

# Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire



## **DRAGAGES ET IMMERSIONS A LA LAMBARDE : ACTUALISATION DU DOSSIER HYDROSEDIMENTAIRE**

### **MODELISATION REGIONALE DU BRUIT DE FOND EN MES**

#### **RAPPORT PROVISOIRE**

**ARTELIA Eau & Environnement**

**Activité Maritime**

6 rue de Lorraine

38130 - Echirolles

Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00

Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33



**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

**RAPPORT PROVISOIRE**

N° 8 71 3901 R2 :

MODELISATION REGIONALE DU BRUIT DE FOND EN MES

| N° 8 71 3901 R2 :<br>MODELISATION REGIONALE DU BRUIT DE FOND EN MES |             |           |         |          |            |
|---|-------------|-----------|---------|----------|------------|
|   |             |           |         |          |            |
|   |             |           |         |          |            |
|   |             |           |         |          |            |
| V0  |             | RWR       | LHM     | LHM      | 30/11/2018 |
| Version   | Description | Rédaction | Vérifié | Approuvé | Date       |

## SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBJET DE L'ETUDE</b>  | <b>1</b>  |
| <b>SYNTHESE ET CONCLUSIONS</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1. METHODOLOGIE INITIALE</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1.1. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE</b>                                | <b>7</b>  |
| 1.1.1. CONSTRUCTION DU MODELE : BATHYMETRIE ET MAILLAGE                | 7         |
| 1.1.2. MODELISATION DES NIVEAUX D'EAU                                  | 9         |
| 1.1.3. MODELISATION DE LA HOULE  | 13        |
| 1.1.4. MODELISATION DU VENT ET DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE            | 17        |
| <b>1.2. MODELISATION HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA PROPOSITION INITIALE</b> | <b>17</b> |
| 1.2.1. PERIODE SIMULEE ET FORÇAGE HYDRO-METEOROLOGIQUE                 | 17        |
| 1.2.2. DEBITS LIQUIDES ET DEBITS SOLIDES                               | 17        |
| 1.2.2.1. Vilaine   | 17        |
| 1.2.2.2. Loire   | 18        |
| 1.2.2.3. Charente  | 18        |
| 1.2.2.4. Garonne et Dordogne   | 19        |
| 1.2.2.5. Adour   | 19        |
| 1.2.2.6. Tous estuaires réunis   | 19        |
| 1.2.3. PROCESSUS PHYSIQUES MODELISES                                   | 22        |
| <b>1.3. RESULTATS ET CONCLUSION</b>                                    | <b>22</b> |
| <b>1.4. INVESTIGATION DE L'HYPOTHESE 1</b>                             | <b>22</b> |
| <b>1.5. RESULTATS ET CONCLUSION</b>                                    | <b>23</b> |
| <b>2. NOUVELLE METHODOLOGIE</b>  | <b>25</b> |
| <b>2.1. REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE</b>                                   | <b>25</b> |
| 2.1.1. REPARTITION SPATIALE DES 7 CLASSES DE SEDIMENT                  | 25        |
| <b>2.2. PROCESSUS PHYSIQUES MODELISES</b>                              | <b>27</b> |
| <b>2.3. PARAMETRES RETENUS APRES CALAGE</b>                            | <b>28</b> |
| 2.3.1. REPARTITION DES SEDIMENTS DANS CHAQUE CLASSE SEDIMENTOLOGIQUE   | 28        |
| 2.3.2. PARAMETRE PHYSIQUES DES SEDIMENTS                               | 30        |
| 2.3.2.1. Vases   | 30        |
| 2.3.2.2. Sables  | 31        |
| 2.3.2.3. Graviers  | 31        |
| 2.3.2.4. Contraintes critiques des mixtures et flux d'érosions         | 31        |
| 2.3.2.5. Récapitulatif des valeurs de calage retenus (calcul 68)       | 33        |
| <b>2.4. RESULTATS</b>  | <b>34</b> |
| 2.4.1. COMPARAISON AU POINT DE MESURE CROISIC-D4                       | 34        |

2.4.2. COMPARAISON AU MESURES SATELLITES DE SURFACE \_\_\_\_\_ 38

**2.5. BRUIT DE FOND MODELISE AU NIVEAU DE LA LAMBARDE \_\_\_\_\_ 43**

**BIBLIOGRAPHIE \_\_\_\_\_ 46**

## TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Paramètres physiques calcul 68.....                                      | 33 |
| Mélange des sédiments pour chaque classe sédimentologique calcul 68..... | 33 |
| Paramètres physiques calcul 64.....                                      | 36 |
| Mélange des sédiments pour chaque classe sédimentologique calcul 64..... | 36 |

## FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 – Turbidité régionale dans la partie côtière du golfe de Gascogne.....  | 1  |
| Figure 2 – Apports en MES par les 5 principaux estuaires français du golfe de Gascogne .....   | 5  |
| Figure 3 – Positionnement du mouillage Previmer D4 le Croisic .....  | 6  |
| Figure 4 – Evolution temporelles au mouillage Previmer D4 le Croisic 2007-2008 .....   | 6  |
| Figure 5 – MES moyennes mensuelles à partir de données satellites (F. Gohin) .....   | 7  |
| Figure 6 – Maillage du modèle .....  | 7  |
| Figure 7 – Base de données bathymétriques HOMONIM.....   | 8  |
| Figure 8 – MNT SHOM projeté sur le maillage .....  | 9  |
| Figure 9 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Concarneau et Port Tudy .....  | 10 |
| Figure 10 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Port Navallo et Port Maria .....  | 10 |
| Figure 11 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Le Palais et Saint-Nazaire.....   | 11 |
| Figure 12 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de l'Herbaudière et les Sables d'Olonnes.....  | 11 |
| Figure 13 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de La Rochelle et La ponte de Grave .....  | 12 |
| Figure 14 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Biscarosse et Saint-Jean de Luz .....   | 12 |
| Figure 15 – Exemple de propagation à partir de la frontière n°4 .....  | 13 |
| Figure 16 – définition des bibliothèques de houle .....  | 14 |
| Figure 17 – Positionnement du point Croisic-D4.....  | 14 |
| Figure 18 – Houle imposée à la frontière 3 et houle calculée au point Croisic-D4 après propagation .....   | 15 |
| Figure 19 – Comparaison de la houle mesurée au point Croic-D4 et de la houle calculée .....  | 16 |
| Figure 20 – Localisation des périodes défectueuses sur le houlogramme de forçage .....   | 16 |
| Figure 21 – Comparaison de la houle mesurée au point Croic-D4 et de la houle calculée avec un étalement directionnel moyen calibré .....                                       | 17 |
| Figure 22 – Débit liquide journalier de chacun des fleuves (banque hydro) entre 2004 et 2009.....  | 20 |
| Figure 23 – Concentration journalière de chacun des fleuves calculée entre 2004 et 2009 .....  | 20 |
| Figure 24 – Apports journaliers calculés et cumulés de chacun des fleuves entre 2004 et 2009 .....   | 21 |
| Figure 25 – Comparaison des apports journaliers calculés moyen annuel des fleuves entre 2004 et 2009 aux estimations de flux sédimentaire expulsés Jouanneau et al. 1999 ..... | 21 |
| Figure 26 – Bathymétrie du modèle de Gascogne fusionné avec le modèle Loire 3D .....   | 23 |
| Figure 27 – Panaches de MES en surfaces calculées après 2 ans de simulations.....  | 23 |
| Figure 28 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Juin (moyenne sur 2 ans) .....                     | 24 |
| Figure 29 – Répartition spatiale des 7 classes de sédiment – source : projet EMODnet .....   | 26 |

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

|                           |  |    |
|---------------------------|--|----|
| Figure 30 – Gascogne      | Répartition spatiale des 7 classes de sédiment projetée sur le maillage du modèle  | 26 |
| Figure 31 –               | Définition des classes sédimentologiques (triangles de Folk) .....   | 27 |
| Figure 32 –               | Ratio de vases dans la mixture sable-vase (en blanc le rock).....  | 29 |
| Figure 33 –               | Ratio de sable dans la mixture sable-vase (en blanc le rock).....  | 29 |
| Figure 34 –               | Ratio de gravier dans la mixture sable-vase-gravier (en blanc le rock).....  | 30 |
| Figure 35 –               | Courbe de vitesse de chute en fonction de la concentration .....   | 31 |
| Figure 36 – et al., 1997) | Schema conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement, (Panagiotopoulos   | 32 |
| Figure 37 –               | Contraintes critiques recalculées à partir de la répartition des classes sédimentologiques   | 32 |
| Figure 38 –               | Positionnement du point Croisic-D4.....  | 34 |
| Figure 39 – calage        | Comparaison des mesures ADCP au résultat du modèle (calcul 68) retenu au terme du  | 35 |
| Figure 40 –               | Comparaison des mesures ADCP au résultat du modèle (calcul 64).....  | 37 |
| Figure 41 –               | Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Janvier (moyenne sur 5 ans).....   | 39 |
| Figure 42 –               | Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Mars (moyenne sur 5 ans) .....     | 40 |
| Figure 43 –               | Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Juin (moyenne sur 5 ans).....      | 41 |
| Figure 44 –               | Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Novembre (moyenne sur 5 ans) ..... | 42 |
| Figure 45 –               | Position des points de sondes : Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde ...  | 43 |
| Figure 46 – 2004 et 2009  | Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 68 (calage retenu) entre   | 43 |
| Figure 47 –               | Houle moyenne -50m CM sur le 5 jours précédents et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 68 (calage retenu) entre 2004 et 2009 .....                | 44 |
| Figure 48 –               | Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 64 (entre 2004 et 2009.....  | 45 |

## OBJET DE L'ETUDE

ARTELIA a produit entre 2008 et 2012, pour le GPMNSN, une série d'études hydrosédimentaires permettant d'établir les dossiers loi sur l'eau et Natura 2000 pour renouveler les autorisations de dragage dans l'estuaire de la Loire et d'immersion en mer à la Lambarde. Ces études ont porté essentiellement sur le site d'immersion de la Lambarde qui fait l'objet d'une attention permanente.

Les autorisations ont été délivrées en avril 2013 sur une durée de 10 ans (jusqu'en avril 2023) avec un point de contrôle au bout de 5 ans (en 2018).

Pour le dossier à mi-parcours (2018), le Port souhaite présenter les éléments suivants:

- 1) Analyse du suivi de la Lambarde jusqu'à mi-2017 pour estimer la stabilité du dépôt,
- 2) Modélisation régionale du bruit de fond en MES,
- 3) Extension du modèle de dispersion à la zone littorale pour évaluer l'impact sur les plages sensibles,
- 4) Rejeu des modèles existants : stabilité et dispersion

Le présent rapport d'étude répond au point 2 : Modélisation régionale du bruit de fond en MES.

### Motivations :

Les calculs de dispersion de 2012 ont été réalisés en « eau pure » c'est-à-dire sans le bouchon vaseux de l'estuaire ni les apports en MES de la Loire et sans le bruit de fond en MES qui existe dans la partie côtière du golfe de Gascogne (voir figure ci-dessous) et qui est de l'ordre de 10 à 30 mg/l aux environs du site de la Lambarde (rapport 171 3187, tableau 3).

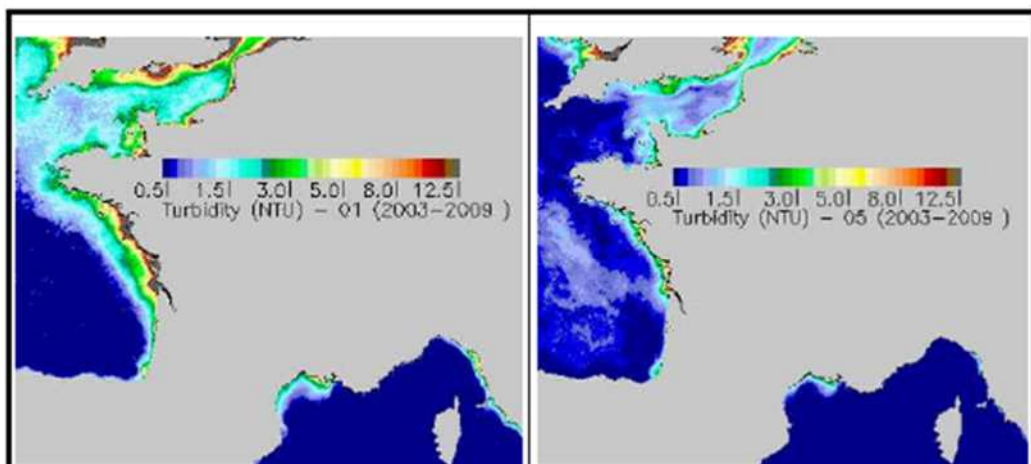


Figure 87 : Turbidité (NTU) moyenne sur 2003-2009 en janvier (gauche) et en août (droite) estimée à partir de la couleur de l'eau (Gohin 2010).

### **Figure 1 – Turbidité régionale dans la partie côtière du golfe de Gascogne**

Cette approche a permis de mettre clairement en évidence l'impact des seules immersions à la Lambarde. D'un autre côté, elle s'éloigne de la réalité de terrain pour laquelle il y a différentes sources de MES et des interactions non-linéaire entre elles. Ainsi le modèle en eau pure ne permet pas d'évaluer l'impact des autres sources d'apports de MES sur un site tiers comme la baie de Bourgneuf.

De plus en eau pure, la dispersion des sédiments immergés conduit à de faibles turbidités pour lesquelles la vitesse de chute du sédiment est également très faible. L'ajout d'un bruit de fond venant du large et de l'estuaire conduit à des teneurs en MES plus élevées qui favorisent la formation de floccs et augmentent les vitesses de chute ce que ne permet pas le modèle

---

actuellement. Cela peut modifier l'impact sur le littoral mais aussi le départ des sédiments vers le large.

Enfin la connaissance synoptique du bruit de fond a été également demandée par la DREAL Pays de Loire lors de l'instruction du dossier de renouvellement avec la demande d'une meilleure caractérisation de la turbidité initiale « bruit de fond ».

Les verrous actuels :

La prise en compte du bruit de fond en MES au large de l'estuaire de la Loire constitue un verrou scientifique significatif. Deux options correspondant à l'état de l'art ont été initialement proposées par ARTELIA : soit un décalage vers l'ouest de la limite aval pour limiter les pertes de MES par la frontière du large, ou bien l'utilisation des mesures disponibles de MES collectées sur l'ensemble du plateau continental Atlantique en 2011 dans le cadre d'une synthèse commandée par l'Ifremer (Artelia, 2011).

Après discussion, le Port n'a pas été convaincu par ces deux options notamment à cause du manque de cohérence des différentes campagnes de mesures en nature et par le fait que l'extension du modèle plus au large ne résolvait pas la question des interactions non-linéaires entre les différentes sources de sédiments, ni la question d'éventuels apports extérieurs susceptibles d'impacter le littoral.

Proposition d'une méthodologie innovante :

Pour surmonter les verrous actuels de l'état de l'art, il est proposé ici de reconstituer le bruit de fond à l'aide d'un modèle régional du plateau continental du golfe de Gascogne dans lequel les apports continentaux seront simulés. Etant donné le caractère de recherche de cette étude, cette stratégie est une base de départ qui pourra évoluer au cours de l'étude et des résultats intermédiaires.



---

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Un modèle 3D du golfe de Gascogne a été construit et a été calé et validé en terme de niveau d'eau sur une douzaine de marégraphes.

La frontière maritime s'étendant sur plusieurs kilomètres et les temps de calcul étant trop long pour pouvoir totalement coupler la propagation de la houle avec le modèle 3D sur plusieurs années de calcul, une méthodologie innovante basée sur la bibliothèque de houle classique a été utilisée.

La frontière maritime a été découpée en sous-frontière et une bibliothèque de houle par sous – frontière a été calculée. La combinaison des résultats a permis de retrouver une énergie totale en chaque point pour laquelle on revient calculer les paramètres de houle. La méthodologie a été validée sur un point de mesure de plus de 3 mois. Grâce à cette méthodologie, nous pouvons calculer 5 ans d'hydrodynamique et de propagation de houle dans le golfe de Gascogne en moins de 2 semaines.

Afin d'estimer la MES régionale dans le golfe de Gascogne, une première méthodologie basée sur les apports fluviaux a été tentée. Pour ce faire un important travail de bibliographie et de recalcul de flux, a permis d'établir des séries temporelles de débit liquide et solide journalier entre 2004 et 2009 pour la Vilaine, La Loire, La Charente, La Garonne, La Dordogne et L'Adour. Les apports moyens annuels calculés corrèlent de plus avec les estimations existantes.

Cette méthodologie a cependant été abandonnée, du fait de l'expulsion trop récurrente des panaches turbides de la part des estuaires. En effet, il semble que la modélisation trop schématique de la vase et du raffinement nécessaire pour pouvoir représenter les processus estuariens, ne permettent pas de représenter des dynamiques de bouchon vaseux de façon assez réaliste.

Une seconde méthodologie basée sur les travaux de thèse de Baptiste Mengual (2017), « Variabilité spatio-temporelle des flux sédimentaires dans le Golfe de Gascogne : contributions relatives des forçages climatiques et des activités de chalutage » a été déployée. Cette méthodologie, est principalement basée sur un remplissage sédimentaire du golfe de Gascogne par 7 classes sédimentologiques. La MES régionale modélisée est donc due à une remise en suspension du remplissage sédimentaire. Cela signifie que la turbidité générale côtière est plus liée à la remise en suspension locale de la MES due aux épisodes de tempêtes, qu'aux panaches des estuaires en temps général (la tendance se renverse certainement pour un épisode de crue).

Après un calage, de la répartition et des paramètres physiques moyens de 3 sédiments : vase, sable et gravier, dans 7 classes sédimentologiques, il a été possible de caler l'évolution temporelle de la MES au point Croisic –D4 par -19m CM. Il a été difficile d'obtenir à la fois les mesures de fond en période de tempête et en période de calme. En effet, la MES régionale se trouve dans des gammes de concentrations inférieures 10 mg/l, sauf pendant les périodes agitées.

Il est fort probable que les vases qui restent en suspension dans les périodes calmes avec des concentrations < 10 mg/l et qui composent certainement les images satellites de turbidité moyenne n'aient pas les mêmes paramètres physiques que celles qui sont majoritairement reprises du fond en zone côtière pendant les tempêtes.

Le calage obtenu est donc certainement un compromis de ces différentes vases.

Cette modélisation, qui reste encore largement améliorable, nous indique tout de même que cette seconde méthodologie est certainement la plus correcte pour représenter le bruit de fond, et qu'il n'est donc pas nécessaire de simuler le golfe de Gascogne entier. L'implantation de cette méthodologie dans un modèle estuarien 3D élargi de la Loire, permettrait d'avoir à la fois le bruit de fond du aux tempêtes et les panaches issus du fleuve en période de crue.

Le modèle ayant simulé 5 ans, avec le calage retenu, nous avons analysé ce que le modèle donnait comme information au niveau du bruit de fond en MES à la Lambarde. Les résultats suivants ont été obtenus :

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

**RAPPORT PROVISOIRE**

---

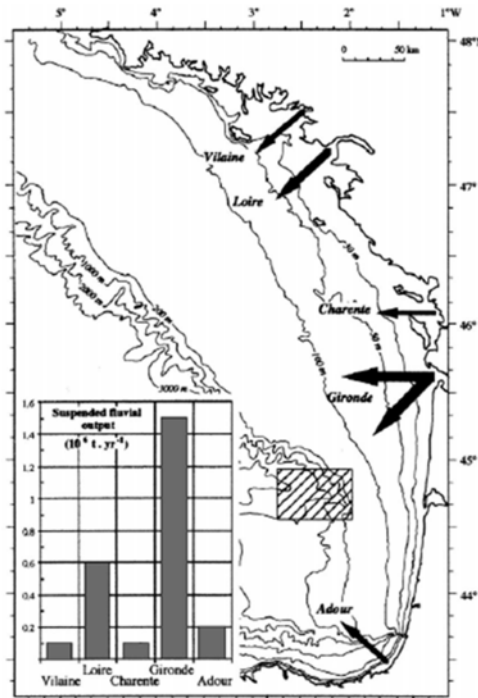
- La MES moyenne sur 5 ans est de 7 mg/l,
- Les valeurs de MES ne dépassent pas 15 mg/l 90 % du temps,
- La valeur de 0,37mg/l est dépassée 1% du temps.

Les épisodes de fortes concentrations étant fortement reliés à la hauteur de houle des jours précédents, il a pu être établi que si la houle (à -50m CM) est inférieure à 1,8m en moyenne sur les 5 jours précédents, la MES moyenne au point Lambarde est généralement inférieure à 10 mg/l.

Les résultats étant fortement différents avec un autre paramètre de calage qui était acceptable au niveau du Croisic, le paramétrage retenu reste donc encore sujet à modifications. La campagne de mesures de MES en cours de part et d'autre de la Lambarde, permettra certainement d'affiner ce calage, et de diminuer les incertitudes.

## 1. METHODOLOGIE INITIALE

Pour surmonter les verrous actuels de l'état de l'art, il est proposé de reconstituer le bruit de fond à l'aide d'un modèle régional du plateau continental du golfe de Gascogne dans lequel les apports continentaux seront simulés.



**Figure 2 – Apports en MES par les 5 principaux estuaires français du golfe de Gascogne**

Ces apports ont été estimés en moyenne à 2,5 millions de tonnes/an (voir figure 2). Les dimensions du plateau continental sont estimées à 500 km du nord au sud x 120 km/2 d'ouest en est x 50m de profondeur ce qui constitue un volume d'eau de 1500 milliards de m<sup>3</sup>.

