



Réponse d'une plage fortement anthropisée en milieu semi-aride à une série de tempêtes (cas de la baie d'Agadir, Maroc atlantique)

**Ismail AOUCHE¹, Fatima Ezzahra OMDI¹, Lahcen DAOUDI¹,
Edward J. ANTHONY², Mouncef SEDRATI³**

1. Laboratoire de Géosciences et Environnement, FST Marrakech, BP 549, Marrakech, Maroc. aouiche31@gmail.com
2. Aix Marseille Univ, Institut Universitaire de France, CEREGE, UMR CNRS 6635, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, B.P. 80, 13545 Aix en Provence, France.
3. Université de Bretagne Sud, Equipe GMGL - Domaines Océaniques UMR 6538, Vannes, France.

Résumé

Cette étude concerne la réponse morphosédimentaire de la plage fortement anthropisée d'Agadir à la série de tempêtes qui a affecté les côtes nord-est atlantiques au cours du mois de janvier 2014. Les résultats obtenus ont montré que la réponse morpho sédimentaire de la zone intertidale était très différente entre le nord et le sud de la baie; chaque profil de la plage a présenté un mode de comportement spécifique. Cette réponse est contrôlée par plusieurs paramètres dont la variation des caractéristiques hydrodynamiques au niveau de la baie, la pente initiale de l'estran juste avant les tempêtes, l'orientation du trait de côte et l'angle d'incidence de la houle au point de déferlement.

Mots clés : Baie d'Agadir, Tempête, Anthropisation, Evolution, Dune, Modélisation.

1. Introduction

Les changements climatiques en cours suggèrent une agressivité des conditions climatiques s'accompagnant d'un risque de tempête accru soit par l'intensité des événements ou par leur fréquence qui entraîne une forte érosion de la plage. Ces effets peuvent être transitoires ou persistants, avec des plages qui peuvent prendre des semaines, des années ou même des décennies pour revenir à leur morphologie pré-tempête, la question est de savoir comment et quand les sédiments seront restaurés à la plage, en particulier sur quelle échelle de temps.

La côte nord-est atlantique a subi au cours du mois de janvier 2014, une série de tempêtes qui a affecté notamment le littoral d'Agadir (Maroc atlantique). Ce cas d'étude est particulièrement intéressant pour comprendre l'influence de ces tempêtes sur des littoraux fortement anthropisés des milieux semi-arides. En effet, l'évolution de ce littoral est liée à la conjugaison de facteurs naturels et de facteurs anthropiques complexes. Les aménagements portuaires, touristiques, hydro-agricoles et la croissance

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

urbaine du "Grand Agadir" ont gravement perturbé l'équilibre naturel du littoral de la baie d'Agadir. Après le séisme d'Agadir (1960), le plan directeur de la construction de la ville en 1962 a complètement transformé le paysage littoral. La dune bordière a beaucoup souffert d'une bétonisation et d'une urbanisation linéaire de la plage ; dans certains endroits elle est complètement arasée et son sable a été exploité pour construire des hôtels à proximité immédiate du rivage.

A partir des années 90 et dans le cadre d'une nouvelle politique de développement du tourisme de masse la construction de nombreux ouvrages de défense le long de la côte a conduit à une perturbation du fonctionnement hydro-sédimentaire et à une dégradation de l'environnement naturel de la plage. Cette dégradation s'est manifestée par une destruction totale de la dune bordière pour construire les premiers complexes hôteliers, et la mise en place d'une digue promenade.

Dans le cadre d'un suivi saisonnier de l'évolution topographique de la baie d'Agadir que nous avons entrepris au cours du mois d'avril 2013, le premier de son genre sur cette côte, nous avons réalisé une quinzaine de profils topographiques et plusieurs modèles numériques de terrain. La fréquence de ces campagnes de mesure a été augmentée suite à cette série de tempête. Le but est de mettre en évidence la réponse morphologique de cette plage particulière à ces phénomènes extrêmes.

