

Quantification de transport sédimentaire longshore : application à la baie d'El Haouzia (région d'El Jadida, Maroc)

Mohamed CHAIBI¹, François SABATIER² & Mohamed MAANAN³

1. Université Cadi Ayyad, Faculté Polydisciplinaire, Département des Sciences Naturelles et de Géographie, Laboratoire ELMar, Safi, Maroc. chaibim2003@yahoo.fr

2. Université Aix-Marseille III, Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement, Aix-en-Provence, France.

3. Université de Nantes, UMR 6554 LETG - Géolittomer, France.

Résumé. Dans le littoral d'El Jadida les processus hydrodynamiques entretiennent la mobilité des sédiments produits par l'érosion. Suite à leur action, les sédiments sont soit stockés soit transportés sur différentes zones côtières. Le suivi de l'évolution morphodynamique de la plage mésotidale au niveau de la baie d'El Haouzia, à court et à moyen terme, montre une forte variabilité morphologique. Les morphologies moyennées et volumes de la plage d'El Haouzia ont été calculés en termes de saisons et d'années. Les simulations du transport longshore, calculé à partir de la formule du CERC (1984), montrent de nombreuses similitudes dans les directions du transit avec les observations de terrain. Le transport total varie de 10^6 à 5.10^6 m³/an selon les secteurs de la baie. Le transport théorique résultant indique un point de divergence dans la partie centrale de la baie d'El Haouzia.

Mots clés : Plage mésotidale, modélisation, hydrodynamique, transport longshore.

Quantification of longshore sedimentary transport: application to the El Haouzia Bay (El Jadida, Morocco)

Abstract. Hydrodynamic processes on the El Jadida coast mobilize sediments produced by erosion. Through their actions, the sediments are stocked or transported to different coastal zones. The monitoring of morphodynamic evolution of mesotidal beach at the bay of El Haouzia at short and medium terms, shows a high morphological variability. The morphological patterns of the beach have then been analysed face to the wave energy input. The simulations of longshore transport calculated by the CERC formula (1984) show many similarities in their transport directions. The total transport varies between 10^6 and 5.10^6 m³/year from one area to another. The theoretical transport results indicate a point of divergence in the middle of El Haouzia beach.

Key words : Mesotidal beach, modelling, hydrodynamic, longshore transport.

INTRODUCTION

Dans la zone littorale, des quantités importantes de sables sont transportées sous l'action de la houle et des courants. Quand les vagues atteignent la côte et déferlent sur la plage, elles génèrent des courants côtiers qui interagissent avec les vagues incidentes pour transporter le sédiment (Masselink *et al.* 2006). Quand les crêtes de ces vagues forment un angle significatif avec le trait de côte, elles induisent la formation d'un courant *longshore* parallèle à la côte, et restreint à la zone côtière entre la ligne de déferlement et la plage. Ce courant peut être localement modifié par l'action de courants induits par le vent ou par la marée (Van Rijn 1998). Sur des plages soumises à des houles obliques dominantes, ce mode de transport est bien souvent prépondérant. Les variations longitudinales (augmentation ou diminution) du taux de transport (*longshore gradient*) induisent l'existence de zones d'érosion lorsque le taux de transport augmente ou des zones d'accrétion lorsque ce dernier diminue. Modéliser ce processus est une approche couramment utilisée en géomorphologie et/ou en ingénierie côtière (Giosan *et al.* 2000, Kumar *et al.* 2000, Sabatier *et al.* 2001, Lafon *et al.*, 2004) car elle présente l'avantage de donner une vision globale des transits sédimentaire à macro-échelles, dans le cadre des cellules hydrosédimentaires en vue d'une gestion raisonnée, ou dans des perspectives de modélisation simples d'évolution du rivage.

L'objectif du présent travail est de quantifier par modélisation le transport longitudinal dans la baie d'El

Haouzia (El Jadida, Maroc) afin de définir la participation du transport longitudinal dans le bilan sédimentaire de la baie d'El Haouzia et d'établir des secteurs en gain et/ou pertes, au niveau de 33 profils utilisés dans l'analyse.

CARACTERISTIQUES DE LA ZONE ETUDIEE

La plage d'El Haouzia, entre 33°15'00'' et 33°21'40'' Nord et 8°18'00'' et 8°30'00'' Ouest, se situe sur la côte atlantique présentant un linéaire de 25 kilomètres quasi exclusivement composée de plages sableuses entre l'estuaire de l'Oum Rbia au nord et le port d'El Jadida au sud (Fig. 1) bordée par un système complexe de dunes éoliennes. Les vents dominants sont ceux de secteurs Ouest, Nord et Nord-Est. Les vents forts (11 à 16 m/s) proviennent des secteurs ouest et sud-ouest. L'amplitude moyenne de la marée est de 4 m en vives-eaux et de 2 m en mortes-eaux. Au large, la vitesse des courants n'excède pas 0,25 m.s⁻¹. A la côte, les courants de marée sont très largement négligeables devant ceux induits par la houle.

