



## Morphodynamique d'une embouchure tidale artificielle éphémère : la lagune d'Albufeira, Portugal

Alphonse NAHON<sup>1</sup>, Paula FREIRE<sup>1</sup>, Ana Rita PIRES<sup>2</sup>, Guillaume DODET<sup>1,3</sup>,  
Xavier BERTIN<sup>3</sup>, Maria da Conceição FREITAS<sup>2</sup>, André B. FORTUNATO<sup>1</sup>,  
César ANDRADE<sup>2</sup>

1. Division des Estuaires et Zones Côtières, Laboratoire National d'Ingénierie Civile, Lisbonne, Portugal.  
*anahon@lnec.pt*
2. Centre de Géologie, Faculté des Sciences de l'Univ de Lisbonne, Lisbonne, Portugal.
3. UMR LIENSS 6250, CNRS – Université de La Rochelle, Institut du Littoral et de l'Environnement, La Rochelle, France.

### Résumé :

La présente étude examine le comportement morphologique d'une embouchure tidale éphémère, depuis deux semaines après son ouverture artificielle jusqu'à son comblement naturel huit mois plus tard. Des levés topo-hydrographiques mensuels permettent de discuter l'évolution au cours de cette période de la position longitudinale du chenal principal, de l'aire de la section mouillée du chenal principal et des chenaux internes et des deltas de flot et de jusant. Le calcul de la dérive littorale en face de l'embouchure (grâce un modèle de houle régional et à la formule empirique du CERC), permet ensuite d'interpréter ces évolutions en fonction du forçage.

La répartition temporelle ainsi que la variabilité de la dérive littorale locale expliquent la migration du chenal principal ainsi que l'apparition de méandres et de bifurcations qui réduisent l'efficacité hydraulique de l'embouchure. Les paramètres morphologiques extraits révèlent que le delta de flot ne croît pas en hauteur, mais que sa surface augmente au détriment des chenaux internes, dont les sections mouillées finissent par diminuer au cours de la période la plus énergétique. Cette diminution est accentuée au cours d'*overwashes*. Durant le dernier mois, la dérive totale nette s'inverse lors d'un épisode de forte houle avec une incidence importante, qui ferme alors l'embouchure. Ces observations illustrent des mécanismes qui, à différentes échelles temporelles, sont responsables de l'instabilité de ce type d'embouchures.

### Mots clés :

Embouchure tidale – Dérive littorale – Fermeture naturelle – Morphodynamique

### 1. Introduction

Au sein d'un système embouchure tidale/lagune, l'embouchure assure les échanges d'eau et de sédiments entre la lagune et une mer ou un océan. Dans le cas d'embouchures dominées par les vagues, un faible prisme de marée et/ou des conditions

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

de houle énergétiques peuvent conduire à la fermeture de l'embouchure. Une fois l'embouchure fermée, la qualité des eaux lagunaires se dégrade, empêche la pêche et la baignade et nuit à la faune et à la flore aquatiques locales. En revanche, l'accumulation d'eau dans la lagune permet sa réouverture par débordement localisé, naturel ou provoqué. Sur la côte portugaise, un régime méso-tidal et un climat de houle très énergétique rendent ces embouchures éphémères fréquentes (FREITAS, 1995). Les lagunes auxquelles elles sont souvent associées étant des niches écologiques ainsi que des lieux propices à la pêche et au tourisme, certaines embouchures sont ouvertes artificiellement afin d'assurer le renouvellement des eaux lagunaires. Elles restent alors ouvertes pendant des périodes allant de quelques jours à plusieurs mois. Afin de mieux comprendre les mécanismes qui conduisent à la fermeture de ce type d'embouchures, la présente étude se base sur des levés topo-hydrographiques réalisés durant la période d'ouverture d'une embouchure éphémère sur la côte portugaise. L'évolution du chenal principal et des chenaux internes ainsi que celle des deltas de flot et de jusant, sont discutées et interprétées à la lumière des valeurs calculées de dérive littorale.

