeux de données très riches collectés dans le cadre des programmes de recherche Seine-Aval et du réseau de mesure SYNAPSES. Cependant, de fortes incertitudes pesaient sur les mesures de turbidité réalisées en 2010-2011 dans le cadre du projet MODEL.

En conséquence, les données *in situ* présentées dans cette étude concernent les mesures de turbidité 2014-2015 issues du réseau SYNAPSES aux points Balise A (bouée), Fatouville (ponton) et Tancarville (ponton) (Figure 1) qui encadrent l'étendue du bouchon vaseux au cours de son cycle hydrologique annuel. Le débit moyen sur l'année août 2014 – août 2015 est de 516 m³/s, proche du débit moyen des vingt dernières années. Des études réalisées dans le cadre des projets FLUMES et SUSPENSE (Seine-Aval 4 et 5) mettent en évidence une forte variabilité du coefficient de calibration (c_{cal}) entre la turbidité mesurée en NTU ($turb_{NTU}$) et la concentration en g/l des matières en suspension SSC (Suspended Sediment Concentration) vis-à-vis des variations hydrologiques et tidales : $SSC\ (g/l) = c_{cal} \times turb_{NTU}$. c_{cal} a été estimé à partir de 565 prélèvements collectés à Fatouville et Tancarville entre janvier 2015 et juin 2016 [Druine et al., 2016; Table 3, p.25]. Dans cette étude, nous utilisons le coefficient de calibration moyen associé à une incertitude de 50%, soit $c_{cal} = 0,0012 \pm 0,0006$. De plus, des mesures complémentaires, issues de campagnes en mer réalisées dans les chenaux en face des pontons de Fatouville et Tancarville, font apparaître des variations significatives en termes de phasage et d'intensité, nous amenant ainsi à relativiser les valeurs des mesures *in situ*. En effet, il n'est pas encore bien défini quelle est la représentativité de ces mesures de turbidité réalisées le long du rivage par rapport à la turbidité dans le chenal (risques de perturbation des piles de ponton, frottement latéral des rives, etc.). Ce questionnement fait, en partie, l'objet du travail de thèse de Flavie Druine dans le cadre du projet SUSPENSE.

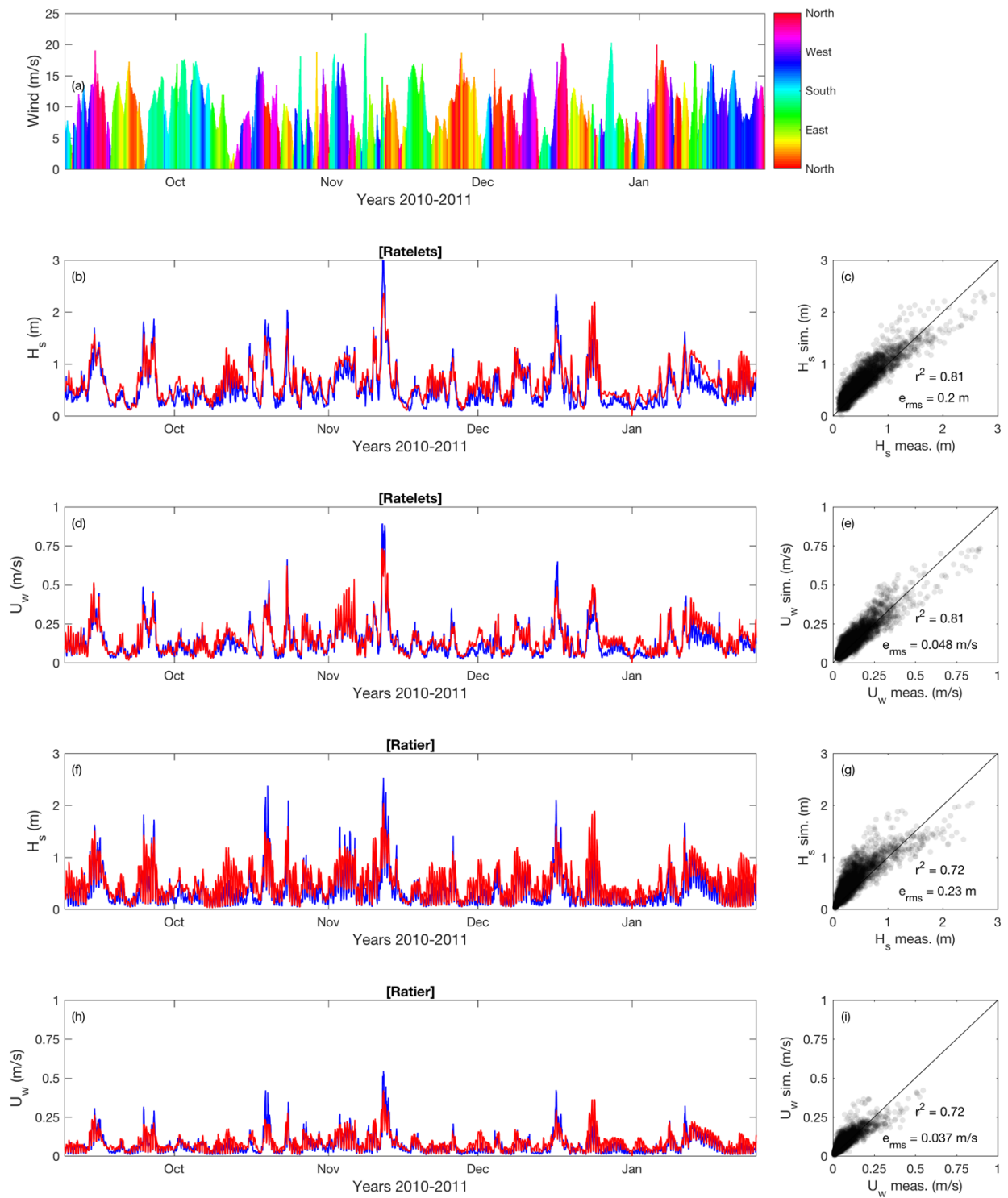


Figure 4. Conditions de vent (ARPEGE) et de vagues (WW3) aux stations des Ratelets et du Ratier entre septembre 2010 et janvier 2011. (a) Vitesse du vent et direction (couleur). Hauteur significative des vagues H_s aux Ratelets (b, c) et au Ratier (f, g). Vitesse orbitale des vagues U_w aux Ratelets (d, e) et au Ratier (h, i). (b, d, f, h) Mesures en bleu et simulations en rouge.

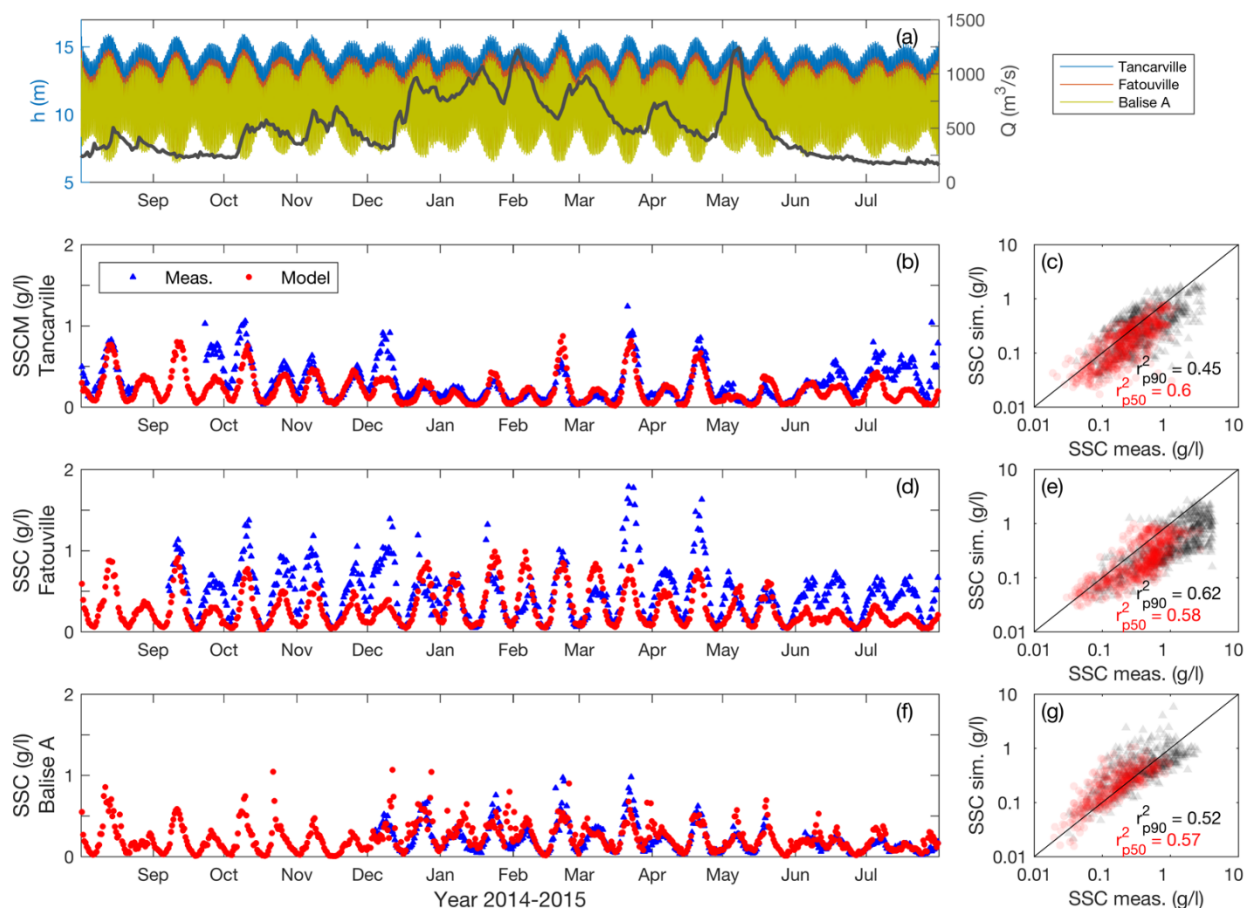


Figure 5. Dynamique des SSC proche du fond (1 m) moyennés par marée d'août 2014 à août 2015. (a) Débit de la Seine Q (gris) et hauteur d'eau h à Balise A (bleu), Fatouville (vert) et Tancarville (magenta). (b, d, f) SSC médiane (i.e. percentile 50) mesurée (bleu) et simulée (rouge), et (c, e, g) percentile 50 (rouge) et percentile 90 (noir) de la SSC simulée versus mesurée à (b, c) Tancarville (d, e) Fatouville et (f, g) Balise A.

Les résultats de modèle présentés dans cette étude correspondent à des simulations réalisées après une année de *spin up*. C'est-à-dire que le modèle a simulé une année, puis la condition finale de l'année (hydrodynamique, distribution sédimentaire, matières en suspension, etc.) a été utilisée pour initialiser une nouvelle année de simulation étant la référence. Cela permet de garantir la bonne tenue du bouchon vaseux après un cycle hydrologique complet (crue/étiage). De plus, les niveaux de turbidité de l'année de référence après un an de *spin up* sont très proches de ceux de l'année initiale, attestant la robustesse et la bonne conservativité du modèle aux échelles de temps annuelles.

La Figure 5 illustre les caractéristiques hydro-sédimentaires simulées par le modèle à Balise A, Fatouville et Tancarville. Les quantités tracées représentent les valeurs moyennes par zone d'étude (4x4 mailles, soit environ 400 m x 200 m, voir Figure 1), afin d'améliorer la représentativité des simulations. La hauteur d'eau moyenne aux différentes stations varie d'environ 10 à 12 m (Figure 5a) et la contrainte de frottement au fond est essentiellement due aux courants de marée, excepté à Balise A en période de tempêtes (Figure 5b). Les Figure 5c, d et e représentent les SSC médianes (percentile 50) au cours d'un cycle de marée, mesurées et simulées. Le modèle simule relativement bien les SSC mesurées aux stations, autant en termes d'intensité que de phasage tidal (VE/ME), avec cependant une sous-estimation de l'intensité à Fatouville. Le phasage hydrologique est également bien simulé, avec une augmentation en SSC à Balise A et diminution à Tancarville lorsque que le débit

augmente (bouchon vaseux translaté à l'aval), et inversement lorsque le débit diminue. Cependant par fort étiage (ex. juillet 2015), les SSC simulées à Tancarville sont sous-estimées, signifiant que le bouchon vaseux simulé semblerait ne pas être suffisamment en amont à cette période.

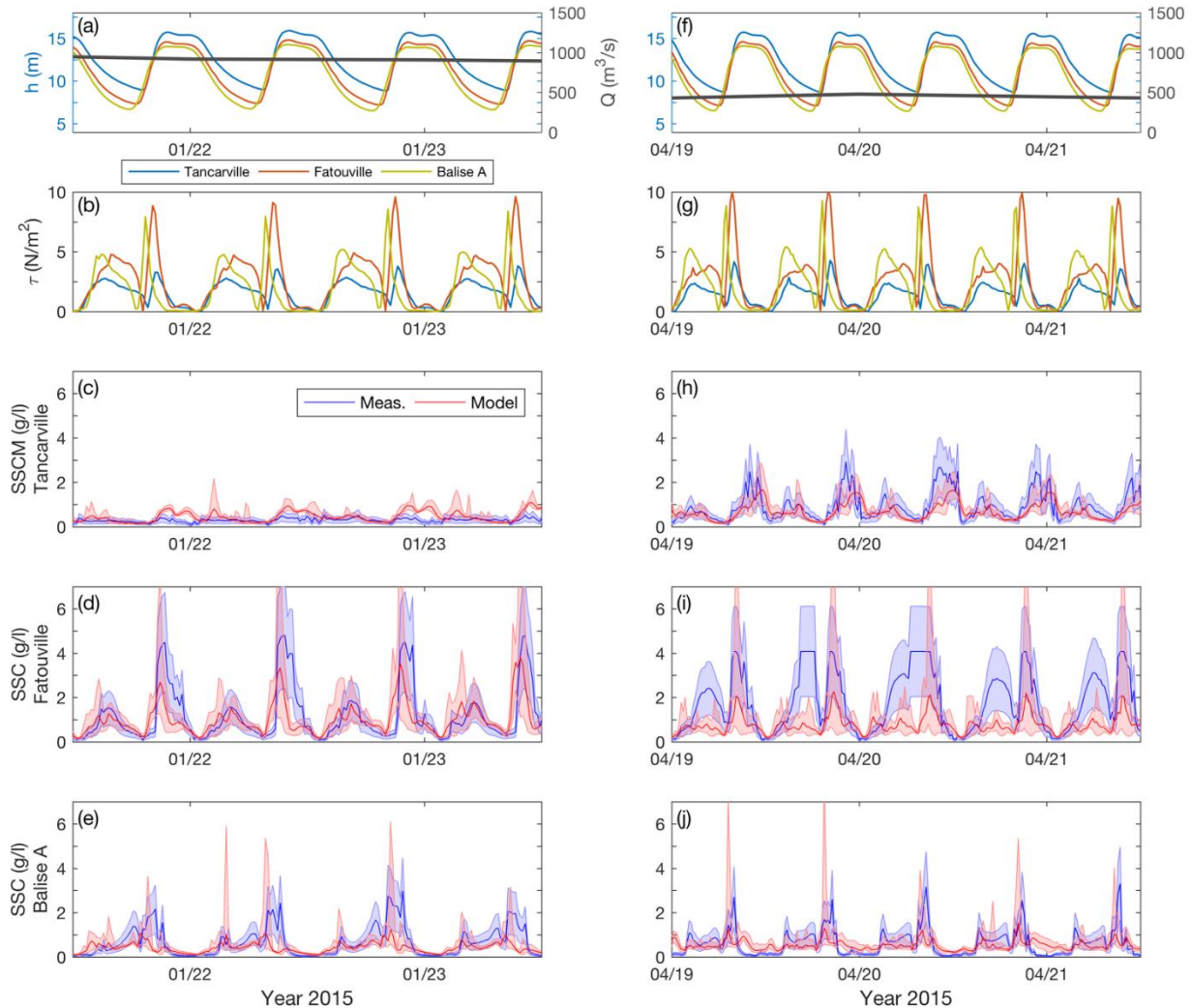


Figure 6. Dynamique des SSC proche du fond (1 m) à haute fréquence (15 minutes) par fort débit (à gauche, 21-23 janvier 2015) et par débit moyen (à droite, 19-21 avril 2015). (a, f) Débit de la Seine Q (gris) et hauteur d'eau h ; (b, g) contrainte de frottement au fond τ simulée à Balise A (bleu), Fatouville (vert) et Tancarville (magenta). (c, d, e, h, i, j) SSC mesurée (bleu) et simulée (rouge), à (c, h) Tancarville, (d, i) Fatouville et (e, j) Balise A. Pour les simulations, les zones colorées représentent les valeurs min et max dans les boîtes noires définies sur la Figure 1b ; pour les mesures, elles représentent les incertitudes sur le coefficient de calibration des SSC. La saturation du capteur de turbidité est observée à Fatouville en avril 2015.

De manière analogue à la Figure 5, la Figure 6 représente les caractéristiques hydro-sédimentaires en période de crue (janvier 2015 à gauche) et par débit moyen (avril 2015 à droite), mais pour les SSC mesurées et simulées toutes les 15 minutes. Les zones colorées représentent l'incertitude sur les mesures et la variabilité min/max des simulations dans les cadres définis ci-dessus et illustrés sur la Figure 1. Les résultats mettent en évidence une forte variabilité des simulations entre les points proches des berges et ceux du chenal. La sous-estimation des SSC à Fatouville est principalement marquée par débit moyen (Figure 6i) mais le phasage tidal est dans l'ensemble correctement simulé aux différentes stations. Toutefois,

les pics de concentration mesurés à Balise A aux étales de basse mer, probablement dus à la décantation du bouchon vaseux, sont généralement sous-estimés par le modèle (Figure 6e et j).

Sachant que les masses sédimentaires draguées par les ports dans les chenaux de navigation menant au GPMH et GMPR représentent une part importante des flux sédimentaires à l'embouchure, il était nécessaire de confronter les simulations de dragage aux observations. De manière encourageante, les masses draguées dans le modèle sont cohérentes avec les quantités annoncées par les ports. Par exemple au cours de l'année 2010-2011, le modèle simule ~2 MT/an (~3,4 MT/an la première année de *spin up*) pour les zones GPMR (~3,8 MT/an mesurées) et ~1,8 MT/an (~2 MT/an la première année de *spin up*) pour les zones GPMH (~1,6 MT/an mesurées). Le type de sédiment dragué par le modèle est principalement vaseux (~65% de vase) pour les zones GPMH, en accord avec les observations (~85% de vase) ; toutefois, il est sablo-vaseux (~13% de vase et ~64% de sable fin) pour les zones GPMR, alors que les observations soulignent davantage une vase sablonneuse (~66% de vase et ~28% de sable fin). Un travail sur une modélisation plus fine des quantités draguées, ainsi que leurs influences sur le fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire, a été davantage développé pour la modélisation morphodynamique (chapitre IV) et fait l'objet de la thèse de Jean-Philippe Lemoine dans le cadre du projet MEANDRES (Programme Seine-Aval 6).

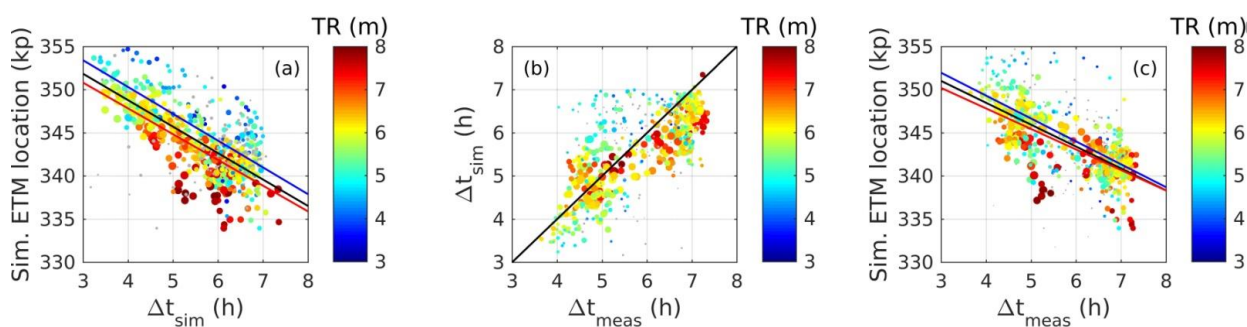


Figure 7. Méthode pour estimer la position du bouchon vaseux en fonction du déphasage Δt entre la pleine mer et le maximum de turbidité du jusant à Fatouville (d'août 2014 à août 2015). (a) Position du bouchon vaseux simulée en fonction du déphasage simulé Δt_{sim} , (b) déphasage simulé Δt_{sim} en fonction du déphasage mesuré Δt_{meas} , (c) position du bouchon vaseux simulée en fonction du déphasage mesuré Δt_{meas} . La couleur des symboles représente le marnage TR, et leur taille représente la SSC (a) simulés et (b, c) mesurés. Les lignes en (a) et (c) représentent les régressions linéaires pour l'ensemble des données (noir, TR = 3-8 m), en mortes eaux (bleu, TR = 3-5.5 m) et en vives eaux (rouge, TR = 5.5-8 m). En (b), la ligne noire représente la ligne d'égalité.

Un élément supplémentaire de validation du modèle hydro-sédimentaire consiste à comparer la dynamique du bouchon vaseux observée et simulée. Il est observé que la station SYNAPSES de Fatouville est en quasi-permanence comprise dans la zone d'excursion du bouchon vaseux au cours d'un cycle de marée, tout au long de l'année. Les résultats de modélisation montrent qu'à Fatouville, le déphasage Δt entre l'heure t_1 de pleine mer et le moment t_2 du pic de turbidité observé au jusant est corrélé au positionnement du bouchon vaseux : plus Δt est long, plus le bouchon vaseux est situé à l'amont de Fatouville ; plus Δt est court, plus le bouchon vaseux est proche de Fatouville (Figure 7a). Ce déphasage simulé Δt_{sim} à Fatouville est comparé au déphasage mesuré Δt_{meas} à la station SYNAPSES de Fatouville (Figure 7b), présentant une bonne corrélation. Cela signifie que pour des niveaux de turbidité

significatifs (gros points), le modèle simule bien le phasage du bouchon vaseux et donc son positionnement dans l'estuaire. On observe toutefois que le modèle sous-estime un peu le déphasage pour $\Delta t \sim 6-7$ h, c'est-à-dire lorsque le bouchon vaseux est en amont (i.e. en étiage). Cela confirme l'analyse de la Figure 5 comme quoi le bouchon vaseux simulé semblerait ne pas être suffisamment en amont en étiage.

En acceptant que Δt_{sim} simule Δt_{meas} de manière satisfaisante, le modèle peut ensuite être utilisé pour calibrer la relation entre Δt_{meas} et le positionnement du bouchon vaseux (Figure 7c). Cela permet ainsi d'obtenir une estimation de la position du bouchon vaseux seulement à partir des mesures de turbidité de la station SYNAPSES de Fatouville.

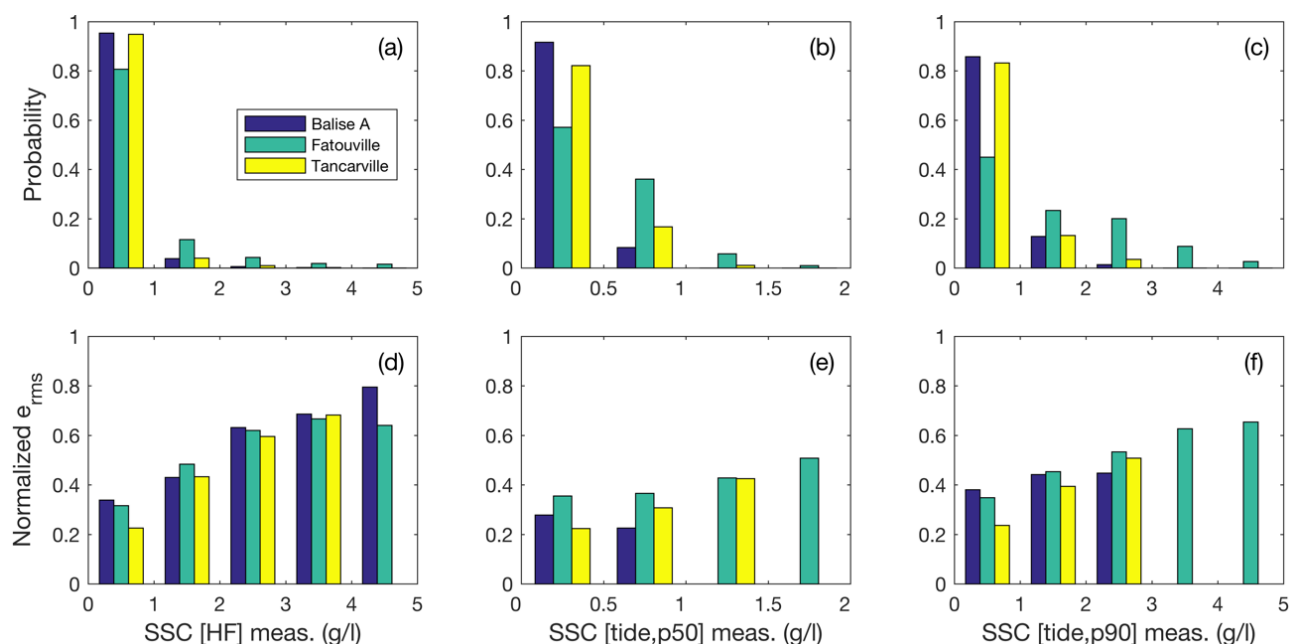


Figure 8. (En haut) Distribution des probabilités d'occurrence et (en bas) erreur quadratique normalisée : (a, d) des SSC haute-fréquence (15 minutes), (b, e) percentile 50 de la SSC par marée et (c, f) percentile 90 de la SSC par marée. Comparaisons modèle/mesures à Balise A (bleu), Fatouville (vert) et Tancarville (jaune).

Estimation de la marge d'erreur sur les SSC simulées

La modélisation numérique de la dynamique sédimentaire (sable/vase) dans les environnements estuariens est associée à des erreurs qui doivent être quantifiées pour évaluer le niveau de confiance à accorder aux simulations. L'hydrodynamique et l'hydrologie sont très bien modélisées et les principales sources d'erreur viennent de la modélisation complexe de la dynamique sédimentaire. Les marges d'erreur sur la SSC sont discutées à haute fréquence (15 minutes) et à l'échelle de la marée (Figure 8). La majorité du temps (81-95%), la marge d'erreur 'haute-fréquence' à Balise A, Fatouville et Tancarville varie entre 23 et 34% (erreur quadratique normalisée $e_{rms} = 0.23-0.34$). Pendant les pics de SSC les plus intenses (1-7% du temps), la marge d'erreur varie entre 60 et 80% (Figure 8a et d). A l'échelle de la marée, la marge d'erreur sur la SSC (percentile 50) est toujours inférieure à 50% (Figure 8b et e) ; pour le percentile 90 de la SSC, elle atteint 63-65% pendant les événements les plus intenses (11% du temps) à Fatouville (Figure 8c et f).

Les marges d'erreur sont principalement associées à une sous-estimation de la SSC, en particulier à Fatouville et Tancarville. Néanmoins, il faut rappeler que les mesures *in situ* à ces deux stations ont de grandes chances de surestimer la SSC à cause d'artefact locaux (pontons, enrochement, etc.). En conséquence, le degré de confiance qui peut être attribué à la quantification des SSC en estuaire de Seine est associé à une marge d'erreur inférieure à 50%. Un tel niveau de validation, basé sur un an de mesures haute-fréquence en trois emplacements et pour des simulations réalisées après un an de *spin-up*, fournit un degré de confiance satisfaisant pour étudier la dynamique des sédiments en suspension dans un estuaire macrotidal des échelles de temps tidales à annuelles [e.g. Amoudry et al., 2014 ; Yu et al., 2014 ; Bi and Toorman, 2015 ; Toubanc et al., 2016].

Les éléments de validation présentés ci-dessus permettent d'avoir une certaine confiance sur la capacité du modèle à simuler de manière satisfaisante la dynamique des sédiments en suspension et ainsi de pouvoir quantifier la dynamique du bouchon vaseux et de proposer des estimations de flux et bilans sédimentaires dans l'estuaire aval. Le modèle hydro-sédimentaire reste bien sûr perfectible, mais afin de respecter les délais accordés au temps de calibration dans le cadre de ce projet (en accord avec le comité de suivi), il a été décidé de s'arrêter à ce niveau de validation. Par la suite, le modèle bénéficiera des avancées en modélisation des activités de dragage associées au projet MEANDRES. Il faut également rappeler que les comparaisons présentées ci-dessus pour valider le modèle se basent sur des mesures autonomes en bordure de rivage dont la représentativité spatiale fait encore l'objet de travaux dans le cadre du projet SUSPENSE.

Comparaison des SSC pour les configurations avec ou sans couplage morphodynamique

Il est présenté ici une comparaison des simulations de SSC entre la version sans couplage morphodynamique de référence présentée ci-dessus, et la version avec couplage morphodynamique. Les simulations de la version morphodynamique présentées ci-après suivent également une période de *spin up* d'un an (année 2010-2011). La description de la configuration avec couplage morphodynamique est détaillée dans la Partie IV. Ces simulations sont très similaires aux simulations précédentes avec cependant des niveaux de concentration légèrement plus élevées (Figure 9), en particulier à Fatouville, améliorant ainsi l'accord avec les mesures.

Les différences entre les niveaux de concentration issus des modèles sans/avec couplage morphodynamique ne viennent pas significativement de l'effet du couplage, mais principalement de modifications de la configuration (e.g. distribution sédimentaire initiale, corrections bathymétriques), qui sont détaillées dans la Partie IV. De manière générale, les simulations des sédiments en suspension du modèle avec couplage morphodynamique fournissent un niveau de précision satisfaisant et assurent un degré de confiance du modèle comparable aux résultats sans couplage morphodynamique (détaillé ci-dessus).

