



Apport de l'étude diachronique dans l'évolution spatio-temporelle de la baie d'Agadir (Maroc)

Contribution of diachronic study in the spatio-temporal evolution of the Agadir bay (Morocco)

I. Aouiche¹, L. Daoudi¹, A. Harti², E. Ziane²

¹ Laboratoire de Géosciences et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques Marrakech, B.P. 549, Marrakech-Guéliz, Université Cadi Ayyad Morocco.

² Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes, Casablanca.

* Auteur correspondant. E-mail: aouiche31@gmail.com; Tel: (+212 666 04 71 62)

Résumé

L'étude de l'évolution du trait de côte au niveau de la baie d'Agadir consiste à déterminer l'équilibre dynamique du système dont il faut intégrer les composantes à différentes échelles de temps et d'espace. Ce littoral qui a beaucoup souffert des interventions humaines, connaît actuellement une tendance très nette au démaigrissement ; ses plages s'érodent et ses dunes se dégradent, le trait de côte recule, menaçant les aménagements et l'attractivité touristique du site. L'étude de l'évolution du trait de côte a permis la quantification de l'érosion linéaire sur une période de 49 ans. Il en ressort que les taux d'érosion et d'engrèvement ont varié durant cette période. Le secteur Nord près du brise-lames mis en place en 1968 (Secteur 2), s'engraisse avec un taux moyen de $2,75 \pm 0,94$ m/an, le secteur Sud devant les complexes hôteliers, enregistre une accélération de l'érosion avec un taux moyen de $3,07 \pm 0,94$ m/an, et le nord du secteur 5 représenté par l'embouchure de l'oued Souss, souffre d'une érosion avec un taux moyen de $6,024 \pm 0,833$ m/an.

Mots clés: Erosion, trait de côte, recul, diachronique, bathymétrique, baie d'Agadir.

Abstract

The study of the evolution of the coastline is based on the determination of the dynamic equilibrium of the system, which must integrate components at different temporal and spacial scales. In order to provide additional knowledge on this issue, we treat the case of the coastal of Agadir. This coastline suffers from a lot of human intervention and its dunes suffer from severe erosion. The southern beach of Agadir is experiencing a very clear loss of beach sand; the coastline recedes; threatening developments and tourist attraction on the site. The study of the evolution of the coastline of the bay of Agadir has allowed us the quantification of the linear erosion over a period of 49 years. It shows that the build up or loss of beach sand varied during this period. The area located near the northern breakwater built in 1968 (Sector 2), tapers with an average rate of 2.75 ± 0.94 m/an. The southern sector across from hoteliers complex, records an erosion rates of about 3.07 ± 0.94 m/an, and the northern of sector 5 represented by the mouth of the Oued Souss, shows an average erosion rate of 6.024 ± 0.833 m/an.

Key words: Erosion, coastline, diachronic, bathymetric, bay of Agadir,

1. Introduction

Le littoral atlantique du Maroc, comme la majorité des littoraux du monde n'échappent pas à la problématique de l'érosion [1- 5]. La baie d'Agadir est soumise à un régime hydrodynamique très complexe ; les ouvrages présents (Ports, brises lames, épis) ainsi que l'agressivité de la houle sont parmi les causes principales agissant sur l'évolution du domaine côtier.

Depuis l'antiquité la baie d'Agadir est le siège d'une dynamique hydro-sédimentaire très active. Cette dynamique s'est fortement perturbée par les différents aménagements portuaires et touristiques mis en place au

niveau de la zone. Une grande partie de la baie de d'Agadir subit une érosion intense dans différents secteurs surtout les secteurs au droit des établissements hôteliers. Les investigations de terrain ont permis de constater des phénomènes d'érosion spectaculaires ; les remblais terrestres sont attaqués du fait d'un déficit sédimentaire conséquent dans ces secteurs. Pour analyser les causes de ces phénomènes d'érosion, il convient de réaliser une approche fine de la dynamique sédimentaire à partir des études diachroniques des différentes périodes et des études des évolutions du zéro hydrographique à partir des cartes bathymétriques disponibles ; l'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés de terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte [6].

Les études menées ces dernières années dans les différentes régions du monde montrent que la régression des côtes sableuses est un phénomène planétaire. Ainsi en Europe, l'érosion toucherait 40 % des plages de l'Union Européenne [7], et plus de 50 % des côtes sableuses en France métropolitaine [8], Aux Etats Unis, au moins 66 % du linéaire côtier sableux du Golfe du Mexique seraient en recul [9], 45 % des plages de la Floride à la Caroline du Nord [10], et 40 % des plages californiennes [11], En Amérique Latine, au Brésil par exemple, 81 à 84% des plages de l'Etat du Rio Grande do Sul s'éroderaient [12]. Sur le continent asiatique, des phénomènes d'érosion ont également été mis en évidence sur les plages indiennes dans la Baie du Bengale [13]. En Afrique, dans le delta du Nil, l'érosion côtière, exacerbée par les aménagements réalisés sur le Nil (barrages) ou sur les rives de la Méditerranée (port, ouvrage de protection), est l'un des principaux facteurs de la dégradation de l'environnement littoral [14-17].

L'étude que nous avons menée sur l'évolution du trait de côte au niveau de la baie d'Agadir est réalisée au moyen d'une analyse diachronique des variations de la position du rivage en 1963, 1975, 1989, 1991, 1993, 2002, 2003, 2005, 2011, 2012. Ces documents révèlent des situations ponctuelles (le trait de côte à un moment précis) mais peuvent surtout, par comparaison, mettre en évidence les différentes phases de l'évolution géomorphologique du secteur et de l'aménagement des terres [1], [18-23]. L'analyse diachronique des photographies aériennes, des cartes topo-bathymétriques et des images satellitaires, a permis de quantifier l'érosion sur une période de 49 ans. Le présent travail vise une meilleure compréhension de l'évolution spatiotemporelle du trait de côte de baie d'Agadir par l'évaluation d'une manière quantitative du taux de recul et d'avancée du trait de côte dans les différents secteurs 1, 2, 3, 4, et 5 (Figure 4). Ainsi on vise à identifier les principaux facteurs anthropiques qui ont accentué ce déséquilibre, en se basant sur les données historiques des différentes interventions humaines sur ce littoral.

2. Caractéristiques naturelles et anthropiques de la baie d'Agadir

Située sur la côte atlantique du Maroc à 35 km au Sud du Cap Ghir, 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 (Figure 1). La baie d'Agadir située à 30°25' N de latitude et 9°38' W de longitude, forme une zone de transition entre une côte rocheuse au nord et une longue côte sableuse, rectiligne et basse au sud.

