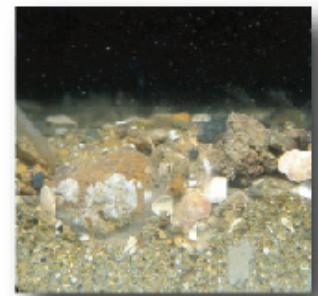


Flux Sédimentaires en Manche Est

Modélisation du Transport à long terme



$$\tau_c = \rho \left(\frac{\kappa \cdot \bar{u}}{\ln\left(\frac{h}{e \cdot z_0}\right)} \right)^2$$



Flux sédimentaires en Manche Est

- Modélisation du transport à long terme -

Philippe CUGIER, Olivier BLANPAIN

IFREMER, Département Dynamiques des Écosystèmes Côtiers, Laboratoire
d'Écologie Benthique, B.P. 70, 29280 Plouzané.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 3 |
| 2. Description succincte du modèle hydrosédimentaire de la Manche | 4 |
| 2.1 Le modèle hydrodynamique | 4 |
| 2.2 Calcul du frottement sur le fond..... | 6 |
| 2.3 Le modèle de transport sédimentaire multiclasse | 9 |
| 2.4 Couverture sédimentaire en Manche : conditions initiales de simulation..... | 11 |
| 2.5 Forçages | 12 |
| 3. Résultats | 13 |
| 3.1 Fond sédimentaire homogène..... | 14 |
| 3.2 Fond sédimentaire réaliste..... | 16 |
| 3.2.1 Marée réelle seule..... | 17 |
| 3.2.2 Marée réelle et houle réelle | 18 |
| 4. Conclusions | 21 |
| Bibliographie citée..... | 23 |
| Liste des figures | 24 |

1. Introduction

La présente étude vient en appui du contrat n° 2004-00-258-00-07 signé entre l'Ifremer et la DIREM qui porte sur la recherche de zones de moindres contraintes pour l'exploitation de granulats marins. Elle vise à caractériser, par modélisation mathématique, les grands traits des déplacements sédimentaires en Manche Est. Cette étude s'appuie principalement sur les développements réalisés dans le cadre de la thèse d'Olivier Blanpain sur l'étude du transport sédimentaire en Manche. Cette thèse de doctorat, cofinancée par l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) et l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), a débuté en 2005 afin d'aboutir au développement d'un modèle numérique de transport sédimentaire prenant en compte l'hétérogénéité des dépôts. Ce travail s'appuie sur le code hydrodynamique MARS développé à l'Ifremer (DYNECO/PHYSED) et utilisé depuis de nombreuses années à l'IRSN Cherbourg.

La zone d'étude s'étend de l'entrée de la Manche, à l'Ouest, jusqu'au Nord du Pas-de-Calais. Le modèle sédimentaire développé prend en compte plusieurs classes granulométriques et leur transport simultané.

Les résultats présentés dans ce document fournissent une vision à l'échelle de la Manche des grandes tendances du transport sur le fond, en fonction de la granulométrie et des contraintes hydrodynamiques.

2. Description succincte du modèle hydrosédimentaire de la Manche

2.1 Le modèle hydrodynamique

Le modèle hydrodynamique utilisé dans cette étude est basé sur le modèle MARS de l'Ifremer (Lazure et Dumas, 2008) dans sa version bidimensionnelle horizontale (2D). L'emprise du modèle couvre l'ensemble de la Manche avec une résolution spatiale de 4 km (Figure 1). Il fournit à chaque point du maillage la vitesse du courant et le niveau de la surface libre.

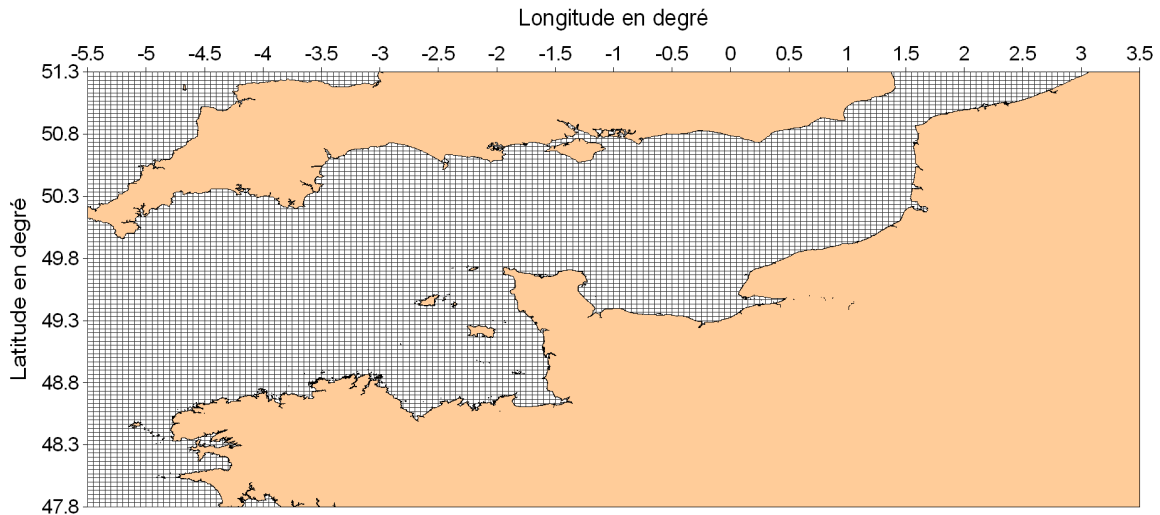


Figure 1 : Emprise géographique du modèle hydrodynamique de la Manche et résolution du maillage.

Ce modèle a été validé en niveau et courant en plusieurs points de la Manche. Quelques éléments de validations sont présentés sur les figures 2 et 3.

Le modèle hydrodynamique permet également d'estimer la contrainte de frottement exercée par le fluide sur le fond. Celle-ci, comparée à une contrainte seuil de mise en mouvement du sédiment, va contrôler le transport sur le fond ou la remise en suspension du sédiment (voir paragraphe 2.3).

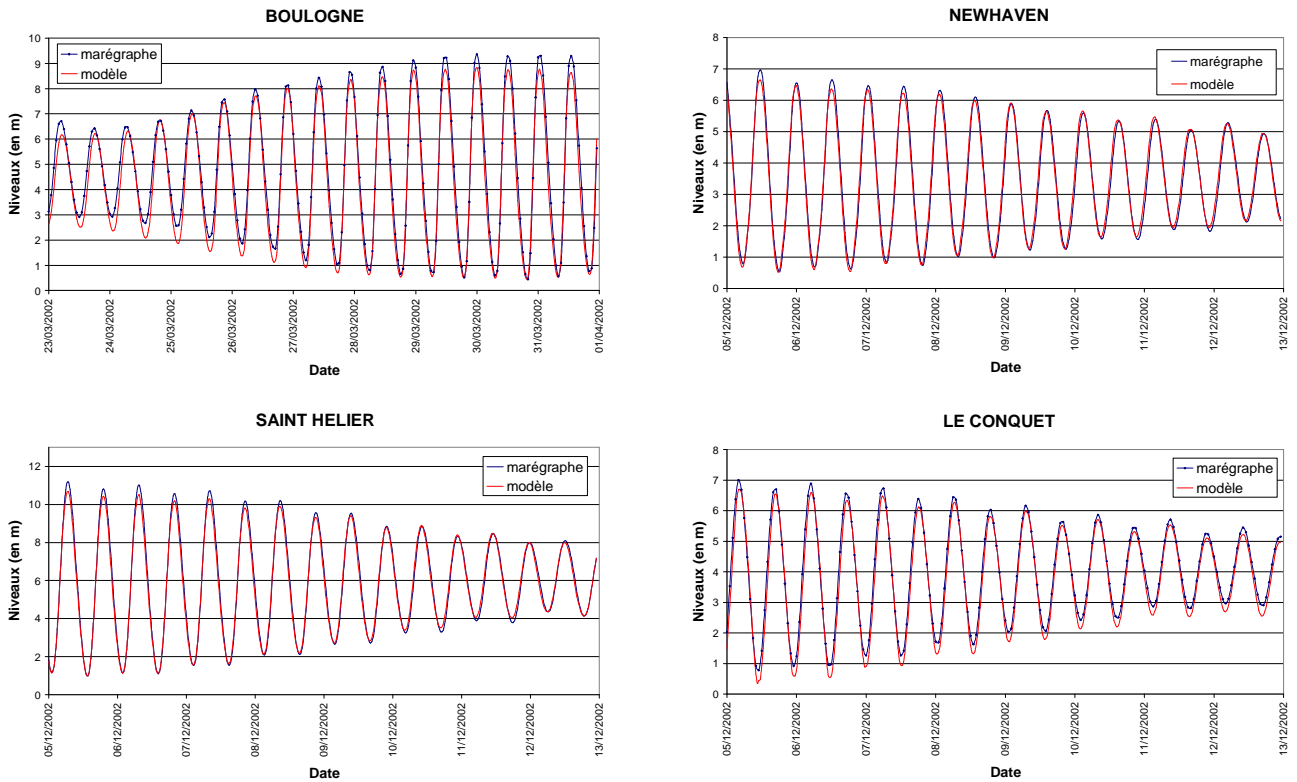


Figure 2 : Comparaison de la marée simulée et mesurée en 4 points de la Manche, d'Est en Ouest [origine des données : BODC (British Oceanographic Data Centre) et SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales)].

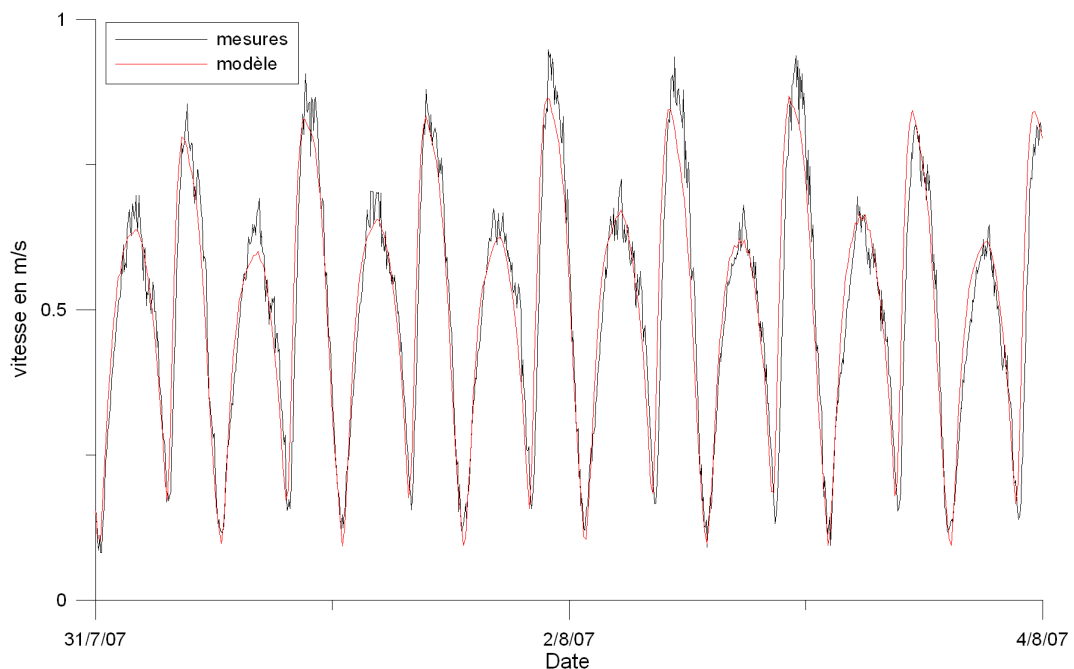


Figure 3 : Comparaison entre vitesse de courant calculée et mesurée au large de Dieppe du 31 juillet au 4 août 2007 [origine des données : Université de Rouen, campagne MOSAG07].