2. Caractéristiques de la baie d'Agadir

Situé sur la côte atlantique du Maroc à 30°25' nord et 9°38' Ouest, la baie d'Agadir est implantée au fond d'une baie protégée au nord par le Cap Ghir et largement ouverte vers le sud-ouest. Elle forme une zone de transition entre une côte rocheuse au nord et une longue côte sableuse, rectiligne et basse au sud. Les vents dominants dans la région sont de direction W-NW, ils accompagnent généralement les tempêtes en provenance des Açores qui ont lieu de mars à octobre (LCHF, 1972 ; LPEE & SOGREA, 1990). Des vents de direction W-SW. seraient aussi occasionnellement observés.

La houle le long des côtes marocaines résulte de dépressions barométriques lointaines et sans relation avec les vents locaux. Les caractéristiques de la houle et de niveau d'eau au cours de la période de collecte des données sur le terrain (voir figure 1) montrent une séquence de deux tempêtes qui se sont produites le 07 et le 18 Janvier 2014 avec des hauteurs d'eau de marée prédites atteignant respectivement 3,6 et 3,4m par rapport au zéro hydrographique, et étiqueté A et B sur la figure 1b. La tempête A du 7 janvier 2014 représente un événement extrême puisqu'elle est la 3ème des plus fortes houles de tempête qu'ont connu les côtes marocaines au cours des 10 dernières années. La même direction de houle a été enregistrée dans le cas des deux tempêtes ; elle est de N140. Cependant, la hauteur de houle significative enregistrée au large de la côte d'Agadir durant les deux tempêtes étaient respectivement de 6,1m et 5,5 m, avec des périodes de 21s pour la tempête A et 15,2 s pour la tempête B.

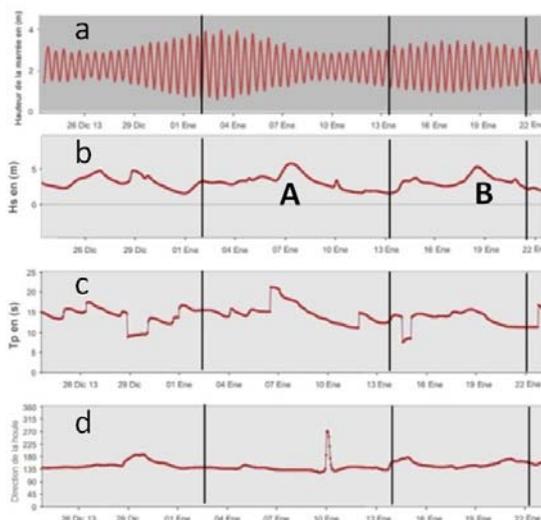


Figure 1. a-Niveau d'eau relatif, b-Hauteur significative de la houle au large H_s , c-Période de pic (T_p), d – Direction de la houle, les lignes verticales indiquent les dates des campagnes de mesure.

3. Méthodologie

Afin de suivre l'évolution morphologique de la zone intertidale de la baie d'Agadir, 14 profils topographiques et deux modèles numériques de terrain ont été effectués sur l'ensemble de la baie. Trois campagnes de mesure seront prises en considération dans cette étude ; 3, 17 et 22 janvier 2014 (voir figure 2). Les levés topographiques ont été réalisés à l'aide d'un tachéomètre TS 06 (précision de $\pm 1\text{cm}$ et $0,2^\circ$).

Les repères situés sur l'arrière-plage du site de suivi ont été raccordés au réseau géodésique national. Pour le traitement des modèles numériques de terrain, l'approche numérique du krigeage a été utilisée ; en effet comme l'ont montré plusieurs auteurs (LOUATI & ZARGOUNI, 2009 ; ROBINSON, 1994 ; BOURGAULT & MARCOTTE, 1997 ; GUIBLIN *et al.*, 1996 ; GUILLAUME, 1977) le krigeage, dont l'erreur moyenne quadratique est la plus faible (entre 2,05 et 5,3 cm), est la méthode d'interpolation la plus appropriée pour construire un modèle numérique de profondeur. Concernant les caractéristiques de la houle, les données d'onde utilisées dans cette étude correspondent à des prévisions quotidiennes générées par le réseau espagnol et dont les registres sont gérés par les autorités portuaires de l'Espagne.

