



## Modélisation numérique de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine

Caroline TESSIER<sup>1</sup>, H. Jacob VESTED<sup>2</sup>, Bo Brahtz CHRISTENSEN<sup>2</sup>,  
Evelyne GOUBERT<sup>3</sup>, Flore SALAÜN<sup>4</sup>

1. DHI, 2/4 rue Edouard Nignon, CS 47202, 44372 NANTES Cedex 3, France.  
*cte@dhigroup.com*
2. DHI, Agern Allé 5, DK 2970 Hoersholm, Danemark.  
*hvj@dhigroup.com*
3. Université de Bretagne Sud, GMGL, DO UMR 6538, 56 000 Vannes, France.  
*evelyne.goubert@univ-ubs.fr*
4. Institution d'Aménagement de la Vilaine, 56130 La Roche-Bernard, France.  
*Flore.Salaun@eptb-vilaine.fr*

### Résumé :

La modélisation numérique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine a été entreprise à l'aide du modèle 2D MIKE 21 en prenant en compte les forçages de marée, débit du fleuve et la houle. Les simulations ont montré l'influence des débits forts sur l'export de matière vers l'embouchure où les houles remobilisent les sédiments, générant alors des dépôts dans la baie de Kervoyal. Lors des faibles débits, les matières en suspension sont advectées vers l'estuaire interne. Dans le but d'améliorer les conditions d'accessibilité à l'estuaire, la faisabilité d'un chenal externe a été étudiée.

### Mots-clés :

Dynamique Estuarienne – Sédiments cohésifs – Modélisation Morphodynamique

### Abstract:

Hydrodynamic and sediment modelling of the Vilaine Estuary has been realized with the 2D modelling system MIKE 21 taking into account tidal dynamics, river discharge and waves forcing over the area. Results show the influence of high river runoff that export sediments from the inner part to the mouth of the estuary. Import of sediment to the inner part is observed with low runoff. Waves resuspend bottom sediment and induce higher deposition in the area of Kervoyal bay. With the aim to improve navigation access to the estuary, a feasibility study of an external channel has been studied.

### Keywords:

Estuary dynamics – Cohesive Sediments – Morphodynamics Modelling

### 1. Introduction

L'estuaire de la Vilaine, en Bretagne Sud, est contrôlé par le barrage d'Arzal. Pour améliorer la connaissance du fonctionnement de l'estuaire et étudier ses évolutions

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

futures probables, une étude importante a été lancée par l'Institution d'Aménagement de la Vilaine (IAV) avec l'objectif de développer un modèle numérique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine. La calibration du modèle s'est appuyée sur des mesures de turbidités et d'évolution altimétrique des vasières mais également sur des différentiels bathymétriques, ce qui a conduit à simuler des scénarios d'évolution morphodynamique de l'estuaire sur 10 ans (VESTED *et al.*, 2011). Ici, la dynamique sur le court-moyen terme (jusqu'à un an) est illustrée, jusqu'à un bilan sédimentaire des évolutions morphologiques annuelles. Ce nouvel outil a permis ensuite d'étudier la faisabilité d'un chenal externe pour faciliter l'accès à la navigation.

### **2. Le modèle hydro-sédimentaire 2D de l'estuaire de la Vilaine**

#### 2.1 Configuration du modèle

La modélisation hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine a été entreprise avec le modèle numérique MIKE 21 FM, en couplant le module de transport de sédiments fins (MT) au module hydrodynamique (HD). Le modèle local s'étend du barrage d'Arzal jusqu'à l'Île Dumet (figure 1) et est emboîté dans un modèle régional de plus grande emprise. Le vent est issu des observations au barrage d'Arzal.

Les apports liquides de la Vilaine sont intégrés à la limite amont en considérant les débits instantanés au barrage d'Arzal : les débits horaires sont reconstitués en fonction des ouvertures des vannes et volets du barrage. Son fonctionnement est caractérisé par des lâchers importants au jusant et des fermetures quasi systématiques autour de la pleine mer, ce qui influe fortement la dynamique des sédiments dans l'estuaire. Les apports solides de la Vilaine sont considérés nuls, étant donné les faibles valeurs de turbidité mesurées en amont du barrage (données de l'usine d'eau de Férel).