La côte atlantique marocaine est exposée à une forte énergie caractérisée par des houles issues de l'Atlantique Nord principalement d'origine Ouest à Nord-Ouest (Charouf 1986). L'action des houles sur le transit sédimentaire est très variable dans le temps et dans l'espace. En fonction de ces caractéristiques, elles déterminent le sens et l'intensité du transit ainsi que sa zone d'action. Les houles les plus dominantes sont celles du cadran nord-nord-ouest et nord-ouest, 78,03 % du temps.

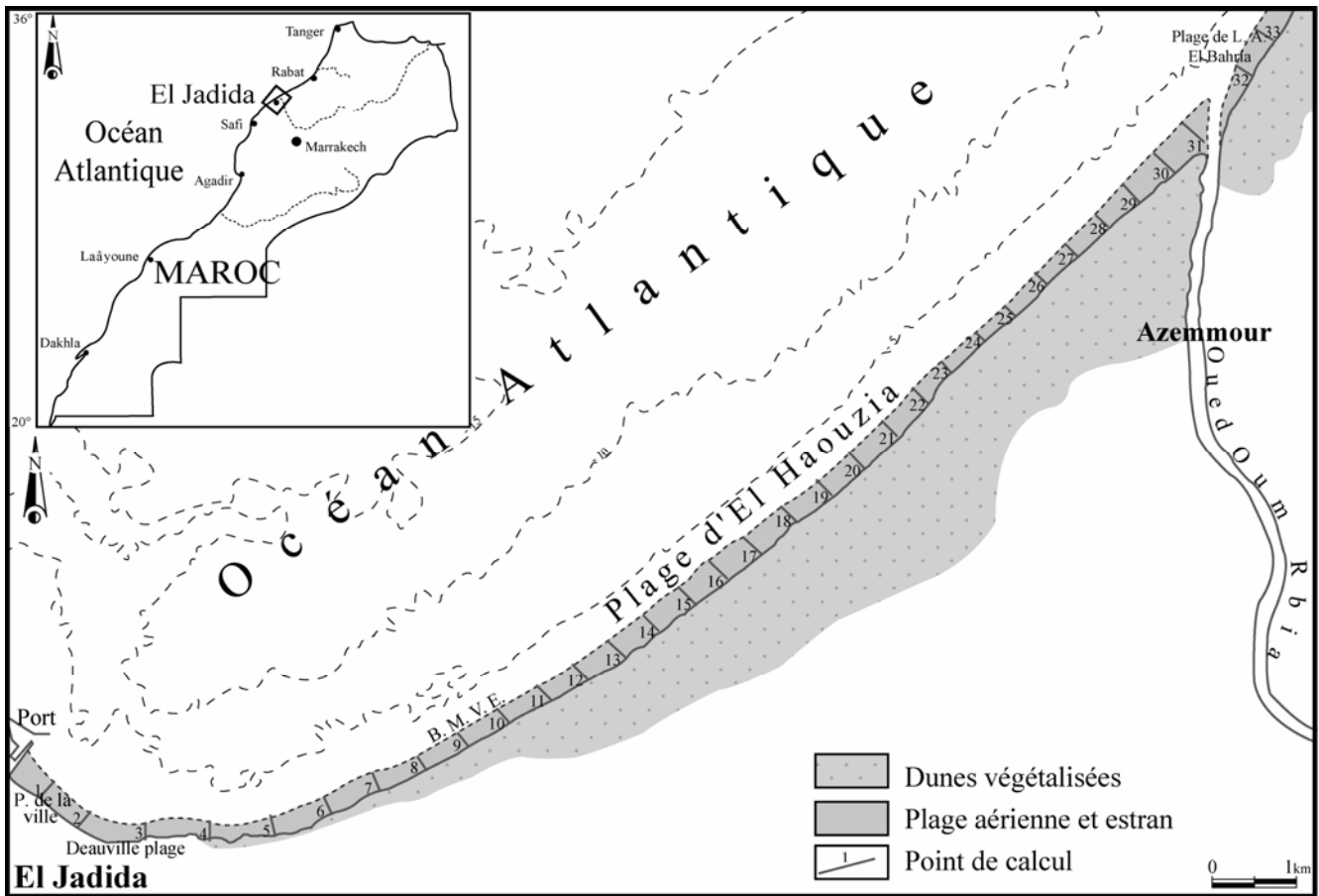


Figure 1. Points de calcul du transit longitudinal (espacement 500 m).
 Figure 1. Points of calculation of the longitudinal transit (spacing 500 m).

Le climat de houle est régulièrement agité puisque les hauteurs significatives supérieures à 2 m dépassent 40 % des cas. Les houles les plus efficaces sont celles dont la période est la plus longue (>11 s). Elles représentent 59,4 % des observations (Chaïbi 2003). La plage d'El Haouzia est majoritairement plage intermédiaire selon la classification de Short (1992), Short & Aagaard (1993).

OUTILS ET METHODES

De nombreux paramètres physiques enregistrés depuis 1997 sur la plage d'El Haouzia (topographie, trait de côte, profils de plages, mesures de houle) permettent d'analyser les réponses du système plage. L'analyse du climat et des caractéristiques de la houle au large dans la région d'El Jadida repose sur les données de la Direction de la Météorologie Nationale (Casablanca). Les statistiques utilisées sont établies, spécialement pour la région d'El Jadida, par les calculs du modèle mathématique de prévision de vagues DSA5 (Densité Spectro-Angulaire 5 ; Services Météorologiques Maritimes SMM, Casablanca).

