

Caractérisation du fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine à partir d'études bathymétriques et altimétriques (Altus)

Evelyne GOUBERT¹, Emmanuel FRENOD¹,
Pierre PEETERS², Pauline THUILLIER², Hans Jacob VESTED³,
Nathalie BERNARD⁴, Véronique VERON⁴

¹ Université Européenne de Bretagne - Univ. Bretagne Sud, 56 000 Vannes.

evelyne.goubert@univ-ubs.fr, emmanuel.frenod@univ-ubs.fr

² DHI 2/4 rue Edouard Nignon, CS 47202, 44372 NANTES Cedex 3, France.

ppe@dhigroup.com, pth@dhigroup.com

³ DHI Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm, Denmark. *hvj@dhigroup.com*

⁴ Institution d'Aménagement de la Vilaine, Boulevard de Bretagne - BP 11, 56 130 La Roche Bernard. *nathalie.bernard@lavilaine.com*

Résumé :

Depuis la construction du barrage d'Arzal entre 1965 et 1970, l'estuaire de la Vilaine est soumis à un fort envasement. A partir de données bathymétriques, hydrologiques et altimétriques (Altus), il est possible d'identifier des climats hydrodynamiques à différentes échelle spatiales et temporelles et de mieux quantifier les phases d'érosion ou de dépôts associées. De plus, il a été possible de montrer l'impact d'un modelé en seillons/banquettes ou d'un modelé plan sur la dynamique de la vasière.

Abstract :

From the construction of the Arzal's dam in 1960's, the Vilaine estuary has been rapidly in-filled. According to bathymetrical, hydrological and altimetical (Altus) data, different hydrodynamical patterns have been identified at various spatial and temporal scales leading to erosional or depositional periods. The hydrodynamical pattern's series allows a better understanding and quantification of sedimentological processes at long term and at short term. Finally, we discussed the influence of bedforms (ridge and runnels or planar bed) on sedimentological processes over an intertidal mudflat.

Mots-clés : Vasière estuarienne intertidale, hydrodynamisme, seillons/banquettes.

1. Introduction

La dynamique de la sédimentation fine en domaine estuarien est un problème récurrent depuis de nombreuses années pour les usagers des estuaires. Afin de mieux gérer ces environnements, de nombreux modèles numériques ont été conçus pour apporter des solutions d'aménagement. Pour que ces modèles soient callés et validés, il est nécessaire d'appréhender le fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire à différentes échelles spatio-temporelles.

Certains grands domaines estuariens ont été l'objet d'études multi-proxies et multi échelles spatiales et temporelles pour montrer les rôles relatifs des différents facteurs de contrôle hydrodynamiques (BASSOULLET *et al.*, 2000 ; revue dans DELOFFRE *et al.*, 2006, 2007).

Dans le cas de l'estuaire de la Vilaine, il s'agit d'un domaine à dimensions réduites, par rapport aux environnements étudiés dans les travaux précédemment cités, et à régime fluvial contrôlé par un barrage bloquant la remontée des eaux salées à 8 km de l'embouchure. La construction de ce barrage a entraîné un comblement important en 30 ans, modifiant profondément la morphologie de l'estuaire et les pratiques des usagers (mytiliculture, civelles, coques, navigation). La gestion raisonnée des ressources de l'estuaire nécessite une compréhension approfondie du fonctionnement hydrodynamique et sédimentaire pour proposer des scénarios d'aménagements adaptés aux différentes contraintes du milieu. Ainsi, la modélisation hydrosédimentaire de l'estuaire a été initiée. Cette modélisation repose sur des données acquises spécifiquement pour cette étude et sur l'analyse des données disponibles.

La présente étude aborde la caractérisation du fonctionnement hydrosédimentaire de la Vilaine à partir de l'analyse (1) des données bathymétrique de 1866 à nos jours et (2) des suivis altimétriques (Altus) de la vasière intertidale septentrionale associés à différentes données caractérisant l'hydrodynamisme (marée, agitation de l'eau, vent, turbidité - Marel-, débit fluvial), de novembre 2007 à avril 2008. L'objectif de cette approche est de définir l'impact d'événements hydrodynamiques sur l'évolution altimétrique d'un domaine intertidal afin d'alimenter un modèle hydrosédimentaire.