### **2. Le site d'étude**

Située à une vingtaine de kilomètres au sud de Lisbonne (figure 1a), la lagune d'Albufeira est reliée de manière intermittente à l'océan. Ouverte artificiellement au printemps, l'embouchure se referme naturellement au cours de l'hiver. Périodiquement ouverte depuis le XV<sup>ème</sup> siècle, la fréquence de ces interventions au cours des 50 dernières années est blâmée pour l'ensablement de la lagune (FREITAS *et al.*, 1992). L'ensablement de la lagune et l'instabilité de l'embouchure sont favorisés par un contexte hydro-sédimentaire propice.

La bande littorale sableuse sur laquelle se trouve la lagune d'Albufeira est soumise à un régime méso-tidal semi-diurne, la composante M2 ayant une amplitude de l'ordre de 1 m, et à un climat de houle énergétique, avec une hauteur significative moyenne annuelle (calculée à partir des sorties d'un modèle régional de houle, pour la période 1953-2009: <http://disepla.fc.ul.pt/Micore/WaveDownload.html>) de 1.9 m au large. D'après FREITAS & ANDRADE (1994), une grande majorité du temps, l'embouchure exhibe les caractéristiques morphologiques d'une embouchure dominée par la houle, avec un chenal peu profond, un delta de jusant peu étendu et un delta de flot au contraire bien développé. Leurs travaux, basés sur une séquence d'états morphologiques, mettent en avant l'importance des processus de transport transversaux des corps sédimentaires pour expliquer la fermeture de l'embouchure et évoquent l'impact de l'élongation des chenaux et la diminution résultante de leur efficacité hydraulique.

