

PRÉSENTATION D'UNE APPROCHE NUMÉRIQUE POUR LA MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE: CAS DU LITTORAL DE MOHAMMEDIA (MAROC)

Mohammed Idrissi

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc
LSEET, UMR 6017, Université du Sud Toulon-Var,
La Garde Cedex, France

Fabrice Gouaud

ACRI- IN Sophia Antipolis, Nice, France

Vincent Rey

LSEET, UMR 6017, Université du Sud Toulon-Var,
La Garde Cedex, France

Ahmed Makaoui

Omar Ettahiri

Karim Hilmi

Institut National de Recherche Halieutique, Casablanca, Maroc

Mohamed Chagdali

Ahmed Hourimeche

Faculté des Sciences Ben M'sik, Driss El Harti, Casablanca, Maroc

Abstract

We present numerical modelling to study the impact of natural and anthropic process on the sedimentary dynamic. This approach is based on the numerical modelling of wave propagation and of sediment transport in order to predict the shoreline evolution. The results concern the localization of erosion or accretion areas. A long term shoreline evolution can be determined. This multidisciplinary method is applied to the case of the Mohammedia coast (Morocco).

Keywords: Shoreline evolution, Sedimentary dynamic, wave propagation, Mohammedia coast-(Morocco)

Résumé :

Nous présentons dans ce travail une méthodologie numérique pour d'étude de l'incidence des processus naturels et anthropiques sur la dynamique sédimentaire actuelle du littoral. Cette méthodologie est basée sur la modélisation numérique de la propagation de la houle à la côte pour calculer le transport des sédiments et simuler l'évolution du trait de côte. Les résultats obtenus sont relatifs à l'impact des aménagements côtiers d'un point de vue hydrodynamique et à la localisation des secteurs soumis à l'érosion et des secteurs sujets à l'accrétion. Pour le long terme, l'évolution du trait de côte peut être déterminée. Cette méthodologie multidisciplinaire est appliquée au littoral de Mohammedia (Maroc).

Mots clefs: Evolution du trait de côte, dynamique sédimentaire, propagation de la houle, littoral de Mohammedia (Maroc)

Introduction

Le littoral est un domaine privilégié pour étudier et mieux comprendre l'incidence des processus naturels et anthropiques sur la dynamique sédimentaire actuelle. Cet impact se caractérise par une évolution du trait de côte qui reste liée à la compréhension des mécanismes hydrodynamiques et morpho-dynamiques côtiers. De façon plus appliquée, la modélisation de cette évolution, qu'elle soit due à des processus naturels ou liée à la construction d'ouvrages, reste un problème d'actualité pour les problèmes d'aménagement côtier et de gestion du littoral. Les études antérieures montrent que le comportement de la côte est le résultat d'un grand nombre de processus et de mécanismes qui agissent et interagissent à des échelles de temps et d'espace différentes (De Vriend et al., 1992 ; Rey et al., 2013). Ces processus peuvent être étudiés selon deux approches: Une approche à "moyen terme", qui utilise les données de houles significatives disponibles, ou une approche à plus "long terme", surtout quand l'évolution bathymétrique est inconnue.

Nous avons considéré dans cette étude le cas du littoral de Mohammedia (Maroc) avec un modèle de comportement basé sur la conservation de la masse sédimentaire parallèlement à la plage. Les variations temporelles de profil bathymétrique perpendiculairement à la côte ont été négligées, ce qui est communément admis pour des profils monotones à des échelles de temps suffisamment grandes (Dean, 1977 ; Rey et al., 2011 ; 2014). Les hypothèses physiques ainsi que le modèle mathématique et la méthode de résolution numérique sont présentés dans une première partie. Le modèle est ensuite appliqué au littoral de Mohammedia (Maroc) où la nature de l'évolution du trait de côte est discutée.

Présentation du domaine d'étude

Dans ce travail nous nous intéressons au cas de la baie de Mohammedia pour lequel une très forte modification du trait de côte a pu être observée et mesurée ces dernières années (Idrissi, 2006 et Idrissi et al., 2004), en particulier depuis la construction du nouveau port. La baie de Mohammedia se situe au nord de Casablanca au Maroc. Cette côte s'étend du port de Mohammedia, incluant la plage de Mohammedia, la plage de Mannesmann, la plage de Monika, jusqu'à la plage Sablette terminée par l'oued Nfifikh. La zone est limitée par les latitudes $7,2^\circ$ et $7,24^\circ$ et les longitudes $33,42^\circ$ et $33,47^\circ$ (Fig. 1).