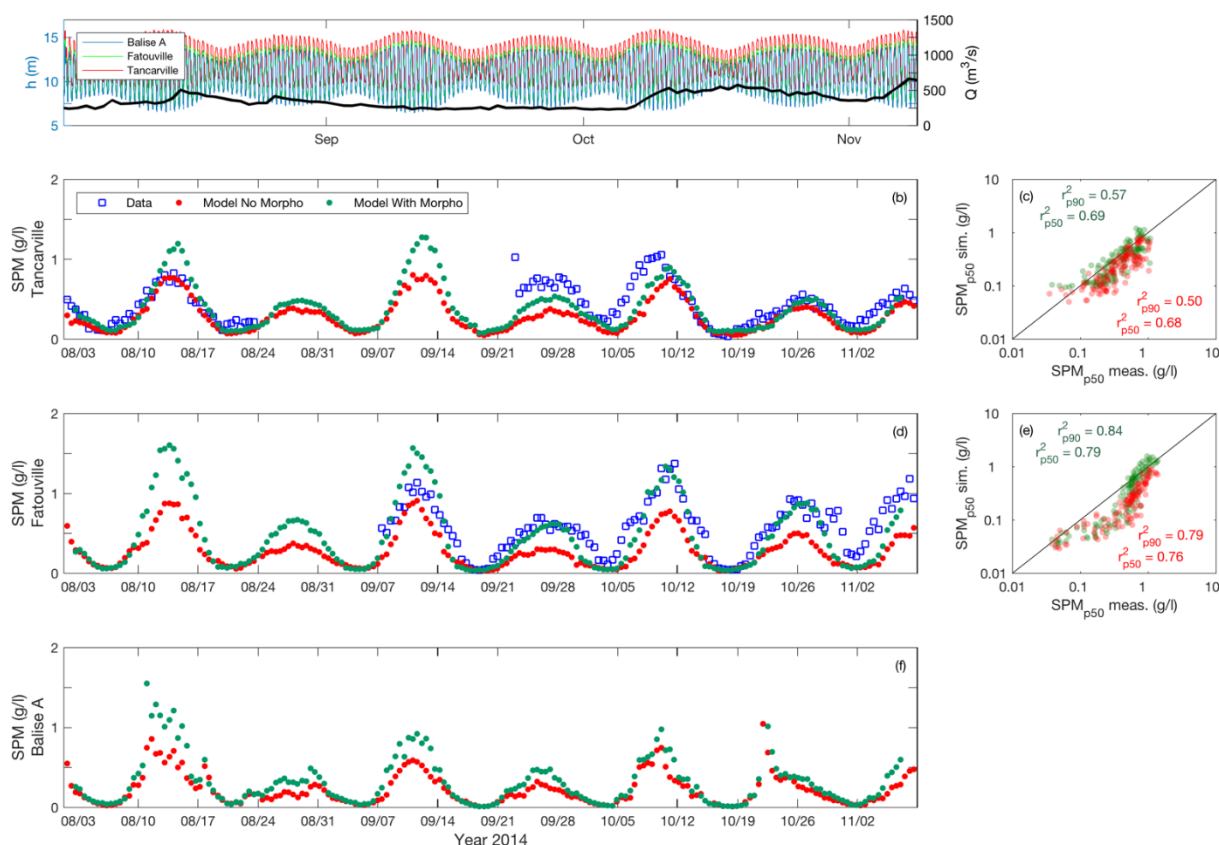


Figure 9. Dynamique des SPM (Suspended Particulate Matters) proche du fond (1 m) moyennés par marée d'août à novembre 2014. (a) Débit de la Seine Q (gris) et hauteur d'eau h à Balise A (bleu), Fatouville (vert) et Tancarville (magenta). (b, d, f) Concentration médiane (i.e. percentile 50) des SPM mesurée (bleu) et simulée (rouge : sans morpho ; vert : avec morpho), et (c, e) percentile 50 de la concentration en SPM simulée (rouge : sans morpho ; vert : avec morpho) versus mesurée à (b, c) Tancarville (d, e) Fatouville et (f) Balise A.

Modélisation avec le modèle MARS3D curviligne « orthogonal »

La version du modèle MARS3D utilisée dans ce projet est une version curviligne « non-orthogonale » (Figure 10d), c'est-à-dire que pour des mailles de dimension variable (dû au curviligne) les vecteurs g_1 et g_2 peuvent ne pas être à angle droit. Ce maillage permet de pouvoir mieux suivre les lignes bathymétriques ainsi que le trait de côte, mais entraîne des temps de calcul plus élevés (termes correctifs en plus). Cette version curviligne non-orthogonale (V9.05) ne bénéficie pas directement des développements faits sur le code hydro-morpho-sédimentaire de référence (V10.12), rendant son actualisation *up-to-date* plus laborieuse. Enfin, le code ECOMARS n'est pas directement adapté au calcul curviligne non-orthogonal, alors qu'il l'est pour le curviligne orthogonal (Figure 10c).

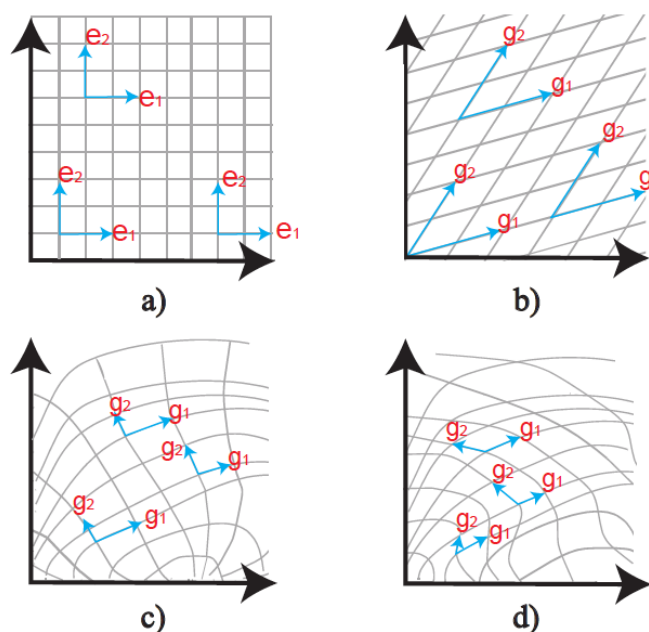


Figure 10. Représentation schématique de maillages (a, b) réguliers et (c, d) curvilignes, étant (a, c) orthogonaux ou (b, d) non-orthogonaux [Khojasteh Pour Fard, 2015].

Sachant que le maillage curviligne de la Seine a été réalisé de manière à ce qu'il soit très proche de l'orthogonalité, nous avons testé le modèle en version curviligne orthogonale (V10.12, Figure 10c) sur la grille non-orthogonale et comparé les simulations en termes d'élévation de surface libre (Figure 11) et de salinité (Figure 12). Les résultats de comparaison avec les mesures aux points fixes sont très satisfaisants. Une comparaison spatiale des percentiles 10 et 90 de la salinité a également été réalisée entre les deux simulations sur l'estuaire aval (Annexes III). Il ressort de légères différences de salinité au large de l'embouchure, mais nous n'avons pas pu comparer ces résultats à des observations *in situ* pour attester la justesse d'une simulation ou de l'autre.

Enfin, le modèle MARS3D en version curviligne orthogonale (V10.12) semble pouvoir être utilisé pour la modélisation hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de Seine. Le gain en temps de calcul (~20% plus rapide) associé à son actualisation *up to date*, en ferait un outil particulièrement adapté à la modélisation morphodynamique long terme et à la modélisation environnementale.

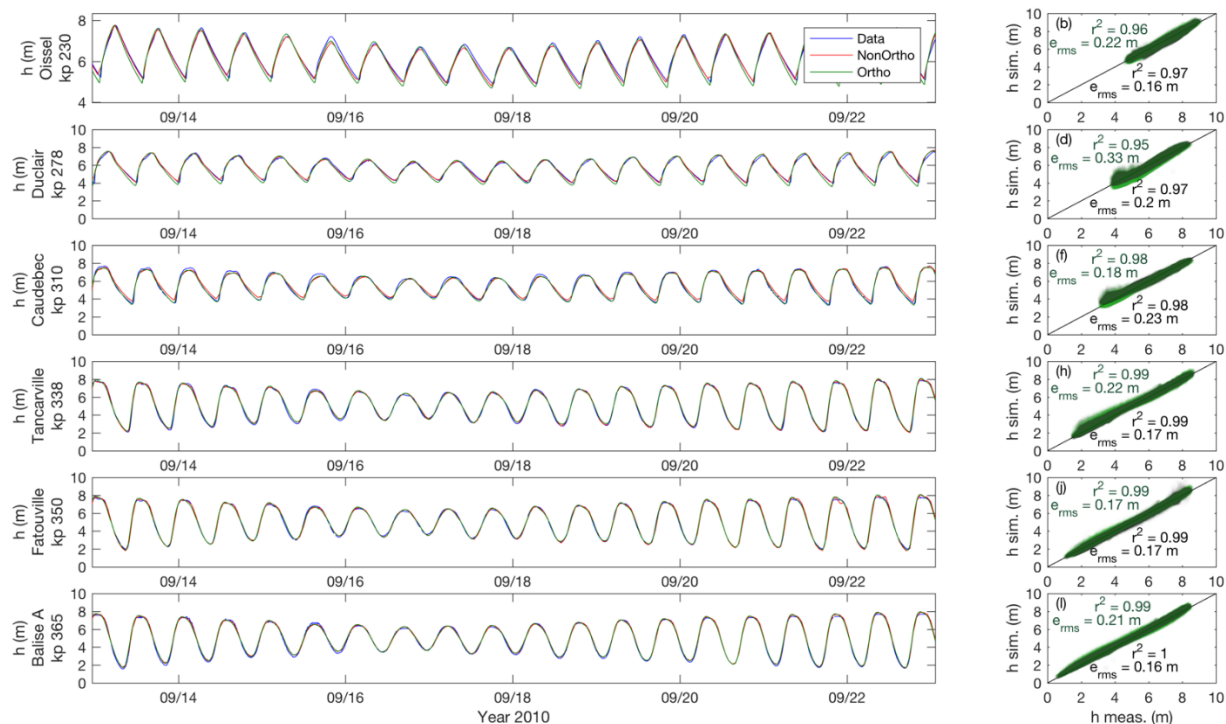


Figure 11. Comparaison de l'élévation de la surface libre à différent points de l'estuaire entre les mesures (bleu) et les simulations du modèle MARS3D curviligne en version non-orthogonale (rouge ; référence du projet, V9.05) et en version orthogonale (vert ; V10.12).

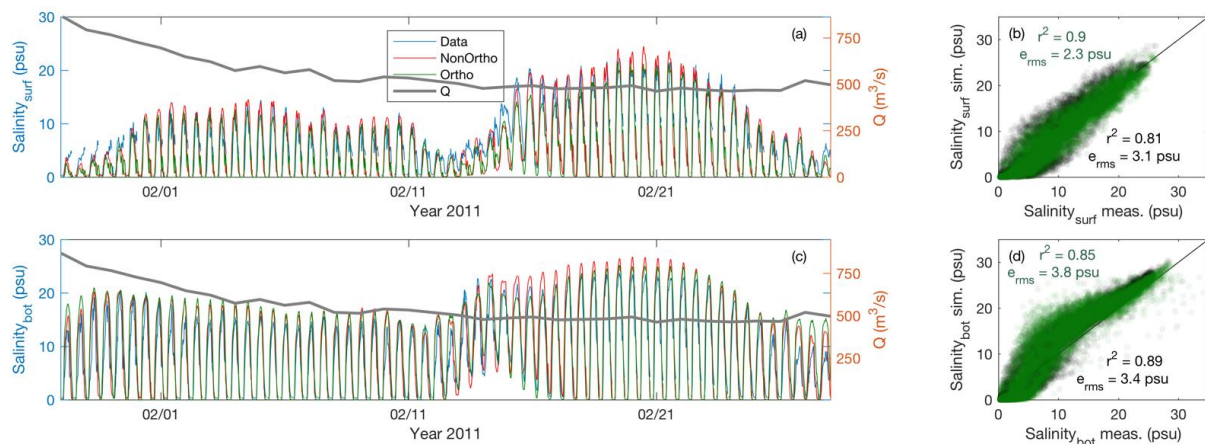


Figure 12. Comparaison de la salinité (a) de surface et (b) de fond à Fatouville entre les mesures (bleu) et les simulations du modèle MARS3D curviligne en version non-orthogonale (rouge ; référence du projet, V9.05) et en version orthogonale (vert ; V10.12).

II. Dynamique du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Seine

En s'appuyant sur le travail de validation présenté dans le chapitre précédent, le modèle hydro-sédimentaire a été exploité afin d'étudier la dynamique du bouchon vaseux (BV ; ou Estuarine Turbidity Maximum – ETM), en particulier en termes de positionnement longitudinal et de masse en suspension. Ces résultats sont davantage détaillés dans l'article de Grasso *et al.* [under revision], présenté en Annexe V.

Analyse de la position du bouchon vaseux le long de l'estuaire

La Figure 13 représente l'évolution temporelle de la position du BV au cours de la période août 2014 – août 2015. Cette position est estimée par cycle de marée comme la médiane de la concentration de vase en suspension entre l'engainement ($kp = 370$ km) et Caudebec-en-Caux ($kp_{Cau} = 310$ km), intégrée sur la hauteur d'eau et la section définie par l'espace entre les digues (ronds noirs sur la Figure 13a). Le BV est en moyenne situé entre Fatouville ($kp_{Fat} = 350$ km) et Tancarville ($kp_{Tan} = 337$ km) avec une forte dynamique liée au régime hydrologique de la Seine, translaté à l'aval vers Balise A en période de crue et à l'amont vers Tancarville en période d'étiage. On note également une forte réactivité du BV suite aux variations rapides de débit, ainsi qu'aux cycles de vives eaux / mortes eaux (VE/ME). L'excursion du BV au cours d'un cycle de marée peut atteindre 20 km en période de VE (en gris sur la Figure 13), et la position médiane par marée s'étend sur une vingtaine de km au cours de l'année ($kp = 340$ -360).

Le front de salinité par marée, défini par le positionnement médian des 5 psu (moyenné sur la section) à 1 m au-dessus du fond (triangles violets sur la Figure 13a), permet de représenter la position du gradient de salinité (« coin salé »). Sa position fluctue avec les variations de débit de manière similaire à celle du BV, mais la dynamique associée aux cycles VE/ME semble être sensiblement différente.

Pour étudier plus précisément l'influence de la marée sur la position du BV et du front de salinité, la tendance liée au débit a été retranchée à la position globale, telle que : $X_{TR}(Salinity, ETM) = X_{(Salinity, ETM)} - X_Q(Salinity, ETM)$, avec $X_{TR}(Salinity, ETM)$ les positions du front de salinité et du BV associées au marnage TR (Tidal Range), $X_{(Salinity, ETM)}$ les positions globales et $X_Q(Salinity, ETM)$ les positions associées au débit Q . Les tendances liées au débit ont été estimées à partir des régressions linéaires présentées sur la Figure 14a.

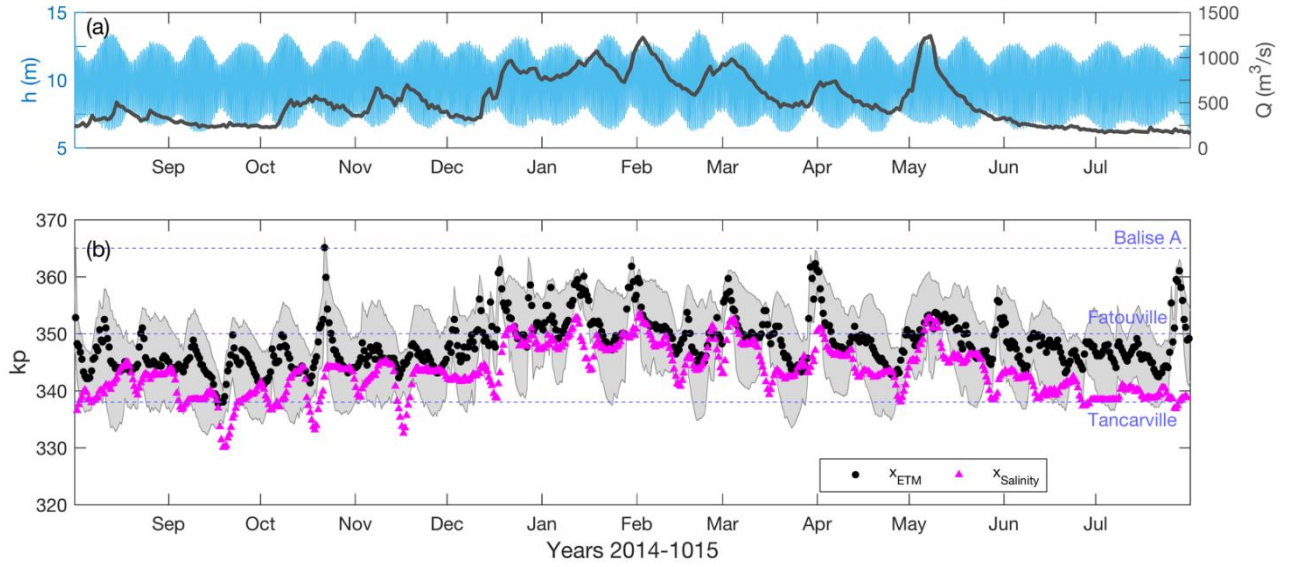


Figure 13. (a) Hauteur d'eau h simulée à Fatouville (bleu) et débit de la Seine Q mesuré à Poses (gris), **(b)** positions moyennes par marée du bouchon vaseux x_{ETM} (ronds noirs) et du front de salinité proche du fond (1 m) $x_{Salinity}$ (triangles violets) simulées le long de l'estuaire aval, d'août 2014 à août 2015. Sur **(b)**, les zones grises représentent l'extension longitudinale minimale et maximale par marée ; les lignes pointillées horizontales représentent les positions Tancarville ($kp_{Tan} = 337$ km), Fatouville ($kp_{Fat} = 350$ km) et de Balise A ($kp_{Bal.A} = 365$ km).

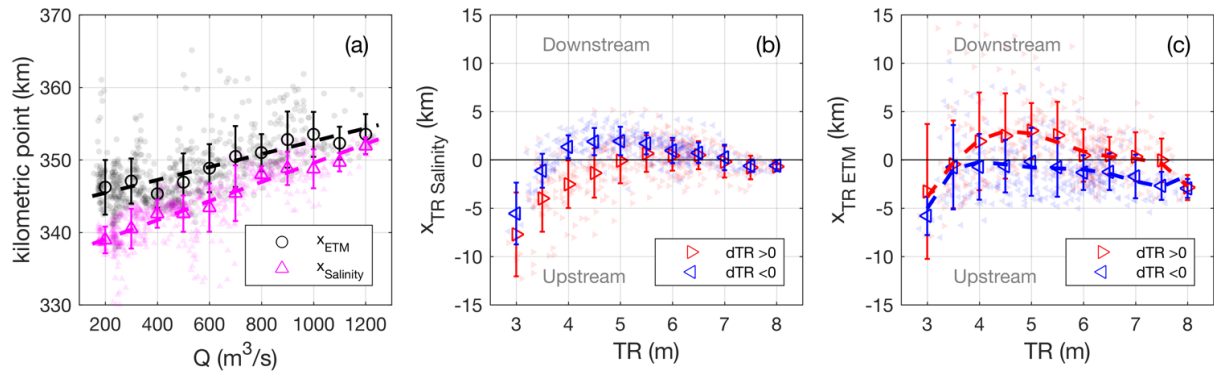


Figure 14. (a) Positions du bouchon vaseux x_{ETM} et du front de salinité proche du fond (1 m) $x_{Salinity}$ en fonction du débit de la Seine Q . Positions après soustraction du signal de débit **(b)** du front de salinité proche du fond (1 m) $x_{TR Salinity}$ et **(c)** du bouchon vaseux $x_{TR ETM}$, en fonction du marnage TR en périodes de revif ($dTR > 0$, points rouges) et de déchet ($dTR < 0$, points bleus). En **(a)**, les lignes noire et violette représentent les lois de régression linéaire pour x_{ETM} et $x_{Salinity}$. En **(b)** et **(c)**, les triangles et crochets verticaux représentent la moyenne et l'écart type des données associés aux classes de TR pour les périodes de revif (triangles rouges vers la droite) et de déchet (triangles bleus vers la gauche).

La Figure 14b illustre clairement la remontée du front de salinité en ME, due au processus de stratification avec l'eau douce en surface et l'eau salée au fond, et une position plus à l'aval en VE lorsque l'ensemble de colonne d'eau est mélangé par les forts courants. On observe cependant une hystérésis entre ME et VE, caractérisée par la variation du marnage dTR calculé pour une marée t comme : $dTR_t = (TR_{t+1} - TR_{t-1})/2$, avec $dTR > 0$ en revif (ME \rightarrow VE) et $dTR < 0$ en déchet (VE \rightarrow ME). Cette hystérésis correspond au temps pour que la stratification se mettent en place, plus lente en période de déchet. L'influence du marnage sur la dynamique du BV est différente (Figure 14c) avec une remontée du BV en VE, caractéristique du pompage tidal. On note également une hystérésis entre ME et VE, correspondant à l'inertie que met le pompage tidal à se mettre en place et remonter le BV.

Pour un marnage donné, la position du BV sera donc plus en amont en période de déchet que de revif. Enfin, par très faible marnage (forte ME) le BV est également translaté vers l'amont, probablement dû au front de salinité venant le « bloquer » en amont.

Le positionnement du BV en 2014-2015 est comparé aux observations faites en 1978 par Avoine et al. [1981]. La

Figure 15 synthétise par gamme de débit la position du BV à basse mer et haute mer. Les simulations soulignent que la limite amont n'a pas significativement changé au cours des 35 dernières années. Cependant, la limite avale a migré de plusieurs kilomètres vers le large (jusqu'à 10 km) en 2014-2015, en particulier pour les débits moyens (i.e. 400-600 m³/s). Ce constat est renforcé par le fait que le BV devrait même être davantage vers l'amont en période d'étiage, suivant les mesures SYNAPSES de turbidité à Fatouville (Figure 7b). Cette tendance est en accord avec les simulations réalisées dans le cadre du projet ANPHYECO (Seine-Aval 5), présentant une augmentation de l'asymétrie de marée entre 1975 et 2010, pouvant renforcer le pompage tidal. Cela serait probablement dû à l'extension de Port 2000, rétrécissant l'embouchure de l'estuaire et renforçant les courants de flot.

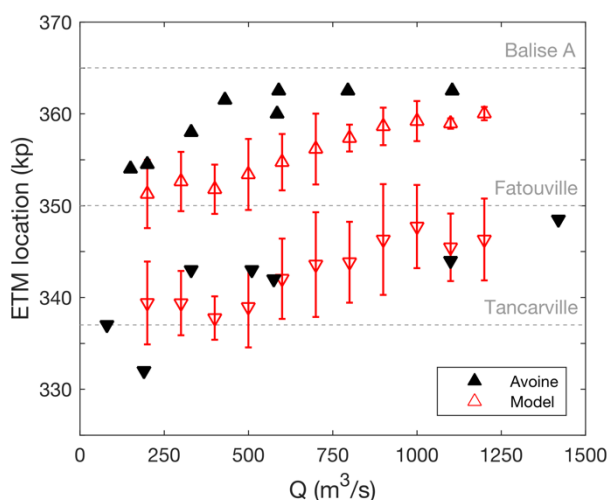


Figure 15. Position du bouchon vaseux en fonction du débit de la Seine Q à pleine mer (triangles vers le bas) et à basse mer (triangles vers le haut) estimée par Avoine et al. [1981] en 1978 à partir de mesures de turbidités de fond (triangles noirs pleins) et simulée par le modèle (triangles rouges) d'août 2014 à août 2015. Les crochets verticaux représentent la variabilité (écart type) des simulations du positionnement du bouchon vaseux associée aux cycles vives eaux – mortes eaux, par classe de débit. Les lignes horizontales représentent les positions de Tancarville ($kp_{Tan} = 337$ km), Fatouville ($kp_{Fat} = 350$ km) et Balise A ($kp_{Bal.A} = 365$ km).

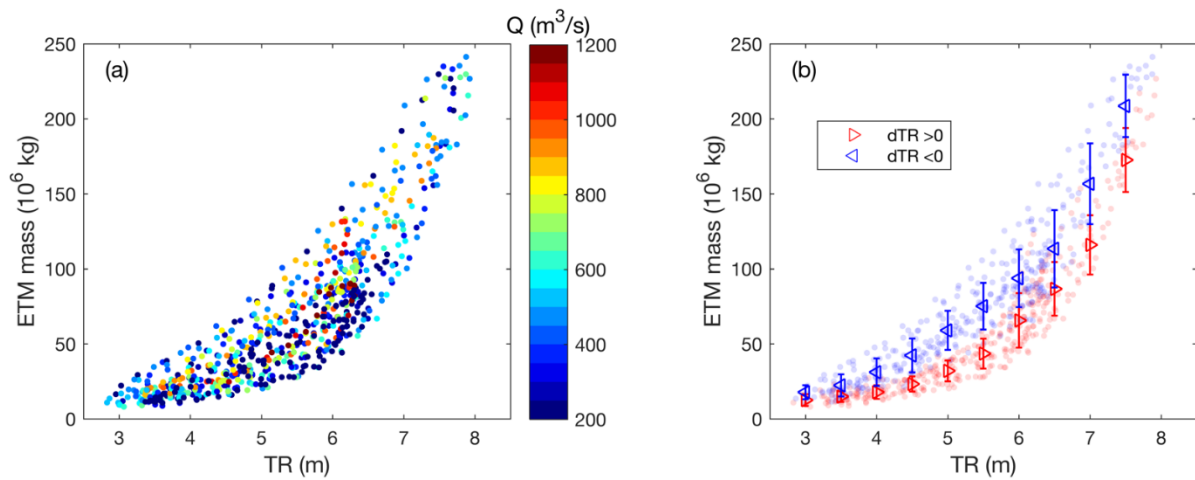


Figure 16. Masse du bouchon vaseux maximum par marée en fonction du marnage TR et (a) du débit de la Seine Q (couleur), (b) des périodes de revif ($dTR > 0$, points rouges) et de déchet ($dTR < 0$, points bleus). En (b), les triangles et crochets verticaux représentent la moyenne et l'écart type des données associés aux classes de TR pour les périodes de revif (triangles rouges vers la droite) et de déchet (triangles bleus vers la gauche). Simulations d'août 2014 à août 2015.

Analyse de la masse en suspension du bouchon vaseux

La masse du bouchon vaseux est calculée comme le maximum par marée de la masse de vase en suspension entre l'engainement ($kp = 370$ km) et Caudebec-en-Caux ($kp_{Cau} = 310$ km), i.e. la concentration de vase intégrée sur la hauteur d'eau, la section entre les digues et longitudinalement [cf. Grasso et al., under revision]. La masse du BV est clairement corrélée au marnage (Figure 16), atteignant 250.000 T en fortes VE pendant lesquelles le pompage tidal est le plus fort. On observe une forte non-linéarité avec une augmentation plus forte de la masse au-delà de $TR = 6$ m. Alors que le débit de la Seine influence fortement le positionnement du BV, il n'impacte pas significativement sa masse (Figure 16a). En contrepartie, la période de revif ou de déchet modifie l'intensité des masses en suspension (Figure 16b), provoquant une hystérésis similaire à celle observée sur la Figure 14c (inertie pour mettre les sédiments en suspension lors de l'augmentation du marnage). Pour un marnage donné, la masse du BV sera donc plus élevée en période de déchet que de revif. Enfin, la Figure 16b, permet d'estimer très simplement la masse du BV seulement en fonction du marnage (\pm déchet/revif), et la Figure 14 (a et c) permet d'estimer la position du BV en fonction du débit et du marnage (\pm déchet/revif).

L'influence des vagues sur la masse du BV a été étudiée en comparant des situations calmes ($H_s < H_{s,med} = 0,57$ m, Figure 17a) et énergétiques ($H_s > H_{s,med}$, Figure 17b). La différence (b) – (a), représentée sur la Figure 17c, fait ressortir une augmentation de la masse en période énergétique (de 10 à 50%), en particulier par fort débit lorsque que le BV se situe plus près de l'embouchure où les resuspensions sur les bancs peuvent venir alimenter plus facilement le BV. Cela souligne la nécessité de considérer le forçage des vagues pour modéliser correctement la dynamique du BV.

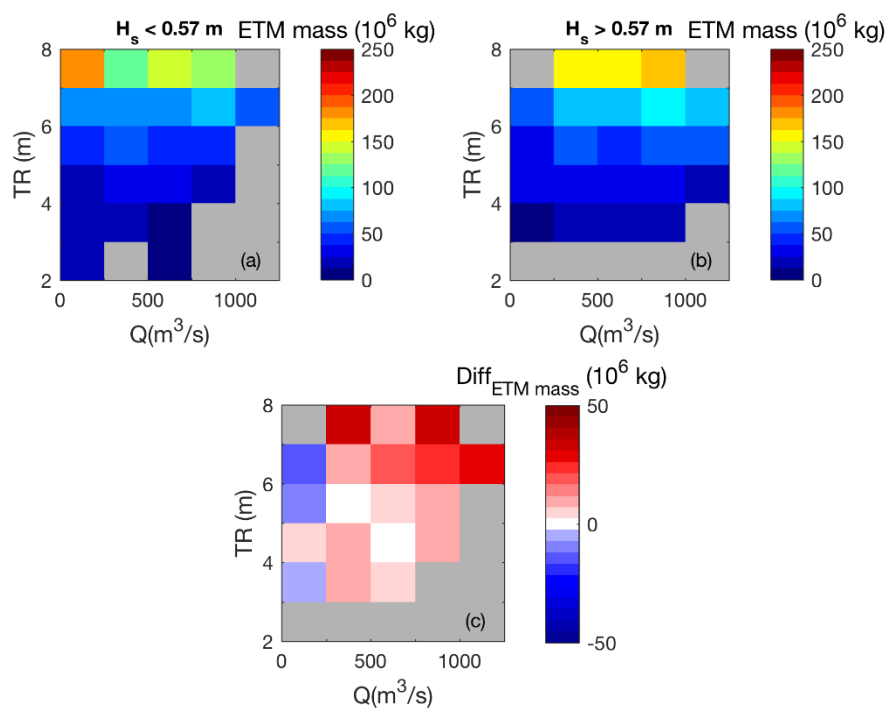


Figure 17. Masse du bouchon vaseux maximum par marée en fonction du marnage TR et du débit de la Seine Q pour des vagues (a) inférieures et (b) supérieures à la hauteur significative médiane ($H_{s,med} = 0.57$ m) d'août 2014 à août 2015. La figure (c) représente la différence (b) - (a).

III. Quantification des flux et bilans sédimentaires dans l'estuaire et la baie de Seine

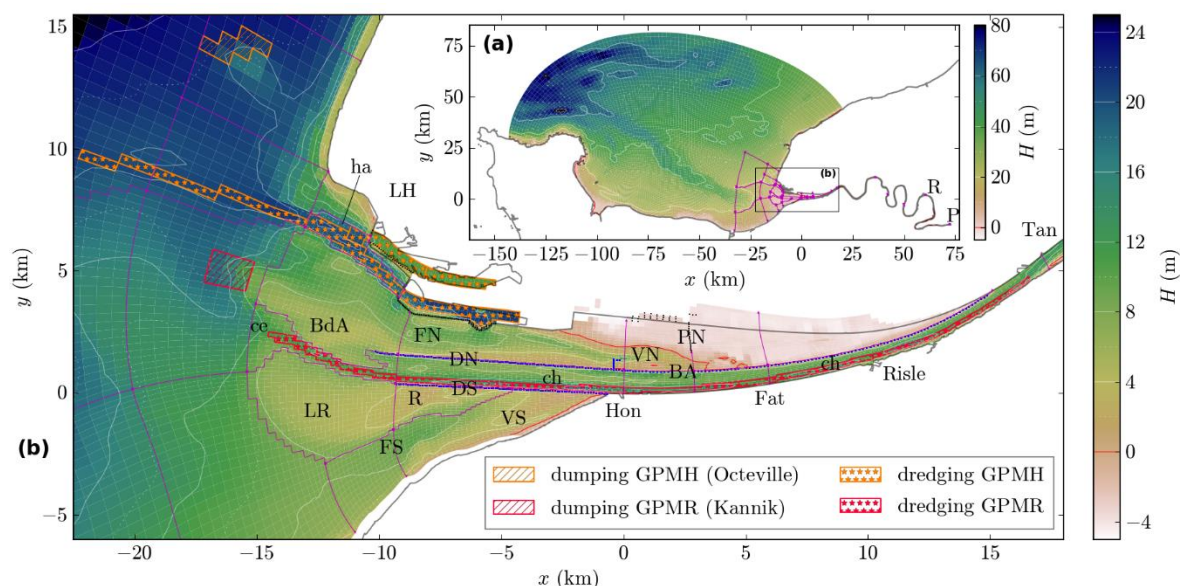


Figure 18. Bathymétrie du modèle et représentation des sections (magenta) utilisées pour le calcul des flux et bilans sédimentaires. (a) R - Rouen, P - Poses. (b) LH - Le Havre, Hon - Honfleur, Fat - Fatouville, Tan - Tancarville, ha - harbour access, ce - channel entrance - Engainement, ch - channel, BdA - Banc d'Amfard, LR - Les Ratelets, R - Ratier, FN/FS - Fosse Nord/Sud, DN/DS - Digue Basse Nord/Sud, VN/VS - Vasière Nord/Sud, BA - Brèche Aval, PN - Pont de Normandie.