2.2 Calcul du frottement sur le fond

La tension de frottement sur le fond (τ) représente la contrainte exercée par le fluide sur le fond sédimentaire, contrainte susceptible de mettre le sédiment en mouvement. Elle est la résultante de l'effet combiné du courant de marée et de la houle. Elle va dépendre de l'intensité de l'hydrodynamisme et de la rugosité du fond.

En faisant l'hypothèse d'un profil logarithmique de vitesse, la tension de frottement liée au courant seul peut s'exprimer sous la forme :

$$\tau_c = \rho \left(\frac{\kappa \cdot \bar{u}}{\ln\left(\frac{h}{e \cdot z_0}\right)} \right)^2 \quad (\text{N.m}^{-2})$$

où :

| | |
|-----------|---|
| κ | constante de Karman (=0,4) |
| h | hauteur d'eau (m) |
| z_0 | longueur de rugosité (m) |
| \bar{u} | vitesse moyenne du fluide (m.s^{-1}) |
| e | 2,7183 |
| ρ | masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}) |

La longueur de rugosité z_0 peut être reliée à la rugosité (k_s) du fond par $z_0 = \frac{k_s}{30}$, avec $k_s = 3 \cdot D_{90}$ (Van Rijn, 1984a). D_{90} est le diamètre (m) tel que 90 % des grains ont un diamètre inférieur à cette valeur.

La contrainte de cisaillement générée par la houle s'exprime quant à elle sous la forme :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot U_b^2$$

où :

| | |
|-------|---|
| U_b | vitesse orbitale de houle (m.s^{-1}) |
| f_w | facteur de frottement de houle |

U_b est calculée en fonction de la hauteur (H_{houle}), de la longueur d'onde (L), de la période (T) de la houle et de la profondeur h par :

$$U_b = \frac{\pi \cdot H_{houle}}{T \cdot sh\left(\frac{2\pi \cdot h}{L}\right)}$$

Soulsby *et al.* (1993) proposent de retenir pour f_w la formule :

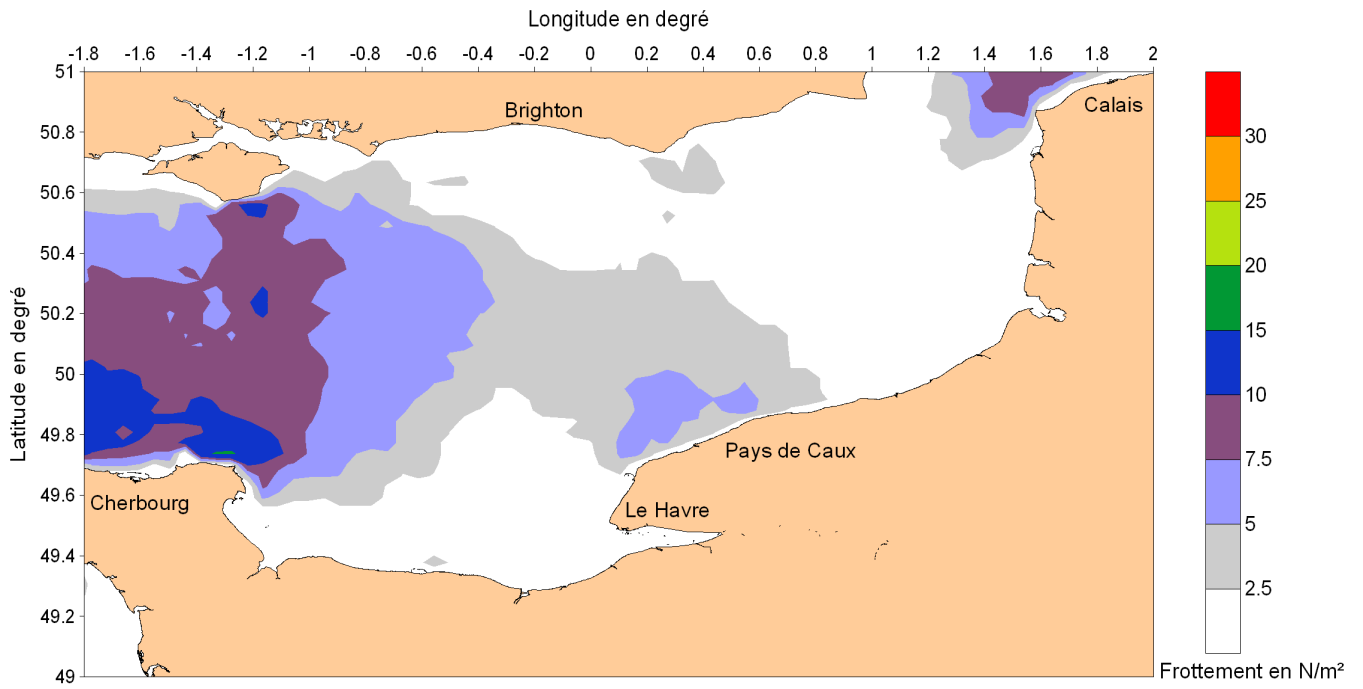
$$f_w = 1,39 \left(\frac{A}{z_0} \right)^{-0,52}$$

où A est l'excursion des particules fluides sur le fond exprimée par $A = \frac{T \cdot U_b}{2\pi}$

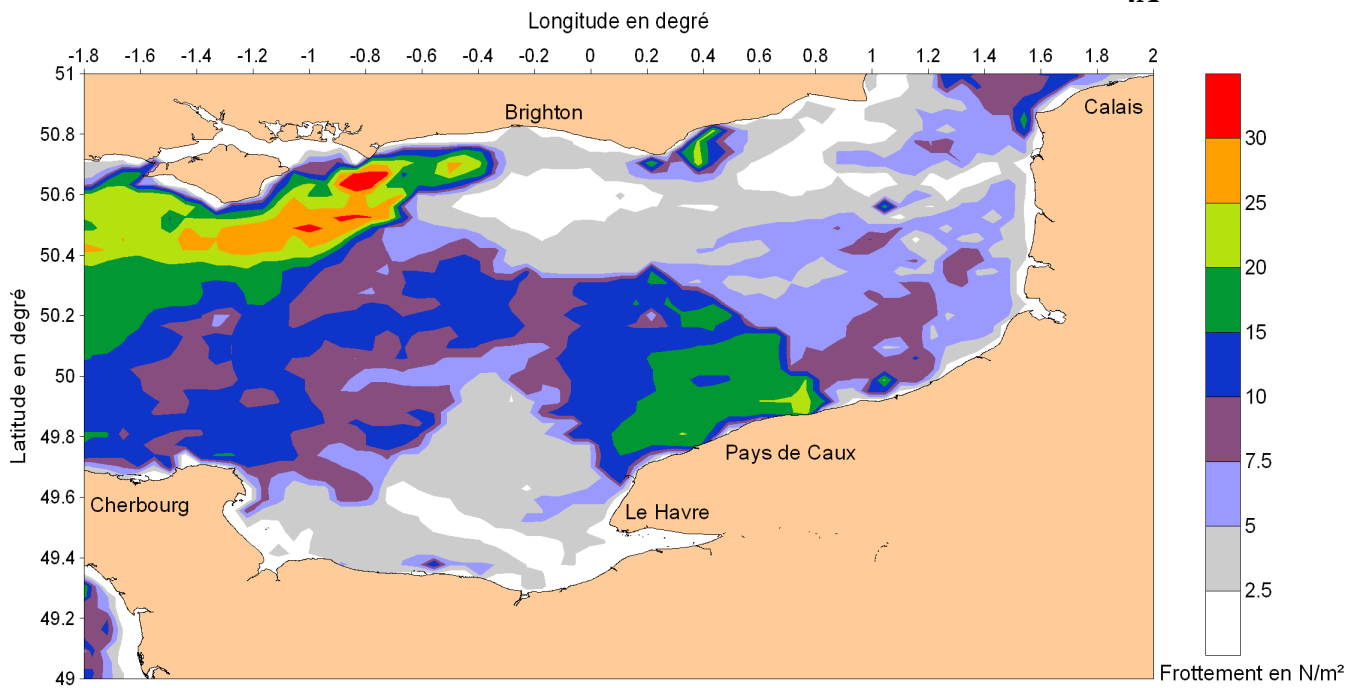
La contrainte totale résultante τ_b est obtenue par une combinaison non linéaire des contraintes de courant et de houle proposée par Soulsby *et al.* (1993). C'est cette contrainte qui est utilisée pour calculer le transport sédimentaire.

Afin d'illustrer l'importance de la houle dans la contrainte exercée sur le fond, la figure 4 montre la carte des contraintes maximales obtenues par le modèle en Manche, avec et sans prise en compte de la houle. La houle considérée ici est la houle réelle de l'année 2007 (voir chapitre 2.5).

La prise en compte de la houle entraîne une augmentation de la contrainte sur le fond qui se fait principalement sentir au centre de la Manche près de la côte anglaise, mais également en Manche Est, notamment le long du Pays de Caux.



4A



4B

Figure 4 : Contrainte maximale calculée au fond pour le courant de marée sans prise en compte de la houle (4A) et avec l'effet de la houle (4B).

2.3 Le modèle de transport sédimentaire multiclassé

Ce modèle permet de calculer le transport simultané de plusieurs classes granulométriques sous l'effet des contraintes hydrodynamiques (Cugier, 2000 ; thèse O. Blanpain). Il repose principalement sur l'utilisation de formules de transport qui fournissent les capacités de transport du sédiment à partir des paramètres instantanés locaux (vitesse du fluide, diamètre des grains, densité). Ces formules donnent en général le transport potentiel dans un écoulement uniforme, c'est-à-dire le transport à l'équilibre. Certaines d'entre elles calculent le transport total, d'autres le décomposent en un transport par charriage et un transport en suspension. Enfin, il existe des formules qui considèrent un seuil de mobilité en dessous duquel le transport est nul et des formules ne prenant pas en compte de seuil et qui donnent un transport même pour les vitesses de courant les plus faibles.

La formule proposée par Wu *et al.* (2000) a été retenue pour cette étude car elle semble donner des valeurs de flux transportés les plus proches de ceux estimés *in situ* par mesures en Manche (Thèse O. Blanpain).

Cette formule a été calibrée et testée sur de nombreuses données expérimentales. Elle prend en compte un facteur de « masquage/exposition » permettant de représenter dans le cas d'un mélange hétérométrique l'effet de la présence de gros grains sur la mobilisation ou non des grains de plus petite taille (Figure 5). Elle a par ailleurs un domaine de validité très étendu en terme de granulométrie, allant des sables fins aux galets (D_{50} allant de 0,2 à 50 mm).