Les houles sont simulées du large jusqu'à l'estuaire à l'aide du modèle MIKE 21 SW à partir d'un modèle de façade Manche-Gascogne, d'un modèle régional et d'un modèle local, de même maillage que le modèle hydro-sédimentaire. Les paramètres de houles ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $Dir$ ) calculés ainsi sur chaque maille du modèle sont utilisés pour estimer les contraintes de cisaillement sur le fond qui vont générer les remises en suspension des sédiments dans le modèle sédimentaire.

Le modèle hydro-sédimentaire local reproduit ainsi la dynamique 2D dans l'estuaire, liée à la marée, aux circulations dues au vent, aux apports du fleuve et aux remises en suspension par les vagues. Les processus 3D tels que la stratification haline et les courants de densité ne sont pas reproduits ici, mais cette dynamique de l'estuaire de la Vilaine a été simulée par ailleurs par une configuration 3D du modèle MIKE 3 FM. Pour la dynamique sédimentaire, en particulier pour simuler les évolutions morphologiques sur le long-terme (1 à 10 ans), l'utilisation du modèle 2D (plus rapide en temps de calcul) s'est avéré un outil tout à fait acceptable.

Les simulations ont été entreprises sur l'année complète 2007-2008, période sur laquelle de nombreuses mesures ont été acquises : courants, houles, turbidité, altimétrie des vasières (GOUBERT *et al.*, 2010). Ces mesures ont permis de calibrer et valider le modèle pour différentes échelles de temps et pour différentes conditions environnementales.

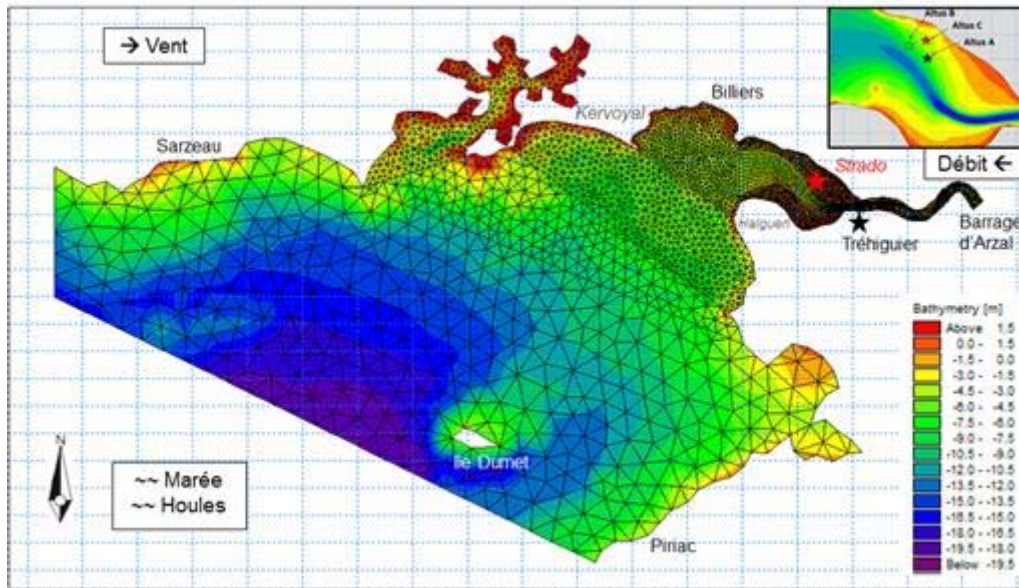


Figure 1. Emprise du modèle hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine

## 2.2 Paramétrisation du modèle sédimentaire

L'estuaire de la Vilaine est caractérisé par des sédiments cohésifs composés de vases et sables fins/silts, constituant ainsi 2 modes granulométriques principaux situés autour de 10  $\mu\text{m}$  et de 90  $\mu\text{m}$ . Avec une proportion de sables fins de 20% à 40%, le comportement de ce sédiment mixte reste cohésif et les particules de sables fins peuvent être transportées dans la colonne d'eau (pas de transport par charriage). Le modèle sédimentaire simule donc la dynamique de 2 classes de particules ayant des vitesses de chutes distinctes. Les particules de sable fin ont une vitesse de chute constante et égale à 8 mm/s, alors que les particules de vase ont une vitesse de chute variable, dépendant des processus de floculation, de 0.15 à 9.3 mm/s pour des concentrations en suspension comprises entre 0.01 et 10 g/l.

