



HAL
open science

SENSIBILITE D 'UN MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE AUX INCERTITUDES LIEES A LA CARACTERISATION DES SEDIMENTS DE FOND

Nicolas Guillou, Georges Chapalain, Alain Leprêtre

► **To cite this version:**

Nicolas Guillou, Georges Chapalain, Alain Leprêtre. SENSIBILITE D 'UN MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE AUX INCERTITUDES LIEES A LA CARACTERISATION DES SEDIMENTS DE FOND. Hydraulic modeling and uncertainty, 2010. hal-01889805

HAL Id: hal-01889805

<https://hal.science/hal-01889805>

Submitted on 8 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SENSITIVITY OF HYDRODYNAMIC AND SEDIMENT TRANSPORT MODELS TO UNCERTAINTIES IN BOTTOM SEDIMENTS CHARACTERIZATION

Sensibilité d'un modèle hydro-sédimentaire aux incertitudes liées à la caractérisation des sédiments de fond

Nicolas Guillou, Georges Chapalain

Laboratoire de Génie Côtier et Environnement, Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales,
155 rue Pierre Bouguer Technopôle Brest Iroise BP 5 – 29280 Plouzané, France, e-mails :
nicolas.guillou@developpement-durable.gouv.fr, georges.chapalain@developpement-durable.gouv.fr

Alain Leprêtre

Laboratoire d'Ecologie Numérique, Ura, CNRS 1363, Université des Sciences et Technologies de Lille,
59655, Villeneuve-d'Ascq cedex, France, e-mail : alain.lepretre@univ-lille1.fr

KEY WORDS

numerical modeling, tide, bedload, suspension load, heterogeneous sediments, English Channel.

ABSTRACT

An original method coupling a spherical factor analysis and a series of kriging is applied in the English Channel to the spatial interpolation of a sampled grain size distribution dataset. The number of factorial axes produces various spatial repartitions of bottom sediments numerically degraded with respect to the original data. These surficial sediments characterizations varying by their correlation degrees towards the sampled data are integrated to a hydrodynamic and sediment transport model. The modeling procedure is based on the coupling of the three-dimensional tidal circulation model COHERENS with multicomponent sediment transport modules. The analysis identifies the variability of “key” parameters of (i) hydrodynamic like the bottom roughness, the current amplitude and the bottom shear stress and (ii) sediment transport such as bedload and suspended load transport rates. A low sensitivity of current predictions is obtained. This result contrasts with the noticeable variability of sediment load transport rates exacerbated for the suspension load.

RESUME

Sensibilité d'un modèle hydro-sédimentaire aux incertitudes liées à la caractérisation des sédiments de fond
Une technique originale couplant une analyse factorielle sphérique et une série de krigeages est appliquée en Manche à l'interpolation spatiale des distributions granulométriques échantillonnées. Le nombre d'axes factoriels retenus dans la méthode détermine différentes répartition spatiales des sédiments de fond numériquement « dégradées » par rapport aux données d'origine. Ces caractérisations du substrat superficiel variant par leur degré de corrélation aux données mesurées sont intégrées à un modèle hydro-sédimentaire. La modélisation repose sur le couplage des codes de circulation tridimensionnelle de marée COHERENS à des modules de transport sédimentaire multiclasse. L'analyse porte sur la variabilité à la caractérisation du substrat des paramètres « clés » (i) de l'hydrodynamique tels que la rugosité, l'intensité des courants et le taux de cisaillement près du fond et (ii) du transport sédimentaire tels que les taux de transport en charriage et en suspension. Les prédictions courantologiques présentent une faible sensibilité à la restitution du substrat de fond. Ce résultat contraste avec la variabilité remarquable des taux de transport sédimentaire exacerbée pour la suspension.

1. INTRODUCTION

La distribution granulométrique des sédiments de fond est une donnée fondamentale en hydraulique. Elle détermine à la fois les proportions des classes de sédiment disponibles et la forme des rides sableuses de fond et les échelles de rugosité associées. En modélisation numérique, la représentation de cette donnée multivariable présente de nombreuses incertitudes liées à la méthode de restitution aux différents nœuds du maillage de calcul. La présente étude vise à quantifier l'impact de ces incertitudes sur les prédictions d'un modèle tridimensionnel hydrodynamique et hydro-sédimentaire multiclasse forcé par la marée seule. Il s'agit notamment d'identifier le degré de précision à atteindre dans la caractérisation des sédiments de fond pour assurer la convergence des résultats numériques.

