

Contraintes de fond dans le Golfe du Lion générées par les houles et les courants

François DUFOIS^{1,2}, Pierre GARREAU¹, Pierre Le HIR¹

¹IFREMER, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

²IRSN, Centre Ifremer, BP 330, 83507 La Seyne sur Mer, France

Résumé

Un jeu de données modélisées de l'ensemble des paramètres de houle et de courant pour l'année 2001 est utilisé afin de discuter de manière statistique de leur contribution au potentiel érosif de la dynamique du plateau du Golfe du Lion. Les schémas de circulation de fond en réponse aux principaux forçages sont également présentés. Une méthode de calcul des contraintes de peau à partir de la contrainte de fond totale est proposée et comparée à une méthode de détermination directe.

Abstract

Simulated data of both currents and waves for the entire year 2001 are used in order to assess their statistical contribution to the erodability power over the shelf of the Gulf of Lion. Bottom circulation patterns are also analysed in response to wind forcing. A method to compute the skin friction component of the total bottom shear stress is then proposed and compared with a classical method.

Mots Clés : houles, courants, contraintes de fond, contraintes de peau, Golfe du Lion, MARS-3D

1. Introduction

La modélisation couplée à l'analyse de données in-situ a récemment amélioré la compréhension des importantes variabilités spatiales et temporelles de la circulation dans le Golfe du Lion (Estournel et coll.² ; André et coll.¹). La circulation de fond a cependant été moins étudiée que la circulation de surface ou le transport moyen (intégré sur la verticale). Du fait de son importance du point de vue de la dynamique sédimentaire, une analyse de ses caractéristiques par une approche de modélisation est présentée ici.

Compte tenu de la faible dynamique sur le plateau, la connaissance des champs de houle et des tensions de fond associées est également nécessaire à la compréhension des phénomènes de remise en suspension.

L'étude présentée ici étant destinée à caractériser les conditions de remaniement des sédiments, ce sont les contraintes de peau qui seront considérées, alors que classiquement ce sont les contraintes globales qui sont prises en compte pour ralentir les courants ou amortir les houles. Une méthode de calcul de la contrainte de peau à partir de la contrainte totale est présentée et

discutée. Elle servira à l'analyse statistique des contraintes de fond générées conjointement par la houle et par les courants.

2. Hydrodynamique du Golfe du Lion

Du point de vue de l'hydrodynamique, le Golfe du Lion est une région très complexe dans la mesure où plusieurs phénomènes intenses et très variables coexistent. Millot⁹ a présenté les différents processus de la circulation du Golfe du Lion. Il a distingué la circulation générale, les courants de densité (dont les plongées d'eau froide sur le plateau), les up- et down-welling, et les courants d'inertie induits par le vent. Si la circulation générale peut influencer la circulation sur le plateau, celle-ci est malgré tout essentiellement forcée par le vent et par les effets de flottabilité des eaux issues du Rhône. Les épisodes de Mistral et Tramontane, intenses et fréquents, entraînent les eaux superficielles vers le large qui sont remplacées lors de remontées d'eaux plus profondes (up-welling), tandis que les vents d'est à sud-est, moins fréquents, génèrent une accumulation d'eau à la côte et une plongée des eaux de surface (down-welling).

3. Description du modèle couplé

L'hydrodynamique est modélisée avec le code de calcul aux différences finies MARS-3D (3D hydrodynamical Model for Applications at Regional Scale), développé à l'IFREMER (Lazure et Dumas⁷) et basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Le modèle appliqué au Golfe du Lion a une résolution de 1.1 km sur l'horizontale et 30 niveaux verticaux (en coordonnées σ). Il est forcé par plusieurs paramètres tels que les conditions atmosphériques (vent, flux solaire, etc. fournis par Météo-France), les débits des rivières, ainsi que par une élévation de surface libre et des flux de sel, de quantité de mouvement et de température aux frontières ouvertes. Le modèle est ainsi capable de reproduire les différents processus hydrodynamiques décrits précédemment (Garnier et coll.³ ; André et coll.¹).

Les champs de vagues sont modélisés en méditerranée occidentale à l'aide du code de calcul de troisième génération WAVEWATCH-III (Tolman¹⁷) mis à disposition par Fabrice ARDHUIN du SHOM et forcé par les champs de vent ALADIN et ARPEGE de Météo-France. La grille de calcul est à 0.1° de résolution (soit environ 1.1 km en latitude).