Cette baie appartient à la région Souss Massa qui se situe au centre géographique du Maroc et qui couvre une superficie de l'ordre de 23950 km², renfermant trois bassins versants. Le climat de la plaine de Souss est aride à semi-aride ; il varie du type humide, à hiver froid sur les sommets du Haut-Atlas Occidental, à hiver frais en plaine. La proximité de l'Océan et l'influence du courant froid des Canaries atténuent le climat de la zone, et la barrière montagneuse de l'Anti-Atlas contribue à la protection contre les vents du Sud [24]. Sur le bassin versant d'Agadir, quatre rivières débouchent dans la baie d'Agadir : Oued Souss, Oued Lahouar, Oued Tanaout et Oued Tildi. Parmi ces rivières, l'oued Souss est le seul dont le débit est élevé ; et constitue la quasi-totalité des apports d'eau par voie fluviale dans la baie d'Agadir (500 millions de m³ voire même 1 milliard de m³ au cours d'années exceptionnellement pluvieuses. Il se jette dans l'océan à 6 km au sud du port ; son débit moyen est de 16,3 m³/s [25]. La houle le long des côtes marocaines est la conséquence de dépressions barométriques lointaines et sans relation avec les vents locaux. L'organisme public des ports de l'état de l'Espagne nous a fourni des données statistiques des paramètres des houles (Hauteur significative, direction, période) en fonction de leur fréquence. Les champs d'ondes ont été générés avec le modèle d'onde spectrale WAM qui est un code de calcul numérique basé sur les champs de vents. La comparaison des mesures du point SIMAR 44 a permis de mettre en évidence que les houles de directions W, WNW, NW, et NNW sont très largement dominantes en fréquence et en intensité.



Figure 1: Situation géographique de la baie d'Agadir (Google earth, 2012)

Les principales étapes du développement des aménagements au niveau de la baie d'Agadir ainsi que les différentes opérations effectuées au niveau de la plage sont résumées dans le tableau 1 (Direction des Ports et du Domaine Public Maritime, 2012).

Tableau 1: Historique des principaux aménagements au niveau de la baie d'Agadir (DPDPM, 2012)

Période	Principales interventions humaines
1917 - 1920	construction de la première digue du port d'Agadir sur une longueur de 206 m
1940 - 1948	allongement de la jetée jusqu'au point métrique 940 et construction de la halle aux poissons
1950 - 1953	construction d'un bassin de 30 ha, protégé par la digue sud d'une longueur totale de 1600 m
1960	séisme d'Agadir ; établissement du nouveau plan directeur de la construction de la ville, plan qui va complètement transformer le paysage littoral.
1968	mise en place d'un brise-lames d'une longueur de 200 m au sud de la jetée du port de pêche ; pour protéger cette zone contre l'érosion.
1982 - 1988	construction du nouveau port de commerce : pour cela, 1.2 millions de m ³ de sédiments ont été prélevés par fonds de -10m à -20 m au droit de l'Oued Souss, et 800 000 m ³ au voisinage de la passe d'entrée de l'ancien port.
1993	construction un système de défense, formé par deux brises lames d'environ 220 m de longueur chacun et un épi dont l'objectif est de lutter contre l'érosion au niveau du palais royal.
1990 - 2005	destruction totale de la dune bordière sur une longueur de 7 km entre l'embouchure de l'oued Souss et le complexe portuaire, suite à la construction des complexes hôteliers.

3. Méthodologie de travail

L'étude de l'évolution du trait de côte par la comparaison des photographies aériennes ou des images satellitaires commence par le choix de la ligne de référence. Une étude diachronique consiste souvent à utiliser des photographies verticales, dont l'échelle varie en général entre le 1/15000 et le 1/30000. Ces photographies sont géoréférencées sur la base de la carte topographique d'Agadir au 1/50000. La méthode de comparaison de photographies aériennes, permet d'apprécier la dynamique du trait de côte au cours d'une période par une confrontation des résultats avec les données historiques multisources. Elle permet de mieux comprendre l'impact des aménagements successifs sur le système côtier. Ainsi, l'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse : l'interprétation de photographies aériennes, l'analyse iconographique qualitative de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu [6].

Dans cette étude, les cinq types de documents du tableau 2 qui couvrent la période de 1963 à 2011, ont été utilisés. En ce qui concerne l'étude diachronique de l'évolution de la ligne de rivage par photo-interprétation, nous avons sélectionné les missions aériennes de Mai 1975, Avril 1991, Janvier 2003, Novembre 2011. L'étude de la cinématique de la ligne des pleines mers entre 1975 et 2011 indique des évolutions importantes consécutives aux différents aménagements mis en place dans la baie d'Agadir. La mesure de la distance qui sépare deux traits de côte a permis de calculer les taux d'érosion et d'engrèvement linéaires entre deux prises de vue [26-29]

Tableau 2: Documents utilisés pour l'étude diachronique

Documents	Année d'acquisition
Photographies aériennes	1975, 1991, 2003, 2011
Images satellites –LANDSAT-	1989, 2002, 2005
Photos historiques	1950, 1970
Cartes bathymétriques	1963, 1993, 2012
Cartes topographiques	1976

a. Choix de la ligne de référence :

Il existe plus d'une douzaine de lignes de référence matérialisant la position du trait de côte. Dans le cadre d'une étude diachronique fondée sur la photo-interprétation, le choix d'une ligne commune aux différentes images utilisées est nécessaire [29, 30]. Sur l'image de 1975, trois lignes sont identifiables (Figure 2): la ligne de rivage instantanée, le pied de dune qui représente la limite du front dunaire, matérialisé par une rupture de pente en avant de la limite de végétation dunaire, et le niveau des pleines mers matérialisé par la limite supérieure d'humectation qui représente la trace laissée par l'eau sur l'estran par la marée haute pendant toute la période de l'étale. Sur les images de 2003 et 2011, seules les lignes de rivage instantanées et des pleines mers sont discernables ; le contact entre la plage et la dune est difficilement exploitable en l'absence d'une nette rupture de pente suite à la disparition de la dune bordière (Figures 2 et 3). La ligne de rivage instantanée est présente sur toutes les images, cependant elle n'est pas utilisable de sa fluctuation puise qu'elle est dépendante des conditions de marée. Or, aucune information n'est disponible sur les jours et les heures des prises de vue, et les hauteurs des marées correspondantes pour pouvoir effectuer les corrections nécessaires. Le choix s'est donc porté sur la ligne des pleines mers encore appelée ligne de hautes eaux précédant la prise de vue (High water line, High tide line) (Figure 2). Cette ligne reste l'indicateur le plus fréquemment utilisé pour l'étude des variations de la ligne de rivage [30-32]. Elle a été définie par Crowell et al [33], comme le niveau atteint par la dernière marée haute. Toutefois, comme pour la ligne de rivage instantanée, cette limite reste également dépendante de la marée d'où la nécessité de déterminer la marge d'erreur correspondant à la variation de la ligne de pleines mers pendant les mois où les photos aériennes ont été prises. Les informations sur la position de la ligne des pleines mers proviennent des clichés des deux missions aériennes, acquis en mode panchromatique en 1975 et 1991, et des images satellitaires des deux périodes 2003 et 2011 obtenues à partir de Google Earth. Les deux clichés nous ont été fournis au format numérique par les responsables de l'Agence Nationale de la Conservation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie [34].