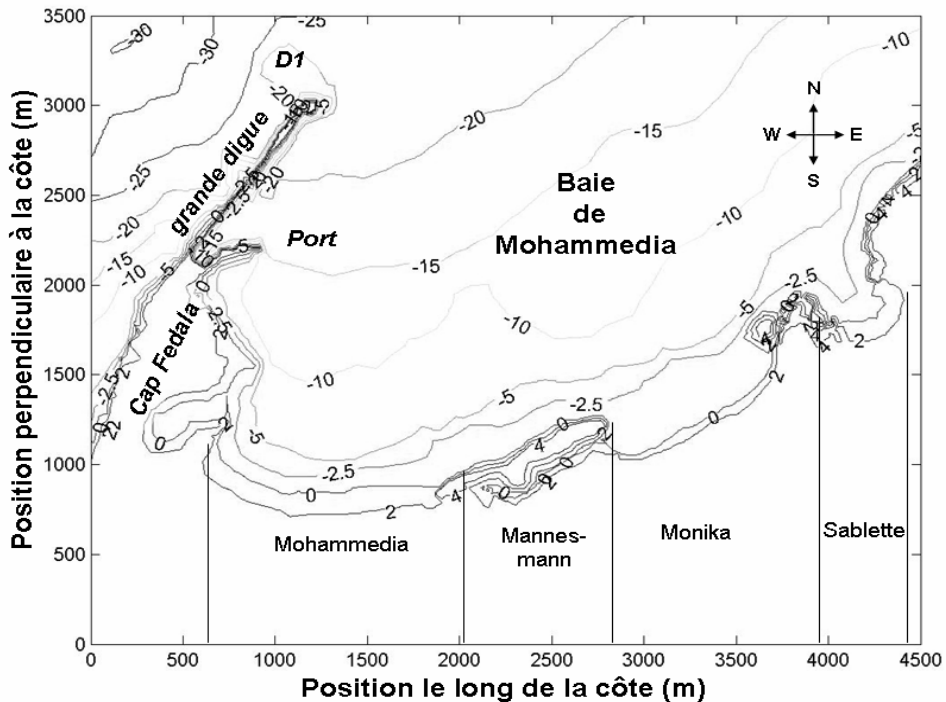


Figure 1: Bathymétrie du domaine d'étude

La morphologie du domaine d'étude est caractérisée par l'alternance des plages sableuses et des plages à platiers rocheux. A l'Ouest, au niveau du cap de Fedala, la pente du fond est importante. Une dorsale sous marine se trouve dans le prolongement du cap. La grande digue du port de Mohammedia relie la pointe du cap et la dorsale. A l'Est du cap, la baie de Mohammedia est caractérisée par des pentes douces. Sur certaines portions de plage, conséquence de l'érosion intense, le recul du trait de côte a découvert plusieurs zones de platiers rocheux. Ces platiers semblent jouer maintenant un rôle protecteur pour la plage de Mannesmann.

Les travaux de Idrissi (2006) et Idrissi et al. (2004), montrent un recul du trait de côte dans la zone de Monika et une avancée dans la zone de

Mohammedia. L'utilisation de photographies permet de visualiser graphiquement la dynamique du littoral Casablanca - Mohammedia (Fig. 2). Les observations de l'évolution du trait de côte le long de la côte de Mohammedia confirment les observations in situ pour les trois plages décrites précédemment. Il est à noter en particulier l'accrétion que subit la plage de Mohammedia depuis des années ainsi que l'érosion au niveau de Monika. L'analyse des photographies aériennes des années 1969, 1986, 1997 et 2003, montre que les plages du secteur Est de la baie de Mohammedia subissent une érosion et un recul depuis 1969 qui est estimé à 51 m en 34 ans (1,5 m/an). Les plages Monika et Mannesmann subissent le plus ce recul. Le débit solide transporté y a été évalué entre 3000 et 4500 m³/j. Ce transport latéral des sédiments côtiers, depuis la plage Monika vers la plage Mohammedia, est responsable entre autres de l'édification des corps sédimentaires (Tombolos) au niveau de la plage Mannesmann et de l'accrétion de la plage de Mohammedia. Les plages du secteur Ouest sont en accrétion. Ceci est en rapport avec le fait que la jetée du port protège cette plage contre l'effet érosif des vagues. Cependant, la présence de l'épi oriental a contribué à la surélévation et l'élargissement de ce secteur Ouest en obligeant le courant de dérive littorale à déposer une partie de sa charge sédimentaire. Cette charge vient essentiellement de l'érosion des plages du secteur Est. La plage Sablette, presque stable, subit un léger recul. Ceci est en rapport avec la forme en baie de cette plage qui est située dans l'embouchure de l'Oued Nfifikh. Cette plage est détachée du reste de la baie par un platier rocheux et des dunes bordières conséquentes. Elle sera considérée par la suite indépendante du système de plages Mohammedia-Mannesmann- Monika.