4. Résultats et discussion

4.1 Réponse morpho sédimentaire de la baie d'Agadir

La variation de la réponse topographique de la zone intertidale au niveau de la baie d'Agadir est illustrée quantitativement par les mesures sur des profils transversaux avant et après les deux tempêtes (voir figure 3). La position du niveau moyen de la

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

marée est située à une hauteur de 1,2 m. Cette étude à court terme montre que chaque profil de plage présente un mode de comportement spécifique.

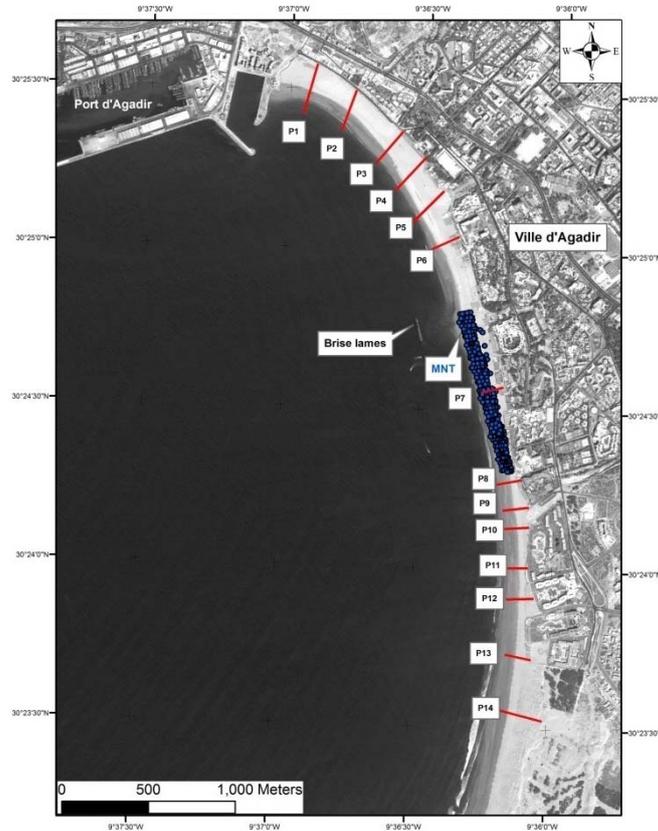


Figure 2. Carte de localisation des profils et du MNT réalisés dans la zone d'étude.

Dans la partie Nord de la baie (profils 1 à 5), le premier relevé réalisé avant la tempête A montre la présence d'une barre intertidale bien développée, dont la hauteur atteint 1 m (voir figure 3a). De telles barres intertidales jouent un rôle important dans la stabilité des plages du fait qu'elles peuvent amortir les vagues de tempête et dissiper leur énergie (WATABE & SASSA, 2008). La première tempête a causé la destruction totale de cette barre, avec un taux de recul qui varie de 16,7 m au niveau du profil 4 à 47,45 m au niveau du profil 3. Dans cette zone, les profils avaient une pente moyenne de $2,69^\circ$ (définie entre 1,2 m et -2 m) avant la première tempête A. Après cette tempête la ligne de rivage a avancé d'environ 47 m, alors que la zone intertidale supérieure a subi une élévation d'environ 0,4 m et l'exhaussement maximale de la plage était de l'ordre de 1 m à la limite supérieure de l'action des vagues ; par conséquent, la pente moyenne de la zone intertidale s'est adoucie à $1,04^\circ$. Suite à la deuxième tempête B, la situation s'est aggravée avec un recul de 32 m, et une diminution de la pente de $1,04^\circ$ à $1,02^\circ$ (voir figure 3a). Ainsi, dans cette zone de la plage, on assiste à un transfert du sable qui compose cette barre soit vers l'arrière plage soit vers les petits fonds (-1 m à

-2 m) ; conduisant à un adoucissement de la pente et un rééquilibrage du profil de la plage.