Un bruit de fond de 10 mg/l équivaut à 10-5 tonnes/m<sup>3</sup> et conduit à une masse totale de MES de 15 millions de tonnes soit l'équivalent de 6 années d'apport des fleuves. Sachant que le bruit de fond peut monter à 30 mg/l, une simulation sur 20 ans permettrait de constituer un stock suffisant pour retrouver ces chiffres.

Les données disponibles pour estimer la cohérence des résultats du modèle sont :

- Des mesures de longue durée effectuées sur la période novembre 2007-avril 2008 au mouillage Previmer D4 Croisic (mesure utilisée dans la thèse de C. Tessier).

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

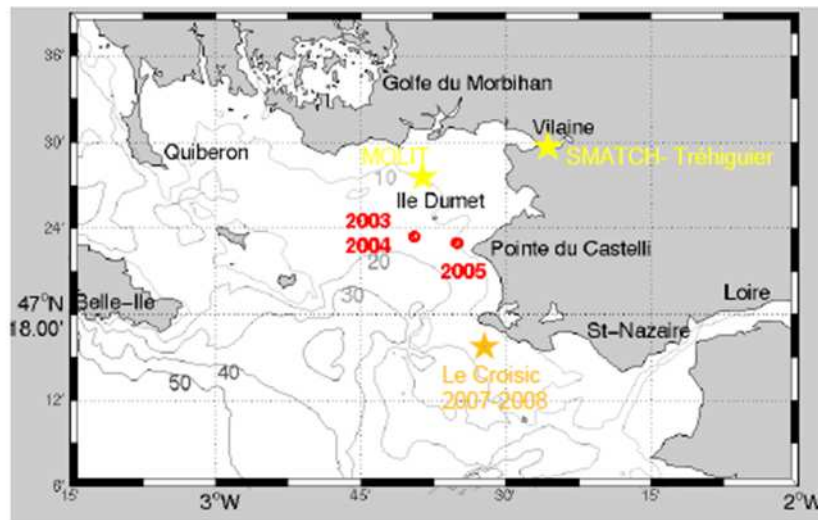


Figure 3-2 : Position des mouillages instrumentés mis en place pour le suivi de la turbidité dans le Mor-Bras depuis 2003 (ADCP et turbidimètres).

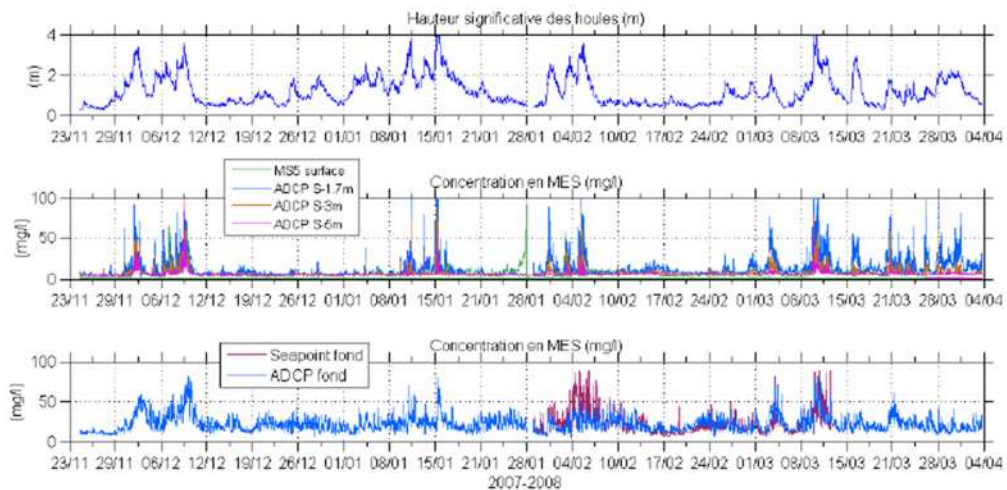
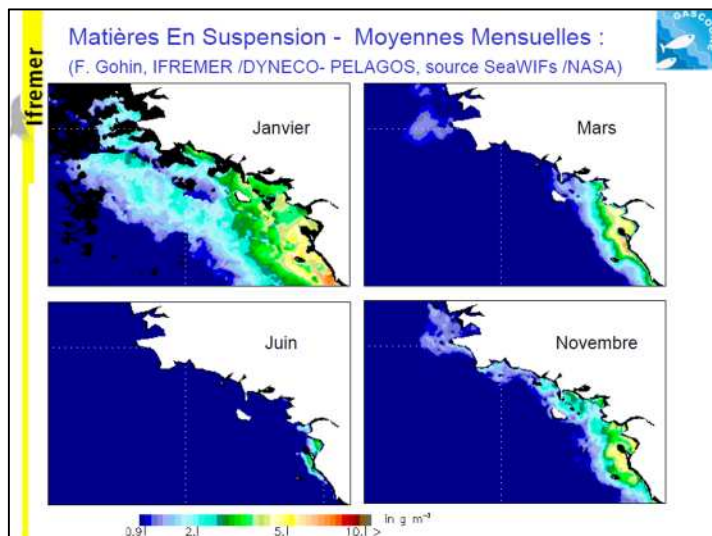
**Figure 3 – Positionnement du mouillage Previmer D4 le Croisic**

Figure 4-31 : Mouillage PREVIMER D4 Le Croisic – Evolution temporelle de la salinité en sub-surface et des hauteurs d'eau, des hauteurs significatives de houles, de la concentration en sub-surface estimée par l'AWAC et la sonde MS5, de la concentration massive à 1m du fond (AWAC et Seapoint).

**Figure 4 – Evolution temporelles au mouillage Previmer D4 le Croisic 2007-2008**

- Des mesures de MES de surface par image satellite. Cette comparaison plus qualitative, se fera sur des périodes moyennes comme présenté ci-dessous (moyenne sur un mois):

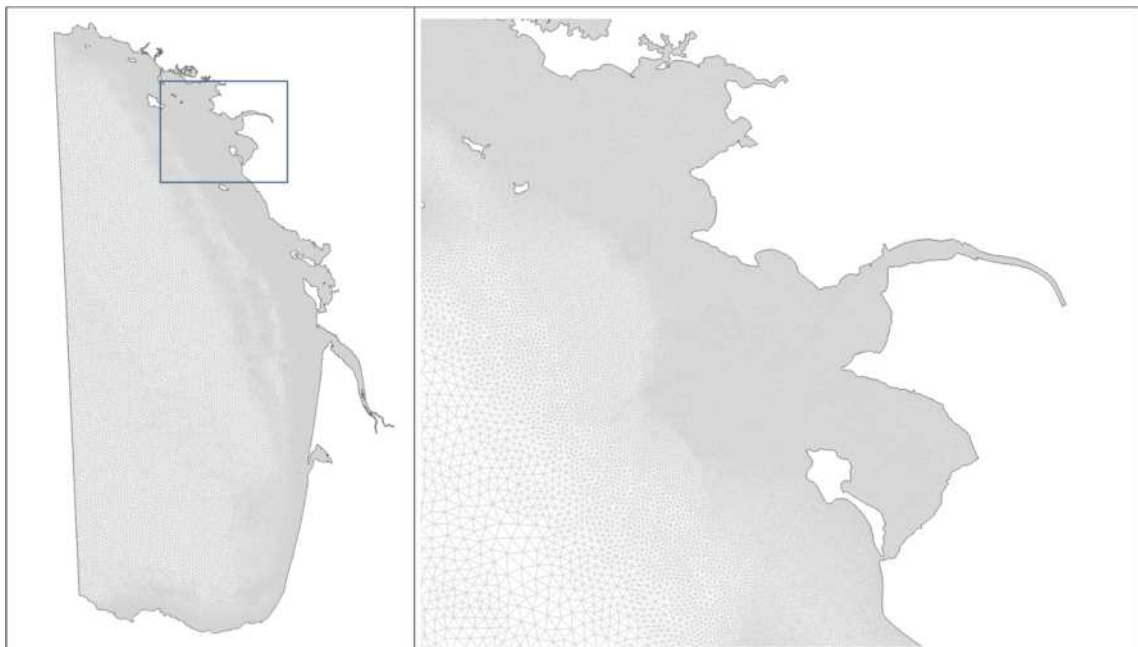


**Figure 5 – MES moyennes mensuelles à partir de données satellites (F. Gohin)**

## 1.1. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

### 1.1.1. Construction du modèle : bathymétrie et maillage

Ce modèle s'étend du Guilvinec en Bretagne sud à Santander en Espagne et représente de manière simplifiée les 5 principaux estuaires (Vilaine, Loire, Charente, Gironde et Adour).



**Figure 6 – Maillage du modèle**

Une taille de maille de 250m sur toute la zone côtière a été retenue et une taille de 3 km au large.

Un travail important a été effectué pour représenter de manière très fidèle la bathymétrie avec un nombre de nœuds raisonnable. La transition entre le large et le plateau continental, les canyons et la zone côtière ont particulièrement été travaillés. L'unique base de données bathymétrique qui a permis d'effectuer ce travail est le MNT bathymétrique de façade du SHOM.

Le produit MNT bathymétrique de façade correspond à une surface bathymétrique dont l'emprise englobe tout ou partie d'une façade maritime nationale (100 à 1000 km). Il couvre intégralement le plateau continental, s'étend vers les zones hauturières et inclut généralement le talus. La résolution définie est de 0.001° (~100m). La couverture de ce type de produit est consultable en ligne à l'adresse suivante : [data.shom.fr](http://data.shom.fr).



**Figure 7 – Base de données bathymétriques HOMONIM**

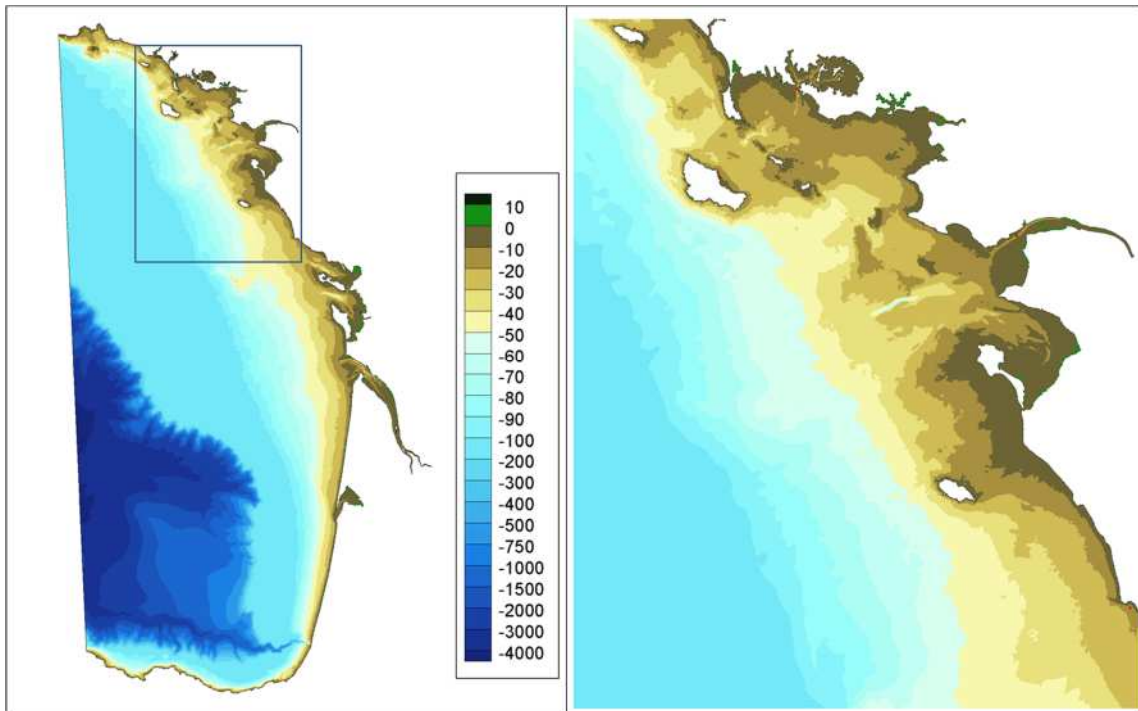
Les sources de données sont les suivantes:

- les lots de sondes valides de la Base de Données Bathymétriques du SHOM (BDBS) ne présentant pas de contraintes d'usage pour la réalisation du MNT ;
- les données Litto3D® ,
- les lots de sondes valides provenant d'organismes extérieurs ne présentant pas de contrainte d'usage pour la réalisation du MNT ;

,des données bathymétriques disponibles sur des bases de données internationales (NGDC ...)

- des compilations existantes sous forme de MNT (GEBCO, EMODNET, ...).

La projection de ce MNT sur le maillage effectué donne le résultat suivant :



**Figure 8 – MNT SHOM projeté sur le maillage**

### 1.1.2. Modélisation des niveaux d'eau

Le modèle hydrodynamique TELEMAC-3D forcé en chaque point de sa frontière maritime par les niveaux et courants de marées issus du modèle global de marée FES 2012.

Ce modèle de marée inclut les 33 ondes suivantes : M2, K1, S2, N2, K2, 2N2, O1, P1, Q1, S1, L2, Mu2, Nu2, R2, T2, E2, J1, La2, M4, M6, M8, MN4, MS4, M3, MKS2, N4, S4, Mf, Mm, Mtm, MSf, Ssa, Z0. Ces ondes sont les principales ondes générant la marée dans le golfe de Gascogne.

La validation de la propagation de la marée a été effectuée sur un ensemble de 12 marégraphes répartis le long de la cote :

- Concarneau
- Port Tudy
- Port Navalo
- Port Maria
- Le Palais
- St-Nazaire
- l'Herbaudiere
- Les Sables d'Olonnes
- La Rochelle
- Pointe de Grave

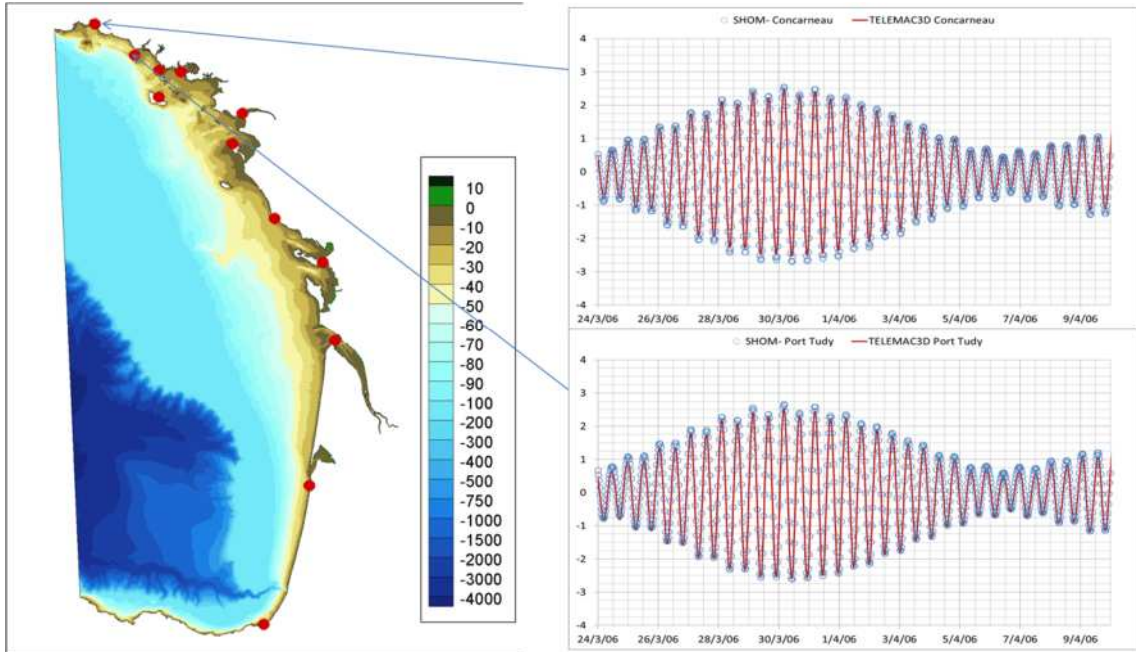
**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

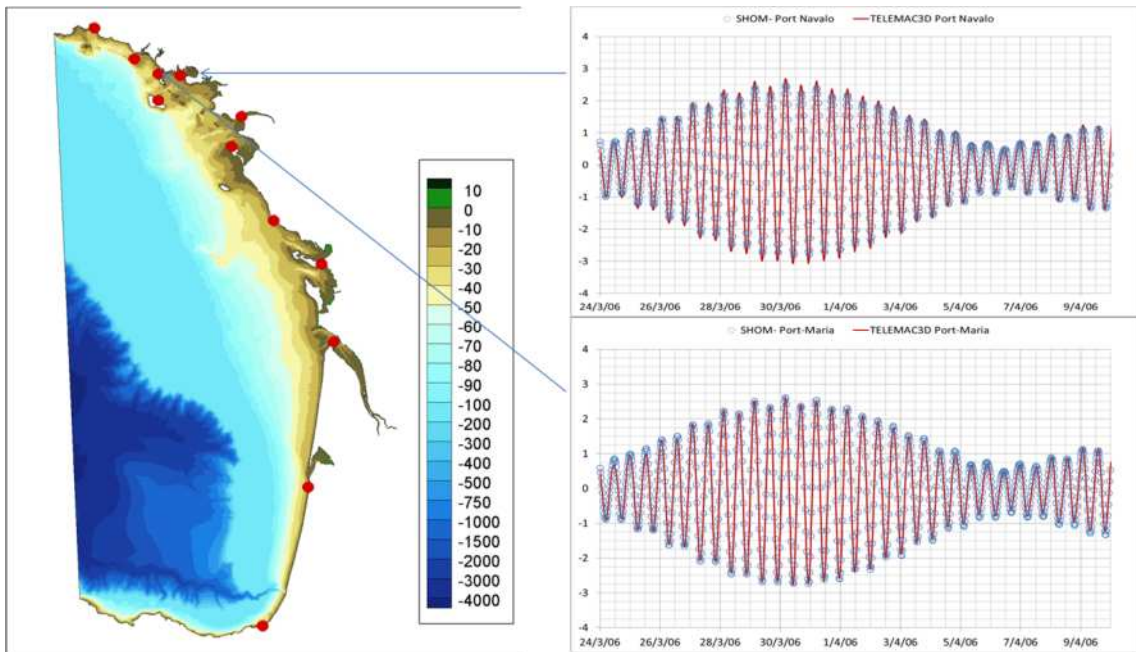
RAPPORT PROVISOIRE

- Biscarosse
- St-Jean de Luz

La comparaison modèle3D / SHOM en marée pure sur 15 jours est présentée sur les figures suivantes :



**Figure 9 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Concarneau et Port Tudy**



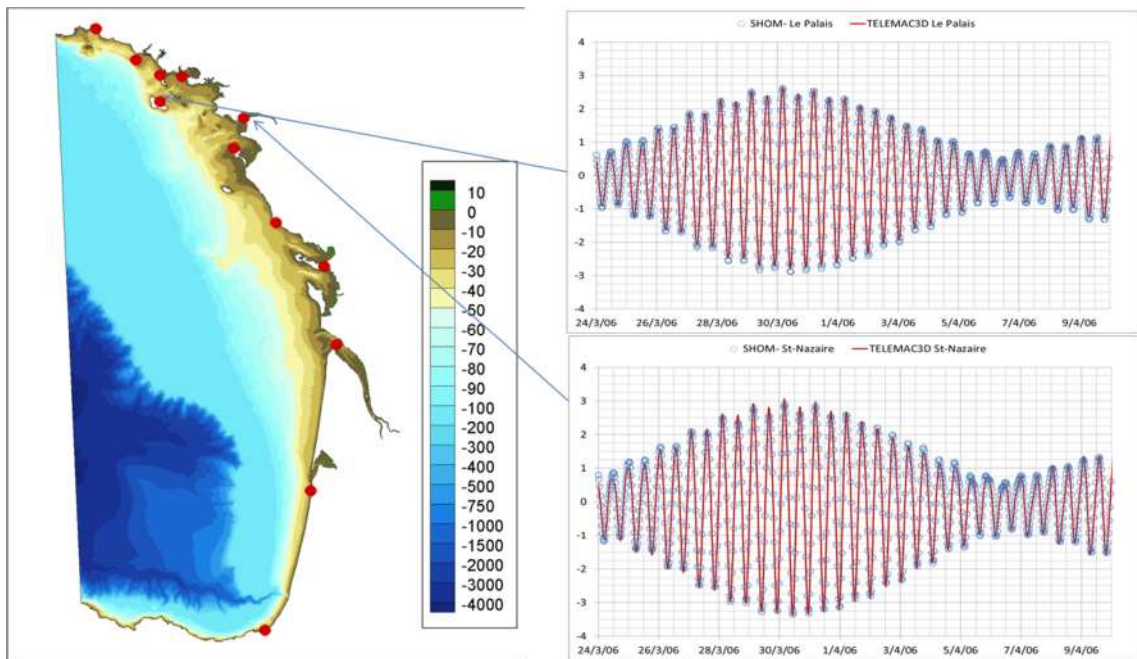
**Figure 10 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Port Navallo et Port Maria**



