



## Modélisation 2D de la turbidité en baie de Bourgneuf

Morgan DUSSAUZE<sup>1</sup>, Martin SANCHEZ<sup>1</sup>,  
Laurent BARILLÉ<sup>2</sup>, Benoist HITIER<sup>3</sup>

1. Université de Nantes, UMR 6112 CNRS-LPG, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes, France. [morgan\\_dussauze@yahoo.fr](mailto:morgan_dussauze@yahoo.fr) ; [martin.sanchez@univ-nantes.fr](mailto:martin.sanchez@univ-nantes.fr)
2. Université de Nantes, Mer Molécules Santé UPRES EA 2160, Nantes, France.
3. Ifremer, LERMPL, rue Ile d'Yeu, 44300 Nantes, France.

### Résumé :

Un modèle numérique est mis en place afin de simuler la turbidité en Baie de Bourgneuf (France) à partir d'une couverture schématique de sédiments fins. Trois agents hydrodynamiques sont pris en compte : les courants de marée ; la houle se propageant des grandes profondeurs vers la côte et le clapot généré localement par le vent. Cette modélisation permet de représenter le gradient Nord/Sud de turbidité, et les rapides changements de turbidité qui sont mesurés au niveau de la zone intertidale au cours d'un cycle de marée et cela en accord avec les mesures *in situ* effectuées sur l'estran et les mesures satellites.

### Mots-clés :

Sédiment fin – Marée – Houle – Erosion – Transport en suspension – Turbidité

### Abstract:

A numerical model MIKE2D is implemented in order to simulate the suspended matter concentration in the Bourgneuf Bay. A quite coarse sediment cover and three hydrodynamic agents are taken into account: tidal currents, swell and local wind-generated waves. This model makes it possible to represent the North/South gradient of turbidity observed by satellites and the rapid changes of turbidity measured on the tidal flat.

### 1. Introduction

Située au sud de l'estuaire de la Loire, la baie de Bourgneuf est un bassin ostréicole d'une grande importance. Les performances de croissance des huîtres y sont cependant sensiblement inférieures aux autres sites ostréicoles français notamment en raison de l'état général des concessions (HAURE *et al.*, 2003), de la compétition trophique due aux huîtres sauvages et aux crépidules, et enfin de la turbidité élevée qui altère les fonctions écophysologiques de l'huître et entraîne ainsi une diminution de la qualité de la nourriture ingérée (BARILLÉ *et al.*, 1997). Dans ce contexte, l'axe 3 du projet régional GERRICO (<http://www.gerrico.fr>) vise à développer une méthodologie permettant de prendre en compte, par l'intermédiaire d'une chaîne de modèles couplés,

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire et transports des particules*

l'ensemble d'un espace depuis les bassins versants jusqu'à la mer côtière. Cette méthodologie va permettre, entre autres, d'aboutir à une modélisation de la croissance des huîtres. Une bonne représentation de cette croissance est dépendante d'une modélisation correcte de la turbidité au niveau des zones de cultures. En effet, le modèle fonctionne avec des effets de seuils (filtration de l'huître altérée pour une turbidité supérieure à  $60 \text{ mg L}^{-1}$  ; arrêtée pour une turbidité supérieure à  $192 \text{ mg L}^{-1}$ ). Si plusieurs exercices de modélisation des transports sédimentaires ont été réalisés en Bretagne Sud et au niveau de l'estuaire de la Loire (TESSIER, 2006 ; SANCHEZ, 2008), aucun ne s'est intéressé de manière spécifique à reproduire la turbidité en baie de Bourgneuf. Ainsi, un modèle numérique de transport des sédiments fins en baie de Bourgneuf est mis en place à l'aide du logiciel MIKE 21 afin de reproduire de manière réaliste les agents hydrodynamiques (courants de marée, houle et clapot généré localement) responsables de la remise en suspension du sédiment fin présent en fond de baie.