Le site d'application est la Manche caractérisée par une hétérogénéité des sédiments de fond [1,2] et une dynamique de marée marquée avec des courants supérieurs à 3 m/s dans le raz Blanchard [3]. Une technique originale couplant une analyse factorielle sphérique (AFS) et une série de krigeages [4] est appliquée pour interpoler spatialement aux nœuds de calcul une série de distributions granulométriques mesurées. Selon le nombre d'axes factoriels retenus dans cette méthode, on obtient des distributions plus ou moins « dégradées » par rapport aux données optimales (11 axes). Ces différentes informations relatives à la composition du substrat sédimentaire sont respectivement injectées dans la modélisation numérique. Leurs incidences au niveau de paramètres intermédiaires comme la rugosité du substrat et finaux tels que l'intensité des courants, la contrainte de cisaillement de fond et les taux de transport sédimentaire en charriage et en suspension sont évaluées.

L'article s'organise selon les étapes suivantes. Après une description succincte de la méthode d'interpolation spatiale des distributions granulométriques et des codes numériques (Section 2), la sensibilité des prédictions est évaluée à travers des corrélations point par point aux nœuds du maillage de calcul (Section 3). Enfin, la section 4 synthétise l'ensemble des résultats.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Méthode d'interpolation spatiale des distributions granulométriques

Le domaine d'application couvre la Manche centrale et orientale entre les longitudes 3,300° W et 3,000° E et les latitudes 48,410° N et 51,300° N. Il est discrétisé en 142x108 cellules carrées de 3 km de côté. La bathymétrie est issue des données transmises par Salomon (communication personnelle, 1993). La méthode d'interpolation spatiale des données granulométriques [4] est appliquée aux 2638 échantillons récoltés au cours des campagnes « RCP 378 Benthos de la Manche » [5]. Onze classes sédimentaires comprises entre 50 µm et 2 cm déterminées par les tailles des mailles de tamis complétées d'une classe extrême (5,5 cm < d₁₁ < 50 cm) correspondant aux affleurements rocheux sont prises en considération.

Le nombre d'axes factoriels retenus détermine différentes caractérisations du substrat de fond variant par leur degré de corrélations aux données d'origine. La part de la variance de chacun des 11 axes factoriels dans le pourcentage cumulé de la variance totale (Figure 1) met en évidence (i) les axes majeurs porteurs de l'essentiel de la structure du nuage de points telle que les gradients sables-cailloutis ou sables-vases et (ii) les axes subséquents considérés comme porteurs du bruit de fond.

Une recomposition complète intégrant les 11 axes factoriels restitue fidèlement les distributions granulométriques échantillonnées. A titre indicatif, la cartographie d'un paramètre dérivé intégré comme la médiane exprimée en échelle de Wentworth $\phi_{50} = -\log(d_{50})/\log(2)$ (Figure 2-a) avec d₅₀ le diamètre médian (en mm) s'accorde avec les cartographies qualitatives établies par les sédimentologues [1,2]. Elle reproduit les gradients sédimentaires francs (i) entre les zones de cailloutis (-8 < ϕ_{50} < -4) et les larges secteurs gravelo-sableux (-4 < ϕ_{50} < -2) et (ii) entre les sables grossiers (0 < ϕ_{50} < 2) et les poches de sables fins envasés (2 < ϕ_{50} < 6) à proximité du rivage. La réduction du nombre d'axes factoriels, des axes mineurs aux axes majeurs, altère la corrélation entre les données reconstituées et mesurées (Figures 2-b à f). Peu sensible sur les axes mineurs (Figures 2-b,c), l'écart RMS (« Root-Mean Square ») normalisé par rapport à une recomposition complète

avec 11 axes factoriels atteint 11 % pour une recombinaison avec les 5 axes majeurs (Figure 2-d). Cet écart augmente rapidement lors de l'élimination cumulée des axes factoriels majeurs restants (Figures 2-e,f et 3-a). La conservation d'un seul axe factoriel n'intègre pas les sédiments de diamètre médian $d_{50} < 500 \mu\text{m}$. La conséquence est un remplacement de la granulométrie sur les zones de silts et sables fins littoraux. L'écart RMS normalisé atteint dans ce cas une valeur de 48 %.