4. Méthode de calcul des tensions de fond

Du point de vue de la dynamique des sédiments il convient de distinguer la contrainte totale de la contrainte de peau, qui est celle à prendre en compte pour la mise en mouvement des particules. Les rugosités de forme, qui influencent l'écoulement, sont également susceptibles de modifier de manière non négligeable les contraintes de peau et l'extrapolation simple de la vitesse sous l'hypothèse d'un profil de vitesse logarithmique en prenant une rugosité de peau dépendante

du diamètre du grain ne permet pas une bonne approximation des contraintes en présence de rides.

Nous proposons ici de calculer ces contraintes en utilisant le modèle de couche limite de fond de Smith et McLean¹³ et en prenant en compte l'existence d'une rugosité de forme liée à la présence de rides de vague. Le calcul de la tension de fond se fait de manière itérative jusqu'à convergence de la solution. La boucle de calcul décrite en annexe est implémentée dans le modèle MARS-3D, et comprend 4 étapes, activées à chaque pas de temps du modèle hydrodynamique ($\Delta t \sim 200s$):

- 1/ Calcul de la macro-rugosité résultant des grains, des rides et du transport des sédiments par charriage.
- 2/ Calcul de la contrainte de cisaillement totale (du point de vue de l'hydrodynamique) en présence de vagues et de courant.
- 3/ Calcul de la tension de peau à partir de la contrainte totale.
- 4/ Prédiction des rides, lorsque la contrainte de peau dépasse le seuil de mise en mouvement.

Pour l'application au Golfe du Lion, on choisit de considérer que le sédiment est non-cohésif dans la bande côtière jusqu'à une profondeur de 30m et que les sables fins qui l'occupent (en dehors de la zone de déferlement) ont un diamètre moyen de $100\mu m$ conformément aux observations (Got et Aloisi⁴). La rugosité z_0 pour les sédiments cohésifs qui occupent le reste du plateau est fixée à 0.1mm.

4.1. Comparaison des méthodes de calcul

Les tensions de peau calculées avec la méthode décrite précédemment ont été comparées aux tensions déterminées en considérant un z_0 « moyen » fixé à 0.1mm, sur une période de l'année 2001 (figure 1). Dans la bande littorale (profondeur de 10m) les tensions de peau générées par le courant apparaissent peu sensibles à la présence ou non de rides. En ce qui concerne les tensions liées aux vagues, on constate que la présence de rides a tendance à augmenter les contraintes pendant les périodes faiblement énergétiques. Durant les périodes les plus énergétiques (figure 1, zone encadrée) le « sheet-flow » induit, qui détruit les rides, provoque une diminution importante des contraintes de vagues. Cette diminution est aussi perceptible mais de manière plus faible sur les contraintes de peau lorsque le « sheet-flow » intervient pendant des épisodes de courant important.