Analyse des flux et bilan sédimentaires

L'objectif est ici de quantifier les flux sédimentaires transitant dans l'estuaire aval de la Seine (de Tancarville au large de l'embouchure, Figure 18) des échelles de temps saisonnière à annuelle, pour différents scénarios hydrométéorologiques caractéristiques des vingt dernières années (Tableau 2 et Figure 19, Annexe VI). Le scénario de référence 'A' représente la période août 2010 – août 2011 dont l'hydrologie annuelle ($Q_{moyen} = 426 \text{ m}^3/\text{s}$) est représentative des vingt dernières années (cf. Annexes V et VI). Des années exceptionnellement sèche (scénario 'B') et humide (scénario 'C') ont été simulées en conservant le forçage météorologique de référence (marée, vent, vagues de 2010-2011) mais en appliquant les débits des années 1995-1996 et 2000-2001, respectivement. Le scénario 'D' représente une année tempétueuse, considérant le forçage météorologique (marée, vent, vagues) de l'année 2011-2012, mais en gardant le débit de référence de l'année 2010-2011. Ces scénarios permettent de comparer indépendamment les influences des débits et des tempêtes. Enfin, le scénario 'E' est similaire au scénario de référence 'A', mais avec une vitesse de chute maximale de la vase de 1 mm/s au lieu de 1,5 mm/s.

Tableau 2. Présentation des différents scénarios et des forçages appliqués.

experiment	river discharge (m ³ /s)	wind, waves, tides
A reference	typical (433), 2010-2011	calm, 2010-2011
B low Q	low (309), 1995-1996	calm, 2010-2011
C high Q	high (958), 2000-2001	calm, 2010-2011
D stormy	typical (433), 2010-2011	stormy, 2011-2012

Ces résultats sont davantage détaillés dans l'article de *Schulz et al.* [under revision], présenté en Annexe V.

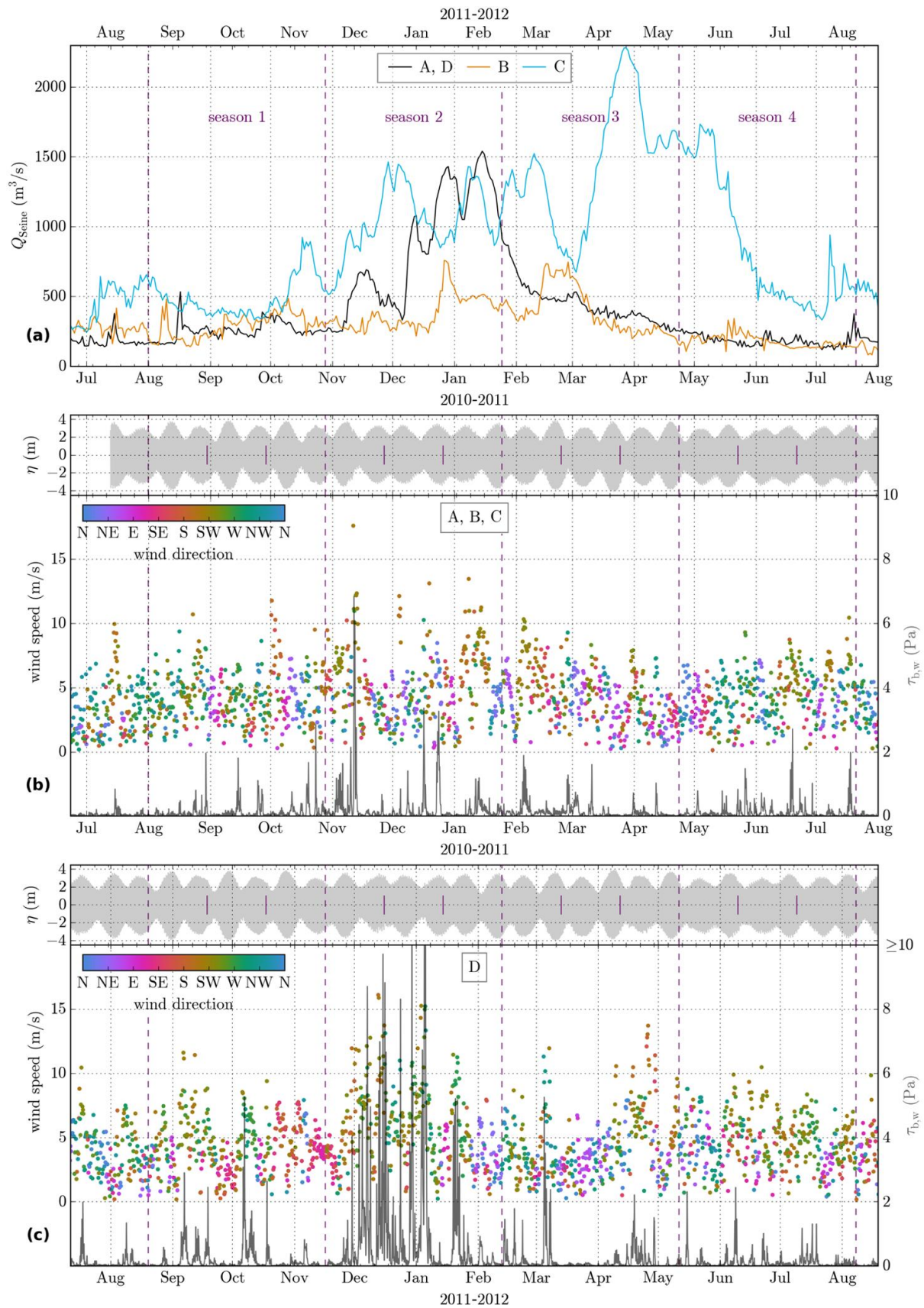


Figure 19. Représentation des forçages des scénarios A-D. (a) débit de la Seine Q à Poses. (b) scénarios A-C et (c) scénario D : élévation de la surface libre η à Honfleur, vitesse et direction du vent, et contrainte de frottement au fond induit par les vagues $\tau_{b,w}$ à l'embouchure de l'estuaire (cf. Annexes VI).

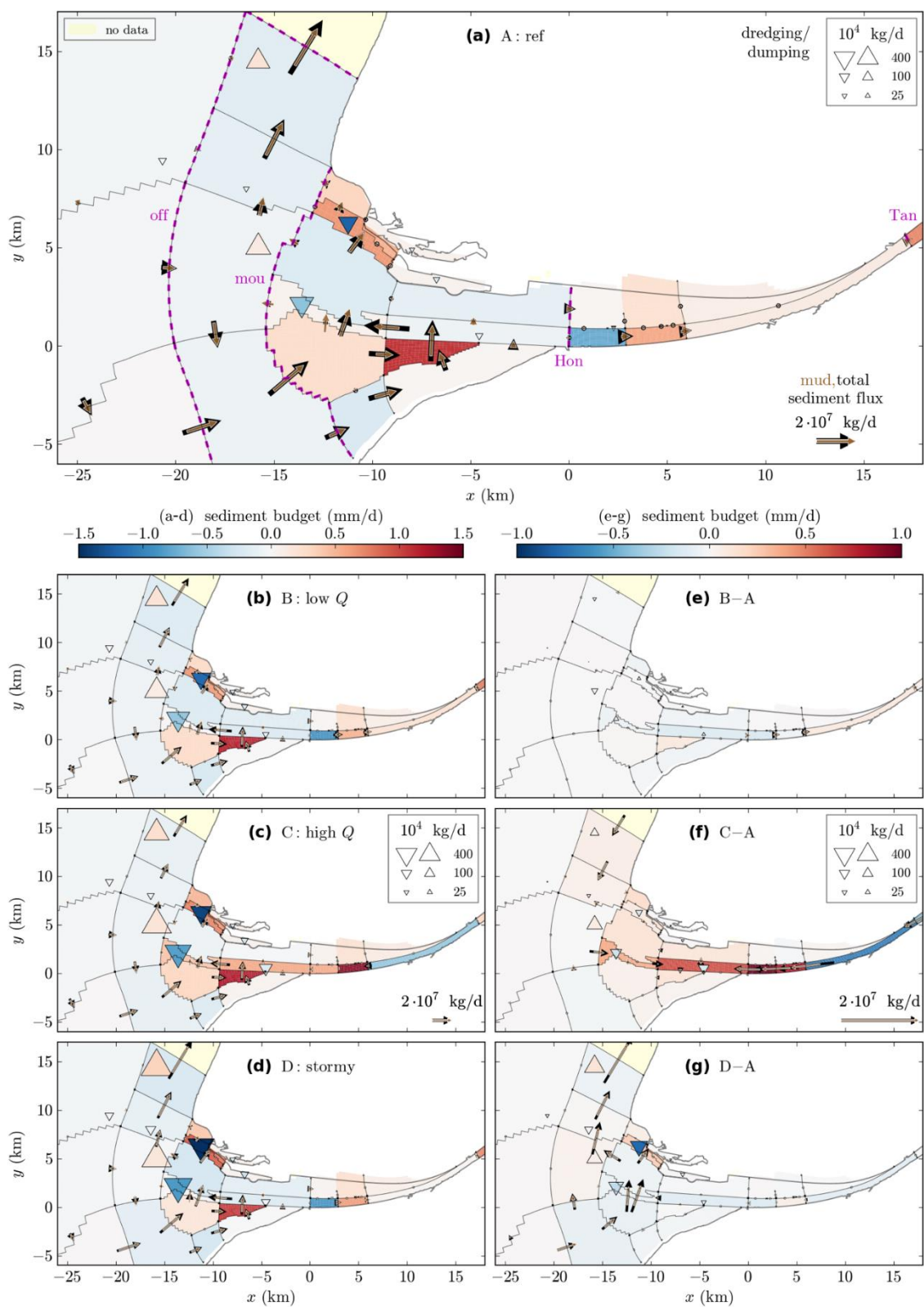


Figure 20. Flux sédimentaires résiduels (flèches : vase en marron et total en noir), bilans sédimentaires totaux (sable et vase) en accrétion (rouge) et érosion (bleu), dragages (triangles vers le bas) et clapages (triangles vers le haut) pour les scénarios A-D (figures a-d). Les figures (e-g) représentent la différence entre les scénarios B-D et le scénario de référence A. En (a), les lignes tiretées magenta représentent les sections utilisées pour le calcul des flux du Tableau 3.

Plus de 25 zones réparties autour de l'embouchure de l'estuaire ont été définies afin de quantifier les échanges sédimentaires (sables et vase) entre les différentes sections caractéristiques de l'estuaire aval (Figure 18). La délimitation des zones s'est principalement basée sur les structures morphologiques de l'estuaire (ex. bancs/fosses à l'embouchure, chenaux principaux, vasières latérales, etc.) et sur les compartiments clés associés à la dynamique du bouchon vaseux.

La Figure 20 synthétise les échanges sédimentaires à l'échelle annuelle des scénarios A-D, à travers les flux résiduels totaux (flèches noires) et de vase (flèches marrons), les bilans sédimentaires (en couleur ; exprimés en équivalent mm/jour d'accrétion en rouge ou d'érosion en bleu), ainsi que la contribution des dragages (triangles vers le bas) et clapages (triangles vers le haut) à ces bilans. La transformation entre les masses sédimentaires (kg) et les volumes (m^3) s'est basée sur des concentrations massiques de dépôt définies à $C_{sable} = 1600 \text{ kg/m}^3$ pour le sable et $C_{vase} = 625 \text{ kg/m}^3$ pour la vase.

Pour le scénario de référence A (Figure 20a), le schéma de circulation met en évidence une accrétion du banc sud-ouest à l'embouchure, ainsi qu'à l'aval de Fatouville, principalement due aux flux résiduels sableux. En revanche, les évolutions sédimentaires observées sur le reste de l'embouchure résultent majoritairement des flux de vase avec un dépôt notoire à l'ouest du GPMH entre le banc nord et le Cap de la Hève. De plus, il apparaît nettement que les sédiments (principalement vaseux) sortant de l'estuaire, par advection naturelle et clapages, sont soit transportés vers le nord, soit réinjectés dans l'estuaire au sud-ouest. Les flux sédimentaires cumulés à différentes sections caractéristiques ('off', 'mou', 'Hon' et 'Tan' ; cf. Figure 20a) sont représentés sur la Figure 22a et les quantités résiduelles sont renseignées dans le Tableau 3. La Figure 22a illustre nettement un résiduel assez stable à la limite 'off' et un apport de sédiment (vers l'amont) aux sections 'mou', 'Fat' et 'Tan' se réduisant vers l'amont, entraînant un engraissement de la partie aval de l'estuaire (entre 'mou' et 'Tan'). Les évolutions temporelles des flux sédimentaires cumulés mettent en évidence des modulations tidales (cycle VE/ME), hydrologiques mais également associées aux événements de tempête (vagues). Une analyse de corrélation (cf. Annexe V) montre que : (1) les vagues influencent significativement les flux seulement à l'embouchure (sections 'off' et 'mou') ; (2) la marée influence significativement les flux de l'embouchure à l'amont (sections 'mou' – 'Tan') ; et (3) le débit influence significativement les flux seulement en amont de Honfleur (sections 'Hon' – 'Tan').

Tableau 3. Flux sédimentaires cumulés (positifs vers l'amont) et masses draguées totaux (noir) et de vase (marron) aux différentes sections définies sur la Figure 20a, pour les scénarios A-E.

exp. period	cum. mass flow (10^7 kg) through cross-section								dredging (10^7 GPMH)	
	off	mou	Hon	Tan						
A year	-32	6	924	373	287	178	166	131	-177	-126
A season 1	-5	5	267	97	130	79	91	73	-27	-22
A season 2	-43	-31	237	98	31	14	-20	-20	-85	-54
A season 3	29	25	284	114	98	59	57	45	-41	-31
A season 4	-13	7	136	65	29	26	38	33	-24	-20
B year	-60	-6	910	359	337	221	209	165	-173	-123
B season 1	8	14	288	110	131	79	80	64	-27	-21
B season 2	-80	-51	205	75	87	60	32	24	-82	-51
B season 3	24	23	280	110	91	57	60	45	-39	-31
B season 4	-13	8	137	64	28	25	38	33	-25	-20
C year	170	138	1172	552	4	-37	-82	-87	-203	-144
C season 1	32	30	329	132	114	66	42	32	-27	-21
C season 2	-11	-9	269	121	-7	-14	-38	-37	-99	-64
C season 3	100	70	375	181	-75	-70	-61	-59	-47	-36
C season 4	49	48	200	118	-27	-19	-26	-23	-30	-23

exp. period	cum. mass flow (10^7 kg) through cross-section								dredging (10^7 GPMH)	
	off	mou	Hon	Tan						
D year	-336	-116	947	384	262	155	169	130	-309	-189
D season 1	-46	-32	247	83	125	72	85	69	-59	-42
D season 2	-293	-116	313	147	26	6	-11	-14	-191	-102
D season 3	12	27	234	92	77	47	52	38	-34	-27
D season 4	-9	4	153	62	35	30	43	38	-25	-18
E year	-42	-3	950	391	318	203	161	130	-187	-132
E season 1	-6	3	274	101	133	81	99	79	-30	-24
E season 2	-54	-37	239	99	43	23	-26	-24	-90	-55
E season 3	31	29	305	128	106	69	54	43	-39	-28
E season 4	-13	2	132	64	38	29	35	33	-29	-24

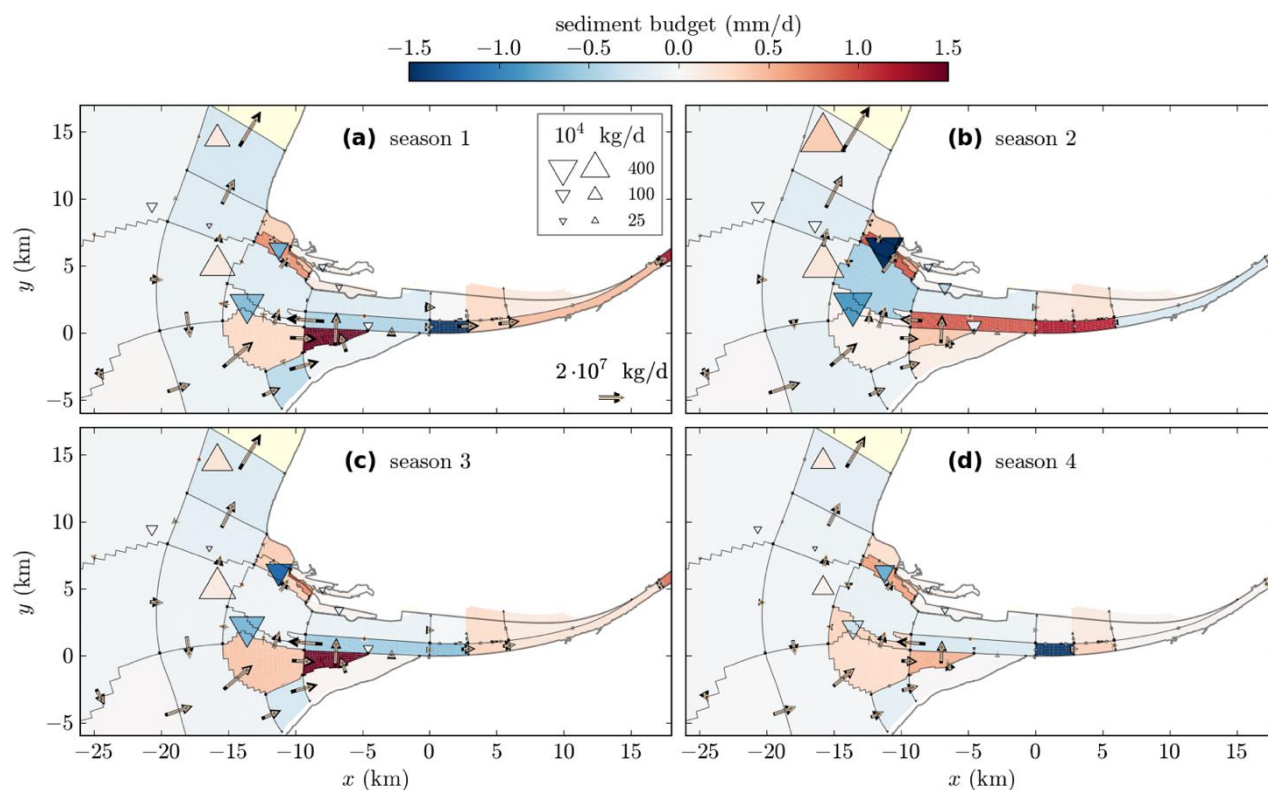


Figure 21. Même légende que la Figure 20, mais pour les quatre saisons du scénario de référence A.

La Figure 21 illustre les flux et bilans sédimentaire du scénario de référence A, décomposés en quatre périodes d'environ trois mois. La période de crue (novembre-janvier, Figure 21b) se différencie du reste de l'année avec un fort dépôt sédimentaire entre Balise A et Fatouville, principalement dû à la présence du bouchon vaseux dans cette zone à cette période, et un flux résiduel à Fatouville dirigé vers l'aval. Le dépôt à l'ouest du GPMH est également plus marqué et l'ensemble des quantités draguées est plus important. Même si le schéma de circulation antihoraire à l'embouchure est observé toute l'année, c'est durant les périodes août-octobre 2010 (Figure 21a), février-avril 2011 (Figure 21c) et mai-juillet 2011 (Figure 21d) que les dépôts sur le banc sud-ouest sont les plus forts. Cela doit résulter des conditions de vagues plus calmes durant ces périodes, limitant la remise en suspension des sédiments sur les bancs et favorisant le dépôt sédimentaire. Enfin, la période mai-juillet est nettement moins dynamique, autant en termes de flux et bilans sédimentaires, que de masses draguées.

La comparaison entre les différents scénarios hydrométéorologiques (Figure 20b-g) fait ressortir plusieurs points caractéristiques. Pendant l'année humide (scénario C ; Figure 20c et f, Figure 22c), le bouchon vaseux est renforcé par les apports sédimentaires supérieurs provenant de la Seine à Poses et se situe plus à l'aval dû au débit liquide plus soutenu. Cela participe à renforcer les flux sortants entre Tancarville et Honfleur (courbes bleues sur les Figure 23c et d). Mais de manière surprenante, il y a moins d'export de sédiment à l'engainement et à la limite nord-est (au nord-est d'Octeville), se traduisant par des flux aux sections 'off' et 'mou' renforcés vers l'amont (Figure 23a et b). Ces observations contre-intuitives s'expliquent par le fait que la circulation barocline induite par le gradient de densité (orientée vers l'amont au fond) est renforcée lorsque le débit augmente, comme illustré sur la Figure 24.

Le scénario B (année exceptionnellement sèche) présente une situation inverse au scénario humide C, mais de manière bien moins intense (Figure 20b et e, Figure 22b et Figure 23). Le scénario D (année fortement tempétueuse) est bien marqué (Figure 20c et f, Figure 22d) avec une nette intensification des flux à l'embouchure et très peu d'effet à l'amont, en cohérence avec le peu d'influence des vagues sur les flux aux sections 'Hon' et 'Tan' décrit précédemment. L'intensification des flux à l'embouchure se traduit par un large export de sédiment au niveau de la section 'off' (Figure 23a). A noter que cet export est renforcé par une augmentation des dépôts sédimentaires au niveau de la zone de clapage d'Octeville, associée aux dragages du GPMH plus importants en périodes de tempêtes.



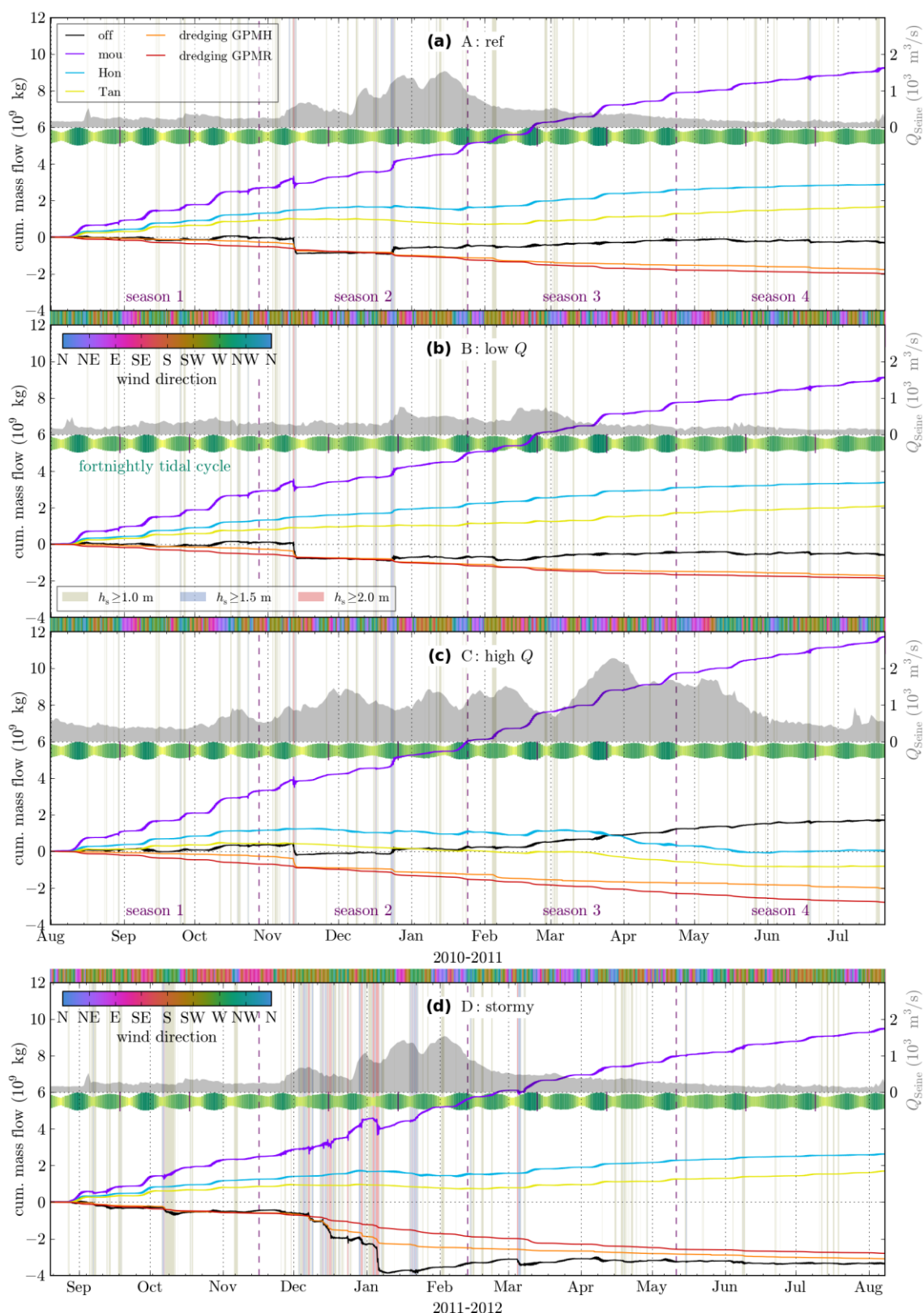


Figure 22. Flux sédimentaires cumulés totaux (positifs vers l'amont) aux différentes sections définies sur la Figure 20a et masses draguées cumulées totales (négatives) pour les scénarios A-D (a-d). Sont aussi représentés : le débit de la Seine Q (gris), les cycles vives eaux – mortes eaux (vert – jaune), la direction du vent (barre de couleur) et les périodes de fortes vagues à l'embouchure (barres verticales beige, bleues et roses ; légendes en (b)).

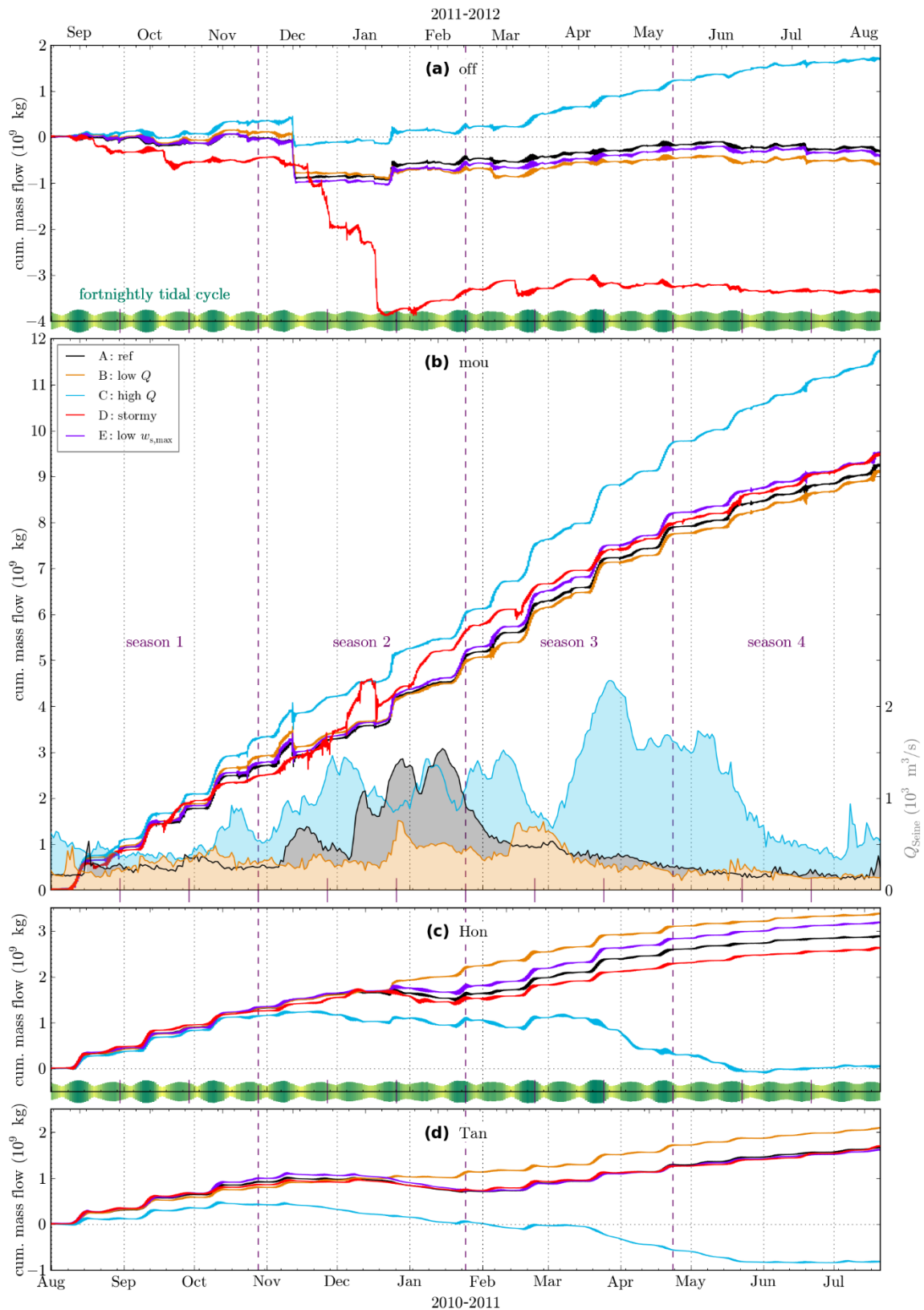


Figure 23. Flux sédimentaires cumulés totaux (positifs vers l'amont) aux sections (a) 'offshore', (b) 'mouth', (c) 'Honfleur' et (d) 'Tancarville' définies sur la Figure 20a, pour les scénarios A-E. Sont aussi représentés : le débit de la Seine Q pour les scénarios A, D, E (gris), B (orange) et C (bleu) ; et les cycles vives eaux – mortes eaux (vert – jaune).