2. L'estuaire de la Vilaine et la barrage d'Arzal

La Vilaine (Figure 1), fleuve d'une longueur d'environ 220 km draine un bassin versant d'environ 10 000 km² et se termine par un estuaire s'ouvrant sur la Baie de Vilaine. Cette baie, d'une profondeur maximum de 30 m est partiellement protégée des houles du large par un arc de presque îles et d'îles.

L'estuaire de la Vilaine, d'une orientation globale Est-Ouest est soumis aux actions de la houle, aux débits sortant du barrage et à un régime de marée méso à macrotidal (2,5 m en mortes eaux et plus de 5 m en vives eaux). Cet estuaire (Figure 1) est caractérisé à l'Est par une morphologie chenalissante de type méandriforme, l'estuaire interne, pour évoluer vers l'Ouest en une forme plus rectiligne qui s'évase vers l'embouchure, l'estuaire intermédiaire. La limite entre l'estuaire intermédiaire et la zone externe est marquée par un haut fond vaseux. Une forme de type delta sous-marin caractérise cette zone externe. La morphologie générale de cet estuaire indique qu'il s'agit d'un domaine intermédiaire entre un estuaire dominé par les vagues partiellement ouvert et un estuaire dominé par la marée selon DALRYMPLE & CHOI (2007).

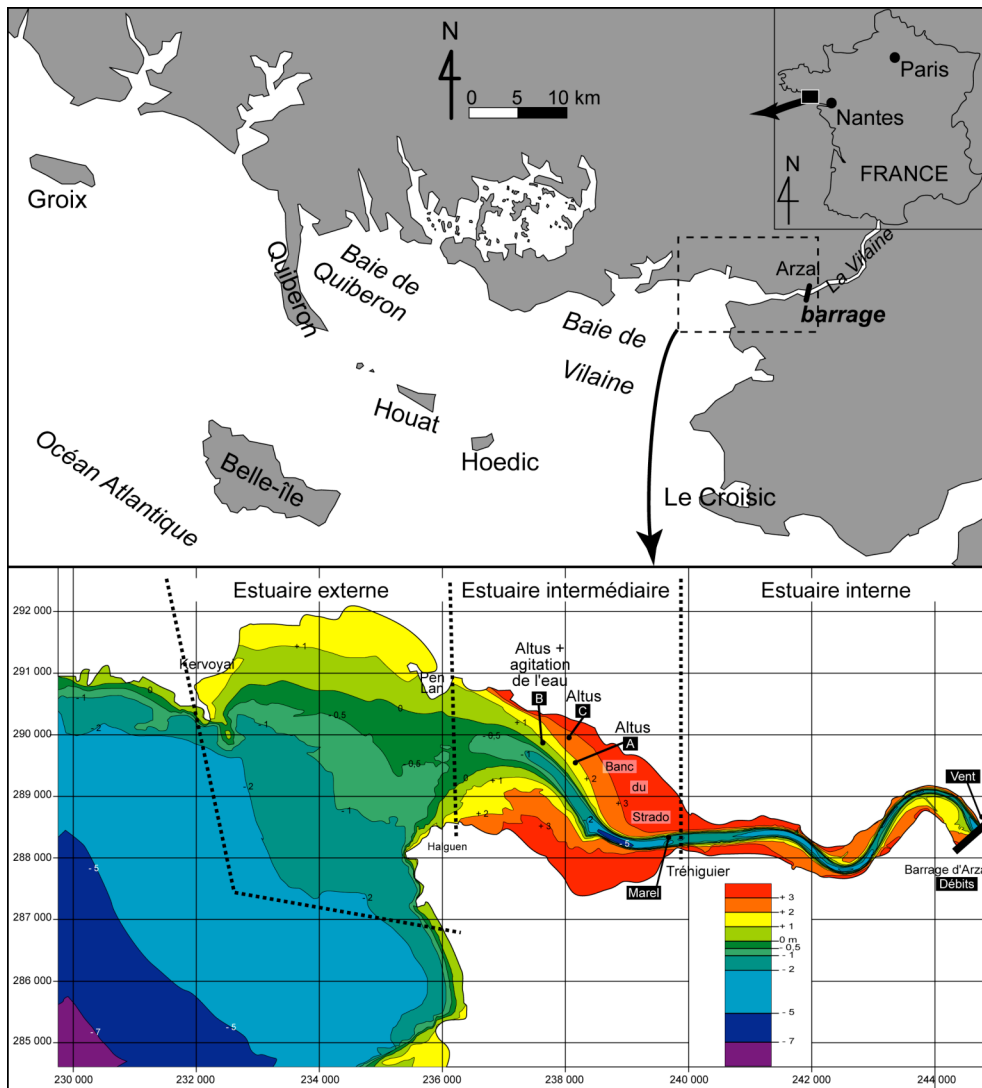


Figure 1. L'estuaire de la Vilaine : localisation, bathymétrie (2007) et plan de position des stations de mesures.