b. Digitalisation du trait de côte et estimation des erreurs

En dépit du redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures, il demeure un certain nombre d'incertitudes liées à la qualité des données de base, à la rectification des images, à l'extraction du trait de côte, et à la variation à court terme de la position de la ligne de référence. Dans le cadre d'une synthèse diachronique, tous ces éléments sont des facteurs de décalages supplémentaires qui doivent être évalués avant de tirer des conclusions sur la cinématique littorale [28, 29, 33, 35, 36, 37].

➤ Erreurs liées au géoréférencement des photos aériennes

Le géoréférencement correct d'une image nécessite un nombre suffisant d'amers ou de points de calage, bien répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Toutefois il faut ramener cette erreur à ± 1 pixel, soit 2 pixels si on compare deux images. Dans les photos aériennes analysées, le nombre de point de calage choisi est de 14, l'erreur liée au géoréférencement déduite est d'environ $\pm 0,53$ m.

➤ Erreurs liées à la digitalisation du trait de côte

La digitalisation du trait de côte aux quatre dates (1975, 1991, 2003 et 2011), a été répétée à plusieurs reprises de manière à estimer la marge d'erreur lors de la numérisation à l'écran. En effet, comme l'ont indiqué plusieurs

auteurs, le positionnement du trait côte au moment de la phase de digitalisation par un même opérateur peut être extrêmement variable dans le temps [36, 37]. En additionnant les intervalles de variation on a obtenu une précision de $\pm 3,5$ m pour la ligne des pleines mers.

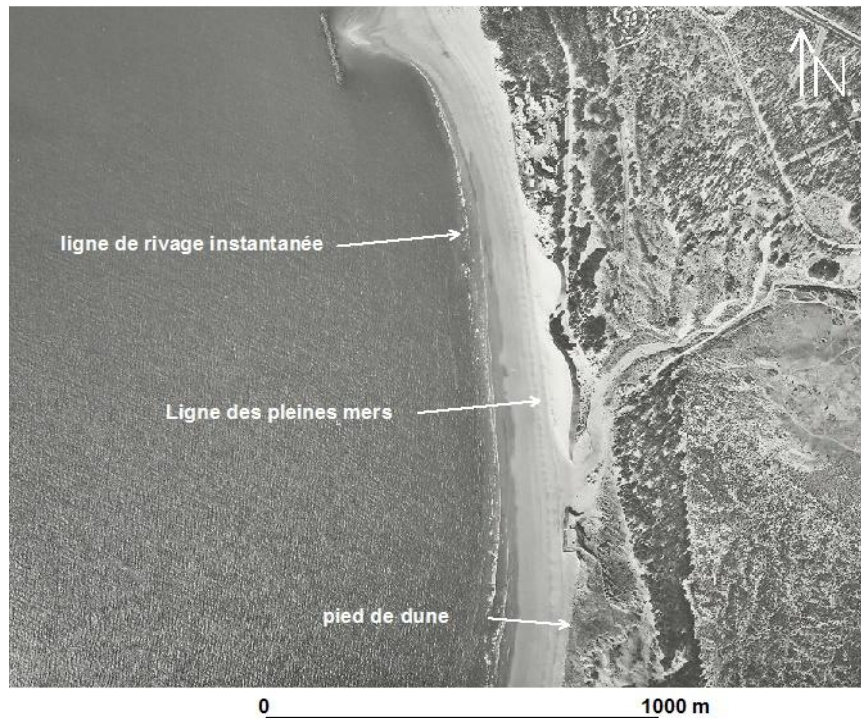


Figure 2: Photo aérienne de localisation de ligne de référence (ANCFCC, 1975)



Figure 3: Image satellitaire montrant la disparition de la dune bordière (Google earth, 2003)

➤ Erreurs liées à la variation du niveau des pleines mers

Une étude comparative fondée sur la photo-interprétation de la ligne des pleines mers requiert que les images soient acquises aux mêmes périodes dans des conditions de marée identiques ou proches afin de minimiser l'influence des fluctuations du niveau des pleines mers [38]. Quantifier précisément ces effets dans une zone comme la baie d'Agadir est délicat, car nous ne disposons pas de données concernant la pente de la plage au moment où les missions aériennes ont été réalisées. Par contre on peut avoir les données de marée basse et marée hautes pendant les mois où les photos aériennes ont été prise ; Ces données sont disponible dans le site du service hydrographique et océanographique de la marine. On peut calculer la pente moyenne dans la baie d'Agadir à partir des données bathymétrique de la zone des quatre périodes 1963, 1972, 1993, et 2012 à partir de

l'analyse des quatre cartes bathymétriques. On a pris la pente de 3° comme une pente moyenne pour le calcul de la marge d'erreur. Ainsi, comme l'on montré Thomas et Diaw [39], en fonction de la pente (θ) et de la hauteur d'eau (h), il est possible de calculer l'écart entre les niveaux de pleines mers maximale et minimale (Δd) à partir de la formule suivante : $\Delta d = h/\tan(\theta)$. Le tableau 3 résume les valeurs du minimum et du maximum des pleines mers pendant les mois ou les photos ont été prises.

Tableau 3 : Erreurs liées à la variation du niveau de la mer

Année	Période	Maximum des pleines mers (m)	Minimum des basses mers (m)	Hauteur d'eau (m)	Marge d'erreur (m)
1975	Mai	3,52	2,5	1,02	19,46
1991	Avril	3,61	2,33	1,28	24,42
2003	Janvier	3,88	2,38	1,5	28,62
2011	Novembre	3,66	2,65	1,01	19,27

4. Résultats d'analyse de l'évolution du trait de côte par photos aériennes

Selon la tendance évolutive globale du trait de côte au niveau du littoral de la baie d'Agadir, l'analyse des résultats obtenus a permis de mettre en évidence 5 secteurs distincts (Figure 4).