Les particules qui chutent sont d'abord déposées dans la première couche du sédiment puis transitent vers les autres couches, par l'intermédiaire de taux de transfert entre couches ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ), schématisant ainsi la consolidation. Les différentes couches du sédiment représentent donc des couches fluides ou partiellement consolidées associées à des dynamiques sur différentes échelles de temps. Le fond sédimentaire est ici représenté par 3 couches de concentration croissante (la densité augmente avec la profondeur dans le milieu du fait de la consolidation) avec :

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- une couche superficielle très fine de  $200 \text{ kg/m}^3$  facilement érodable, qui schématise une couche se rapprochant de la crème de vase, avec une dynamique très rapide (flux vers la couche 2 de  $1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ) ;
- une seconde couche partiellement consolidée ( $500 \text{ kg/m}^3$ ) avec une dynamique sur plusieurs semaines (flux vers la couche 3 de  $1 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ ) ;
- et une dernière couche plus dense ( $800 \text{ kg/m}^3$ ) érodée lors des événements de crue ou de tempête.

La condition initiale du fond sédimentaire a été créée en spatialisant les fractions de vases et sables fins, en éliminant les sédiments des secteurs rocheux. De plus, les épaisseurs des couches 1 et 2 ont été spatialisées grâce à une simulation d'initialisation avec des conditions hydrodynamiques réalistes sur deux années.

Les processus à l'interface eau-sédiment considèrent les lois classiques de Krone pour le dépôt et de Parthéniades pour l'érosion (LUMBORG & PEJRUP, 2005). Les contraintes critiques d'érosion ont été spatialisées de façon à reproduire au mieux les évolutions morphologiques dans l'estuaire. En particulier, les confrontations aux différentiels bathymétriques historiques (VESTED *et al.*, 2011) ont mené à réduire l'érodabilité des sédiments à l'embouchure en y augmentant la contrainte critique (tableau 1). Ce besoin d'ajustement serait lié à la présence à l'embouchure des processus de liquéfaction des vases par les houles, ce qui tendrait à réduire la force d'entraînement.

Tableau 1. Paramètres de la loi d'érosion pour les 3 couches sédimentaires

	$T_{ce} [N/m^2]$	$E_0 [kg/m^2/s]$
Couche 1	0.425/0.35/0.25	$5.0 \times 10^{-4}$
Couche 2	0.85/0.7/0.5	$4.5 \times 10^{-4}$
Couche 3	1.0	$4.5 \times 10^{-4}$

### 2.3 Forçage hydrodynamique : impact des houles sur les contraintes de cisaillement

Les contraintes de cisaillement sur le fond sont évaluées à partir des courants et des paramètres de houles, selon la formulation de SOULSBY *et al.* (1993). La rugosité du fond (de Nikuradse) est prise homogène égale à 0.5 mm. Le débit de la Vilaine renforce les contraintes dans tout l'estuaire interne et intermédiaire, jusqu'au débouché du chenal principal où les contraintes maximales passent de  $1.5 \text{ N/m}^2$  à  $3 \text{ N/m}^2$  avec un débit instantané de crue de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les vagues affectent particulièrement la bande côtière (de nature rocheuse) et les petits fonds, tels qu'à l'embouchure. En se propageant dans l'estuaire intermédiaire à marée haute, elles renforcent également les contraintes de cisaillement sur le bord du banc du Strado et dans le chenal où elles atteignent  $4 \text{ N/m}^2$  lors de la tempête de mars 2007. L'influence du forçage par les houles est ici clairement mise en évidence et va donc avoir une forte influence sur la remobilisation des sédiments dans l'estuaire.