Le calcul théorique du transport longitudinal est dépendant des données de houles utilisées en entrée (hauteurs, périodes, angle d'incidence des houles, coefficient de réfraction). Les caractéristiques principales des houles sont résumées dans le tableau 1. Le climat de houle annuel est analysé à partir des données issues du

modèle DSA5 pour 1999. La classe de houle comprise entre 0,1 et 0,5 n'a pas été prise en compte car elle est trop faible pour induire un transport longitudinal significatif.

Propagation de la houle

La houle se propage depuis le large jusqu'à la courbe bathymétrique -5 m environ à partir du modèle de propagation de la houle Fudda-Vag. Ce modèle permet de calculer et de représenter graphiquement des plans de vagues au voisinage d'une zone côtière. Il se base sur le principe de la réfraction (loi des rayons de Snell) et le *shoaling* (par ordre de la théorie linéaire). Les données bathymétriques sont issues de la numérisation par SURFER de la carte bathymétrique "Approaches to El Jadida and Jorf Lasfer" à l'échelle 1/150 000 réalisée par "les Services de l'Etat français" en 1958 et corrigée en 1994. Elle présente différentes lignes de niveau depuis l'isobathe -200 m jusqu'à l'isobathe 0 m.

Quantification du transport sédimentaire potentiel

Le linéaire de la plage d'El Haouzia a été segmenté en 33 points de calcul du transport longitudinal théorique avec un espacement de 500 m (Fig. 1). Sur chaque point de calcul, la simulation du transport longshore instantané selon les secteurs de houles représentatifs dans la baie d'El Haouzia est calculée à partir de la formule du CERC (1984) (*Coastal Engineering Research Centre*) :

Tableau I. Hauteurs significatives (*Hsig*) et directions (*Dire*) des houles utilisées pour les simulations du transit sédimentaire longitudinal (% du temps annuel -1999)

Table 1. Significant heights (*Hsig*) and swells directions (*Dire*) used for simulations of the longitudinal sedimentary transit (% of annual time -1999)

Hsig/Dire	WNW	NW	NNW	Total
0,1 - 0,5	0	0,3	0	0,3
0,6 - 1,0	1,4	5,4	2,7	9,5
1,0 - 1,5	3,6	10,0	13,2	26,8
1,6 - 2	2,2	9,0	10,4	21,5
2,1 - 2,5	1,5	8,1	6,6	16,1
2,6 - 3	0,2	3,7	2,1	6,1
3,1 - 4	0,2	4,1	1,5	5,9
4,1 - 5	0	0,3	0,2	0,5
5,1 - 6	0	0,5	0	0,5
6,1 - 7	0	0,3	0	0,3
7,1 - 8	0	0	0	0
8,1 - 9	0	0	0	0
9,1 - 10	0	0	0	0
Total	9,2	41,6	36,6	87,5

$$Q = k \frac{\rho \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma} (\rho_s - \rho)(1-n)} H_{b^{5/2}} \cdot \sin 2\alpha_b$$

Q = transport longitudinal en $m^3 \cdot s^{-1}$

n = facteur de porosité (0,4)

α_d = angle d’incidence des houles au déferlement

ρ_s = densité du sable (2650 kg/m^3)

ρ = densité de l’eau de mer (1025 kg/m^3)

K = paramètre empirique (0,2)

H_b = hauteur au déferlement est calculée à partir de la formule de Goda (1970) récemment validée et améliorée par Rattanapitikon & Shibayama (2000) :

$$H_b = 0,17Lo \left\{ 1 - \exp \left[\frac{\pi d_b}{Lo} \cdot K \right] \right\}$$

$K = 16,21 \tan^2 \beta - 7,07 \tan \beta - 1,55$

β = pente de la plage (°)

Lo = Longueur d’onde de la houle au large (m)

d_b = Profondeur d’eau au déferlement

Cette formule, dont la définition originale provient des travaux de Komar & Inman (1970) à partir de traceurs fluorescents est la formule la plus utilisée à travers le monde. Cette formule s’appuie sur le composant énergétique des vagues en relation avec l’incidence des houles déferlantes avec le rivage.

Les valeurs calculées tous les 500 m sont interprétées en termes de transport et de bilan sédimentaire potentiel. Les dynamiques à moyen terme, c’est à dire le transport annuel résultant et son interprétation en termes de bilan sédimentaire, sont effectuées de la manière suivante sur chaque point de calcul (33 points) :

1- calcul du transport potentiel pour chaque classe de hauteur de houles (entre 6 et 10 classes) et pour les trois secteurs de provenance de la houle (NNW, NW et W) ;

2- addition du transport potentiel par secteur de provenance (transport total) ;

3- calcul du transit annuel potentiel résultant, en additionnant le transport potentiel des 3 directions (transport net) ;

4- cartographie du transit annuel potentiel résultant sur la zone d’étude (transport net) ;

5- calcul du bilan sédimentaire longitudinal annuel en utilisant le principe du gradient de transport ;

6- cartographie du bilan sédimentaire annuel potentiel résultant.