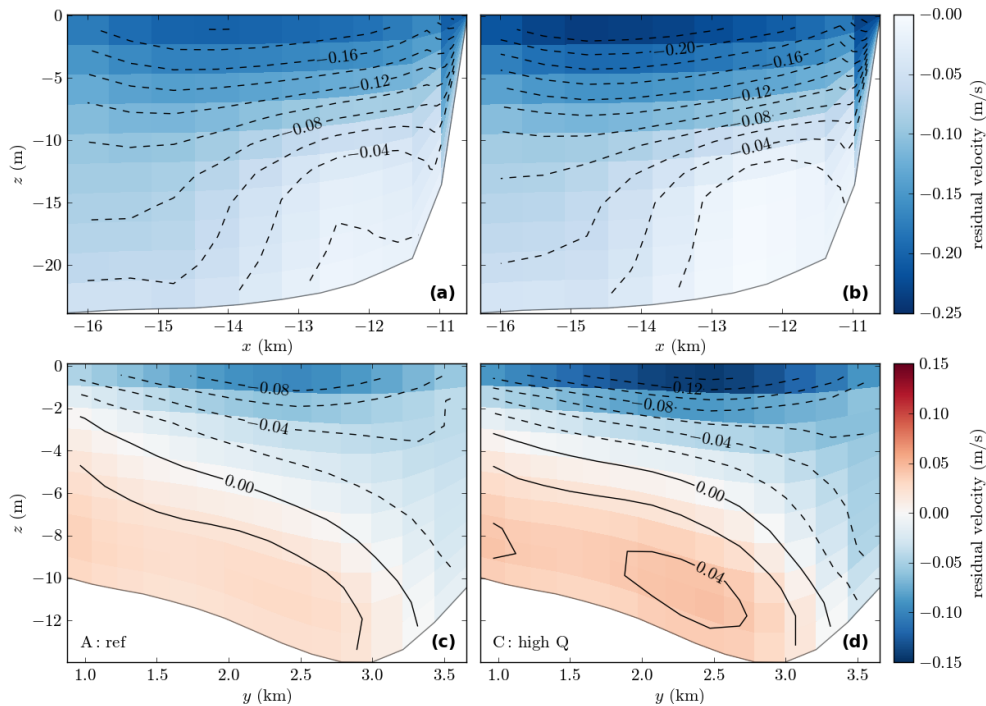


Figure 24. Courants résiduels (moyennés sur un an, positifs vers l'amont) : (a, b) le long de la section nord-est de la zone de clapage d'Octeville et (c, d) à l'engainement 'ce' (voir Figure 18b) ; pour (a, c) le scénario A et (b, d) le scénario C.

Dans le but de tester la robustesse des simulations des flux sédimentaires, le scénario de référence A a été comparé au scénario E, différant seulement par la vitesse de chute maximum de la vase ($w_{s,mud\ max} = 1\text{ mm/s}$ au lieu de $1,5\text{ mm/s}$). Etant donné les niveaux de turbidité simulés, la vitesse de chute de la vase est très souvent plafonnée par sa valeur maximum, et une réduction de 33% est significative (tout en restant dans la variabilité observée en milieu estuarien). La paramétrisation de la vitesse de chute de la vase est un des paramètres clé de la calibration d'un modèle sédimentaire estuarien car elle influence l'advection et la décantation du bouchon vaseux, modifie la fraction de vase déposée et donc l'érodabilité du mélange sédimentaire (sable/vase) à la surface. Le *spin up* du scénario E a également considéré $w_{s,mud\ max} = 1\text{ mm/s}$. Les comparaisons sont illustrées sur la Figure 23 et quantifiées dans le Tableau 3. Les différences sur les flux résiduels sont assez faibles (moins de 11%), attestant la robustesse du modèle hydro-sédimentaire. On retrouve une tendance à légèrement augmenter les flux sédimentaires car la vase reste plus longtemps en suspension et se trouve donc plus dynamique. En contrepartie, les quantités draguées sont plus faibles dû à la réduction du dépôt.

Enfin, les bilans sédimentaires annuels des scénarios A-D ont été comparés aux observations issues des relevés hydrographiques (RH) réalisés par le GPMR entre 'Tan' et 'mou', en excluant les zones du GPMH et les zones au-dessus du niveau d'eau moyen (Tableau 4). A noter que les incertitudes sur les RH sont très élevées ($\pm 10\text{ Mm}^3$) dû à la concaténation de levé bathymétriques pouvant s'échelonner sur plus de six mois. Les volumes simulés sont du même ordre de grandeur que les observations (i.e. relativement stable en 2010-2011), avec également une tendance engraisser l'estuaire aval pour les années humides (scénario C, obs. 2008 et 2013, cf. Annexe V).

simulated mass/volume budget			observed volume budget	
exp.	mass (10^7 kg)		year	10^6 m ³ ($\pm 10.10^6$ m ³)
A	216	-50	2006	6
B	182	-87	2007	7
C	587	251	2008	10
D	5	-131	2009	1
exp.	volume (10^6 m ³)		2010	0
A	0.86	-0.80	2011	-3
B	0.29	-1.39	2012	1
C	6.11	4.02	2013	15
D	-1.26	-2.10	2014	3

Tableau 4. Masses et volumes sédimentaires totaux (noir) et de vase (marron) simulés pour les scénarios A-D sur un an dans la zone aval de l'estuaire couverte par les relevés hydrographiques du GPMR (de la section 'mouth' à 'Tancarville', en excluant les zones du GPMH ainsi que les zones au-dessus du niveau d'eau moyen) ; volumes observés issus des relevés hydrographiques.

Prise en compte des apports liquides et solides des tributaires de la Seine aval

Le modèle de référence prend en compte les apports liquides (mesurés) et solides (estimés) de la Seine à Poses (Q_{Seine}), ainsi que les apports liquides de la Risle (constant, 15 m³/s). Ces apports représentent en moyenne 92-96% des apports totaux Q_{Total} en prenant en compte l'ensemble des tributaires de la Seine à l'aval de Poses (Seine aval) (Figure 25a et b, Annexe IV). Cependant en période d'étiage de la Seine amont, les apports des tributaires de la Seine aval (Q_{Trib}) peuvent représenter jusqu'à 25% des apports totaux (Figure 25c et d), en particulier lors d'orages localisés sur les bassins versants de Seine aval. L'objectif de cette étude est de quantifier l'influence de ces tributaires sur l'hydrologie et la dynamique sédimentaire de l'estuaire. Ce travail se base sur les résultats de la thèse de Valentin Landemaine dans le cadre du projet AFFLUSEINE (Seine-Aval 5), fournissant les chroniques d'apports liquides et solides des six principaux affluents de la Seine aval (Austreberthe, Cailly, Eure, Risle, Andelle et S^{te} Gertrude,). A partir de la méthode de calcul des apports solides (cf. Rapport final du projet AFFLUSEINE), deux estimations sont proposées : (1) une sans correction ('Tss') se basant sur les mesures de SSC à haut-fréquence (HF) ; et (2) une avec correction ('Tac') faisant correspondre les mesures HF aux mesures SSC basse-fréquence (BF) assurées par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN). Ces deux estimations nous renseignent sur l'incertitude associée à la méthode de calcul des apports solides (cf. Annexe IV).

La comparaison des flux sédimentaires résiduels avec et sans prise en compte des apports des tributaires s'est basée sur la période août 1995 – août 1996 durant laquelle le ratio $Q_{\text{Trib}}/Q_{\text{Total}}$ est particulièrement élevé (Figure 25). Cela correspond à une année exceptionnellement sèche parmi les vingt dernières années (scénario B ci-dessus, Figure 20).

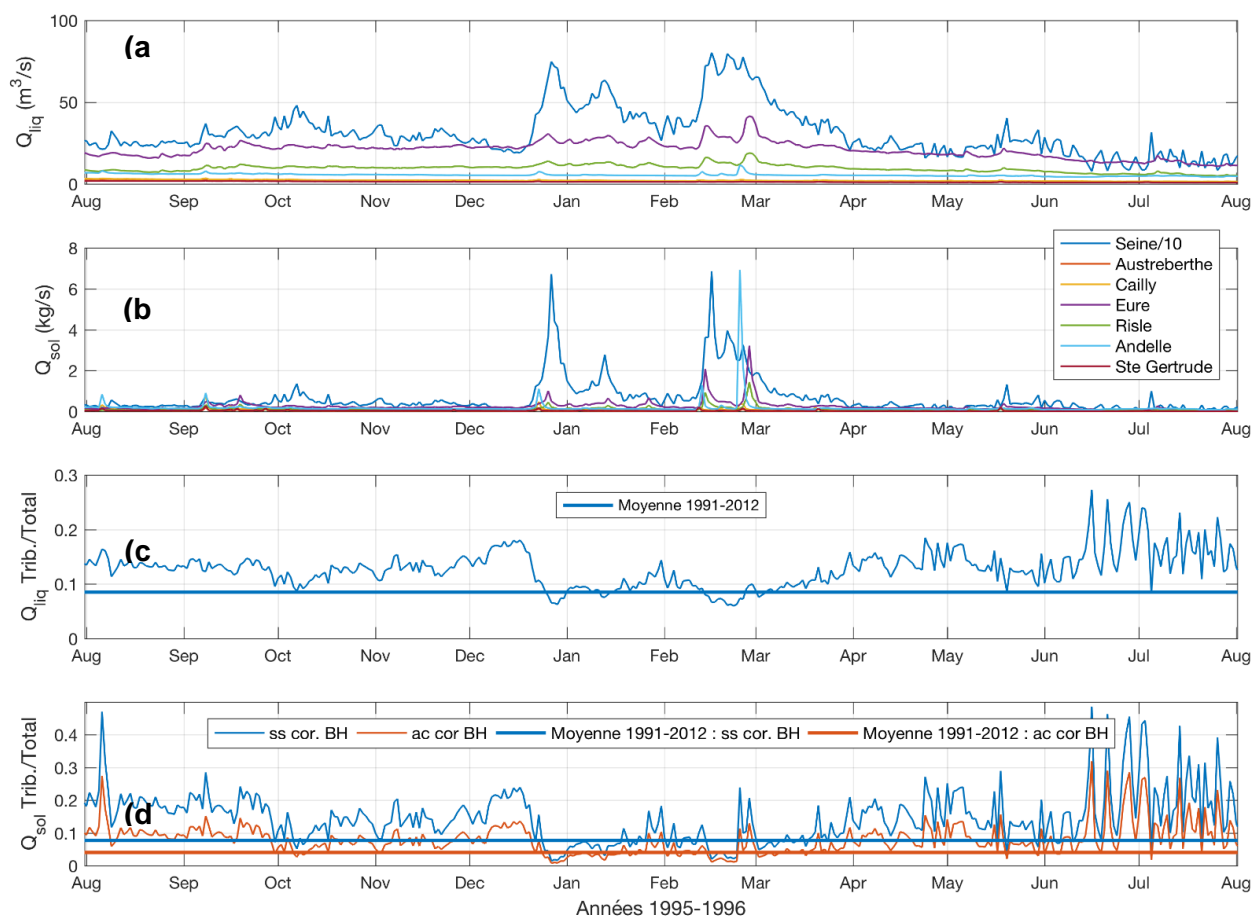


Figure 25. (a) Débits liquides Q_{liq} de la Seine à Poses (divisé par 10) et des tributaires de la Seine à l'aval de Poses, (b) débits solides Q_{sol} de la Seine à Poses (divisé par 10) et des tributaires à l'aval de Poses. Rapport entre les débits des tributaires Q_{trib} et le débit total de la Seine Q_{total} pour (c) les apports liquides et (d) les apports solides sans (bleu) et avec (orange) correction. Période août 1995 – août 1996 durant laquelle le rapport Q_{trib}/Q_{total} est particulièrement élevé.

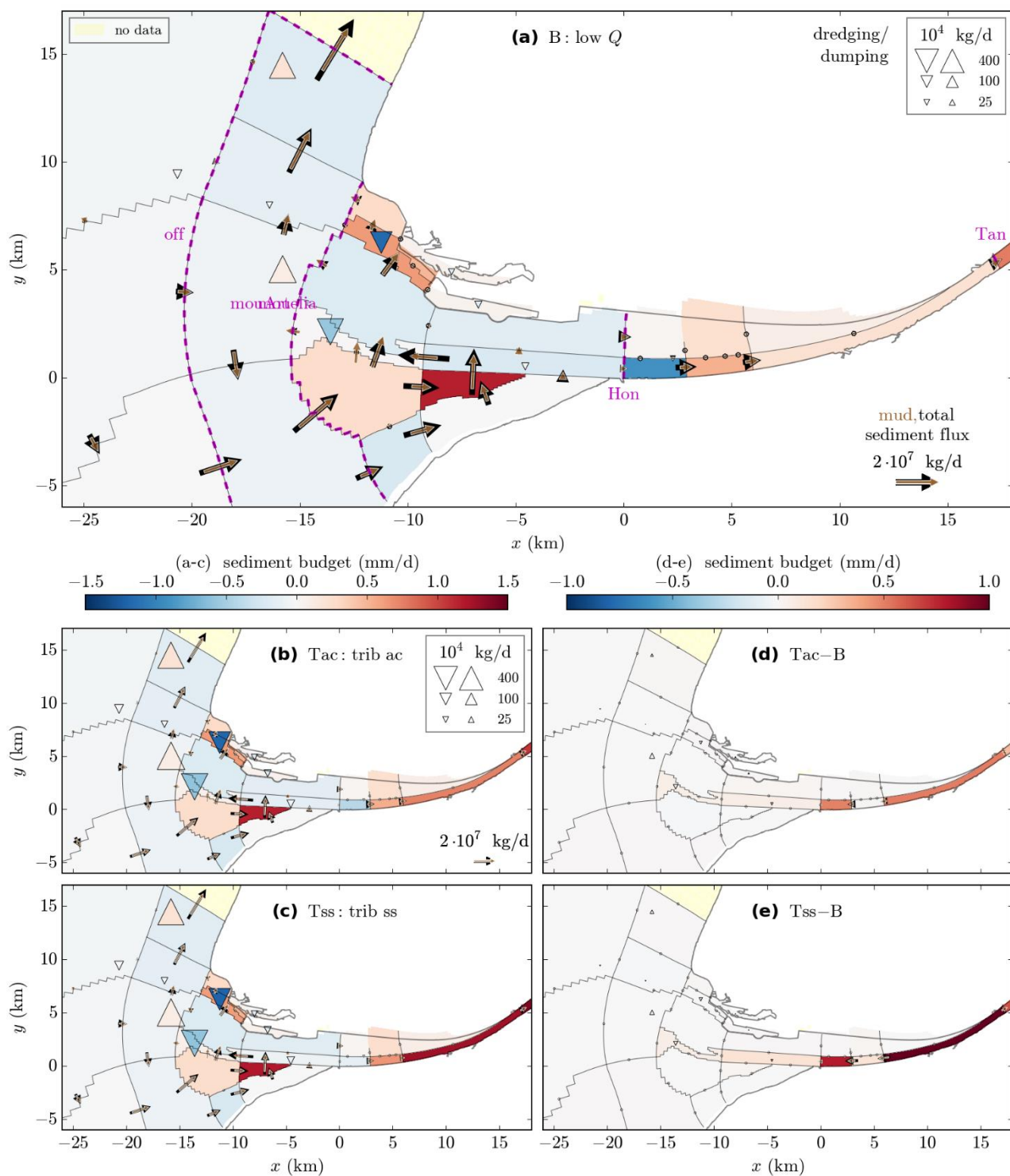


Figure 26. Flux sédimentaires résiduels (flèches : vase en marron et total en noir), bilans sédimentaires totaux (sable et vase) en accrétion (rouge) et érosion (bleu), dragages (triangles vers le bas) et clapages (triangles vers le haut) pour (a) le scénario B ne prenant pas en compte les apports des tributaires, et les scénarios prenant en compte les apports des tributaires : (b) Tac avec correction, et (c) Tss sans correction. Les figures (d, e) représentent la différence entre les scénarios 'Tac et Tss' et le scénario de référence B. En (a), les lignes tiretées magenta représentent les sections utilisées pour le calcul des flux du Tableau 5.

Tableau 5. Flux sédimentaires cumulés (positifs vers l'amont) et masses draguées totaux (noir) et de vase (marron) aux différentes sections définies sur la Figure 26a, pour le scénario B (sans tributaires) et les scénarios Tac et Tss avec prise en compte des apports des tributaires.

exp. period	cum. mass flow (10^7 kg) through cross-section								dredging (10^7 kg) at site			
	off		mou		Hon		Tan		GPMH		GPMR	
B year	-60	-6	910	359	337	221	209	165	-173	-123	-186	-30
B season 1	8	14	288	110	131	79	80	64	-27	-21	-55	-10
B season 2	-80	-51	205	75	87	60	32	24	-82	-51	-62	-9
B season 3	24	23	280	110	91	57	60	45	-39	-31	-50	-7
B season 4	-13	8	137	64	28	25	38	33	-25	-20	-19	-4
Tac year	-47	1	928	370	314	205	229	191	-175	-123	-193	-34
Tac season 1	10	16	293	113	126	74	77	66	-27	-22	-59	-11
Tac season 2	-72	-46	205	77	85	57	41	31	-82	-50	-61	-10
Tac season 3	26	24	292	115	80	49	62	51	-41	-32	-51	-8
Tac season 4	-12	7	139	65	24	24	48	42	-23	-19	-21	-5
Tss year	-50	-3	929	371	297	192	252	217	-176	-125	-192	-34
Tss season 1	13	16	293	113	121	72	85	74	-27	-22	-59	-12
Tss season 2	-75	-47	209	78	76	51	39	32	-84	-52	-61	-10
Tss season 3	26	23	288	114	80	46	71	60	-40	-32	-50	-7
Tss season 4	-14	4	139	65	19	22	58	51	-24	-20	-22	-5

Les Figure 26a-c synthétisent les flux sédimentaires résiduels à l'embouchure (et les bilans associés) pour l'année sèche correspondant au scénario B (débits de 1995-1996) ainsi que les simulations avec prises en comptes des apports des tributaires avec correction (scénario Tac) et sans correction (scénario Tss). Les seules différences significatives (Figure 26d et e) consistent en une augmentation des dépôts sédimentaires entre Tancarville et Honfleur, plus ou moins intense en fonction de l'estimation des apports solides choisie (Tac ou Tss). Cela s'explique naturellement par une augmentation de la turbidité (résultant des apports solides des tributaires) dans la zone du bouchon vaseux, se situant relativement en amont (entre Fatouville et Tancarville) durant cette année particulièrement sèche. On observe également que les flux résiduels au droit de Fatouville, dirigés vers l'amont pour l'ensemble des simulations, sont toutefois réduits dans le cas de la prise en compte des tributaires. Ceci s'expliquerait par un renforcement des courants résiduels de jusant dû à l'augmentation du débit liquide par les tributaires.

Une analyse de sensibilité plus fine a été réalisé sur la période de VE/ME du 11 au 25 juin 1996, pendant laquelle le ratio Q_{Trib}/Q_{Total} était très élevé (Figure 25c et d), pour observer l'influence des apports des tributaires (scénario Tac) sur l'hydrodynamique, l'hydrologie (percentiles 10 et 90 de la salinité) ainsi que la turbidité (percentiles 10 et 90 de la SSC) (cf. Annexe IV). A l'embouchure, la prise en compte apports liquides entraine une faible augmentation des courants résiduels de surface et une réduction de ceux du fond, de l'ordre du cm/s. Ce phénomène s'expliquerait par le renforcement de la circulation barocline dû à une stratification plus marquée, comme décrit dans le chapitre précédent (Figure 24). L'apport d'eau douce provenant des tributaires va également réduire la salinité (jusqu'à -1 psu) dans toute la colonne d'eau de Tancarville à l'embouchure. Enfin, les apports solides des tributaires induisent une augmentation de la turbidité dans la colonne d'eau pouvant atteindre +50 mg/l, en particulier dans le chenal à l'amont de Fatouville. Cependant, cette augmentation de SSC

reste faible (~5%) comparée aux niveaux de concentration observés et simulés dans la zone du bouchon vaseux (de l'ordre de 1000 mg/l).

En conclusion, la prise en compte des apports liquides et solides des tributaires de la Seine aval ne vient pas modifier significativement le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire aval de la Seine. De plus, les changements environnementaux des habitats pouvant être causés par les apports des tributaires (courant, salinité, turbidité) restent très réduits face aux variations tidales journalières, même durant les périodes où l'influence des tributaires est la plus forte. La prise en compte des tributaires permet cependant d'augmenter le réalisme de la modélisation environnementale de l'estuaire de la Seine.



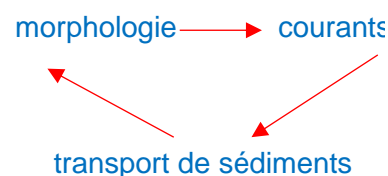
IV. Morphodynamique et évolution du substrat sédimentaire dans l'estuaire de Seine

Cette tâche a pour objectif d'évaluer les possibilités du modèle hydro-sédimentaire, mis en place et validé sur l'hydrologie ou les structures et flux de sédiments en suspension, à reconstituer les évolutions du sédiment superficiel pendant des périodes relativement courtes (de l'ordre de l'année). Les évolutions sédimentaires se traduisent par des érosions/dépôts, et par des changements de nature (fractionnement sables/vase).

Principes de modélisation des couplages morphodynamiques

Le modèle morphosédimentaire de la Seine constitue une version du modèle Sedi-MARS-3D, qui respecte donc l'ensemble des capacités et spécificités du modèle d'hydrodynamique et de transport sédimentaire MARS-3D, dans sa version à maillage curviligne non-orthogonal (et bien naturellement compatible avec l'autre version à maillage cartésien ou curviligne orthogonal). Une première version de modèle MARS morphodynamique avait été élaborée pour des estuaires schématiques dans le cadre du projet C3E2 (Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires) pour le Ministère de l'Ecologie ; cette version a été modifiée (changement de base de référence dans la grille de calcul) et a été adaptée au cas de la Seine pour prendre en compte des endiguements, et des pratiques de dragage.

Le principe d'un modèle morphodynamique est de respecter les couplages qui se produisent entre l'hydrodynamique et les transports sédimentaires qui en résultent via une évolution de la bathymétrie que ces transports provoquent, et dont dépendent la propagation des vagues et de la marée, ainsi que les courants associés. Dans les modèles "basés sur les processus" comme le modèle Sedi-MARS-3D, ce couplage se fait naturellement au cours du temps, en réactualisant la cote du fond à chaque pas de temps de calcul sédimentaire (de l'ordre de 10-30 secondes pour l'application Seine).



Du point de vue de l'hydrodynamique, l'élévation du fond doit être déterminée sur les bords de chaque maille, alors que l'épaisseur variable du sédiment est calculée au centre de la maille. Se donnant une position fixe d'un fond dur inérodable, défini initialement, la cote du fond aux centres des mailles peut être recalculée à chaque pas de temps : la cote de chaque bord de maille est ensuite réactualisée en prenant la valeur la plus haute des cotes du fond des mailles adjacentes. Dans le cas des digues submersibles, définies sur des bords de mailles, la cote correspondante ne peut être plus basse que sa valeur nominale, donnée, mais par contre peut devenir supérieure si les deux mailles adjacentes ont des élévations du fond plus hautes (cas d'un dépôt qui peut être temporaire). Il est à noter que pour les durées de simulation adoptées (≤ 1 an) dans HYMOSED, le couplage des vagues n'a pas été pris en considération, par souci de simplification et économie de calcul.

Processus complémentaire : érosion latérale

Une difficulté classique de la modélisation morphodynamique consiste à prendre en compte l'érosion latérale d'une maille de calcul qui n'est jamais recouverte d'eau, condition indispensable pour simuler un élargissement ou un méandrement de rivière ou d'estuaire. Une formulation simple du processus est ici adoptée, profitant de la résolution des variables d'état du modèle selon une grille *Arakawa C*, dans laquelle les composantes de vitesse sont calculées comme des composantes normales aux bords des mailles. Une maille (i, j) pourra être érodée latéralement par l'écoulement dans la maille $(i+1, j)$ selon la hauteur d'eau dans cette maille et la composante de vitesse parallèle au bord concerné (soit ici $[v(i+1, j) + v(i+1, j-1))/2]$; ainsi de suite pour les 4 bords de mailles (Figure 27). Le processus fait intervenir un nouveau paramètre (un coefficient d'érosion latérale) qui mérite calibration. Pour l'application à la Seine, la possibilité d'érosion latérale d'une maille non découverte a été introduite, pour permettre l'érosion latérale d'un rebord de plateau subtidal par les courants forts au sein d'un chenal qui le jouxte : les résultats se sont montrés sensibles à ce processus, en particulier l'intensité des dragages du GMPR (cf. Annexe VII).

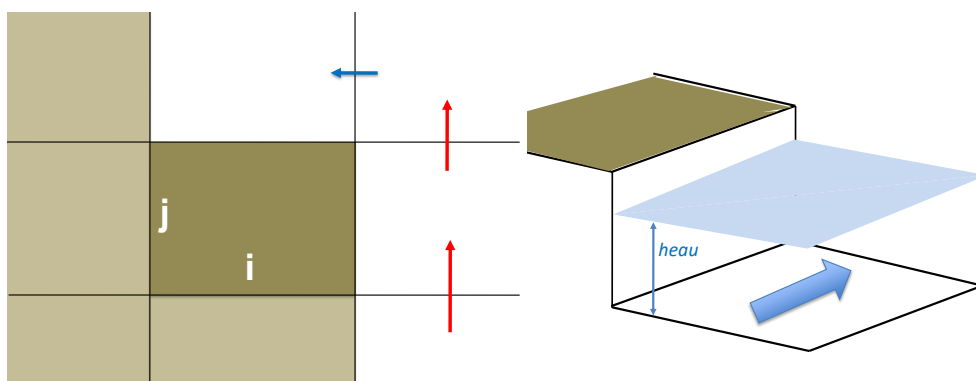


Figure 27. Schéma représentant la prise en compte d'un effet d'érosion latérale. La maille (i,j) est érodée significativement sur son bord droit, et un peu sur son bord haut. Schéma de droite : l'érosion de la maille grise est proportionnelle à la hauteur d'eau dans la maille voisine.

Autres processus pris en compte

Au contraire, le processus de glissement des dépôts frais de vase (crème de vase) sur des fonds à forte pente, modélisé comme l'étalement de ces dépôts dans les mailles voisines plus basses, n'a pas impacté les résultats du modèle en érosion/dépôt. Ce processus, introduit dans la modélisation morphodynamique des estuaires schématisés, a été provisoirement abandonné pour l'application Seine.

Enfin, l'analyse des résultats sur le banc du Ratier montre un effet localement trop faible des vagues. Il est proposé de schématiser l'effet érosif du déferlement des vagues par petits fonds par une augmentation de la contrainte de cisaillement induite à partir d'un critère de déferlement. Un critère simple de déferlement est donné par une valeur limite du rapport H/h , où H est la hauteur des vagues et h la hauteur d'eau. Dans notre modélisation, c'est l'information vitesse orbitale près du fond U_w qui est préférée à la hauteur des vagues H . Par très faible profondeur, on peut utiliser la relation $U_w = 0.5H\sqrt{g/h}$. Le critère $H/h < R_{\text{def}}$ devient $(2/g^{0.5})U_w < R_{\text{def}} \cdot h^{0.5}$. Ce processus est pris en compte dans le modèle en choisissant de façon empirique R_{def} ainsi que le facteur d'amplification de la vitesse orbitale qui est appliqué lorsque le critère est dépassé.

Stratégie de calibration/validation

En dehors du paramètre d'érosion latérale, la modélisation morphodynamique n'introduit aucun paramétrage supplémentaire. En théorie, il n'y a donc pas de phase de calibration (sauf pour l'érosion latérale), mais seulement une validation supplémentaire des résultats du modèle en termes morphologiques. En pratique, pourtant, les paramètres de modélisation sont si nombreux que des ajustements sont possibles, sans changer les structures ayant déjà été validées, telles que la propagation de la marée, l'hydrologie (salinité), et les caractéristiques du bouchon vaseux, avec un impact sur les érosions/dépôts. En particulier, en dehors d'un bilan sédimentaire "raisonnable" (cf. Tableau 4) la dynamique des sables n'avait pu être tout à fait validée jusque-là, étant donné leur impact de 2ème ordre sur le bouchon vaseux. Un grand nombre de simulations sur des durées moyennes (4 mois à 1 an) ont donc été entreprises (de l'ordre de 200 !) en faisant varier par tâtonnements successifs différents paramètres, pour restituer des phénomènes ou changements observés en préservant autant que possible les structures déjà validées. Ce processus s'est déroulé sur une période de 15 mois, avec un certain nombre d'aller/retours sur certains paramètres, car il n'y a pas indépendance de leurs effets respectifs sur le comportement du modèle. A posteriori, on peut se poser la question d'une possible optimisation du paramétrage sur la base d'une simulation d'ensemble, jugée initialement beaucoup trop coûteuse, mais peut-être pas tant au regard du nombre de simulations effectuées...

Rappel des paramètres de la modélisation

On peut distinguer des paramètres liés aux processus physiques, des paramètres liés à la caractérisation du sédiment, et des paramètres numériques. La sensibilité à ces derniers n'a pas été considérée : le pas de temps choisi reste celui requis pour la stabilité du modèle, et reste faible devant l'échelle de temps des processus hydro-sédimentaires. Les pas d'espace (grille de calcul) avaient été spécifiés lors du projet SA4 MODEL, résultant d'un compromis optimisé entre temps de simulation et résolution spatiale. Sur le ordinateur actuel de l'Ifremer, le temps de simulation est d'environ 3x24h avec 64 nœuds de calcul pour une simulation d'un an, sans le calcul des vagues. La "résolution sédimentaire" du modèle en 5 classes de taille peut être également vue comme un paramétrage numérique, qui n'a pas été modifié.

Les paramètres physiques ayant fait l'objet d'ajustements sont (1) la distribution spatiale des rugosités de fond, (2) la distribution spatiale des viscosités horizontales, (3) le frottement de peau utilisé pour l'effet des vagues, (4) la rugosité de peau utilisée pour le calcul des contraintes de courant sur le fond, (5) la constante d'érosion des sables purs. Le paramétrage de la turbulence qui influence surtout les remontées halines, les stratifications et la distribution du panache turbide n'a pas été révisé. De même, le comportement des vases pures (vitesse de chute et floculation, érosion), le paramétrage de la consolidation (vases et mélanges sable/vase), calibré à partir d'expérimentations en laboratoire sur des vases pures et des mélanges sable/vase de Seine [programme SA3 & Grasso *et al.*, 2015] n'ont pas été retouchés. En outre, le paramétrage de la transition entre comportement sableux et vaseux d'un sédiment mixte est resté rustique, sans intégration des résultats récents obtenus dans notre laboratoire pour des mélanges de sable fin et de vase [thèse de B. Mengual, 2016].

Les paramètres sédimentaires sont la distribution initiale des facies et leur composition (fraction des 5 classes sédimentaires, et densité totale du sédiment). Malgré la disponibilité d'une cartographie récente et très riche de la couverture sédimentaire obtenue dans le cadre

du programme SA4 COLMATAGE [Lesourd, 2011], les gradients de forçage hydrodynamique (vagues et courants) sont tels qu'ils sont susceptibles de générer des contrastes de distribution sédimentaires que l'échantillonnage de carottes/bennes plus ou moins équi-réparties ne permet pas de révéler. Il a été suggéré de construire dans le futur des plans d'échantillonnages sédimentaires structurés selon les gradients statistiques de contraintes de cisaillement (Figure 28) obtenues par modèle. D'autre part, l'épaisseur initiale du sédiment a été étendue à 3 m, sauf pour les secteurs vaseux, afin d'éviter qu'un tassement du sédiment initial n'induisse un abaissement du fond assimilable à une érosion : en général, ces secteurs vaseux sont plutôt sujets à accrétion, et leur épaisseur initiale importe peu (exception faite sans doute des vases très indurées dans la Fosse Sud).