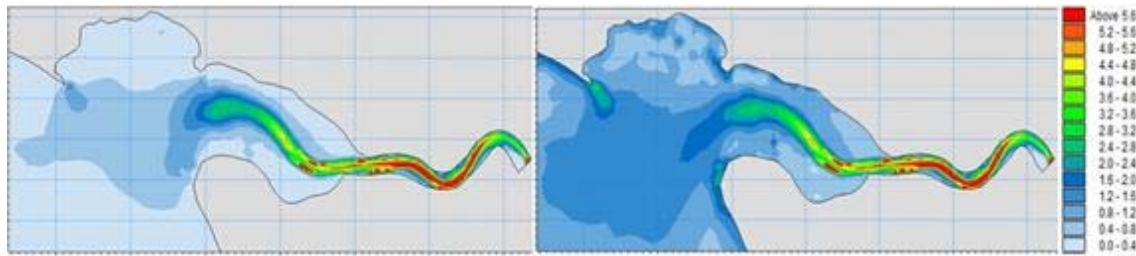


Figure 2. Contraintes maximales de cisaillement sur le fond ( $N/m^2$ ) en mars 2007 sous l'effet des courants de marée et du débit de crue de la Vilaine, sans houles (à gauche) et avec l'action des houles (à droite).

### 3. Dynamique sédimentaire sur le court-moyen terme

#### 3.1 Dynamique des matières en suspension en mars 2007

Une première calibration sur le court-moyen terme a été réalisée en s'appuyant sur des mesures de turbidité réalisées du 14 au 29 mars 2007 en 3 stations fixes de l'estuaire. Pendant cette période, les coefficients de marée atteignent 115 les 20-21 mars. La Vilaine était en crue, le débit instantané dépasse les  $1000 m^3/s$  jusqu'au 12 mars puis les pics du débit sont de l'ordre de  $500-700 m^3/s$ . De plus une tempête d'Ouest-Nord-Ouest a lieu du 18 au 20 mars avec des houles de hauteur significative 1.5 m à l'île Dumet et 0.4 m sur la vasière Nord à l'entrée de l'estuaire (banc du Strado).

Les concentrations de matières en suspension fluctuent de façon semi-diurne avec la marée mais aussi sous l'influence des houles. Dans le chenal au niveau de Tréhiguier, les pics de concentration de l'ordre de 1 g/l ont lieu au moment du flot et du jusant les 19-21 mars 2007 (figure 3) : la tempête a généré des remises en suspension qui sont advectées et maintenues en suspension par les courants de la marée de vives-eaux. Le modèle reproduit très bien cette variabilité qui est suivi ensuite d'une baisse des concentrations à moins de 15 mg/l à cette station en période de mortes-eaux (après le 24 mars). Sur la figure 3, sont présentées les signaux obtenus avec la première calibration (en bleu) et la calibration ajustée (en rouge) suite aux simulations sur le long-terme afin de mieux représenter les zones d'érosion-dépôt en comparaison avec les différentiels bathymétriques historiques (VESTED *et al.*, 2011). Cette nouvelle calibration (tableau 1) met en évidence des pics de concentration plus faibles au jusant mais la dynamique des matières en suspension reste satisfaisante.

Une simulation réalisée sans le forçage par les vagues met en évidence l'influence des houles sur la dynamique des matières en suspension dans l'estuaire à cette période : les concentrations ne représentent alors environ que 30% des valeurs obtenues avec les houles. De même une simulation à faible débit a montré des concentrations dans la colonne d'eau plus élevées dans ce cas sur la station proche du barrage du fait de la remontée possible des matières en suspension dans l'estuaire. Le débit fort modifie en

effet l'asymétrie de marée avec un allongement du jusant et un affaiblissement du flot dans la partie interne de l'estuaire (en amont de Tréguier).

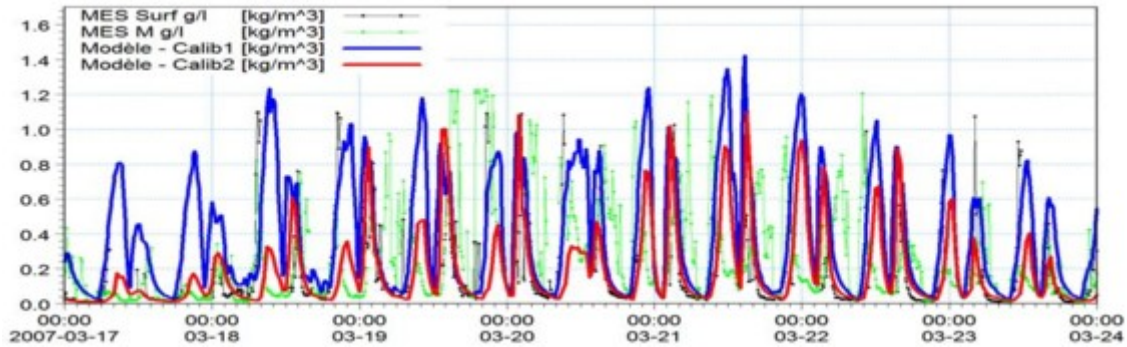


Figure 3. Evolution des concentrations en suspension (g/l) en mars 2007 à Tréguier : turbidité (calibrée en concentration massique) mesurée en sub-surface et à -4m, et concentration modélisée (calibration 1 et finale du modèle).