### **2. Site d'étude**

La Baie de Bourgneuf est une zone séparée de l'océan par l'île de Noirmoutier et par conséquent bien abritée par rapport à la houle (DUSSAUZE *et al.*, 2009). Le panache de la Loire, dont l'estuaire se trouve à environ 15 km au nord, se dirige de manière générale vers le nord et pénètre rarement dans la baie. Cependant, par vent de nord, la Loire l'influence de manière importante. Les sédiments fins en général y sont présents dans des proportions allant de 1 à 50% (GOULEAU, 1968). La baie est caractérisée par la présence de vase qu'on trouve principalement dans sa partie orientale. Dans cette même zone, une accumulation de "crème de vase", facilement mobilisable, couvre une surface d'environ 2000 hectares. Ce sédiment fin est remis en suspension entraînant ainsi une très forte turbidité, notamment au niveau de l'estran, dépassant largement les  $200 \text{ mg L}^{-1}$ .

### **3. Modélisation**

Le logiciel utilisé est MIKE 21 (DHI, 2007a), qui utilise la méthode des volumes finis afin de calculer, en chaque maille du domaine (figure 1), l'élévation de la surface libre et les courants de marée à partir de conditions aux frontières calculées à partir des 100 premières harmoniques de marée. La propagation de la houle est calculée séparément par le module Spectral Waves MIKE 21 (DHI, 2007b) en mode instationnaire. Les phénomènes physiques pris en compte sont la génération par le vent, la dissipation d'énergie par moutonnement, par friction sur le fond et par déferlement, la réfraction et le phénomène de shoaling dus à la variation de profondeur et les interactions vagues/vagues et courants/vagues. Le modèle est forcé aux frontières par des mesures de houle à l'île d'Yeu issues du réseau CANDHIS du CETMEF. Le modèle simule l'érosion et le dépôt de la vase en fond de baie, respectivement selon les formulations de PARTHENIADES (1965) et de KRONE (1986). La couverture est considérée vaseuse

sur tout le fond de baie et les paramètres de seuils critiques des formules de Krone et Partheniades sont pris constants sur le domaine. Le tassement n'est pas pris en compte et la vitesse de chute est fonction de la concentration (floculation selon VAN RIJN (1989) ; vitesse de chute entravée selon RICHARDSON et ZAKI (1954)).

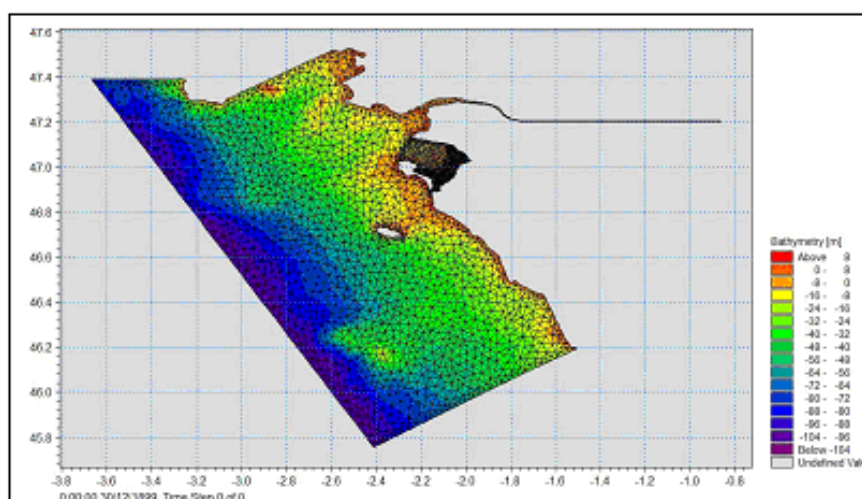


Figure 1. Maillage du domaine sur fond de bathymétrie (mailles de 3 km au large et 300 m au niveau de la Baie de Bourgneuf). La bathymétrie en fond de baie a été raffinée avec un modèle numérique de terrain obtenu à partir d'un levé LIDAR de 2008.