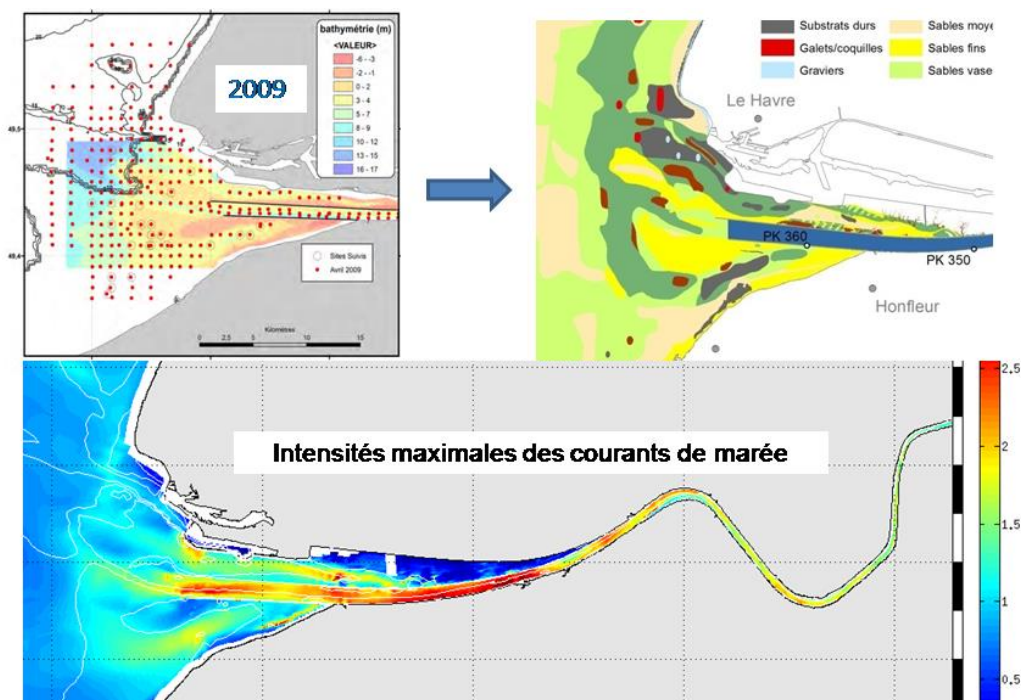


Figure 28. Carte des faciès sédimentaires issus d'un échantillonnage homogène relativement serré (Lesourd, 2011 : projet SA4 COLMATAGE), en regard des gradients de courants max, révélant des gradients dominants dans la dimension transversale de l'estuaire

Les tests ont révélé que l'introduction initiale dans le lit mineur d'une masse de crème de vase du même ordre que celle du bouchon vaseux n'était pas nécessaire. Elle a été remplacée par une masse initiale en suspension, mais les résultats sont très peu sensibles à cette initialisation : le stock initial de vase contenu dans le sédiment d'embouchure est largement suffisant pour que le système reconstitue une masse de bouchon vaseux conforme à sa "capacité" telle que révélée dans le chapitre II.

Une difficulté majeure résulte des possibilités d'ajustement de paramètres distribués dans l'espace, lorsque ceux-ci peuvent affecter des phénomènes se déroulant à distance. En particulier la rugosité de forme initiale, déduite empiriquement de la distribution initiale des sédiments, peut perdre de sa pertinence au gré des évolutions de la couverture sédimentaire. L'adoption d'une rugosité de forme dépendante de la composition du sédiment en temps réel, envisageable assez simplement, a été jugée risquée, du fait de la dépendance des rides de sable en fonction des forçages (vagues/courant) et de leur rémanence lorsque ces forçages diminuent. Une rugosité alternative, uniforme à l'embouchure, puis variable entre les digues et vers l'amont pour respecter la propagation de la marée, a été préférée. Des ajustements locaux de répartition initiale des faciès sédimentaires ont aussi été réalisés, donnant lieu à de

très nombreux tests. Par exemple les quantités draguées par le GPMR dans le secteur dit "de la brèche" se sont révélés sensibles à l'initialisation du sédiment entre les digues submersibles.

Il faut signaler d'autre part que la bathymétrie 2010 introduite dans le modèle a été légèrement retouchée pour aider à la simulation des dragages du GPMR au PK 351 (secteur de la brèche). En effet dans la bathymétrie initiale utilisée le plafond du chenal dans ce secteur était nettement plus bas que la cote de dragage, nécessitant de déposer une forte quantité de sédiment avant de commencer à draguer. La correction apportée permet de réduire ce temps. L'exercice a montré une forte sensibilité des dragages simulés à la bathymétrie environnant le chenal entretenu. En effet, une cote du fond légèrement surélevée à proximité du chenal amplifie les courants dans le chenal par respect de la continuité, ce qui entraîne un auto-dragage de ce dernier. Au contraire, un approfondissement de la section de part et d'autre du chenal entraîne une réduction des vitesses dans ce chenal, et un risque de sédimentation locale. On peut se demander si une réduction locale de section par apport de matériaux grossiers (donc pouvant s'y stabiliser) au droit du PK 351 au nord du chenal ne pourrait constituer une solution au problème récurrent d'entretien de ce secteur par le GPMR.

Enfin, la limitation des zones de dragages a été révisée avec le concours du GIPSA dans le cadre du projet MEANDRES (thèse de J.P. Lemoine) au moyen du SIG. Le paramétrage du modèle est rappelé dans l'Annexe VIII.

Rappel des mesures et observations disponibles pour la validation

Les mesures considérées pour l'évaluation du modèle sont :

- mesures marégraphiques pour vérifier la calibration hydrodynamique ;
- quantités et nature des sédiments dragués dans chacune des zones du GPMR [5 zones : z1 engainement, z2 et z3 entre Balise A et pont de Normandie, z4 entre le pont et PK348 ("secteur de la Brèche") et z5 en amont jusqu'à Tancarville] et du GPMH [z6 port du Havre, z7 avant-port du Havre et chenal d'accès, z8 port 2000 et z9 accès port 2000] ;
- différentiels bathymétriques constitués à partir des "relevés hydrographiques" (RH) annuels des ports, entre 2009 et 2012 ; ces relevés RH ont fait l'objet de bilans par secteurs sélectionnés par les GPM et la société Artelia qui peuvent être examinés en complément ;
- enregistrements altimétriques locaux fournis par les systèmes ALTUS, déployés en subtidal dans le cadre du projet COLMATAGE et en intertidal soit dans le cadre de projets SA2 et SA3 soit dans le cadre du présent projet HYMOSED.

En raison du nombre élevé de simulations à réaliser, une période de validation rassemblant différentes conditions de forçage représentatives en un temps restreint, coïncidant si possible à des observations, a été sélectionnée. C'est la période d'une année entre 1er août 2010 et 31 juillet 2011 qui a été retenue, en raison des forçages marée/vent/débit représentatifs (période de référence du chapitre III) et pour laquelle des évolutions bathymétriques issues des cartes RH sont relativement cohérentes avec la tendance pluriannuelle 2009-2012 (annexe 9). En outre c'est la période pour laquelle on dispose des enregistrements ALTUS les plus longs en domaine subtidal (sur les flancs ouest et est du banc du Ratier).

Par ailleurs des indicateurs globaux ont été évalués pour vérifier le maintien des qualités du modèle à simuler le bouchon vaseux (masse totale en suspension, localisation) et la vraisemblance des résultats (bilans sédimentaires).



Analyse des résultats et sensibilité

Parmi les tests réalisés, 3 ont retenu notre attention. Ils ont tous les trois la même initialisation sédimentaire, qui est un ajustement de la carte des faciès sédimentaires de Lesourd (2011). Les distributions de chaque classe sont représentées en Figure 29.

Les 3 tests se distinguent par la rugosité de forme affectée au calcul des courants (z_{0xyf}), la rugosité de peau affectée au calcul des contraintes à l'origine des resuspensions par le courant (z_{0p}) et le facteur modulant la constante d'érosion des sables (E_{0s}). D'autre part le run 257 est celui pour lequel l'effet du déferlement des vagues sur la resuspension a été pris en compte par augmentation locale de la contrainte de cisaillement.

- run 229 : distribution z_{0xyf} issue des faciès, très proche de celle de la version de référence sans morpho (appelée *référence hydrosédim*), adaptée dans le chenal de Honfleur à Caudebec, $z_{0p}=0.5\text{mm}$, $E_{0s}=0.8$;
- run 195 : distribution z_{0xyf} uniforme et faible (0.2mm) dans l'embouchure, adaptée dans le chenal de Honfleur à Caudebec, $z_{0p}=0.5\text{mm}$, $E_{0s}=0.8$;
- run 257 : distribution z_{0xyf} uniforme et élevée (1mm) dans l'embouchure, adaptée dans le chenal de Honfleur à Caudebec, $z_{0p}=0.8\text{mm}$, $E_{0s}=0.6$.

Le run 229 sera notre *référence morpho*, tandis que le run 195 sera la *version frottement faible*, et le run 257 la *version frottement fort et déferlement*.

La

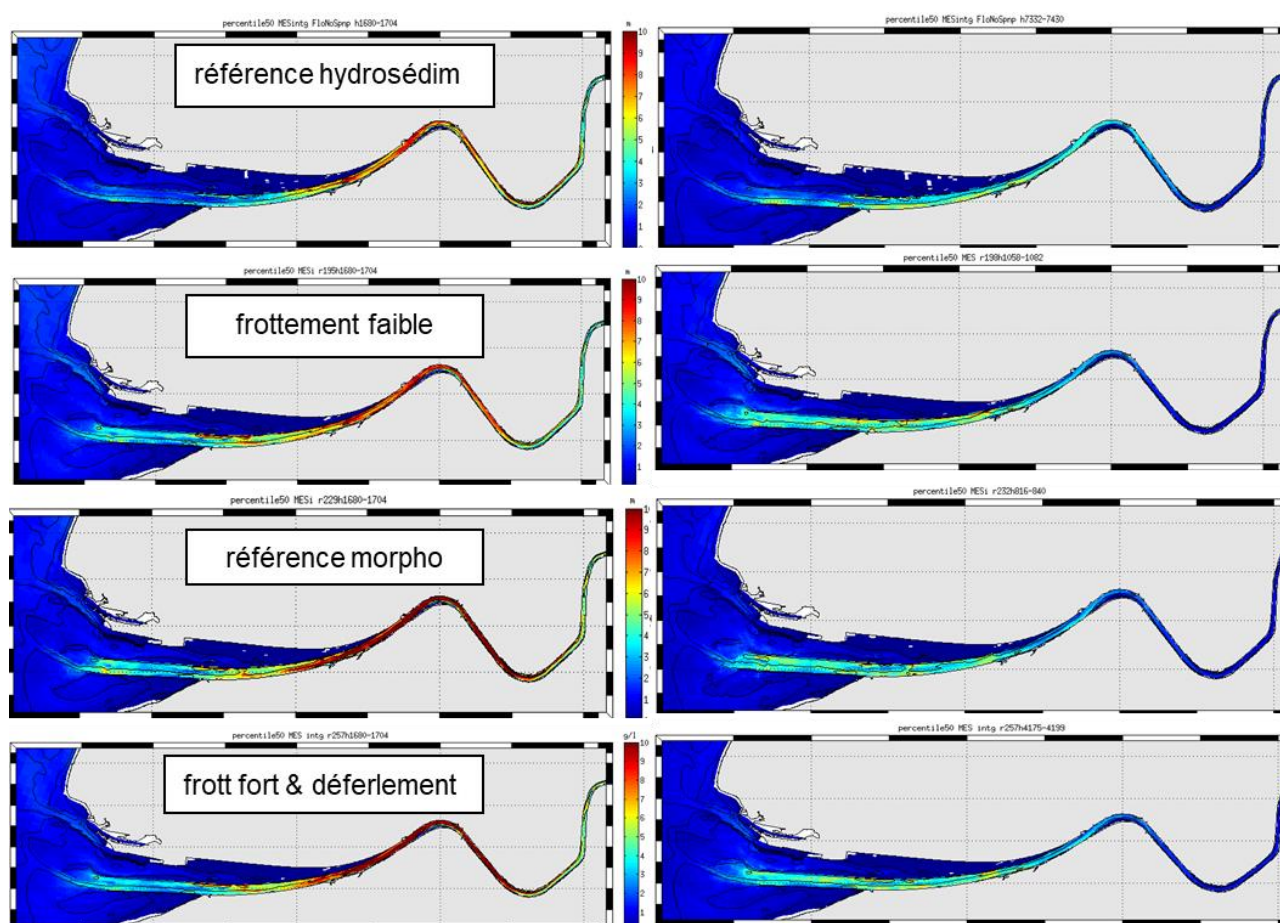


Figure 30 montre que le bouchon vaseux de ces runs morpho est positionné de la même façon que pour le run de référence, avec des concentrations supérieures selon la version. Une comparaison quantifiée est donnée plus loin.

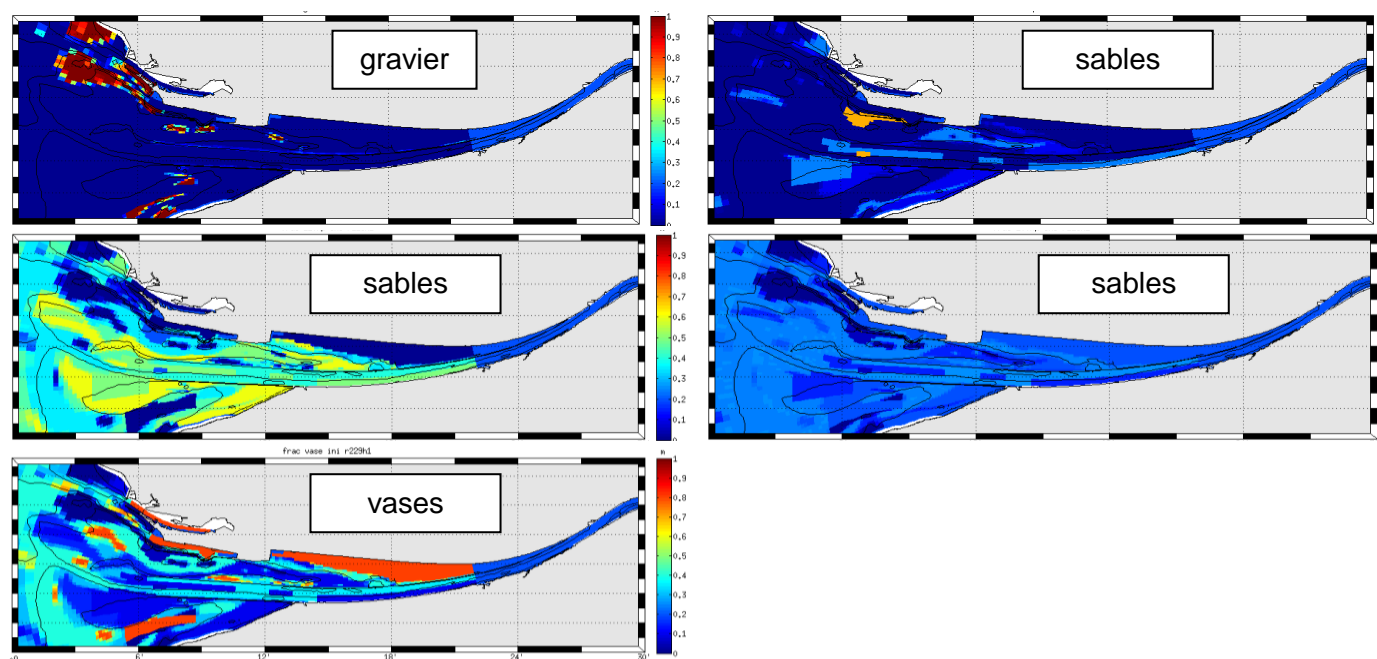


Figure 29. Distribution initiale des classes sédimentaires dans l'embouchure de la Seine.

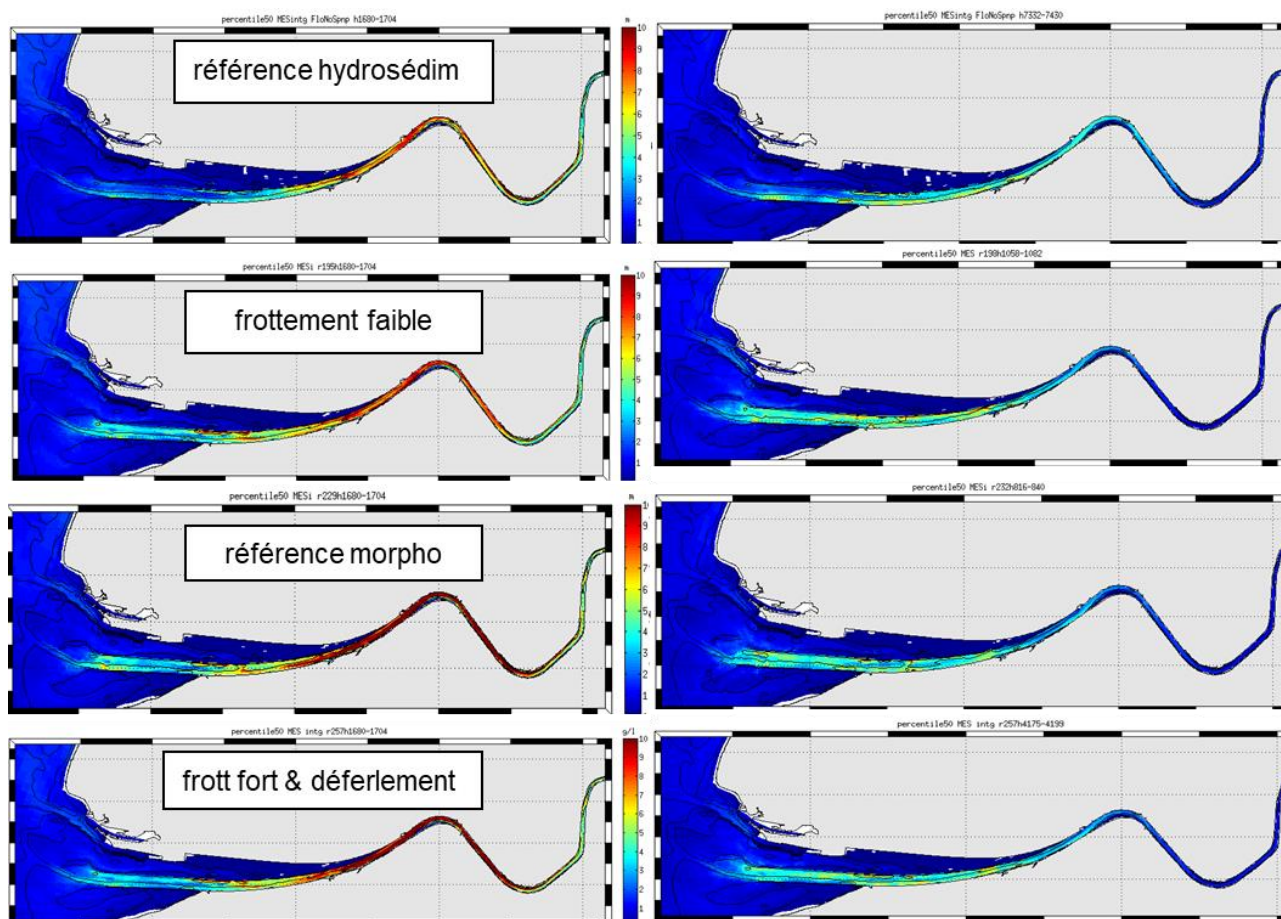


Figure 30. Représentation du bouchon vaseux par la médiane (percentile 50) au cours d'une vive eau de la masse en suspension intégrée sur la verticale (en kg.m^{-2}). Situation d'étiage à gauche, et de crue ($1300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) à droite. (valeur max en légende : 10 kg.m^{-2})

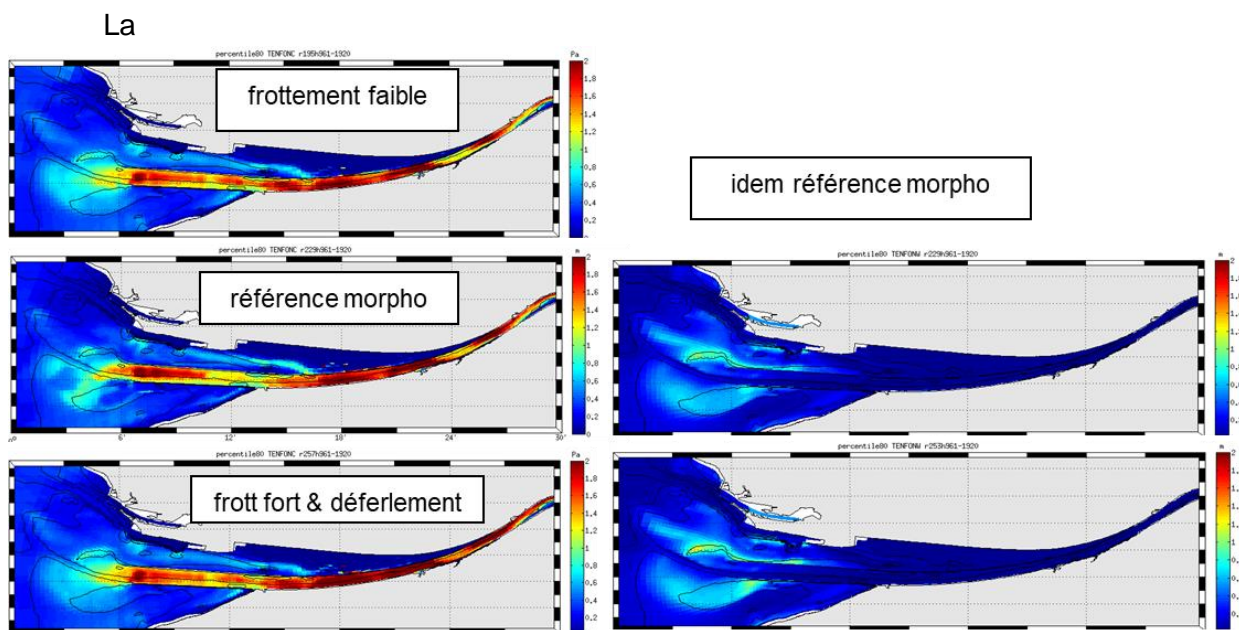


Figure 31 représente le poids des forçages courants et vagues pour les 3 tests. Les différences entre les versions restent subtiles.

Les **résultats en termes d'évolution morphodynamique**, centraux dans ce chapitre, sont donnés sous forme de différentiel bathymétrique pendant 1 an (Figure 32) ou 2 ans et

comparés au différentiel entre RH 2012 et RH 2010 couvrant approximativement la période de fin 2009 à fin 2011 (cf. Annexe IX). Les différentiels bathymétriques annuels obtenus à partir des levés "RH" représentent des évaluations approximatives, en raison des incertitudes de mesure mais surtout parce que ces levés sont constitués d'observations étalées sur plus de 6 mois. Ainsi, pour la période jugée représentative "été 2010 - été 2011", nous avons préféré retenir le différentiel RH 2012 (i.e. fin 2011) - RH 2010 (i.e. fin 2009), qui moyenne l'évolution morphologique à court terme succédant à la bathymétrie initiale du modèle.

Les patrons d'érosion/dépôt simulés montrent des analogies et des différences, à la fois entre eux et avec l'observation. D'une façon générale les évolutions morphologiques apparaissent excessives par rapport aux observations.



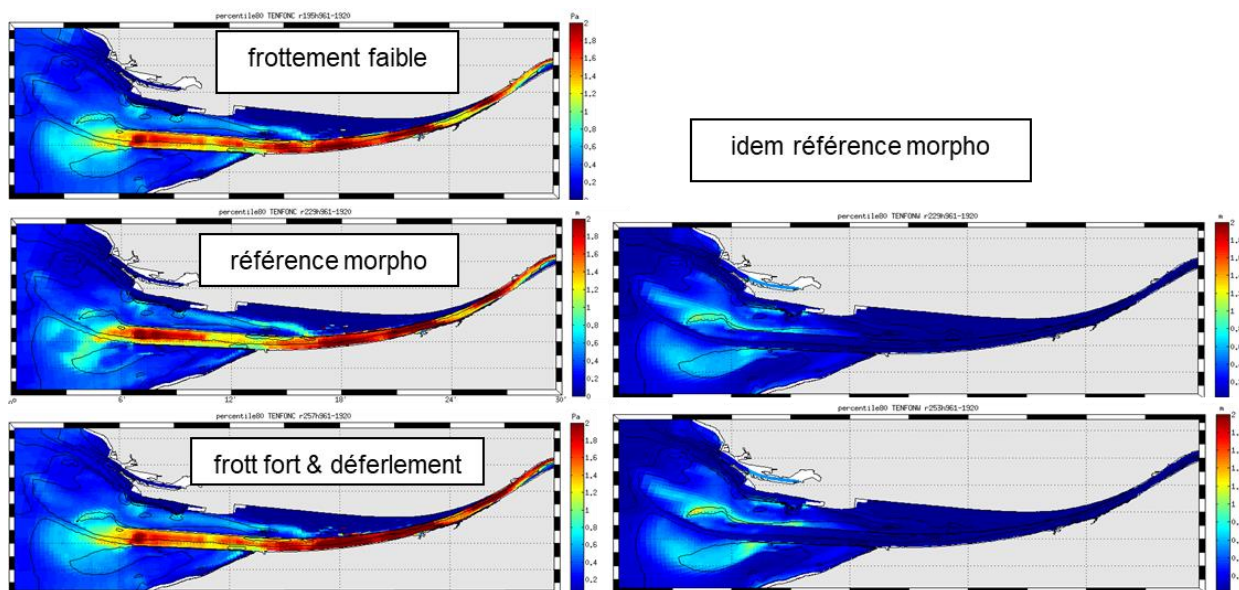


Figure 31. Percentile 80 de la contrainte de cisaillement de peau (en Pa, valeur max 2 Pa) générée par les courants (à gauche) et par les vagues (à droite), pendant 40 jours (approximativement 10 septembre - 20 octobre 2010).

Analopies.

Toutes les simulations montrent une érosion généralisée dans le chenal (de digue à digue) entre Balisa A et Honfleur, comme dans les observations, et plus en amont, une érosion dominante dans le chenal de navigation (il reste cependant des secteurs dragués !) ainsi qu'un dépôt marqué au sud de la digue basse nord (DBN) entre Honfleur et la brèche, ce qui est différent de la nature (les observations montrent aussi un secteur en dépôt, mais détaché de la DBN). Tous les tests simulent le comblement du méandre amont, et pour la Fosse Nord 1) une érosion du secteur aval, 2) un dépôt sur le banc de sable au nord de la DBN, 3) une accrétion de part et d'autre de l'épi, et 4) une érosion locale dans le chenal Nord au droit de ce dernier. Ces résultats sont en accord avec les observations, à la résolution près du modèle, qui reste faible pour le secteur. A noter cependant que l'accrétion sur le banc au nord de la DBN se produit plutôt en son centre dans la nature, et est simulé sur son flanc nord. L'affouillement au SW de la digue de Port 2000 est également constaté en nature comme dans les simulations. Tous les tests montrent une progradation du banc du Ratier vers l'ouest, comme en nature, et une érosion sur son flanc nord, en marge du chenal de navigation (entre balise A et l'engainement). Une légère sédimentation sur le banc à l'approche de la DBS, constatée sur les cartes bathymétriques, est qualitativement reproduite par le modèle (la config *frottement fort et déferlement* est la plus conforme à ce sujet). L'érosion de la fosse sud, assez claire sur les mesures, reste timide dans les simulations. Le modèle simule effectivement une accrétion (observée) sur le flanc SE du banc du Ratier et juste à côté de l'érosion, mais de façon un peu décalée. Enfin, toutes les simulations montrent de l'accrétion sur les flancs du chenal d'accès à port 2000, non constatée sur les différentiels RH : il est possible que ce soit une compensation du modèle à une initialisation un peu trop large du chenal par rapport à la largeur maintenue par dragages, le non alignement du maillage par rapport au chenal n'aidant pas... Dans la suite, on pourra réévaluer la possibilité d'atténuer cet effet en introduisant le glissement des vases en dépôt sur les fonds pentus.

Différences.

Le secteur entre le dépôt du Kannig et le port du Havre, en équilibre selon les observations, est en accrétion plus ou moins prononcée dans les simulations, de même que le sommet du banc du Ratier.

Toutes les tentatives récentes de paramétrisation ont consisté à réduire ce dépôt excessif dans le modèle, avec un succès trop marginal : en particulier l'augmentation de la resuspension par les vagues simulants l'effet du déferlement par faible hauteur d'eau (carte du bas, Figure 32) est loin d'être suffisante :

une validation de la hauteur des vagues dans ces deux secteurs (ainsi que devant la plage de Ste

Adresse, où les vagues simulées sont visiblement insuffisantes, cf.

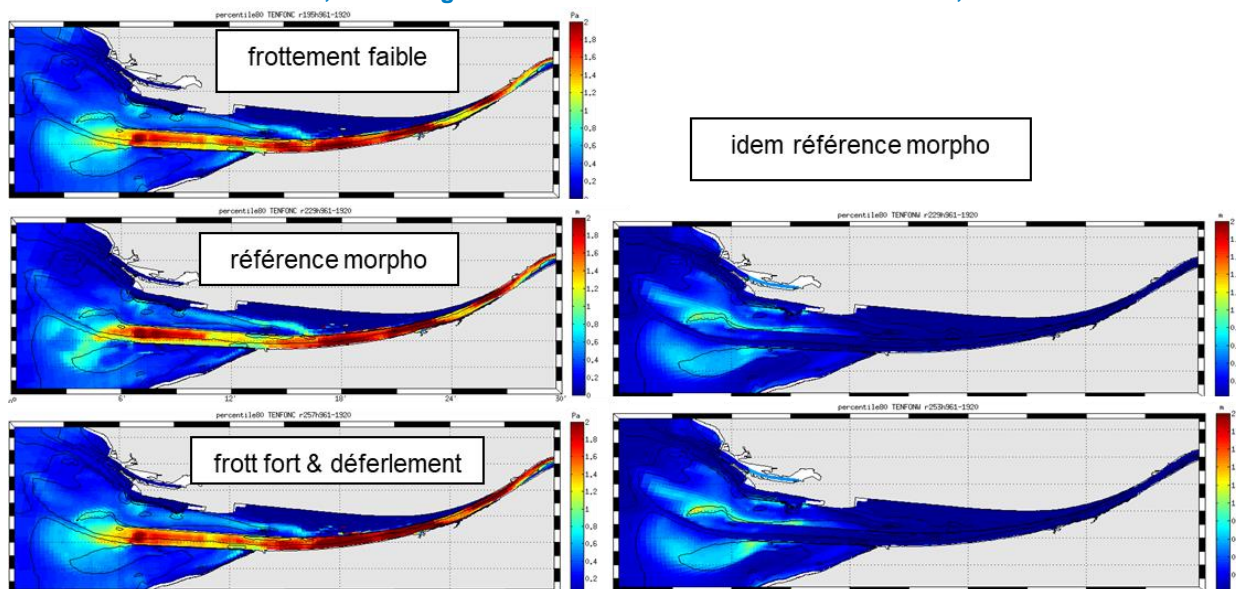


Figure 31), et peut-être une mesure du courant de marée seraient sans doute utile. Le dépôt au Kannig varie selon les tests en fonction des quantités draguées, mais reste moins dispersé que dans les mesures : il est possible que nous l'ayons moins étalé que dans la réalité, ne retenant que les sites de clapages de fin de période. Les différences observées sur le banc d'Amfard en fonction des tests sont intéressantes. Ce banc a tendance à s'ouvrir vers le N-NW, avec une sédimentation sur son flanc nord et de l'érosion sur son flanc sud/sud-est. La config *frottement faible* ne reproduit absolument pas cela, alors que les deux autres le font, en particulier la config *frottement fort et déferlement*. Cette dernière reproduit assez bien l'alternance dépôt/érosion/dépôt de l'ouest vers l'est entre le Kannig et le banc d'Amfard. Cette simulation se caractérise aussi par des érosions/dépôts plus modérés, plus en accord avec les mesures : elle nous paraît donc la meilleure pour les évolutions morphologiques (mais elle est moins performante pour les dragages).