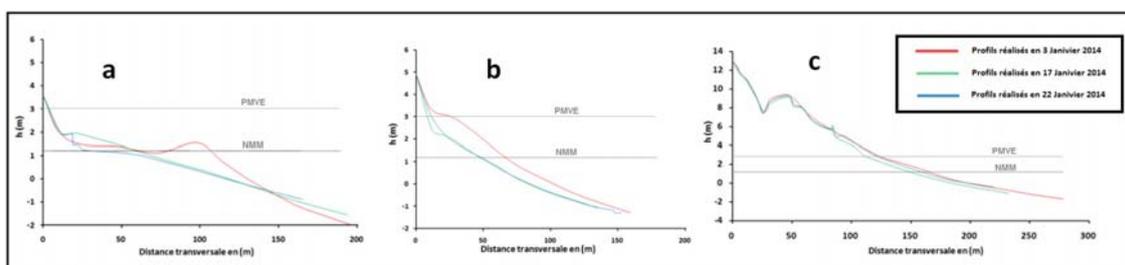


Figure 3. Evolution des profils types de chaque zone de la baie d'Agadir (a : zone nord-profil 3 ; b : zone sud-profil 12 et c : profil 14 ; La ligne horizontale NMM représente le niveau moyen de la mer ; La ligne horizontale PMVE représente le niveau pleine mer des vives eaux).

Concernant la partie sud de la baie, (profils 6 à 13), on assiste à la disparition de la barre intertidale ; l'estran se rétrécit en se déplaçant vers le sud et la pente devient de plus en plus convexe. Suite à la tempête A, l'érosion accentue la convexité du profil de plage, avec un transfert de sédiments du haut vers le bas de plage. La nouvelle allure des profils suggère que les sédiments prélevés au niveau de l'estran sont transférés vers le bas de plage, à -2 m de profondeur. Le recul maximum est enregistré au niveau du profil 12, où la ligne de rivage a reculée de 18 m après la tempête A et de 1.7 m après la tempête B (voir figure 3b). La morphologie de cette portion de la baie indique clairement des conditions réfléchissantes marquées par une forte pente favorisant la naissance de forts courants d'arrachements (CARTER, 1988). Ceci explique pour la totalité des profils réalisés dans cette zone (profil 6 à 13), il n'y a pas d'accumulation en bas de plage (voir figure 3b). Dans les années 80, cette portion de la baie d'Agadir était formée d'une dune très massive (12 à 14 m) et d'une plage à pente douce qui se prolongeait jusqu'à la plage sous-marine.

Parmi les 14 profils réalisés ; le profil 14 fait exception ; il présente une zone intertidale marquée par une pente initiale la plus douce qui est de l'ordre de $1,35^\circ$. Cette pente est restée pratiquement inchangée après les deux tempêtes (voir figure 3c). Au cours de la première tempête (A), on a enregistré un recul de la ligne de rivage de 14,46 m alors qu'après la deuxième tempête, on note une avancée de l'ordre de 8,67 m. Ce profil réalisé sur la portion résiduelle de la dune bordière nous permet de mettre en évidence le rôle joué par cette dernière dans la préservation de l'équilibre naturel de la plage. Cette relation complexe entre les dunes côtières et les plages a été abondamment discuté dans la littérature. Ces dunes bordières agissent comme une zone de stockage et de source de sable pour la plage ; en effet, elles fournissent du sable qui contribue à la dissipation de

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

l'énergie des houles dans l'avant côte (JACKSON & NORDSTROM, 2011 ; YOUNG & DEBUTTS, 2011).

