

Évolution et morpho-dynamique de la plaine côtière de Saïdia (littoral méditerranéen du Nord-Est du Maroc) durant la période 1958-2006

Mounia MOUZOURI¹ & Zoulikha IRZI²

1. Université Mohammed Premier, Faculté de Sciences, Département de Biologie,
Laboratoire d'Hydrobiologie et d'Écologie Générale, Boulevard Mohammed VI, B.P. 717, Oujda, Maroc.

2. Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire des Géosciences Appliquées,
Boulevard Mohammed VI, B.P. 717, Oujda, Maroc. e-mail auteur correspondant : irzizou@yahoo.fr

Résumé. L'étude géomorphologique du littoral méditerranéen de Saïdia (Nord-Est du Maroc), s'étendant entre les oueds du Kiss à l'Est et la Moulouya à l'Ouest, montre qu'il est composé de cinq cordons dunaires séparés par des replats et dont la formation date de la dernière transgression flandrienne. L'analyse diachronique des variations du trait de côte, à l'aide des photographies aériennes (missions de 1958, 1963, 1988 et 2006) et des travaux de terrain, ont permis de retracer son évolution. Ainsi, trois zones distinctes ont été identifiées. Deux sont dominées par une évolution régressive : l'une à proximité de l'embouchure de la Moulouya avec des vitesses de retrait de 9 à 10 m/an et l'autre à l'Ouest du Kiss avec des vitesses de retrait de 0,2 à 1,6 m/an. Une troisième zone centrale est caractérisée par une accrétion de 0,34 à 2,52 m/an. En plus des facteurs géologiques, climatiques et hydrodynamiques locaux, les interventions anthropiques sont pour une grande part à l'origine de cette évolution. En effet, les deux barrages construits sur l'Oued Moulouya ont diminué significativement la charge sédimentaire transportée entre 1963 et 1988. En outre, le port de plaisance a entravé le transit sédimentaire dominant vers l'Est, induisant, entre 1988 et 2006, un recul du rivage du secteur Est d'un taux moyen de 1 m/an, et une avancée de l'estran de 44 m contre sa jetée Ouest. Par ailleurs, les aménagements massifs et les projets touristiques viennent perturber davantage le fonctionnement naturel des écosystèmes côtiers et des corps sédimentaires associés dans ce site.

Mots clés : Littoral méditerranéen, Maroc, trait de côte, photo-interpretation, érosion, accrétion.

Morphodynamics and evolution of the Saïdia coastal plain (Mediterranean Coast of northeastern Morocco) during the period 1958-2006

Abstract. The present paper discusses the impact of natural processes and anthropogenic factors on the morphological evolution of the northeastern Mediterranean coast of Saïdia (Morocco). Geomorphological investigation shows that the studied coast, lying between the Kiss river to the east and the Moulouya river to the west, is composed of five dune ridges separated by benches whose formation resulted from a complex evolution since the last Flandrian transgression. Based on data from aerial photographs (1958, 1963, 1988 and 2006 surveys) and fieldwork, the diachronic analysis related to changes in the coastline permitted us to track the evolution of the Saïdia coastline. Thus, three distinct areas were recognized, two of which, namely those located close to the mouth of the Moulouya and Kiss rivers, are dominated by a regressive evolution whose calculated rates of withdrawal are 9 to 10 m/year and 0.2 to 1.6 m/year, respectively. By contrast, the third area is characterized by accretion corresponding to calculated rates varying from 0.34 to 2.52 m/year. Besides to geological, climatic and hydrodynamic factors, the anthropological activities are also responsible for the coastline evolution outlined above. Indeed, the two dams built on the Moulouya river caused a significant decrease in the sediment load transported between 1963 and 1988. Furthermore, the marina has hampered the eastward dominant sedimentary transit, resulting between 1988 and 2006 in a 1m/year decline of the eastern shoreline and its shift to the west. Additionally, the coastal development projects taking place in the Saïdia, come to disrupt the natural evolution of coastal ecosystems and the sedimentary bodies associated, as well, in this site.

Key words: Mediterranean Coast, Morocco, coastline, photo-interpretation, erosion, accretion.