Au cours des années 1960, la construction du barrage d'Arzal, situé à 8 km de l'embouchure, a permis de réduire fortement les inondations des marais de Redon en empêchant les eaux saumâtres et chargées en particules fines de pénétrer jusqu'à 50 km en amont. Les sédiments superficiels présents sur la zone d'étude sont des vases sableuses, avec une fraction inférieure à 45 μm allant de 10 à 99% selon la saison (GOUBERT, 1997). Les vases sont remises en suspension par la houle et les vagues de tempête, puis elles sont transportées à marée montante vers l'estuaire.

La barrage d'Arzal, par sa position et son fonctionnement, a entraîné la réduction du volume oscillant, la diminution des vitesses de courant et ainsi provoqué (1) le déplacement de la zone de turbidité maximum vers l'aval (secteur intermédiaire) et (2) l'augmentation de la décantation des fractions fines dans ce secteur (LCHF, 1962-1964 ; MAILLOCHEAU, 1980 ; GOUBERT, 1997).

3. Matériels et méthodes

3.1. Données bathymétriques de 1866 à 2007

De 1866 à 2007, les données de douze relevés bathymétriques sont disponibles et utilisables. Les relevés ont été acquis au plomb suiffé, puis au sondeur à 200 kHz ou 33kHz puis en bifréquence 33 kHz/200kHz. Les données ont été traitées sous MapInfo/Vertical Mapper (GOUBERT & MENIER, 2005), puis sous MIKE afin de réaliser des coupes sériées et le calcul des soldes sédimentaires.

3.2. Suivis altimétriques d'une vasière intertidale et données connexes

Du 7 novembre 2007 au 4 avril 2008, trois Altus (JESTIN *et al.*, 1998) ont mesuré les variations altimétriques de la vasière intertidale septentrionale et la hauteur de la tranche d'eau (Figure 1). Les Altus A et C enregistrent ces données toutes les 2 minutes. L'Altus B a été programmé afin d'avoir un indice d'agitation du plan d'eau (une mesure toutes les $\frac{1}{2}$ seconde pendant 4 min 40, reprise 15 min plus tard). Toutes les 2 à 3 semaines, un suivi terrain était effectué pour décrire l'état de la vasière et décharger les données des Altus.

Différentes données ont été utilisées pour caractériser l'état hydrodynamique de l'estuaire. Au barrage sont mesurés les volumes évacués par heure (exprimés en débit horaire en m^3/s) ainsi que la vitesse et la direction du vent, moyennées sur 10 min. Au niveau de Tréhiguier (Figure 1), la bouée Marel, installée depuis novembre 2004, mesure toutes les 10 min la turbidité en NTU. Le positionnement de ces 3 Altus a été effectué à la lumière de l'analyse des relevés bathymétriques.

4. Résultats et interprétations

4.1. Evolution de la bathymétrie de 1866 à 2007

D'après les relevés de 1866 comparés à ceux de 1960 par LATTEUX (2005), la zone interne de l'estuaire est caractérisée par un exhaussement des fonds de 1 à 3 m et les vasières latérales de la partie intermédiaire par un exhaussement de 4 m pour la vasière septentrionale (Banc du Strado) et de 2 m pour la méridionale. Au cours du siècle précédent la mise en place du barrage, le taux moyen annuel de sédimentation a donc été au maximum d'environ 4 cm/an au niveau du Strado.

Concernant l'évolution depuis la construction du barrage, les calculs des soldes sédimentaires, entre chaque suivi bathymétrique, révèle que dans la zone estuarienne interne et intermédiaire, 16 millions de m³ ont comblé l'estuaire en environ 30 ans (Figure 2).