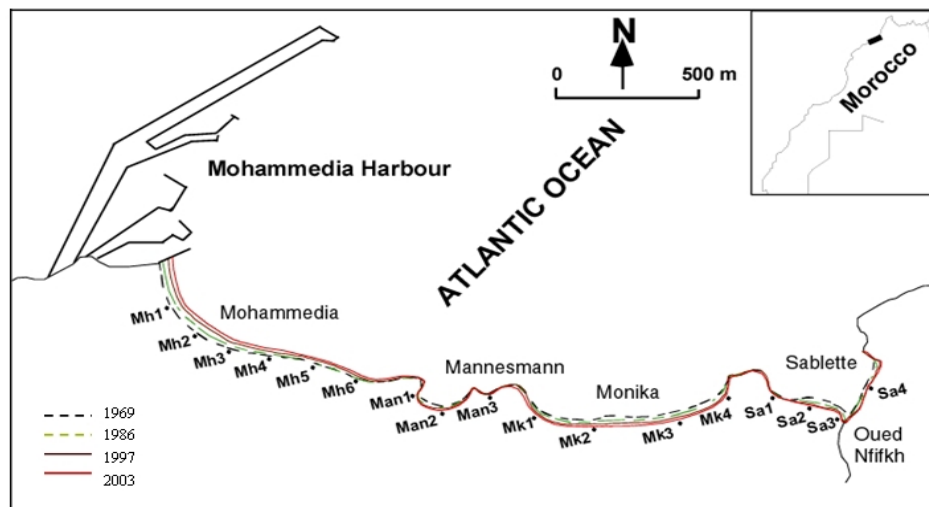


Figure 2: Traits de côte à différentes dates, d'après les photographies aériennes (Idrissi, 2006)

Les différentes considérations et outils discutés et étudiés précédemment, surestimaient fortement la tendance d'avancée ou de recul. De plus, ces outils ne permettent pas d'analyser l'influence des infrastructures côtières, en particulier la grande digue du port.

Pour compléter les résultats existants sur le fonctionnement de la dynamique sédimentaire dans la baie de Mohammédia, une étude a été menée avec une approche numérique dont les outils sont présentés ci-après.

Simulation numérique Modélisation numérique

Pour estimer les taux d'engraissement et de démaigrissement du littoral du site d'étude, on utilise une approche numérique composée d'un modèle de propagation de la houle pour localiser les zones de convergence, et un modèle de comportement de transport solide pour calculer l'évolution du trait de côte. Le modèle de propagation de la houle prend en compte les effets combinés de la diffraction et de la réfraction, REFDF1 (Kirby et Dalrymple, 1983). Avant son application ce code de calcul a fait l'objet d'un certain nombre de tests visant à déterminer sa capacité à représenter la réalité, avec en particulier une comparaison avec des données issues d'une étude expérimentale (Gouaud, 2007). Il en ressort que ce modèle numérique représente bien la propagation de la houle au-dessus de fonds variables. Et pour une houle irrégulière, la représentation est encore plus précise. REFDF1 ne peut être utilisé que pour des houles monochromatiques. Il est cependant possible de l'utiliser pour représenter la propagation des houles réelles. Le critère de déferlement utilisé est la relation qui lie la hauteur de houle et la profondeur:

$$H_B = \gamma \cdot d_B \quad (1)$$

H_B est la hauteur de houle au déferlement, d_B est la profondeur au déferlement et γ est le coefficient de déferlement pris égal à 0,78.

Le modèle de calcul de l'évolution du trait de côte résout l'équation (Horikawa, 1988) :

$$\frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{1}{D} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (2)$$

où Q est le débit sédimentaire, D est la profondeur de fermeture, y est la position perpendiculaire à la côte, x est la position le long de la côte et t est le paramètre temps. Le débit Q est calculé par la formule du CERC (Krauss et Harikai, 1983):

$$Q = H_B^2 C_{gB} \left(K_1' \cdot \sin(2 \cdot \alpha_{BP}) - K_2' \cdot \cos(\alpha_{BP}) \frac{\partial H_B}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Avec α_{BP} l'incidence de la houle au déferlement par rapport à la plage, C_{gB} la vitesse de groupe au déferlement. x, y sont les coordonnées cartésiennes. K_1', K_2' sont deux constantes empiriques.

Le modèle de calcul complet est composé du modèle numérique de houle pour obtenir les caractéristiques au déferlement et du modèle de calcul de l'évolution du trait de côte qui fait intervenir (3).

Conditions de houle

L'étude de la houle depuis vingt ans (1983-2003), montre que la direction de propagation dominante est NW. La houle significative a pour caractéristiques respectivement en hiver et en été, 15s et 7s de période pour respectivement une hauteur de 3,4m et de 2m. Le régime des marées est semi diurne. Le marnage moyen est de 2,2m avec un maximum à 3,5m et un minimum à 0,9m.