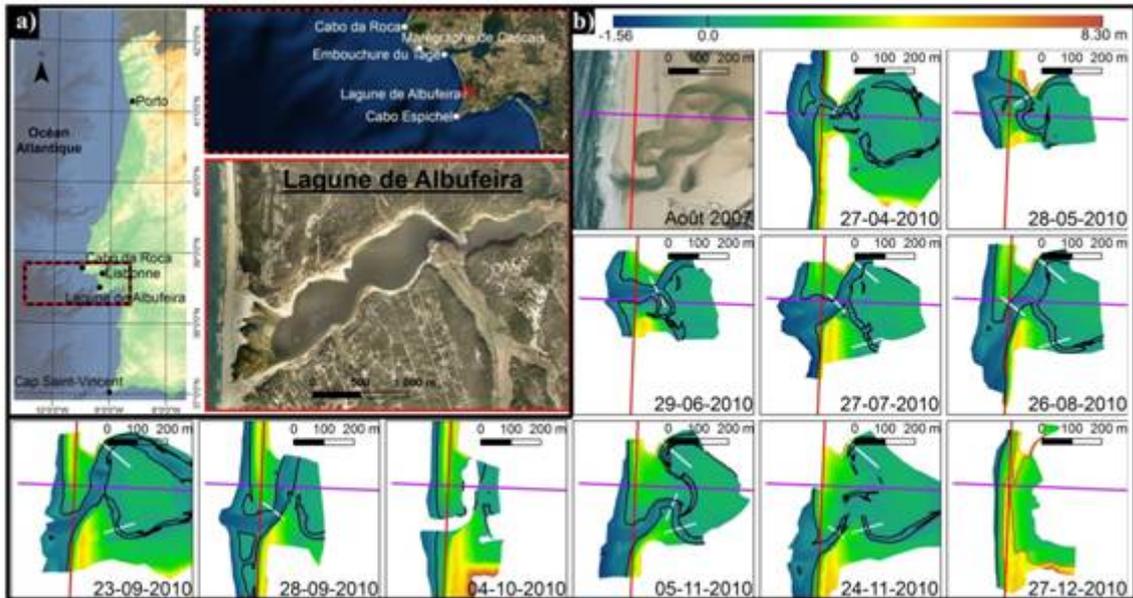


Figure 1. a) La lagune d'Albufeira, située sur la bande côtière sableuse entre l'embouchure de Tague et le cap rocheux du Cabo Espichel. b) Série de onze MNEs de l'embouchure, établis entre le 27 avril et le 27 décembre 2010. Les profils longitudinal et transversal sont respectivement indiqués en rouge et violet. Les profils utilisés pour les calculs de section sont en blancs. En rouge, le 27 décembre, la cote des 3.5 m.

### 3. Méthodologie

#### 3.1 Levés topo-hydrographiques

Au cours de l'année 2010, l'embouchure a été ouverte du 15 avril au 24 décembre. Pour cette période de huit mois, onze modèles numériques d'élévations (MNEs) ont été établis (figure 1b), trois de ces MNEs étant réalisés à cinq et six jours d'intervalle à la fin du mois de septembre. Des levés topo-hydrographiques ont été réalisés quasiment mensuellement en période de vives eaux, à l'aide de DGPS en mode RTK. Pour chaque levé, un MNE est constitué à l'aide d'une triangulation de Delaunay, dont les triangles sont à posteriori alignés avec les isolignes, afin de conserver les pentes et les chenaux. Centrés sur le chenal principal, et suivants sa migration, les levés recouvrent la partie intertidale du delta de jusant ainsi que les zones du delta de flot et des chenaux internes proches de l'embouchure. La zone d'étude se caractérise par l'absence de végétation et la présence d'un sable grossier dont le diamètre médian varie de 0.6mm à 1.7mm.

Afin de décrire le fonctionnement hydro-sédimentaire du système embouchure tidale / lagune, un ensemble de profils sur lesquels sont interpolés les MNEs a été défini (figure 1b). La position du chenal principal est définie comme la zone la plus profonde le long d'un profil longitudinal. L'aire de la section mouillée des chenaux est calculée le long de profils variables pour le chenal principal et, à partir de la fin du mois de juillet, le

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

long de profils fixes pour les chenaux internes. L'aire des sections mouillées est indiquée par rapport au niveau moyen de la mer (NMM). Un profil transversal permet d'évaluer les mouvements verticaux du delta de flot.