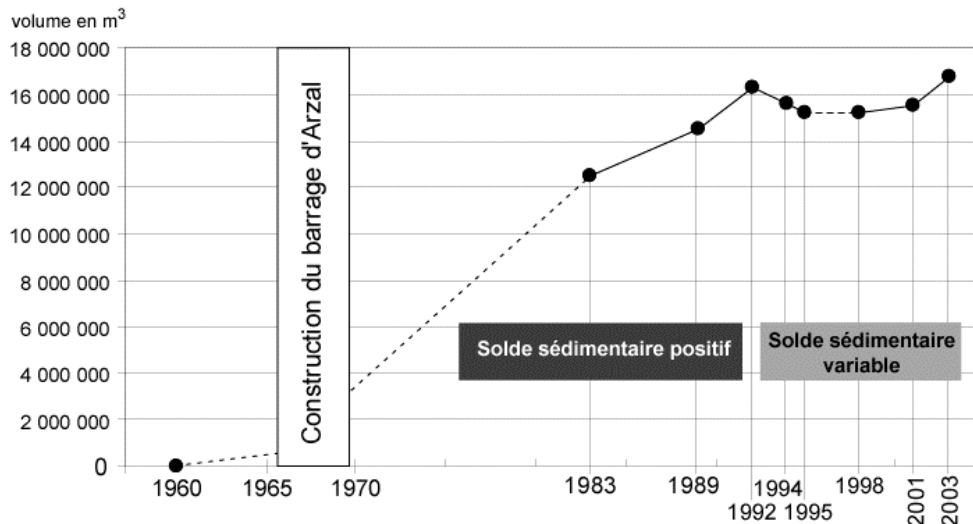


Figure 2. Evolution des soldes sédimentaires calculés pour les secteurs interne et intermédiaire (GOUBERT & MENIER, 2005).

Dans le secteur interne, des vasières latérales de 7 m d'épaisseur sont apparues. Dans le secteur intermédiaire, les vasières latérales ont enregistré un exhaussement de 4 à 6 m. Toutes les vasières latérales sont donc passées en position intertidale vers 1990. Ces valeurs, rapportées en cm/an, traduisent des taux de sédimentation de 13 à 23 cm/an.

Depuis le début des années 1990, entre 1 et 2 millions de m³ de sédiments sont déposés/érodés au fil des ans au niveau des vasières intertidales en fonction des périodes de crues (1995) et de tempêtes (1999 et 2000). Entre 2001 et 2003, période moins pluvieuse et moins tempétueuse, la zone la plus active est la vasière intertidale septentrionale avec des exhaussements pouvant atteindre 40 cm/an.

4.2. Evolution altimétrique de la vasière intertidale septentrionale (Banc du Strado) du 7 novembre 2007 au 4 avril 2008

Les trois Altus sont disposés en triangle de manière à définir deux gradients : un gradient amont/aval (Altus A, C et B) et un gradient altimétrique du chenal vers la côte avec l'Altus B, le A et le C (Figure 1).

Après une première phase relativement calme (voir (1) en blanc sur noir, sur la Figure 3) caractérisée par des vents faibles et d'orientation d'Est ou d'Ouest, les évolutions altimétriques de fin novembre 2007 à fin mars 2008 (Figure 3a) montrent de nombreuses phases d'érosion et de dépôt, qui peuvent être corrélées ou non avec les pics d'agitation de l'eau (Figure 3b), la direction et l'intensité du vent (Figure 3c), les pics de turbidité enregistrés à Tréhiguier par la bouée Marel (Figure 3d) et avec les débits horaires au barrage (Figure 3e).

Toutes les phases d'érosion (soulignées par les traits en pointillés ou par certaines petites flèches noires) sont corrélées aux pics d'agitations de l'eau. L'agitation de l'eau est elle-même corrélée à la direction du vent et à sa vitesse. En effet, à chaque coup de vent d'Ouest et de vitesse supérieure à 10 m/s correspond une phase d'agitation du plan d'eau, et donc une phase d'érosion (voir (2) et (4) sur la Figure 3). En revanche, quelle que soit la vitesse du vent, lorsque celui-ci vient de l'Est, le plan d'eau est calme, et les matières en suspension se décantent (voir (3) sur la Figure 3). La durée et l'ampleur de ces deux cas, érosion ou dépôt, ainsi que les occurrences de pics de turbidité à Tréhiguier vont dépendre des conditions de marée et de débit. Ainsi, le paroxysme de la tempête du 2 décembre a eu lieu à marée descendante, il s'est traduit par l'érosion en moyenne de 4 cm sur l'ensemble de la zone. En revanche, la tempête du 9 décembre a atteint son maximum à marée montante. Cette conjonction a alors entraîné un important pic de turbidité à Tréhiguier.