RESULTATS ET DISCUSSION

Plans de houle et indices de réfraction

La plage d’El Haouzia présente un système plage-dune complet avec les morphologies suivantes : plage subtidale avec barre en croissant ; barre intertidale ou encore système de barre ; une berme en haut de plage intertidale ; une dune embryonnaire bien formée ; une dune blanche et une dune grise formant la dune littorale.

Afin de cerner la répartition de l’énergie et les caractéristiques de la houle et d’élargir la connaissance de propagation de la houle sur la côte d’El Jadida, nous avons réalisé des simulations de la propagation de la houle. Les résultats obtenus par ces plans de vagues permettent aussi de simuler le transport sédimentaire. Pour les trois directions de propagation de houle choisies dans le littoral d’El Jadida : NNW, NW et WNW, nous avons retenu une période de $T = 11$ s pour l’élaboration des trois plans de houle. Les coefficients de réfraction ont été répartis en trois classes, afin de mettre en évidence :

- les secteurs moins exposés aux attaques des houles, présentant un faible coefficient, $Kr < 1$;
- les secteurs moyennement exposés, avec un coefficient de $1 \leq Kr \leq 1,30$;
- les secteurs très exposés, où le coefficient de réfraction est fort, $Kr > 1,30$.

Les houles NNW (Fig. 2)

Les phénomènes de convergence et de divergence sont liés aux changements fréquents d’orientation du rivage. Les secteurs les plus exposés sont moins étendus. Les fortes concentrations d’énergie des houles se situent au niveau des pointes d’El Jadida ($Kr > 1,45$) et celle d’Azemmour ($Kr > 1,39$) au Nord. En revanche, les secteurs caractérisés par des coefficients de réfraction moyens, plus nombreux, se localisent dans toute la zone comprise entre la pointe d’El Jadida et le cap de Jorf Lasfer (Kr de 1,03 à 1,29) et au milieu de la grande baie d’El Jadida. Les valeurs des faibles coefficients oscillent entre 0,66 et 0,89 au Sud et entre 0,66 et 0,96 au Nord.

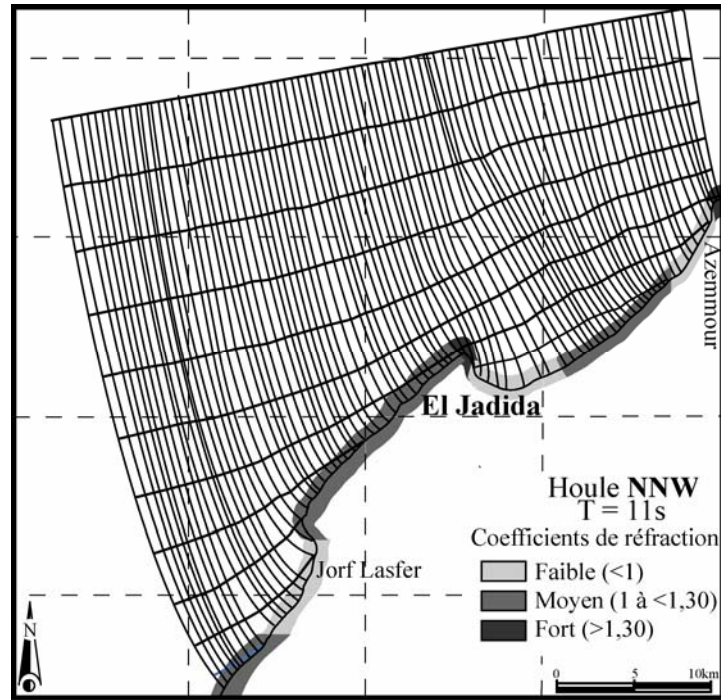


Figure 2. Simulation de la propagation de la houle de secteur NNW ($T=11s$) et coefficients de réfraction sur l’avant côte d’El Jadida
 Figure 2. Simulation of the swell sector NNW propagation ($T=11s$) and coefficients of refraction on before El Jadida coast

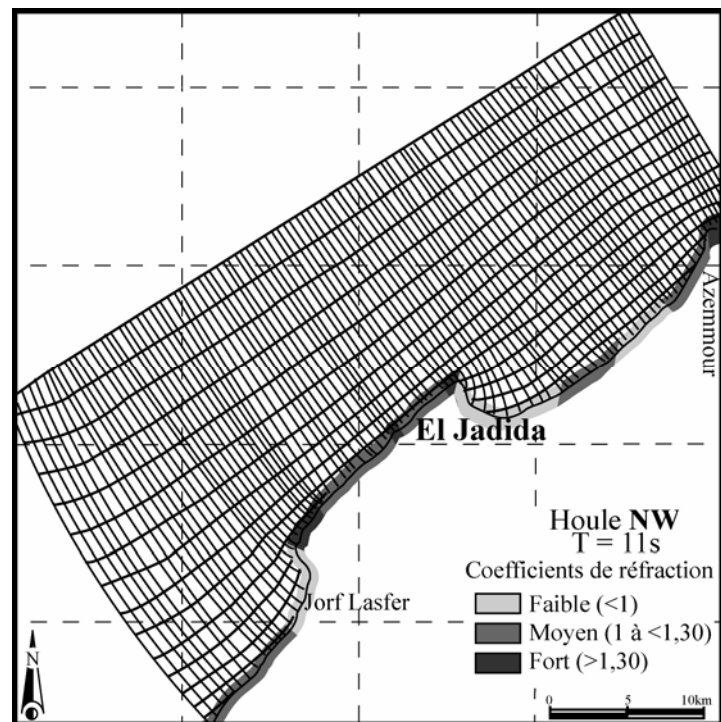


Figure 3: Simulation de la propagation de la houle de secteur NW ($T=11s$) et coefficients de réfraction sur l’avant côte d’El Jadida
 Figure 3: Simulation of the swell sector NW propagation ($T=11s$) and coefficients of refraction on before El Jadida coast