#### 4. Campagnes de mesures et imagerie satellitaire

De nombreuses mesures ont été réalisées et ont permis de calibrer et de valider le modèle. Des ADCP ont été mouillés en 2008 et 2009, ils ont permis de valider la marée et la houle. Des sondes multiparamètres YSI ont été placées en 2005 et 2006 et ont enregistré (entre autres) toutes les heures, et à hauteur de tables (environ 50 cm du fond), la turbidité en deux points de la baie très contrastés (figure 2). Le site de la Couplasse, dans la partie Nord de la baie, est très turbide et les concentrations en matière en suspension sont régulièrement supérieures à  $200 \text{ mg L}^{-1}$ . Au contraire, le site de Graisseloup, dans la partie Sud de la baie, est assez peu turbide et les concentrations dépassent peu souvent les  $50 \text{ mg L}^{-1}$ . La profondeur d'eau varie pour les deux stations entre 2.5 m en mortes-eaux et 5 m en vives-eaux. Des cartes de turbidité en surface ont également été obtenues en 2005 et 2006 à partir d'images SPOT pour lesquelles ont été quantifiées les concentrations en matières en suspensions en utilisant l'*empiric line correction* (SMITH & MILTON, 1999) afin de transformer les comptes numériques en réflectance ; puis une relation logarithmique (FROIDEFOND *et al.*, 2003) a été appliquée pour passer de la réflectance à la valeur de turbidité.

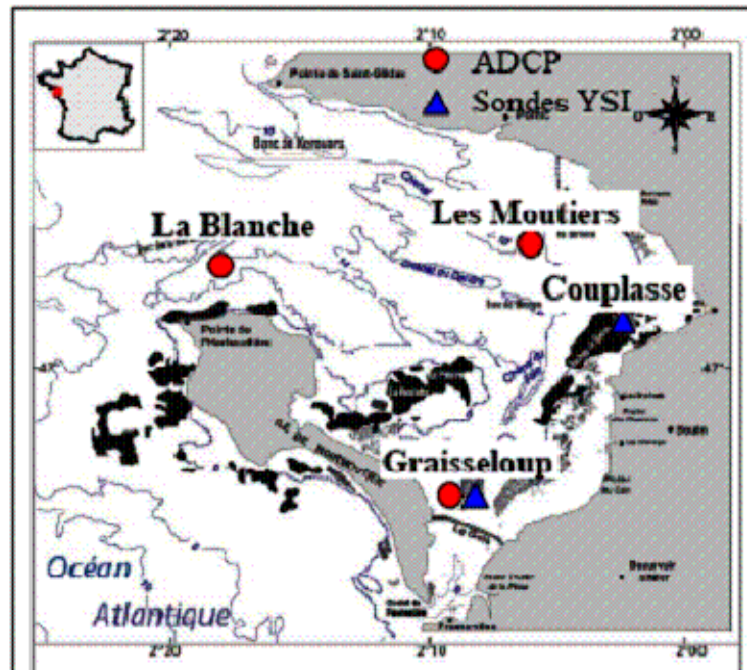


Figure 2. Bathymétrie schématique de la baie et points de mesures.

## 5. Résultats

La marée est validée à l'aide des hauteurs d'eaux mesurées sur l'estran en 2005 et 2006, des mesures ADCP de courants, et d'un atlas de courant du SHOM. Les mesures de houles n'étant pas disponibles en 2005, la propagation de houle est validée à l'aide de mesures à la bouée Ile d'Yeu ( $02^{\circ} 25.65'W$ ,  $47^{\circ} 41.45'N$ , voir figure 3) et par confrontation aux mesures ADCP (effectuées en 2009, voir figure 4) afin de vérifier la cohérence des hauteurs significatives et des périodes de houle à l'intérieur de la baie.