### 3.2 Altimétrie des vasières en décembre 2007

Des mesures d'altimétrie de la vasière septentrionale ont été réalisées de novembre 2007 à avril 2008 (GOUBERT *et al.*, 2010) en trois points du secteur Ouest du banc du Strado (A "Amont", B "Bord du chenal", C "Côte", figure 1). Elles ont permis également de calibrer le modèle pour le comportement du fond sédimentaire sur 5 mois. Avec des amplitudes un peu plus faibles que les observations, le modèle reproduit les événements d'érosion (mesurés de l'ordre de 5 à 10 cm) lors des fortes tempêtes de début décembre 2007 et de mars 2008. De même l'accrétion du bord du chenal (altus B) est bien modélisée en période de débits forts (janvier-février 2008). Par contre, il apparaît que le modèle ne reproduit pas l'accrétion observée sur les points avals (Altus B et C) par vent d'Est fin décembre 2007 et fin février 2008. L'agitation est faible sur la vasière à ces périodes mais la sédimentation observée pourrait être favorisée par des apports de masses d'eau turbides issues du clapot et des recirculations locales, ici mal reproduites. De même certains processus locaux ont été mis en évidence par les mesures et sont difficilement reproductibles avec la résolution du maillage actuel : en particulier le système de seillons et banquettes qui augmente les écarts d'altimétrie entre les Altus A et C après les épisodes érosifs. Ainsi la variabilité haute fréquence des niveaux mesurés est moins bien reproduite par le modèle, en partie du fait que celui-ci considère seulement 3 couches de sédiment de densité fixe, ce qui explique aussi une certaine incertitude sur les épaisseurs des érosions-dépôts. Malgré ces limitations qui rendent l'exercice de calibration avec ces mesures délicat, il apparaît que le modèle permet de reproduire les tendances principales de l'évolution de cette vasière, avec cependant une dynamique plus faible.

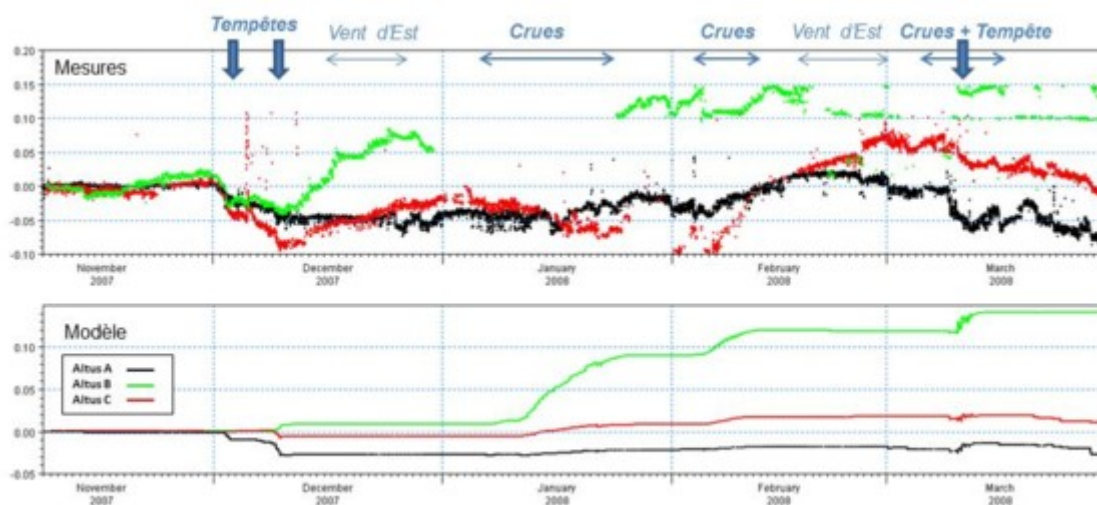


Figure 4. Evolutions des fonds sédimentaires (m) modélisées et mesurées (Altus, GOUBERT et al., 2010) sur le banc du Strado de novembre 2007 à mars 2008.