Les houles NW (Fig. 3)

Pour cette direction, les houles sont quasi frontales, ce qu’explique la présence de plusieurs secteurs à forte énergie. Les coefficients de réfraction varient de 1,30 à 1,65. Ces houles n’affectent que les pointes et quelques zones de la côte rocheuse. Les secteurs les plus sensibles (côtes sableuses entre les pointes d’El Jadida et

d’Azemmour) ne sont pas touchés. Ces secteurs se distinguent par des coefficients de réfraction faibles (Kr de 0,65 à 0,97) et moyens (Kr de 1,04 à 1,27) et par une incidence plus faible par rapport aux houles NNW. Les secteurs du port de Jorf Lasfer sont moins exposés et se distinguent eux aussi par les mêmes caractéristiques. La divergence des orthogonales dans cette zone induit le plus faible coefficient de réfraction ($Kr = 0,46$).

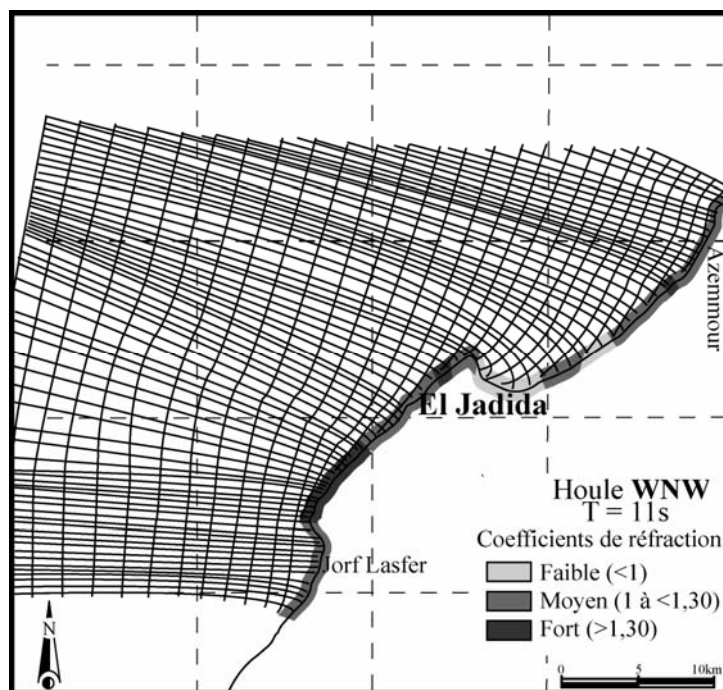


Figure 4. Simulation de la propagation de la houle de secteur WNW ($T=11s$) et coefficients de réfraction sur l'avant côte d'El Jadida.
 Figure 4. Simulation of the swell sector WNW propagation ($T=11s$) and coefficients of refraction on before El Jadida coast.

Les houles WNW (Fig. 4)

Les houles WNW sont les plus énergiques à la côte. Les secteurs à faible coefficient de réfraction sont moins étendus et sont localisés seulement au niveau de la ville d'El Jadida. Les houles WNW subissent au contact de la pointe rocheuse et de la digue du port d'El Jadida, une diffraction qui s'accompagne d'une perte d'énergie. Cela se traduit par un écartement des orthogonales de houle, des coefficients oscillant entre 0,53 et 0,80 et par une baisse d'intensité des vagues. Les secteurs les plus exposés, à fort coefficient de réfraction, ne se limitent plus à la pointe d'El Jadida et à la zone rocheuse entre cette dernière et Jorf Lasfer. La côte sableuse à proximité de l'embouchure d'Oum Rbia se distingue, pour la première fois, par une forte concentration d'énergie des houles WNW. Les coefficients de réfraction varient entre 1,38 et 1,62. La variabilité de l'angle d'incidence des houles à la côte sera donc le résultat des changements de l'orientation de la ligne de rivage.

Quantification du transport longshore

Le transport longshore total calculé dans la baie d'El Haouzia (Fig. 5), c'est à dire mis en mouvement pour tous les secteurs de houles, est très important puisqu'il varie de 10^6 à 5.10^6 m^3/an selon les secteurs. Les valeurs les plus élevées se trouvent par contre aux bornes du site d'étude, entre les profils 1 et 5 et entre les profils 31 et 34. Dans la partie centrale, le transport total oscille autour de 10^6 m^3/an .