En ce qui concerne l'aspect sédimentaire, l'intérêt est porté uniquement sur la remise en suspension du sédiment présent sur l'estran en 2005 et particulièrement le mois de décembre pour lequel les images satellites sont disponibles (les années 2005 et 2006 sont les plus intéressantes dans notre cas. Le couplage avec le modèle biologique se fera sur ces années puisque des mesures de croissance des huîtres y ont été réalisées régulièrement). Seule la vase présente en fond de baie a été prise en compte. Les paramètres utilisés sont très proches de ceux utilisés par TESSIER (2006) pour des particules fines :

- tension critique d'érosion= $0.1 \text{ N m}^{-2}$ ,
- taux d'érosion de référence= $10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ ,
- tension critique de dépôt= $0.1 \text{ N m}^{-2}$ ,
- vitesse de chute variant avec la concentration en MES entre  $0.1 \text{ mm s}^{-1}$  et  $5 \text{ mm s}^{-1}$ ,
- vent du modèle ARPEGE homogène sur le domaine,

La condition initiale considérée est une couche de vase uniforme de 15 cm de concentration égale à  $800 \text{ g L}^{-1}$ . Les contraintes au fond sont estimées à partir d'une

rugosité de fond  $z_0$  égale à 0.1 mm, valeur prise généralement pour des fonds vaseux. Les apports en sédiments de la Loire ne sont pas pris en compte. Si sur le long terme, ils participent bien évidemment à l'engraissement de la baie, la Loire n'est pas la cause des très fortes turbidités enregistrées sur l'estran à l'échelle d'un cycle de marée.

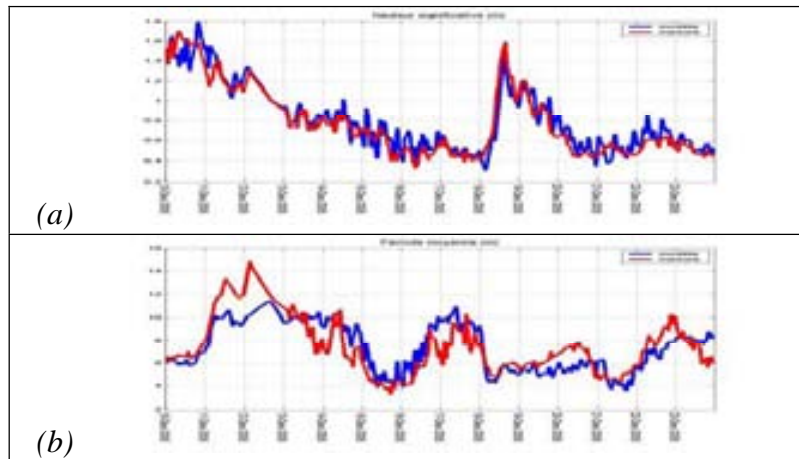


Figure 3. Comparaisons entre modèle (en bleu) et mesures (en rouge) du 10 au 23 décembre 2005. (a) Hauteur significative de houle (en m) à l'île d'Yeu. (b) Période significative de houle (en s).