Traitement de la bathymétrie

Pour la simulation de la houle, les caractéristiques au large sont considérées identiques à celles des données au large de Casablanca, situé à 23 km plus à l'Ouest. Les houles auxquelles sont soumises les côtes de la région peuvent être de période relativement longue. Cela oblige par conséquent à utiliser des bathymétries allant jusqu'à des profondeurs importantes. En couplant différentes cartes marines fournies par le SHOM, deux grilles bathymétriques ont été élaborées. Une première, s'étend jusqu'à 40 km au large, ce qui correspond à une profondeur de 170m. Les dimensions de la grille sur laquelle doivent être réalisés les calculs sont ici importants par rapport à la longueur d'onde moyenne des houles qu'il est nécessaire de propager. Afin de respecter les capacités de calcul des moyens informatiques à disposition, un pas d'espace relativement lâche sera utilisé (50m). Cependant, une meilleure résolution est nécessaire au niveau de la baie de Mohammedia, ceci afin de pouvoir simuler de manière réaliste le phénomène de diffraction présent dans la zone abritée par la digue ainsi que les effets dus à différents hauts-fonds. Par conséquent une seconde grille englobant seulement la baie mais avec une résolution beaucoup plus fine (10m) est ici utilisée. Par une simulation en grilles imbriquées, les plans de houle au niveau de la baie de Mohammedia sont obtenus avec une bonne résolution. Le plateau continental au niveau de cette partie de la côte atlantique marocaine est important et s'enfonce profondément vers le large où les lignes isobathes sont très régulières. La houle est donc normalement réfractée de manière uniforme. Par contre, près de la côte, un platier rocheux situé à environ 5 km au large, longe la côte à l'Est de Mohammedia. Près de la baie de Mohammedia, cette barre sédimentaire disparaît progressivement,

formant une bathymétrie complexe avec de nombreux hauts-fonds positionnés en entrée de baie. Ces structures sont responsables d'une modification de la propagation de la houle.

Simulation numérique de la propagation de la houle

Les simulations ont été réalisées avec le modèle REFDIF1. Sur la figure 3, on présente respectivement la hauteur pour des données hivernales. La houle au large est prise pour une direction NW. La zone s'étendant du port à la partie Est de Mannesmann est particulièrement abritée. Puis l'agitation devient de plus en plus importante en s'éloignant vers l'Est. Ainsi, au niveau des côtes de Monika et de Sablette, l'amplitude de la houle, dans les zones de focalisation, est environ 30% plus importante qu'au large. Pour des houles hivernales et estivales, les données au déferlement (figures 4.a et 4.b) montrent une diminution quasi-linéaire de la hauteur de houle depuis la plage de Sablette où la digue n'a presque pas d'influence, jusqu'à la plage de Mohammedia où l'agitation est quasiment nulle. Dans la baie, la houle est soumise essentiellement à la déformation par diffraction. On observe sur la figure 5 ce phénomène dont l'effet est prolongé jusqu'au platier rocheux de Mannesmann. Cela entraîne la création d'un courant qui ramène les sédiments de la plage Monika vers la plage Mohammedia et qui est renforcé par le courant de dérive littorale, circulant du Nord vers le Sud le long de la frange côtière. De ce fait, le secteur Ouest du littoral de Mohammedia, protégé par la jetée principale, se comporte comme une pompe aspirant en permanence les sables du secteur Est. L'élargissement et la surélévation de la plage Mohammedia sont en relation avec la présence de l'épi transversal qui protège le port de Mohammedia et qui oblige le courant de dérive littorale à déposer une partie de sa charge sédimentaire au niveau de ce secteur Ouest. Les traceurs minéralogiques utilisés dans les travaux de Idrissi (2006), confirment cette hypothèse d'un transport suivant la direction Est-Ouest.