Le transport longshore résultant théorique (Fig. 5) indique un point de divergence vers le point de calcul 20, au nord duquel le transit sédimentaire est orienté vers le Nord avec des valeurs globalement similaires proches de 10^6 m^3/an . Il est globalement similaire au transport total ; ceci indique la direction dominante du transit. Au sud du

point de calcul 20, le transport global est orienté vers le Sud avec néanmoins deux secteurs aux comportements différents avec des courants longshore différents : l'un est convergent (entre les points 8 et 9), l'autre est divergent (entre les points 7 et 6).

Entre les points de calcul 20 et 6, le transport varie de 60 000 à 2,2 millions de m^3 . Le transit est localement inversé (vers le Nord) aux points de calcul 19 et 7-8. Dans cette partie, le transport total est largement supérieur au transport résultant, ce qui suggère qu'un transit bidirectionnel est possible. A partir du point de calcul n°6, le transit résultant, identique au transit total (500 000 à 5 millions de m^3), montre une direction dominante vers le sud.

Le bilan sédimentaire théorique (Fig. 6) s'appuie sur le gradient longitudinal du transport résultant. Le bilan sédimentaire présente un fonctionnement différencié suivant les secteurs. Les valeurs obtenues sont très importantes puisqu'elles varient entre 300 000 m^3/an et $1,2.10^6$ m^3/an . Globalement, ce fonctionnement présente deux zones bien marquées par l'érosion et d'autres en accumulation. Les zones en accumulation sont bien réparties le long de la baie ainsi que dans la partie septentrionale de la grande baie d'El Haouzia au niveau de la rive droite de l'oued d'Oum Rbia ; en revanche, les zones d'érosion sont localisées principalement au milieu et au Sud de la baie à la limite des infrastructures portuaires.

On considère généralement que la méthode utilisée ici affiche une marge d'erreur de $\pm 50\%$ (CERC 1984). Néanmoins, les volumes estimés sont très importants, en comparaison avec ceux mesurés à partir des profils de plage et aux photographies aériennes (Chaïbi 2003). Les ordres de grandeur varient d'un facteur 10 à 100. Nous restons donc prudents quant à leur signification réelle.

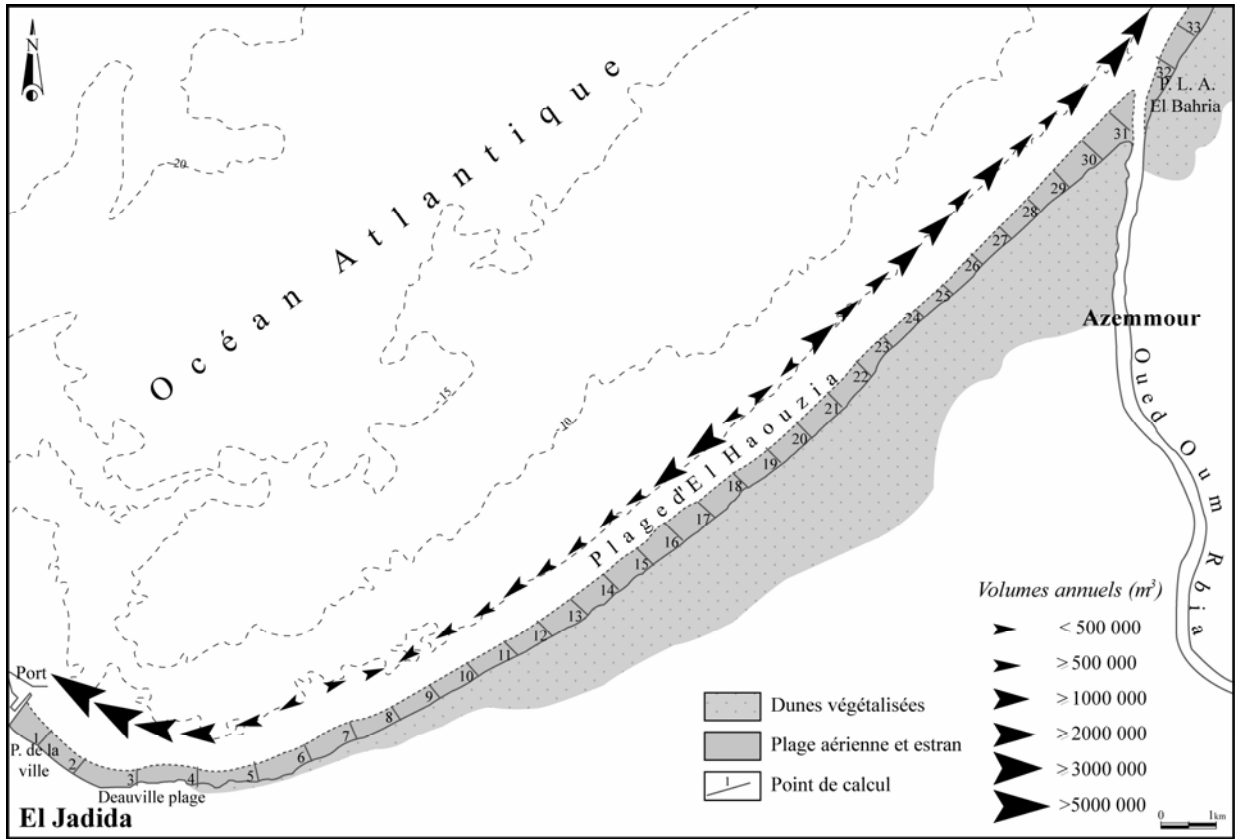


Figure 5. Transport sédimentaire annuel théorique (m^3 /an).
 Figure 5. Annual theoretical sedimentary transport (m^3 /year).