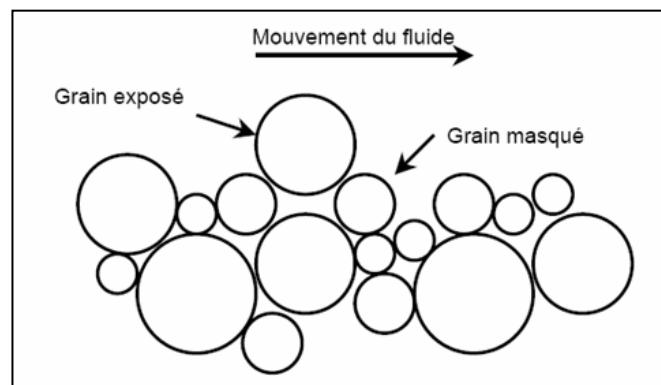


Figure 5 : Illustration du phénomène de masquage/exposition.

La formule de Wu *et al.* différencie le transport par charriage près du fond du transport en suspension. Elle s'exprime sous la forme :

Transport par charriage :

$$q_{b,i} = p_i \cdot 0,0053 \cdot \left[\frac{\tau_b}{\tau_{c,i}} - 1 \right]^{2,2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot D_i^3} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

où :

$$\tau_{c,i} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot D_i \cdot \theta_c \cdot \xi_i \quad \text{tension critique de frottement (N.m}^{-2}\text{)}$$

$$\tau_b \quad \text{tension de frottement du fluide (N.m}^{-2}\text{)}$$

$$\xi_i = \left(\frac{p_{e,i}}{p_{m,i}} \right)^{-0,6} \quad \text{facteur d'exposition/masquage}$$

| | |
|--|--|
| $p_{e,i} = \sum_{j=1}^N p_j \frac{D_i}{D_i + D_j}$ | probabilité d'exposition |
| $p_{m,i} = \sum_{j=1}^N p_j \frac{D_j}{D_i + D_j}$ | probabilité de masquage |
| $\theta_c = 0,03$ | paramètre critique de Shields |
| $g = 9,81$ | gravité (m.s ⁻²) |
| ρ_s | masse volumique des grains (kg.m ⁻³) |
| ρ | masse volumique de l'eau (kg.m ⁻³) |
| $p_i ; p_j$ | proportion de la classe i (ou j) dans la couche de surface |
| $D_i ; D_j$ | taille moyenne des grains de la fraction i (ou j) |

Transport en suspension :

$$q_{s,i} = p_i \cdot 0,0000262 \cdot \left[\left(\frac{\tau_b}{\tau_{c,i}} - 1 \right) \cdot \frac{\bar{u}}{\omega_i} \right]^{1,74} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot D_i^3} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

où :

$$\omega_i = \sqrt{\left(13,95 \cdot \frac{\nu}{D_i} \right)^2 + 1,09 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot g \cdot D_i} - 13,95 \cdot \frac{\nu}{D_i} \quad \text{vitesse de chute classe i (m.s}^{-1}\text{)}$$

$$\nu = \left[1,14 - 0,031 \cdot (T_e - 15) + 0,00068 \cdot (T_e - 15)^2 \right] \cdot 10^{-6} \quad \text{viscosité cinématique (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

Le transport total s'exprimera donc par :

$$q_{t,i} = q_{b,i} + q_{s,i} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$$

Le modèle permet de calculer à chaque instant, en fonction des contraintes hydrodynamiques (courants de marée et houle) exprimées au travers de la tension de frottement τ_b , le flux de chaque classe de particules, dans chacune des mailles du modèle. Le flux des particules de type i dépendra donc de la disponibilité de ces particules dans la maille et de la présence et de la proportion des autres catégories de particules.

La résolution de l'équation de conservation du sable pour chaque maille permet de calculer l'évolution de la cote du fond :

$$(1 - p) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \sum_i \left(\frac{\partial q_{tx,i}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty,i}}{\partial y} \right) = 0$$

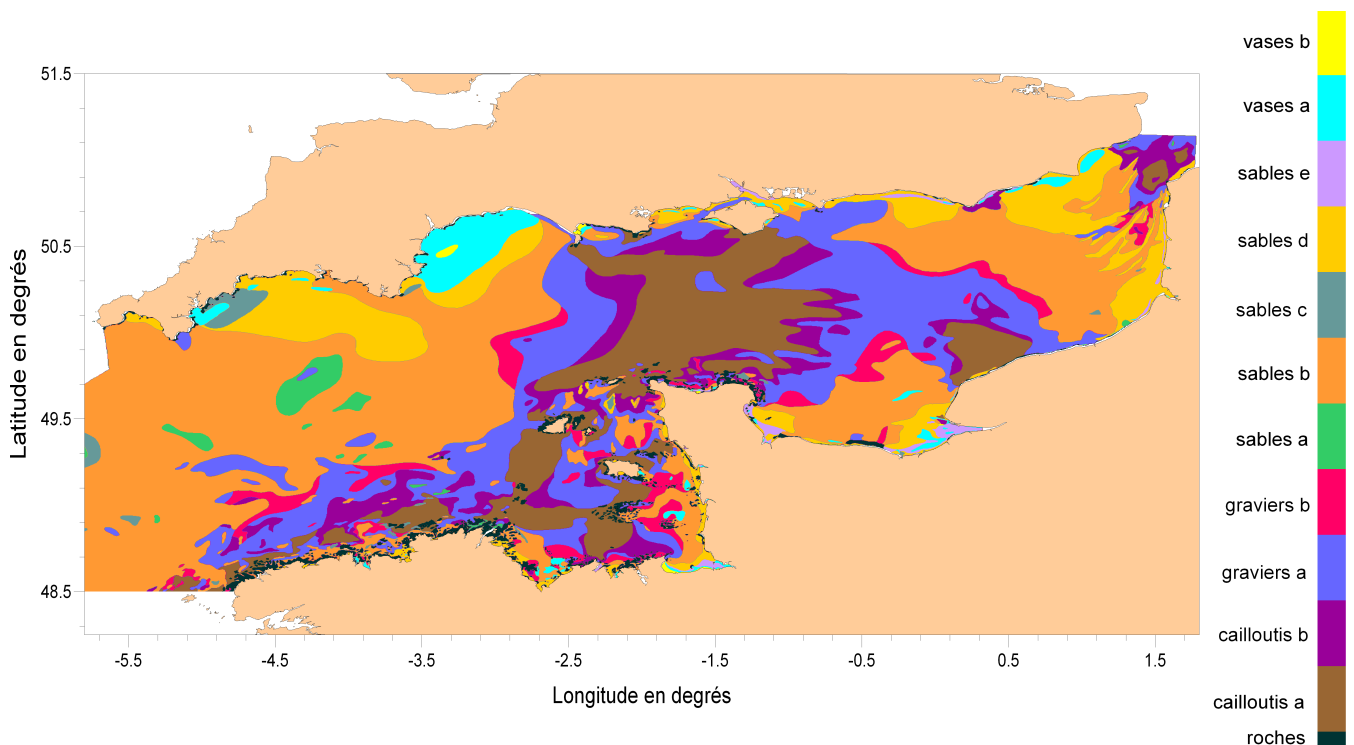
où :

| | |
|-----------------------|--|
| p | porosité |
| Z_f | cote du fond (m) |
| t | temps (s) |
| $q_{tx,i} ; q_{ty,i}$ | flux total transporté selon la direction x (ou y) des particules de classe i (m ³ .m ⁻¹ .s ⁻¹) |

2.4 Couverture sédimentaire en Manche : conditions initiales de simulation

La nature des fonds sédimentaires en Manche a fait l'objet de nombreuses études et est globalement bien connue. Le document le plus complet à ce sujet est la carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000 réalisée par Vaslet *et al.* (1978) et publiée par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et le CNEXO (Centre National pour l'Exploitation des Océans). Elle rassemble l'ensemble des résultats acquis jusqu'en 1977 par un grand nombre de laboratoires et se base sur l'étude de 12 000 échantillons auxquels s'ajoutent des informations tirées de publications britanniques, de renseignements extraits des cartes marines, de carottages de roches et de profils sismiques. Sur ce document, chaque zone est représentée par un type de sédiment défini d'après sa granulométrie et sa teneur en calcaire.

La figure 6 en est une représentation simplifiée. Elle montre une large zone caillouteuse au centre de la Manche qui sépare la Manche Est de la Manche Ouest, où les sédiments gravo-sableux dominent. Des zones de cailloutis sont observées toutefois à l'Est comme à l'Ouest, dans le détroit du Pas-de-Calais, au large du Pays de Caux et le long des côtes bretonnes depuis Ouessant jusqu'aux îles anglo-normandes. Les sédiments plus fins sont présents dans les baies et les estuaires (baie de Seine, baie de Somme, baie du Mont Saint Michel, baie de Lyme, ...). La frange côtière se caractérise par une grande diversité de dépôts qui dépend de l'énergie locale des courants de marée, de l'exposition aux houles et de la morphologie de la côte et des fonds.



Les données de cette carte sont utiles au modèle pour définir les conditions initiales de simulation. Cela suppose de pouvoir relier chaque zone sédimentaire à une granulométrie moyenne et/ou à un classement sédimentaire. Larssonneur (1971) a établi les répartitions granulométriques pour chacun des faciès représentés sur la figure 6. L'exploitation de ces

répartitions a permis de calculer la proportion de chaque classe granulométrique choisie pour chacun des faciès de la couverture sédimentaire (Bailly du Bois, 2000).

Quatre classes granulométriques ont été définies dans cette étude : sables très fins à fins ($D = 0,13$ mm), sables moyens à grossiers ($D = 1,13$ mm), graviers ($D = 16$ mm) et galets ($D = 100$ mm). Les courbes granulométriques ont permis de déterminer la distribution de ces 4 classes dans chacune des mailles du modèle afin d'établir les conditions initiales de simulation (Figure 7).

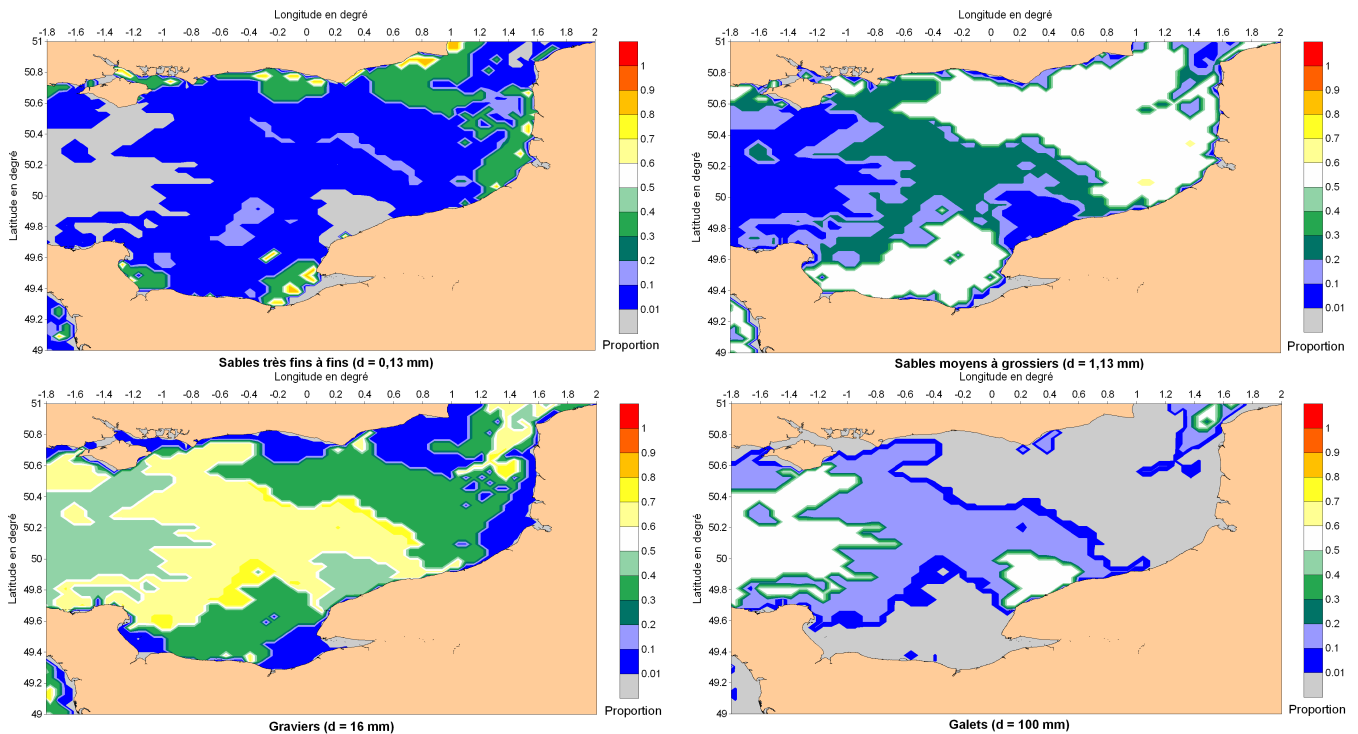


Figure 7 : Proportion de chacune des classes granulométriques considérées.