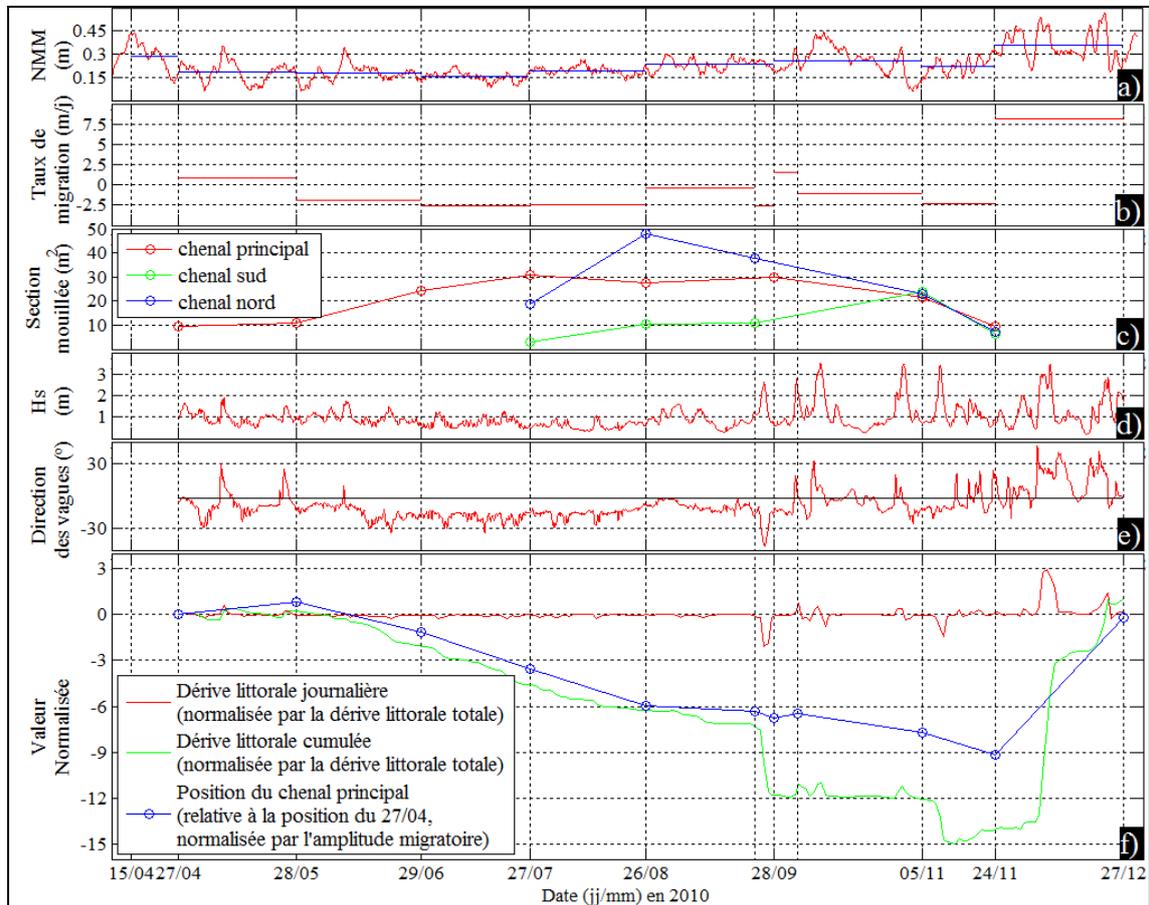


Figure 2. **a)** Niveau moyen de la mer, mesuré au niveau du marégraphe de Cascais. En bleu, la valeur moyenne utilisée pour le calcul de l'aire des sections mouillées. **b)** Taux de migration du chenal principal, en mètre par jour. **c)** Aire de la section-mouillée du chenal principal (en rouge) et des chenaux internes nord (en bleu) et sud (en vert). **d)** et **e)** Hauteur significative et direction (cartésienne) des vagues en face de la lagune. La direction normale à la plage est indiquée en noir. **f)** Valeurs journalière (en rouge) et cumulée (en vert) de la dérive littorale, normalisées par  $Q_{tot}$ . En bleu, la position du chenal principal, relative à sa position au 27 juillet. En **b)** et **f)**, les valeurs positives (resp. négatives) indiquent un transport/déplacement vers le nord (resp. sud).

### 3.2 Mesures hydrodynamiques et variation du niveau moyen

Lors des 23 et 24 septembre 2010, des mesures hydrodynamiques in-situ ont été effectuées afin d'identifier et de quantifier les processus hydrodynamiques en présence (DODET *et al.*, 2012). Les données de cette campagne sont ici utilisées pour

géoréférencer verticalement les MNEs : les données d'élévation acquises en face de la lagune sont comparées avec les données du marégraphe de Cascais, la différence observée étant rajoutée aux MNEs. Le NMM utilisé pour calculer l'aire des sections mouillées est donc obtenu à partir des données du marégraphe de Cascais (figure 2a), à l'aide d'un filtre de marée (PL33 décrit dans ROSENFELD, 1983), implémenté dans le programme d'analyse harmonique TAPPY (site web). Tout au long de la période de suivi, le NMM varie entre 0.15 m, entre les 26 juin et 27 juillet, et 0.36 m, entre les 24 novembre et 27 décembre.