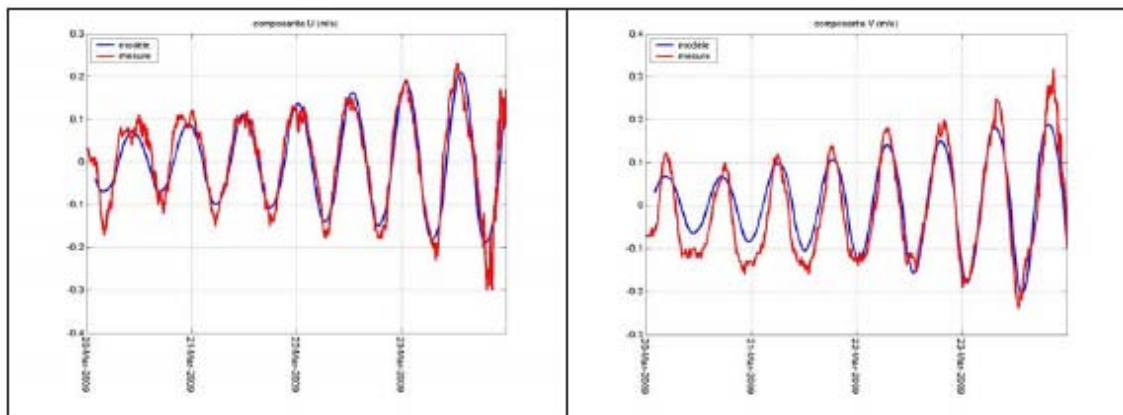


Figure 4. Comparaison entre les composante U et V du courant simulé (en bleu) et le courant mesuré moyenné sur la verticale (en rouge) par l'ADCP du site des Moutiers du 20/03/2009 au 24/03/2009.

La figure 5 représente la turbidité modélisée comparée à celle issue de l'imagerie satellitaire (LEROUXEL *et al.*, 2007) le 13/12/2005 environ 2 heures avant l'étales de haute mer (coefficient de marée 73). Ce jour correspond à des conditions de houle et de vent relativement faibles (hauteur significative de houle inférieure à 1m à l'île d'Yeu, vitesse du vent d'environ  $10 \text{ m s}^{-1}$ ). Le modèle reproduit de manière correcte aussi bien le panache turbide que son intensité (concentrations supérieures à  $200 \text{ mg L}^{-1}$  dans la

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire et transports des particules

partie orientale de la baie ; au maximum  $100 \text{ mg L}^{-1}$  près de Noirmoutier). Si on s'intéresse à 2 sites en particulier ; le site de la Couplasse au nord et le site de Graisseloup au sud ; le modèle réussit à reproduire l'intensité de la turbidité mesurée par les sondes YSI aussi bien au nord avec des concentrations qui peuvent atteindre  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , qu'au sud où les concentrations ne dépassent pas les  $100 \text{ mg L}^{-1}$  (figure 6). On note (particulièrement à la Couplasse) que les concentrations les plus élevées sont pendant le jusant aussi bien pour la mesure que pour le modèle. La différence de turbidité entre le modèle et la mesure à la Couplasse le 18 décembre est certainement due à un coup de vent qui est représenté par le modèle de manière relativement grossière (valeur de vent toutes les 6 heures). Les valeurs maximums sont également surestimées sur le site de Graisseloup entre le 15 et le 20 décembre. Cependant, les résultats du modèle sur une année (résultats non présentés) sont en accord les mesures c'est-à-dire une turbidité moyenne d'environ  $30 \text{ mg L}^{-1}$  à Graisseloup et  $100 \text{ mg L}^{-1}$  à la Couplasse.

De manière générale, à la vue des différentes images satellites disponibles, la structure turbide est souvent du même type que celle illustrée figure 5 c'est-à-dire des fortes turbidités dans la partie Est de la baie et des turbidités beaucoup plus faibles dans la partie Ouest. En effet, le modèle montre que la partie Ouest (exemple Graisseloup) est beaucoup plus protégée de la houle du fait de la présence l'île de Noirmoutier que la partie Est (exemple Couplasse). Ainsi, la tension de fond modélisée est en général beaucoup plus forte au nord de la baie qu'au sud, le seuil d'érosion est atteint plus souvent, ce qui explique les différences de concentrations.