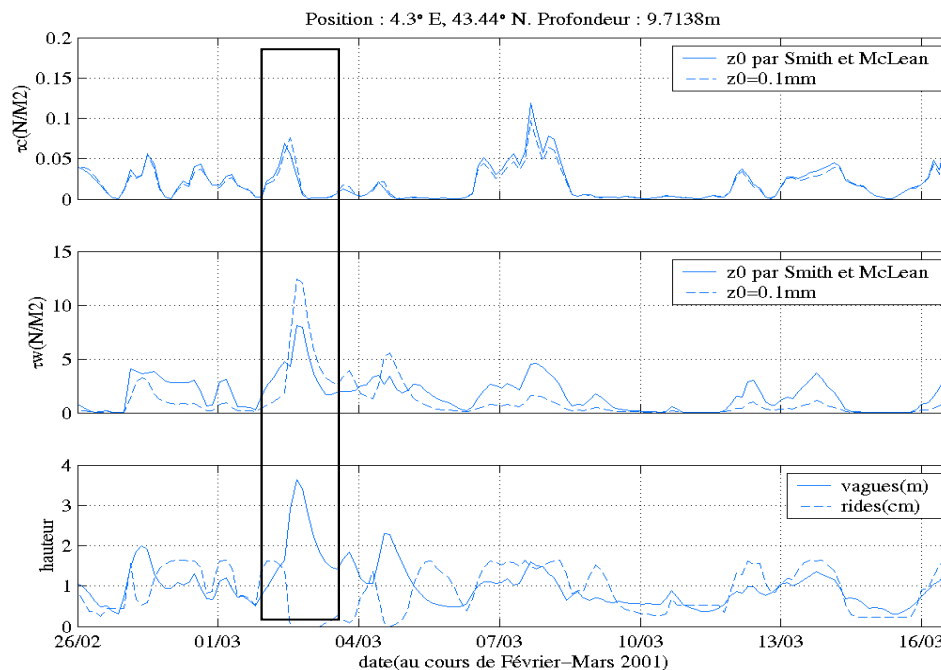


Figure 1 : contraintes de cisaillement de peau liées au courant en haut et aux vagues au milieu, calculées avec un z_0 constant en pointillés et avec le modèle de Smith et McLean en trait plein. En bas, H_s (m) en trait plein et hauteur des rides en pointillés.

Cette méthode permet ainsi d'intégrer les modifications de la micro topographie de fond et leur influence sur l'écoulement à l'échelle du grain.

Les résultats présentés ci après sont issus des calculs basés sur le modèle de Smith et McLean¹³. Notons que les résultats sont sensiblement identiques dans le cas du courant seul, que l'influence des rides sur la contrainte de peau soit prise en compte ou non.

5. Contraintes de fond sur le plateau

5.1. Caractéristiques de la circulation sur le fond

Des simulations académiques ont été réalisées pour comparer la seule influence de la direction du vent, en forçant le modèle hydrodynamique pendant une semaine avec un vent constant et homogène en force (20 m/s) et en direction (provenance est ou nord-ouest) sur l'ensemble du domaine (figure 2). Ces simulations mettent en évidence deux types de circulation de fond. Dans le cas du vent d'est un jet côtier se met en place rapidement sur toute la colonne d'eau et les vitesses sont globalement orientées vers l'ouest/sud-ouest, tandis que le vent de nord-ouest génère une circulation de fond vers le nord, qui s'oppose à la circulation de surface. Les frottements de fond sont supérieurs dans les cas des vents d'est à la fois à la côte et en bordure du talus.

Nous formulons l’hypothèse que ces deux schémas de circulation seront ceux rencontrés lorsque les vitesses des couches de fond auront un pouvoir érosif sur le plateau.

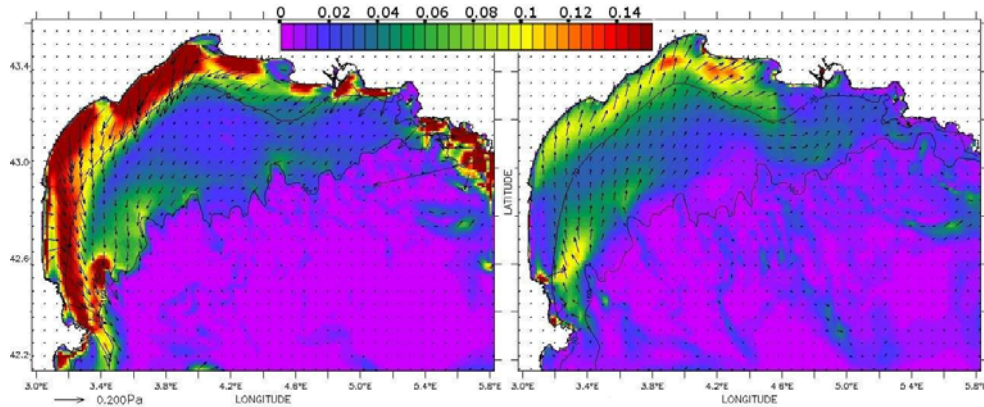


Figure 2 : intensité et direction des contraintes de cisaillement moyennées sur une période de 6 jours en N/m^2 . A gauche, vent d’est de 20 m/s ; à droite, vent de nord ouest de 20 m/s.

5.2. Analyse statistique des contraintes de fond liées au courant

L’analyse des sorties hydrodynamiques du modèle sur l’année 2001 complète a permis de mieux comprendre les schémas de circulation de fond sur le plateau (1 sortie toutes les 3 heures). Cette année apparaît être représentative du point de vue du forçage par le vent (figure 3). La circulation générale ainsi que les plongées d’eau dense (peu intenses et peu fréquentes en 2001) sont prises en compte dans la modélisation, mais leur influence sur les contraintes de fond n’a pas été mise en évidence