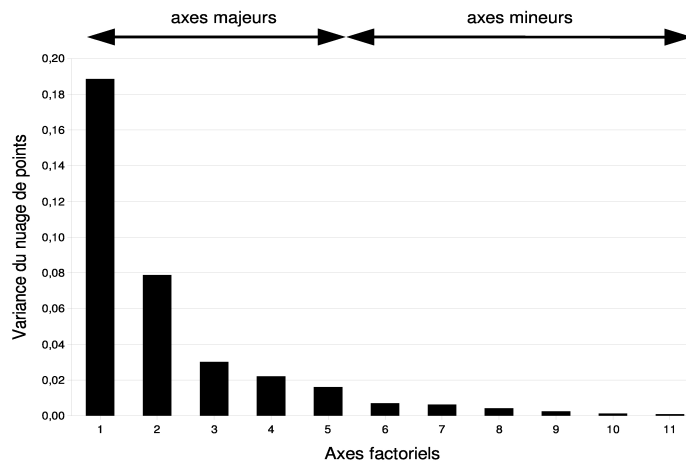


Figure 1 : Histogramme des valeurs propres de l'AFS du tableau de données des campagnes « RCP 378 Benthos de la Manche » correspondant aux variances du nuage de points projetés sur les axes factoriels.

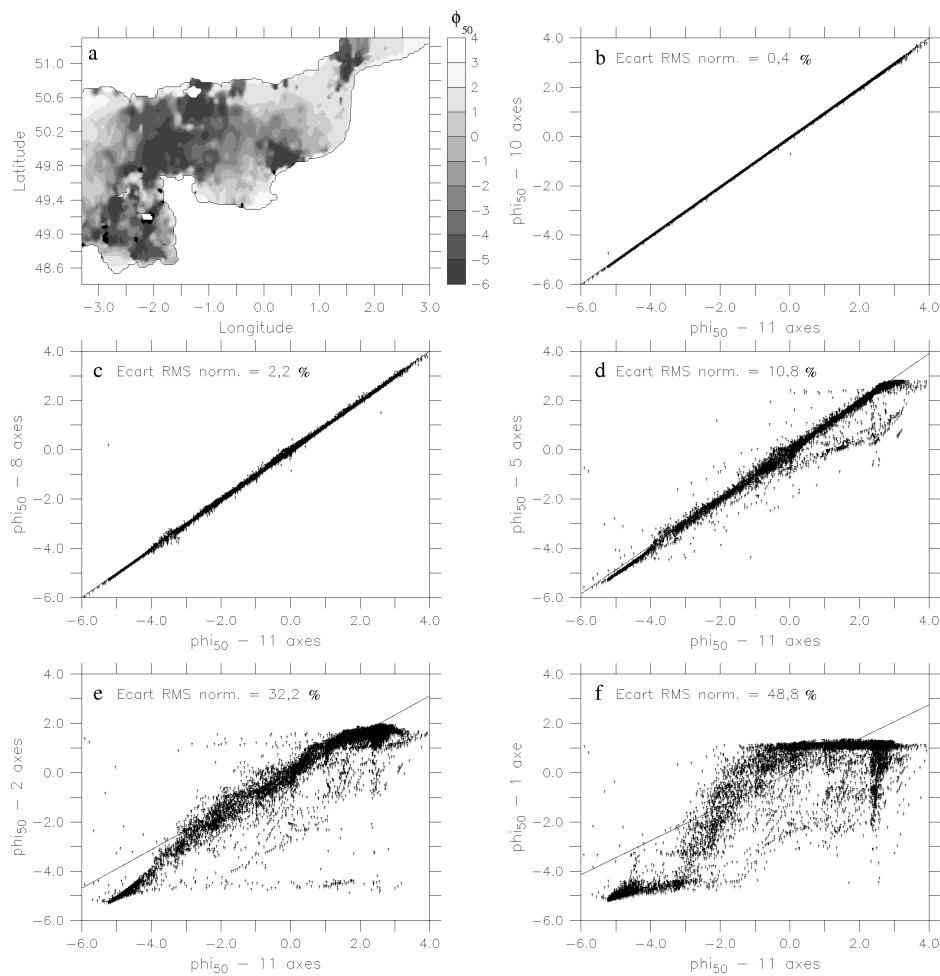


Figure 2 : (a) Répartitions en Manche du diamètre médian $\phi_{50} = -\log(d_{50})/\log(2)$, avec d_{50} en mm, calculée par la technique mixte AFS-krigeage en tenant compte des 11 axes factoriels. Corrélations point par point de la médiane obtenue à partir d'interpolations intégrant respectivement (b) 10, (c) 8, (d) 5, (e) 2 et (f) 1 axes factoriels avec la médiane obtenue à partir des 11 axes factoriels.