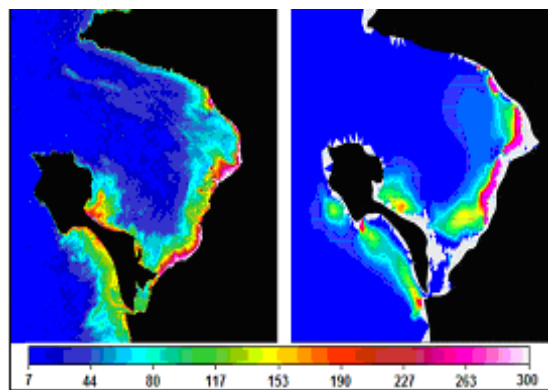


Figure 5. Turbidité ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en Baie de Bourgneuf (à gauche image SPOT du 13/12/2005 à 11h ; à droite résultats du modèle le même jour à la même heure).

### 6. Conclusion

Bien que se basant sur des hypothèses très restrictives, ce travail a permis de représenter le panache turbide observé en baie de Bourgneuf à l'aide du modèle MIKE 21. Cependant, le but de cette modélisation était surtout de pouvoir obtenir de manière relativement simple et avec une résolution relativement grossière les principales



structures turbides de la baie. Même si certains écarts demeurent, les résultats ont paru comme le meilleur compromis dans l'optique du couplage avec le modèle biologique d'Ifremer ECO-MARS 3D (MÉNESGUEN *et al.*, 2006 ; LAZURE & DUMAS, 2008) qui utilise des mailles de 500 mètres pour améliorer les résultats de croissance spatialisée des huîtres dans les différents secteurs de la baie réalisée en 2008 (DUSSAUZE, 2008) à partir du modèle croissance de l'huître (BARILLÉ *et al.*, 1997). Ainsi, cette information spatialisée constituera un outil pertinent d'aide à la gestion des espaces conchylicoles, permettant en particulier une analyse plus précise des éventuelles restructurations des bancs ostréicoles.

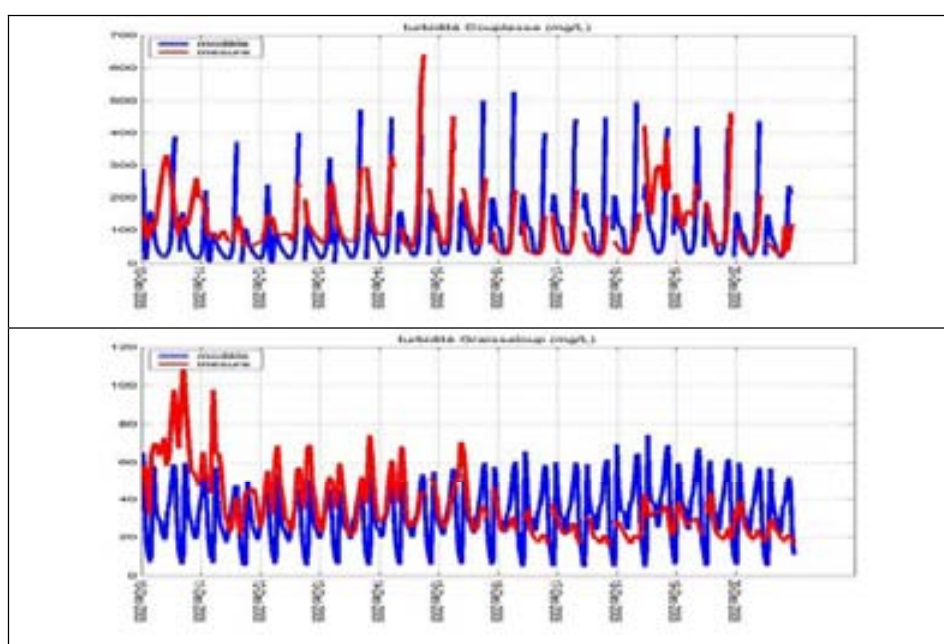


Figure 6. Concentration en MES à la Couplasse (au centre), et à Graisseloup (en bas) du 10 au 23 décembre 2005 (en bleu le modèle et en rouge la mesure).

### Remerciements

Le projet GERRICO est piloté par l'Ifremer et l'Université de Nantes, avec le soutien de la Région des Pays de la Loire. Les auteurs remercient ces trois institutions.