### 3.3 Modélisation

Afin de calculer la dérive littorale à laquelle est soumise l'embouchure, un modèle de houle régional a été implémenté, basé sur les modèles spectraux de houle WW3 (TOLMAN, 2009) et SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999). Une séquence de domaines de calcul emboîtés (2 domaines WW3 et 3 domaines SWAN) est utilisée pour calculer le climat d'agitation local à partir des prévisions de vent du *Global Forecast System* (GFS) de la NOAA. Les domaines WW3, suivant le modèle de DODET *et al.* (2010), recouvrent l'Atlantique Nord et forcent la frontière d'un premier domaine SWAN allant du *Cabo da Roca* jusqu'au *Cabo Espichel*. Le niveau moyen dans les simulations SWAN est calculé à l'aide du modèle de circulation ELCIRC (ZHANG *et al.*, 2004), forcé par un modèle régional de marée (FORTUNATO *et al.*, 2002). Sur l'ensemble des domaines de calcul SWAN et ELCIRC, les effets du vent, principalement la génération des vagues, sont maintenus en forçant ces modèles avec les prévisions GFS.

Les résultats de la dernière simulation SWAN sont ensuite exportés le long d'un profil transversal, afin de calculer la dérive littorale à partir de la formule empirique du CERC (USACE, 1984) pour le flux de transport sédimentaire  $Q$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ):

$$Q = \frac{\rho K \sqrt{g/y_b}}{16 (\rho_s - \rho) (1 - \alpha)} Hs_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\theta_b) \quad (1)$$

Avec  $K$  un coefficient,  $\rho$  et  $\rho_s$  les densités de l'eau et du sable,  $g$  la gravité,  $y_b$  le rapport entre la profondeur et la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) au point de déferlement,  $\alpha$  la porosité ainsi que  $Hs_b$  et  $\theta_b$  la hauteur significative et la direction des vagues au point de déferlement. Le long du profil, le point de déferlement est identifié comme le point de  $H_s$  maximale. Le flux  $Q$  est alors calculé en ce point avec, faute de données pour calibrer le modèle, un coefficient  $K$  choisi égal à 1.

## 4. Résultats

### 4.1 Evolution morphologique

Trois périodes peuvent être distinguées (figure 1b). De fin avril à fin août, après avoir migré de 25 m vers le nord, le chenal principal progresse (de 215 m) continuellement

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

vers le sud (figure 2b), à raison de  $\pm 2.25$  m/jour en moyenne de juin à août. Aussi, l'engraissement progressif de la plage adjacente au nord du chenal principal, associée à l'érosion au sud, fait basculer le delta de jusant, relativement symétrique jusqu'alors, et crée un *offset* prononcé de la marge Nord. Enfin, au cours de cette période les chenaux se développent et l'aire des sections mouillées augmentent (figure 2c). Ensuite, au cours de septembre et jusque début octobre, le chenal principal migre moins vite (0.87 m/jour en moyenne) et une quantité importante de sable vient se souder et alimenter la plage sud. Avec l'érosion au nord, l'alignement des plages adjacentes au chenal principal est ainsi rétabli. De cette manière, le chenal principal et le chenal interne nord, qui étaient quasiment alignés, viennent former un coude. Cette configuration va progressivement obstruer le chenal interne au sud et l'isoler. Il en résulte qu'au cours de cette période, l'aire des section-mouillées du chenal principal et du chenal interne sud stagne, alors que celle du chenal nord diminue (figure 2c). Finalement, à partir du mois d'octobre il est possible d'observer deux modifications morphologiques majeures, de même que leur impact sur le fonctionnement de l'embouchure. Sur le premier MNE du mois de novembre, la trace d'un important *overwash* vient obstruer le chenal nord, ce qui réactive le chenal sud. En revanche cela génère un méandre prononcé et à la fin du mois de novembre, l'ensablement des chenaux est notable. Enfin, l'isoligne des 3.5 m sur le MNE du 27 décembre indique qu'avant son comblement total, le chenal principal a presque regagné sa position du 27 juillet, moyennant un taux de migration 8.12 m/jour au cours du dernier mois du suivi.