2.2 Chaîne de modélisation MISTRAL

La chaîne Modélisation Intégrée pour la Simulation des TRANsports Littoraux MISTRAL est basée sur le noyau hydrodynamique du code de circulation tridimensionnelle COHERENS (« Coupled Hydrodynamical Ecological Model for Regionals and Shelf Seas ») [6] et le code de propagation de houle SWAN (« Simulating Waves Nearshore ») [7]. Cette chaîne de modélisation comprend un module de transport sédimentaire adapté (i) au calcul du charriage à partir de la formulation proposée par Van Rijn [8] et (ii) à la résolution de l'advection et de la dispersion [9] de particules sédimentaires non-cohésives de différentes tailles. Les modules de houle et d'interaction houle-courant sont ici ignorés.

La chaîne MISTRAL est implantée sur la grille horizontale du domaine précédent (Section 2.1). Le maillage vertical de la colonne d'eau comporte 11 niveaux σ complétés par un sous-maillage de la demi-cellule verticale de fond de 7 niveaux afin de réaliser un calcul optimisé du flux de dépôt près du fond [9]. Les pas de temps des modes barotrope et barocline sont fixés respectivement à 30 et 300 s. Les rugosités de fond sont paramétrées à partir du diamètre médian des sédiments de fond d_{50} et du diamètre d_{90} au-dessous duquel on retrouve 90 % de la masse sédimentaire. Les substrats sableux de diamètre médian $d_{50} < 800 \mu\text{m}$ développent des rides [10] dont le paramètre de rugosité global perçu par l'écoulement est calculé par la formule de Wooding et al. [11] à partir du modèle géométrique de Yalin [12] de sorte que $z_0 \sim 8d_{50}$. Les substrats plus grossiers ($d_{50} \geq 800 \mu\text{m}$) qui ne présentent pas de rides ont un paramètre de rugosité directement conditionné par le diamètre des grains, $z_0 = d_{90}/10$ [13]. Le calcul de conditions limites compatibles avec la résolution des transports sédimentaires a imposé une extension du domaine de calcul hydro-sédimentaire entre les longitudes $4,000^\circ \text{ W}$ et $4,692^\circ \text{ E}$ et les latitudes $48,410^\circ \text{ N}$ et $52,837^\circ \text{ N}$. Le paramètre de rugosité y est fixé à $z_0 = 0,0035 \text{ m}$. L'élévation de la surface libre est imposée aux limites de ce domaine à partir de la recomposition des harmoniques semi-diurne M_2 et quart diurne M_4 (José Ozer, Management Unit of the North Sea Mathematical Models, communication personnelle, 1999).

3. RESULTATS NUMERIQUES ET DISCUSSIONS

3.1 Paramètre de rugosité

La Figure 3-b présente la variabilité du paramètre de rugosité z_0 pour les différentes recompositions de la granulométrie des sédiments de fond. Les différences sont plus marquées que pour la médiane (Figure 3-a) avec un écart RMS normalisé maximal de 62 % pour la recomposition à un seul axe. L'écart RMS normalisé est sensiblement plus important pour une recomposition à 4 axes que pour une recomposition à 3 axes. Cependant, le biais absolu indique une plus forte corrélation lorsque le nombre d'axes pris en compte augmente.