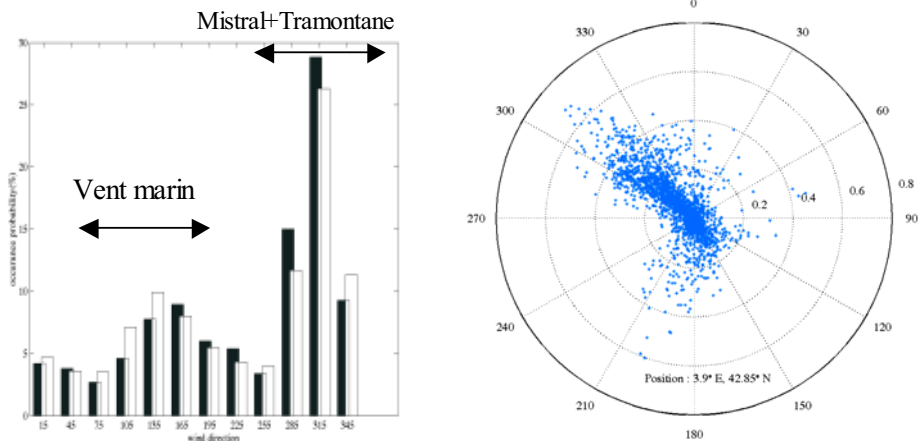


Figure 3 : à gauche : fréquences d’apparition des vents en fonction de leur direction pour l’année 2001 (en noir) et pour les années 1994 à 2001 (en blanc) à la position $43.4^{\circ}N, 4.3^{\circ}E$. A droite : Intensité des tensions de vents en surface (N/m^2) en fonction de leur direction (provenance).

Afin de déterminer l'origine des frottements sur le fond en réponse au forçage de vent, une analyse des tensions de fond « relatives au grain » a été réalisée en discriminant les vents d'origine continentale et les vents d'origine marine.

La probabilité que les tensions de fond importantes ($>0.04\text{N/m}^2$) soient liées à l'un ou l'autre de ces deux secteurs de vent a été calculée (figure 4). Le seuil de 0.04N/m^2 correspond à une valeur moyenne du seuil de mise en suspension de la couche superficielle des sédiments fins du plateau du Golfe du Lion (Schaff et coll.¹² ; Schaff¹¹). Il apparaît nettement que les zones du plateau externe (à proximité du talus) sont principalement soumises à des courants forts durant les épisodes de vent marin (zones de couleur claire). Les probabilités d'occurrence sont toutefois assez faibles (de l'ordre de 0.1%). Plus à la côte on note que les vents marins « frottent » sur une bande un peu plus large, mais que dans l'ensemble les deux types de vent sont susceptibles de mobiliser les couches de fond. Les zones d'up-welling décrites par Millot⁹, notamment en face du petit Rhône, sont cependant plus sensibles au Mistral et/ou à la Tramontane (zones noires) avec des probabilités d'occurrence de l'ordre de 1%.

Les zones marquées d'un cercle vert sur la figure 4 sont examinées plus en détail. En général sur le plateau, les zones soumises à des contraintes sensiblement importantes ont leurs principaux courants parallèles aux isobathes et bien polarisés (figure 5). L'analyse sur une année complète confirme l'hypothèse précédemment décrite de deux types de schéma de circulation bien distincts et très dépendants du vent local. En effet lorsque la circulation de fond est importante la direction du courant est directement liée à l'origine du vent. Les tensions liées aux vent marins (en rouge, figure 5) et celles liées aux vent continentaux (en bleu) sont opposées en direction. Au niveau de la bordure externe du plateau, on constate conformément à l'analyse précédente que les tensions maximums, orientées vers le sud-ouest sont générées par des vents d'est pourtant bien plus faibles en intensité et bien moins fréquents (figure 4) que les vents d'origine continentale. Les deux autres sites plus à la côte présentent une certaine symétrie, et les tensions importantes sont observées pour différentes directions de vent. Il n'existe en outre pas de relation entre la seule intensité du vent et l'intensité de la circulation de fond ; des vents d'origine marine d'intensité plus faible sont susceptibles d'engendrer des tensions au moins aussi importantes que les vents continentaux.