Les évolutions morphologiques le long des profils transversaux aux chenaux internes (figure 3) et du profil transversal (non-représentées) apportent des informations supplémentaires sur l'ensablement de la lagune. En particulier, on observe que le long de chacun des trois profils, la cote du delta de flot demeure relativement constante au cours du temps. Aussi, au vu de l'évolution de la section des chenaux, le delta de flot semble accumuler du sable même lorsque la section mouillée des chenaux augmente.

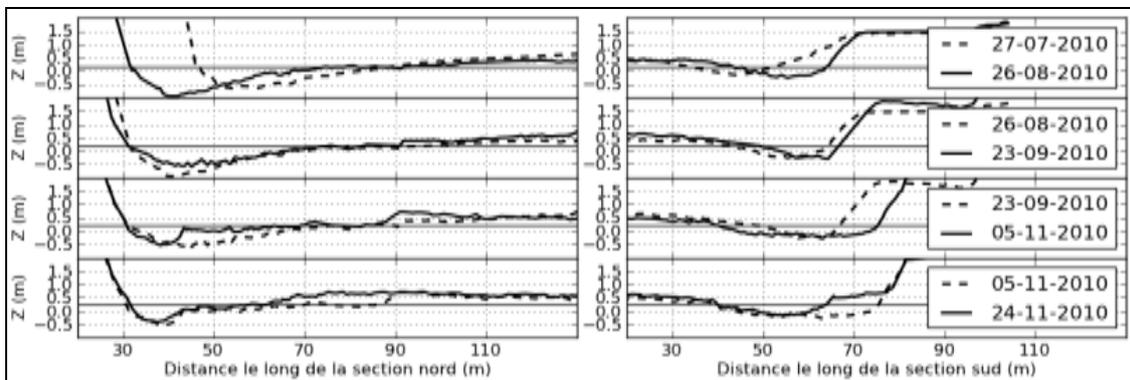


Figure 3. Évolution morphologique le long des profils transversaux aux chenaux internes nord (gauche) et sud (droite).

#### 4.2 Répartition temporelle de la dérive littorale

Le calcul de la dérive littorale en face de la lagune (figure 2d,e,f), indique une valeur totale nette ( $Q_{tot}$ ) de 21100 m<sup>3</sup> vers le nord, au bout des huit mois de suivi. Cette valeur demeure toutefois peu représentative du transport réel. En effet, la dérive cumulée atteint jusqu'à quinze fois cette valeur (316400 m<sup>3</sup>), vers le sud. Jusqu'à fin septembre, la dérive cumulée vers le sud augmente progressivement, sans à-coups ni diminution, alors qu'à partir de fin septembre la dérive cumulée évolue de manière plus irrégulière, sans suivre une réelle tendance. De fin septembre jusqu'à la fermeture de l'embouchure, la dérive littorale cumulée augmente ou diminue par à-coups sous l'impact d'évènements énergétiques. Aussi, alors que jusqu'à fin septembre la corrélation entre la dérive littorale cumulée et la migration du chenal est évidente, elle l'est moins ensuite, à l'exception du dernier mois d'activité de l'embouchure.