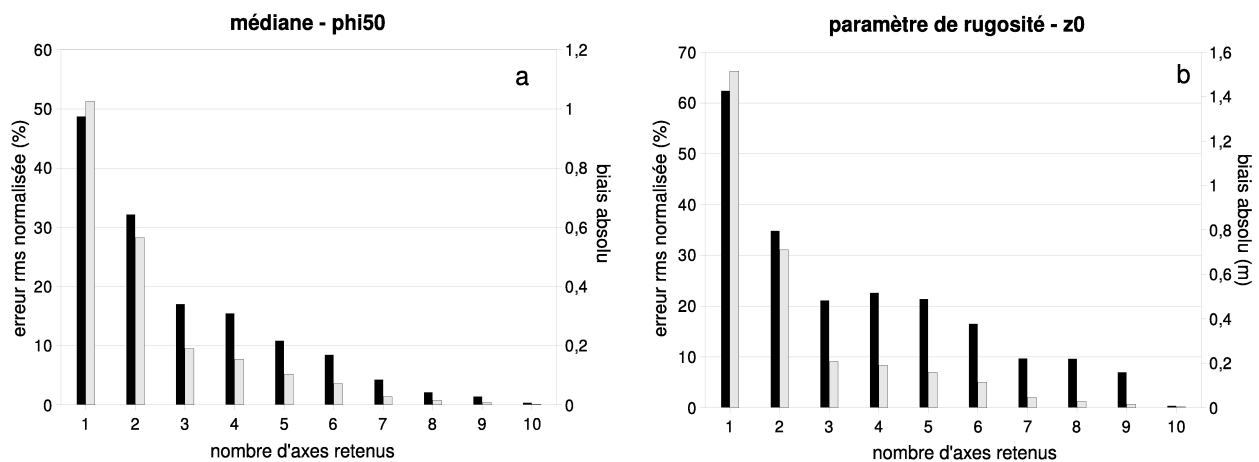


Figure 3 : Erreurs RMS normalisées (noir) et biais absolu (gris) par rapport à une recomposition complète avec les 11 axes factorielles des résultats de (a) la médiane ϕ_{50} et (b) du paramètre de rugosité z_0 .

3.2 Courant moyen et contrainte de cisaillement superficielle sur le sédiment

La répartition spatiale des sédiments de fond en Manche est fortement corrélée avec les courants de marée [14, 15]. Les fonds de graviers et de cailloutis apparaissent ainsi au niveau des régions de plus fortes contraintes de cisaillement sur le fond ($\tau_{skin} > 2,6 \text{ N.m}^{-2}$) du golfe Normano-Breton, de la section île de Wight-presqu'île du Cotentin et de la partie centrale du détroit du Pas-de-Calais (Figure 4). Les sédiments fins ($d < 200 \mu\text{m}$) se retrouvent principalement dans les baies et les estuaires où $\tau_{skin} < 0,10 \text{ N.m}^{-2}$ (Figure 4).

La prédiction de l'intensité maximale du courant apparaît peu sensible à l'erreur affectant l'information des champs de la distribution granulométrique des sédiments de fond (Figure 5-a). L'écart RMS normalisé par rapport à une recombinaison à 11 axes reste inférieure à 2,5 % pour les 10 répartitions spatiales des sédiments de fond testées.

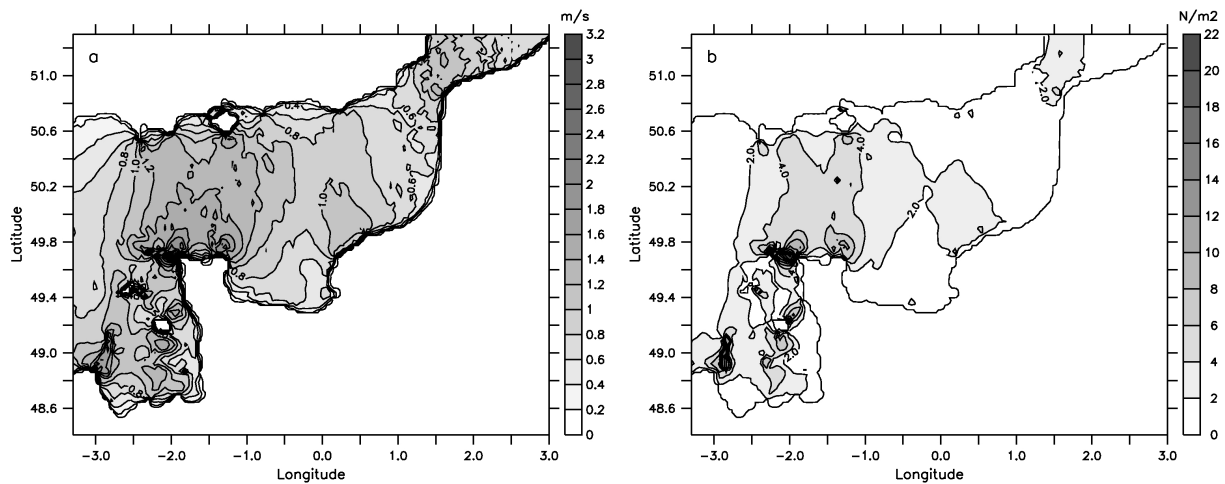


Figure 4 : Intensités maximales au cours d'un cycle de marée (a) du courant moyenné sur la verticale et (b) de la contrainte de cisaillement superficielle prédites.