Après ce premier épisode commun d'érosion, les trois Altus ont évolué de manière similaire ou opposée, selon leur localisation géographique et les conditions hydrodynamiques.

L'événement (3) sur la Figure 3, juste après le coup de vent du 10 décembre, débute par quelques jours de relative stabilité de la vasière, sans décantation. Il est fort probable que cette stabilité soit due aux forts débits du barrage (flèche noire). Par la suite, les débits diminuant et les coefficients de marée descendant, les matières remises en suspension début décembre commencent à décanter. Cette phase (3) de décantation est interrompue par deux petits coup de vent d'Ouest et du Sud (4) provoquant un épisode érosif qui va modeler la surface de la vasière en « ridge and runnel » ou seillons/banquettes (SB) orientés perpendiculairement aux courbes bathymétriques (GOULEAU *et al.*, 2000 ; WHITEHOUSE *et al.*, 2000).

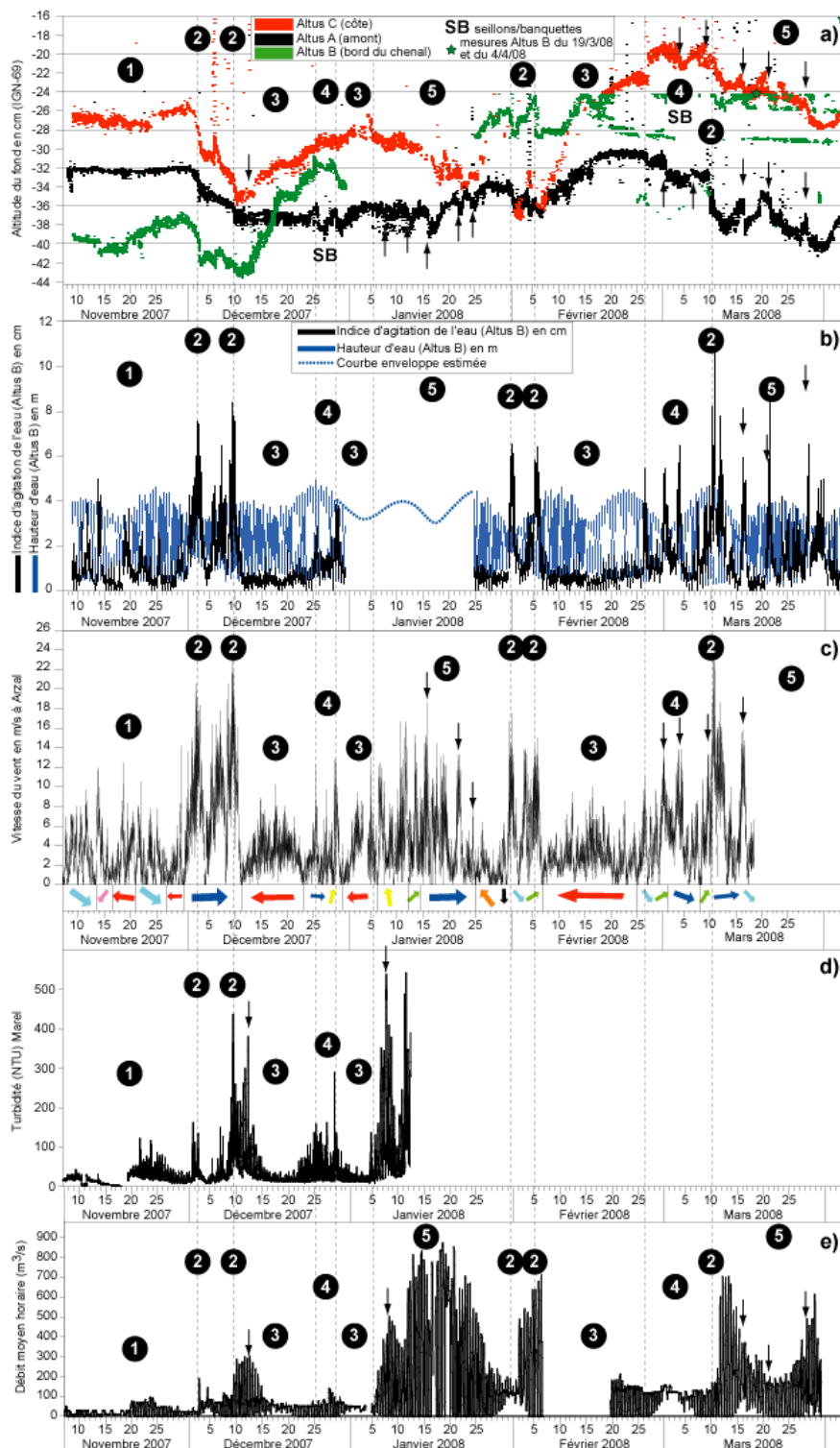


Figure 3. Suivis hydrosédimentaires de l'estuaire de la Vilaine du 7 novembre 2007 au 4 avril 2008.

La position de l'Altus A au dessus d'un seillon et celle du C au dessus d'une banquette va permettre de mieux comprendre les variations de mesures lors de la phase suivante (5). Cette phase est caractérisée par une succession de coups de vent allant du Sud à l'Ouest qui vont se traduire par l'alternance de dépôt et d'érosion de vase très fluide dans les seillons (flèches noires pour l'Altus A) alors que les banquettes vont progressivement être rabotées (Altus C). Début février, la surface de la vasière est à nouveau plane, mais les structures seillons/banquettes (SB) sont sous-jacentes.

Parallèlement, le secteur de l'Altus B (bord du chenal non atteint par le système SB) a enregistré un dépôt de vase fluide d'une épaisseur de 6 cm.

Cette phase (5) est interrompue par un coup de vent double début février (2), mais qui n'affecte que le secteur de l'Altus B en raison de l'érodabilité plus grande de la vase fluide fraîchement déposée, par rapport au SB qui ont été stabilisés au niveau des Altus C et A. Suite à cette phase, les matières en suspension vont se décanter sur l'ensemble de la zone au cours du mois de février (3), principalement à partir du moment où les coefficients de marée vont diminuer.