2.5 Forçages

Pour simuler la propagation de la marée sur tout le domaine du modèle « Manche », la hauteur d'eau doit être connue à ses limites marines à chaque instant. Ces conditions aux limites sont fournies par un modèle de plus grande emprise (figure 8). Ce modèle est lui-même forcé à ses limites par un signal de marée composée des 8 ondes principales provenant de l'atlas de constantes harmoniques de la marée FES99 (Lefevre *et al.*, 2002).

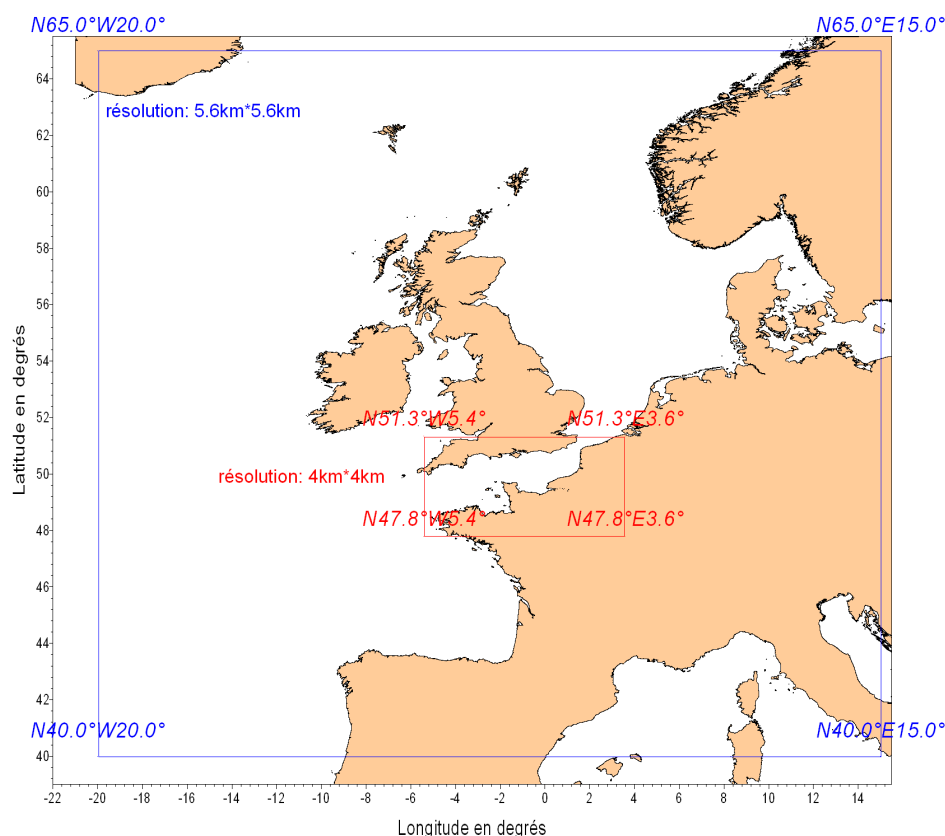


Figure 8 : Emboîtement du modèle « Manche » dans le modèle de grande emprise.

Les données de vent, permettant de forcer le modèle hydrodynamique en surface, proviennent du modèle ALADIN de Météo-France.

Les caractéristiques de houle (hauteur, période et longueur d'onde) proviennent du résultat de la simulation du modèle WAVEWATCH III (Ardhuin *et al.*, soumis) appliquée à la zone golfe de Gascogne/Manche et interpolée sur notre grille de calcul. Ces caractéristiques correspondent aux conditions de houle de l'année 2007.

Les apports par les fleuves ne sont pas pris en compte dans cette étude, ni en terme hydraulique, ni en terme d'apport de matériaux fins. Sur le domaine considéré, les apports de la Seine peuvent influencer l'hydrodynamique sédimentaire locale. Il faut donc considérer les résultats obtenus à l'embouchure de la Seine comme non réalistes.

3. Résultats

Afin de séparer les facteurs importants contrôlant les flux sédimentaires, deux types de simulation sont réalisés. Une première série de simulations a considéré une couverture homogène, sur l'ensemble de la Manche, de chacune des 4 classes sédimentaires retenues au chapitre 2.4. On obtient ainsi le transport « potentiel » d'une granulométrie donnée en fonction des forçages hydrodynamiques.

La deuxième série de simulations a pris en compte cette fois la couverture sédimentaire réaliste sur la base de ces mêmes 4 classes granulométriques. Elle permet donc de prendre en compte d'une part le transport simultané de plusieurs classes sédimentaires et d'autre part la disponibilité réelle de ces classes sur le fond. En effet, la proportion des 4 classes varie à l'échelle de la Manche ; ainsi, selon les faciès, les différentes classes sont plus ou moins représentées. Lors de l'analyse des résultats, il est important de garder à l'esprit que l'importance du transport d'une certaine classe dépend à la fois des conditions

hydrodynamiques mais aussi de sa disponibilité. Ainsi, dans une zone donnée, le transport d'une classe pourra être nul ou extrêmement faible, non pas parce que les conditions hydrodynamiques ne permettent pas ce transport mais parce que cette classe est peu ou pas représentée.

Deux situations hydrodynamiques ont été simulées dans ce cas :

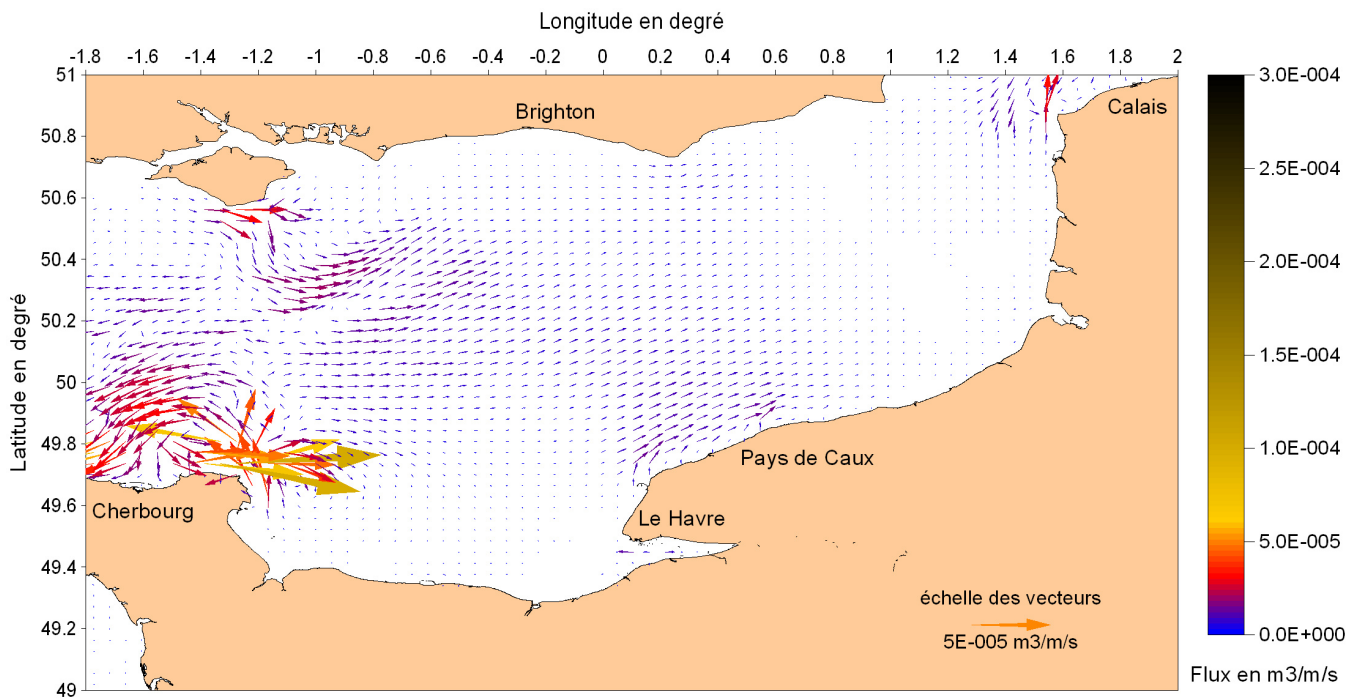
- une condition de marée réelle seule,
- une condition de marée et de houle réelles correspondant à l'année 2007.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes de flux résiduels calculés sur une année pour chaque classe granulométrique et pour chaque condition de forçage : 1) marée réelle seule et fond homogène formé d'une seule classe ; 2) marée réelle seule et fond réaliste ; 3) marée réelle, houle réelle et fond réaliste. Contrairement à l'emprise du modèle qui englobe toute la Manche, les résultats seront présentés uniquement sur la Manche Est (du Cotentin au Pas-de-Calais).

Les résultats des flux seront discutés en relatif plutôt qu'en valeur absolue. En effet, vu le peu de données disponibles et la difficulté de mesurer des flux sédimentaires *in-situ*, les valeurs quantitatives sont à prendre avec précaution. Quelques éléments de comparaison avec des flux mesurés de part et d'autre du détroit du Pas-de-Calais sont tout de même fournis au chapitre 3.2.2.