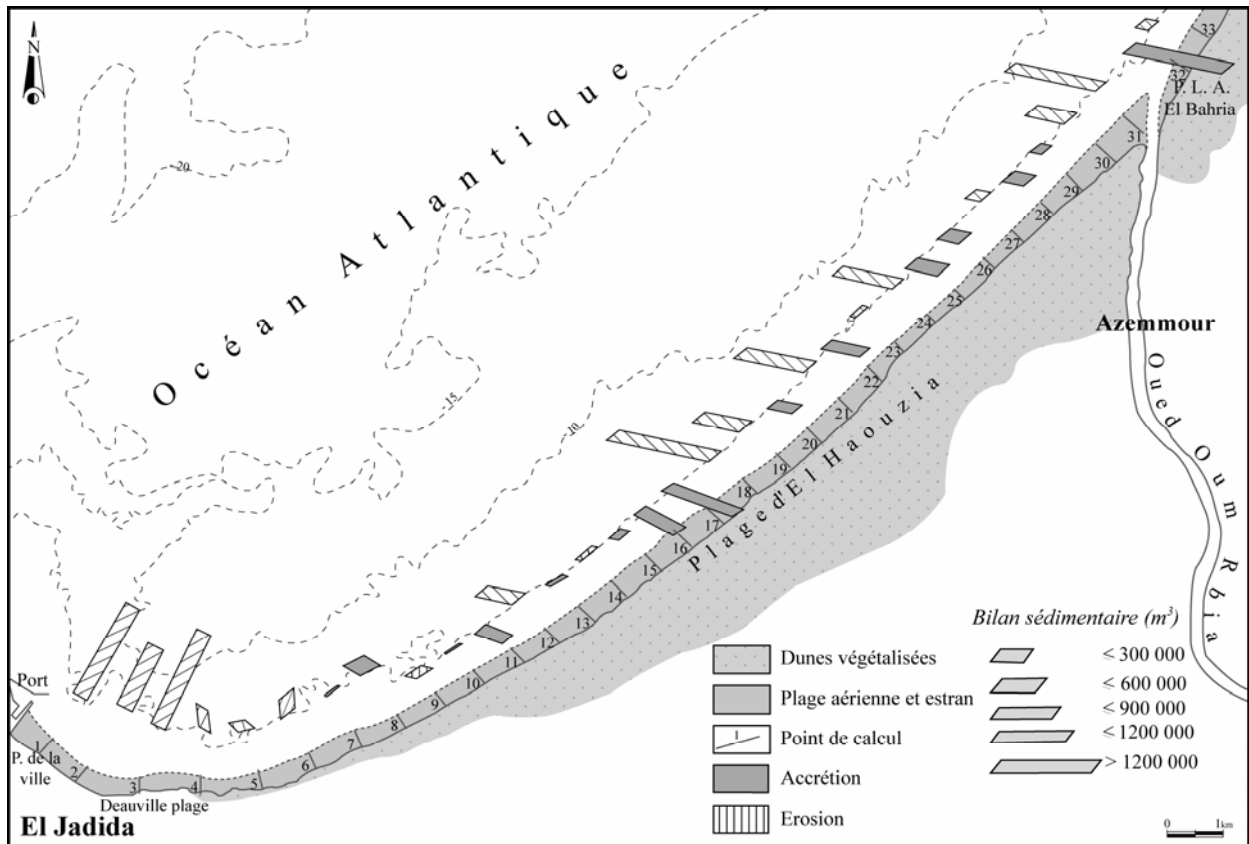


Figure 6. Bilan du transport sédimentaire théorique (m^3 /an).
 Figure 6. Assessment of theoretical sedimentary transport (m^3 /year).

Par ailleurs, les bilans sédimentaires sont incohérents avec les résultats obtenus par des profils de plages (Chaïbi 2003). Cependant, le secteur sud de la plage de la ville est en réalité en accrétion (+13 690 m³/an) alors que la modélisation prévoit une érosion en relation avec une augmentation du gradient de transport. Cette discordance est due aux limites de la propagation de la houle dans cette zone où elle est très réfractée : l'angle d'incidence estimé au niveau de la bathymétrie -5 m est très différent de celui de la zone de déferlement. Le problème de la propagation (réfraction) de la houle se retrouve aussi au niveau de la partie septentrionale de la zone étudiée. Le point 32 montre un gain alors que les autres points dans le même secteur indiquent un démaigrissement. Ici, les résultats obtenus sont en accord avec ceux déterminés par les profils de plage (-22 600 m³/an). Les problèmes de simulation des champs de vagues ne sont finalement pas surprenants car le modèle de propagation de la houle, utilisé (Fudda-Vag) est relativement simpliste puisqu'il ne considère pas la bathymétrie complexe de la zone étudiée.