La période de fin février à début avril commence par la formation de SB du 28 février au 9 mars (4). Il semble que cette deuxième occurrence de SB soit une réactivation la structure antérieure en érodant tout d'abord la vase plus fluide située au niveau des anciens seillons, puis ces nouveaux seillon sont surcreusés.

La tempête du 10 mars (25 m/s) a érodé fortement la vasière (6 à 8 cm) et effacé le système SB. Enfin, du 13 mars au 4 avril, le même climat hydrodynamique que celui du mois de janvier a régné sur l'estuaire (5) : succession de coups de vent de Nord-Ouest à Sud-Ouest, de vitesse moyenne. L'altitude globale de la vasière diminue, mais avec une succession de cycle de dépôts de 1 à 2 cm de vase fluide pendant les jours calmes puis érosion 2 à 3 cm au cours des coups de vent (flèches noires). A la différence du mois de janvier, cet épisode se déroule sur une vasière plane, alors qu'en janvier il s'agissait d'un système en SB.

5. Discussion et conclusion

L'estuaire de la Vilaine est un environnement sédimentaire très actif. Même avant la construction du barrage d'Arzal, le processus de comblement était caractérisé par des taux de sédimentation importants, jusqu'à 4 cm/an. L'implantation du barrage d'Arzal a provoqué la multiplication du taux de sédimentation par 3 et même par 8 au niveau des vasières latérales. Depuis le début des années 1990, les variations bathymétriques majeures concernent principalement les vasières intertidales. Elles sont alors sujettes à de fortes variations interannuelles en fonction des épisodes de crue ou de tempête. Le suivi altimétrique par la méthode

Altus de la vasière intertidale septentrionale a permis la quantification des dépôts et des érosions au cours d'une période hivernale riche en tempêtes et coups de vent d'orientations et de vitesses variables. Ainsi, sur l'ensemble de la période étudiée, les taux d'érosion ont été de 6 à 11 cm lors de la première tempête de décembre et de 4 à 6 cm pour la tempête de mars. Pour les taux de sédimentation, ils ont atteint 26 cm en quatre mois pour l'Altus B (soit 6,5 cm/mois) et 16 cm au cours du mois février pour l'Altus C (côte). Ces taux sont supérieurs à ceux observés à Marennes-Oléron (BASSOULLET *et al.*, 2000). En revanche, ils sont comparables à ceux observés en Seine (DELOFFRE *et al.*, 2006), alors que la Seine a des dimensions géographiques et des paramètres hydrodynamiques deux à dix fois supérieurs à ceux de l'estuaire de la Vilaine.