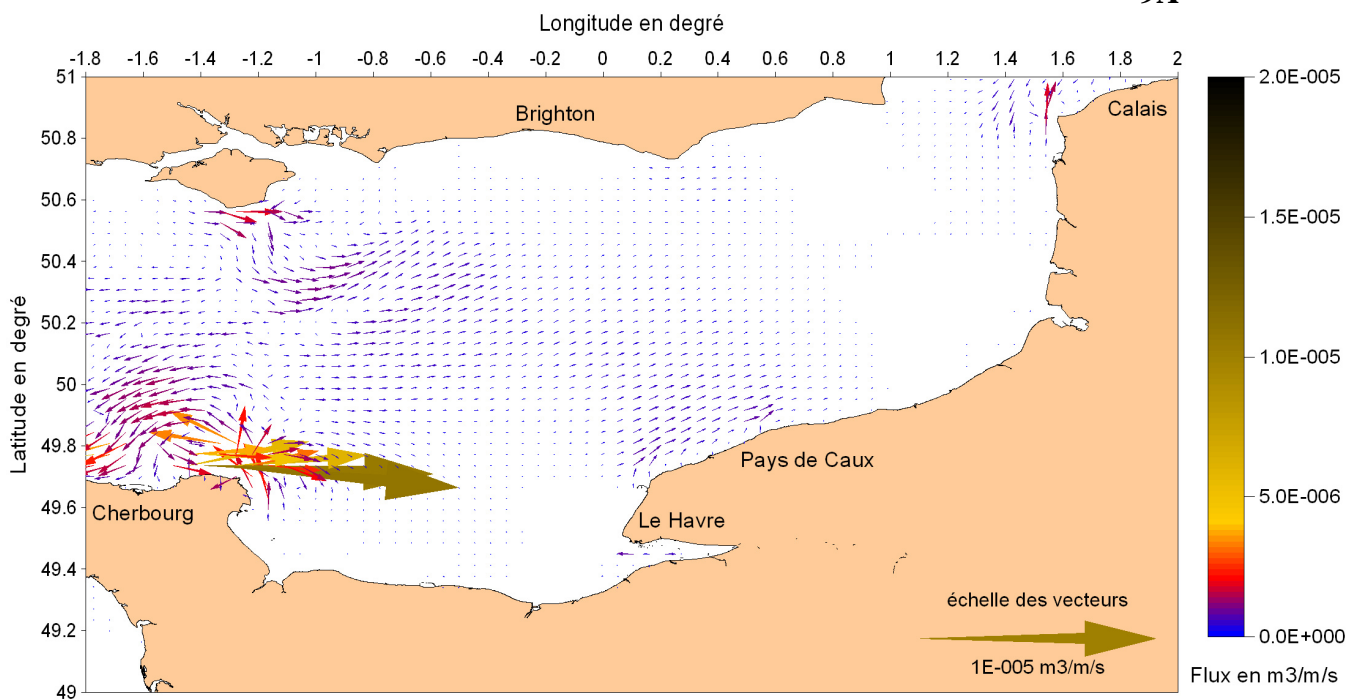
3.1 Fond sédimentaire homogène

Pour une granulométrie donnée, les flux calculés par les formules de transport dépendent de l'intensité du forçage hydrodynamique et expriment donc la capacité du fluide à transporter ces grains. A l'échelle de la Manche, les zones où cette capacité est maximale correspondent donc directement aux zones où le forçage hydrodynamique est le plus fort. Des simulations théoriques ont été réalisées, dans lesquelles le fond de la Manche est tapissé de manière homogène par une seule classe granulométrique. Les figures 9A à 9C représentent le transport résiduel « potentiel » calculé pour chacune des classes granulométriques dans ces conditions.



Sables très fins à fins (D = 0,13 mm)

9A



Sables moyens à grossiers (D = 1,13 mm)

9B

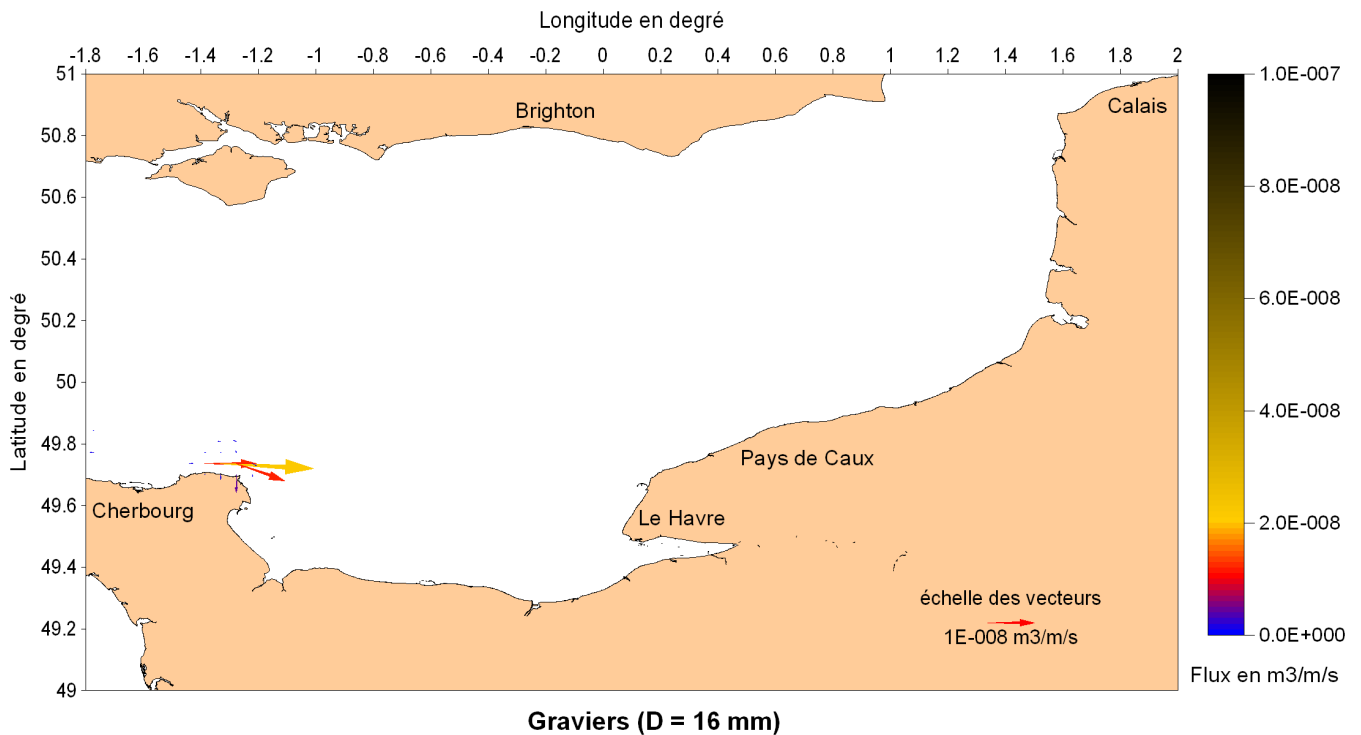


Figure 9 : Flux résiduels « potentiels » pour les différentes granulométries considérées séparément et réparties de manière homogène sur la Manche.
 9A : sables très fins à fins ; 9B : sables moyens à grossiers ; 9C : graviers.

Pour les 2 classes granulométriques les plus fines (sables très fins à fins et sables moyens à grossiers), les transports potentiels les plus forts correspondent aux zones où le frottement au fond est maximum, c'est-à-dire le centre Manche, le Pays de Caux et le détroit du Pas-de-Calais. Pour les graviers, la seule zone où un transport est prédit se situe au niveau du Cotentin. Pour la classe la plus grossière (galets), aucun flux n'est prédit par le modèle. Pour les granulométries les plus fines, une tendance nette du transport d'Ouest en Est est observée entre le Cotentin et la baie de Somme. A l'Est de la baie de Somme, le transport semble inversé (d'Est en Ouest). Une zone de convergence du transport semble donc exister entre la baie de Somme et la côte anglaise.

3.2 Fond sédimentaire réaliste

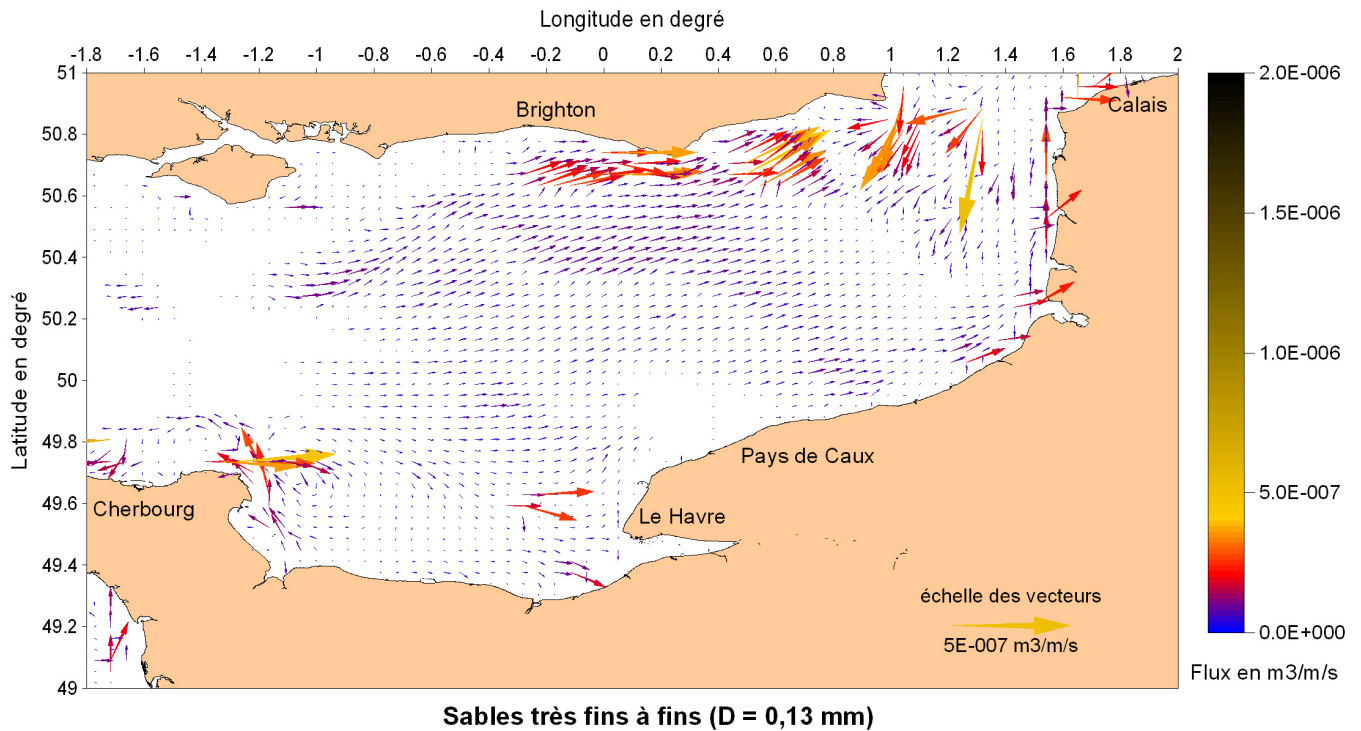
Le type de simulation précédente reste très académique et n'exprime spatialement que la potentialité d'un transport pour une classe granulométrique donnée. Dans la réalité, le fond sédimentaire est constitué de nombreuses classes granulométriques, dont la distribution va différer spatialement. Le transport réel va donc dépendre du mélange granulométrique, et donc des interactions entre grains de taille différente, mais aussi de la disponibilité locale de ces différentes classes. Les simulations suivantes considèrent donc un fond sédimentaire plus « réaliste » sur la base des 4 classes granulométriques décrites au chapitre 2.4.