Depuis le printemps 2017, des simulations complémentaires ont été réalisées, en profitant du changement de calculateur scientifique à Ifremer, le nouveau calculateur permettant des simulations nettement plus rapides. Ainsi la Figure 33 ci-après représente les résultats obtenus pour deux simulations de 2 ans (entre le 27 décembre 2009 et le 27 décembre 2011). Pour chacune d'elles, un *spin up* sédimentaire de 2 ans a été effectué, puis la bathymétrie initiale réactualisée dans la même configuration de référence, et la simulation morpho-sédimentaire a soit commencé le 1er janvier 2009 (simulation 3468), soit directement le 27 décembre 2009 (simulation 34750). Dans le premier cas la bathymétrie a pu évoluer pendant une première année avant examen des évolutions sédimentaires, mais pas dans le second cas. Pour les deux simulations, le paramétrage sédimentaire est très proche du run morpho de référence (run 229), mais la rugosité hydraulique était calculée en fonction de la nature sédimentaire simulée, ce qui peut se traduire par un forçage par les courants légèrement différents. On observe des évolutions morphologiques qualitativement analogues

aux précédentes simulations, mais nettement moins intenses. Sur cette période, elles restent néanmoins supérieures au différentiel RH. L'évolution autour du banc d'Amfard apparaît très atténuée dans ces deux simulations : en fait elle a pu être modifiée en raison du spin up sédimentaire ou à cause de la réactualisation des rugosités hydrauliques. La sensibilité du modèle à la durée du spin up, au démarrage des simulations morphodynamiques et à la réactualisation des rugosités hydrauliques sera approfondie dans le cadre du projet Seine-Aval 6 MORPHOSEINE.



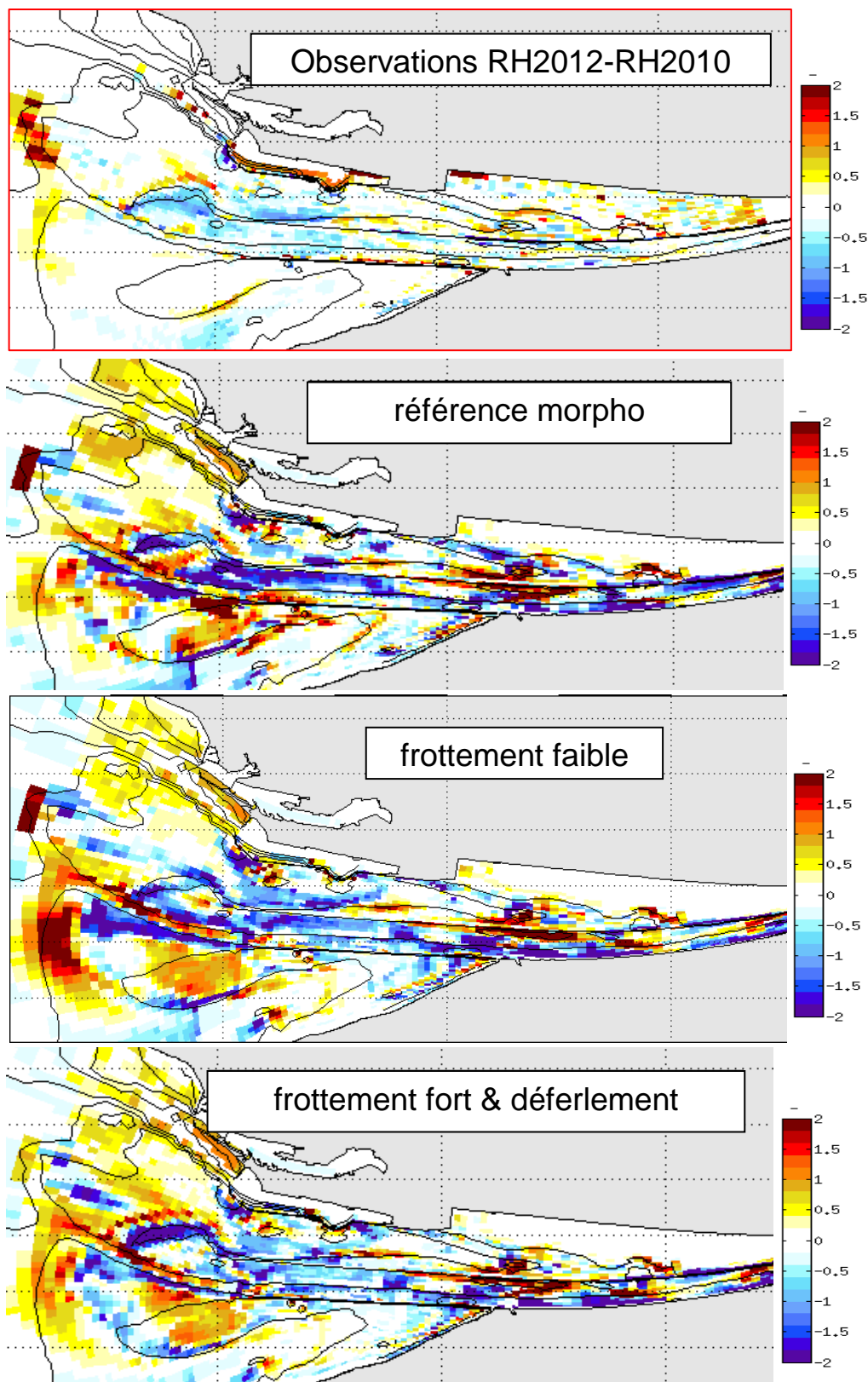


Figure 32. Différentiels bathymétriques (en m) simulés sur 1 an (1er aout 2010 - 31 juillet 2011) et différentiel observé pendant la période (environ 2 ans). Accrétion en >0 , érosions (ou effet du tassement) en <0 .

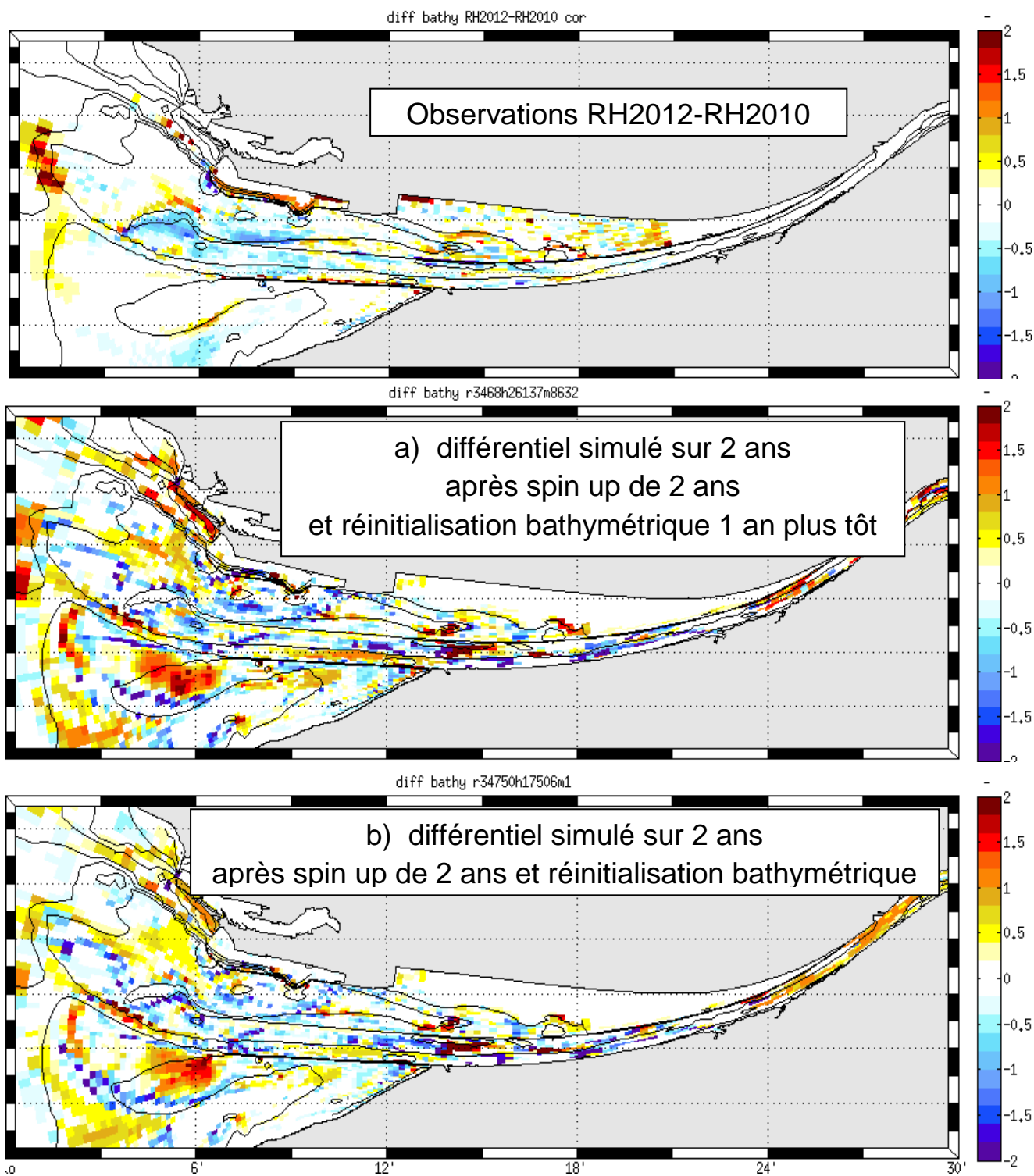


Figure 33. Différentiel bathymétrique (en m) simulé sur 2 ans (27 décembre 2009 - 27 décembre 2011) et différentiel observé pendant la même période d'après les levés synthétiques RH 2012 et RH2010..

Accrétion en >0, érosions (ou effet du tassement) en <0).

a) simulation N°3468 après spin up de 2 ans, puis réinitialisation bathymétrique et début de simulation le 1er janvier 2009.

b) simulation N°34750 après spin up de 2 ans, puis réinitialisation bathymétrique et début de simulation le 27 décembre 2009

Simulation des dragages

La Figure 34 représente l'évolution des dragages simulés dans différents secteurs et pour l'ensemble des ports, conjointement à la chronologie des forçages et à la masse du bouchon vaseux, pour la config *référence morpho*. Elle est complétée (Figure 35) par la représentation des dragages du GPMH dans la zone des accès à Port 2000 et ceux du GPMR à l'engainement et à la brèche (rien n'est dragué en zones 3 et 5, et les dragages de la zone 2 représentent environ 12% des masses draguées à l'engainement).

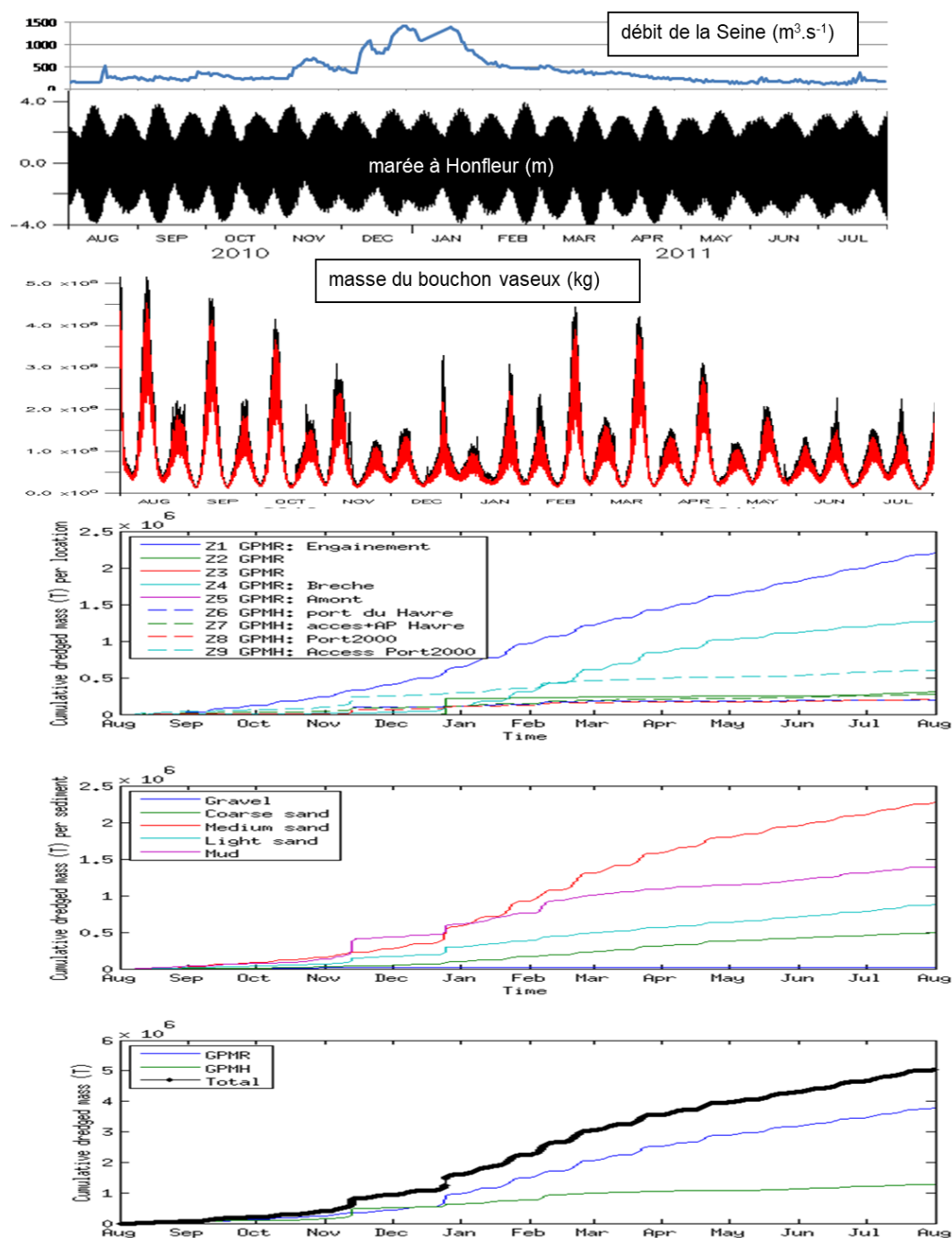


Figure 34. Evolution des dragages (en Mtonnes) simultanément aux forçages.

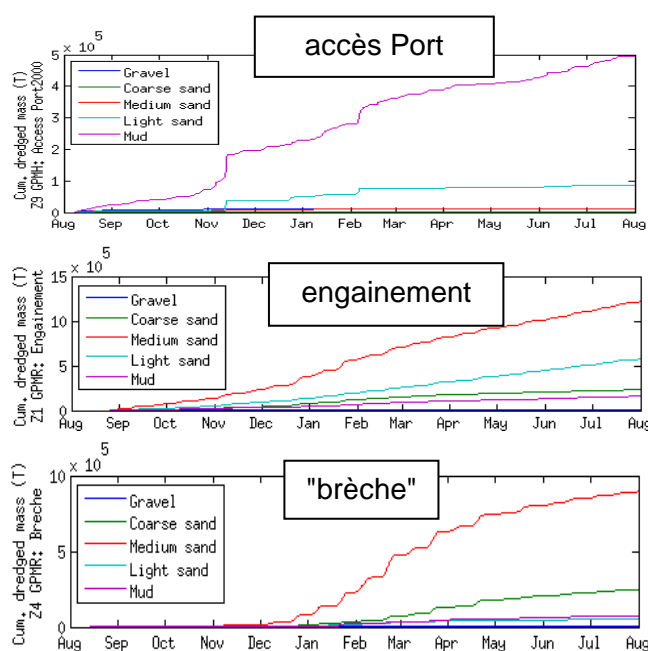


Figure 35. Evolution des dragages dans certains secteurs.

On observe :

- un dragage annuel de 1.2 Mtonnes dans les secteurs du GPMH et de 3.8 Mtonnes dans ceux du GPMR (le GPMR a dragué 3.76 Mtonnes en 2010 et 3.78 Mtonnes en 2011, le GPMH 2Mt en 2010 et en 2011), donc un remarquable accord entre simulations et observations
- un dragage nul dans les zones 3 et 5 du GPMR, et faible en zone 2, comme dans la réalité ; un dragage à la brèche égal à 50% de celui de l'engainement semble aussi réaliste
- un dragage largement dominant en vase pour le GPMH, également conforme à la nature ; par contre, les dragages simulés pour les zones du GPMR ne contiennent pas assez de vase, à la brèche comme à

l'engainement.

- le dragage dans le secteur de la brèche ne démarre qu'après 4 mois, sans doute le temps de rattraper la cote de dragage, plus élevée que la cote initiale des mailles concernées : c'est cette différence qui a été réduite dans l'ajustement bathy évoqué précédemment.

La modélisation apporte aussi des informations intéressantes sur la dynamique et la saisonnalité des dragages. On peut noter sur les Figure 35 et Figure 34 que la pente des quantités draguées intégrées au cours du temps est supérieure en crue, en particulier à la brèche, et que les apports les plus importants ont lieu en vive eau dans les zones du GPMR. Au contraire, le dragage dans les zones du GPMH est plus influencé par les tempêtes, et l'est très peu par l'amplitude de marée. Pour rappel, les résultats des simulations supposent une capacité de dragage infinie, de telle sorte que la cote du plafond du chenal à satisfaire peut être respectée instantanément.

S'agissant des autres configurations sélectionnées, les simulations des dragages sont moins bonnes, comme le montre le Tableau 6. C'est pour cette raison que la dernière configuration testée, plutôt meilleure en différentiel bathy, n'est pas retenue comme la version de référence.

Tableau 6. Masses sédimentaires draguées (GPMH et GPMR) selon les différentes simulations.

configuration	Dragage annuel GPMR (10 ⁶ Tonnes)	... dont z5 (brèche) (10 ⁶ T)	Dragage annuel GPMH (10 ⁶ T)
référence morpho	3.8	1.3	1.2
frottement faible	4	0.3	2
frottement fort & déferlement	1.6	0.28	2

Variations altimétriques

Les résultats de la config de référence morpho dans les secteurs des mesures ALTUS de 2010-2011 sont reproduits sur les Figure 36 et Figure 37. Il est d'abord constaté sur ces deux secteurs une très forte hétérogénéité spatiale : les tendances évolutives dans les mailles voisines du point théorique (carré rouge) sont différentes. Cependant, les ordres de grandeur des variations sont respectés. On peut considérer que sur le site des Ratelets, la simulation de la maille bleue représente assez bien la mesure ALTUS, sauf le dépôt important lors de la tempête de fin décembre. En début de période, des épisodes rapprochés d'érosion/dépôt sont constatés, les deux souvent induits par des vagues importantes. Etonnamment, la très forte tempête du 10 novembre se traduit en légère accrétion suivie d'une aussi légère érosion, dans la mesure comme dans le modèle (de façon plus marquée dans la mesure). La fin de période, plus calme, est caractérisée par une tendance érosive en moyenne, avec des érosions marquées en vive eau (effet du courant de marée), suivies de sédimentation progressive jusqu'à la vive eau suivante.

Concernant la mesure à Ratier Est, la tendance générale est à l'érosion (10 cm en 8 mois), avec cependant des épisodes d'accrétion faisant suite à une tempête, pouvant s'effacer quelques jours après. La courbe rouge reproduit ce genre d'épisodes, mais un dépôt excessif survient lors de la vive eau de fin mars. La courbe bleue, obtenue dans une maille attenante, reproduit mieux la tendance à moyen terme, et en particulier le processus d'érosion lors des vives eaux.

Cette comparaison montre l'extrême complexité des épisodes d'érosion/dépôt dans ces secteurs subtidiaux, déjà décrite dans le cadre du projet SA4 COLMATAGE, et assez bien simulée par le modèle, qualitativement et avec les bons ordres de grandeur. Il faudra un examen plus attentif pour tenter d'expliquer chacun des épisodes, en considérant simultanément la succession des forçages (y compris la direction du vent et des vagues) et l'évolution de la nature du sédiment superficiel, et ce dans un voisinage relativement étendu du point de mesure.



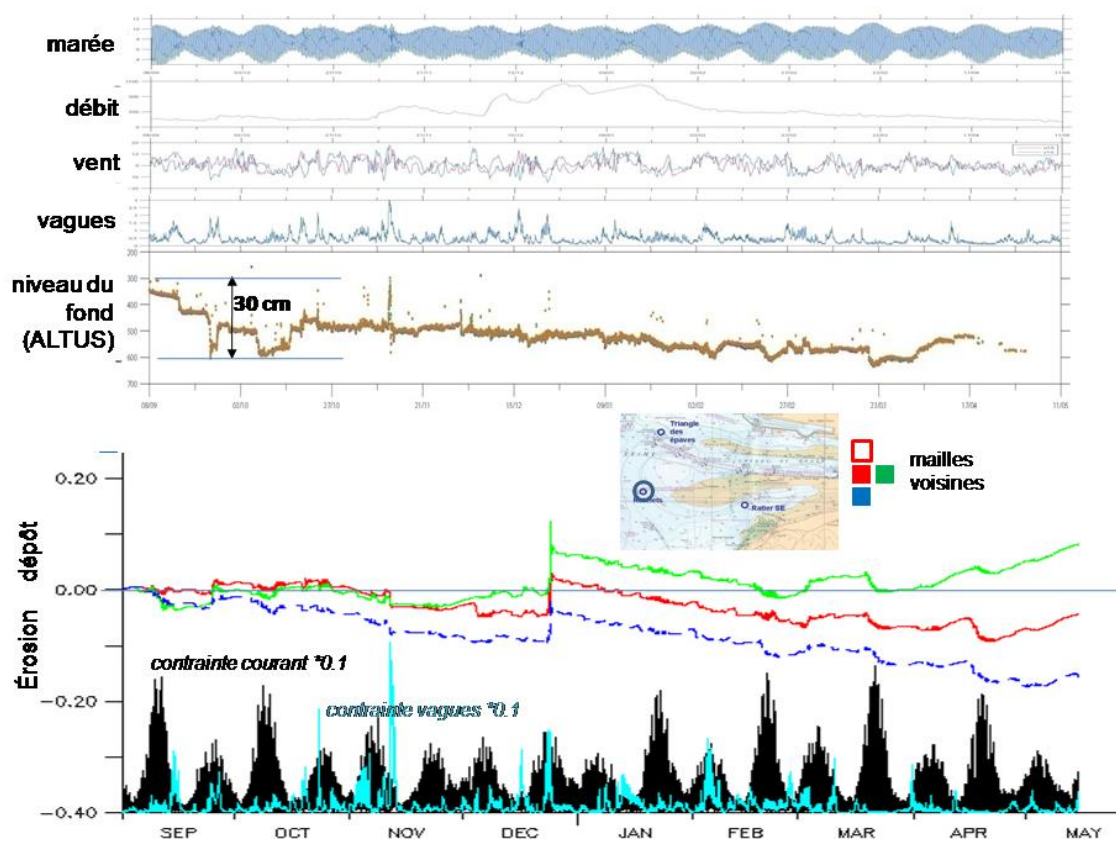


Figure 36. Simulation des érosions dépôts (en m) près de la bouée des Ratelets, à l'ouest du banc du Ratier

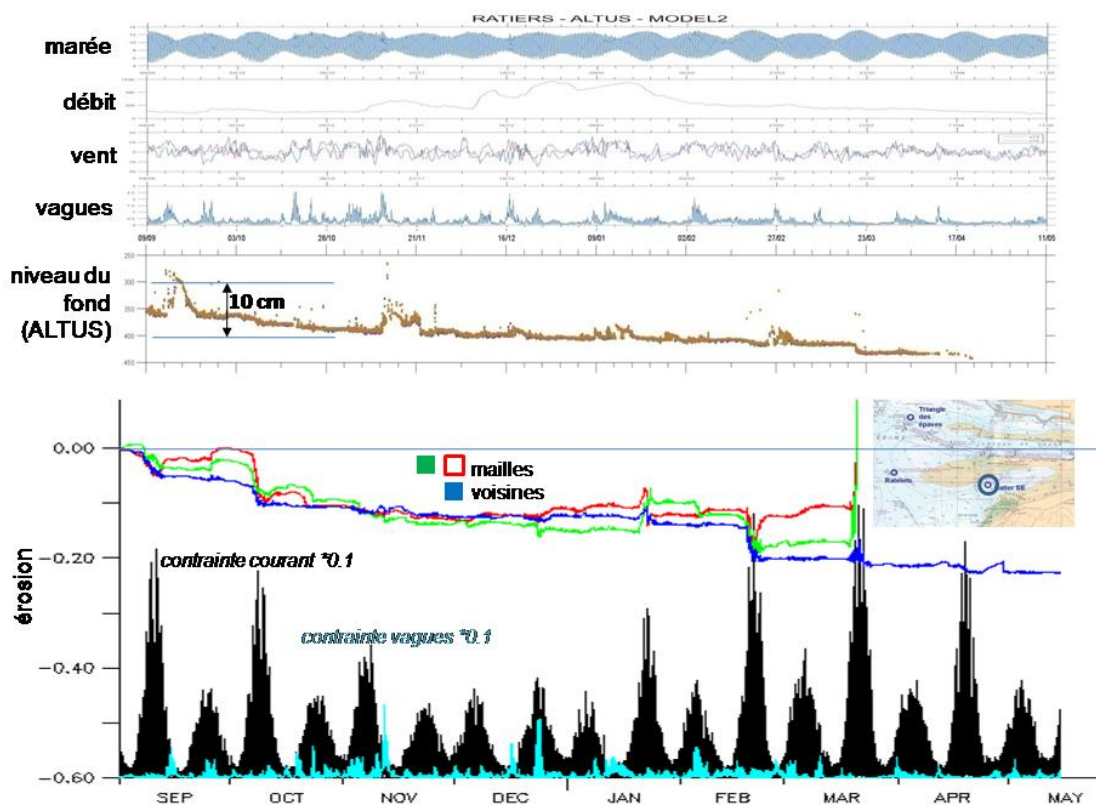


Figure 37. Simulation des érosions dépôts (en m) au sud-est du banc du Ratier.

Bilans sédimentaires

Des bilans sédimentaires ont été effectués sur les secteurs d'embouchure délimités par les GPM et la société Artelia dans le cadre de l'étude en cours sur l'aménagement de la fosse Nord. La délimitation des secteurs, reproduite en Annexe X, a été reportée approximativement sur notre maillage. La période d'initialisation des 4 premiers mois a été écartée, et les bilans ont été effectués sur la config *référence morpho* en sommant à tout instant les volumes sédimentaires correspondant aux accrétions (respectivement diminutions, qui peuvent résulter d'érosions, mais aussi du tassement) par rapport au volume initial pour obtenir un "volume total" d'accrétion (respectivement d'érosion/tassement), et le bilan entre les deux. Au cours du temps, ces volumes peuvent diminuer ou augmenter, et il est difficile de savoir si les valeurs obtenues sont comparables aux calculs effectués par Artelia en commençant en 2005. Par contre les résidus sur une période donnée le sont, puisqu'ils représentent la différence de volume sédimentaire entre un instant et un autre. Les résultats sont présentés par zones, et exprimés en bilans ramenés à l'année, les observations étant des bilans opérés sur les RH 2010 et 2012 par Artelia ou par le GIPSA à l'aide de SIG.

On peut noter que les bilans sont très inférieurs aux volumes totaux érodés ou déposés, quelle que soit l'estimation. Sur la période considérée, le bilan varie entre - 0.74 et -0.875 Mm³/an d'après les relevés RH et selon le traitement effectué, alors que notre simulation *référence morpho* donne un bilan lui aussi négatif mais de l'ordre de -3 Mm³/an, tandis que notre simulation *frottement fort & déferlement* donne un bilan de -1.5 Mm³/an, assez proche des observations. Ce bilan nous semble donc raisonnable compte tenu des imprécisions de l'exercice, et de l'extrapolation de 8 à 12 mois effectuée sur les résultats du modèle. Il serait d'ailleurs utile d'effectuer les calculs des masses érodées et des masses déposées sur les différentiels RH 2011-2010 et 2012-2011, et de voir si leurs sommes respectives sont égales aux masses obtenues avec le différentiel RH 2012-2010. Néanmoins, les volumes totaux en accrétion et ceux en érosion semblent excessifs dans nos simulations, indiquant que la dynamique simulée serait amplifiée. C'est aussi ce qui apparaissait sur la Figure 32, et nous faisait préférer la simulation *avec frottement élevé et déferlement*. Rappelons enfin que l'incertitude des relevés RH est estimée de l'ordre de ± 10 Mm³. La Figure 38 représente l'évolution temporelle des érosions/dépôts pour toutes les zones. La même représentation par zone permet d'analyser la corrélation entre ces variations sédimentaires et les forçages débit/marée/tempête : elle est fournie en annexe X. Sur le Tableau 7, les résultats des différentiels simulés sur 2 ans après spin up de 2 ans ont été ajoutés. Les érosions/dépôts par zones sont réduites d'un facteur 2 à 3, par contre le bilan global montre un engraissement de 2.55 Mm³/an dans la simulation avec évolution morphosédimentaire en 2009, précédant l'estimation du différentiel, et sinon une érosion globale de 0.4 Mm³/an. La Figure 39 représentant l'évolution globale des érosions/dépôts montre une compensation générale entre érosions et dépôts dans les deux cas, mais aussi leur régularité au cours du temps, tandis que le bilan est nettement plus fluctuant. On retient surtout que selon la simulation, le bilan global peut changer de sens : dans le cas où l'évolution morphodynamique est calculée directement après spin up, on retrouve une très faible érosion globale, dans l'ordre de grandeur des observations, tandis que si après spin up on laisse les fonds évoluer pendant un an, le modèle indique une tendance à l'engraissement pour les évolutions ultérieures. Cette tendance sera analysée et revue dans le cadre du projet MORPHOSEINE. Cela montre une forte sensibilité des réponses du modèle à son initialisation à la fois morphologique et sédimentaire.