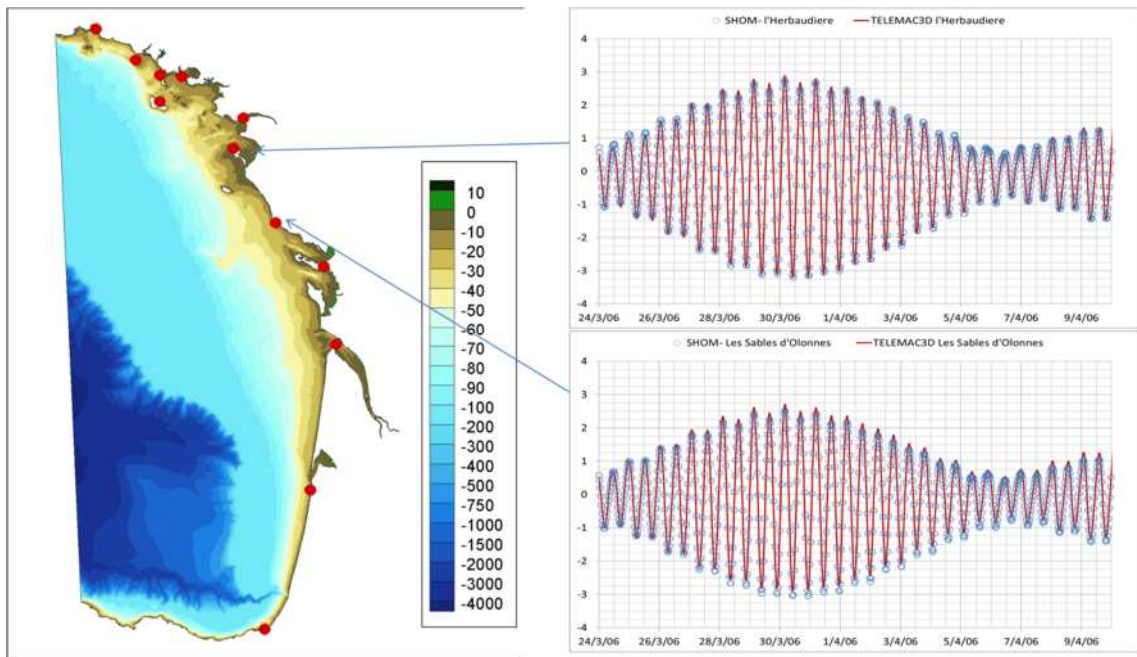
**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 11 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Le Palais et Saint-Nazaire**

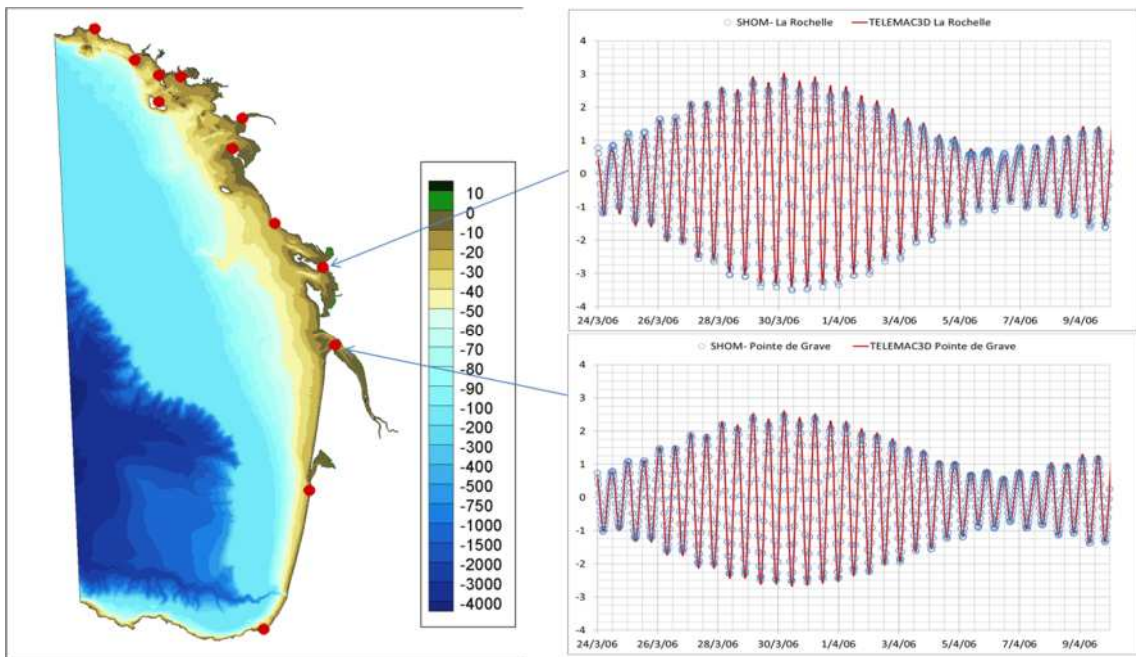


**Figure 12 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de l'Herbaudière et les Sables d'Olonnes**

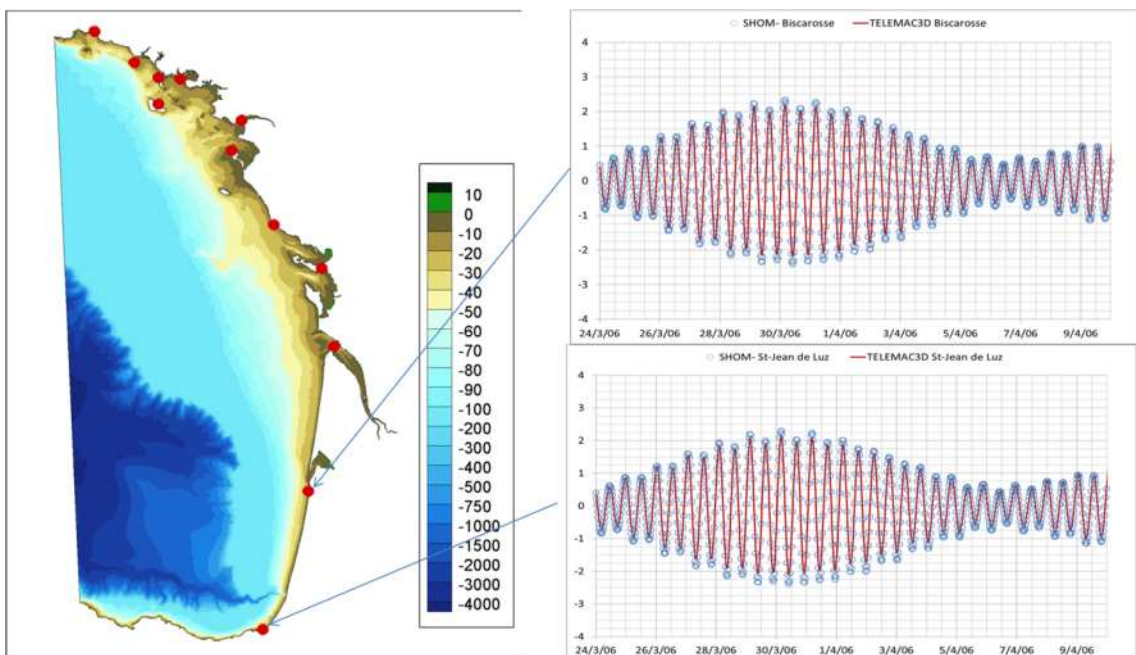
**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 13 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de La Rochelle et La ponte de Grave**



**Figure 14 – Comparaison des niveaux aux marégraphes de Biscarosse et Saint-Jean de Luz**

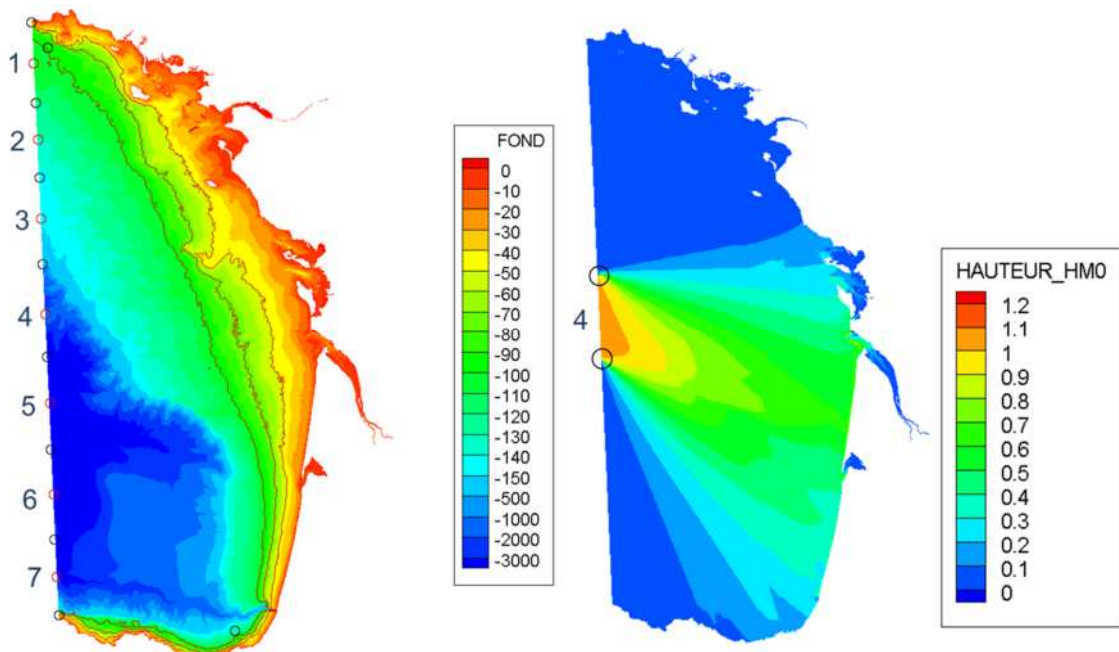
### 1.1.3. Modélisation de la houle

Les données de houle au large sont extraites de la base de données HOMERE (zone Manche – Golfe de Gascogne) au niveau de la condition aux limites du modèle.

Les résultats fournis se présentent sous forme de séries chronologiques de Hmo, Tp et Direction de pic.

Du fait du temps de calcul de propagation et de génération des houles, il n'est pas possible d'effectuer des calculs en parallèle de l'agitation et de l'hydro-sédimentaire 3D sur plusieurs années dans des temps raisonnables.

L'idée est donc de créer une bibliothèque d'agitation en début de calcul pour différentes périodes de pic, directions d'agitation et niveaux d'eau. Etant donné que la frontière maritime est très étendue, une condition de forçage homogène sur l'ensemble de la frontière est peu réaliste. C'est pourquoi, nous avons créé 7 frontières de forçages (délimitées par les points bleus sur la figure suivante et forcée par le point centrale (en rouge sur la figure suivante)). Ceci implique donc de créer 7 bibliothèques de houle :



**Figure 15 – Exemple de propagation à partir de la frontière n°4**

Les 7 matrices de propagation unitaire des houles ont été calculées pour 10 classes de période et 11 classes de direction ainsi que pour des niveaux d'eau allant de -3 à +6 m IGN69 avec un pas de 0,25 m soit au total 28490 épures qui sont stockées dans les bibliothèques.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

|      | Tp3 | Tp5 | Tp7 | Tp9 | Tp11 | Tp13 | Tp15 | Tp17 | Tp19 | Tp21 |
|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| N360 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N340 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N320 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N300 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N280 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N270 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N260 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N240 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N220 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N200 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
| N180 |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |

**11 directions x 10 périodes x 37 niveaux d'eau x 7 frontières avec Hs unitaire = 28 490 plans de houle**

**Figure 16 – définition des bibliothèques de houle**

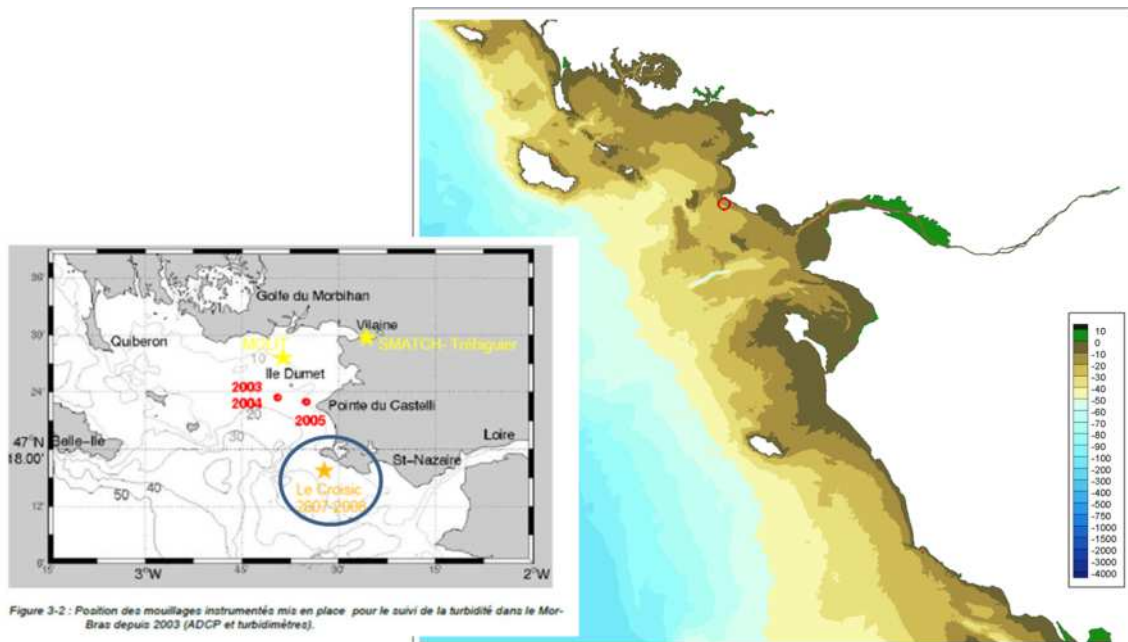
A chaque pas de temps du calcul hydro-sédimentaire, et en chaque nœud, la houle sera interpolée en sommant l'énergie interpolée (en fonction niveau d'eau au point concerné et des conditions de houle Tp, dir au temps donné au point incident de la frontière concernée) dans les 7 bibliothèques.

Un calcul de Hs, Tp et dir est alors réeffectué à partir de cette énergie totale

Notons que le transfert est effectué de façon linéaire en hauteur significative sauf dans les petits fonds où le déferlement est pris en compte par écrêtage de la hauteur significative à 0,6 fois la hauteur d'eau locale.

Pour propager l'ensemble de ces plans de houle, le modèle de propagation de 3eme génération Tomawac de la chaîne Telemac a été utilisé. Un spectre de Jonswap avec un facteur de 3.3 a été appliqué et un étalement de directionnel de 17° a été imposé.

Nous avons comparé les résultats obtenus sur la période novembre 2007- mars 2008 avec le modèle et les mesures de houle mesurée à L'ADCP au point Croisic-D4.

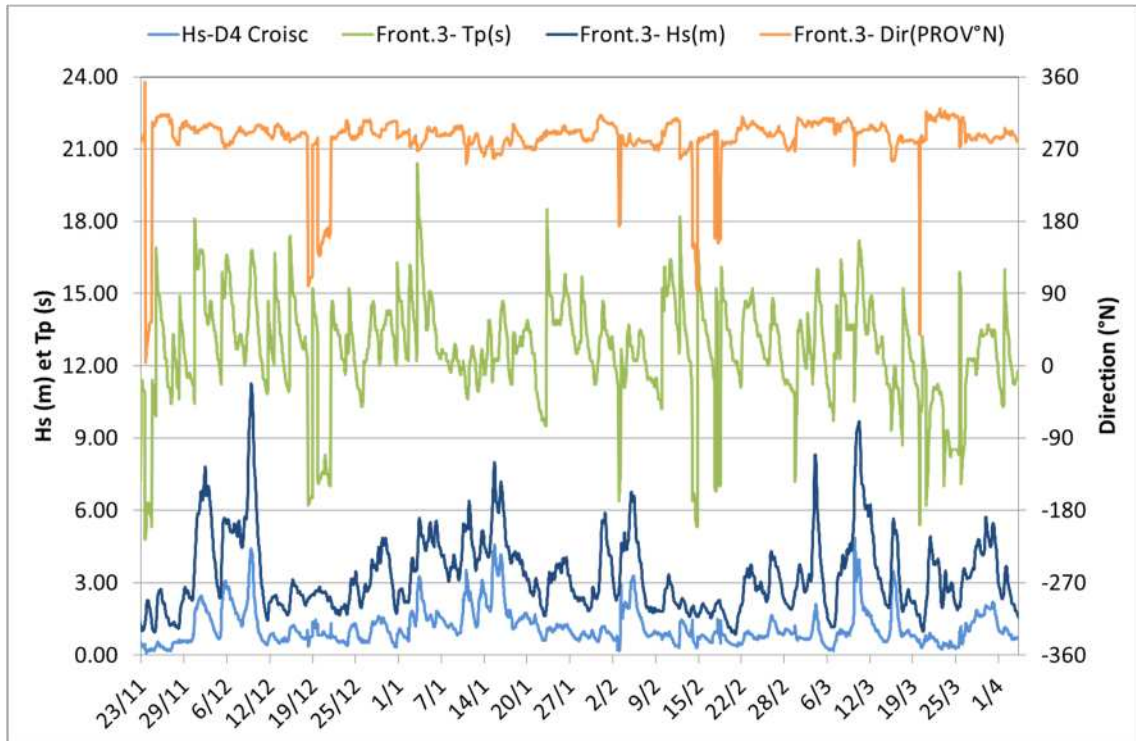
**Figure 17 – Positionnement du point Croisic-D4**

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

Ce premier graphique montre la série temporelle de houle imposée à la frontière 3, et la houle calculée au point Croisic-D4 après propagation, ce qui permet d'estimer la diminution d'énergie en zone côtière.



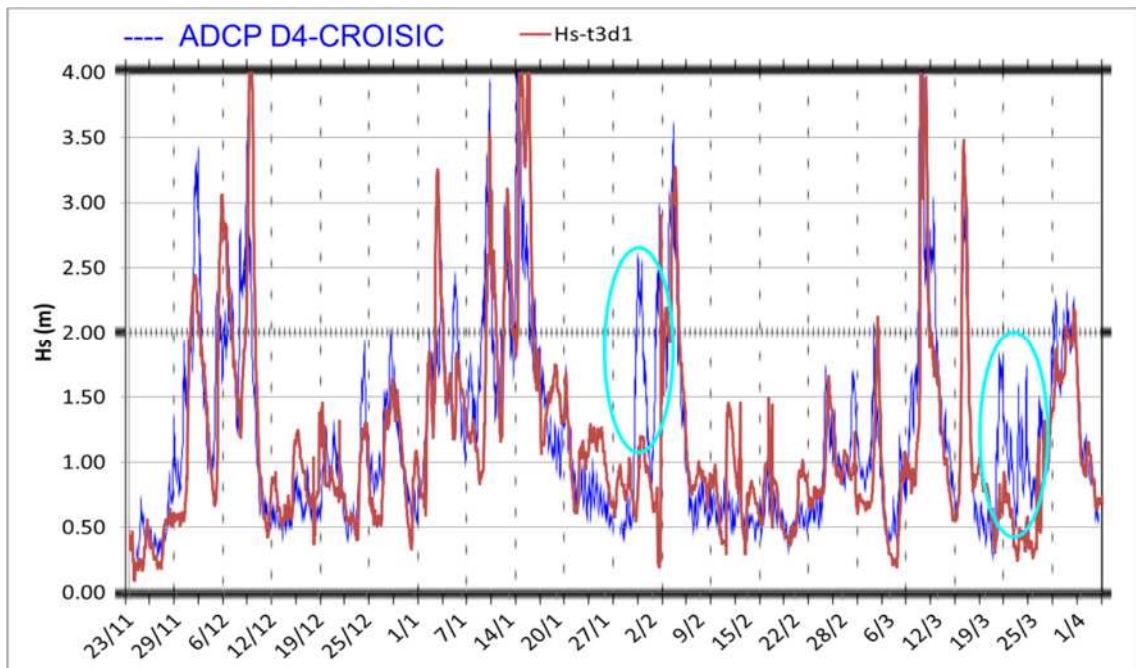
**Figure 18 – Houle imposée à la frontière 3 et houle calculée au point Croisic-D4 après propagation**

Le graphique suivant montre la comparaison directe de la houle mesurée au point Croisic-D4 et la houle calculée à partir de l'interpolation effectuée à partir des 7 bibliothèques. Il est intéressant de voir que les événements sont raisonnablement bien reproduits, cependant certains épisodes (entourés en bleu) ne sont pas représentés. Nous avons donc cherché l'origine de cette différence.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

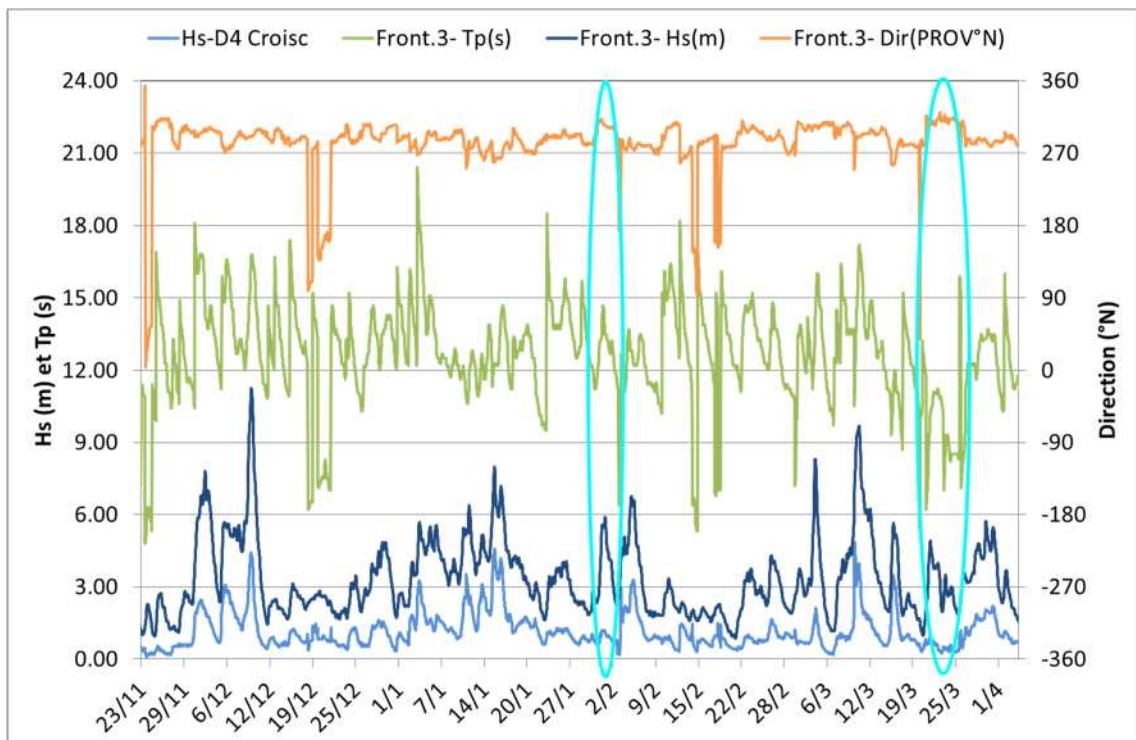
Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 19 – Comparaison de la houle mesurée au point Croic-D4 et de la houle calculée**