Deux cas de figures ont été simulés :

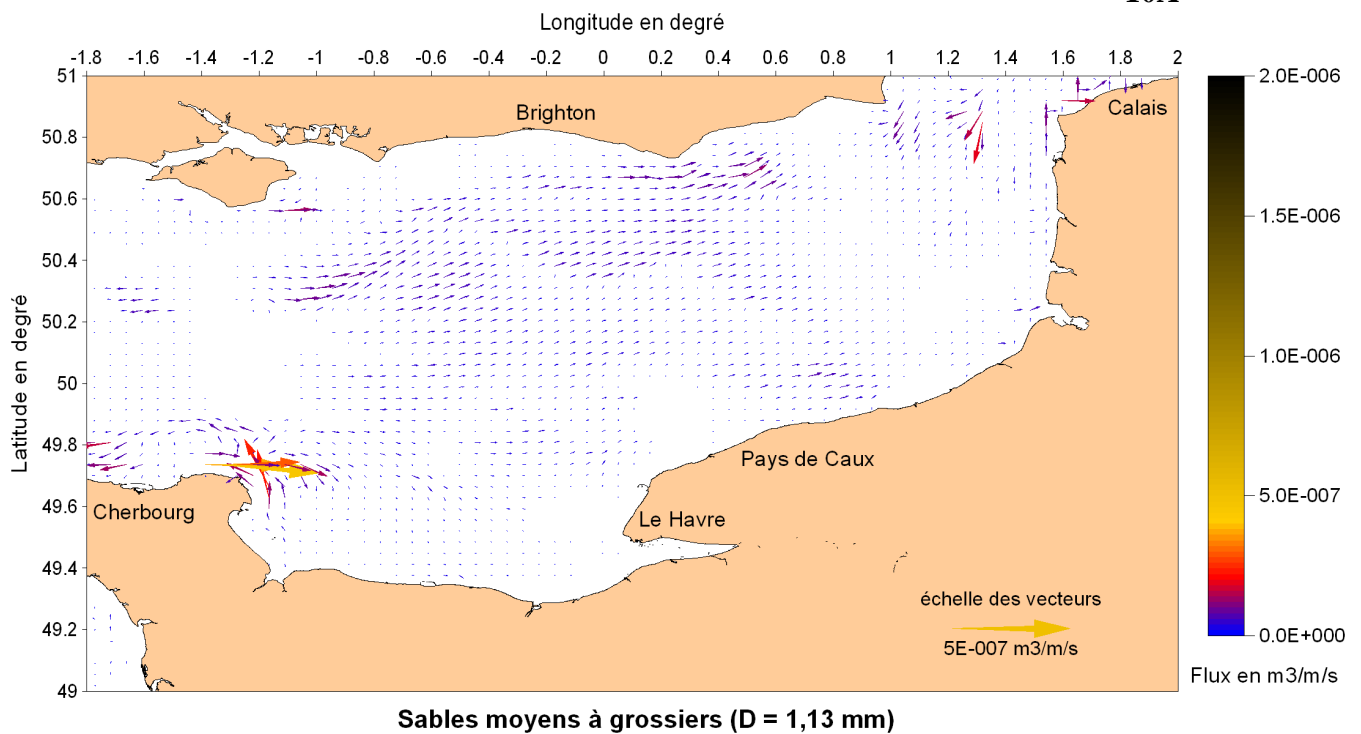
- forçage de marée uniquement (marée réelle correspondant à l'année 2007),
- forçage conjoint marée et houle (année 2007).

3.2.1 Marée réelle seule

Les résultats sont présentés sur les figures 10A à 10C. La classe la plus grossière correspondant aux galets n'est pas représentée car aucun transport n'est prédit par le modèle.



10A



10B

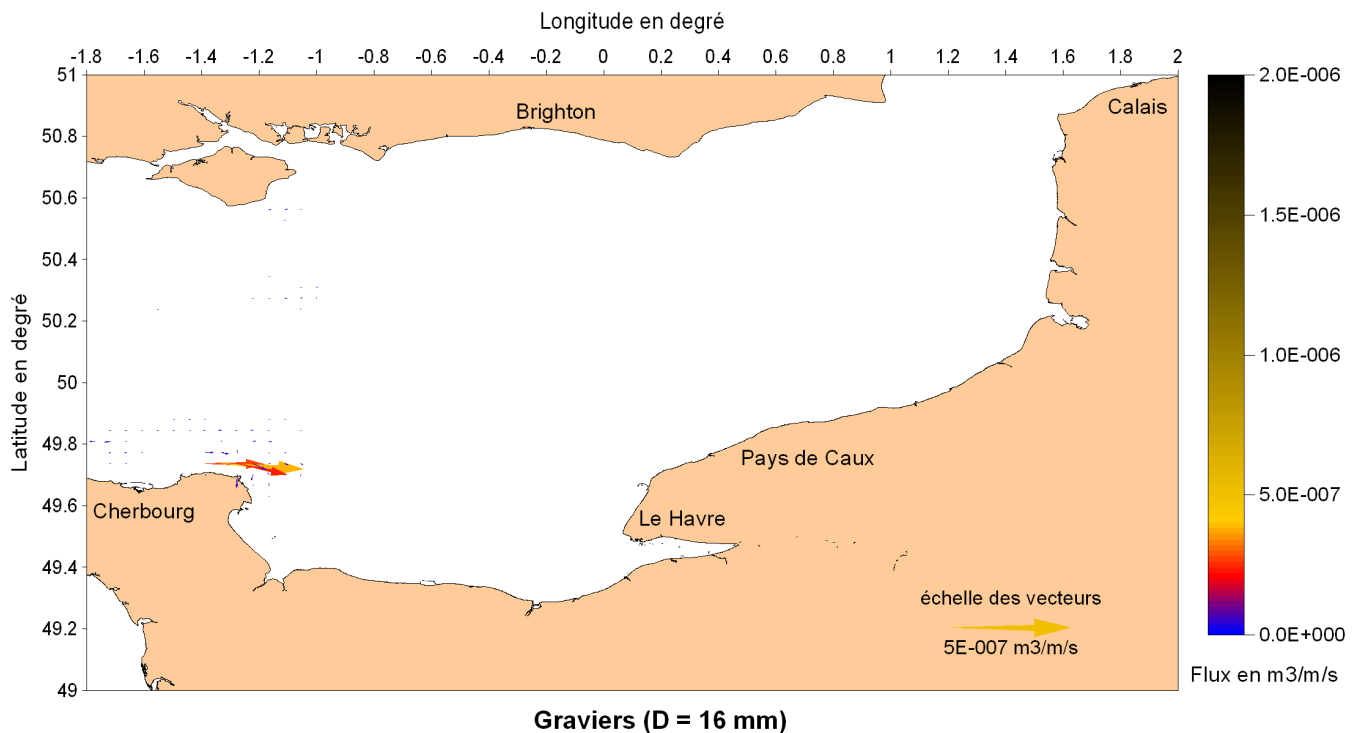


Figure 10 : Flux résiduels des différentes granulométries, sans prise en compte de la houle dans le cas d'un fond sédimentaire réaliste en Manche.

10A : sables très fins à fins ; 10B : sables moyens et grossiers ; 10C : graviers.

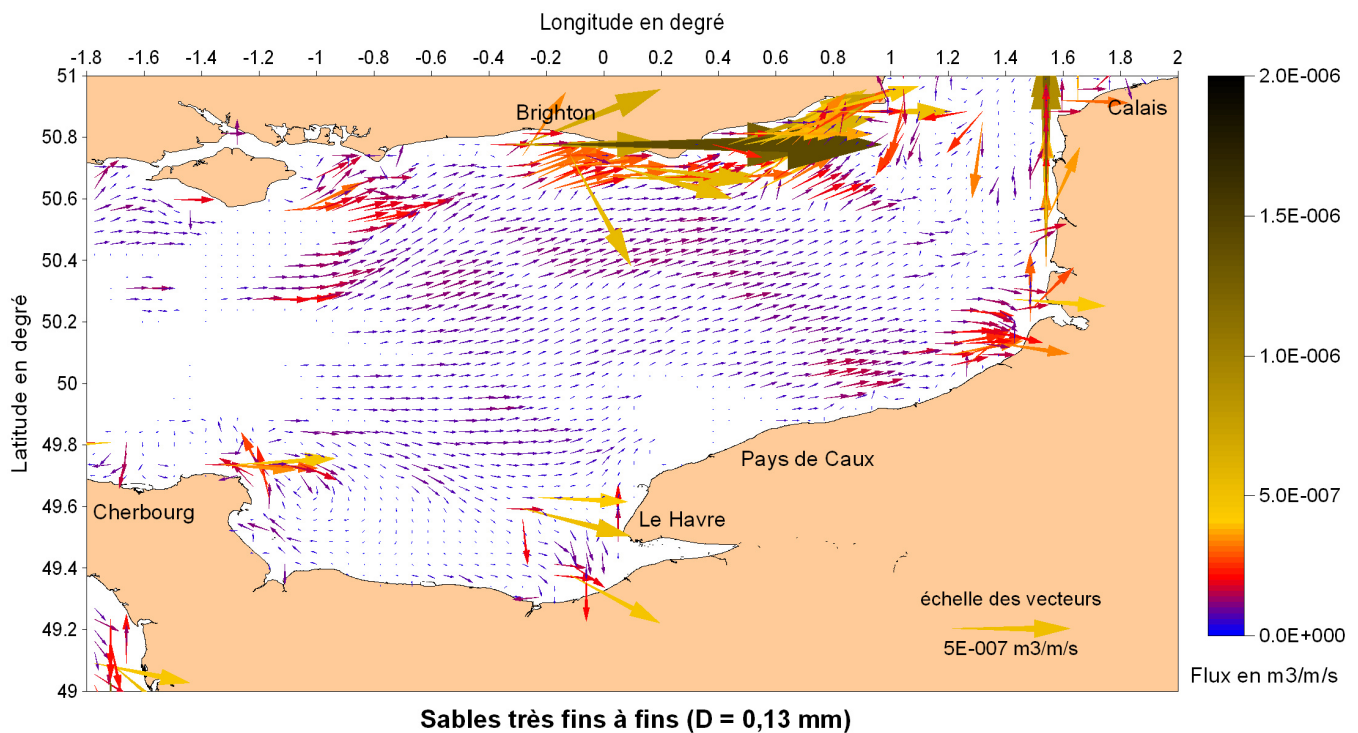
Lorsqu'un fond sédimentaire plus réaliste est pris en compte, les flux les plus importants ne sont pas obtenus systématiquement aux endroits où le frottement sur le fond est maximum mais plutôt aux endroits où les matériaux les plus fins sont les plus disponibles. Par exemple, en centre Manche ou le long de la côte du Pays de Caux les fonds sont dominés par des sédiments très grossiers (graviers, cailloutis) et les fractions potentiellement les plus mobiles sont peu ou pas représentées à la surface du sédiment. Les flux de transport calculés dans ces zones sont donc faibles voire nuls. Par ailleurs, même si des particules fines existent dans ces secteurs, les particules plus grossières présentes en surface agiront comme un bouclier et empêcheront ou limiteront la remobilisation des particules fines sous-jacentes. C'est le phénomène de masquage décrit au paragraphe 2.3 et dont le modèle tient compte. Ainsi, même si la tension de frottement sur le fond est moins importante à certains endroits, les flux annuels calculés pourront être largement supérieurs si la proportion des classes les plus fines est importante.

Concernant la direction des transports, le schéma reste par contre assez semblable à celui des transports potentiels avec globalement un transport d'Ouest en Est entre le Cotentin et la baie de Somme, et d'Est en Ouest plus au Nord. On retrouve donc la zone de convergence décrite précédemment entre la baie de Somme et la côte anglaise. On note toutefois qu'au Nord de la baie de Somme, sur une fine bande côtière, le transport est orienté vers le Nord.