Le secteur 1 correspond à la plage d'Anza située au Nord du port de Commerce. La jetée du port constitue un obstacle vis-à-vis du transit sédimentaire véhiculé par la dérive littorale qui est orienté approximativement du Nord vers le Sud. Ceci permet d'expliquer l'accumulation des sédiments au niveau de ce secteur. Le taux d'accrétion linéaire augmente tout en se déplaçant du profil 1 au profil 3 (Figure 4, Secteur1). L'avancée maximum est enregistrée au niveau du profil 3 qui est de l'ordre de $13 \pm 1,5$ m/an entre l'année 1991 et 2011.

Le secteur 2 est situé à l'extrémité Nord de la baie d'Agadir entre le port de pêche et l'oued Tildi (Figure 4, secteur2). Il montre une nette tendance d'accrétion qui s'atténue vers le sud. Le taux d'accrétion maximum enregistré au niveau du profil 4 est de l'ordre de $4,25 \pm 0,833$ m/an. Cette tendance générale à l'accrétion est en relation avec la construction du port de commerce dont les jetés représentent des obstacles contre les houles ce qui a conduit à la mise en place d'une zone calme qui favorise le dépôt des sédiments. En plus, cette zone a subi un rechargement artificiel à plusieurs reprises entre les années 1962 et 1970. L'évolution diachronique montre qu'à partir de 2003, la ligne de rivage tend à se stabiliser.

Dans le secteur 3, un brise-lames de 220 m de longueur est implanté en 1968, par fonds de -4 m sous le zéro hydrographique, à 175 m de la laisse de basse mer et arasé à la côte de pleine mer (+4 m). Ce brise-lames associé à des dépôts de produits de dragages par petits fonds a provoqué un engraissement spectaculaire de la plage qui vient se raccorder à l'ouvrage bien qu'il soit submersible aux pleines mers. Ces travaux d'aménagements ont montrés leur efficacité durant la période 1975-2011 par la formation d'un tombolo dans la partie arrière du brise-lames (Figure 4, secteur3). En effet, l'arrière du brise-lames a montré une accrétion importante surtout dans la partie centrale près de profil 9 avec un taux d'accrétion de l'ordre de $6,97 \pm 0,833$ m/an.

Le secteur 4 qui englobe les complexes hôteliers, est délimité par le brise-lames au nord et l'oued Tanaout au sud. Les variations de la ligne du rivage entre 1975 et 2011 sont analysées à partir de 4 profils établis perpendiculairement à la ligne de côte (Figure 4, secteur4). La tendance évolutive montre une érosion généralisée dans cette zone surtout dans la partie centrale où on distingue un recul de $114,61 \pm 30$ m à $176,85 \pm 30$ m avec un taux d'érosion linéaire maximum de $4,91 \pm 0,833$ m/an au niveau de profil 15.

Le secteur 5 délimité au nord par l'oued Tanaout et au sud par l'oued Souss, est caractérisé par la présence du palais royal qui est protégé par deux brise-lames et un épi mis place en 1994. Les variations de la ligne du rivage entre 1975 et 2011 sont analysées à partir de 3 profils établis perpendiculairement à la ligne de côte (Figure 4, secteur5). Ce secteur a montré un recul généralisé du trait de côte, avec un taux d'érosion de $6,024 \pm 0,833$ m/an. Les structures de défense contre la mer ont montré leur efficacité par la formation d'un début de tombolo dans la partie arrière des deux brises lames et une accumulation en amont de l'épi, mais on ne peut pas quantifier cette accrétion entre 1991 et 2011 à cause de l'absence des photos aériennes pendant cette période au niveau de ce secteur. Cependant, la partie sud du secteur 5 située au niveau de l'embouchure de l'oued Souss a montré un recul très important du trait de côte qui est de l'ordre de $6,024 \pm 0,833$ m/an (profil 18 de la figure 4).

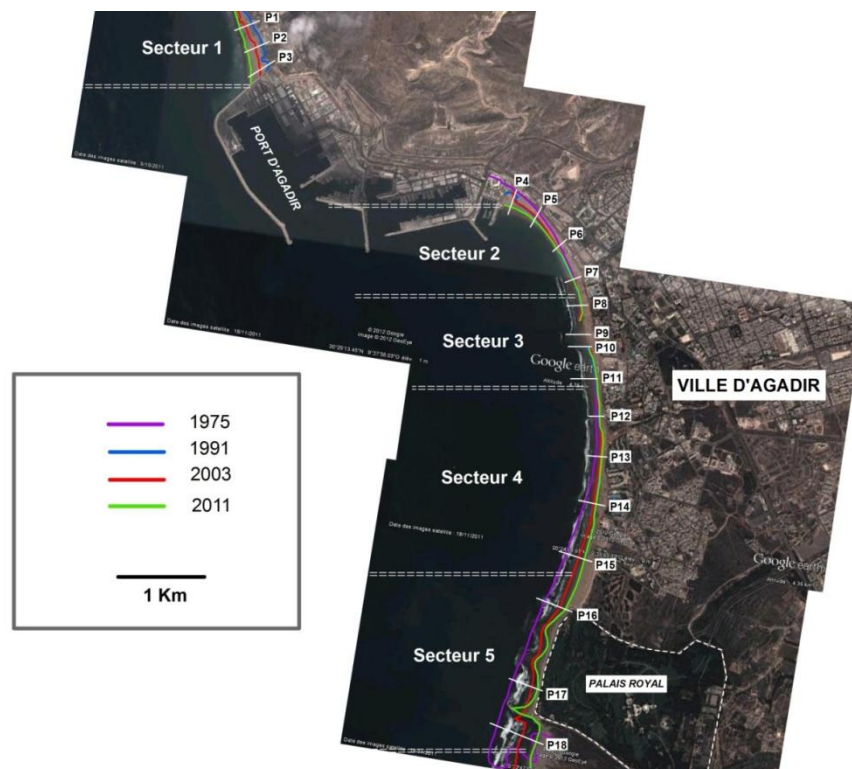


Figure 4: Carte de l'évolution globale du trait de côte.