Tableau 7. Bilans érosion/dépôt pour différentes zones d'embouchure, en millions de m³ rapportés à l'année. En rouge sont indiquées les estimations s'écartant vraiment des observations.

zone	Bilan Artelia d'après RH	Accrétion GIPSA d'après RH	Erosion GIPSA d'après RH	Bilan GIPSA d'après RH	Accrétion réf.morp. Frotf+deferl	Erosion réf.morph. Frotf+deferl	Bilan réf. morpho Frotf+deferl	Accrét. run 2 ans	Erosion run 2 ans	Bilan run 2 ans
Amfard	-0.65	0.615	-1.295	-0.68	4.0 x1.5 4.05x1.5	-2.4 x1.5 -3.1 x1.5	2.4 1.42	3.3 4.4	-3.0 -4.1	0.3 0.3
Ratelet	0.64	1.025	-0.425	0.60	4.7 x1.5 5.5 x1.5	-4.5 x1.5 -3.6 x1.5	0.3 2.85	5.9 6.9	-3.2 -4.8	2.7 2.1
Kannik	1.89	2.325	-0.425	1.90	3.9 x1.5 2.6 x1.5	-2.0 x1.5 -2.0 x1.5	2.85 0.90	3.7 2.5	-3.6 -4.6	0.1 -2.1
Zone endig.	-1.09	0.66	-1.695	-1.035	3.9 x1.5 3.7 x1.5	-6.7 x1.5 -5.65 x1.5	-4.2 -2.92	5.2 6.0	-4.7 -9.2	0.5 -3.2
Fosse sud	-1.04	0.56	-1.55	-0.99	5.0 x1.5 3.6 x1.5	-4.96 x1.5 -3.4 x1.5	0.06 0.3	8.6 10.9	-6.6 -7.7	2.0 3.2
entre ponts	-0.23	0.33	-0.78	-0.45	2.0 x1.5 2.45 x1.5	-3.1 x1.5 -3.25 x1.5	-1.65 -1.20	4.1 6.0	-2.8 -4.5	1.3 1.5
Fosse N amont	0.16	0.36	-0.21	0.15	1.0 x1.5 0.55 x1.5	-1.2 x1.5 -0.6 x1.5	-0.3 -0.07	0.7 1.0	-1.0 -1.7	-0.3 -0.7
Banc Passe	0.35	0.545	-0.20	0.34	0.6 x1.5 0.7 x1.5	-0.8 x1.5 -0.45 x1.5	-0.3 -0.37	0.9 1.3	-0.7 -1.2	0.2 0.1
Méandre	0.18	0.17	0.0	0.17	0.5 x1.5 0.5 x1.5	-0.38 x1.5 -0.5 x1.5	0.18 0.0	1.0 1.2	-0.1 -0.2	0.9 1.0
Fosse N aval	-0.95	0.235	-1.115	-0.88	1.2 x1.5 1.05 x1.5	-2.8 x1.5 -3.15 x1.5	-2.4 -3.15	1.25 1.4	-3.55 -4.4	-2.3 -3.0
total	-0.74	6.825	-7.695	-0.875	26.8 x1.5 24.7 x1.5	-28.84 x1.5 -25.7 x1.5	-3.06 -1.5	34.65 41.6	29.25 -42.4	5.1 -0.8

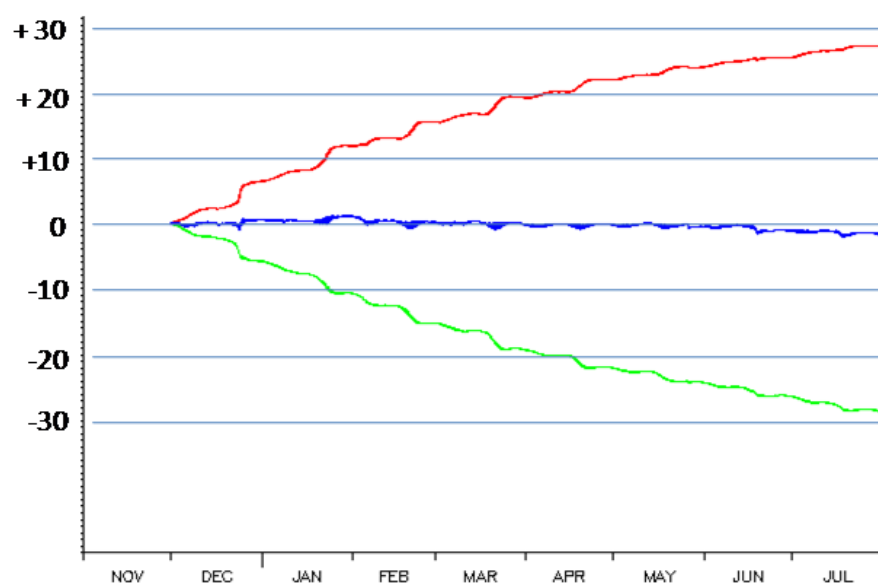


Figure 38. Bilan sédimentaire des érosions/dépôts pendant 8 mois sur la zone d'embouchure (en M m³). Config référence morpho.

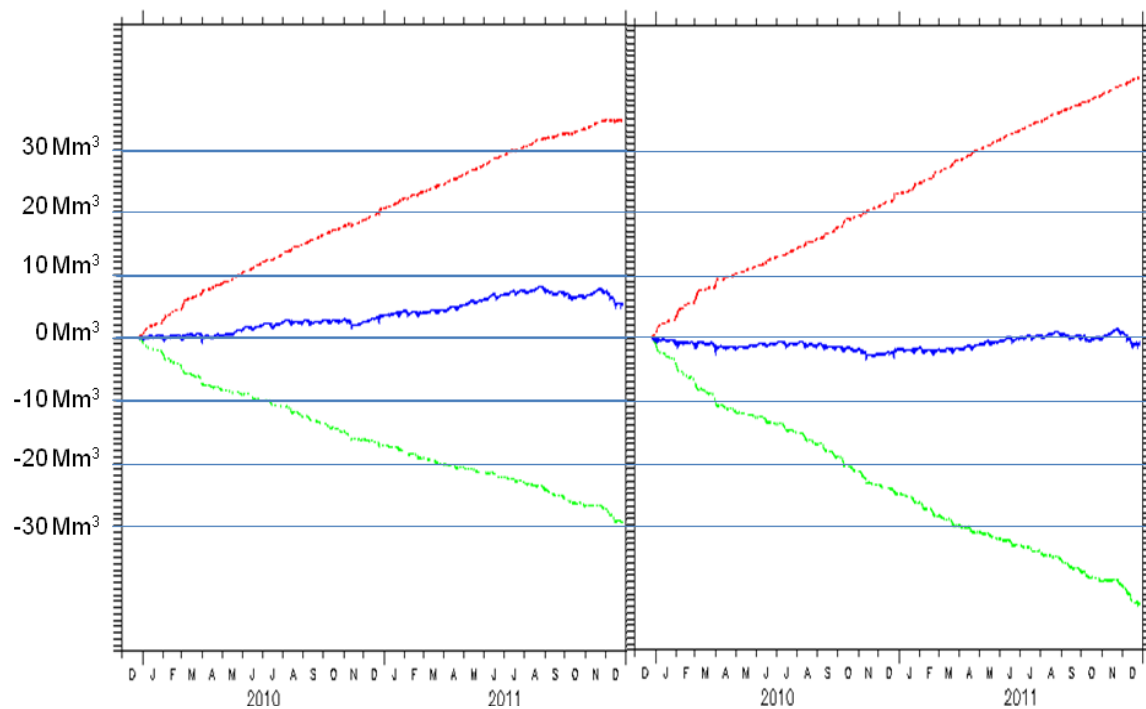


Figure 39. Bilan sédimentaire des érosions/dépôts pendant 2 ans sur la zone d'embouchure (en M m³).
a) [à gauche] simulation N°3468 après spin up de 2 ans, puis réinitialisation bathymétrique et début de simulation le 1er janvier 2009.
b) [à droite] simulation N°34750 après spin up de 2 ans, puis réinitialisation bathymétrique et début de simulation le 27 décembre 2009

La Figure 40 montre la relation entre les forçages hydrodynamiques et le bilan morphologique pendant les deux années considérées (2010 et 2011). L'amplitude de marée génère souvent - et conformément aux attentes - des incréments plus forts à la fois des érosions et des dépôts. On observe un effet assez net des tempêtes mais pas toujours dans le même sens, tandis que l'effet du débit de la Seine n'apparaît pas significatif : dans le cadre du projet MORPHOSEINE, les bilans massiques par classes sédimentaires seront estimés et analysés.

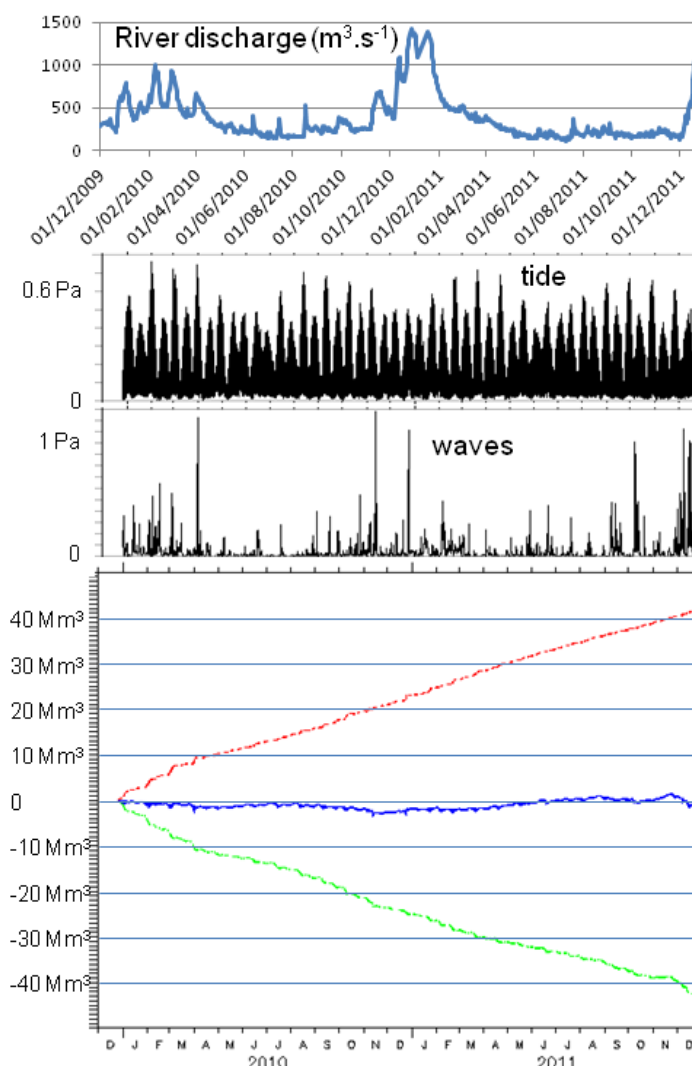


Figure 40. Evolution des forçages (débit de la Seine; amplitude de marée représentée ici par la contrainte générée sur le fond en un point choisi au large de l'embouchure ; contribution des vagues représentée par la contrainte générée sur le fond au même point) simultanément au bilan des érosions/dépôts (en bleu, tandis que les dépôts sont en rouge et les érosions en vert) pendant 2 ans sur la zone d'embouchure (en M m³). Simulation N°34750 après spin up de 2 ans, puis réinitialisation bathymétrique et début de simulation le 27 décembre 2009

Variations du substrat sédimentaire

La morphodynamique est largement contrainte par la nature du sédiment superficiel, qui varie en fonction des transits sédimentaires. La Figure 41 montre une certaine "concentration" des vases et sables par rapport à la distribution initiale, particulièrement dans les secteurs en dépôt. L'envasement des chenaux d'accès au Havre est clair, et sans doute exagéré devant la plage de Ste Adresse (!). La classe de sable fin (210 μ m), très représentative de l'embouchure de la Seine, reste bien présente dans les secteurs où elle avait été placée initialement.

On remarque la présence de vase sur le sommet du banc du Ratier. Les tests récents ont été mis en œuvre pour réduire ce phénomène, et la Figure 42 montre qu'effectivement il n'y a plus de dépôt de vase sur le banc du Ratier après paramétrisation du déferlement (config *frottement fort & déferlement*).

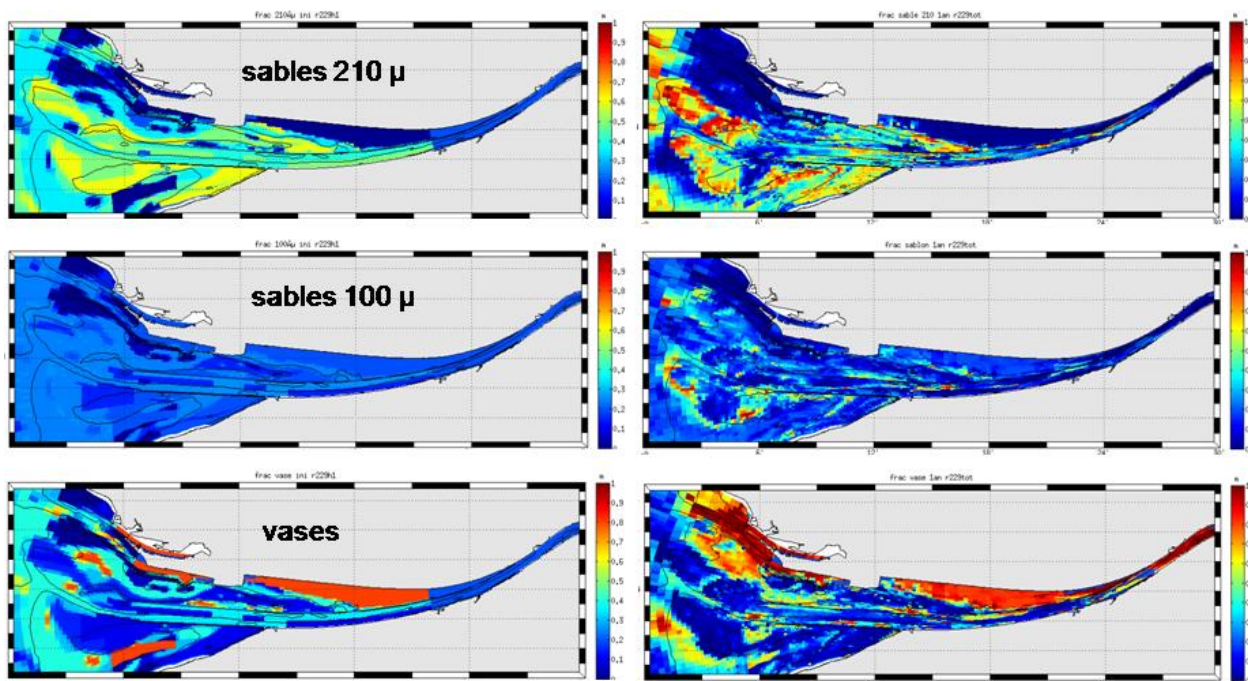


Figure 41. Variation du sédiment superficiel (moyenne sur les 16 mm de surface) après un an de simulation. A gauche, fraction initiale des classes de sédiment fin, à droite, leur distribution après 1 an (simu référence morpho).

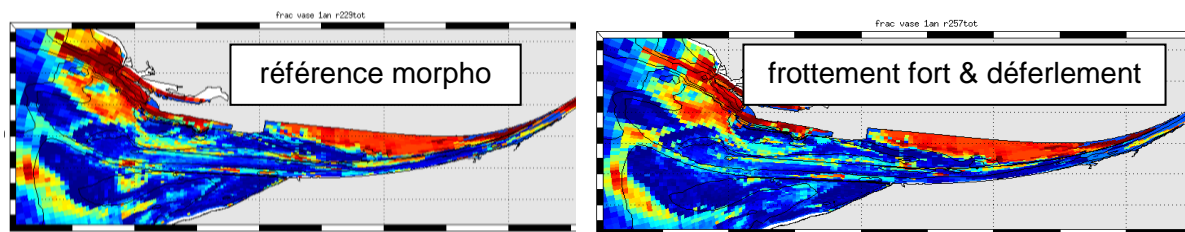


Figure 42. Distribution des vases dans le sédiment superficiel après un an de simulation pour deux configurations.

Nous exploitons cette dernière configuration pour illustrer la variabilité de la couverture sédimentaire au gré des forçages hydrodynamiques (Figure 43). Les résultats, tous présentés en morte eau quand la dynamique est moindre, sont très proches de ceux obtenus avec la config *référence morpho*. On observe qu'avant la tempête de fin décembre 2010, donc en début de montée de débit (cf. Figure 34), le sédiment superficiel de l'embouchure n'est pas très riche en vase, et finalement assez proche de celui obtenu après un an.

L'effet de la tempête (qui s'est produite en vive eau) est une redistribution des vases et un envasement clair autour du banc du Ratier, en particulier sur son flanc SW, et dans le chenal central, depuis l'engainement jusqu'à Honfleur. La crue ne bouleverse pas la distribution, mais renforce l'envasement du secteur du Havre. Enfin après une phase d'étiage assez longue, on observe une nette réduction de la vase dans le chenal central. Les variations pendant une marée de vive eau peuvent être significatives (Figure 44), sans remettre en cause les résultats précédents. Il reste néanmoins à vérifier que ces résultats sont robustes sur la durée, après plusieurs années.

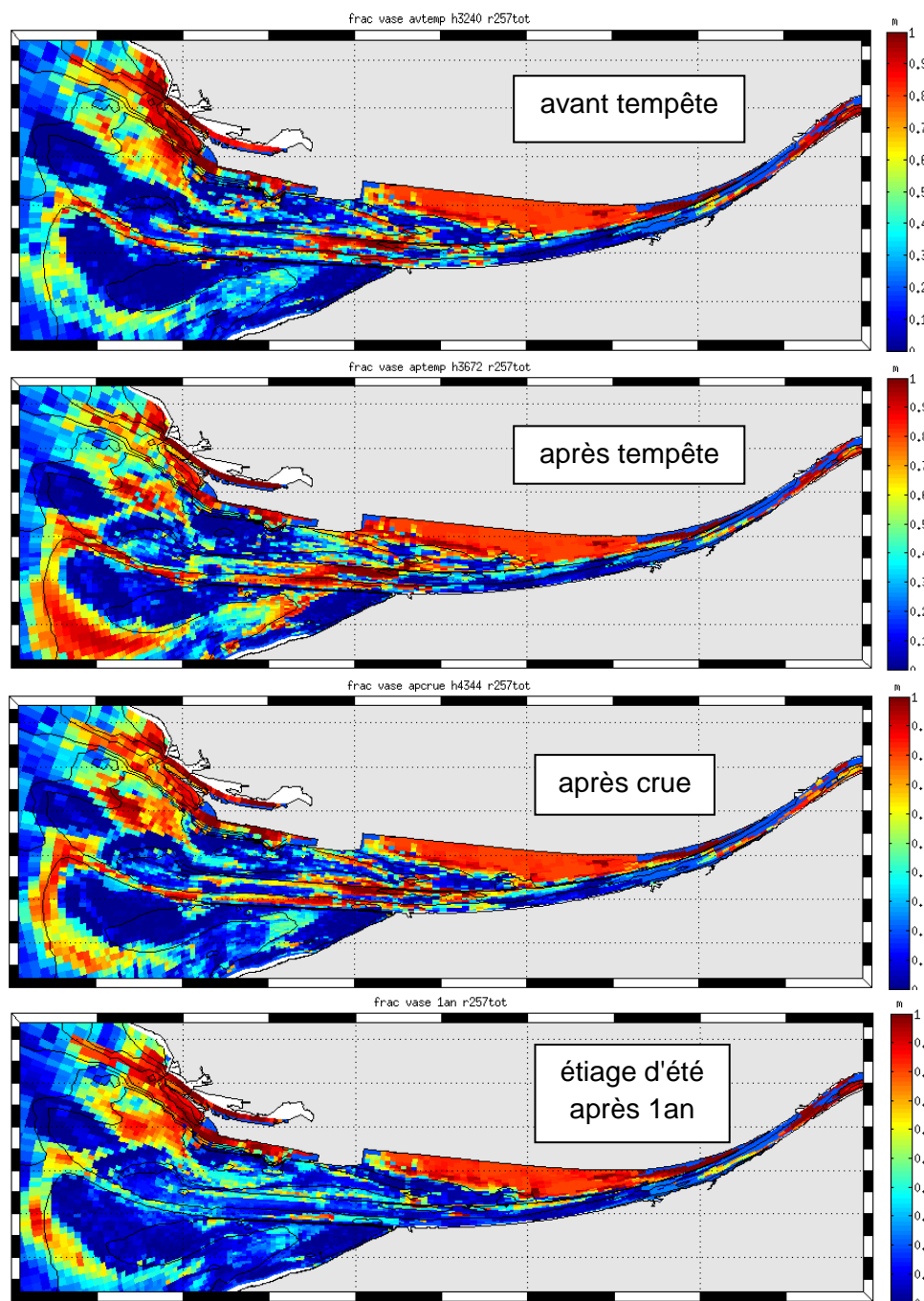


Figure 43. Variabilité de la couverture sédimentaire : fraction de vase dans les 16 mm de surface. Config frottement fort & déferlement

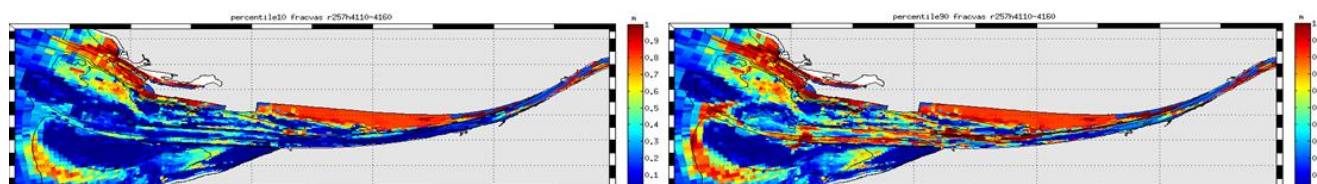


Figure 44. Variation de la fraction superficielle de vase (moyenne sur 16 mm de surface) au cours d'une vive eau, en crue (juste avant situation de morte eau/crise présentée en Figure 43).

Cas des vasières intertidales

Quelques résultats du modèle (config *référence morpho*) dans les secteurs de vasières sont ici illustrés. La Figure 45 présente l'évolution des cotes des mailles de calcul approximativement positionnées sur la radiale de la vasière nord du Havre, où des mesures ALTUS, drone et TLS ont été effectuées (cf. rapport de projet HYMOSED, volet *mesures*). La courbe noire, qui représente l'évolution du fond dans une maille subtidale de la Fosse nord en limite de vasière, indique que le bord du chenal est en accrétion pendant la période, sauf au cours de la crue. Les différences entre bas estran (courbes rouge et verte), estran médian (courbes bleue, cyan et magenta) et estran supérieur (courbes en pointillé) sont frappantes. Le bas estran est en forte accrétion pendant le premier étiage, mais en érosion pendant le second étiage, peut-être en compensation du dépôt réalisé du côté du chenal... De ce fait, il est difficile d'évaluer le rôle de la crue sur cette évolution de bas estran. Par contre, il apparaît clairement que les épisodes d'accrétion sont corrélés aux fortes vives eaux, car c'est à ce moment que l'alimentation en matières en suspension (MES) est possible (cf. *Deloffre et al.*, 2006 et rapport HYMOSED/mesures). Ceci est vrai pour tout l'estran, avec une intensité moindre, très haut (apports réduits) ou au niveau moyen (courants plus intenses en jusant). A la cote -2m sous le niveau moyen (courbe bleue), l'alimentation pendant la crue apparaît nettement, suivie d'une érosion progressive pendant l'étiage. Enfin, l'estran supérieur est caractérisé par un effet de tassement du stock de vase initial, et des dépôts de pleine mer de vive eau très atténués. Ces résultats sont en accord avec le fonctionnement que l'on connaissait de la vasière nord, et par exemple la courbe bleue peut être rapprochée du signal enregistré par l'ALTUS "Slikke" illustré Figure 8 du rapport HYMOSED-mesures. D'une façon générale, les amplitudes des variations altimétriques simulées semblent cependant un peu fortes, en cohérence avec les constats faits sur les bilans sédimentaires.

Surtout, la simulation ne montre pratiquement aucun effet des vagues, alors que les mesures récentes en ont montré, ainsi que les mesures ALTUS faites un peu plus à l'ouest en 1999-2000 dans le cadre du programme SA2. Il semble que le modèle de vagues, dont la limite amont est pratiquement à cette longitude, ne soit pas réaliste dans le secteur : ce point sera peut être à revoir dans les projets ultérieurs.

Les résultats sur estran du modèle ont aussi été comparés à Tancarville (il n'y a pas de maille d'estran dans le secteur de la Roque). La résolution du modèle est cependant très limite pour une analyse fine des résultats, et d'autre part les enrochements qui séparent la vasière du chenal n'ont pas été représentés dans le modèle. La Figure 46 montre que le modèle simule des dépôts très importants en bordure de chenal sur le site de *Tancarville aval*. Si l'on focalise l'attention sur l'évolution de l'estran (courbes noire et rouge à *Tancarville aval*, noire rouge et verte à *Tancarville amont*), on observe plutôt une accrétion moyenne, qui se produit exclusivement pendant les vives eaux, mais pas en crue, en accord avec l'absence de MES pour alimenter le site, lorsque le bouchon vaseux est plus en aval. Les très légères réductions de la cote du fond constatées sur l'estran de *Tancarville amont* sont à interpréter comme un effet du tassement, et ne correspondent pas aux érosions importantes mesurées par l'ALTUS de *Tancarville amont* (en 2015-2016 !). Par contre, la courbe rouge (mi estran) obtenue sur la radiale *Tancarville Aval* peut être rapprochée de la mesure ALTUS de *Tancarville Aval* (en 2015-2016 !), cf. rapport HYMOSED-mesures. D'une part on observe à chaque vive eau un dépôt suivi d'une érosion partielle, d'autre part une érosion régulière semble se produire pendant la période de forts débits, en plus du tassement. L'amplitude des variations sur ce point est également en accord avec les observations.

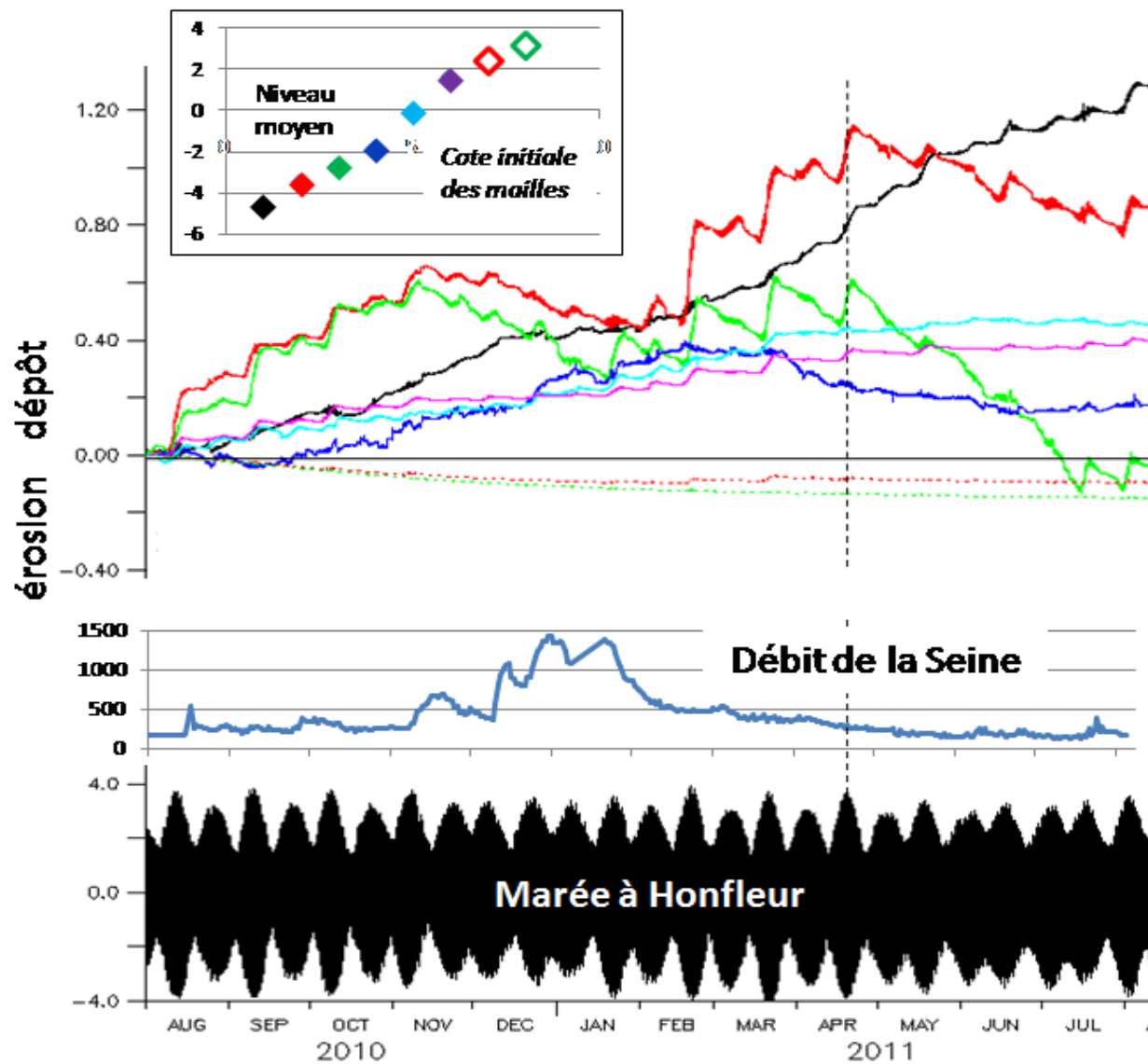


Figure 45. Erosions, dépôts et tassements (m) simulés sur l'estran sud du secteur de Tancarville.

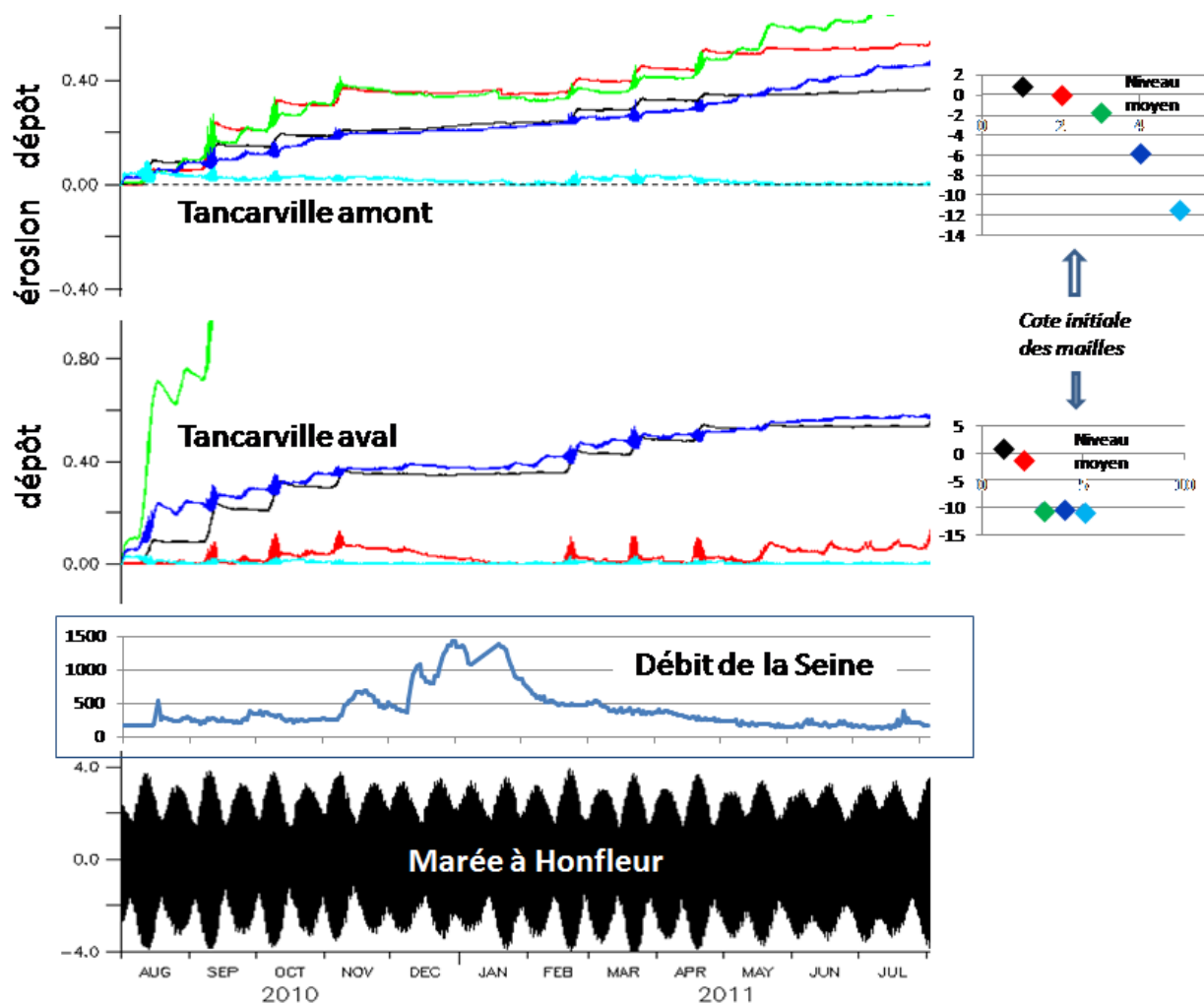


Figure 46. Erosions, dépôts et tassements (m) simulés sur l'estran sud du secteur de Tancarville.