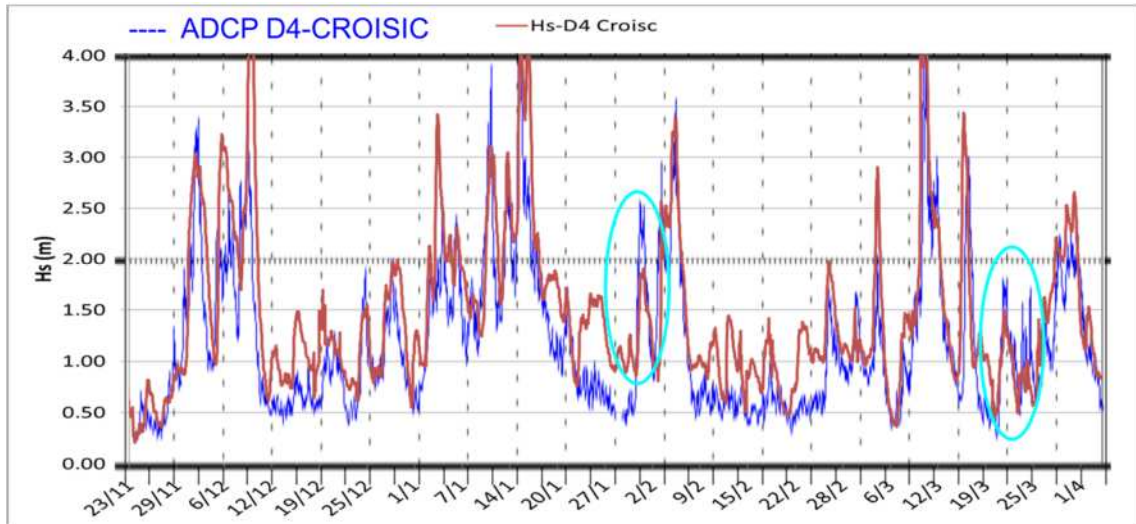
En regardant les périodes correspondantes (en bleu) sur le houlogramme imposé à la frontière, on s'aperçoit que cela correspond à des directions de houles qui ne parviennent pas directement sur le site en suivant la direction principale (env. N315), mais par étalement directionnel.



**Figure 20 – Localisation des périodes défectueuses sur le houlogramme de forçage**

L'étalement directionnel n'étant pas une des variables des données d'entrée des bibliothèques, elle reste fixe pour l'ensemble des calculs. Nous avons donc appliqué un étalement directionnel moyen

plus large que précédemment (33° au lieu de 17°) afin de caler au mieux sur l'ensemble de la période de calage en favorisant les périodes agitées pour lesquels la turbidité est plus importante dans la zone côtière.



**Figure 21 – Comparaison de la houle mesurée au point Croic-D4 et de la houle calculée avec un étalement directionnel moyen calibré**

#### 1.1.4. Modélisation du vent et de la pression atmosphérique

Les champs de pression et vent (modèle EMCWF) ont été projeté sur le maillage du modèle 3D et son donc pris en compte sur les périodes modélisées avec un pas de temps de 3 heures.

## 1.2. MODELISATION HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA PROPOSITION INITIALE

### 1.2.1. Période simulée et forçage hydro-météorologique

Nous simulons une période de 5 ans représentative allant du 1er janvier 2004 au 31 décembre 2008. Les forçages hydro-météorologiques marée, vent, pression et houle sont modélisés comme présentés dans le chapitre précédent. Cette période sera répétée 4 fois, afin d'alimenter suffisamment l'ensemble du plateau continental en sédiment, d'après une première estimation.

### 1.2.2. Débits liquides et débits solides

Seuls les apports liquides et solides de la Vilaine, Loire, Charente, Gironde et Adour sont pris en compte. Les débits journaliers sont issus de la banque hydro et les apports moyens annuels en MES sont imposés de manière plus ou moins simplifiée selon les données disponibles.

Une importante recherche bibliographique a été effectuée pour favoriser les études ayant pu mettre en évidence une relation Débit liquide - Débit solide. Cela permet de forcer des concentrations en fonction des chroniques hydrologiques imposées pour chaque estuaire plutôt que de forcer avec une concentration moyenne annuelle.

#### 1.2.2.1. Vilaine

Les débits liquides intégrés dans les forçages sont les débits journaliers issus de la banque hydro à la station : La Vilaine à Rieux [Pont de Cran].

Les débits solides sont recalculés d'après la relation issues de la Thèse de Caroline TESSIER, 2006 « Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud »

p.174 apports des fleuves :

« Des mesures de MES au barrage d'Arzal ont été faites de 1995 à 1997. La corrélation avec le débit (à Rieux) montre que l'on peut considérer la relation polynomiale » :

$$\text{MES}_{\text{vilaine}} (\text{mg/l}) = 20 + 0.0003 \times (\text{Qliq}_{\text{vilaine}})^2$$

### 1.2.2.2. Loire

Les débits liquides intégrés dans les forçages sont les débits journaliers issus de la banque hydro à la station de Montjean.

Les débits solides sont recalculés d'après la relation issue de l'étude du programme de restauration de la Loire estuarienne en aval de Nantes: 1711822 R10 : Développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire, Lot 1 – Phase 2 - Exploitation du modèle sur l'état actuel - Annexe A- ajustement de la loi de débit solide amont pour le calcul de référence dans l'état actuel (décembre 2010)

Crue (  $Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}+100}$  ) :

$$\text{MES} (\text{g/l}) = 180/2000 * (\text{Q}_j - 500) + 10$$

Décru (  $Q_j < Q_{\text{moyen des 5j précédents} - 100}$  ) :

$$\text{MES} (\text{g/l}) = 80/5000 * (\text{Q}_j - 500) + 10$$

Etat intermédiaire :

$$\text{MES} (\text{g/l}) = 120/3000 * (\text{Q}_j - 500) + 10$$

Ces 3 lois sont bornées

- en limite supérieure par la loi :  $\text{MES} (\text{g/l}) = -70/3500 * (\text{Q}_j - 2000) + 180$
- en limite inférieure par une concentration minimum de 10 mg/l pour un débit inférieur à 500 m<sup>3</sup>/s.

### 1.2.2.3. Charente

Les débits liquides intégrés dans les forçages sont les débits journaliers issus de la banque hydro à la station de La Charente à Jarnac [Mainxe].

Les débits solides sont recalculés d'après les éléments issus de la Thèse Julien MODERAN, 2010. « Estuaire de la Charente : structure de communauté et ecologie trophique du zooplancton, approche ecosystemique de la contamination métallique »

Du fait du manque de données, une loi simple issue du tableau de variabilité temporelle a été appliquée :

$$\text{Si } \text{Qliq}_{\text{charente}} < \text{module} (61 \text{ m}^3/\text{s}) \text{ MES}_{\text{charente}} = 0.01 \text{ g/l}$$

$$\text{Si } \text{Qliq}_{\text{charente}} > \text{module} (61 \text{ m}^3/\text{s}) \text{ MES}_{\text{charente}} = 0.1 \text{ g/l}$$



**1.2.2.4. Garonne et Dordogne**

Les débits liquides intégrés dans les forçages sont les débits journaliers issus de la banque hydro à la station de à Tonneins pour la Garonne et la station de Pessac-sur-Dordogne pour la Dordogne.

Les débits solides sont recalculés d'après les relations issues de la Thèse d' Alexandra COYNEL, 2005. « Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne »

$$\text{MES\_Garonne (mg/l)} = 34.3 \times (\text{Qliq\_garonne} / (1.5 \times 615))^{2.11}$$

$$\text{MES\_Dordogne (mg/l)} = 9.3 \times (\text{Qliq\_dordogne} / (1.5 \times 279))^{2.52}$$

Une limite inférieure a été fixée à 0.01g/l.

**1.2.2.5. Adour**

Les débits liquides intégrés dans les forçages sont les débits journaliers issus de la banque hydro aux stations de :

- L'Adour à Saint-Vincent-de-Paul
- Le Gave d'Oloron à Escos
- Le Gave de Pau à Bérenx [Pont de Bérenx]
- La Nive à Cambo-les-Bains

Les débits solides sont recalculés d'après les relations issues de la Thèse d' Alexandra COYNEL, 2005. « Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne »

$$\text{MES\_Adour (mg/l)} = 58.8 \times (\text{Qliq\_Adour} / (1.5 \times 107))^{0.6}$$

$$\text{MES\_Gaves\_reunis} = 20.3 \times (\text{Qliq\_Gaves\_reunis} / (1.5 \times 184))^{1.95}$$

$$\text{MES\_Nives (mg/l)} = 22.9 \times (\text{Qliq\_Nives} / (1.5 \times 30.9))^{1.2}$$

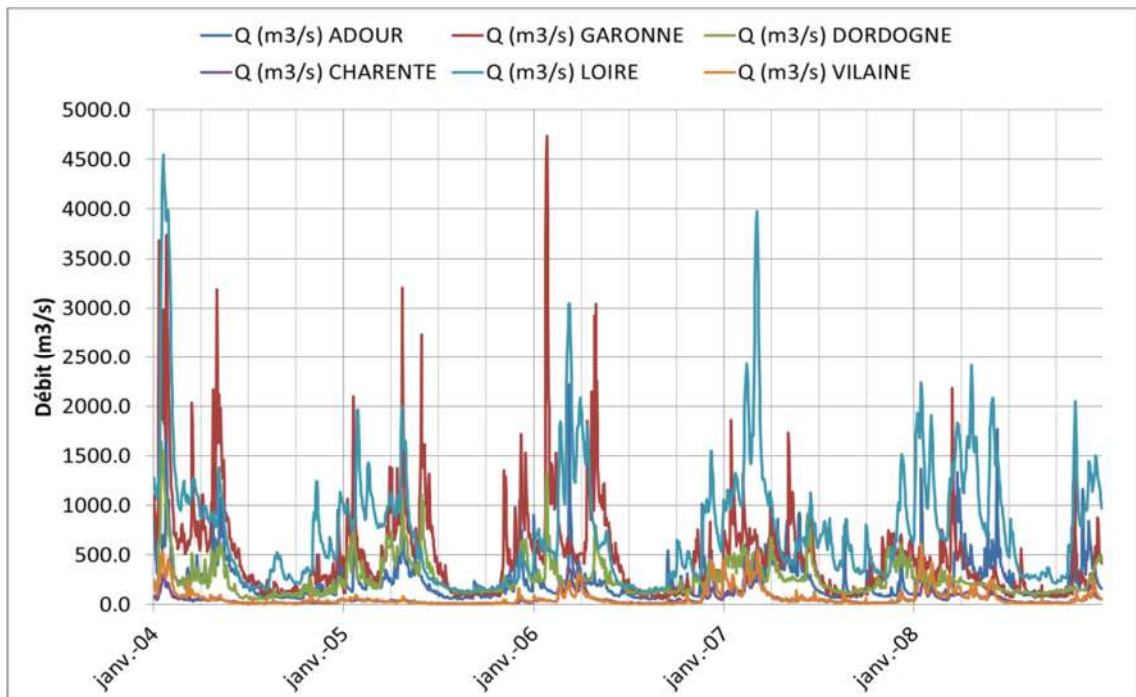
**1.2.2.6. Tous estuaires réunis**

Le graphique suivant donne l'hydrogramme sur la période modélisée pour l'ensemble des fleuves modélisés :

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

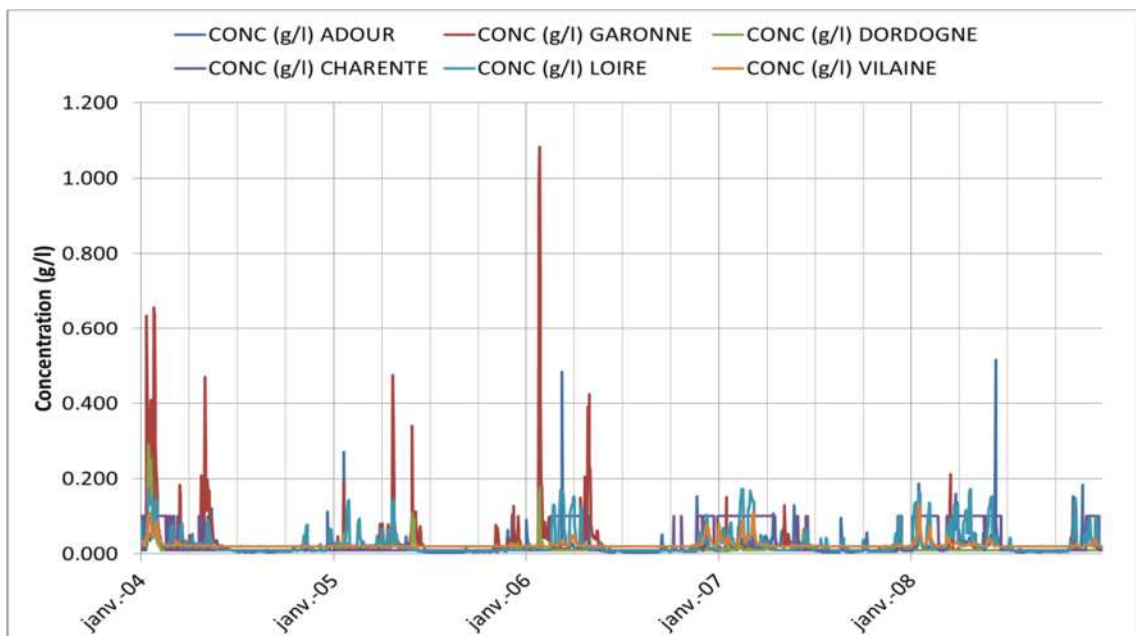
Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 22 – Débit liquide journalier de chacun des fleuves (banque hydro) entre 2004 et 2009**

En utilisant les lois empiriques citées précédemment, les séries temporelles de concentration pour chaque estuaire donne le graphique suivant :



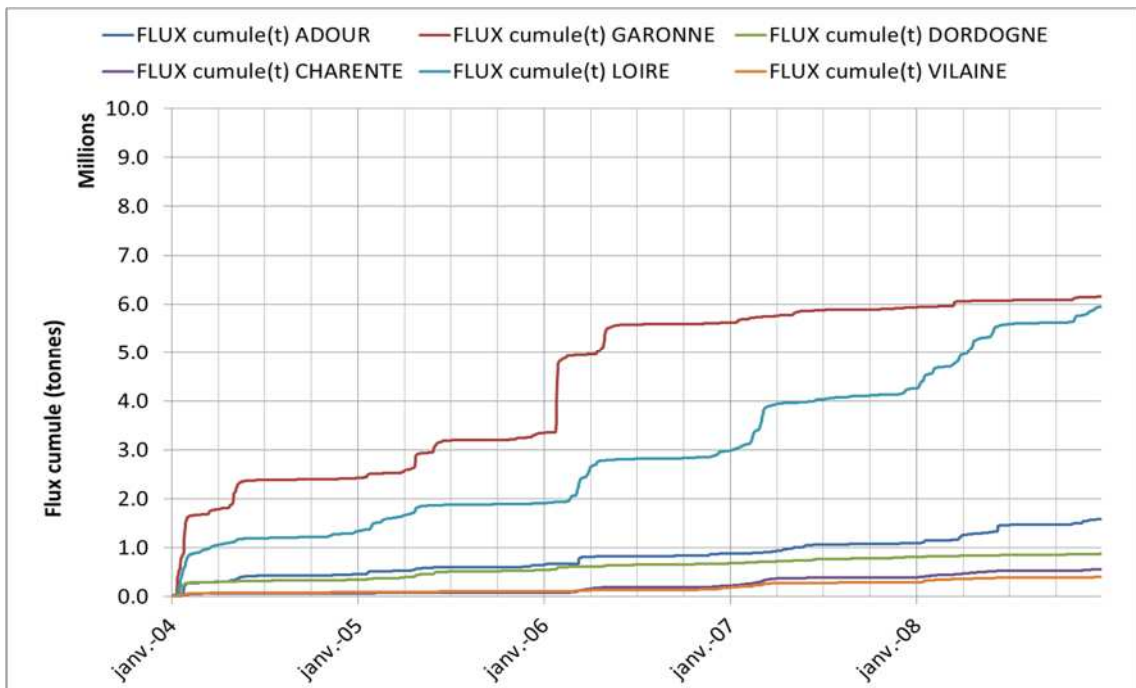
**Figure 23 – Concentration journalière de chacun des fleuves calculée entre 2004 et 2009**

En cumulant les flux journaliers on obtient les apports au bout de 5 ans :

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

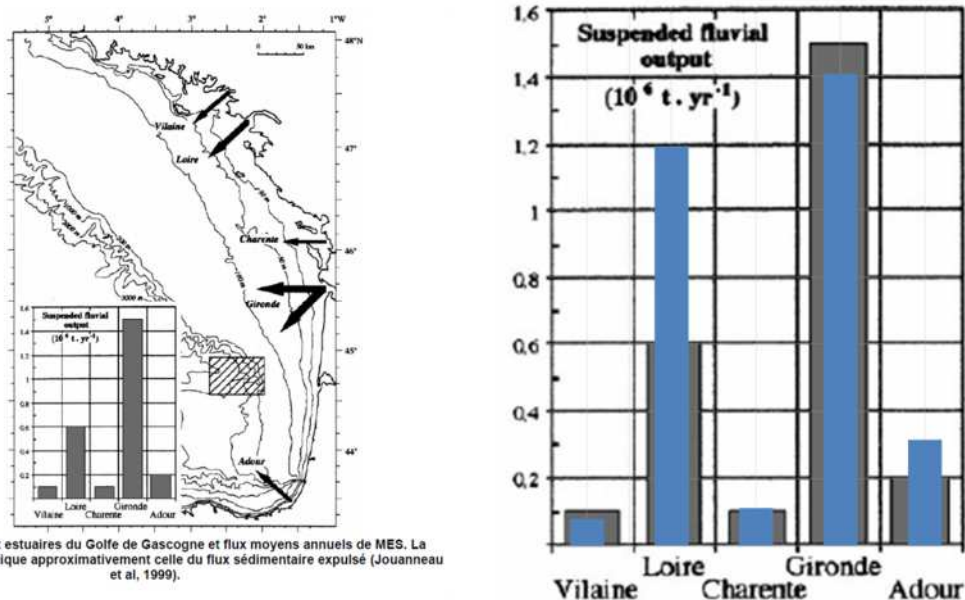
Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 24 – Apports journaliers calculés et cumulés de chacun des fleuves entre 2004 et 2009**

En moyennant ces valeurs sur une année, on peut alors comparer les données de Jouanneau et al. 1999, avec celles calculées ici :



**Figure 25 : Principaux estuaires du Golfe de Gascogne et flux moyens annuels de MES. La direction des flèches indique approximativement celle du flux sédimentaire expulsé (Jouanneau et al, 1999).**

**Figure 25 – Comparaison des apports journaliers calculés moyen annuel des fleuves entre 2004 et 2009 aux estimations de flux sédimentaire expulsés Jouanneau et al. 1999**

On remarque une bonne comparaison sur les estuaires de la Vilaine, la Charente, la Gironde et l'Adour.

Sur l'estuaire de la Loire, la valeur de 1,2 million de tonnes/an, 2 fois supérieure à celle de Jouanneau, est conforme à la récente estimation effectuée par Artelia pour le GIP Loire Estuaire (Artelia, 2010).

### 1.2.3. Processus physiques modélisés

Les processus hydro-sédimentaires sont simplifiés par rapports au modèle 3D de l'estuaire de la Loire utilisé dans les études précédentes, notamment au niveau du tassement : une seule concentration moyenne avec une contrainte moyenne d'érosion sera conservée. Cela permettra d'une part, d'être le plus représentatif en moyenne des différentes vases que l'on peut rencontrer sur le plateau continental. La loi de vitesse de chute en fonction de la concentration est par contre conservée.

## 1.3. RESULTATS ET CONCLUSION

Les résultats sont peu concluants, malgré plus de 15 tentatives de calage des paramètres.

Les paramètres modifiés ont été la vitesse de chute minimum en fonction de la concentration (0.000001-0.01m/s), la contrainte d'érosion critique de la vase (0,01 - 0,3 N/m<sup>2</sup>) et la constante de Partheniades (0.01-0.000001).

Les apports fluviaux sont fortement expulsés tout au long de l'année et alimentent fortement les MES le long de cotes avec des ordres de grandeur 1 à 2 fois supérieurs à ceux mesurés.