5. Etude de l'évolution du zéro hydrographique

L'étude diachronique des photos aériennes a montré que l'évolution de la ligne du rivage a connu d'importantes variations de recul et d'avancée depuis 1975. Pour disposer d'une information complémentaire sur le déplacement des sédiments, nous avons recherché et exploité plusieurs données bathymétriques couvrant l'ensemble du secteur d'étude sur une échelle de temps relativement importante. Les données utilisées sont celles de 1963 (Carte marine SHOM), 1993 (Levée du Laboratoire Public d'essai et d'étude -LPEE-) et 2012 (Levée de la direction des ports et du domaine public et maritime-DPDPM-). La première carte couvre le secteur compris entre l'ancien port et le sud du brise lame, alors que les deux autres couvrent l'ensemble de la baie entre l'ancien port et l'embouchure du Souss. Ces documents ont été scannés, numérisés, et recalés en prenant en compte le zéro hydrographique de la zone comme ligne de référence. L'évolution des fonds est obtenue par superposition diachronique des cartes bathymétriques ce qui nous a permis de mettre en évidence deux zones distinctes :

- La zone 1 qui correspond à la partie nord de la baie d'Agadir et qui englobe les deux secteurs 2 et 3 précédemment définis dans l'étude diachronique. Dans cette zone, on dispose des données bathymétriques des trois années 1963, 1993, et 2012 (Figure 5). Les résultats obtenus montrent que cette zone a connu une accumulation d'un stock sableux important entre 1963 et 2012, en particulier au niveau de la partie protégée par le brise lames. Cette évolution confirme celle obtenue par l'étude diachronique qui a mis en évidence une avancée du trait de côte entre 1975 et 1991. On observe toutefois l'apparition d'une zone d'érosion directement au sud du brise-lames sur environ 150 m (Figure 5), qui peut s'expliquer par la détérioration de l'état du brise-lames.
- La zone 2 qui correspond à la partie sud de la baie d'Agadir et qui comprend les secteurs 4 et 5 de l'étude diachronique. Dans cette zone, on dispose seulement des données bathymétriques des années 1993 et 2012 (Figure 6). Cette zone est le siège d'une érosion accentuée et d'un recul de trait de côte qui commence devant les complexes hôteliers et qui s'intensifie vers le sud. Au droit du Palais Royal, la construction des brise-lames au Sud a conduit à une avancée significative de l'isobathe 0 m entre 1993 et 2012 (Figure 6). Cependant, au niveau de l'embouchure, le recul du trait de côte est le plus significatif au niveau de toute la baie d'Agadir. Donc la construction des brise-lames a permis de résoudre efficacement le problème d'érosion au droit du Palais, mais l'a accentué en aval de ces ouvrages. Les mêmes tendances évolutives ont été obtenues par l'étude diachronique dans les secteurs 4 et 5 (Figure 4).

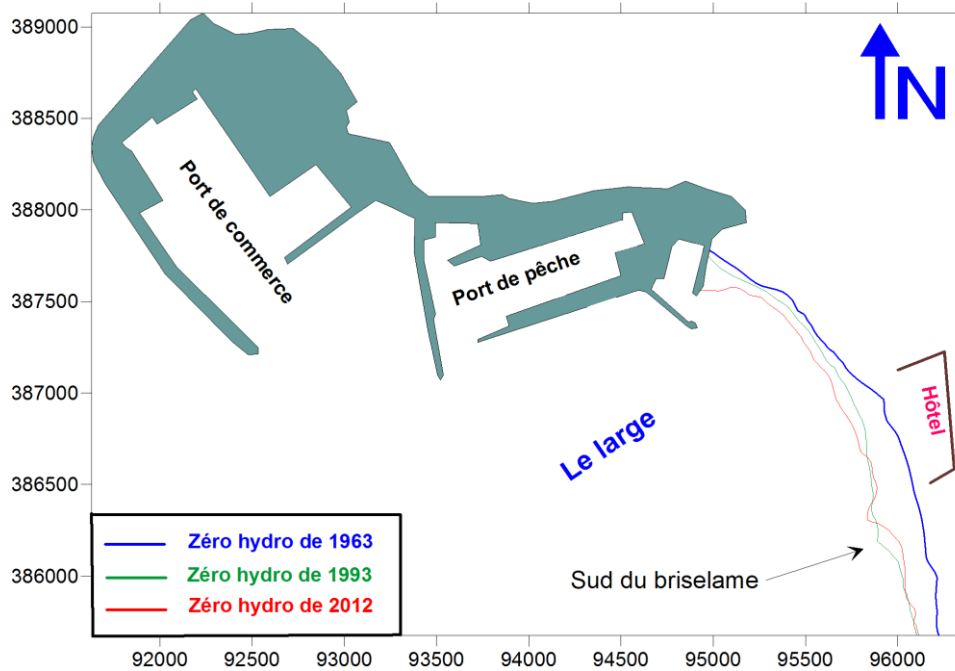


Figure 5: Carte de l'évolution du zéro hydrographique du secteur 1

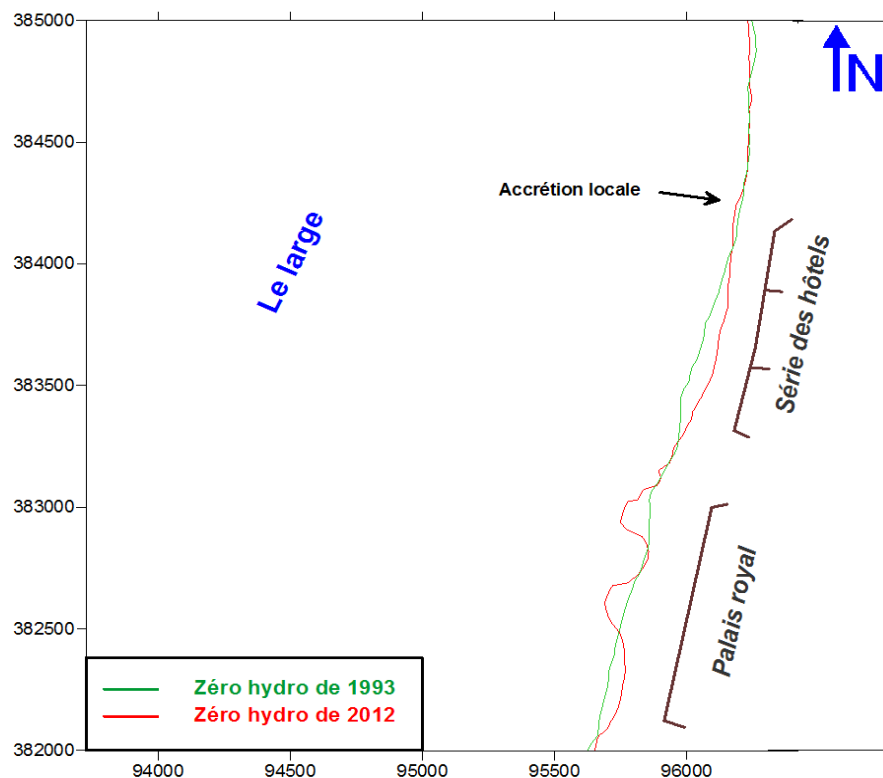


Figure 6: Carte de l'évolution du zéro hydrographique du secteur 2

6. Apport des images landsat dans l'évolution du trait de côte

La technique utilisée pour la réalisation de ce travail est basée essentiellement sur des images satellitaires Landsat que nous avons obtenues à partir des archives issues des instruments TM (Thematic Mapper) et ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Les images que nous avons utilisées pour ce travail datent de 1989 et 2002 ; chaque image couvre la totalité du littoral de la baie d'Agadir. Après une observation visuelle des bandes téléchargées, sept bandes ont été retenues pour réaliser un composé coloré de chaque image satellitaire. La ligne