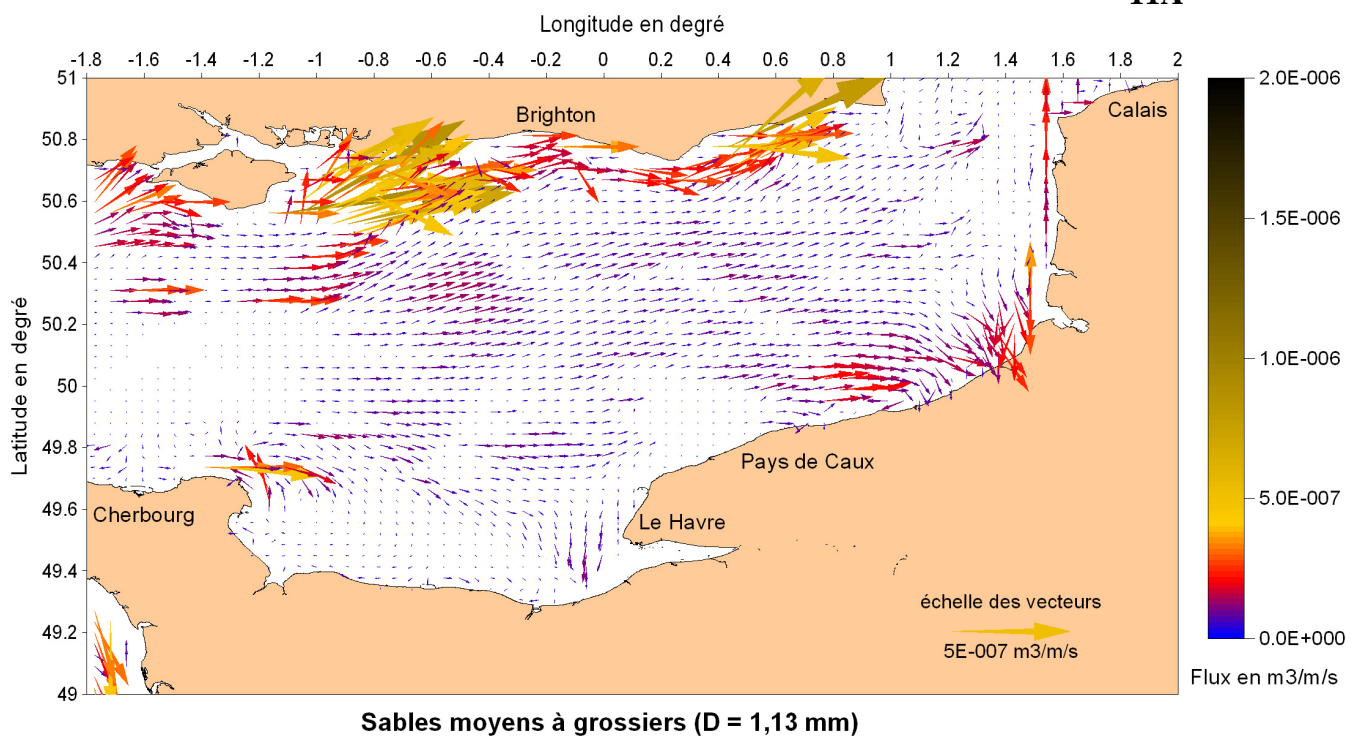
3.2.2 Marée réelle et houle réelle

La houle va augmenter de manière significative la tension de frottement exercée au fond (figure 4B) et va donc jouer un rôle important dans le processus de transport sédimentaire. Les houles d'origine océanique sont orientées de l'Ouest vers l'Est. A ces houles peuvent se

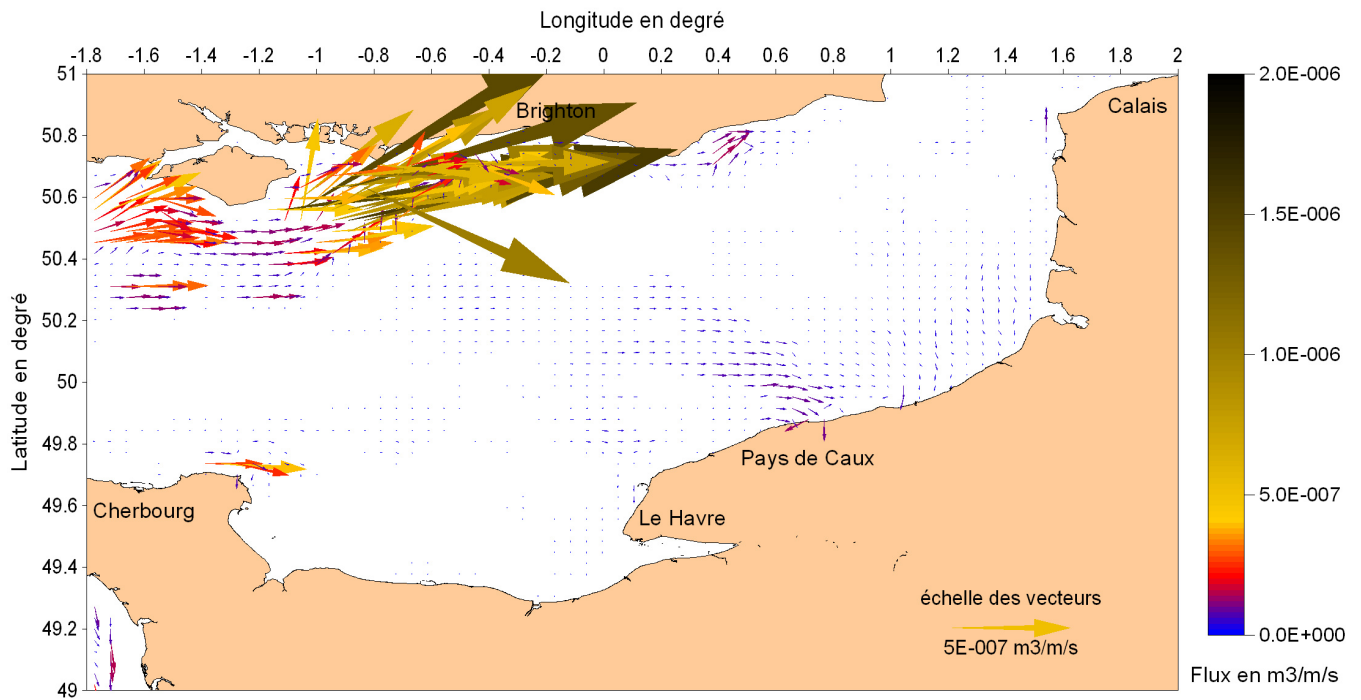
superposer les vagues générées localement par l'action du vent. L'action de la houle se fait principalement sentir par petits fonds, entraînant la remise en suspension des sédiments et leur déplacement sur le fond. Au-delà de quelques mètres de profondeur, l'action des courants de marée devient prépondérante. Toutefois, lors d'épisodes de forte agitation (tempêtes), les houles peuvent agir sur le fond à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Les vents dominants provenant essentiellement de secteur Ouest en Manche, c'est surtout dans les zones exposées, ouvertes vers l'Ouest, que l'action des houles se fera le plus sentir. Les figures 11A à 11D montrent les flux de transport obtenus lorsque la houle est prise en compte.



11A

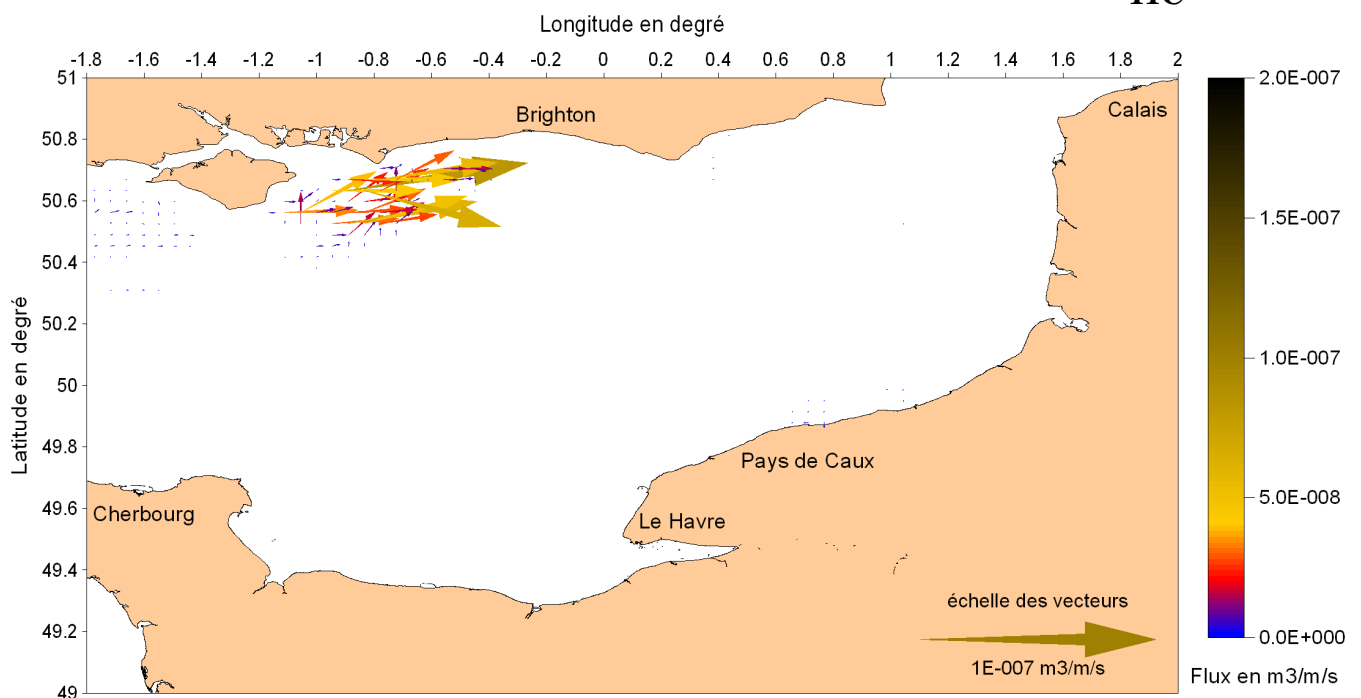


11B



Graviers (D = 16 mm)

11C



Galets (D = 100 mm)

11D

Figure 11 : Flux résiduels des différentes classes granulométriques avec prise en compte de la houle et du fond sédimentaire réaliste en Manche.

11A : sables très fins à fins ; 11B : sables moyens à grossiers ; 11C : graviers ; 11D : galets.

Les directions de transport décrites précédemment dans le cas sans houle ne sont globalement pas modifiées. Par contre, l'intensité des flux va être notablement augmentée quelle que soit la classe granulométrique. Le modèle prédit notamment un transport de graviers et de galets autour de l'Île de Wight et de graviers le long de la côte du Pays de Caux qui n'apparaît pas

lorsque la houle n'est pas prise en compte. L'importance de ces flux est accrue par la grande disponibilité de ces classes granulométriques sur le fond. La carte des contraintes maximales sur le fond (figure 4B) montre effectivement que l'effet de la houle est important dans ces deux zones.

Il est intéressant de noter que la zone de convergence des transports, située entre la baie de Somme et la côte anglaise, existe toujours mais se trouve légèrement décalée vers le Nord. Ceci reflète sans doute la dominance des houles d'Ouest qui, superposées aux courants de flot, renforce le transport vers l'Est.