#### 4. Bilans sédimentaires dans l'estuaire à l'échelle de l'année

Une simulation morphodynamique sur une année, de mars 2007 à mars 2008, a été réalisée avec des forçages quasi-réalistes de débits, marée, vent, et houles (voir section 2.1). Les débits de la Vilaine étaient particulièrement élevés en mars 2007 et en janvier-février 2008, provoquant une érosion du chenal de l'ordre de 1.5 m dans l'estuaire interne et un export de matières à l'embouchure générant des dépôts d'environ 25 cm. Ces résultats sont cohérents aux observations terrains et aux différentiels bathymétriques historiques (2007-2005 en particulier, GOUBERT & MENIER, 2005). Les simulations montrent également que ce sont les tempêtes et en particulier les fortes tempêtes de mars 2007, décembre 2007 et mars 2008 qui remobilisent les sédiments à l'embouchure et dans la baie de Vilaine, et qui induisent alors des dépôts dans la baie de Kervoyal et sur les bancs tidaux, là où la décantation est favorisée par des courants plus faibles. Une simulation réalisée ensuite pour la même année mais avec des débits faibles (débit pondéré d'un facteur 0.25 pour être représentatif d'une année sèche) met en évidence une tendance à l'accrétion de l'estuaire interne avec des dépôts sédimentaires de l'ordre de 20 cm dans le chenal. Cette dynamique est cohérente avec le différentiel bathymétrique de 2003-2001.

Les flux sédimentaires cumulés (vases+sables) ont été calculés en trois sections de l'estuaire et les bilans sédimentaires correspondants sont indiqués sur la figure 5. Le tableau 2 indique la comparaison des flux solides modélisés avec les estimations faites à partir des différentiels bathymétriques historiques (GOUBERT & MENIER, 2005). La zone de calcul comprend les secteurs "intermédiaire" et "interne" (en rectangle orange sur la figure 5). Une année à crues exporterait 420000 t de sédiments alors qu'une année sèche générerait un flux de matière entrant dans l'estuaire de l'ordre de 110000 t. En

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

considérant une concentration volumique du sédiment incertaine entre 300 et 500 kg/m<sup>3</sup>, les volumes associés sont cohérents entre modèle et observations, avec cependant une tendance à sous-estimer légèrement les apports lors des débits faibles. La sensibilité à la bathymétrie initiale et les incertitudes sur les forçages considérés mènent à une variabilité de ces résultats de +/-30%.