التطور المورفودينامي للساحل السعيدية للفترة الممتدة ما بين 1958 و 2006 (الساحل المتوسطي الشمالي الشرقي للمغرب)

ملخص. يعالج هذا المقال مختلف العوامل المسؤولة عن التطور المورفودينامي للساحل المتوسطي للسعيدية (الشمال الشرقي للمغرب). تبين هذه الدراسة الجيومرفولوجية أن هذا الساحل الممتد ما بين واد كيس شرقا و ملوية غربا، يتكون من خمس كتبان رملية تفصل بينها منخفضات يرجع تاريخ تكوينها إلى آخر عمر بحري فلونديري. إن التحليل الزمني لتغيرات خط الساحل بالاعتماد على الصور الجوية (1958-1963-1988-2006) والعمل الميداني، مكنتنا من إعادة رسم التطور الحالي لخط الساحل للسعيدية. حيث تم التمييز بين ثلاث مناطق متفاوتة : فالمنطقة المحاذية لمصب واد ملوية تتميز بتراجع يصل ما بين 9 و 10 متر في السنة، و الثانية الموجودة شرق واد كيس تتراجع بمعدل ينحصر بين 0,2 و 1,6 متر في السنة. أما بخصوص المنطقة الثالثة التي تتوسطهما فهي تتميز بتقدم محصور ما بين 0,34 و 2,52 متر في السنة. بالإضافة إلى العوامل الجيولوجية و المناخية والهيدرودينامية المحلية، فإن للعوامل البشرية الأثر الأكبر في هذا التطور. فالسدن اللذين شيدا على واد ملوية، قد قللا بصفة كبيرة من الحمولة الارسابية المنقولة ما بين 1963 و 1988. كما أن وجود الميناء الترفيهي حال دون مرور الإرسابات في اتجاه الشرق في الفترة الممتدة ما بين 1988 و 2006، حيث تم تسجيل تراجع كبير لخط الساحل في المنطقة الشرقية بمعدل 1 متر في السنة و تقدم لخط الساحل ب 44 متر في الاتجاه المعاكس للحاجز الغربي لهذا الميناء. كما تجدر الإشارة إلى أن عمليات التهينة المكثفة و المشاريع السياحية الحالية، سوف تزيد من خلخلة الوظائف الطبيعية للأنظمة البيئية الساحلية في هذا المجال.

كلمات مفاتيح : الساحل المتوسطي، المغرب، خط الساحل، دراسة زمنية، تعرية، ترسب.