En plus des 14 profils intertidaux réalisés au niveau de la baie d'Agadir, et afin d'étudier les changements morphologiques survenus en réponse aux conditions hydrodynamiques liées aux deux tempêtes, des relevés topographiques en 3D ont été réalisés en même temps que les profils. Ces relevés topographiques ont permis d'obtenir des MNT et par différence des cubatures, de représenter les évolutions entre deux dates (voir figure 4). Le premier MNT anté-tempête a été réalisé le 3 janvier, le deuxième a été réalisé juste après la première tempête (A). Les deux MNT couvrent une surface de l'ordre de 160000 m². Les résultats montrent que l'érosion a concerné principalement le haut estran sur une épaisseur pouvant atteindre 80 cm (voir figure 4). Par ailleurs, la carte des évolutions du bilan sédimentaire montre que le matériel érodé déposé à un niveau plus bas avec un dépôt plus accentué au nord derrière le brise-lames qui est de l'ordre de 20 cm (voir figure 4).

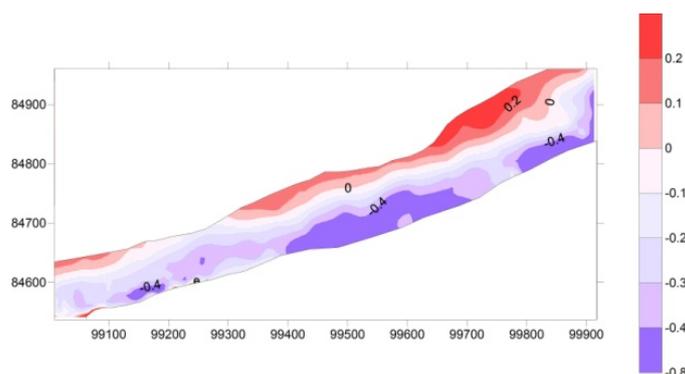


Figure 4. Carte des évolutions résiduelles en m.

Il convient de noter que même si la plupart de ces mouvements sédimentaires peuvent être attribués à des échanges transversaux, il peut aussi y avoir des transferts longitudinaux générés par la dérive littorale. Ainsi la variabilité de la réponse des profils est étroitement liée aux conditions hydrodynamiques, notamment lors des périodes de forte agitation (REICHMÜTH, 2003 ; SEDRATI 2006 ; REICHMÜTH & ANTHONY, 2007 ; SEDRATI & ANTHONY, 2007). Une modélisation a été réalisée à l'échelle de toute la baie, et plus localement, au niveau du secteur de réalisation des MNT.

4.2 Application du modèle Refonde-CETMEF, et du Mopla- SMC

Les simulations de la propagation de la houle, depuis le large vers la zone d'étude, montrent tout d'abord une déformation importante des houles au cours de leur propagation (voir figure 5). Chaque étape de la simulation donne des résultats à interpréter avec prudence, puisque les valeurs d'intensités de vitesse obtenues restent théoriques et nécessitent un calage expérimental sur le terrain. Les ouvrages de

protection du port d'Agadir (digue et musoir du port) entraînent, par diffraction-réflexion-radiation, une diminution de l'énergie de la houle à la côte. Cette diminution de l'énergie est très significative dans la partie nord de la baie semi abritée, située immédiatement au sud du port (voir figures 5a, et 5b). Cependant, les secteurs exposés à l'agitation la plus sévère sont situés plus au sud, au-delà de la zone abritée par les jetées du complexe portuaire.