#### 5. Discussion et conclusion

En 2010, l'embouchure de la lagune d'Albufeira a connu trois phases d'évolution. D'abord, un forçage de houle modéré, mais constant, impose une migration relativement rapide du chenal principal. Malgré cette migration, les chenaux internes se développent et migrent légèrement afin de maintenir l'efficacité hydraulique de l'embouchure tout en permettant l'élargissement du delta de flot. Dans une seconde phase, le déséquilibre provoqué par l'accumulation de sable au nord du chenal principal, apporté par la dérive littorale, est compensé par le passage à un forçage océanique plus frontal, qui rétablit l'équilibre entre les plages nord et sud. Ceci a pour effets de diminuer le taux de migration du chenal, mais aussi d'accélérer l'ensablement de la lagune. Le sable introduit venant se déposer dans les chenaux, le delta de flot continue de s'élargir mais cette fois aux dépens de l'efficacité hydraulique du système. Suite à cette courte phase de transition, l'impact d'évènements énergétiques successifs domine l'évolution morphologique. Tout d'abord, la cicatrice d'un *overwash* inverse le fonctionnement du système dont le chenal dominant devient le chenal sud, et l'apparition de méandres facilite la fermeture totale de l'embouchure lors des évènements énergétiques du mois de décembre. En effet, l'importante dérive littorale, due à la forte houle et à son incidence persistante, colmate d'autant plus facilement le chenal principal que l'efficacité hydraulique du système se trouve réduite.

Ceci met en avant l'importance de l'intensité mais aussi de la répartition dans le temps du forçage océanique sur la fermeture d'une embouchure. Les résultats suggèrent que l'ensablement de la lagune a lieu tout au long de la période d'ouverture. Cependant la saisonnalité de phénomènes à caractère plus ponctuels suggère que ceux-ci sont des facteurs dominants dans le cas d'embouchures qui se ferment chaque année.

## 6. Remerciements

Ce travail a été financé par la Fondation portugaise pour la Science et la Technologie (FCT), dans le cadre des projets 3D-MOWADI (PTDC/ECM/103801/2008) et DETI (PTDC/MAR/65585/2006).

## 7. Références

- BOOIJ N., RIS R.C., HOLTHUIJSEN L.H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation*. Journal of Geophysical Research, Vol. 104(C4), pp 7649-7666. doi:10.1029/98JC02622
- DODET G., BERTIN X., BRUNEAU N., FORTUNATO A.B., NAHON A., TABORDA R. (2012). *Interactions vagues-courants dans une embouchure tidale dominée par la houle*. XII<sup>ème</sup> Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil. doi:10.5150/jngcgc.2012.005-D
- DODET G., BERTIN X., TABORDA R. (2010). *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*. Ocean Modelling, Vol. 31(3-4), pp 120-131. doi:10.1016/j.ocemod.2009.10.010
- FORTUNATO A.B., PINTO L., OLIVEIRA A., FERREIRA J.S. (2002). *Tidally generated shelf waves off the western Iberian coast*. Continental Shelf Research, Vol. 22(14), pp 1935-1950. doi:10.1016/S0278-4343(02)00069-9
- FREITAS M.C. (1995). *Laguna de Albufeira (Península de Setúbal): Sedimentologia, morfologia e morfodinâmica*. Thèse de Doctorat, Université de Lisbonne, 337 p.
- FREITAS M.C., ANDRADE C., JONES F. (1992), *Recent evolution of Óbidos and Albufeira coastal lagoons*. Proceedings of ICC-Kiel'92, pp 167-186.
- FREITAS M.C., ANDRADE C. (1994). *Tidal inlet evolution and characteristics at Albufeira Lagoon*. EUROCOAST-PORTUGAL, International LITTORAL 94 Symposium, pp 257-271.
- USACE (1984). *Shore Protection Manual*. Department of the Army, U.S. Corps of Engineers, Washington, DC (1984) 20314, Vol. I, chap. 4, pp 89-107.
- ROSENFELD L. K. (1983). *CODE-1, WHOI Technical Report*. n° 83-23, 185 p.
- TAPPY (site web). [http://sourceforge.net/apps/mediawiki/tappy/index.php?title=Main\\_Page](http://sourceforge.net/apps/mediawiki/tappy/index.php?title=Main_Page)
- TOLMAN H. L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- ZHANG Y., BAPTISTA A.M., MYERS E.P. (2004). *A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment*. Continental Shelf Research, Vol. 24(18), pp 2187-2214. doi:10.1016/j.csr.2004.07.021