Les mesures de flux sont très rares et très difficiles à obtenir. Il est donc difficile et délicat de valider le modèle en terme d'intensité des flux. Toutefois, des estimations du taux de transport par charriage, utilisant des marquages radioactifs, sont disponibles sur trois points situés le long de la côte française de part et d'autre du Pas-de-Calais. Ces estimations sont reprises dans Grochowski *et al.* (1993). Les valeurs de ces flux, qui correspondent à des sédiments ayant une granulométrie comprise entre 0,2 et 0,3 mm, varient entre $3,7 \cdot 10^{-7}$ et $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Les flux estimés dans le modèle pour la granulométrie la plus fine (0,13 mm) à cet endroit sont compris entre $5 \cdot 10^{-8}$ et $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et sont donc comparables aux observations *in situ*.

4. Conclusions

Le schéma de transport des sédiments en Manche Est (figure 12) montre :

- un transport orienté vers l'Est entre le Cotentin et la baie de Somme,
- un transport de sables (très fins à grossiers) de la pointe de Barfleur vers l'embouchure de la Seine,
- un transport orienté vers l'Ouest-Sud-Ouest entre le Pas-de-Calais et la baie de Somme, à l'exception de la frange côtière française où le transport se fait préférentiellement vers le Nord,
- une zone de convergence du transport, située entre la baie de Somme et la côte anglaise, dont la position exacte fluctue en fonction du régime de houle.

La figure 12 représente l'amplitude des flux résiduels pour l'ensemble des classes granulométriques (sables très fins à fins, sables moyen à grossiers, graviers, galets). C'est une synthèse des résultats calculés dans des conditions réalistes (couverture sédimentaire observée, marée réelle et houle réelle) et présentés précédemment pour chacune des classes. Les flèches blanches représentent les principaux axes de cheminement des grains sans donner d'indication sur leur intensité.

Une simulation théorique (non illustrée dans ce document) a été réalisée pour tester l'effet de conditions extrêmes sur la couverture sédimentaire réaliste : tout au long de l'année, un coefficient de marée de 110 a été associé à une houle d'Ouest de 5,50 m de hauteur significative en Manche Centrale. Le schéma de transport général reste inchangé, seule l'amplitude des flux est logiquement augmentée. Cette simulation prouve le rôle majeur joué par les événements extrêmes dans la mise en place de la circulation particulière à l'échelle de la Manche.

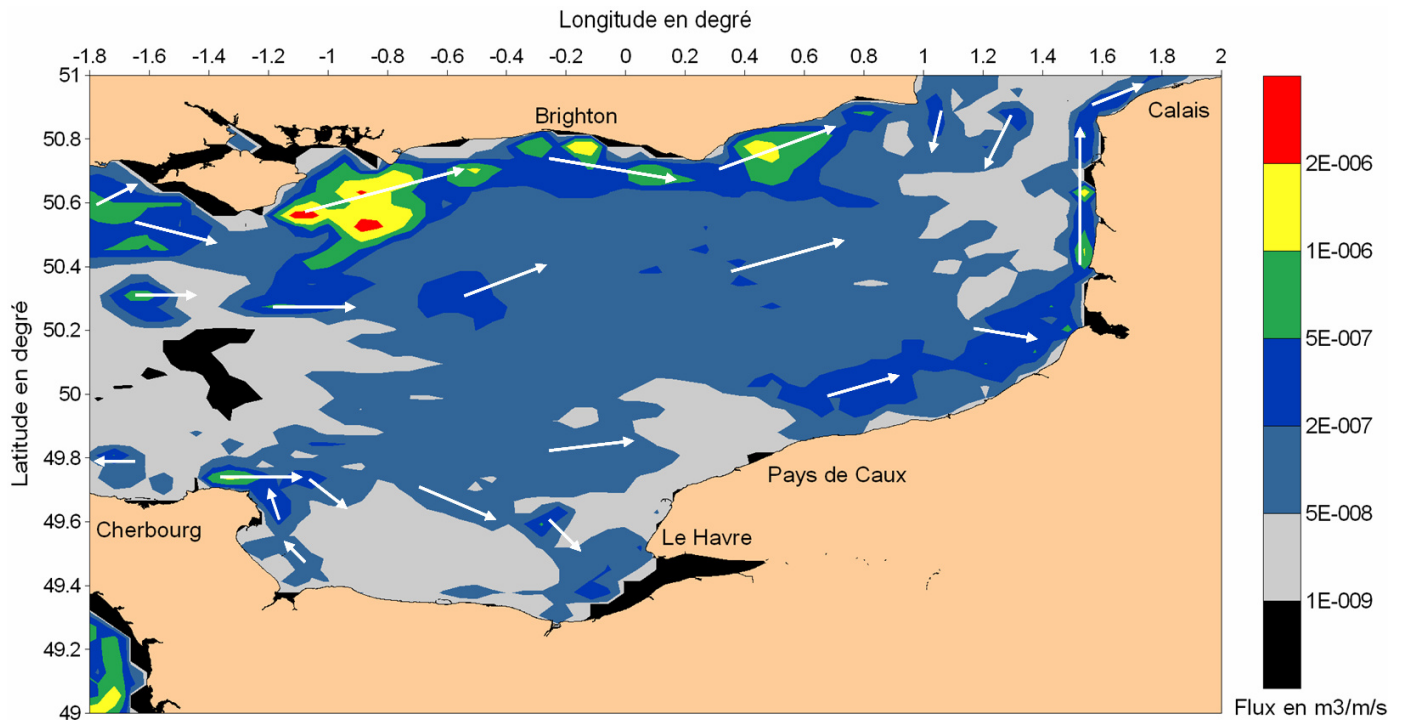


Figure 12 : Synthèse du transport total des sédiments en Manche pendant un an (année 2007), toutes classes granulométriques confondues.
(Les flèches ne représentent que le sens du transport, non son intensité.)

Les directions de circulation sont principalement gouvernées par les courants de marée. La houle joue un rôle en augmentant de manière très importante la contrainte de frottement sur le fond et donc la potentialité de mise en mouvement des grains. La prise en compte de la houle accentue les transports notamment près des côtes, voire permet de mettre en mouvement les classes granulométriques les plus grossières (graviers et galets) à certains endroits (Île de Wight, Pays de Caux). Sur la côte française, le transport dans la zone comprise entre Saint-Valéry-en-Caux et la baie de Somme semble être relativement important et principalement dû à l'effet des houles. Il concerne les sables fins jusqu'aux sables grossiers. Des flux importants sont également observés à l'embouchure de la Seine pour les matériaux les plus fins. Cet effet est en partie lié au fait que les sédiments fins sont dominants à cet endroit et donc que leur disponibilité est grande. Il est toutefois important de rappeler que dans cette étude les apports des fleuves ne sont pas pris en compte, ni en terme hydraulique, ni en terme d'apport de matériaux fins.

A cette échelle, la Manche Est ne présente pas de zones en franche érosion ou en franche accrétion. Malgré des contraintes importantes (forts courants de marée et fortes houles) qui engendrent un transport particulier, il s'établit un équilibre dynamique stable sur tout le domaine. Toutes modifications du stock sédimentaire risquent donc de perturber le schéma de circulation local avec comme conséquence possible l'apparition de zones en déficit. Toutefois, du fait de son faible degré de résolution spatiale, cette étude ne permet pas de déterminer ces zones à risques. Pour cela il serait nécessaire d'affiner à la fois le maillage du modèle de transport, la résolution du modèle numérique de terrain bathymétrique et la caractérisation des faciès sédimentaires. A l'heure actuelle, cette méthode de modélisation est applicable et pertinente pour des zones plus restreintes que l'ensemble de la Manche Est.

Bibliographie citée

- Ardhuin F., Marié L., Rascle N., Forget P., Roland A. Observation and estimation of Lagrangian, Stokes and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface, *Journal of Physical Oceanography* (submitted)
- Bailly du Bois, P., 2000. Représentation continue des classes granulométriques des sédiments superficiels de la Manche à partir des travaux de C. Larsonneur, 1971. IPSN/LERFA, Rapport IPSN/DPRE/SERNAT n°2000-23, 13 p.
- Blanpain, O. Dynamique sédimentaire multiclassée : de l'étude des processus à la modélisation en Manche, Thèse de doctorat de l'Université de Rouen, (in prep).
- Cugier, P., 2000. Développement d'un modèle numérique multicouche hétérométrique pour la simulation du transport sédimentaire en Manche ; caractérisation des principaux processus. Rapport scientifique, Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire/ Département de Protection de l'Environnement, Rapport DPRE/SERNAT/2000-24, 97 p.
- Grochowski N. T. L., Collins M. B., Boxall S. R., Salomon J. C., Breton M., Lafite R., 1993. Sediment transport pathways in the Eastern English Channel. *Oceanologica Acta*, vol. 16, n° 5-6, 531-537.
- Larsonneur C., 1971. Manche centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse de doctorat d'état, Université de Caen, 394 p.
- Lazure P., Dumas F., 2008. An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, 31, 233-250.
- Lefevre F., Yard F.H., Le Provost C., Schrama E.J.O., 2002. FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19 (9), 1345-1356.
- Soulsby R. L., Hamm L., Klopman G., Myrhaug D., Simons R. R., Thomas G. P., 1993. Wave current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, n°21, 41-69.
- Vaslet D., Larsonneur C., Auffret J. P., 1978. Les sédiments superficiels de la Manche 1/500 000. Carte géologique de la marge continentale Française. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Centre National pour l'Exploitation des Océans.
- Van Rijn L. C., 1984. Sediment transport, Part 1: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.110, n°10, pp. 1431 – 1456.
- Wu W, Wang S. S. Y., Jia Y., 2000. Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38 (6), 427-434.

Liste des figures

Figure 1 : Emprise géographique du modèle Manche et résolution du maillage.

Figure 2 : Comparaison de la marée simulée et mesurée en 4 points de la Manche d'Est en Ouest [origine des données : BODC (British Oceanographic Data Centre) et SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales)].

Figure 3 : Comparaison entre vitesse de courant calculée et mesurée au large de Dieppe du 31 juillet au 4 août 2007 [origine des données : Université de Rouen, campagne MOSAG07].

Figure 4 : Contrainte maximale calculée au fond pour le courant de marée sans prise en compte de la houle (4A) et avec effet de la houle (4B).

Figure 5 : Illustration du phénomène de masquage/exposition.

Figure 6 : Carte de la distribution sédimentaire en Manche (d'après Vaslet *et al.*, 1978).

Figure 7 : Proportion de chacune des classes granulométriques considérées.

Figure 8 : Emboîtement du modèle Manche dans le modèle de grande emprise.

Figure 9 : Flux résiduels « potentiels » pour les différentes granulométries considérées séparément et réparties de manière homogène sur la Manche.

A : sables très fins à fins ; B : sables moyens et grossiers ; C : graviers.

Figure 10 : Flux résiduels des différentes granulométries sans prise en compte de la houle dans le cas d'un fond sédimentaire réaliste en Manche.

A : sables très fins à fins ; B : sables moyens et grossiers ; C : graviers.

Figure 11 : Flux résiduels des différentes granulométries avec prise en compte de la houle et avec fond sédimentaire réaliste en Manche.

A : sables très fins à fins ; B : sables moyens et grossiers ; C : graviers ; D : galets.

Figure 12 : Synthèse du transport total des sédiments en Manche pendant un an (année 2007), toutes classes granulométriques confondues.

(Les flèches ne représentent que le sens du transport, non son intensité.)