La simulation par Mopla a permis de quantifier les vitesses du courant dont les valeurs les plus élevées se concentrent au sud, surtout entre les deux points A-B (voir figure 6). Ainsi les vecteurs du courant ont montré deux grandes tendances avec deux dérives ; une orientée vers le nord et l'autre vers le sud, créant ainsi un point de divergence au centre de la baie. Cette analyse confirme les résultats obtenus au niveau des profils, expliquant que les sédiments prélevés au nord de la zone d'étude ne sont pas perdus, puisque le milieu est calme de point de vue de l'agitation. Ainsi les courants de la dérive sont faibles et sont tous orientés vers le nord. Ces résultats expliquent que malgré le taux de recul important de la ligne de rivage enregistré au Nord ; il n'y a pas eu de grosses pertes de sédiments par la dérive mais on a seulement une redistribution soit vers le haut estran soit vers le bas estran, avec un changement d'allure des profils marqué par une diminution de la pente.

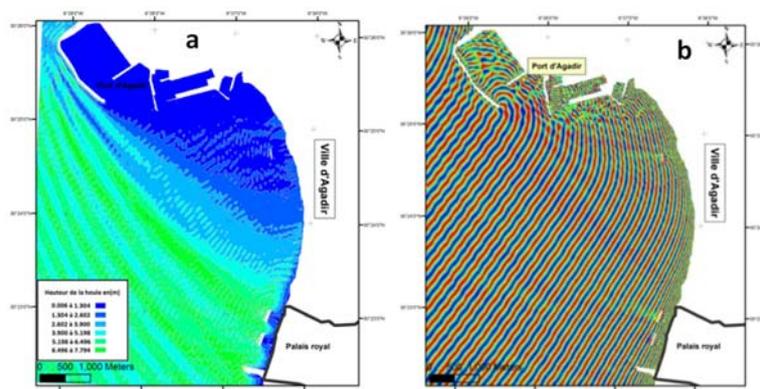


Figure 5. a- Variation de la hauteur de la houle au niveau de la zone d'étude pour une houle aléatoire ($H_s : 5,9 \text{ m}$, $T_p : 16 \text{ s}$, Direction : N140)
b- Variation de la direction de la houle du large vers la côte.

Par ailleurs, la partie sud entre le point A-B est caractérisée par une dérive très forte capable de prélever de grandes quantités de sédiments. Ceci explique que pour la totalité des profils situés au sud, il n'y a pas eu un dépôt significatif en arrière plage ou en bas d'estran. La zone située en arrière du brise-lames (secteur nord), a montré la présence d'une zone de convergence (voir figure 6), qui explique le dépôt mis en évidence au niveau de la carte des bilans sédimentaires (voir figure 4).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

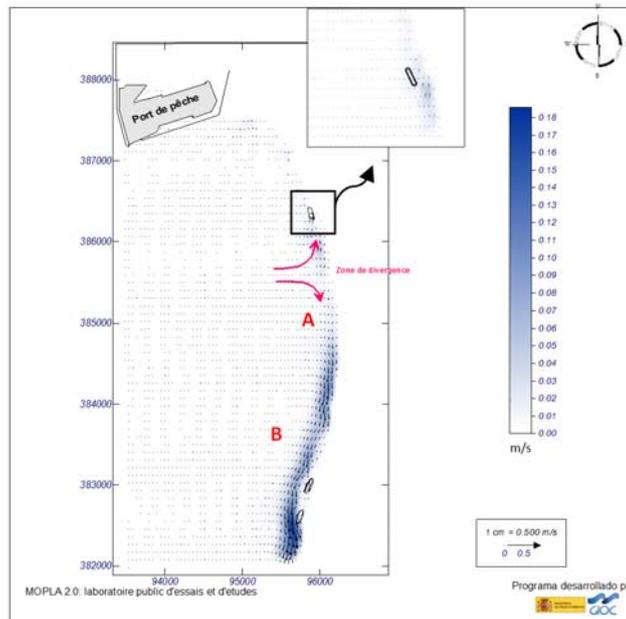


Figure 6. Courants de la houle au niveau de la baie d'Agadir.