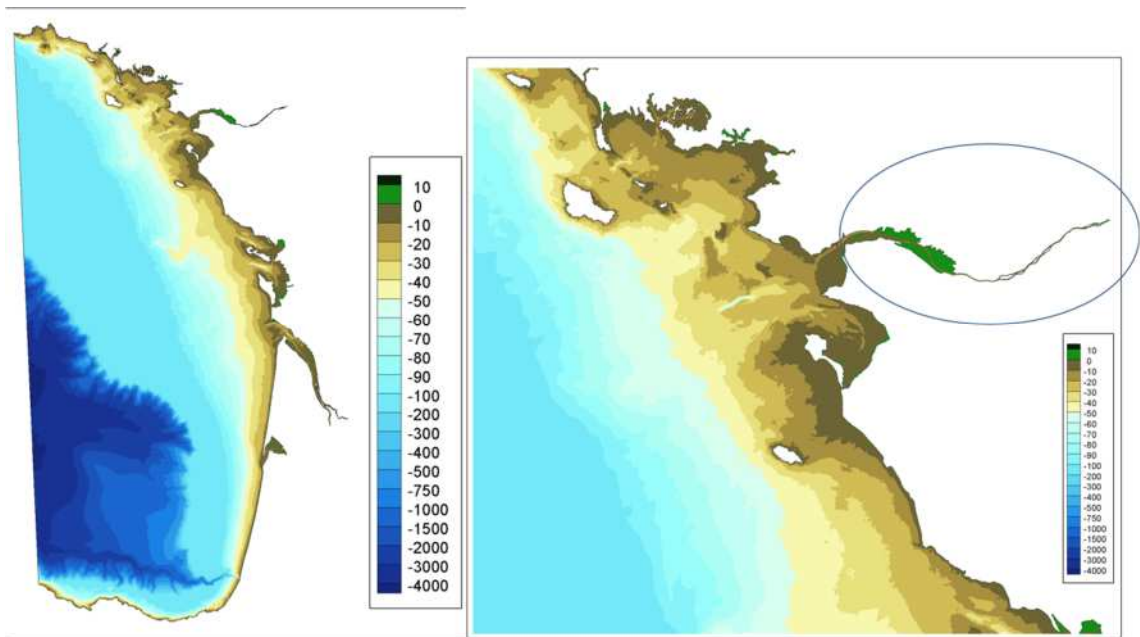
Etant donné que le modèle 3D de l'estuaire de la Loire utilisé dans les études précédentes permettait de reproduire un panache de MES correct au niveau de l'embouchure de la Loire, nous avons émis 2 hypothèses :

Hypothèse 1: la géométrie trop simplifiée (notamment Loire, avec un volume oscillant réduit) ne permet pas de conserver un bouchon vaseux et expulse trop souvent celui-ci.

Hypothèse 2: les processus sédimentologiques sont trop simplifiés et ne permettent pas la reproduction réaliste de bouchons vaseux. En tout cas les paramètres physiques des vases à prendre en compte ne seraient pas les mêmes à l'intérieur des estuaires et à l'extérieur.

## 1.4. INVESTIGATION DE L'HYPOTHESE 1

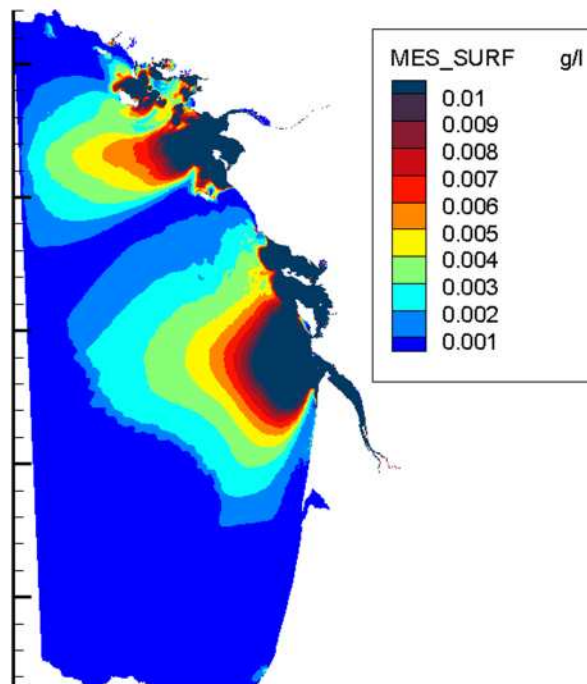
Nous avons fusionné le maillage du modèle de Gascogne, avec le maillage et la bathymétrie du modèle de l'estuaire de la Loire 3D au niveau de l'embouchure



**Figure 26 – Bathymétrie du modèle de Gascogne fusionné avec le modèle Loire 3D**

## 1.5. RESULTATS ET CONCLUSION

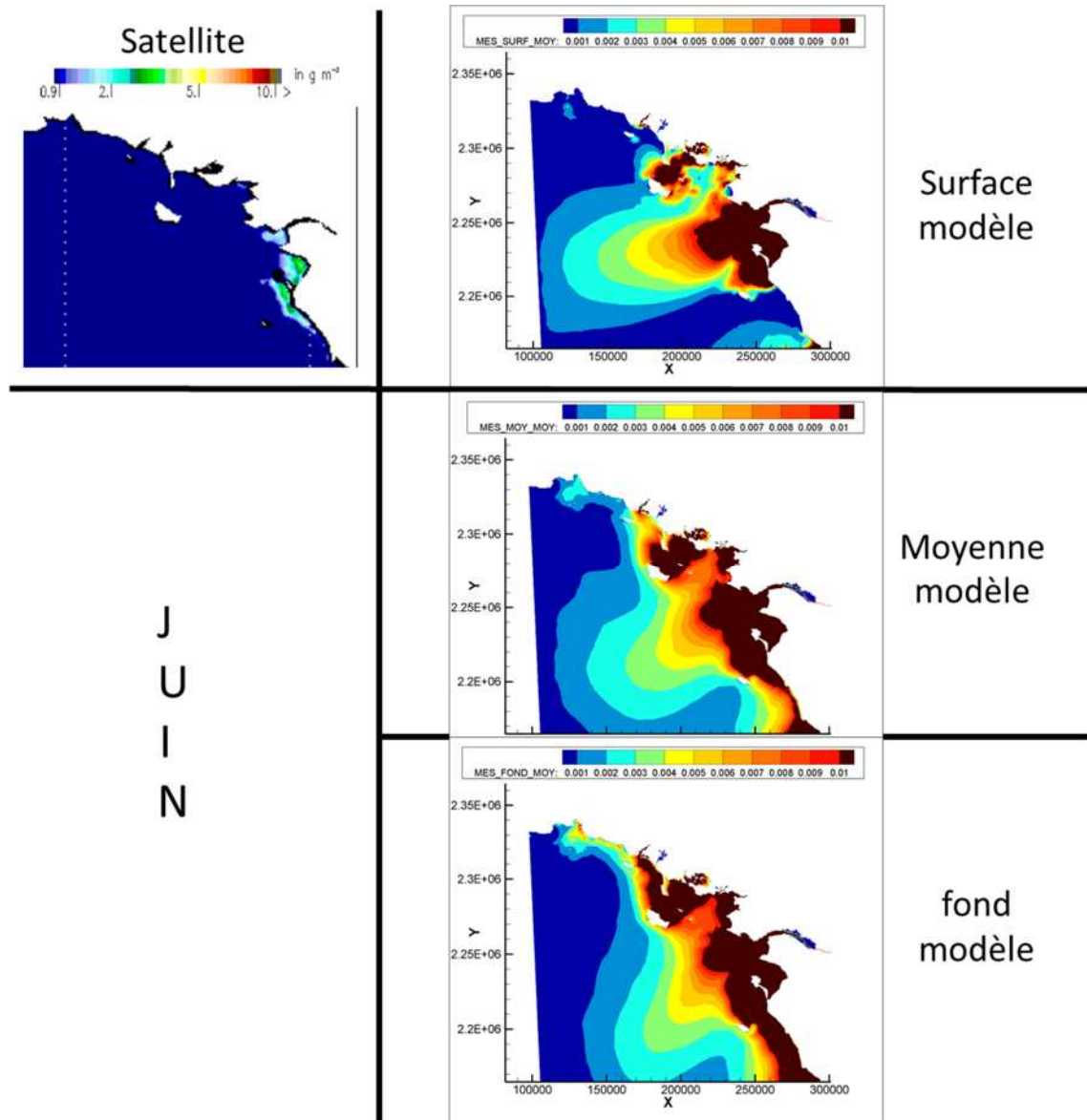
De nouveaux tests avec la même méthodologie ont été effectués et les résultats n'ont pas été plus probants. Les concentrations issues des estuaires sont bien trop importantes tout au long de l'année.



**Figure 27 – Panaches de MES en surfaces calculées après 2 ans de simulations**

Les concentrations calculées restent bien trop importantes, mais il est tout de même intéressant de remarquer que les panaches des deux plus gros estuaires : Gironde et Loire ont peu d'interaction directe, même après deux ans de simulation.

Est présenté à la suite une comparaison des panaches après deux ans, au mois de juin. Ce mois correspond à une période où les concentrations sont assez faibles d'après les images satellites.



**Figure 28 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Juin (moyenne sur 2 ans)**

L'hypothèse 2, reste donc certainement la plus probable, mais l'ampleur du travail à effectuer n'est pas compatible avec l'étude. On rappelle que pour le modèle 3D Loire estuaire, le calage de la dynamique du bouchon vaseux et de la crème de vase a pris entre 1 et 2 ans de travail.

## 2. NOUVELLE METHODOLOGIE

Entre temps, l'état de l'art a évolué et la thèse de Baptiste Mengual (2017) montre qu'il est envisageable d'obtenir des concentrations en MES en zone côtières réalistes (hors panache des fleuves) à partir d'une initialisation du substrat du golfe de Gascogne.

Cela signifie que la turbidité générale côtière est plus liée à la remise en suspension locale de la MES due aux épisodes de tempêtes, qu'aux panaches des estuaires en temps général (la tendance se renverse certainement pour un épisode de crue).

Le but de notre modèle de MES régional n'étant pas spécialement la prise en compte des panaches des fleuves, puisque celui-ci est déjà pris en compte dans notre modèle de précision de l'estuaire de la Loire 3D, nous avons donc adopté cette nouvelle stratégie.

### 2.1. REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE

Le maillage amélioré sur l'estuaire de la Loire (hypothèse 1) a été conservé dans cette nouvelle méthodologie.

Le remplissage sédimentaire du modèle a été effectué à partir des données du projet EMODnet :

Le projet de géologie EMODnet (European Marine Observation and Data network) (<http://www.emodnet-geology.eu/>) collecte et harmonise les données géologiques marines des zones marines européennes afin de faciliter la prise de décision et la planification durable de l'espace maritime. Le partenariat comprend 36 organisations marines de 30 pays. Les partenaires, principalement issus des services maritimes des études géologiques d'Europe, ont rassemblé des informations géologiques marines à l'échelle 1: 1 000 000 de toutes les zones marines européennes. Ces données incluent la carte du substrat marin EMODnet à l'échelle 1: 1 000 000 des zones marines européennes. Traditionnellement, les pays européens ont mené leurs études géologiques marines conformément à leurs propres normes nationales et leurs substrats ont été classés sur la base de leurs systèmes de classification nationaux. Ces classifications nationales sont harmonisées dans un schéma EMODnet commun utilisant le triangle de sédiments de Folk avec une hiérarchie de 16, 7 et 5 classes de substrat. Les données décrivent le substrat marin à partir des 30 cm de sédiments prélevés sous la surface. Les données ont été généralisées dans une échelle cible (1: 1 000 000). La plus petite unité cartographique dans les données est de 4 km<sup>2</sup>. De plus amples informations sur le projet EMODnet-Geology sont disponibles sur le portail (<http://www.emodnet-geology.eu/>).

#### 2.1.1. Répartition spatiale des 7 classes de sédiment

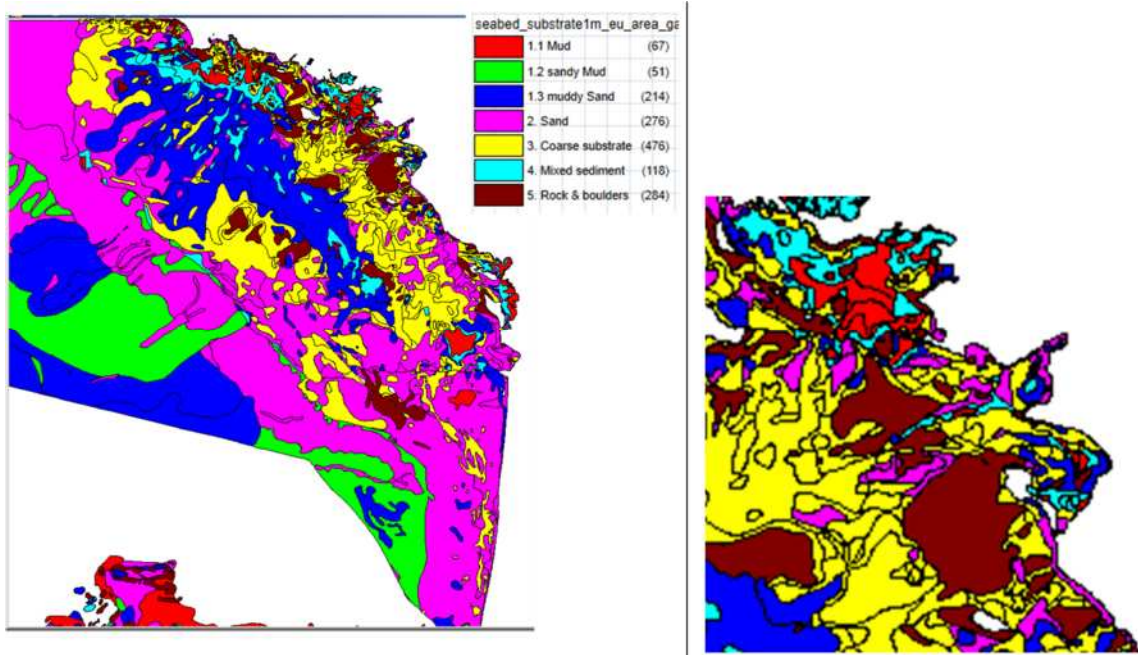
Nous avons utilisé la classification répartie en 7 classes de sédiments. La répartition en 16 classes plus précises, n'étant pas disponible sur l'ensemble de la zone:

Ci-dessous la répartition spatiale issue des données récupérées sous le site EMODnet :

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

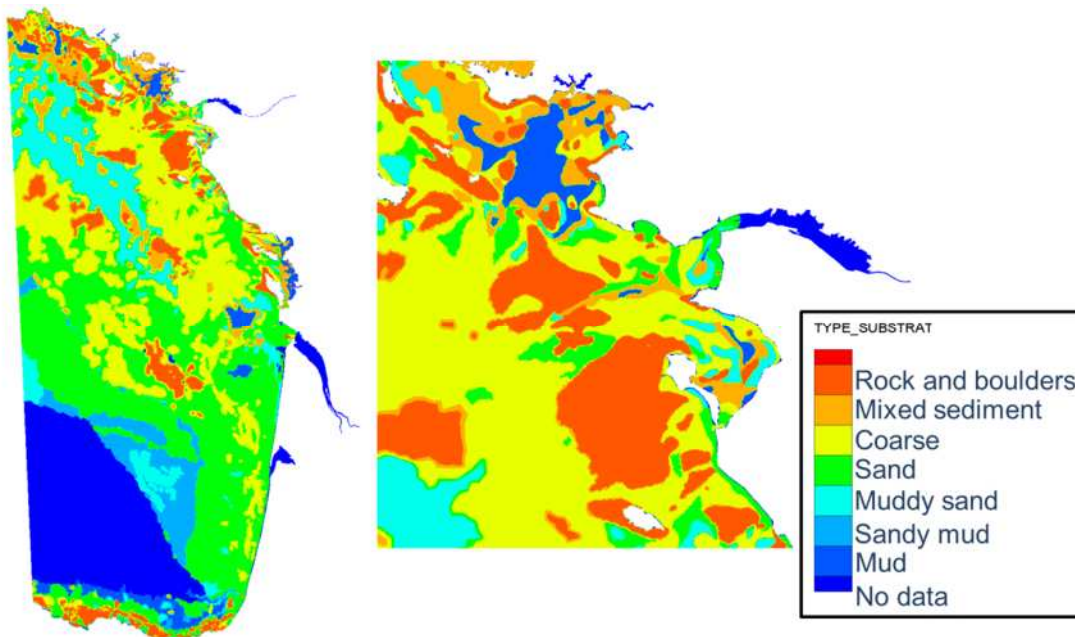
Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 29 – Répartition spatiale des 7 classes de sédiment – source : projet EMODnet**

Cette table a été retravaillée afin que les zones ne soient plus en superposition mais en zones contiguës pour pouvoir les projeter sur notre maillage.

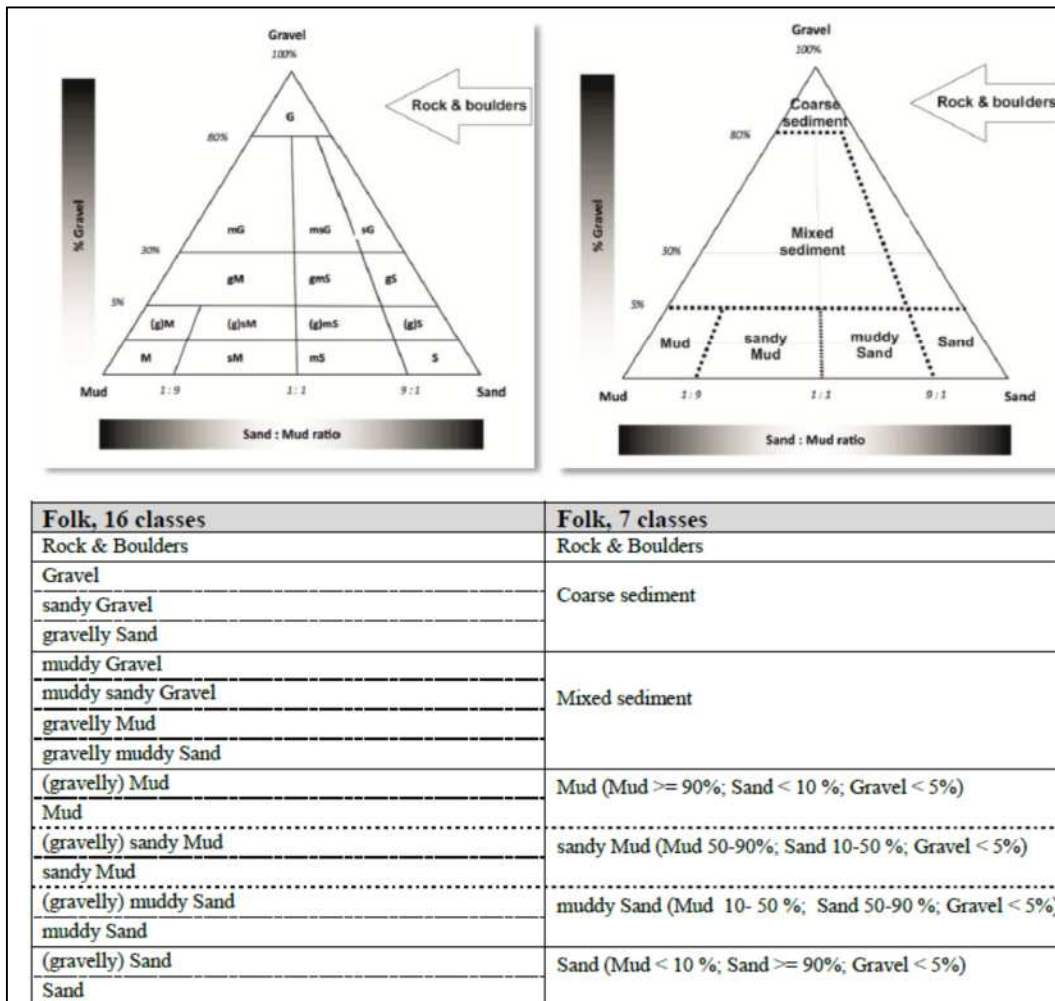


**Figure 30 – Répartition spatiale des 7 classes de sédiment projetée sur le maillage du modèle Gascogne**

On remarquera que le positionnement de notre point ADCP de mesure pour le calage en MES se trouve en limite de plusieurs classes sédimentologiques.

Le triangle de Folk donne une fourchette de pourcentage de chaque type de sédiment pour chaque classe sédimentologique. Le calage du modèle consistera en partie à définir une répartition unique de chaque sédiment pour chaque classe sédimentologique.





**Figure 31 – Définition des classes sédimentologiques (triangles de Folk)**

## 2.2. PROCESSUS PHYSIQUES MODELISES

Les processus hydro-sédimentaires sont simplifiés par rapports au modèle 3D de l'estuaire de la Loire utilisé dans les études précédentes :

- tassement : une seule concentration moyenne avec une contrainte moyenne d'érosion est conservée.
- vitesse de chute : La loi en fonction de la concentration définie dans l emodèle Loire 3D est conservée, sa limite inférieure sera par contre modifiée.
- Seule la classe vase est transportée (cependant, les flux d'érosion tiennent compte de la mixture présente au sol) ;
- La mixture au sol défini initialement n'évolue pas dans le temps, il s'agit d'un paramétrage du modèle.

## 2.3. PARAMETRES RETENUS APRES CALAGE

Plus de 70 calculs ont été nécessaire pour calibrer au mieux le modèle sur la période de novembre 2008 à mars 2009 au point Croisic-D4. Les turbidités mesurées sont principalement dus à des effets de tempêtes. Le calcul dit « 68 » a été retenu.