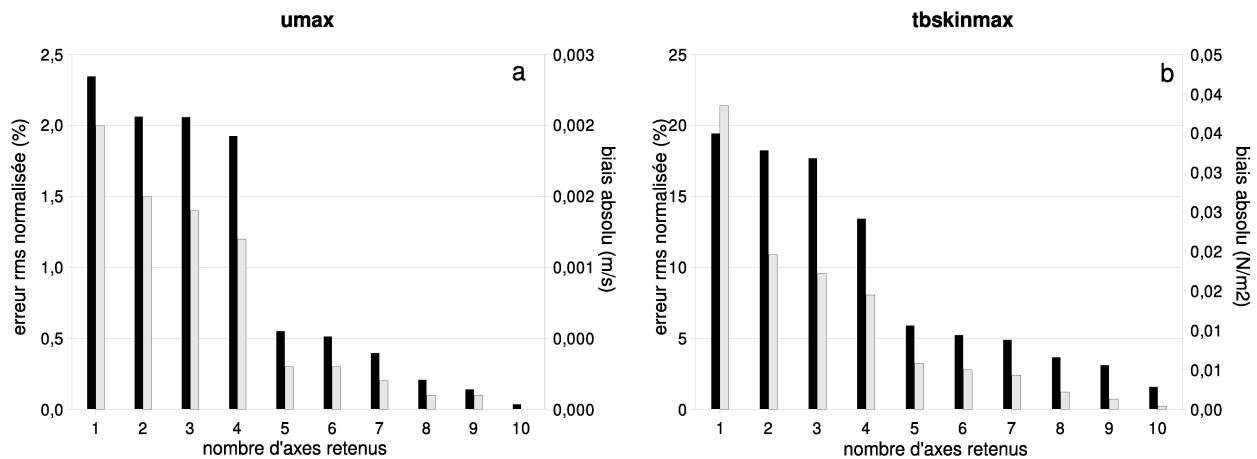


Figure 5 : Erreurs RMS normalisées (noir) et biais absolus (gris) par rapport à une recombinaison complète avec les 11 axes factoriels des valeurs prédites maximales au cours d'un cycle de marée (a) du courant moyenné sur la verticale et (b) de la contrainte de cisaillement superficiel.

La contrainte de cisaillement superficiel sur le sédiment (Figure 4-b) présente une sensibilité plus marquée que la vitesse moyenne avec un écart RMS normalisé atteignant 19,5 % dans le cas d'une recombinaison à un seul axe. Le corrélogramme point par point correspondant indique une dispersion maximale pour les valeurs inférieures à 2 N.m^{-2} . Cette plus forte sensibilité reflète une plus grande dépendance de la contrainte de cisaillement superficiel avec la composition granulométrique via (i) le paramètre de rugosité z_0 intervenant dans l'expression du coefficient de frottement total et (ii) la formule de

partition entre les frottements total et superficiel en présence de rides. Une convergence des prédictions apparaît cependant à partir de la prise en compte du 5^{ème} axe factoriel avec un écart RMS normalisé inférieur à 6 %.

3.3 Taux de transport sédimentaire

La Figure 6 présente les cartographies des taux de transport en charriage sur le fond et en suspension dans la colonne d'eau maximum prédits au cours d'un cycle de marée. Les valeurs moyennes se situent autour de 2,5 g cm⁻¹ s⁻¹ pour le charriage et de 22 g cm⁻¹ s⁻¹ pour la suspension. Les taux de transport les plus élevés sont localisés sur les substrats de silts et de sables aux confins des régions de plus fortes contraintes hydrodynamiques avec une extension géographique en Manche orientale dans la zone centrale reliant l'île de Wight à la presqu'île du Cotentin et au Pays-de-Caux.

Ces deux quantités présentent une forte sensibilité à la qualité de l'information granulométrique des sédiments de fond. L'élimination des axes majeurs de la recombinaison conduit à un écart RMS normalisé supérieur à 60 % pour le charriage et 80 % pour la suspension (Figure 7).