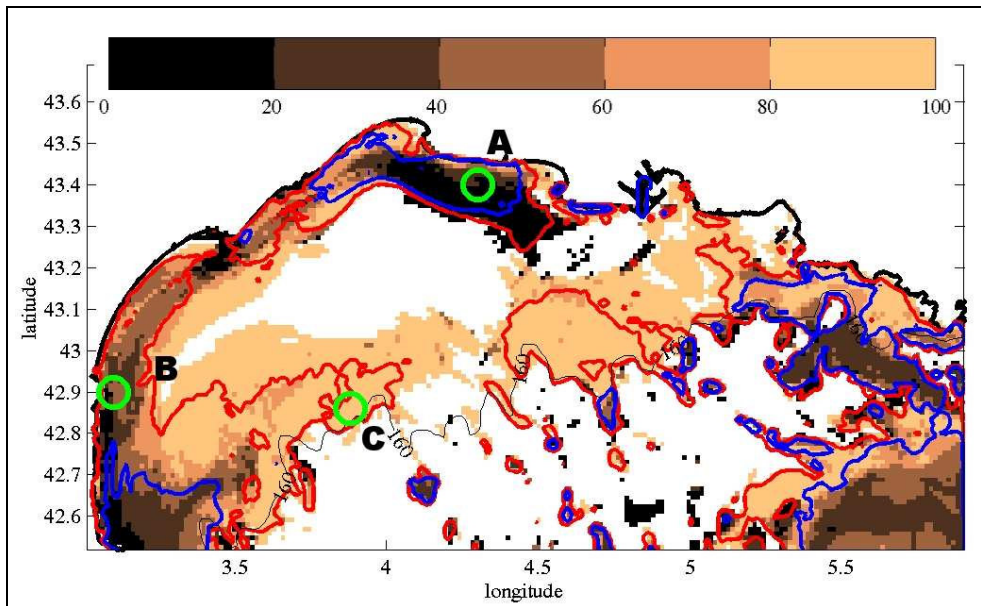
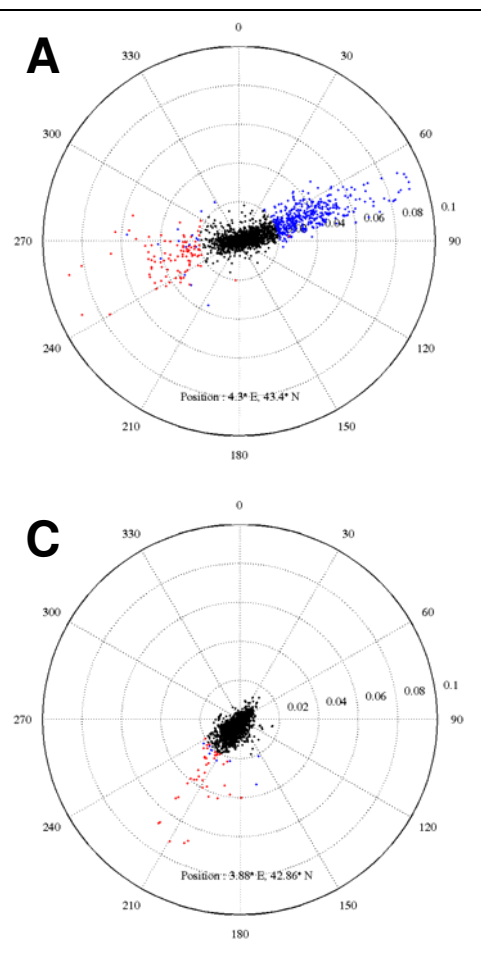


Figure 4 : origine des contraintes générées par les courants. Probabilité (%) que les contraintes de cisaillement supérieures à 0.04 N/m² soient liées à des vents d'origine marine (direction comprise entre 45 et 225°). En trait bleu iso probabilité $\tau_c > 0.04$ N/m² égale à 1%, en rouge égale à 0.2%, en blanc probabilité nulle. L'isobathe 160m (bordure du plateau) est tracée.

Figure 5 : intensité des contraintes de fond (N/m²) en fonction de leur direction (vers où elles portent) en différents points du plateau (cf. cercle vert figure 4). A : face Petit Rhône (29m), B : face Leucate (31m), C : plateau externe (100m). En rouge, vents marins, en bleu vents continentaux, et en noir contraintes inférieures à 0.02N/m². Tous les événements (tri-horaire) de l'année 2001 sont représentés



5.3. Statistiques sur les tensions de vagues

L'analyse des contraintes liées aux vagues pour l'année 2001 montre une dominance de l'effet des vagues sur l'effet des courants sur une majeure partie du plateau lorsque les tensions sont importantes ($> 0.04 \text{ N/m}^2$) (figure 6). On constate cependant que le plateau externe est plus influencé par les courants (zone de profondeurs comprises entre 100 et 160 m). Au niveau de l'isobathe 100 m les houles sont susceptibles d'agir, mais de manière très exceptionnelle (figure 7). Des tensions de l'ordre de 0.04 N/m^2 peuvent être rencontrées durant les tempêtes (hauteur significative des vagues de l'ordre de 5 m et période moyenne d'environ 12 s).