Dans la partie centrale de la plage d'El Haouzia, la simulation montre une alternance des directions qui finalement se retrouve sur l'analyse des profils de plage et de la granulométrie (Chaïbi 2003). Les résultats de l'évolution morpho-sédimentaire de la baie d'El Haouzia, réalisées par la superposition des profils de plage le long de la baie, présentent un fonctionnement différencié suivant les secteurs. Les volumes calculés pour les différents secteurs nous ont permis d'estimer le bilan sédimentaire global de la baie d'El Jadida qui est déficitaire. Le volume perdu s'élève à 18 608 m³/an (Chaïbi 2003).

CONCLUSION

L'ensemble des résultats de ce travail réalisé sur la baie d'El Haouzia, apporte des éléments de compréhension de la morphodynamique d'une plage mésotidale. La démarche adoptée tente de relier l'évolution morphodynamique le long de la baie à une quantification des transports sédimentaires.

La baie d'El Haouzia est soumise à un régime hydrodynamique très complexe. La houle est l'un des phénomènes principaux agissant sur l'évolution des domaines côtiers. Elle est responsable de l'érosion des plages et de la dérive littorale. A son arrivée à la côte, elle génère un transport sédimentaire par deux mécanismes principaux : la remise en suspension et la formation d'un courant littoral.

La simulation du transport longitudinal annuel a été établie de manière conventionnelle, en utilisant : un plan de vague ; un calcul de la hauteur de la houle au déferlement ; les taux de transit et les statistiques de houles annuelles. Chaque étape de la simulation comporte des erreurs qui donnent des résultats à interpréter avec prudence. Par ailleurs, cette analyse confirme l'érosion au Sud de l'Oued Oum Rbia et la divergence des directions de dérive au niveau de la partie médiane de la plage d'El Haouzia.

L'enregistrement temporel du volume de plage montre néanmoins une relative stabilité de la plage intertidale d'El Haouzia avec une importante variabilité morphologique et

volumétrique de la plage sans toutefois marquer de réelle tendance à l'érosion ou à l'accrétion.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE), France, au sein de l'équipe Géomorphologie et Tectonique. Les personnes qui ont participé à la réalisation de cet article sont remerciées pour leur aide.

Références

- Celikoglu Y., Yuksel Y. & Kabdash M-S. 2004. Longshore sorting on a beach under wave action. *Ocean Engineering*, 31, 1351-1375.
- Chaïbi M. 2003. *Dynamique sédimentaire et morphogénèse actuelle du littoral d'El Jadida (Maroc)*. Thèse de Doctorat en géographie physique. Univ. Aix-Marseille I, 236 p.
- Charouf L. 1986. *Les problèmes d'ensablement des ports Marocains sur la façade atlantique : Leur impact sédimentologique sur le littoral*. Thèse de doctorat, Univ. de Paris-Sud, centre scientifique d'Orsay, 312 p.
- Coastal Engineering Research Centre (CERC) 1984. Shore Protection Manual, volumes I & II. Department of the Army, US Army Corps of Engineers.
- Galvin C.J. 1967. Longshore current velocity: a review of theory and data. *Reviews of Geophysics*, 5, 3, 287-304.
- Giosan L., Bokuniewicz H., Panin N. & Postolache I. 2000. Longshore sediment transport pattern along the Romanian Danube delta coast. *J. Coastal Res.*, 15, 4, 859-871.
- Goda Y. 1970. A synthesis of breaker indices. *Trans. JSCE*, 2, 227-230.
- Komar P.D. & Inman D.L. 1970. Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, 75, 30, 5914-5927.
- Kumar V.S., Anand N.M., Chandramohan P. & Naik G.N. 2003. Longshore sediment transport rate-measurement and estimation, central west coast of India. *Coastal Engineering*, 48, 95-109.
- Kumar V.S., Chandramohan P., Kumar K.A., Gowthaman R. & Pednekar P. 2000. Longshore currents and sediment transport along Kannirajapuram coast, Tamilnadu, India. *J. Coastal Res.*, 16, 2, 247-254.
- Lafon V., De Melo Apoluceno D., Dupuis H., Michel D., Howa H., Froidefond J.-M. 2004. Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment (SW France): i. mapping beach changes using visible satellite imagery. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 61, 2, 289-299.
- Masselink G., Kroon A. & Davidson-Arnott R.G.D. 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave dominated coastal settings - A review. *Geomorphology*, 73, 1-2, 33-49.
- Rattanapitikon W. & Shibayama T. 2000. Verification and modification of breaker height formulas. *Coastal Engineering J.*, 42, 4, 389-406.
- Sabatier F., Chaïbi M., Lambert A., Samat O. & Provansal M. 2001. Longshore sediment transport on sandy beaches. A field/modelling approach. *European Geophysical Society*, Nice, France.
- Short A.D. 1992. Beach systems of the central netherlands coast: processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system. *Mar. Geol.*, 107, 103-137.
- Short A.D. & Aagaard T. 1993. Single and multi-bar beach change models. *J. Coast. Res.*, 141-157.
- Van Rijn 1998. *Principles of coastal morphology*. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands, 730 p.

Manuscrit reçu le 29 septembre 2008

Version modifiée acceptée le 27 novembre 2009