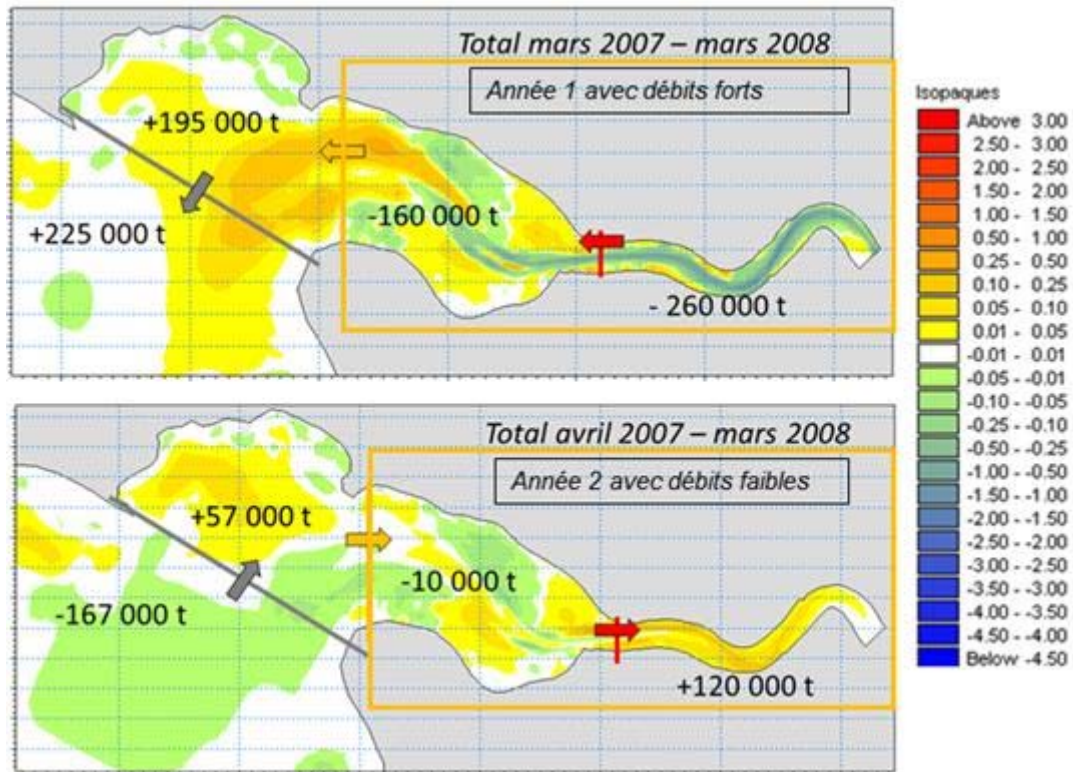


Figure 5. Evolutions des fonds sédimentaires (érosions-dépôts en m) sur une année et bilans massiques des flux de matière pour 4 secteurs. L'encadré orange indique la zone de calcul pour le bilan sédimentaire du tableau 2.

Tableau 2. Bilans sédimentaires dans l'estuaire de la Vilaine (modélisé et observé).

	Année 1 (débits forts)	Année 2 (débit faibles)
<b>Bilan estuaire</b>	Export -420000 t/an	Apports : + 110000 t/an
(Modèle)	~840000 à 1400000 m <sup>3</sup> /an (pour C <sub>sed</sub> =500-300 kg/m <sup>3</sup> )	~220000 à 370000 m <sup>3</sup> /an (pour C <sub>sed</sub> =500-300 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Observations</b>	Export crue (1994 ;2001) :	Apports :
(GOUBERT & MENIER, 2005)	-650000 à -1140000 m <sup>3</sup> /an	+ 250000 à 650000 m <sup>3</sup> /an

### 5. Faisabilité d'un chenal externe

L'importance des dépôts à l'embouchure de l'estuaire de la Vilaine induit une réduction de l'accessibilité à l'estuaire, la faisabilité d'un chenal externe a donc été étudiée. Une



modélisation morphodynamique sur une année a été réalisée avec les caractéristiques initiales suivantes du chenal (figure 6 gauche) : une largeur de 100 m, une profondeur de -1.5 m CM (Cote Marine) et un tracé optimisé en fonction des contraintes de navigation (roches de Kervoyal et de la Varlingue, provenance des houles, trajectoire préférentielle des bateaux, etc..). Le volume initial à draguer est estimé à 370000 m<sup>3</sup> de sédiment.

Le fonctionnement de l'estuaire induit des taux de sédimentation dans le chenal externe qui sont faibles en été (< 5 cm) mais importants en hiver (50 à 80 cm dans la partie centrale du chenal), et ceci d'autant plus que les débits sont forts : ceux-ci induisent un export de matière de l'estuaire interne vers l'embouchure. La remobilisation par les houles favorise également beaucoup les dépôts dans le chenal creusé (figure 6 droite).

La cote de -0.8 m/-1 m CM est atteinte en fin d'hiver les années à débits forts, alors qu'une année à débits faibles génère des dépôts 2 à 3 fois plus faibles. Pour maintenir une cote d'accès à la navigation de -1 m CM, il apparaît donc nécessaire de prévoir des dragages d'entretien au printemps, tous les ans ou tous les deux ans, en fonction des caractéristiques hydrologiques de l'année passée.

Enfin, l'impact du chenal externe sur les dépôts alentours a été estimé : en fin d'hiver, les dépôts supplémentaires seraient de l'ordre de +5 cm à l'entrée de la baie de Kervoyal et à la pointe du Halguen.

Ces estimations comportent des incertitudes, notamment liées aux variabilités de la densité des sédiments. De plus, la formation de vase fluide par l'agitation des vagues dans ce secteur pourrait générer des courants de densité dans le chenal et y accélérer la sédimentation. Les volumes de sédiment estimés par le modèle sont donc ici probablement sous-estimés.