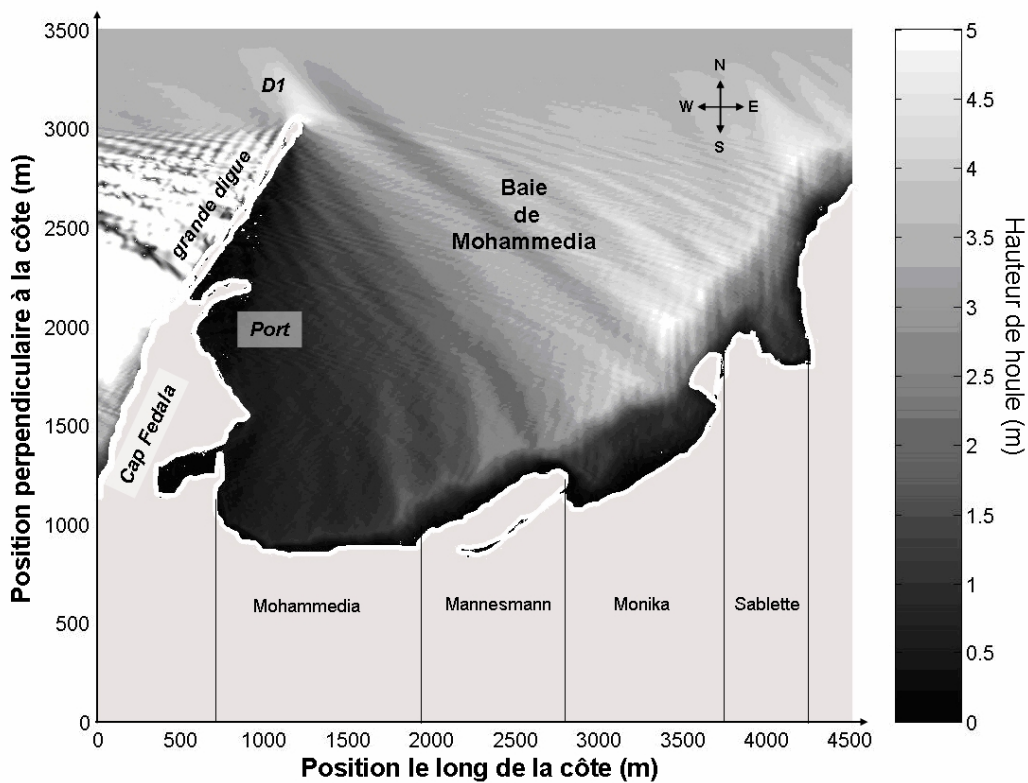


Figure 3: Hauteur de houle (hivernale : $H_s=3.4m$, $T_s=15s$) dans la baie de Mohammédia

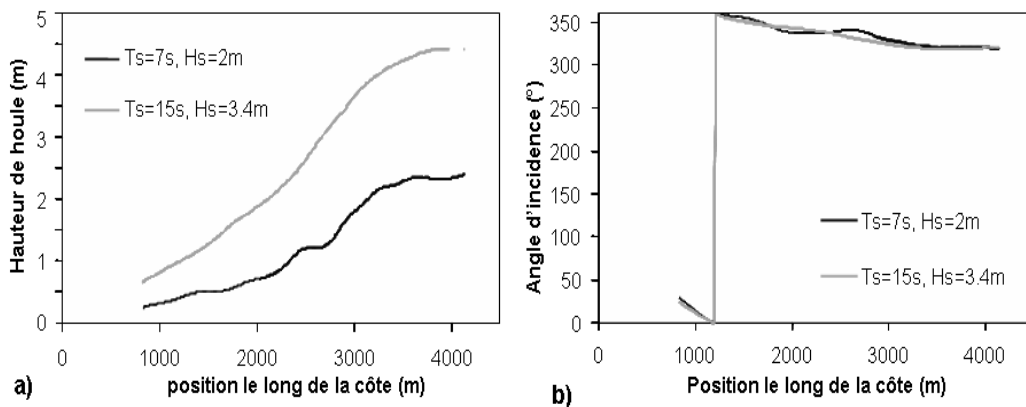


Figure 4: (a) Hauteurs et (b) incidence des vagues au déferlement le long de la côte

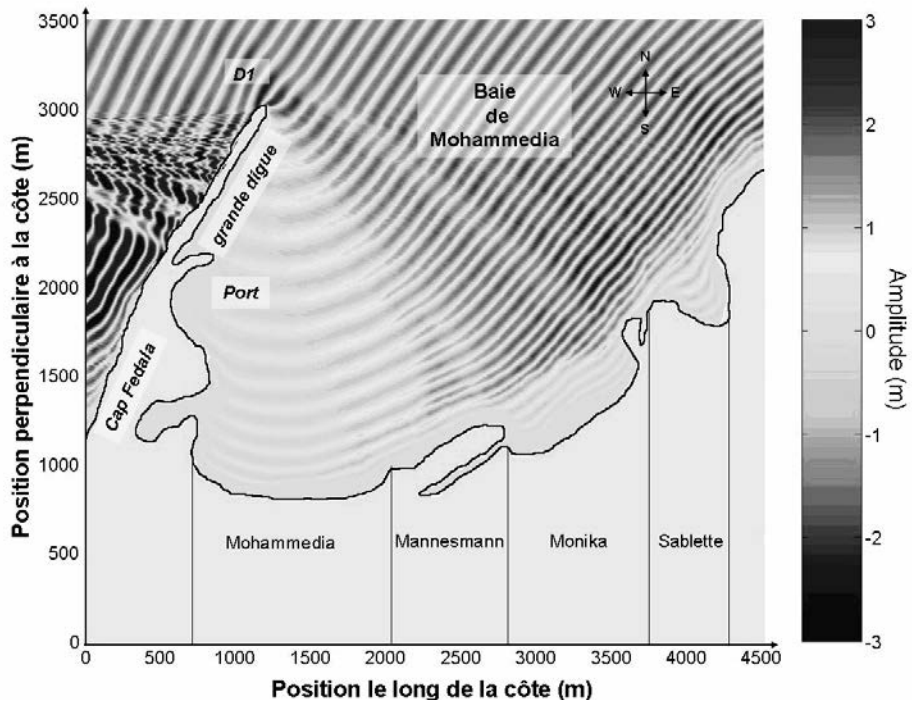


Figure 5: visualisation des lignes de crête

A partir de la plage de Monika, la direction de la houle est frontale. Dans la zone abritée la houle est oblique.