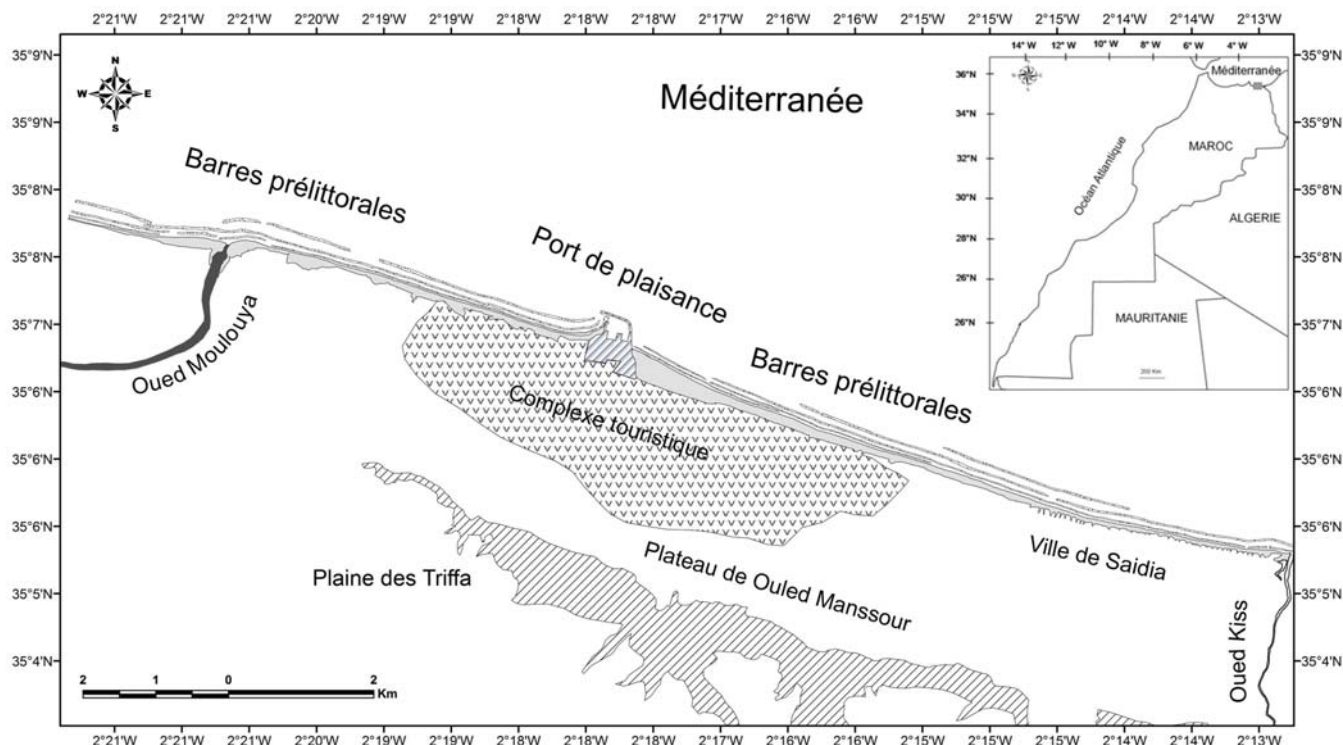


Figure 1. Cadre général de la baie de Saïdia (Nord-Est du Maroc).
 Figure 1. General setting of the Bay of Saïdia (north-eastern Morocco).

INTRODUCTION

La plaine côtière de Saïdia est située à l'extrémité nord-orientale du littoral méditerranéen du Maroc (Fig. 1). Cette zone côtière est de type dissipatif modéré, avec un marnage de type microtidal dominé par la houle (Tesson & Gensous 1979, Irzi 2002). Le littoral de cette baie est constitué de dépôts sableux avec des passages argileux et d'alluvions. C'est une progradation holocène résultant de la combinaison entre les apports des oueds Moulouya et Kiss et les processus hydrodynamiques marins.

A l'extrémité ouest de la plaine se situe l'embouchure de la Moulouya, très méandrique, abritant une riche biodiversité ; c'est une zone humide classée comme site d'intérêt biologique et écologique (SIBE), alors que sa limite orientale est constituée par l'embouchure de l'oued Kiss actuellement formée par un plan d'eau fermé côté mer par une flèche littorale édifiée par le transit littoral d'Ouest en Est.

Cette plaine côtière a été le siège de nombreux changements morphologiques, en particulier durant les cinquante dernières années. En effet, elle a été soumise à des pressions naturelles de plus en plus grandissantes telles que l'aridité du climat, la sécheresse, les inondations, les vagues de tempêtes, etc. De plus, cet espace côtier, ainsi que son arrière-pays font l'objet de nombreuses interventions anthropiques : aménagements urbanistiques, touristiques, portuaires, de barrages etc. Ces interventions, couplées aux processus dynamiques locaux et régionaux, engendrent généralement des dysfonctionnements des différentes composantes de cet écosystème (érosion,

engraissement, pollution, inondations, etc.) ; en outre, ce littoral appartenant à un bassin subsident est caractérisé par une topographie très plane (6 m maximum ; Rampoux *et al.* 1977, Laouina 1990). Il est ainsi très sensible à l'élévation du niveau marin générée par le réchauffement climatique global (Snoussi *et al.* 2008) ; il est également très vulnérable aux processus hydrodynamiques locaux comme les vagues de tempêtes de l'Est ainsi que les inondations catastrophiques comme celles de 1964, 2004, 2008, 2009 et 2010.

Les travaux antérieurs réalisés sur le littoral de Saïdia ont porté essentiellement sur l'étude des formations quaternaires, l'évolution morphosédimentaire, la géochimie et l'évolution de delta de la Moulouya (Gigout *et al.* 1957, Barathon 1989, Laouina 1990, Zourarah 1995, Boumeaza 1998, Zarki 1999, Irzi 2002, Bouabdallah & Larue 2009 et Salmon *et al.* 2010). Ces auteurs signalent bien la variation spatio-temporelle de ce littoral générée par les processus hydrodynamiques, géologiques et climatiques locaux et régionaux.

La présente étude traite l'évolution détaillée du rivage de Saïdia durant les dernières cinquante années. Cet article vise donc principalement à :

- préciser davantage les rythmes d'évolution du rivage au sein de la plaine de Saïdia par l'analyse diachronique des photographies aériennes verticales acquises depuis 1958 ;
- évaluer la dynamique spatio-temporelle des impacts des processus naturels et provoqués en analysant les tendances évolutives.