de référence choisie comme trait de côte pour évaluer la dynamique du littoral est la ligne des pleines mers. Lorsqu'on observe le bilan des évolutions du rivage correspondant aux deux épisodes après la construction du port de commerce en 1988 on note une érosion généralisée qui a affecté la plage sud de la baie d'Agadir. Son impact s'est fait sentir depuis l'aval du brise lames mis en place en 1968 jusqu'au le Nord de système de défense mise en place devant le palais royal, soit sur une longueur de 4km du trait de côte (Figure 7). Dans ce secteur, le taux d'érosion linéaire augmente du nord vers le sud. Le recul maximum est enregistré devant la série des hôtels, où le taux moyen d'érosion est de 4.5 ± 0.833 m/an. Il est plus au moins égale à la moyenne enregistrée dans cette même zone au niveau de l'étude diachronique par photo interprétation, qui est de $4,91 \pm 0,833$ m/an. Le secteur situé au Nord en allant du brise lame jusqu'au port de pêche correspond à un secteur en accrétion qui coïncide à une zone d'ombre protégée par la jetée du port de commerce. Les apports sédimentaire accumulés au niveau de cette plage proviennent essentiellement du sud par la naissance d'une contre dérive sous l'effet de la diffraction de la houle qui provient de la direction $N^{\circ}315$ et $N^{\circ}335$, l'accrétion et la surélévation de cette plage est liée aussi aux différentes opérations du rechargement par du sable du dragage du port de pêche avant 1988. Au cours de cette période, précisément en 1994, des travaux de protection ont été effectués pour freiner l'érosion ; ainsi, deux brise-lames et un épi ont été installés devant le palais royale (Figure 7), la situation d'avant 1989 s'est rétablie, c'est-à-dire qu'on rencontre un secteur localement en légère accrétion. Cette étude qui constitue une application de la télédétection nous a permit de s'assurer des résultats de l'étude diachronique par photos aériennes concernant le taux de recul moyen au sud de la baie ainsi que les causes des cette évolution morphologique de la baie.

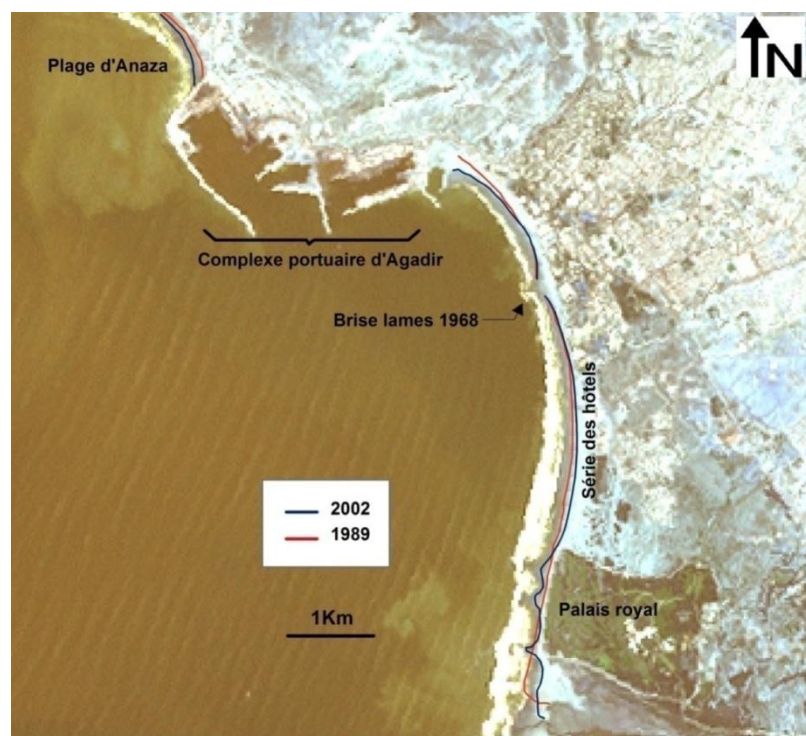


Figure 7: Évolution du trait de côte de la baie d'Agadir sur la période de 1989-2002 à partir des composés colorés d'images satellitaires

7. Discussion des résultats

L'étude de l'évolution du trait de côte basée sur l'analyse diachronique des photos aériennes et d'images satellitaires ainsi que la comparaison des différentes cartes bathymétriques a permis la quantification du taux d'érosion et d'accrétion linéaire sur une période de 49 ans. Il en ressort que les taux d'érosion et d'engraissement ont fortement varié durant cette période. La zone Nord de la plage située à proximité du port (secteur 1), s'engraisse avec un taux moyen de $10,29 \pm 1,5$ m/an. La zone centrale (secteurs 2 et 3) s'engraisse avec un taux moyen de $3,26 \pm 0,833$ m/an, alors que la zone sud de la baie d'Agadir (secteurs 4 et 5) souffre d'une érosion linéaire importante avec une vitesse qui peut atteindre $6,024 \pm 0,833$ m/an par endroit.

Cette tendance évolutive du trait de côte correspond à une évolution classique d'une plage alimentée en sédiments par une dérive littorale constante, perturbée par la mise en place d'ouvrages transversaux. Cette évolution est d'autant plus marquée que les ouvrages sont de dimension importante tel est le cas sur plusieurs plages atlantiques marocaines ; Tanger[2], Mohamedia [3]. La baie d'El Haouzia [4]

Parmi les quatre oueds qui débouchent sur la baie d'Agadir, l'Oued Souss représente le seul oued dont les apports sont significatifs. La phase sableuse du débit solide du Souss a été estimée à environ $100\,000\text{ m}^3$ par an (LCHF, 1972), [40], dont la majorité est apportée en période de crue. Sa contribution en sédiment dans la baie d'Agadir reste cependant très faible, à cause du courant de la dérive qui transporte les sédiments vers le Sud. Le vent peut aussi jouer un rôle non négligeable sur le transport sédimentaire au niveau de l'estran. Son action sur la plage qui est essentiellement érosive est estimée à un transport éolien de $100\,000\text{ m}^3$ par an sur la zone allant de l'Oued Lahouar à l'embouchure de l'Oued Souss (LCHF, 1972). La dérive littorale reste donc de très loin la principale source d'alimentation en sédiment de la baie d'Agadir. Le courant de dérive remanie en particulier les apports des oueds du Nord qui débouchent sur la façade atlantique, ainsi que les sables résultant de l'érosion des falaises du Moghrébien et de l'Holocène pendant les tempêtes. Le transport sédimentaire se fait principalement en direction SSE avec un débit de $400\,000\text{ m}^3/\text{an}$ (LCHF, 1972).