Sur la figure 6, on présente les profondeurs de fermetures (les profondeurs de l'interaction de la houle avec le transport de sédiment), calculée selon la méthode de Sabatier et al. (2004).

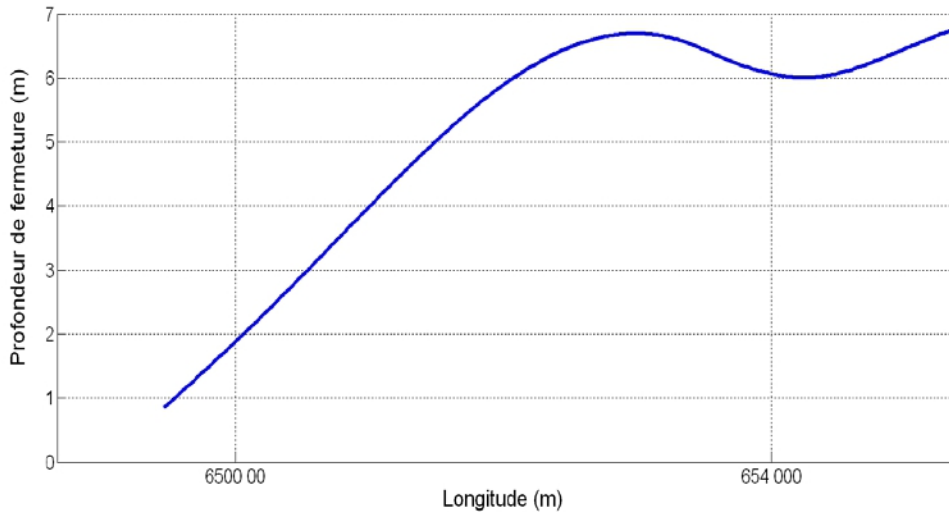


Figure 6: Schéma représentant la Profondeur de fermeture

Calcul de l'évolution du trait de côte:

L'équation du flux (3) dépend des constantes empiriques K_1' , K_2' qui caractérisent deux types de transport. Le premier est dû à l'incidence de la houle et le second correspond aux variations de sa hauteur le long de la côte. Ils sont déterminés par la calibration du modèle d'évolution du trait de côte (Krauss et Harikai, 1983). En utilisant les données sur le trait de côte de 1993, 1997 et 2003, on obtient par une méthode itérative les valeurs suivantes :

$$K_1' = 5.55 \cdot 10^{-5}, K_2' = 830 \cdot 10^{-5} \quad (4)$$

En résolvant les équations (2) et (3), l'évolution du trait de côte en fonction de la distance le long de la côte est présentée sur la Fig. 7. On observe deux secteurs bien distincts: le secteur Ouest en accrétion et le secteur Est en érosion. Le point d'inflexion se trouve sur la plage de Monika. Ce modèle permet de donner une évolution à long terme réaliste. Il montre que si aucun aménagement spécifique n'est réalisé, la partie Est va continuer à subir un phénomène d'érosion important et la partie Ouest s'ensablera à un rythme rapide.

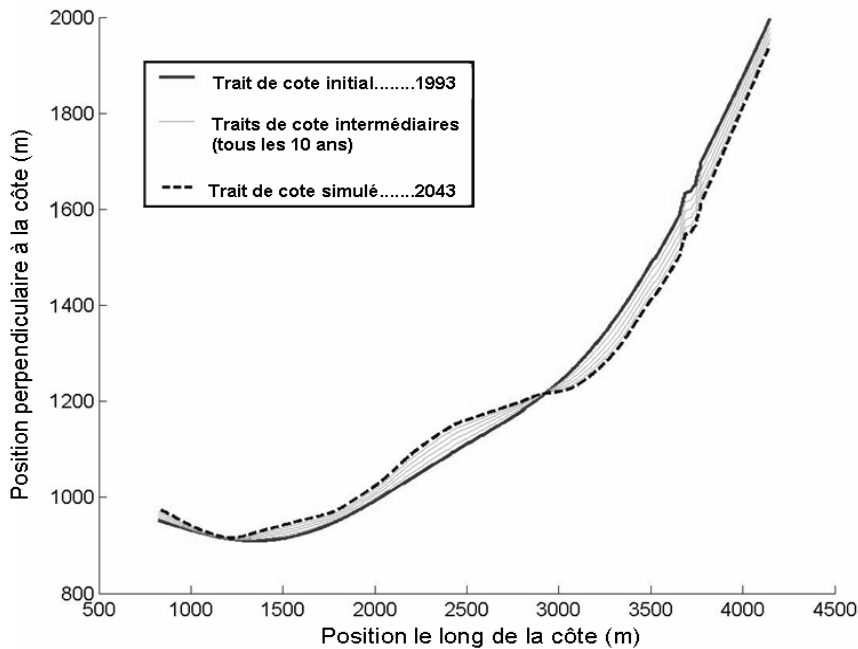


Figure 7: Evolution du trait de côte de la baie de Mohammédia

Etude de l'influence de la digue sur la propagation de la houle:

La digue a été construite entre le cap Fedala qui abritait en partie l'ancien port et des hauts-fonds situés à environ 1.5km plus au large. Pour étudier l'influence de la grande jetée, des simulations ont été réalisées à

partir d'une bathymétrie sur laquelle l'ouvrage n'apparaît pas. La figure 8 présente les lignes de crête pour une houle hivernale.

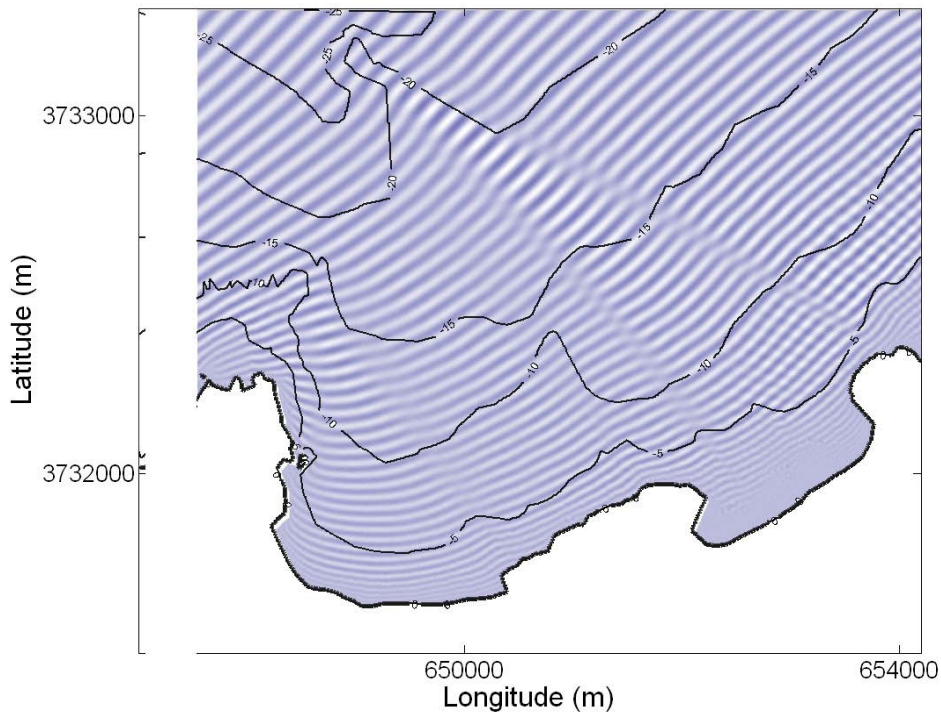


Figure 8: Vue de la surface libre en absence de la digue.

On constate que la plage de Mohammedia est protégée, du fait de la présence du cap Fedala qui force la houle à diffracter. En comparant la Fig.8 avec la Fig.5, on voit que la construction de la digue a accru cette protection. En s'intéressant aux caractéristiques du déferlement de la houle le long de la côte, on constate qu'effectivement les courbes d'incidence restent pratiquement inchangées par rapport au cas avec présence de la digue. En effet, la pente moyenne de la plage est relativement faible (1%) et la direction de propagation de la houle est principalement modifiée par effet bathymétrique. La hauteur de houle au déferlement est également plus faible dans la partie Ouest de la baie. Mais le gradient longshore de hauteur de houle (parallèlement à la côte) est quant à lui beaucoup plus faible (voir Fig. 9 et comparer à Fig.4a).