Le nombre de paramètres étant important et le seul point de mesure étant le point Croisic-D4, ce calage ne s'avère pas être un paramétrage définitif. La validation sur les cartes de turbidités définies par images satellites, permettra d'ailleurs de nuancer les résultats.

A titre informatif :

- Environ 5 tests ont porté sur la turbulence verticale et les schémas numériques
- Environ 25 tests ont porté sur la composition du mélange de chaque classe sédimentologique
- Environ 10 tests ont porté sur les sédiments de type sable et gravier représentatifs à prendre en compte dans les mixtures.
- Environ 5 tests ont porté sur la façon de calculer les flux mixtes en présence de vases, graviers et sables.
- Environ 25 tests ont porté sur les caractéristiques de la vase à prendre en compte (vitesse de chute, constante de Partheniades, contrainte critique d'érosion)

### 2.3.1. Répartition des sédiments dans chaque classe sédimentologique

| Classe sédimentologique | Mud<br>% (in mud-sand mixture) | Sand<br>% (in mud-sand mixture) | Gravel<br>% (in mud-sand-gravel mixture) | Epaisseur initiale<br>(m) |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------|
| Mud                     | 100%                           | 0%                              | 0%                                       | 2                         |
| Sandy mud               | 70%                            | 30%                             | 0%                                       | 2                         |
| Mixed sediment          | 50%                            | 50%                             | 0%                                       | 2                         |
| Muddy sand              | 30%                            | 70%                             | 2,5%                                     | 2                         |
| Sand                    | 0.001%                         | 99.999%                         | 2,5%                                     | 2                         |
| Coarse sediment         | 0%                             | 100%                            | 30%                                      | 2                         |
| Rock                    | 100%                           | 0%                              | 0%                                       | 0                         |

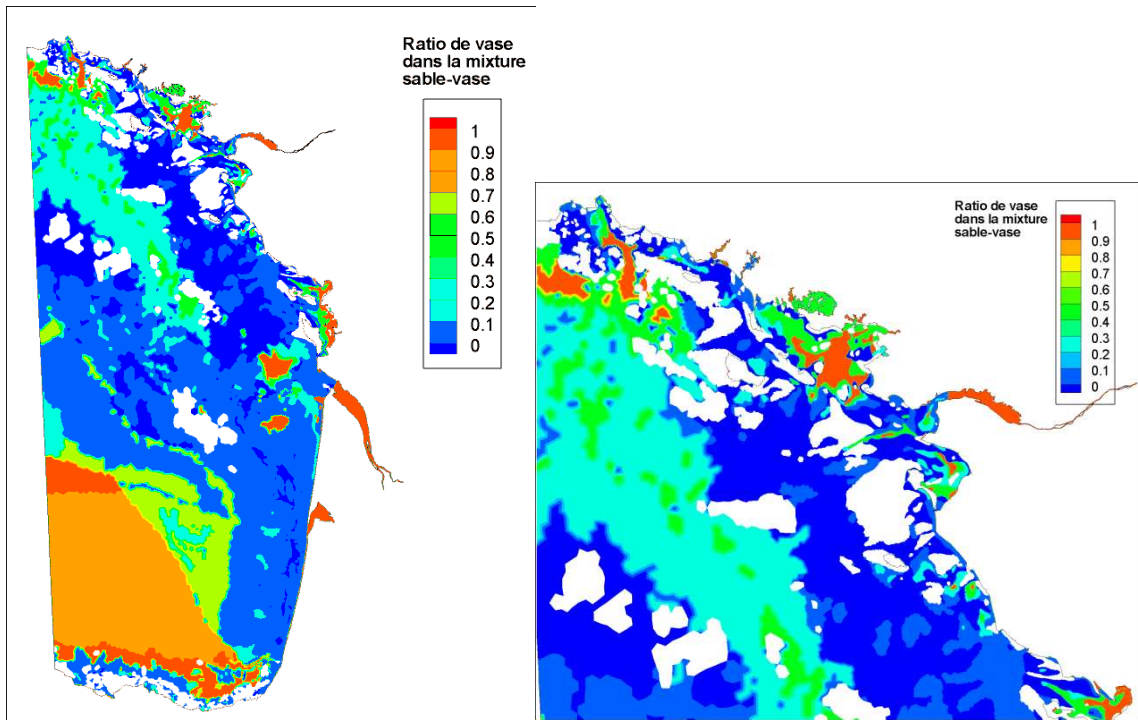
On notera que le rock est considéré comme un fond dur, mais on lui affecte une composition de sédiment de type « Mud ». En effet, s'il y a du dépôt de sédiment sur ce type de sol ce sera obligatoirement de la vase. L'épaisseur initiale affectée à ce type de sol est donc nulle, seul donc du dépôt aura le paramétrage de type « Mud ».

La répartition de sédiment en termes de pourcentage dans le modèle est présentée sur les figures suivantes :

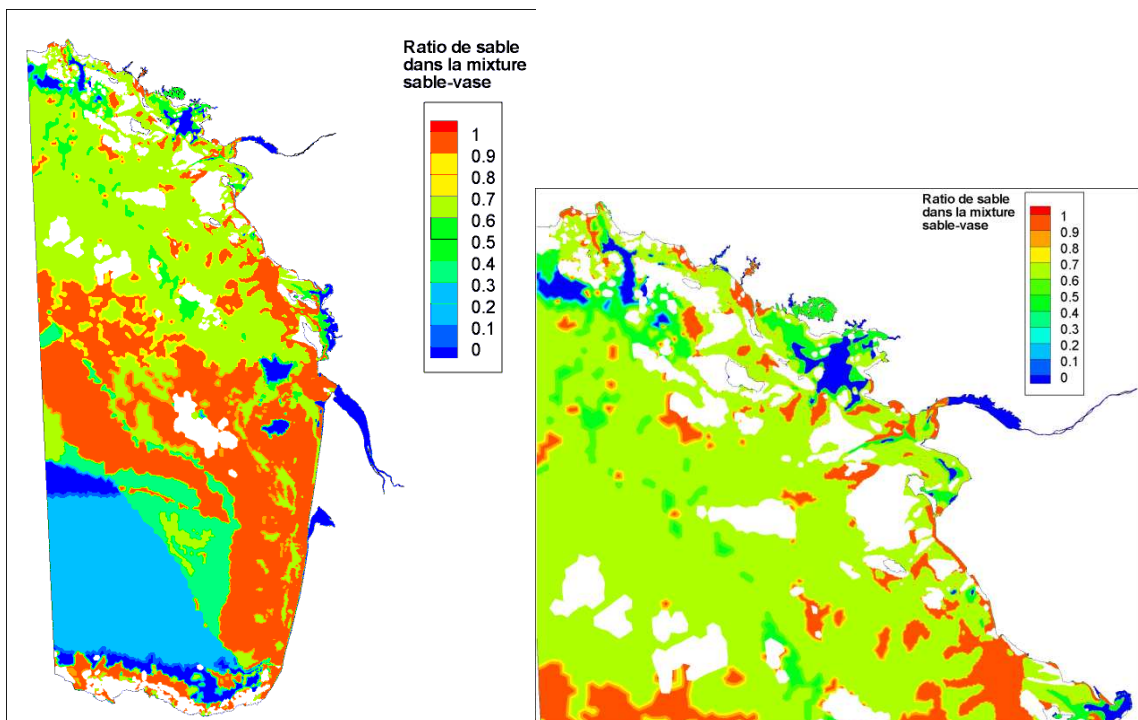
**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

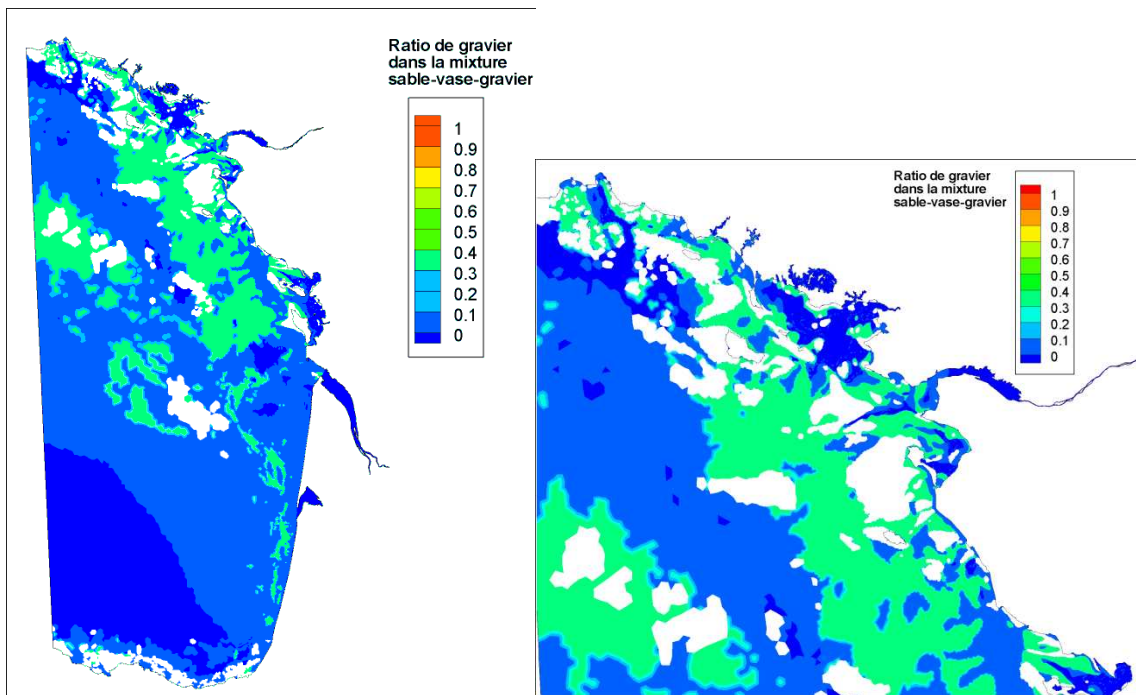
RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 32 – Ratio de vases dans la mixture sable-vase (en blanc le rock)**



**Figure 33 – Ratio de sable dans la mixture sable-vase (en blanc le rock)**



**Figure 34 – Ratio de gravier dans la mixture sable-vase-gravier (en blanc le rock)**

## 2.3.2. Paramètre physiques des sédiments

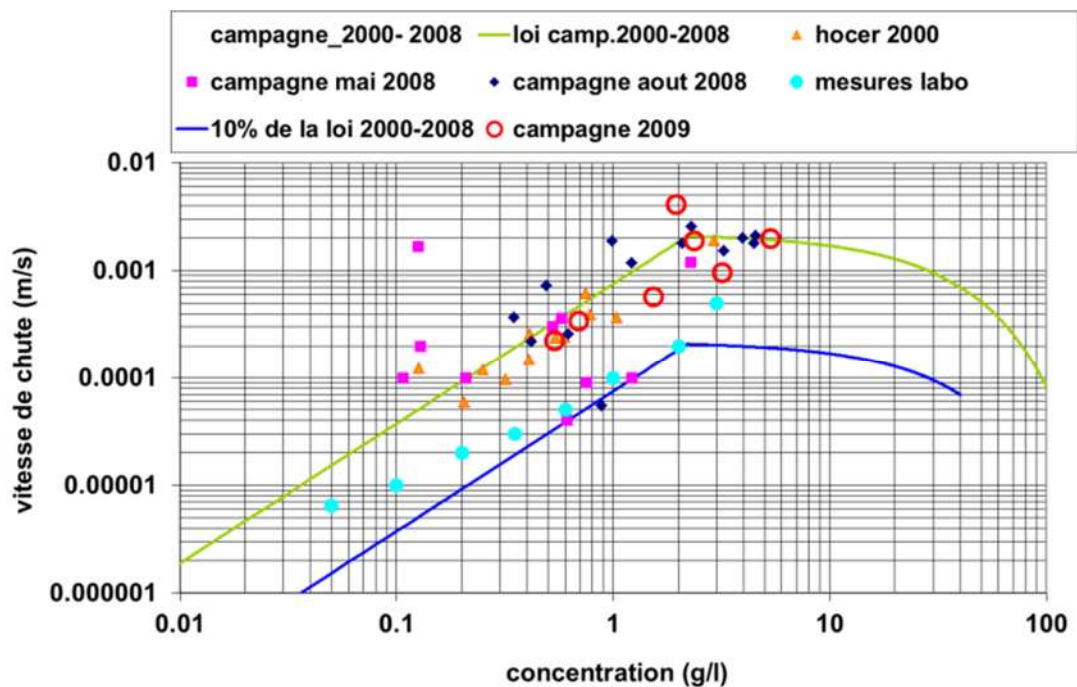
### 2.3.2.1. Vases

La contrainte critique des vases est fixée à  $0.1 \text{ N/m}^2$

La constante de Partheniades est fixée à  $1 \cdot 10^{-6}$  (paramètre multiplicatif du flux d'érosion)

La loi de vitesse de chute en fonction de la concentration définie dans le modèle Loire 3D pour la Lambarde est conservée, seule sa limite inférieure est modifiée.

La courbe verte dans la figure suivante est donc utilisée mais au lieu d'utiliser une vitesse de chute minimum de  $0,1 \text{ mm/s}$ , il est appliqué un minimum de  $0,015 \text{ mm/s}$ .



**Figure 35 – Courbe de vitesse de chute en fonction de la concentration**

### 2.3.2.2. Sables

Diamètre moyen représentatif : 0,2 mm

La contrainte critique correspondante est fixée à 0,176 N/m<sup>2</sup>

La vitesse de chute correspondante est fixée à 0.02 m/s

### 2.3.2.3. Graviers

Diamètre moyen représentatif : 8 mm

La contrainte critique correspondante est fixée à 6,93 N/m<sup>2</sup>

La vitesse de chute correspondante est fixée à 0.359 m/s

### 2.3.2.4. Contraintes critiques des mixtures et flux d'érosions

La contrainte critique de la mixture dépend du mélange et du pourcentage de chaque sédiment :

- Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est inférieure à ~0,3, la contrainte critique est plus importante que celle d'un sable pur. La vase qui s'infiltré dans les pores ne complète pas totalement le vide entre les grains de sables. La cohésion du mélange est encore due aux contacts des grains de sables entre eux (b).
- Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est supérieure à ~0,3, les vases qui se sont infiltrées entre les pores ne permettent plus le contact des grains de sable entre eux. La contrainte critique diminue alors (c).
- Lorsque la fraction massique de la vase dans un mélange est supérieure à ~0,5, on peut considérer que le mélange se comporte comme de la vase pure.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

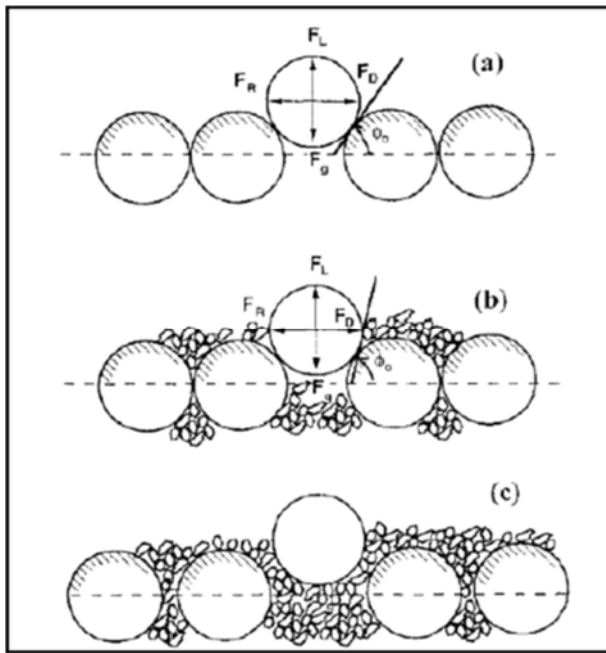


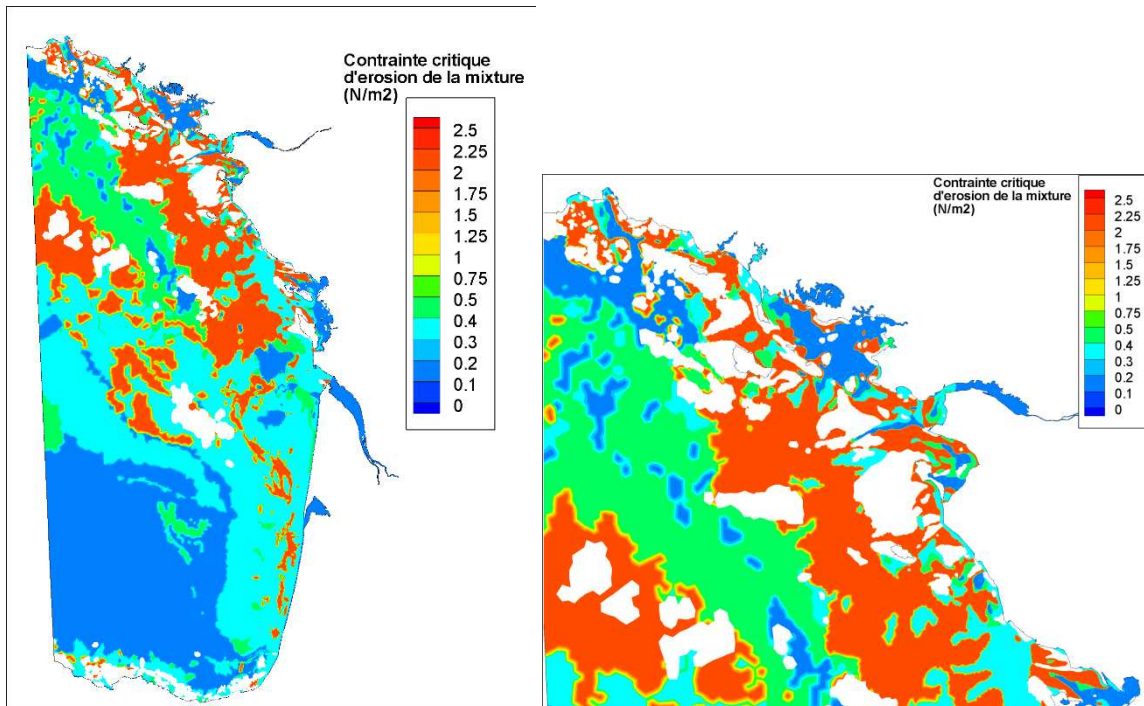
Schéma conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement pour :

- (a) Un sable pur (particules sableuses sphériques d'une seule taille) ;
- (b) Un sédiment mixte sable/vase tel que la fraction vaseuse ( $f_{vas}$ ) est inférieure à 30% ;
- (c) Un sédiment mixte sable/vase tel que la fraction vaseuse ( $f_{vas}$ ) est supérieure à 30%.

(Panagiotopoulos et al., 1997)

**Figure 36 – Schéma conceptuel montrant les mécanismes de mise en mouvement, (Panagiotopoulos et al., 1997)**

Ci-dessous est représenté la carte des contraintes critiques suivant la répartition des classes sédimentologiques.



**Figure 37 – Contraintes critiques recalculées à partir de la répartition des classes sédimentologiques**

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

En termes de flux, le code calcule un flux en sable pur et un flux en vase pure, mais en utilisant la contrainte critique du mélange. Selon la nature du mélange présent dans la couche traitée, un flux de mélange est déduit et rapporté à la fraction massique de chaque classe de sédiment.

Pour la vase pure, la formulation de Krone est utilisée et pour les sables et gravier, le modèle 1DV TRANPOR 2004 (Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas, Leo . van Rijn) est utilisé.

**2.3.2.5. Récapitulatif des valeurs de calage retenus (calcul 68)****Paramètres physiques calcul 68**

| Paramètres physiques                              | Mud                                       | <u>Sable</u>           | <u>Gravier</u>        |
|---|---|------------------------|-----------------------|
| <b>Calcul 68</b>                                  |   |                        |                       |
| Diamètre représentatif                            | -   | 0.2 mm                 | 8 mm                  |
| Contrainte d'érosion critique (N/m <sup>2</sup> ) | 0.1 N/m <sup>2</sup>                      | 0.076 N/m <sup>2</sup> | 6.93 N/m <sup>2</sup> |
| Vitesse de chute (m/s)                            | Loi avec borne minimale :<br>0.000015 m/s | 0.02 m/s               | 0.359 m/s             |
| Constante de Partheniades                         | 0.000001                                  | -                      | -                     |

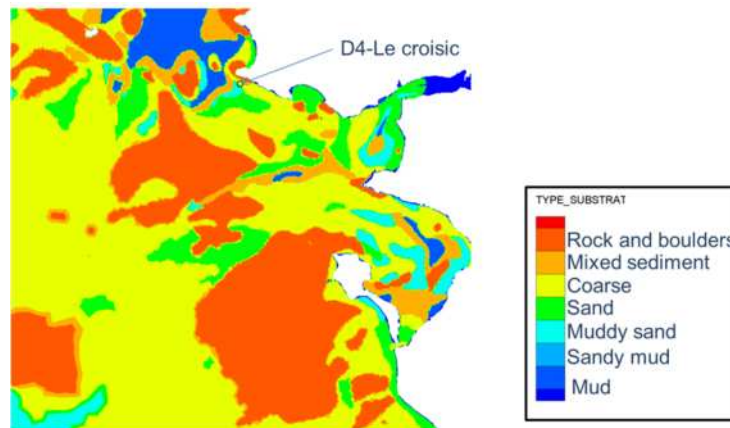
**Mélange des sédiments pour chaque classe sédimentologique calcul 68**

| Classe sédimentologique | Mud<br>% (in mud-sand mixture) | Sand<br>% (in mud-sand mixture) | Gravel<br>% (in mud-sand-gravel mixture) | Epaisseur initiale (m) |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|------------------------|
| <b>Calcul 68</b>        |                                |                                 |  |                        |
| Mud                     | 100%                           | 0%                              | 0%                                       | 2                      |
| Sandy mud               | 70%                            | 30%                             | 0%                                       | 2                      |
| Mixed sediment          | 50%                            | 50%                             | 0%                                       | 2                      |
| Muddy sand              | 30%                            | 70%                             | 2,5%                                     | 2                      |
| Sand                    | 0.001%                         | 99.999%                         | 2,5%                                     | 2                      |
| Coarse sediment         | 0%                             | 100%                            | 30%                                      | 2                      |
| Rock                    | 100%                           | 0%                              | 0%                                       | 0                      |

## 2.4. RESULTATS

### 2.4.1. Comparaison au point de mesure Croisic-D4

Le point Croisic-D4 se trouve à une profondeur d'environ -19 m CM, à la jonction de plusieurs classes de substrat.