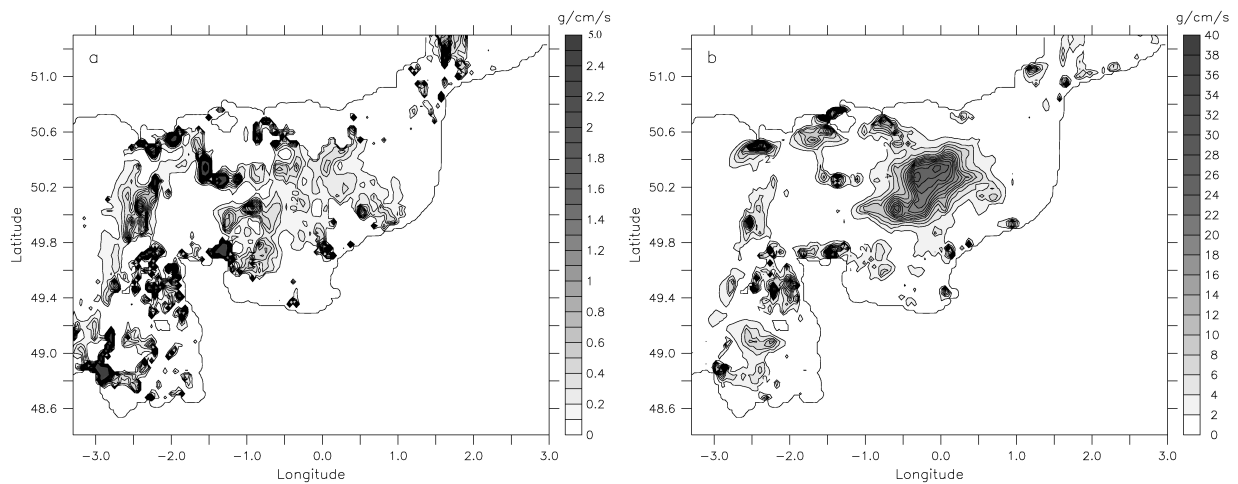


Figure 6 : Taux de transport en (a) charriage et (b) suspension maximum prédits au cours d'un cycle de marée.

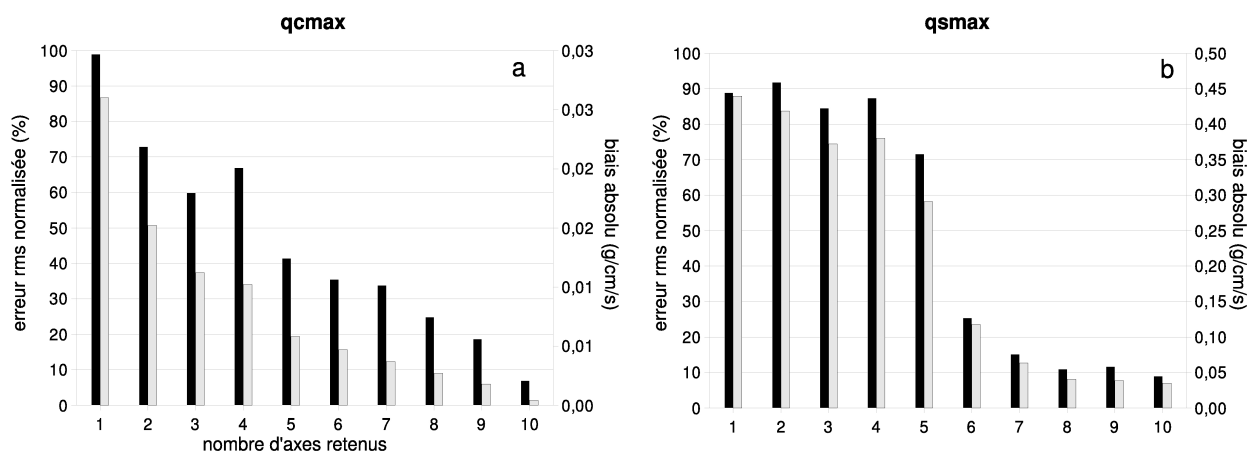


Figure 7 : Erreurs RMS normalisées (noir) et biais absolus (gris) par rapport à une recombinaison complète avec les 11 axes factoriels des taux de transport en (a) charriage et (b) en suspension maximum prédits au cours d'un cycle de marée.

Dans le cas du charriage, la prise en compte d'au moins 5 axes factoriels conduit à des prédictions satisfaisantes (Figure 7-a). Cependant, l'écart RMS normalisé reste supérieur à 40 % et le corrélogramme point par point montre une forte dispersion vers les valeurs extrêmes $q_{\text{cmax}} > 6 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Cette amélioration est également observée sur les prédictions des taux de transport en suspension maximum (Figure 7-b). Une recomposition intégrant 6 axes factoriels réduit ainsi l'écart RMS normalisé de 71 à 25 %. L'analyse des corrélogrammes point par point indique également une forte dispersion autour des valeurs maximales $q_{\text{smax}} > 10 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Ces résultats découlent d'une meilleure prise en compte des proportions de sédiments fins ($d < 200 \mu\text{m}$) avec 5 et 6 axes factoriels. La suspension étant le mode de transport prédominant pour les silts ($d < 50 \mu\text{m}$) en Manche [16], on observe ainsi une évolution nette de l'écart RMS normalisé en passant de 5 à 6 axes factoriels.