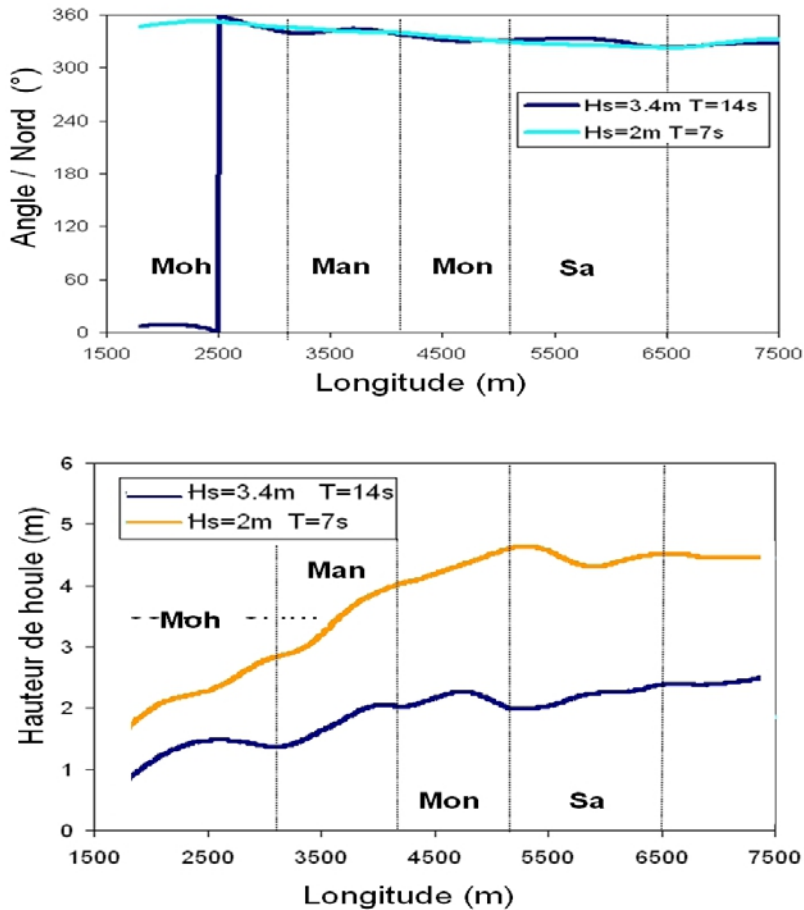


Figure 9: Incidence et hauteur des vagues au déferlement en absence de la digue.

Du point de vue des caractéristiques de houle au déferlement, qui sont les paramètres essentiels des équations de transport sédimentaire à long terme, la construction de la digue n'a pas eu d'effet sur l'incidence locale mais elle a augmenté le gradient de hauteur de houle. Ce fait a eu pour conséquence de modifier l'hydrodynamique dans la baie. Les simulations du trait de côte viennent confirmer cette hypothèse.

Conclusion

Dans ce travail, l'approche numérique pour le traitement des problèmes d'érosion dynamique et l'étude des évolutions de trait de côte a été mise en évidence. L'étude de l'évolution du trait de côte de la zone côtière de la baie Mohammedia a permis de montrer un recul continu du trait de côte en relation avec les facteurs naturels et les travaux d'aménagement réalisés au niveau de cette baie. Le secteur en démaigrissement est localisé

dans le secteur Est de la baie de Mohammedia. Il est exposé à l'action des houles et il est caractérisé par une forte amplification et convergence des vagues. C'est une zone de forte agitation. Le secteur en engraissement est situé dans le secteur Ouest. Ce dernier protégé de l'action des vagues par la jetée du port, correspond à une zone de faible agitation. La position du trait de côte ainsi que le bilan sédimentaire indiquent un recul du rivage et des pertes sédimentaires.

References:

- Dean R.G. (1977). Equilibrium Beach Profiles: US Atlantic and Gulfs Coasts. University of Delaware, Ocean Engineering Technical Report No 12.
- De Vriend H.J. (1992). Mathematical modelling and large scale coastal behavior. Journal of hydraulic research, vol. 29, n_6, pp. 727-740
- Gouaud F. (2007). Modélisation physique et numérique de l'évolution du trait de côte à long terme. Thèse de Doctorat, Université Sud Toulon – Var, France.
- Horikawa (1988). Nearshore Dynamics and Coastal Processes. University of Tokyo Press, 522 pp.
- Idrissi M. (2006). Evolution du littoral de Casablanca-Mohammedia (Maroc): Etude de la dynamique sédimentaire et des impacts anthropiques. Thèse de Doctorat en cotutelle - Université Hassan II Mohammedia Casablanca Maroc, Université Sud Toulon – Var, France.
- Idrissi M., Hourimeche A., Rey V., Chagdali M. (2004). Impact des installations côtières sur l'évolution du littoral de Mohammedia (Maroc). VIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Tome 4, pp. 45-53, Compiègne, France.
- Kirby J.T., Dalrymple R.A. (1983). A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly-varying topography. Journal of Fluid Mechanics, 136, 453-466.
- Krauss N. C., Harikai S. (1983). Numerical model at the shoreline change at Oarai Beach, Coastal Engineering, Vol 7, pp. 1-28.
- Rey V., Guinot F., and Touboul J (2011). Large scale experimental study of wave current interactions in presence of a 3d bathymetry, Genoa, International Maritime Association of the Mediterranean.
- Rey V. et Sous D. (2013). Sediment transport and morphodynamics in nearshore areas, Erosion of Geomaterials, 325-364.
- Rey V, Charland J., Touboul J. (2014). Wave–current interaction in the presence of a 3d bathymetry: deep water wave focusing in opposing current conditions, Phys Fluids, 26:096601.
- Sabatier F., Stive M., Pons F. (2004). Longshore variation of depth of closure on a microtidal wave dominated coast, ICCE.