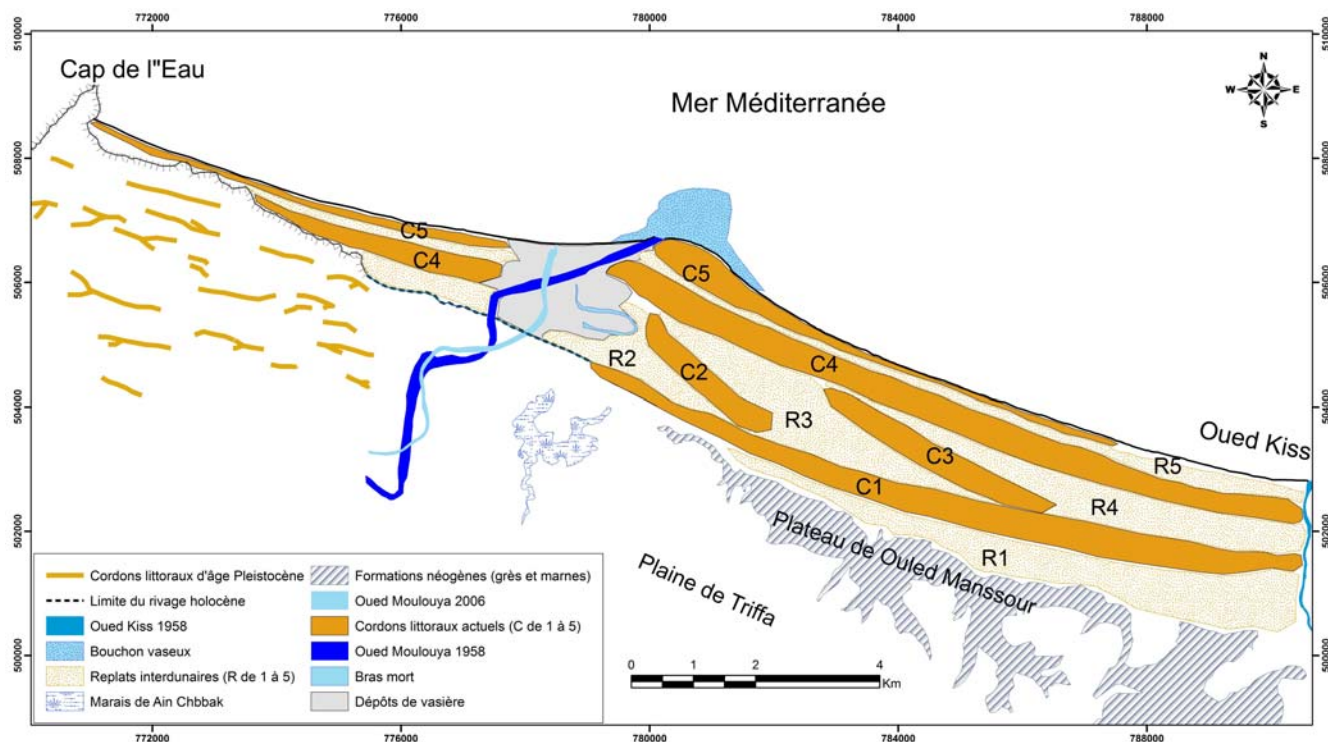


Figure 2. Morphodynamique sédimentaire holocène de la baie de Saïdia d'après la photo-interprétation de 1958 couplée aux investigations de terrain.

Figure 2. Holocene sedimentary morphodynamic evolution of the Bay of Saïdia as inferred from the 1958 photo-interpretation coupled to field investigations.

CADRE DU LITTORAL DE SAÏDIA

La plaine côtière méditerranéenne de Saïdia, orientée WNW–ESE constitue le prolongement de la plaine des Triffa vers le Nord. Elle s'étend sur 14 km de long et 2,5 km de large. Cette plaine est limitée à l'Ouest par l'oued Moulouya, à l'Est par l'oued Kiss, et au Sud par les monts des Ouled Manssour (Fig. 1), dont les falaises mortes, culminant à 100 m d'altitude, sont constituées d'une alternance de dépôts de grès et d'argiles néogènes. La plaine est formée par des dépôts holocènes, mis en place depuis la transgression flandrienne (- 6000 ans) (Gigout *et al.* 1957, Laouina 1990). C'est une côte de morphologie très plane, de faible altitude par rapport à la mer (0 à 6 m). Elle est constituée par un système de cinq cordons dunaires séparés par des replats, un cordon de dunes barkanoides vives et une plage assez large de type dissipatif (Irzi 2002 ; Fig. 2). La plaine côtière est formée essentiellement de limons vaseux continentaux et de sables actuels. La plage de Saïdia est composée de sables fins quartzeux jaunâtres, avec un calibre moyen compris entre 0,25 et 0,30 mm.