5. Conclusion

L'érosion des plages lors des tempêtes est un phénomène complexe. L'analyse des données obtenues au cours de ce travail montre que les plages réfléchissantes à pente forte sont plus changeantes que les plages dissipantes qui souffrent moins de l'érosion. La propagation de la houle, depuis le plateau continental externe vers la zone d'étude, montrent une déformation importante des houles au cours de leur propagation. Cette particularité résulte de la déformation de l'onde incidente venant de l'Atlantique par les obstacles que représentent les jetées des ports d'Agadir et surtout celle du port de commerce. Cette étude montre que bien que l'observation et les mesures sur terrains soient indispensables pour l'analyse et la compréhension de l'évolution morphodynamique d'une plage, la modélisation représente un outil précieux qui permet, sous réserve, d'avoir des mesures in situ de bonne qualité et actualisées, de quantifier les améliorations afférant aux nouveaux aménagements et d'en apporter un support visuel.

6. Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre de l'action intégrée Volubilis Hubert Curien (n° MA/13/290). Nous tenons à remercier la direction des ports à Rabat (DPDPM), et le laboratoire public d'essai et d'étude-Centre expérimental d'hydraulique Casablanca (LPEE-CEH), pour leur participation.

7. Références

- BOURGAULT G., MARCOTTE D. (1997). *Multivariable variogram and its application to the linear model of coregionalization*. *Mathematical Geology*, Vol. 23, pp 899-928. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02066732>
- CARTER R.W.G. (1988). *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines*. Academic Press, London, 617 p.
- GUIBLIN P., RIVOIRARD J., SIMMONDS E.J. (1996). *Analyse variographique de campagnes acoustiques sur le Hareng écossais*. *Forum Halieumétrique*, Nantes, pp 93-97.
- GUILLAUME A. (1977). *Analyse des variables régionalisées*. Editions Doin, Paris, 180 p.
- JACKSON N.L., NORDSTROM K.F. (2011). *Aeolian sediment transport and landforms in managed coastal systems: A review*. *Aeolian Research*, Vol. 3, pp 181-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.011>
- LCHF -Laboratoire centrale hydraulique de la France- (1972). *Modélisation physique du port d'Agadir, Casablanca (Maroc)*. Rapport, 4 p.
- LOUATI M., ZARGOUNI F. (2009). *Modélisation topo-bathymétrique et transit sédimentaire. Exemple des plages sableuses de la baie de Tunis, Nord-est de la Tunisie*. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 3, pp 211-222.
- LPEE, SOGREA H. (1990). *Etude bibliographique sur le rechargement des plages par les produits de dragage*. Rapport interne, 6 p.
- REICHMÜTH B. (2003). *Contribution à la connaissance de la morphodynamique des plages à barres intertidales, approche expérimentale. Côte d'Opale, Nord de la France*. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque, 248 p.
- REICHMÜTH B., ANTHONY E.J. (2007). *Tidal influence on the intertidal bar morphology*. *Geomorphology*, Vol. 90(1-2), pp 101-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.015>
- ROBINSON G.J. (1994). *The accuracy of digital elevation models derived from digitized contour data*. *Photogrammetric record*, Vol. 8, pp 805-814.
- SEDRATI M. (2006). *Morphodynamique et transport hydro-sédimentaire sur les estrans macrotidaux du Nord-Pas-de-Calais : Implications en aménagement du littoral*. Thèse de doctorat l'Université du Littoral Côte d'Opale, 215 p.
- SEDRATI M., ANTHONY E.J. (2007). *Storm-generated morphological change and longshore sand transport in the intertidal zone of a multi-barred macrotidal beach*. *Marine Geology*, Vol. 244(1-4), pp 209-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2007.07.002>
- YOUNG D.R., DEBUTTS H.A. (2011). *Enhancing geomorphic and biologic functions and values on backshores and dunes of developed shores: a review of opportunities and constraints*. *Environmental Conservation*, Vol 38, pp 288-302. <http://dx.doi.org/10.1017/S0376892911000221>

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

WATABE Y. SASSA S (2008). *Application of UAV aerial photography to temporospatial assessment of tidal flat geomorphology*, Proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion, pp 519-525.