Avant la construction du port, les sédiments en provenance du Nord alimentaient toute la baie d'Agadir, et la plage était en équilibre. La construction de la première digue du port et sa prolongation en 1948 a entraîné la perturbation du transit sédimentaire. Il en résulte des opérations de dragages répétitifs, à partir de 1952, de la flèche à hauteur de $330\,000\text{ m}^3/\text{an}$ pour maintenir la passe du port de pêche à une profondeur d'environ -7.5 m . Par ailleurs, ce blocage du transit sédimentaire a entraîné un déséquilibre sédimentaire au niveau de la baie d'Agadir qui s'est manifesté par une érosion en particulier au centre de la baie où la dune bordière a été détruite pour construire les premiers complexes hôteliers. Pour remédier à cette situation, un premier brise lame de 220 m a été édifié en 1968 à 2 km au Sud de l'enracinement de la digue secondaire du port de pêche. Il a été implanté par fonds de -2 m à -3 m . En même temps, les rejets de dragages ont été effectués par fonds de -3 m environ entre le port et le brise-lame pour engraisser la plage nord. Dans cette portion de la baie, la sédimentation a dès lors été très importante ; le brise-lames a occasionné la formation d'un tombolo. Cette accumulation du sable pendant cette période a changé la morphologie du trait de côte surtout au Nord de la baie ; ceci est très clair si on compare les deux photos de 1950 et 1970 (Figure 8).

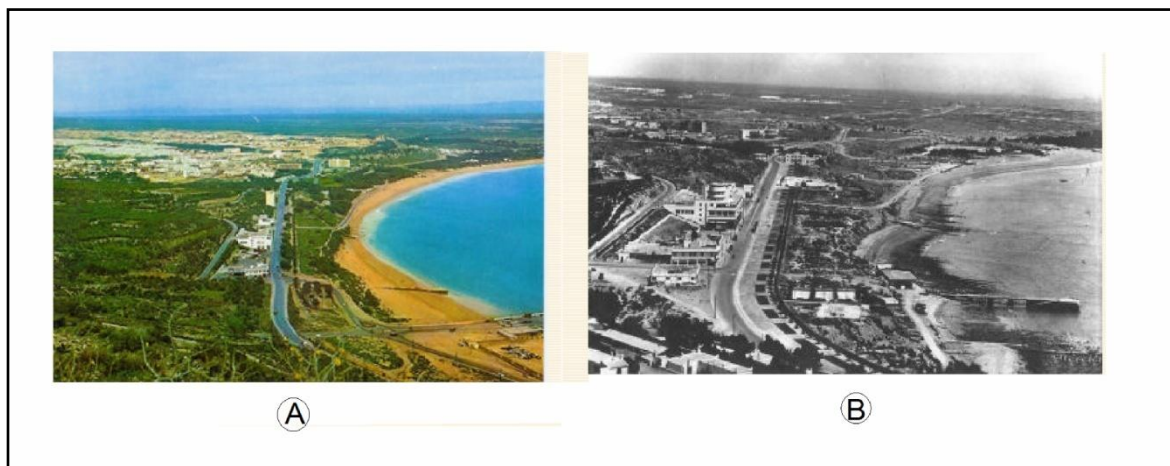


Figure 8: Photos historique de la baie d'Agadir montrant un changement géomorphologiques de la baie d'Agadir entre 1950 (A) et 1970 (B).

C'est à partir de 1982 que la configuration du littoral de la baie d'Agadir commence à changer avec le début des travaux pour la construction du nouveau port d'Agadir qui ont nécessité $1,2$ millions de m^3 de sédiments qui ont été prélevés par fonds de -10 m à -20 m au droit de l'Oued Souss, et $800\,000\text{ m}^3$ au voisinage de la passe d'entrée de l'ancien port [40]. En 1988, correspondant à la fin des travaux de construction du nouveau port, la totalité du transit sédimentaire en provenance du Nord s'est trouvée bloquée par la jetée de cet ouvrage. La plage d'Anza directement adossée à la jetée du nouveau port prend naissance et continue encore de s'engraisser en sédiments avec un taux d'accrétion moyen de $13\pm 1,5\text{ m}/\text{an}$ entre l'année 1991 et 2011. Par contre, dans la baie d'Agadir, si

la situation dans la partie Nord est restée relativement stable grâce la construction du brise-lames et à la création d'une zone calme protégée par la jetée du nouveau port, la partie sud de la baie (entre Oued Lahouar et Oued Souss) est le siège d'une érosion intense et d'un recul du trait de côte qui est de l'ordre de $6,024 \pm 0,833$ m/an entre l'année 1975 et 1993. Ce recul est amplifié par la destruction totale de la dune bordière dans cette zone de la baie d'Agadir sur une longueur de 7 km suite à la construction des complexes hôteliers.

Dans le but de protéger le Palais Royal contre cette érosion intense, deux nouveaux brise-lames et un épi ont été édifiés en 1993. Ces ouvrages ont permis d'observer une certaine stabilité de la plage dans cette zone et même une avancée du trait de côte par endroit (Figure 6), avec la formation d'un début de tombolo dans la partie arrière des deux brises lames et une accumulation en amont de l'épi. La partie sud du secteur 5 qui renferme la zone d'embouchure de l'oued Souss a montré un recul très important du trait de côte qui est de l'ordre de $6,024 \pm 0,833$ m/an. En plus du blocage du transit sédimentaire induit par ces structures de défense, ce recul intense du trait de côte au niveau de l'embouchure est également en partie du à la diminution de la charge solide transportée par l'oued Souss suite aux différents barrages installées sur l'oued et aux travaux d'extraction du sable et de gravier sur le lit de l'Oued.

Conclusion

Les résultats obtenus lors de cette étude apportent des éléments clés sur la compréhension de l'évolution du trait de côte au niveau de la baie d'Agadir. La démarche adoptée a permis de quantifier cette évolution en se basant sur la comparaison des photos aériennes et des images satellitaires ainsi que sur des cartes bathymétriques. La tendance évolutive du trait de côte correspond à une évolution classique d'une plage alimentée en sédiments par une dérive littorale constante, fortement perturbée par des aménagements implantés sur la plaine littorale et réalisés dans le cadre de la nouvelle stratégie pour développer le tourisme de masse. Ces interventions humaines sont devenues de plus en plus lourdes et menaçantes avec le temps.