### 7. Références bibliographiques

- BARILLÉ L., HERAL M., BARILLÉ-BOYER A.L. (1997). *Modélisation de l'écophysiologie de l'huître Crassostrea gigas dans un environnement estuarien*. Aquat. Living Resour. Vol. 10, n° 1, pp 31-48. doi:10.1051/alr:1997004
- DHI (2007a). *MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM*. Hørsholm, Denmark, 14 p.
- DHI (2007b). *MIKE 21 wave modelling*. Hørsholm, Denmark, 16 p.
- DUSSAUZE M. (2008). *Modélisation de la production primaire et de la croissance de l'huître Crassostrea gigas en Baie de Bourgneuf*. Rapport Ifremer.

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire et transports des particules

- DUSSAUZE M., SANCHEZ M., BARILLÉ L., HITIER B., OGER-JEANNERET H., ROBIN M. (2009). *Modélisation de la turbidité en Baie de Bourgneuf (France)*. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 1, Hammamet, Tunisie, pp 95-98. doi:10.5150/cmcm.2009.024-2
- FROIDEFOND J.-M., DOXARAN D., MILLER P. (2003). *Acquisition et traitement d'images satellites. Programme interrégional Loire grandeur nature, GIP Loire estuaire*, Nantes, 174 p.
- GOULEAU D. (1968). *Etude hydrologique et sédimentologique de la baie de Bourgneuf*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Nantes, 365 p.
- HAURE J., MARTIN J.L.Y., DUPUY B., NOURRY M., PALVADEAU H., PAPIN M., PENISSON C., LE MOINE O., GEAIRON P., RAZET D. (2003). *Estimation des stocks d'huîtres en élevage dans la Baie de Bourgneuf en 2002*. Restitution des travaux 2002, contrat Région pays de la Loire, contrat Conseil Général de Vendée et SRC Pays de Loire, DRV/RA/LCPL, 19 p.
- KRONE R.B. (1986). *The significance of aggregate properties to transport processes*. In A.J. Mehta (Ed.), *Estuarine cohesive sediment dynamics, Coastal and estuarine studies n° 14*, pp 66–84.
- 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 233250.
- LEROUXEL A., BARILLÉ L., ROSA P., FROIDEFOND J.M. (2007). *Analyse de la distribution spatiale de la turbidité en baie de Bourgneuf et de son impact sur les cultures ostréicoles*. Rapport d'étude accordée par le SMIDAP, 52 p.
- MÉNESGUEN A., CUGIER P., LEBLOND I., (2006). *A new numerical technique for tracking chemical species in a multisource ecosystem applied to nitrogen causing Ulva blooms in the Bay of Brest (France)*. *Limnology Oceanography*, 51 (1, part 2) 591-601.
- PARTHENIADES E. (1965). *Erosion and deposition of cohesive soils*. *Journal of the Hydraulic Division*, n° 91, pp 105–139.
- RICHARDSON J.F., ZAKI W.N. (1954). *Sedimentation and fluidisation. Part 1*. *Trans. Inst. Chem. Eng*, 32, pp 35-53.
- SANCHEZ M. (2008). *Dynamique des sédiments fins dans une zone côtière à forte turbidité à proximité de l'embouchure de la Loire*. X<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Sophia Antipolis, pp 169-178. doi:10.5150/jngcgc.2008.016-S
- SMITH G.M., MILTON E.J. (1999). *The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed to reflectance*. *Int. J. Remote Sens.* 20 (13), pp 2653-2662. doi:10.1080/014311699211994
- TESSIER C. (2006). *Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud*. Thèse de l'Université de Bordeaux, 400 p.
- VAN RIJN, L.C. (1989). *Handbook on Sediment Transport by Current and Waves*. Delft Hydraulics, Report H461, June 1989, pp 12.1-12.27.