**Figure 38 – Positionnement du point Croisic-D4**

Le modèle a simulé la période du 1<sup>er</sup> janvier 2004 au 1<sup>er</sup> janvier 2009. Les mesures datant de novembre 2007 à mars 2008, cela signifie que le modèle est initialisé pendant 3 ans et 10 mois au préalable.

On compare ci-dessous les mesures ADCP : Houle, MES au Fond et MES en surface. On remarquera que les mesures en surface de la turbidité mesurée par un ADCP placé au fond ne semblent pas très fiables. On avait déjà pu remarquer cela lors des mesures sur la Lambarde pour lesquels des mesures de surface (YSI ou OBS) avaient contredit les mesures par ADCP en surface. Comme pour la Lambarde, on voit que la mesure en surface est plus importante que celle à -5m sous la surface, ce qui ne semble pas vraiment réaliste, sauf s'il s'agit de matière organique dans quel cas il faudrait pouvoir la séparer de la matière minérale.

Sur la réponse du modèle, on voit que la mesure au fond répond naturellement plus en phase avec les forçages de la houle.

Il a été délicat dans la partie calage, de ne pas obtenir des valeurs de concentrations trop importantes pendant les tempêtes et de conserver des concentrations de l'ordre de 10 mg/l lors des périodes de calme. En effet, cela nous a imposé d'avoir des vitesses de chutes très faibles pour les petites concentrations, mais aussi d'avoir une contrainte critique d'érosion assez faibles. Ce dernier paramètre qui implique que des érosions ont lieu très rapidement a été contrôlé par une très faible valeur du coefficient de Partheniades qui permet de limiter les flux.

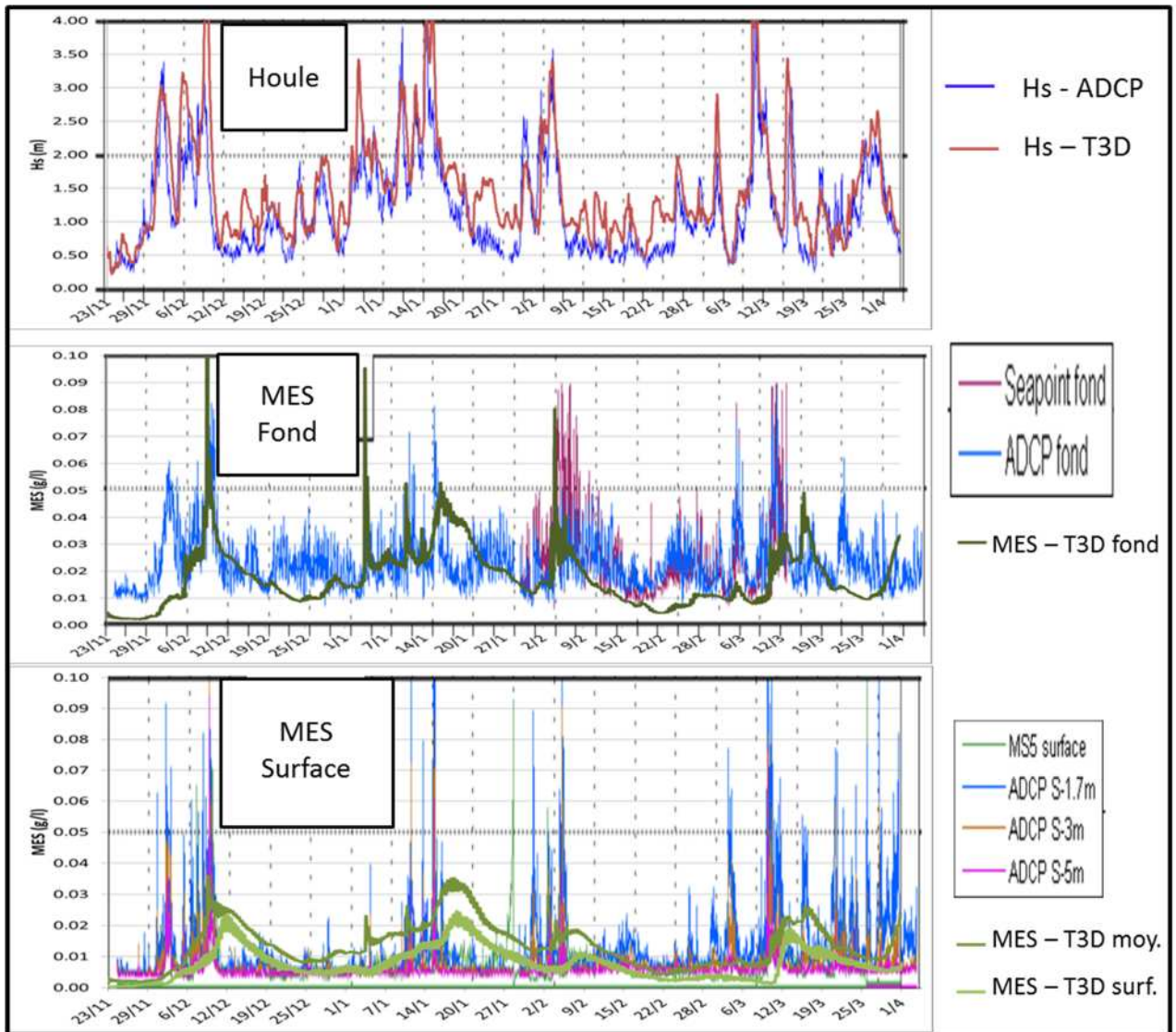
La comparaison à la surface est moins probante car plus lissée. La réponse du modèle est moins en phase avec les forçages dues aux faibles valeurs de vitesses de chute imposées.



**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 39 – Comparaison des mesures ADCP au résultat du modèle (calcul 68) retenu au terme du calage**

Il est à noter qu'il a été possible d'obtenir des résultats en surface plus en corrélation avec la mesure locale (calcul 64 à la suite par exemple), par contre les panaches de surface, moyenne et fond semblent être décorrélés des images satellites de MES.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

Les paramètres du calcul 64 sont les suivant (en rouge ce qui est différent du calcul 68 et entre parenthèse la valeur prise dans le calcul 68) :

**Paramètres physiques calcul 64**

| Paramètres physiques<br>Calcul 64                 | Mud  | <u>Sable</u>           | <u>Gravier</u>        |
|---|--|------------------------|-----------------------|
| Diamètre représentatif                            | -  | 0.2 mm                 | 8 mm                  |
| Contrainte d'érosion critique (N/m <sup>2</sup> ) | 0.1 N/m <sup>2</sup>   | 0.076 N/m <sup>2</sup> | 6.93 N/m <sup>2</sup> |
| Vitesse de chute (m/s)                            | Loi avec borne minimale :<br><b>0.000035 m/s</b><br>(0.000015 m/s) | 0.02 m/s               | 0.359 m/s             |
| Constante de Partheniades                         | 0.000001   | -                      | -                     |

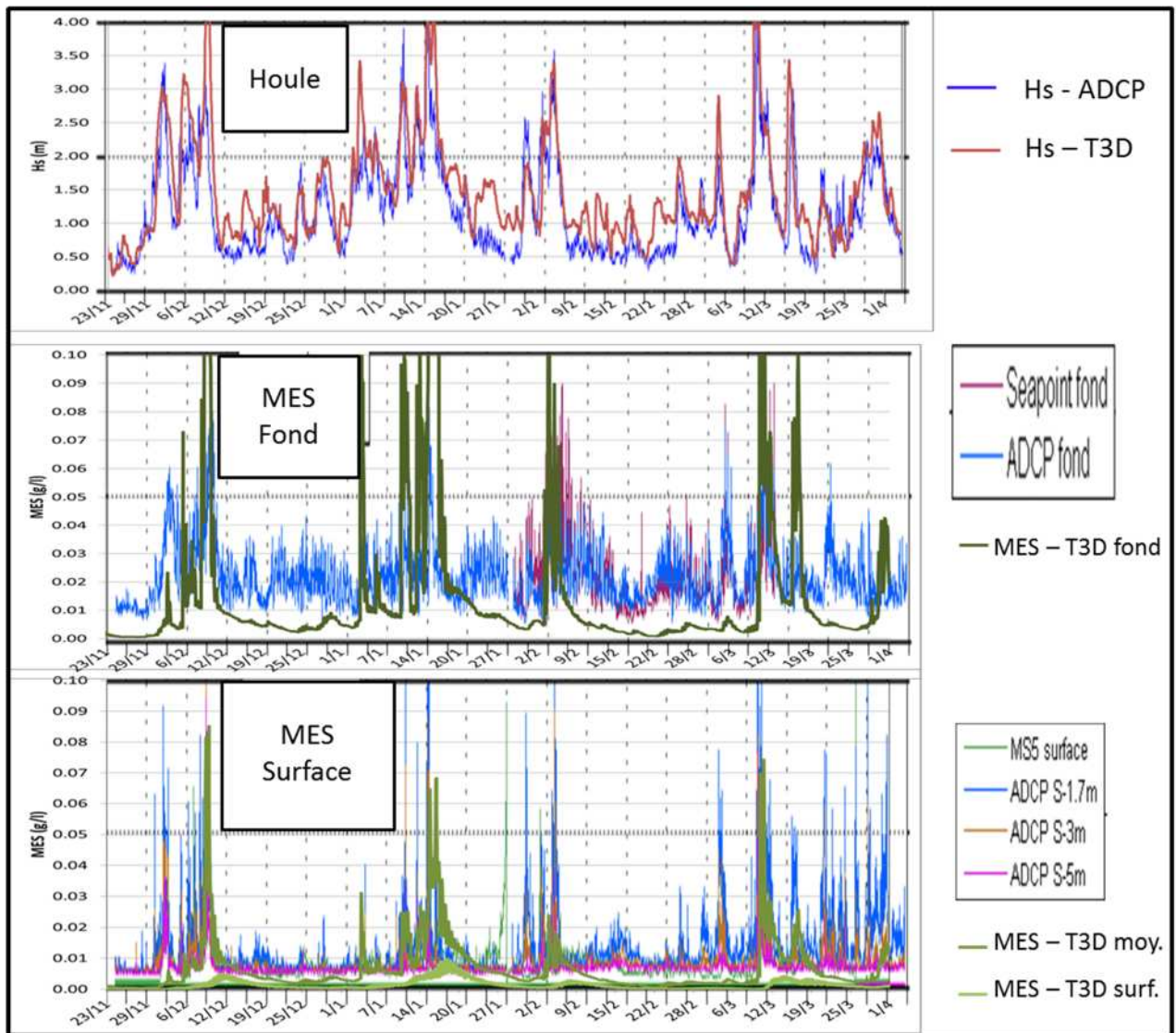
**Mélange des sédiments pour chaque classe sédimentologique calcul 64**

| Classe sédimentologique<br>Calcul 64 | Mud<br>% (in mud-sand mixture) | Sand<br>% (in mud-sand mixture) | Gravel<br>% (in mud-sand-gravel mixture) | Epaisseur initiale (m) |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|------------------------|
| Mud                                  | <b>90%</b><br>(100%)           | <b>10%</b><br>(0%)              | <b>2.5%</b><br>(0%)                      | 2                      |
| Sandy mud                            | <b>60%</b><br>(70%)            | <b>40%</b><br>(30%)             | <b>2.5%</b><br>(0%)                      | 2                      |
| Mixed sediment                       | 50%                            | 50%                             | <b>30%</b><br>(0%)                       | 2                      |
| Muddy sand                           | <b>25%</b><br>(30%)            | <b>75%</b><br>(70%)             | 2,5%                                     | 2                      |
| Sand                                 | <b>0%</b><br>(0.001%)          | <b>100%</b><br>(99.999%)        | 2,5%                                     | 2                      |
| Coarse sediment                      | 0%                             | 100%                            | 30%                                      | 2                      |
| Rock                                 | 100%                           | 0%                              | 0%                                       | 0                      |

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 40 – Comparaison des mesures ADCP au résultat du modèle (calcul 64)**

On notera aussi que les proportions de chaque sédiment influent énormément sur le résultat. Même l'ajout de moins de 1% de vase dans la classe sable, suffit à rendre bien trop turbide tout l'ensemble du littoral.

Suite à l'ensemble des résultats obtenus, il est probable qu'il soit nécessaire de modéliser deux types de vases pour obtenir à la fois :

- Un type de vase qui représente certainement la majeure partie des dépôts du fond qui permet de reproduire les pics de concentrations mesurés pendant les tempêtes à l'intérieur de la colonne d'eau et qui rechute assez vite.
- Un type de vase plus fine avec de faibles vitesses de chute qui représente certainement une faible fraction, mais qui permet d'avoir des concentrations au fond de la colonne d'eau lors des périodes de calme et qui représente certainement la majeure partie des panaches de surface moyennés par les images satellites lors des périodes plus agitées.

Le calage du calcul 68 est certainement un compromis des paramètres pour obtenir un résultat correct dans la colonne d'eau avec une seule vase et acceptable en terme de panache de surface par rapport aux images satellites.

## 2.4.2. Comparaison au mesures satellites de surface

Les images satellite sont présentées en moyenne pour les mois de janvier, mars, juin et novembre.

On notera que les échelles de couleurs sont entre 1 et 10 mg/l. On compare donc un gradient de très faible amplitude dans de très faibles valeurs. On se donne généralement en mesure non direct de MES (ADCP,optique...) une limite de validité à 10 mg/l, ce qui est ici la valeur maximale de l'échelle.

Le modèle ayant simulés les années 204 à 2009, nous avons moyennés les résultats par mois pour comparaison. On remarque de suite, que la MES moyennée sur la colonne d'eau correspond mieux aux images satellites en termes de forme. Cependant, les MES mesurées au large notamment au mois de janvier ne sont pas obtenues. Cela laisse penser que pour obtenir des remises en suspension à ces profondeurs (hors chalutage, voir thèse de Baptiste Mengual) il faudrait une fraction de vase très facilement remobilisable, qui ne peut cependant pas se trouver sur le milieu côtier en quantité importante.

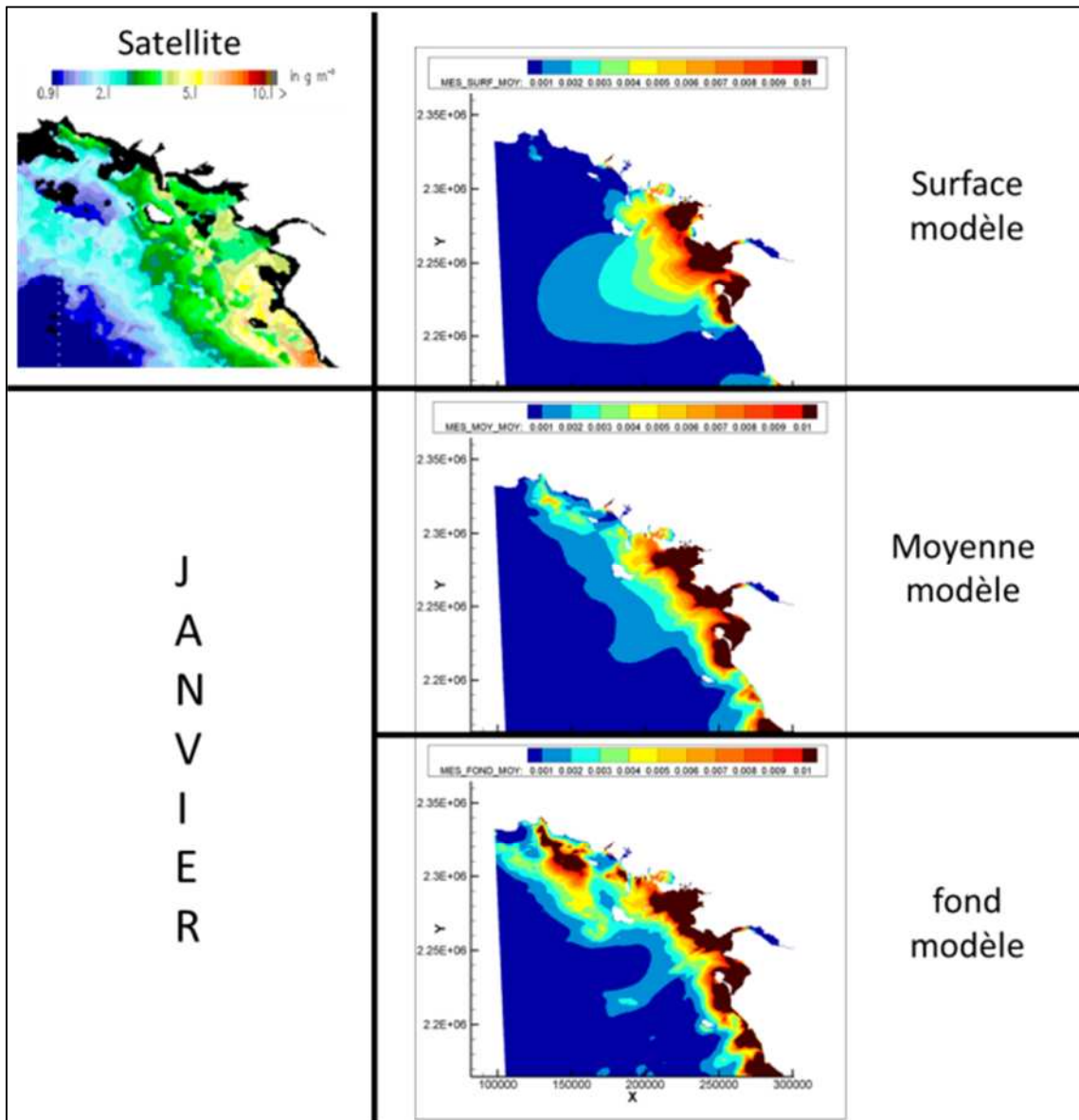
Les Mes calculées aux abords de la vilaine semblent être surestimées quelques soit la période. On peut penser que le substrat vaseux de la baie est plus consolidé que ce qui est appliqué dans le modèle. La difficulté rencontrée est d'appliquer un caractère unique à la vase pour l'ensemble du golfe de Gascogne.