Dans le cas des données de Vilaine, il a été possible de préciser les relations entre le vent et la dynamique sédimentaire. A chaque coup de vent d'Ouest, quelles que soient les autres conditions, une phase d'érosion est enregistrée, la hauteur et l'ampleur de la zone concernée par cette érosion dépendant de la vitesse du vent. Dans ce contexte, les autres conditions (débit et marée) vont contrôler le devenir des matières remises en suspension. Si l'on est en phase de déchet, les MES vont se décanter les jours suivants. Si l'on est en phase de revif, les MES vont décanter moins rapidement ou être transportées hors de la vasière. Si les débits sont importants, les MES seront expulsées de l'estuaire.

Cette hiérarchisation des facteurs contrôlant les processus sédimentaires et la prise en compte de l'impact de l'état de la vasière (surface plane, seillons/banquettes, couche de vase fluide) vont permettre de concevoir des scénarios qui pourront être utilisés pour caler, valider et tester le modèle hydrosédimentaire de l'estuaire la Vilaine à différentes échelles spatiales et temporelles.

6. Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une convention d'étude entre l'Institution d'Aménagement de la Vilaine, le Danish Hydraulic Institut et l'Université de Bretagne Sud. Je remercie Ifremer et l'IAV pour les données de la bouée Marel, et surtout Hervé Jestin, Philippe Bassoullet et Pierre Le Hir pour leurs précieux conseils sur les Altus et pour la mise à disposition des Altus.

7. Références bibliographiques

1. BASSOULLET P., LE HIR P., GOULEAU D., ROBERT S. (2000). Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marenngres-Oléron" (France). *Continental Shelf Research*, 20, 12-13, 1635-1653.

2. DALRYMPLE R.W., CHOI K. (2007). Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems : a schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 81, 135-174.
3. DELOFFRE J., LAFITE R., LESUEUR P., VERNEY R., LESOURD S., CUVILLIEZ A., TAYLOR J. (2006). Controlling factors of rhythmic sedimentation processes on an intertidal estuarine mudflat. Role of the turbidity maximum in the macrotidal Seine estuary, France. *Marine Geology*, 235, 151-164.
4. DELOFFRE J., VERNEY R., LAFITE R., LESUEUR P., LESOURD S., CUNDY A.B. (2007). Sedimentation on intertidal mudflats in the lower part of macrotidal estuaries: Sedimentation rhythms and their preservation. *Marine Geology*, 241, 19-32.
5. GOUBERT E. (1997). *Les Elphidium excavatum, foraminifères benthiques, vivant en baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement*. Thèse de doctorat Université de Nantes, 2 vol., 310 p.
6. 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.
7. GOULEAU D., JOUANNEAU J.M., WEBER O., SAURIAU P.G. (2000). Short- and long-term sedimentation on Montportail-Brouage intertidal mudflat, Marennes-Oléron Bay (France). *Continental Shelf Research*, 20, 1513-1530.
8. JESTIN H., BASSOULLET P., LE HIR P., L'YAVANC J., DEGRES Y. (1998). Development of ALTUS, a high Frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. *Conference Oceans '98*, vol.1/3, 189-194.
9. LATTEUX B. (2005). *Estuaire de la Vilaine : Mission d'expertise sur la modélisation hydro-sédimentaire en milieu estuarien*. Rapport IAV (<http://www.lavilaine.com>)
10. LCHF (1962-1964). *Barrage d'Arzal : Etudes hydrauliques et sédimentologiques*. Archives Institution d'Aménagement de la Vilaine.
11. MAILLOCHEAU F. (1980). *L'envasement de l'estuaire de la Vilaine en aval du barrage d'Arzal*. DEA de Géologie Marine, Université de Nantes, 65 p.
12. WHITEHOUSE R.J.S., BASSOULLET P., DYER K.R., MITCHENER H.J., ROBERTS W. (2000). The influence of bedforms on flows and sediment transport over intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, 20, 1099-1124.