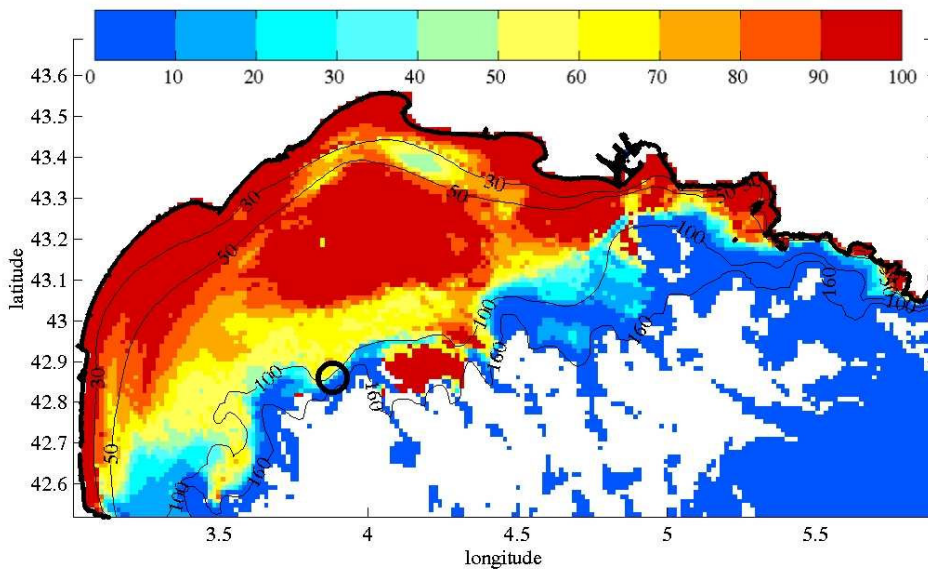


Figure 6 : probabilité que la contrainte des vagues soit supérieure à celle du courant lorsque la contrainte de peau totale est supérieure à 0.04 N/m^2 ($\tau_w > \tau_c$ et $\tau_{cw} > 0.04 \text{ N/m}^2$). Les isobathes 30, 50, 100 et 160 m sont tracées.

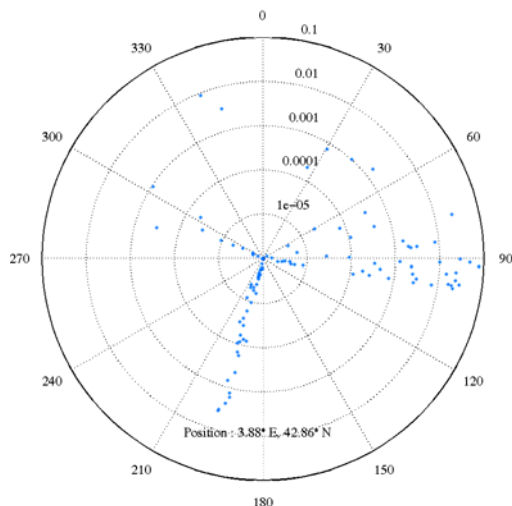


Figure 7 : intensité des contraintes de fonds (N/m^2) en fonction de la direction moyenne (provenance) de la houle en bordure de plateau à 100m de fond (cf. cercle noir figure 6). Echelle logarithmique.

6. Conclusion

Une méthode de calcul des contraintes de peau en prenant en compte les évolutions des rides liées aux vagues a été mise en place dans le modèle et a constitué la base de l'analyse statistique.

Celle-ci a permis de mettre en évidence les schémas de circulation de fond et l'importance des vents d'origine marine qui, ajoutés aux houles créées lors de ces mêmes tempêtes, offrent simultanément une capacité d'érosion et de transport sur une grande partie du plateau. Les vents continentaux montrent quant à eux un potentiel érosif exclusivement en zone côtière et préférentiellement dans les secteurs d'up-welling. Ces vents sont cependant le plus souvent associés à des houles de faibles amplitudes et ne constitueront vraisemblablement pas le forçage majeur du transport de particules sur le plateau.