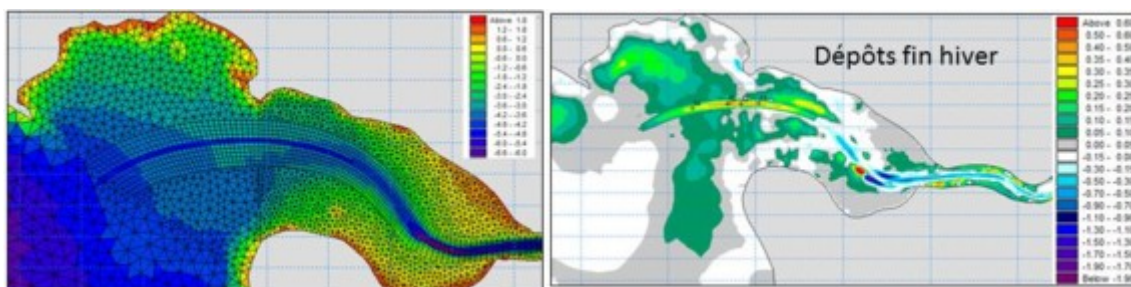


Figure 6. Maillage et bathymétrie initiale (en m par rapport au niveau moyen) du modèle avec un chenal externe et érosion-dépôts (m) des sédiments à la fin de l'hiver.

## 6. Conclusions

Le modèle hydro-sédimentaire 2D de l'estuaire de la Vilaine, a été calibré et validé avec des observations de l'échelle de la marée à l'échelle saisonnière mais également pluri-annuelle (VESTED *et al.*, 2011). Pour bien reproduire les érosions-dépôts sur plusieurs années, la calibration a été ajustée, sans pour autant altérer la dynamique des matières

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

en suspension par rapport aux observations. Les tendances principales des évolutions altimétriques du banc du Strado sont reproduites, excepté par vent d'Est où l'accrétion de la vasière est trop faible par rapport aux mesures Altus. Les imprécisions dans la comparaison sont de plus incontournables avec une schématisation à 3 couches du fond sédimentaire.

Les simulations ont montré l'influence des forts débits hivernaux sur la génération des dépôts à l'embouchure comme observés après l'hiver 2006-2007. Une accrétion de l'estuaire interne est mise en évidence pour les années sèches comme en 2003. Les houles remobilisent les sédiments à l'embouchure et favorisent des dépôts de matières dans la baie de Kervoyal et vers les bancs tidaux, là où les courants sont plus faibles.

Afin d'améliorer l'accessibilité à l'estuaire, la faisabilité d'un chenal externe a pu être quantifiée : le dragage initial serait de 370 000 m<sup>3</sup> de sédiment et un entretien annuel ou bi-annuel (en fonction des débits hivernaux) serait nécessaire afin de maintenir une cote du fond de -1 m CM. Les coûts associés à ce projet ont alors pu être estimés par l'IAV.

### 7. Références bibliographiques

GOUBERT E., MENIER D. (2005). *Evolution morphosédimentologique de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2003 : Valorisation des campagnes bathymétriques*. Rapport Institution d'Aménagement de la Vilaine, 104 p.

GOUBERT E., FRENOD E., PEETERS P., THUILLIER P., VESTED H.J., BERNARD N. (2010). *Utilisation de données altimétriques (Altus) dans la caractérisation de climats hydrodynamiques contrôlant le fonctionnement hydrosédimentaire d'une vasière intertidale : cas de l'estuaire de la Vilaine (Bretagne, France)*. *Revue Paralia*, Vol. 3, pp. 6.1-6.15. doi:10.5150/revue-paralia.2010.006

LUMBORG U., PEJRUP M. (2005). *Modelling of cohesive sediment transport in a tidal lagoon – An annual budget*. *Marine Geology*, Vol. 218 n° 1-4, 1–16. doi:10.1016/j.margeo.2005.03.015

SOULSBY R.L., HAMM L., KLOPMAN G., MYRHAUG D., SIMONS R.R., THOMAS G.P. (1993). *Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer*. *Coastal Engineering*, n°21, pp 41-69.

VESTED H.J., TESSIER C., CHRISTENSEN B.B., GOUBERT E.. (2011). *Numerical Modelling of Morphodynamics - La Vilaine Estuary*. INTERCOH Conference 2011, submitted for Ocean Dynamics Special Issue.