Face à cette anthropisation croissante du littoral d'Agadir, l'érosion marine constitue un risque naturel et une menace collective et individuelle qui impose des choix souvent difficiles en matière d'aménagement. Ces choix devaient dépendre de la connaissance de la dynamique marine, de l'appréciation de ces risques et de l'impact des travaux sur l'environnement. Malheureusement, comme c'est le cas dans la plupart des littoraux des pays dits en voie de développement, les aménagements peu judicieux reposant sur des connaissances insuffisantes des processus naturels et sur des solutions lourdes d'ingénierie, ont entraîné une dégradation importante qui risque d'être irréversible. Cependant, il est encore possible d'éviter ces erreurs par une démarche intégratrice basée sur des études scientifiques et techniques rigoureuses afin de lutter contre la dégradation des littoraux et ses impacts socio-économiques

Remerciement - Nous tenons à remercier la direction des ports et du domaine public et maritimes à Rabat –DPDPM- (Maroc), et l'agence nationale de la conservation foncière du cadastre et de la cartographie à Rabat –ANCFCC- (Maroc), pour leur participation.

Références

1. Sbai A., Bouazza A., *In. Le littoral méditerranéen oriental : Diagnostic et choix de développement et d'aménagement. Colloque national, Oujda* (2002) 3-30.
2. El Abdellaoui J.E., Ozer A., *Revue Télédétection* 5(2005) 81-94.
3. Idrissi M., Ait Laamel M., Hourimeche A., Chagdali M., *J. Afr. Earth Sci.* 39 (2004) 541-548.
4. Chaibi M., Sabatier F., Maanan M., *Bull. Institut Sci.* (2009) 21-37.
5. Elmimouni A., Daoudi L., Anthony E.J., *Géomorphologie-Relief, Processus, Environnement.* 3 (2014) 219.
6. Grenier A., Dubois J.M.M., *Photo-Interprétation* 6 (1990) 3-16.
7. European commission., *Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. Part II Maps and statistics. Report Directorate General of Environment, European Commission, Brussels* (2004) 25.
8. IFEN, *Un quart du littoral recule du fait de l'érosion* 13 (2006) 4.
9. Morton R.A., Millert T.L., Moore L. J., *U.S. Geological Survey, Open-file report* 42 (2004) 2004-1043.
10. Morton R.A., Millert T.L., Moore L.J., *J. Coastal Res.* 21 (2005) 704-709.
11. Hapke C.J., Reid D., Richmond B.M., Ruggiero P., List J., *U.S. Geological Survey* (2006) 72.
12. Dillenburg S.R., Esteves L.S., Tomazelli L.J., *Annals of the Brazilian Academy of Science* 76 (2004) 611.
13. Gopinath G., Seralathan P., *Environ. Geol.* 48/8 (2005) 1058-1067.

14. [14] Blodget H.W., Taylor P.T., Roark J.H., *Marine Geol.* 99 (1991) 67 - 77.
15. [Frihy O.E., Nasr S. M., El hattab M.M., EL Raey M., Remote sensing of beach erosion along the Rosetta promontory, northwestern Nile delta, Egypt. *International Journal of Remote Sensing.* 15 (1994) 1649.
16. Puertos del Estado., *CLIMA MEDIO DE OLEAJE Nodo SIMAR 1038018 Conjunto de Datos: (SIMAR-44)* (2012) 40.
17. El asmar H., White K., *Coastal Engineering* 46 (2002) 127-138.
18. Boumeaza, T., *Thèse de doctorat, Université de Liège* (2002) 340.
19. Murray R. Ford Paul S. Kench., *Anthropocene* (2015) *In press doi:10.1016/j.ancene.2015.11.002*
20. Marek A., *Mémoire de Licence, Univ. de Liège, Fac. Sc., Liège.*(2007) 156.
21. Jalila M., Abderrahmane. ,A, Bendahhou Z., Mehdi M., Mohamed M., *Ocean Engineering* 102 (2015) 71-77
22. Ateeth S., Jayappaa K.S ., D Mitra., *Aquatic Procedia.* 4 (2015) 182-189.
23. Rovere A., Hearty P.J., Austermann J., Mitrovica J.X., Gale J., Moucha R., Forte A.M., Raymo M.E ., *Earth-Science Reviews* 145 (2015) 117-131
24. Sbai, A., *15ème Rencontre des Géomorphologues marocains. «Le Maroc méditerranéen : Dynamique actuelle et mutations spatiales»* (2008) 29-30.
25. Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa -ABH-SM., *Les Bassins Hydrauliques du Maroc* (2003) 384.
26. Laboratoire Central d'Hydraulique de France., *Modélisation physique du port de pêche d'Agadir, Casablanca, Maroc* (1972) 4.
27. Gobert D., Ozer A. et Cornet Y., *Photo-interprétation* 1(1996) 49-57.
28. Durand P., *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1(2001) 55-68.
29. Gaillot S., Chaverot S., *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1(2001) 47-54.
30. Robin M., *In (Baron-Yelles N., Goeldner-Gionella L., Velut S., Ed.) Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Etudes offertes à Fernand VERGER. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris* (2002) 95-115.
31. Boak E. H., Turner I.L., *J. Coastal Res.* 21 (2005) 688- 03.
32. Moore L. J., *J. Coastal Res.* (16/1) (2000) 111 - 124.
33. Moore L. J., Ruggiero P., List J.H., *J. Coastal Res.* 22/4 (2006) 894-905.
34. Crowell M., Leatherman S., Buckley M.K., *J. Coastal Res.* 7 (1991) 839 – 852.
35. *Saloum, Sénégal. Photo-Interprétation.* 35/1997 (1997) 199 - 204.
36. Anders F.J., Byrnes M.R., *Shore and Beach* 59 (1991)17 - 26.
37. [36] Thieler E.R., *J. Coastal Res.* 10/3(1994) 549-563.
38. Durand P., *Photo-Interprétation* 1(2000) 3-18.
39. Stafford D.B., Langeflder J., *Photogrammetric Engineering* 37(1971) 565-575.
40. Thomas Y.-F., Diaw A.T., *Photo-Interprétation* 35/1997 (1997) 199-204.
41. Laboratoire public d'essai et d'étude et SOGREAH (1990)., *Modélisation physique de la baie d'Agadir, Maroc* (1972) 20-34.

(2015) ; <http://www.jmaterenvirosnci.com>