Utilisation d'un facteur morphodynamique

L'échelle de temps d'adaptation morphodynamique est bien plus longue que celle des processus hydrodynamiques qui les provoquent. Pour cette raison, et afin d'optimiser les temps de calcul, plusieurs techniques ont été proposées pour accélérer les simulations morphodynamiques [e.g. *Roelvink*, 2006]. Elles ont en général été développées pour des sédiments relativement grossiers où le transport solide peut être considéré comme un processus local que l'on peut moyenner au cours du temps. Si le transport en suspension est dominant, le filtrage temporel ne peut plus être appliqué de façon locale, et les techniques de filtrage de marée ou de recherche de marée représentative [*Latteux*, 1995], de correction de continuité ou de correction de capacité de transport en fonction des variations de hauteur d'eau sont délicates à exploiter. En effet une évolution morphologique en un point peut être associée à un transport et une érosion ou un dépôt loin de ce point. Récemment, l'approche par facteur morphologique qui consiste à amplifier les effets sur le fond (en érosion ou en dépôt) d'une divergence de flux solides a montré beaucoup d'efficacité [*Lesser et al.*, 2004 ; *Roelvink*, 2006]. Appliquée au transport en suspension, cette approche permet de respecter les bonnes échelles spatio-temporelles des processus dans la colonne d'eau. Par contre, elle ne respecte pas la succession des processus dans le sédiment, et donc n'est a priori pas compatible avec le processus de tassement : par exemple, le dépôt d'une couche de crème de vase à la

renverse de pleine mer est susceptible de se consolider plus rapidement si la masse déposée (et/ou son épaisseur) est amplifiée d'un facteur important.

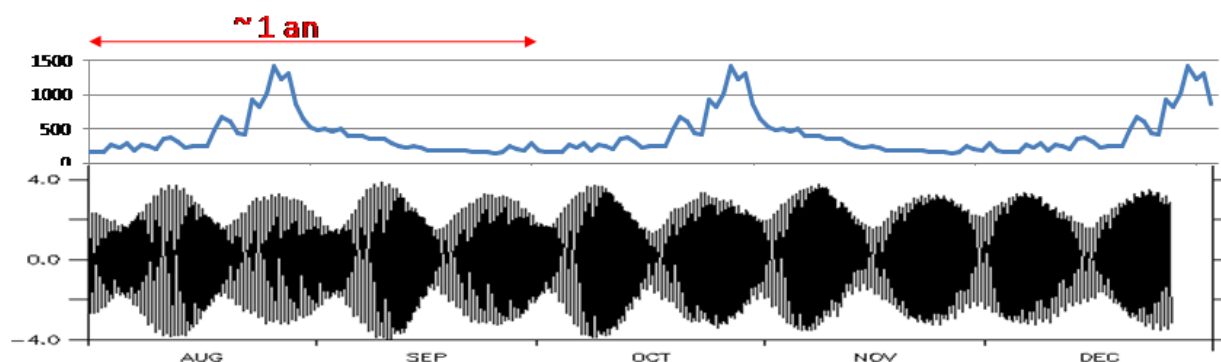


Figure 47. Chronologie des forçages appliqués avec MF=6. En haut : débit de la Seine ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$). En bas : hauteur de marée à Honfleur (m).

L'application du facteur morphodynamique au transport en suspension consiste à multiplier les flux à l'interface eau/sédiment (dépôt et érosion) par ce facteur lorsqu'ils sont pris en compte dans le sédiment. Il en résulte des variations amplifiées de l'épaisseur de sédiment en tout point, qui se répercutent à chaque pas de temps sur l'information bathymétrique prise en compte par le modèle hydrodynamique.

Dans l'application à l'estuaire de la Seine, il était souhaité respecter autant que possible la saisonnalité des variations de débit. Il a donc été choisi de raccourcir le cycle annuel des apports liquides et solides de la Seine, pour éviter des épisodes de crue trop longs et donc irréalistes, et de respecter la variation réaliste de l'amplitude de marée. Pour se rapprocher des variations d'amplitude de marée qui se produisent au cours d'une crue, un facteur morphodynamique (MF) de 6, assez faible, a été sélectionné (pour le projet C3E2 où les variations de débit amont restaient volontairement schématiques, un MF de 200 avait été choisi). Ainsi la chronologie de forçage d'une année est décrite sur la Figure 47. Le régime de vents et vagues reste inchangé comme celui de la marée, de telle sorte que l'éventuelle conjonction de forts débits et de tempêtes reste ignorée dans la simulation.

Enfin la simulation des dragages s'est faite en estimant les quantités draguées (des volumes, convertis en masses de différentes classes de particules selon la composition et la densité du sédiment dragué) sans aucune correction, puis en les clapant dans les couches de fond de la colonne d'eau dans les zones appropriées après division par MF, puisque les variations de sédiment sont amplifiées de ce facteur. La part de ces matériaux clapés qui se redépense ensuite sera à nouveau, et automatiquement, multipliée par MF.

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus début 2017 avec un paramétrage proche de notre référence (z_0 selon "facies", bathy initiale à la limite de dragage devant la brèche). Sont présentés successivement la masse du bouchon vaseux, les masses draguées et le différentiel bathymétrique après un an.

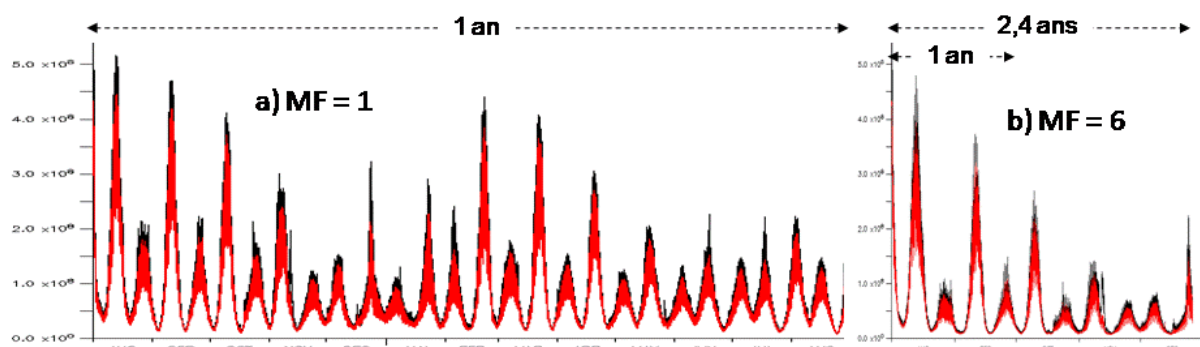


Figure 48. Comparaison des masses de vase en suspension entre balise A et Caudebec pour une simulation d'un an avec MF = 1, et de 2.4 ans avec MF = 6.

Tableau 8. Masses totales draguées selon les simulations (en Mtonnes/an).

Type de run (valeur de MF et durée de simulation)	Dragage annuel GPMR (10 ⁶ Tonnes)	... dont z5 (bèche) (10 ⁶ T)	Dragage annuel GPMH (10 ⁶ T)
MF 1 simulation 1 an	4.15	1.65	1.25
MF 6 simulation 2 mois (~1 an)	3.2	0.5	0.75
MF 6 simulation 4.8 mois (~2.4 ans)	4.13	0.42	1.28

Si l'on écarte les 3 premières vives eaux, on voit que le bouchon vaseux simulé avec facteur morphodynamique est plus faible d'environ 30%. De multiples tests ont été réalisés pour en comprendre la raison, en appliquant pour les simulations avec MF la même variation de débit que sans MF (non accélérée). Le résultat est indépendant du paramétrage de la consolidation et demeure, même en ne la prenant pas en compte (une concentration relative de vase est alors fixée à 450 g/l, ainsi qu'une contrainte critique de dépôt de 0.5 Pa). Il est également peu sensible à l'épaisseur de la couche active, et même à la résolution verticale dans le sédiment. Il semble que la raison principale soit la différence de comportement à l'érosion entre sable et vase, le phénomène de pavage par la présence de sable, limitant la resuspension des vases, se produisant plus facilement avec amplification des dépôts.

Néanmoins, les écarts ne sont pas si importants s'agissant des évolutions morphodynamiques et des quantités draguées. Ces dernières sont fournies dans l'annexe XI, et synthétisées dans le Tableau 8. Pour une durée de simulation avec MF de 6 suffisamment longue (e.g. de 5 mois, soit un équivalent de 2,4 années), les résultats sont proches, sauf devant la brèche.

Les structures d'érosions et dépôts résiduels tels que révélés par la Figure 49 sont très semblables, à la fois en patrons d'évolution et en quantités. Des nuances peuvent cependant être remarquées, telles qu'un dépôt inférieur entre le Kannig et le Havre et dans le secteur du Havre avec MF=6, peut être lié au moindre clapage au Kannig dans cette configuration (seulement 2 mois de simulation pour MF=6). Le banc d'Amfard est également moins érodé sur son bord ouest, tandis que les évolutions dans la fosse nord sont un peu plus marquées.

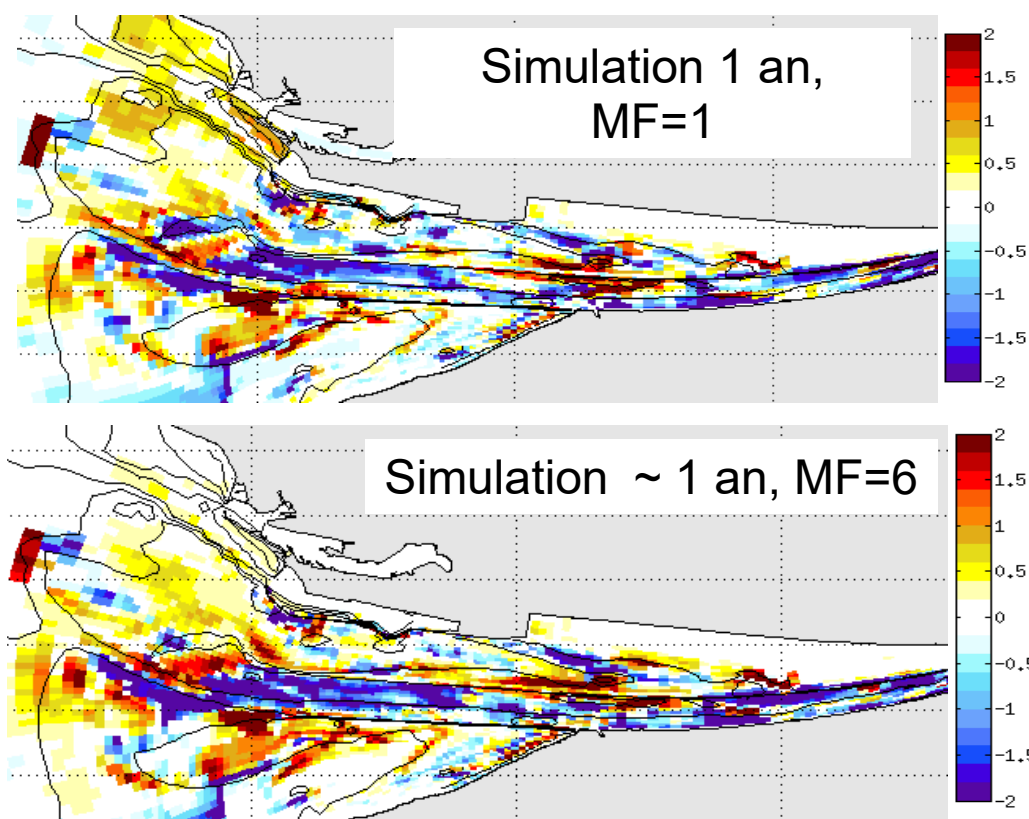


Figure 49. Evolutions morphologiques (en m) pendant 1 an avec ou sans usage du facteur morphodynamique.

Il faut également garder à l'esprit que le forçage de vagues ne décrit pas les mêmes statistiques dans les deux calculs, puisque seuls les forçages vent et vagues des mois d'août et septembre interviennent dans les résultats avec $MF=6$, tandis que le cycle complet de l'année mi-2010/mi-2011 est pris en compte dans le run $MF=1$. L'analogie entre les deux simulations reste très encourageante, et conduit à retenir la solution du facteur morphodynamique pour les tests long-terme, mais à condition cependant de pratiquer un test long-terme de confirmation avec $MF=1$. Il est proposé également de tester dans l'avenir une amplification des évolutions sédimentaires après une période relativement longue, qui intégrerait les successions de forçage (marée/débits/vents et vagues) selon leur échelle temporelle propre : la difficulté tient à la manière d'affecter l'amplification sur la verticale. Le différentiel bathymétrique à l'issue d'une telle période aurait sa propre structure verticale, éventuellement stratifiée, et l'amplification pourra s'effectuer de plusieurs façons (répétition des strates, amplification de chaque strate...).

C'est avec cette configuration utilisant le facteur morphodynamique que nous avons testé l'influence du couplage morphodynamique. La Figure 50 présente les patrons d'érosions/dépôts (sous forme de variation d'épaisseur de sédiment) obtenus en tenant compte de ce couplage, ou en les ignorant, c'est-à-dire sans réactualisation de la bathymétrie en cours de calcul. Si ces patrons se ressemblent, l'intensité des dépôts et surtout des érosions est nettement plus forte dans le cas sans couplage, en particulier les érosions dans le chenal entre digues submersibles, qui se traduisent par des dragages également plus importants. On observe donc le rôle "modérateur des érosions/dépôts", spécifique du couplage, en particulier dans les secteurs où le débit d'eau est contrôlé par des facteurs extérieurs : là où il y a dépôt

(resp. érosion), la colonne d'eau se rétrécit (resp. s'allonge), et les courants de marée augmentent (resp. diminuent), ce qui favorise (resp. atténue) l'érosion. Cette relation est d'autant plus vraie dans le secteur chenalisé qui draine l'essentiel du volume tidal de l'estuaire de la Seine.

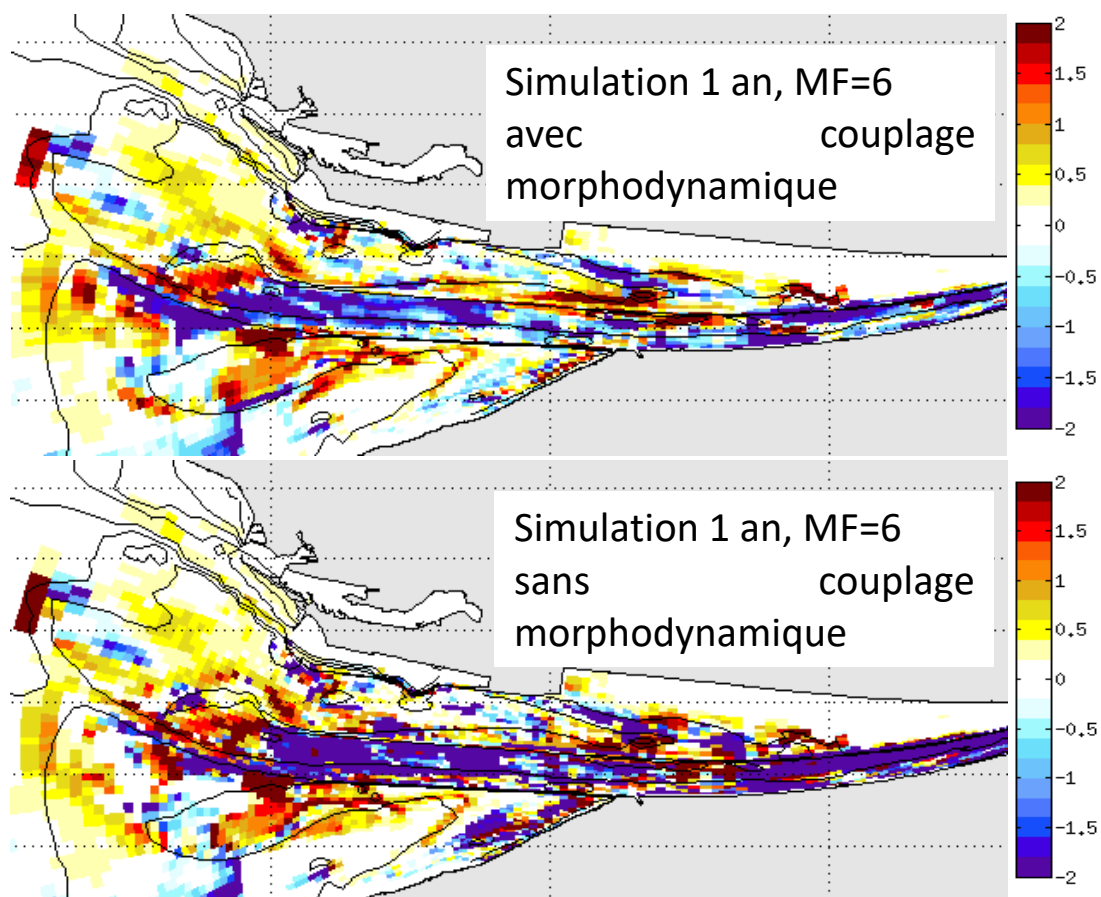


Figure 50. Evolutions morphologiques (en m) pendant 1 an avec ou sans couplage morphodynamique.

Synthèse et recommandations

Les résultats de la version morphodynamique du modèle SediMARS-3D de l'estuaire de la Seine montrent les capacités de ce dernier à reconstituer la plupart des patrons d'érosion/dépôts que l'estuaire connaît dans la période étudiée (autour de 2010). Un dépôt excessif sur le banc du Ratier reste cependant à corriger. La modélisation morphodynamique respecte les performances du modèle relatives au transport en suspension et au bouchon vaseux, et permet de restituer les quantités draguées par les GPM, mais pas pour toutes les configurations. Cette appréciation générale tient compte du manque de raffinement de la résolution du modèle, assumée pour autoriser des simulations à venir sur le long terme, qui devraient être abordées dans le cadre du projet SA6 MORPHOSEINE.

Le modèle s'est également montré robuste vis-à-vis des structures d'érosion/dépôt qui, dans leur majorité, ne sont pas si sensibles aux variations de paramétrage. Le principal défaut relevé est sans doute l'exagération apparente des érosions/dépôts, illustrée par l'intégration des érosions et des dépôts dans différentes zones de l'embouchure, alors que le bilan général est bon, et presque à l'équilibre. La mise en œuvre d'un spin up des la nature du sédiment superficiel, suivi ou non d'un spin up morphosédimentaire, montre que ces érosions/dépôts peuvent être largement atténués. Le bilan global reste encore assez équilibré, mais très variable d'une configuration à l'autre. L'effet sur les quantités et la nature des matériaux dragués, peu commenté dans le présent rapport, semble également sensible à l'initialisation du modèle. Ces questions seront donc reprises à très court terme, dans le cadre des projets SA6 MORPHOSEINE et MEANDRES.

La comparaison des résultats avec des enregistrements ALTUS *in situ*, en quelques points fixes, est plutôt satisfaisante. Même si toutes les variations ne sont pas reproduites en détail, les tendances, les types de variation selon les forçages, et les ordres de grandeur de ces variations sont correctes. L'exercice montre souvent une très grande variabilité spatiale, indiquant que les mesures ponctuelles nécessitent d'être recadrées dans un contexte plus grand, ce qu'apporte la modélisation. L'autre apport de la modélisation est bien sûr la restitution des chronologies, et la possibilité d'expliquer les structures observées en fonction de la succession des forçages.

L'utilisation d'un facteur morphodynamique dans un environnement mixte sable et vase a pu être testée : des limites sont apparues, mais l'intérêt de la démarche pour des simulations long terme est confirmé, compte tenu de l'analogie constatée sur les patrons d'évolution morphologiques. Il sera néanmoins prudent de prévoir une simulation de référence sans facteur morpho.

Les projets d'utilisation future du modèle (en particulier MEANDRES et MORPHOSEINE) devraient prendre en compte les recommandations suivantes :

- effectuer un contrôle plus poussé de la modélisation des vagues en remontant l'estuaire, en particulier dans la fosse nord, et de la qualification du forçage rendant compte du déferlement des vagues ;
- la nécessité de coupler le modèle de vagues au modèle morphosédimentaire, pour réactualiser la bathymétrie dans le calcul des vagues (prévu dans MORPHOSEINE) ;
- concernant l'utilisation d'un facteur d'accélération des processus morphodynamiques, des stratégies alternatives méritent d'être testées : en particulier la manière d'amplifier la modification sédimentaire lorsqu'elle n'est pas pratiquée à chaque pas de temps ;

- ponctuellement, la réponse morphodynamique du modèle devra être améliorée, en particulier sur le sommet du banc du Ratier et au sud-ouest du port du Havre ;
- les simulations de dragage se sont révélées assez sensibles : le projet MEANDRES devrait permettre d'affiner le caractère réaliste des simulations, et de mieux restituer la nature des matériaux dragués par le GPMR ;
- toute étude à long terme dépend de la capacité du modèle à maintenir de façon réaliste la nature des sédiments : l'étude rétrospective planifiée dans le projet MORPHOSEINE devra le vérifier.

Conclusion

Une modélisation hydro-morpho-sédimentaire sable/vase tridimensionnelle a été mise en place en estuaire de Seine afin d'étudier et de quantifier aux échelles de temps événementielle à annuelle : (1) la dynamique des sédiments en suspension et du bouchon vaseux en particulier, (2) les flux et bilans sédimentaires à différentes échelles spatio-temporelles et (3) l'évolution de la morphologie et du substrat sédimentaire. Un important travail de calibration et validation des concentrations en matières en suspension a été mené, en s'appuyant sur de nombreuses mesures de turbidités collectées en estuaire de Seine (programmes Seine-Aval et réseau SYNAPSES). Les concentrations simulées dans la zone d'extension du bouchon vaseux sont du même ordre que les observations et leur dynamique associée aux différentes phases et cycles de la marée, ainsi qu'au cycle hydrologique, est satisfaisante. Les travaux de modélisation morphodynamique de l'estuaire aval présentent également des résultats encourageant en comparaison aux observations de terrain (levés bathymétriques et volumes dragués).

Les simulations numériques mettent en évidence la migration vers l'amont de la limite avale du bouchon vaseux (jusqu'à 10 km) par rapport à sa position des années 1980. En revanche, sa limite amont est restée relativement stable. En plus du forçage hydrologique, le positionnement du bouchon vaseux est dominé par le pompage tidal en vives eaux et par le gradient de salinité par très faible marnage. La période de déchet/revif vient également modifier le positionnement du bouchon vaseux dû à l'inertie du système pour que le pompage tidal et la stratification se mettent en place.

La masse du bouchon est fortement corrélée au marnage, atteignant 250.000 T en fortes vives eaux, et présente également une hystérésis associée à la période déchet/revif. En considérant les marges d'erreur associées à la modélisation des sédiments en suspension (<50% à l'échelle de la marée), on peut estimer une incertitude de ± 125.000 T sur la masse du bouchon vaseux. Bien que le débit influence fortement le positionnement du bouchon vaseux, il n'influence pas significativement sa masse qui semble répondre à une « capacité » du système à mettre en suspension les sédiments (cette capacité serait principalement dépendante du pompage tidal). Les vagues apparaissent également comme un forçage important pouvant augmenter la masse du bouchon vaseux de l'ordre de 10 à 50%.

Enfin, les Figure 14 et Figure 16 peuvent être utilisées comme abaques pour estimer la position et la masse du bouchon vaseux en fonction du débit, du marnage et de la période de déchet/revif. Ces formules paramétriques sont détaillées dans *Grasso et al.* [under review]. L'analyse des flux et bilans sédimentaires, basée sur quatre scénarios hydrométéorologiques caractéristiques des vingt dernières années (années moyenne, sèche, humide et tempétueuse), met en évidence une influence variée des forçages en fonction des zones

considérées : (1) Les vagues favorisent une remise en suspension des sédiments à l'embouchure et un export vers le large dont la direction est déterminée par le vent ; (2) le pompage tidal génère un flux sédimentaire vers l'amont, de l'embouchure à Tancarville ; et (3) le débit favorise un export de sédiment, mais seulement pour les sections en amont d'Honfleur.

Le bilan sédimentaire de l'estuaire aval est relativement à l'équilibre pendant une année hydrométéorologique moyenne, en accord avec les bilans sédimentaires résultant des relevés hydrographiques du GPMR des dix dernières années. Une année tempétueuse provoque une perte significative de sédiment dû au large export vers le large. En revanche, de manière contre-intuitive, les périodes de fort débit favorisent l'apport de sédiment à l'embouchure de l'estuaire. Cela s'explique par un renforcement de la circulation barocline à l'embouchure (générée par le gradient de salinité plus marqué en crue), renforçant le courant de fond dirigé vers l'amont. En conséquence, les années très humides (et peu tempétueuses) ont tendance à engraisser l'estuaire aval, comme observé dans les années 2008 et 2013.

Les résultats du projet HYMOSED ont également permis d'apporter un état des lieux des paramètres environnementaux de l'estuaire (hydrodynamique, hydrologie, turbidité) pour les années 2010-2011 et 2014-2015, et ainsi de contribuer à l'étude du fonctionnement écologique de l'estuaire (participation à différents ateliers organisés par le GIPSA). Dans le cadre du programme Seine-Aval, ces résultats ont directement bénéficié à de nombreux projets : ANPHYECO (pour la modélisation diachronique du fonctionnement hydro-sédimentaire) ; ZOOGLOBAL (pour la caractérisation des habitats) ; BARBÈS (pour la prise en compte de la bioturbation sur les flux sédimentaires) ; SUSPENSE (pour l'estimation du positionnement du bouchon vaseux) ; et MEANDRES (pour la modélisation de l'influence des activités de dragages sur le fonctionnement morpho-sédimentaire de l'estuaire). Enfin, les résultats de validation du modèle hydro-morpho-sédimentaire des échelles temps événementielle à annuelle sont encourageant pour aborder la modélisation morphodynamique de l'estuaire à moyen et long terme (projet MORPHOSEINE du programme Seine-Aval 6).

BIBLIOGRAPHIE

- Amoudry, L. O., R. Ramirez-Mendoza, A. J. Souza, and J. M. Brown, (2014). Modelling-based assessment of suspended sediment dynamics in a hypertidal estuarine channel. *Ocean Dynamics*, 64(5), 707-722.
- 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.
- Bi, Q., and E. A. Toorman (2015), Mixed-sediment transport modelling in Scheldt estuary with a physics-based bottom friction law, *Ocean Dynamics*, 65(4), 555-587, doi:10.1007/s10236-015-0816-z.
- Brenon I., and Le Hir P., 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): identification of formation processes. *Estuarine, coastal and shelf science*, 49, 525-544.
- Deloffre, J., Lafite, R., Lesueur, P., Verney, R., Lesourd, S., Cuvilliez, A. and Taylor, J. A., 2006. Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat - Role of the maximum turbidity zone in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology*, 235(1-4), 151-164.
- Druine, F., R. Lafite, J. Deloffre, R. Verney and J.-P. Lemoine (2016). SUSPENSE : Rapport technique sur la variabilité des coefficients de calibration NTU/mg.l-1 du réseau SYNAPSES. Rapport Seine-Aval 5, 27p. (<http://www.seine-aval.fr/projet/suspense/>).
- Grasso, F., Le Hir, P., Bassoullet, P., 2015. Numerical modelling of mixed-sediment consolidation. *Ocean Dynamics*, 65(4), 607-616.
- 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. *Proc. XIIèmes Journées nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Cherbourg, 12-14 juin 2012.
- Khojasteh Pour Fard, I., 2015. Modélisation des échanges dissous entre l'estuaire de la Loire et les baies côtières adjacentes, University of Bordeaux.
- Latteux, B., 1995. Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Marine Geology*, 126, 129-141.
- Lazure, P., and Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Ressources*, 31, 233-250.
- Le Hir, P., Ficht, A., SilvaJacinto, R., 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(6B), 950-963.
- Le Hir P., Cayocca F., Waeles B., 2011. Dynamics of sand and mud mixtures : a multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, 31, S135-S149.
- Lesourd, S., Lesueur, P., Fisson, C., Dauvin, J.-C., 2015. Sediment evolution in the mouth of the Seine estuary (France): A long-term monitoring during the last 150years, *Comptes Rendus Geoscience*.
- Lesser, G.R., Roelvink, D., Van Kester, J., Stelling, G., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51 (8-9), 883-915.
- Mengual B., 2016. Variabilité spatio-temporelle des flux sédimentaires dans le Golfe de Gascogne : contributions relatives des forçages climatiques et des activités de chalutage. Thèse de l'Université de Bretagne Occidentale, 190p.
- Roelvink, J.A., 2006. Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53, 177-187.
- Roland, A., and Ardhuin, F., 2014. On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean, *Ocean Dynamics*, 64(6), 833-846.
- Soulsby, R., 1997. *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications*, Thomas Telford.
- Van Leussen, W. 1994. *Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport*, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, National Institute for Coastal and Marine Management (RIKZ).

- Toublanc, F., I. Brenon, and T. Coulombier (2016), Formation and structure of the turbidity maximum in the macrotidal Charente estuary (France): Influence of fluvial and tidal forcing, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 1-14, doi:10.1016/j.ecss.2015.11.019.
- Waeles B., and 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. *Proc. IXèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier*, Brest, Centre Français du Littoral/CETMEF/UBO Ed., 471-481.
- Waeles B., Le Hir P., Lesueur P., Delsinne N., 2007. Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach. *Hydrobiologia*, 588, 69-82.
- Waeles B., Le Hir P., Lesueur P., 2008. A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France. *In Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005*, Kusuda, Yamanishi, Spearman and Gailani (Eds), Elsevier, *Proc. in Marine Science*, 9, 477-498.
- Yu, Q., Y. W. Wang, J. H. Gao, S. Gao, and B. Flemming (2014), Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(11), 7705-7724, doi:10.1002/2014jc010228.

ANNEXES

Grasso F. (coord.), Le Hir P., 2018. Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet Modélisation », Annexes du rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 32 p.

1. Simulations des vagues (WW3) aux Ratelets avec/sans prise en compte du forçage hydrodynamique de MARS3D (surface libre et/ou courants)
2. Comparaison du modèle hydrodynamique MARS3D curviligne en version non-orthogonale (V9.05) ou orthogonale (V10.12)
3. Influences des tributaires de la Seine à l'aval de Poses sur la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire
4. Articles soumis à Journal of Geophysical Research – Ocean
5. Forçages hydrométéorologiques
6. Effet de l'érosion latérale sur les différentiels bathymétriques et sur les quantités draguées par les Grands Ports Maritimes
7. Rappel du paramétrage du modèle en configuration morpho.
8. Différentiels bathymétriques élaborés par le GIPSA pendant la période 2009-2012, sur la base des MNT RH du GPMR
9. Evaluation des bilans sédimentaires
10. Comparaison des dragages simulés avec ou sans facteur morphodynamique

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupelement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115, Boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

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

Grasso F. (coord.), Le Hir P., 2018. Projet HYMOSED : Modélisation du fonctionnement HYdro-MORpho-SEDimentaire de l'estuaire de la Seine – Volet Modélisation », Rapport de recherche du programme Seine-Aval 5, 78 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.
Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