7. Annexe : méthode de calcul itératif de la contrainte de cisaillement sur le fond

1/ Calcul de la rugosité physique k_s , qui permet de déterminer la rugosité z_0 pour un régime turbulent rugueux ($z_0=k_s/30$).

k_s est pris comme étant le maximum des trois rugosités physiques, qui sont :

$$\text{-la rugosité de grain : } k_{sg}=2.5D \quad (1)$$

$$\text{-la rugosité de forme (Grant et Madsen⁵) : } k_{sd}=27.7H^2/\lambda \quad (2)$$

si H et λ sont connus sinon initialisée à 0.

-la rugosité liée au charriage (Wiberg et Rubin¹⁹) :

$$k_{sc} = 1.1424D \frac{\tau_{sf}}{\tau_c + 0.2\tau_{sf}} \quad \text{si } \tau_{sf} > \tau_c \quad (3)$$

où D est le diamètre moyen des grains, H la hauteur des rides, λ leur longueur d'onde, τ_{sf} (initialisée à 0) est la contrainte de cisaillement de peau (« skin-friction ») dont le calcul est précisé plus tard, et τ_c est la contrainte critique de mise en mouvement.

2/ Calcul de la contrainte de cisaillement totale (du point de vue de l'hydrodynamique) en présence de vagues (indice w) et de courant (indice c).

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 \quad \text{avec } u_{*c} = \frac{\kappa u(z)}{\ln(z/z_0)} \quad (4)$$

$$\tau_w = 0.5 \rho f_w U_b^2 \quad (5)$$

$$\text{avec (Swart, 1974)¹⁶ } \quad \begin{aligned} f_w &= 0.3 \text{ si } A/k_s < 0.3, \\ &\text{et au-delà : } f_w = 0.00251 \exp(5.21(A/k_s)^{-0.19}) \end{aligned} \quad (6)$$

où ρ est la densité de l'eau, U_b est la vitesse orbitale des houles au fond, z est la hauteur de la première couche au-dessus du fond, $u(z)$ la vitesse associée, κ la constante de Von Karman (0.4) et

A est la demi-excursion orbitale près du fond ($A = \frac{U_b T}{2\pi}$, T étant la période des vagues).

La formulation de Soulsby¹⁴ est utilisée pour prendre en compte les interactions non linéaires houle-courant

$$\tau_m = \tau_c [1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_w + \tau_c} \right)^{3.2}] \text{ et} \quad (7)$$

$$\tau_{cw} = [(\tau_m + \tau_w |\cos \varphi|)^2 + (\tau_w \sin \varphi)^2]^{0.5} \quad (8)$$

où τ_m représente la tension moyenne dans la direction du courant, τ_{cw} est la contrainte maximum générée pendant une période de vague et φ est l'angle entre la direction du courant et celle des vagues.

3/ Calcul de la tension de fond moyenne relative au grain (Smith et McLean¹³),

$$\tau_{sfm} = \frac{\tau_{cw}}{1 + \frac{1}{2\kappa^2} C_D \frac{H}{\lambda} [\ln a(\lambda/z_{0s})^{0.8}]^2} \quad (9)$$

avec $z_{0s} = \max(k_{sg}, k_{sc})/30$, $C_D = 0.21$ sous l'hypothèse d'un écoulement « séparé » (présence d'un tourbillon en aval de la crête) au-dessus des rides et $a = 0.3$ selon Li⁸.

Au sommet des crêtes le maximum est atteint, et estimé à (Harris et Wiberg⁶)

$$\tau_{sf} = \tau_{sfm} (1 + 8H/\lambda) \quad (10)$$

Notons que Harris et Wiberg⁶ ont adopté cette expression de la contrainte de peau sur une ride, mais qu'en tout état de cause le modèle de couche limite de Smith et McLean¹³ ne prend pas en compte l'effet de cisaillement lié aux vagues.

4/ Prédiction des rides. On fait l'hypothèse que les rides ne se forment que dans un environnement non-cohésif. Mitchener et Torfs¹⁰ fixent le seuil de cohésion des sédiments à 30% de vase. Les observations de Van der Wal et coll.¹⁸ confirment cette hypothèse. Ils ont en effet observé des variations importantes de la rugosité pour des pourcentages de vase inférieurs à 30% alors que celle-ci se stabilise dès que l'on dépasse ce seuil. D'autre part, compte tenu de la dynamique du plateau et du rôle prépondérant des houles dans le cas où le seuil critique d'érosion est atteint (notamment dans les zones sableuses, cf. §5), on fait ici abstraction des rides liées au courant.