Enfin, de la même manière que pour l'estimation du paramètre de rugosité z_0 , il s'avère que l'écart RMS normalisé augmente avec la prise en compte du 4^{ème} axe. Une atténuation du biais absolu est cependant observée dans le cas du charriage. Cette tendance n'est pas confirmée pour la suspension. Ceci peut s'expliquer par une meilleure estimation des proportions de fines au détriment de l'estimation globale de la distribution granulométrique.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail présente une étude de sensibilité d'un modèle hydrodynamique et hydro-sédimentaire à une représentation plus ou moins précise des caractéristiques granulométriques des sédiments de fond. L'objectif principal est d'identifier la nécessité d'une approche globale (à l'échelle macroscopique) ou affinée (à l'échelle microscopique) de la variabilité de la distribution granulométrique des sédiments de fond.

Les prédictions des courants sont peu sensibles à une dégradation des informations granulométriques. Cette sensibilité s'accroît pour la contrainte de cisaillement superficiel. Une dispersion des prédictions intervient surtout dans les zones de faible hydrodynamisme ($\tau_{\text{skin}} < 2 \text{ N.m}^{-2}$) et une convergence est obtenue après sélection des 5 axes factoriels majeurs. Une conservation de toute l'information granulométrique s'avère indispensable pour la prédiction des taux de transport. La forte sensibilité des taux de transport sédimentaire est principalement liée aux sensibles modifications de l'estimation des proportions de silts et sables fins mobilisables par charriage et/ou suspension.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Louis Cabioch pour l'accès aux données des distributions granulométriques des échantillons récoltés au cours des campagnes « RCP 378 Benthos de la Manche » et José Ozer du Management Unit of the North Sea Mathematical Models (Bruxelles, Belgique) pour la mise à disposition des harmoniques de marée extraites de sa modélisation à l'échelle de la plateforme Atlantique Ouest Européenne.

REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Vaslet, D., Larsonneur, C. & Auffret, J.P. (1979). *Map of the surficial sediments of the English Channel*, scale 1:500000, Bureau de Recherche Géologique et Minières, Orléans, France.
- [2] Larsonneur, C., Bouysse, P., & Auffret, J.P. (1982). The superficial sediments of the English Channel and its Western Approaches. *Sedimentology*, 29, 851-864.
- [3] Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (1973). *Courants de marée de Dunkerque à Brest*, Imprimerie Nationale, Paris.

-
- [4] Leprêtre, A., Chapalain, G., & Carpentier, P. (2006). Une méthode d'interpolation des caractéristiques granulométriques des sédiments superficiels, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 177 (2), 89-95.
- [5] Cabioch, L., Gentil, F., Glacon, R., & Retière, C. (1977). Le macrobenthos des fonds meubles de la Manche; distribution générale et écologie. *Biology of benthic organisms*, Pergamon Press, Oxford, Keegan, B.F., Ceidigh, P.O., & Caston P.J. Editions, 115-128.
- [6] Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P. & Wild-Aden, K. (1999). *Coherens: A Coupled Hydrodynamics-Ecological Model for Regionals and Shelf Seas*. Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, Belgium.
- [7] Booij, N.R.C., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H. (1999). A third generation wave model for coastal regions, Part I, model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.
- [8] Van Rijn, L.C. (1984). Sediment transport, part I: Bedload transport. *Journal of Hydraulic Division*, 110 (110), 1613-1641.
- [9] Guillou, N. (2007). *Rôles de l'hétérogénéité des sédiments de fond et des interactions houle-courant sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire en zone subtidale – applications en Manche orientale et à la pointe de la Bretagne*. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, 469 p.
- [10] Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*, H.R. Wallingford, Telford, T., London, 249 p.
- [11] Wooding, R.A., Bradley, E.F., & Marshall, J.K. (1973). Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary Layer Meteorology*, 5, 285-308.
- [12] Yalin, M.S. (1985). On the determination of ripple geometry, *Journal of Hydraulic Engineering*, 8 (111), 1148-1155.
- [13] Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua, Amsterdam.
- [14] Stride, A.H. (1963). Current-swept sea floors near the southern half of Great Britain. *Journal of the Geological Society*, London, 119, 175-199.
- [15] Johnson, M.A., Kenyon, N.H., Belderson, R.H., Stride, A.H. (1982). Sand transport. In : Stride, A. (Ed.), *Offshore Tidal Sands. Processes and Deposits*. Chapman and Hall, London, 58-94.
- [16] Guillou, N., & Chapalain, G. (2010). Numerical simulation of tide-induced transport of heterogeneous sediments in the English Channel, *Continental Shelf Research*.