Cependant, l'on retrouve bien les tendances avec un mois janvier turbide qui contraste avec un mois de juin peu turbide si ce n'est dans le sud Loire et la baie de Bourgneuf. Les mois de Mars et Novembre étant intermédiaire.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

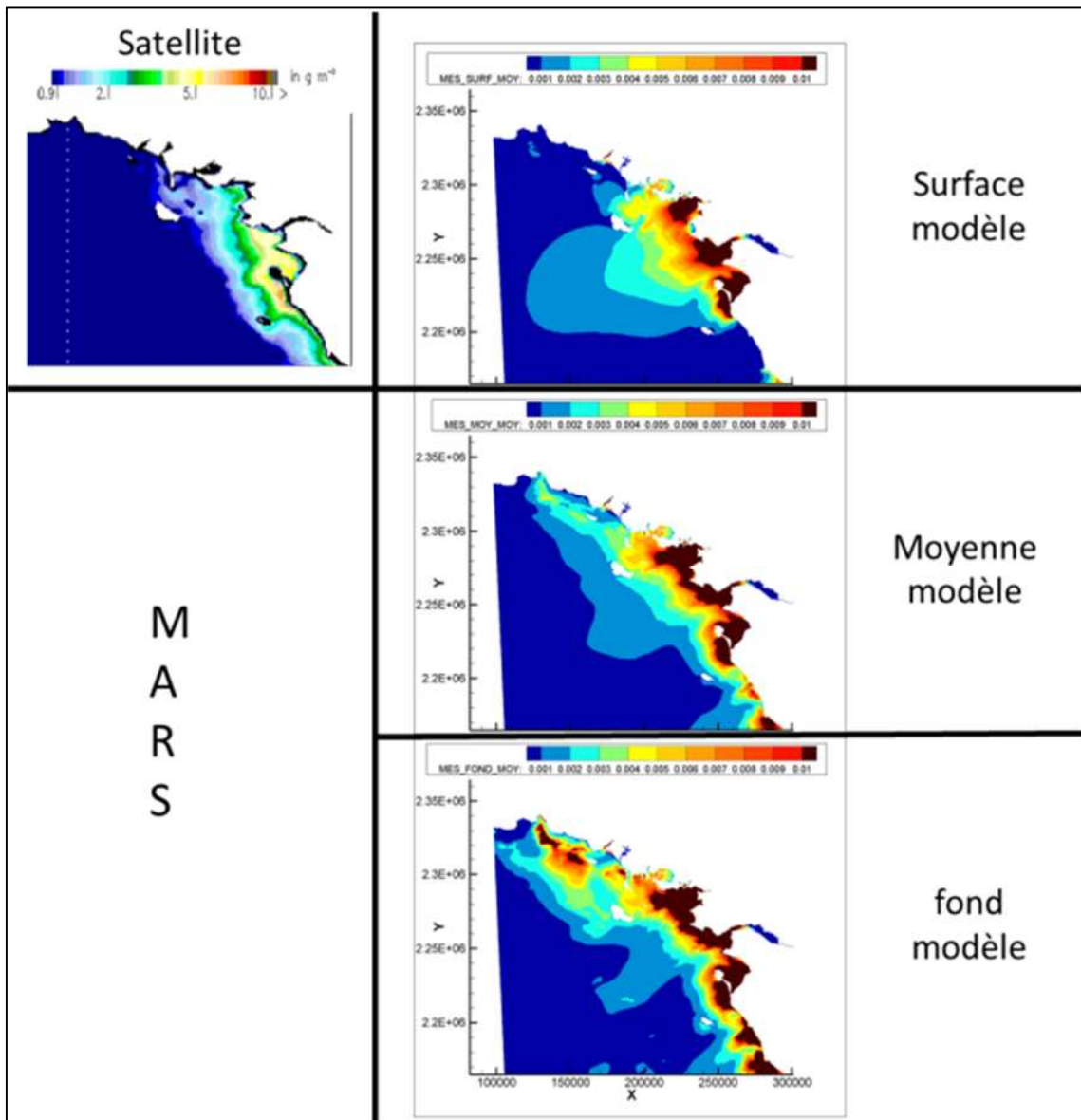


**Figure 41 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Janvier (moyenne sur 5 ans)**

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

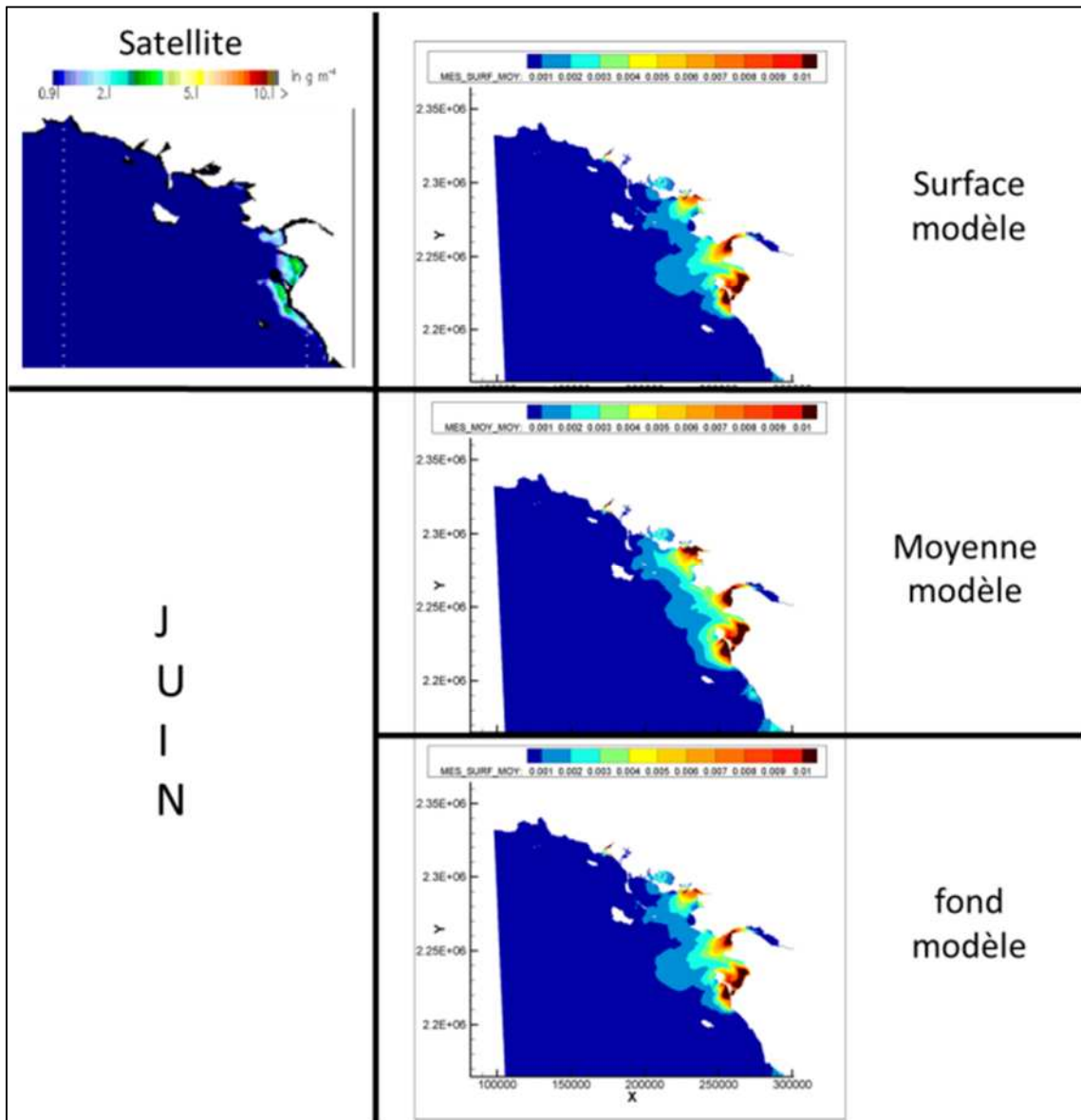


**Figure 42 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Mars (moyenne sur 5 ans)**

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE

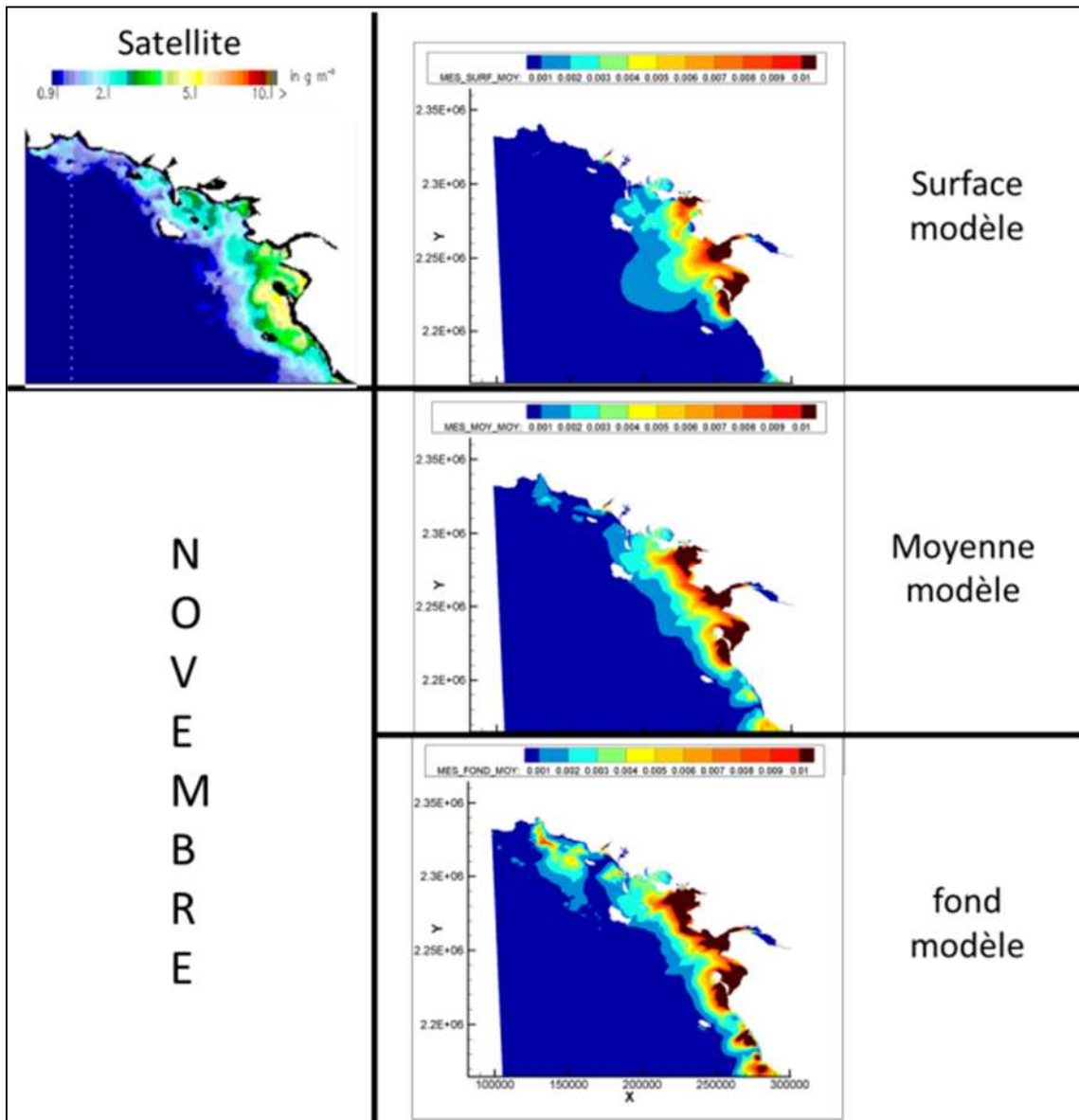


**Figure 43 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Juin (moyenne sur 5 ans)**

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



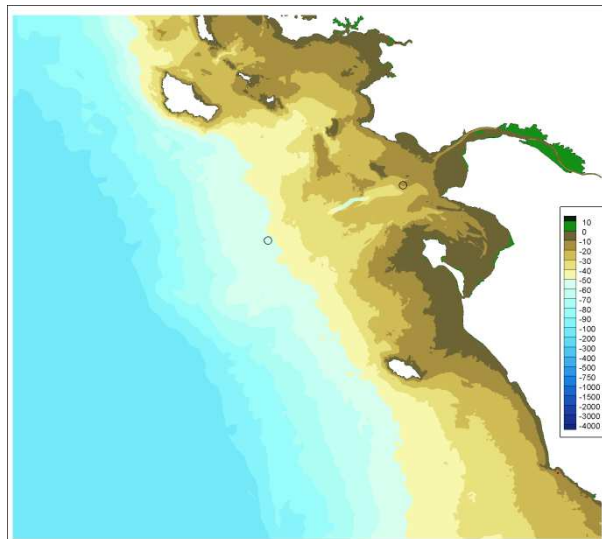
**Figure 44 – Comparaison des mesures de MES issues de mesures par satellite et de MES calculée sur le modèle pour le mois de Novembre (moyenne sur 5 ans)**



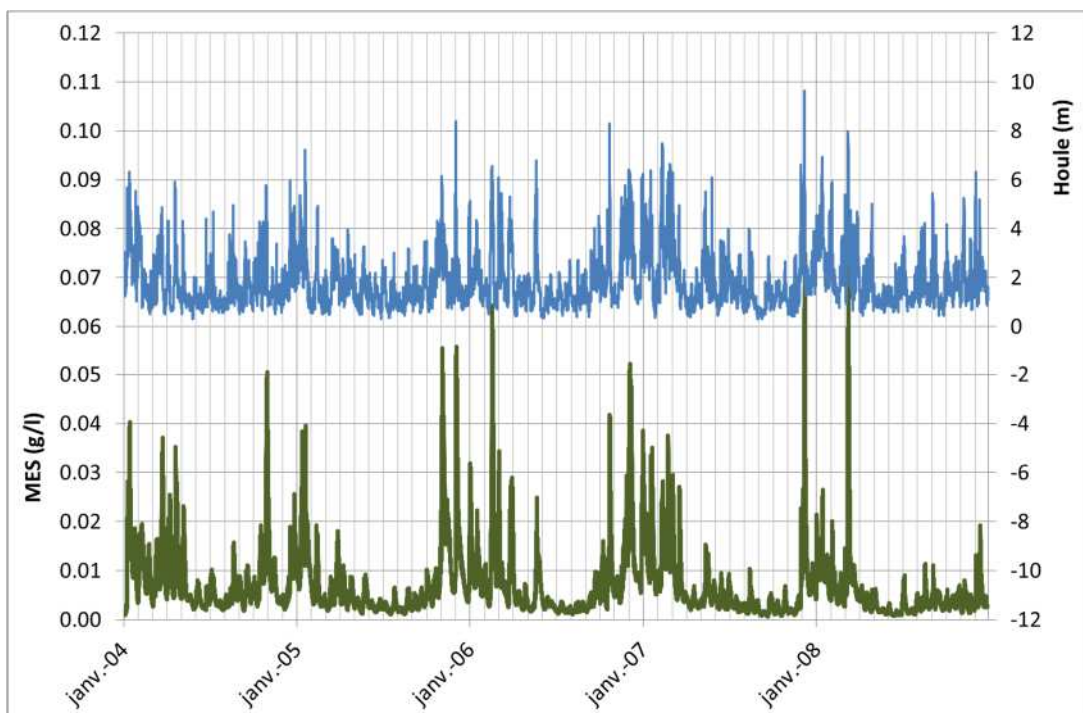
## 2.5. BRUIT DE FOND MODELISE AU NIVEAU DE LA LAMBARDE

Le modèle ayant simulé 5 ans d'évolution de la MES, il est intéressant de regarder en termes d'exploitation et non plus de calage, ce que le modèle donne comme information au niveau de la Lambarde.

Nous avons tracé la MES moyenne calculée au point Lambarde présenté ci-dessous ainsi que la hauteur significativr Hmo de la houle calculée à -50m CM au droit de l'estuaire :



**Figure 45 –** Position des points de sondes : Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde

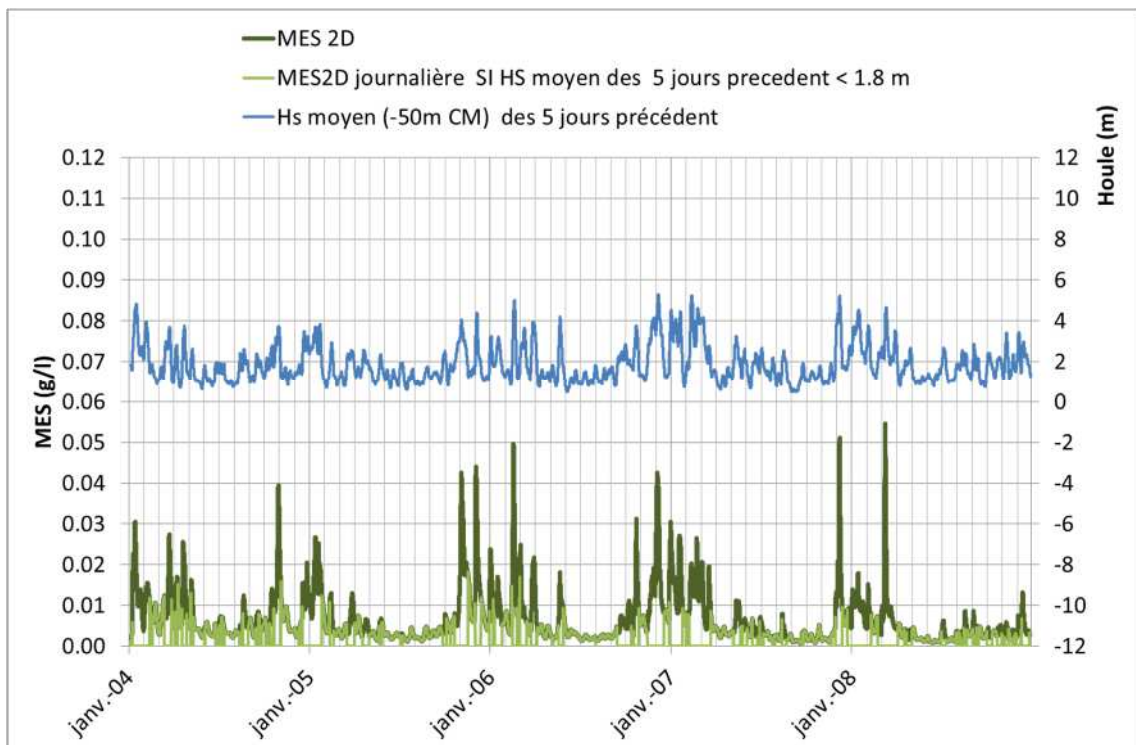


**Figure 46 –** Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 68 (calage retenu) entre 2004 et 2009

Au regard de ces graphiques on peut retenir que :

- La MES moyenne sur 5 ans est de 7 mg/l,
- Les valeurs de MES ne dépassent pas 15 mg/l pendant 90 % du temps,
- La valeur de 37mg/l est dépassée 1% du temps.

Les épisodes de fortes concentrations étant fortement reliées à la hauteur de houle des jours précédents, il a pu être établi que si la houle (à -50m CM) est inférieure à 1,8m en moyenne sur les 5 jours précédents, la MES moyenne au point Lambarde est généralement inférieure à 10 mg/l.



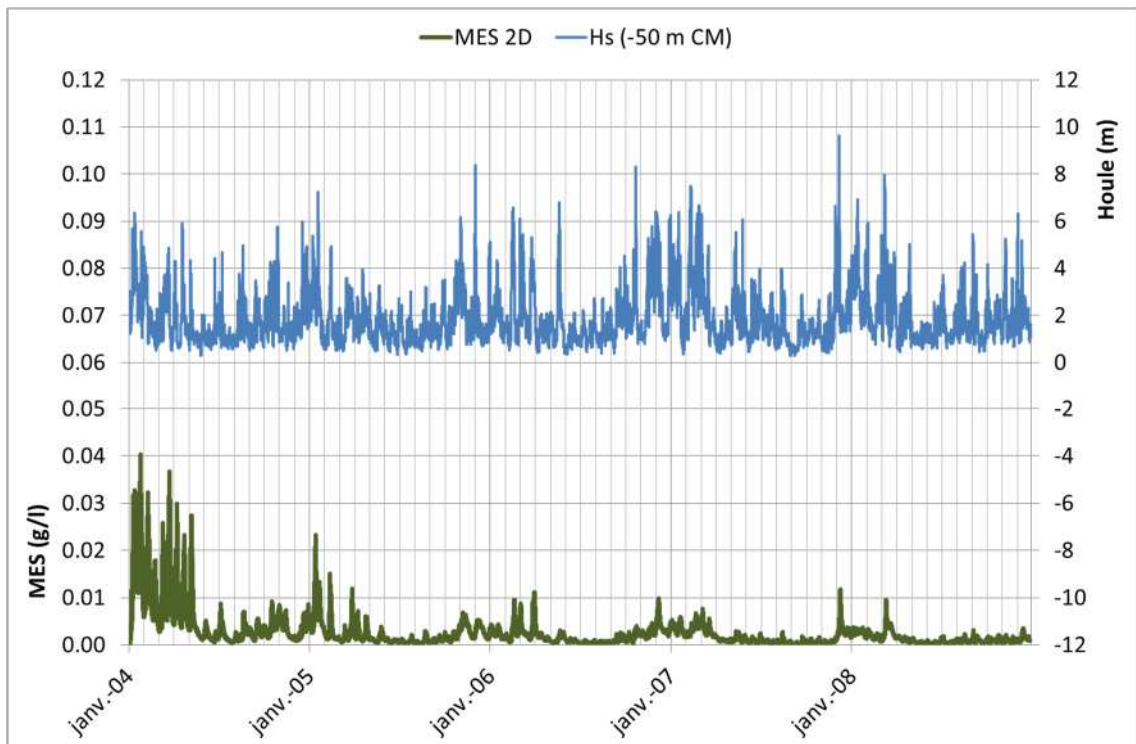
**Figure 47 – Houle moyenne -50m CM sur le 5 jours précédents et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 68 (calage retenu) entre 2004 et 2009**

Il est intéressant de regarder les résultats obtenus au point Lambarde avec le calcul 64 qui était un autre jeu de calage qui pouvait paraître acceptable au vu des comparaisons au point Croisic-D4, mais moins bon aux comparaisons satellites.

**Dragages et immersions a la Lambarde : Actualisation du dossier hydrosédimentaire**

Modélisation régionale du bruit de fond en MES

RAPPORT PROVISOIRE



**Figure 48 – Houle à -50m CM et MES au niveau de la Lambarde. Calcul 64 (entre 2004 et 2009)**

Sur ce calcul on voit que les concentrations obtenues au point Lambarde sont bien moins importantes qu'avec le calcul 68, puisque les concentrations sont globalement toujours inférieures à 10 mg/l (hors initialisation).

Les résultats étant fortement différents avec les paramètres du calcul 64 qui était pourtant acceptable au niveau du Croisic, le paramétrage retenu reste donc encore sujet à modifications. La campagne de mesures de MES initiée en octobre 2018 pour une durée de 10 mois en deux points situés de part et d'autre de la Lambarde, permettra certainement d'affiner ce calage, et de diminuer les incertitudes.

---

## BIBLIOGRAPHIE

ARTELIA, 2010.171: Développement et exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire, Lot 1 – Phase 2 - Exploitation du modèle sur l'état actuel - Annexe A- ajustement de la loi de débit solide amont pour le calcul de référence dans l'état actuel (décembre 2010). Rapport 1822 R10 établi pour le compte du GIP Loire Estuaire

COYNEL A., 2005. « Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne », Thèse

JOUANNEAU J.M. et al (1999). Fine-grained sediment budget on the continental margin of the Bay of Biscay. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography n° 46, pp 2205-2220.

Mengual (2017), « Variabilité spatio-temporelle des flux sédimentaires dans le golfe de Gascogne : contributions relatives des forçages climatiques et des activités de chalutage », Thèse de doctorat

MODERAN J., 2010. « Estuaire de la Charente : structure de communauté et écologie trophique du zooplancton, approche écosystémique de la contamination métallique », Thèse de doctorat

TESSIER C., 2006 « Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud », Thèse de doctorat