La formulation de Soulsby et Whitehouse¹⁵ est utilisée pour la prédiction des rides dues aux vagues:

Si $\tau_{sf} < \tau_c$, H et λ n'évoluent pas

$$\text{Si } \tau_{sf} > \tau_c, \quad \lambda = \frac{A}{1 + 0.00187 A/D (1 - \exp\{- (0.0002 A/D)^{1.5}\})} \quad (11)$$

$$\text{et } H = 0.15 \lambda [1 - \exp\{- (5000 D/A)^{3.5}\}] \quad (12)$$

Les équations ci-dessus prennent en compte implicitement le « sheet-flow » à travers le paramètre D/A , qui lorsqu'il diminue trop fortement entraîne une destruction des rides.

Si le sédiment est cohésif on calcule les contraintes en réalisant seulement l'étape 2 avec un z_0 fixé.

5/ Test de la convergence sur τ_{sf} . La procédure est répétée depuis l'étape 1/ jusqu'à convergence.

8. Références

- 1 André, G., Garreau, P., Garnier, V., et Fraunié, P. (2005), Modelled variability of the sea surface circulation in the North-western Mediterranean Sea and in the Gulf of Lions. *Ocean Dynamics*, 55, 294-308.
- 2 Estournel, C., Durrieu de Madron, X., Marsaleix, P., Auclair, F., Julliand, C., et Vehil, R. (2003), Observations and modelisation of the winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lions under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *Journal of Geophysical Research*, 108 (C3), 1-18.
- 3 Garnier, V., Garreau, P., et André, G. (2005), Towards a realistic modeling of the Northern Current and the circulation features in the Gulf of Lions. *Journal of Marine Systems*, submitted.
- 4 Got, H. et Aloisi, J.C. (1990), The Holocene sedimentation on the Gulf of Lions margin : a quantitative approach. *Continental Shelf Research*, 10 (9-11), 841-855.
- 5 Grant, W.D. et Madsen, O.S. (1982), Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C1), 469-481.
- 6 Harris, C.K. et Wiberg, P.L. (2001), A two-dimensional, time-dependent model of suspended sediment transport and bed reworking for continental shelves. *Computers & Geosciences*, 27 (6), 675-690.
- 7 Lazure, P. et Dumas, F. (2005), A 3D hydrodynamical model for applications at the region scale (MARS-3D) : Application to the bay of Biscay. *Ocean Modelling*, submitted.
- 8 Li, M.Z. (1994), Direct skin friction measurements and stress partitioning over movable sand ripples. *Journal of Geophysical Research*, 99 (C1), 791-799.
- 9 Millot, C. (1990), The Gulf of Lions' hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 10 (9-11), 885-894.
- 10 Mitchener, H. et Torfs, H. (1996), Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering*, 29, 1-25.
- 11 Schaaf, E. (2003), Dynamique de la matière particulaire à l'interface eau-sédiment en zone côtière : approches expérimentales et modélisation. Thèse de l'université de la Méditerranée. Aix-Marseille II.
- 12 Schaaff, E., Grenz, C., et Pinazo, C. (2002), Erosion of particulate inorganic and organic matter in the Gulf of Lion. *Comptes Rendus Geosciences*, 334 (15), 1071-1077.
- 13 Smith, J.D. et McLean, S.R. (1977), Spatially averaged flow over a wavy surface. *Journal of Geophysical Research*, 82 (12), 1735-1746.
- 14 Soulsby, R.L. (1997), Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. London, Thomas Telford. 249p.
- 15 Soulsby, R.L. et Whitehouse, R.J.S. (2005), Prediction of ripple properties in shelf seas. Mark 2 predictor for time evolution, HR Wallingford Report TR 154.
- 16 Swart, D.H. (1974), Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory publication, 131.
- 17 Tolman, H.L. (2002), User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Tech. report 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.
- 18 van der Wal, D., Herman, P.M.J., et Wielemaker-van den Dool, A. (2005), Characterisation of surface roughness and sediment texture of intertidal flats using ERS SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 98, 96-109.
- 19 Wiberg, P.L. et Rubin, D.M. (1989), Bed roughness produced by saltating sediment. *Journal of Geophysical Research*, 94, 5011-5016.