Actuellement, ce littoral est caractérisé par un climat méditerranéen assez contrasté, marqué par une aridité de plus en plus accentuée; la pluviométrie moyenne annuelle est de 320 mm/an, et la température moyenne annuelle est de 17 °C. Les houles les plus actives sur cette plage sont de directions Nord-Ouest et Nord-Est (Zourarah 1995). Leur interférence engendre une dérive littorale dominante avec un sens WNW-ESE. Ceci est attesté au niveau de la rive

gauche de l'embouchure de la Moulouya par la flèche littorale très développée parallèlement au rivage caractérisant les littoraux dominés par la houle (Perillo 1995). La marée est de type microtidal avec une moyenne de 20 cm (Tesson & Gensous 1979). Sbai *et al.* (1992) ont noté une dominance des vents d'Ouest et du Sud-Ouest en hiver et une dominance des vents du Nord et du Nord-Est en été. Les processus hydrodynamiques qui contrôlent ce littoral lui confèrent un régime dominé par la houle.

Les fleuves tributaires de la plaine côtière de Saïdia sont les oueds Moulouya et Kiss. Ces deux fleuves ont une hydrologie variée, rythmée par des apports pluviométriques à débit très contrasté. L'oued Moulouya est la principale source d'alimentation en sédiments de la plage de Saïdia ; d'une longueur de 520 km en moyenne, il prend sa source dans le Moyen Atlas à 2000 m d'altitude (région d'Arhbala), et draine ses eaux jusqu'à son embouchure dans la Méditerranée. Son bassin versant est d'une superficie de plus de 57.000 km². C'est le plus important cours d'eau marocain se jetant dans la mer Méditerranée (Irzi 2002).

MÉTHODOLOGIE

L'étude de la cinématique du trait de côte est basée sur le traitement par photo-interprétation d'une série de photographies aériennes allant de 1958 à 2006, couvrant la frange littorale comprise entre l'oued Kiss et l'oued Moulouya.

Données image

Photographies aériennes

Quatre campagnes de prises de vue du secteur étudié ont permis de déterminer les rythmes et les taux d'évolution du rivage de Saïdia (Tab. I). La première et la deuxième série de photographies correspondent à des prises de vue aériennes effectuées par l'Institut Géographique National en 1958 et 1963. Ces clichés permettent de fournir les informations nécessaires à la compréhension de la genèse et en particulier de l'évolution de ce littoral avant la mise en place des deux barrages dans les gorges des Béni-Znassen

(Mechraa Hammadi en 1958 et Mohammed V en 1967). La troisième série correspond à des photographies aériennes prises le 11 août 1988 par la Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques de Nador. Elle permet de retracer l'évolution de cet espace côtier avant l'aménagement portuaire. La mission photographique, datant du 8 mars 2006 effectuée par l'Agence urbaine d'Oujda, permet d'illustrer l'état actuel de la frange littoral (Tab. I). Un monitoring basé sur la réalisation de missions de terrain a été effectué durant la période 2005 à 2010 afin de compléter et de vérifier les informations fournies par les différentes photographies aériennes analysées.

Tableau I. Liste des photographies aériennes utilisées pour l'analyse diachronique.
Table I. List of aerial photographs used for the diachronic analysis.

Date	Mission	Organisme	Echelle	N° de clichés
08/03/2006	M06-240	Agence urbaine d'Oujda	1/7 500	B1 : de 01 à 12 B2 : de 01 à 19 B3 : de 01 à 21 B4 : de 01 à 22 B5 : de 01 à 23 B6 : de 01 à 10 B7 : de 01 à 10 B8 : de 01 à 09 B9 : de 01 à 09
11/08/1988	M3/87	D.F.C.T.T. Nador	1/40 000	027-028-029-030
1963	MA-048/400	I.G.N. Rabat	1/40 000	003-004-005-006-007-017-018-019
1958	NI30-XXI-XXII	I.G.N. Rabat	1/50 000	069-070-071-072

Cartes topographiques

Deux cartes topographiques ont servi à la correction géométrique des photographies aériennes : Triffa et Saïdia du Kiss au 1/50 000, dressées dessinées et publiées par la Division de la Cartographie (Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques) respectivement en 1965 et 1956.

Relevés GPS

Des nombreux relevés effectués à l'aide d'un GPS ont servi à la vérification et à la localisation des points amers.

Méthodes de traitement

L'étude diachronique de l'évolution du trait de côte du littoral de Saïdia a été réalisée en superposant les photographies aériennes des missions des années 1958, 1963, 1988 et 2006. Les clichés panchromatiques des différentes missions ont été scannés avec une résolution de 150 dpi. La correction géométrique des photographies a été effectuée par la méthode de saisie d'amers en appliquant un modèle polynomial (ordre 1); pour chaque cliché, une vingtaine de points amers répartis d'une manière équilibrée ont été utilisés pour couvrir l'ensemble du cliché. Après rectification, les cartes topographiques traitées ont servi comme image de référence. Les clichés corrigés et

géoréférencés, ont été assemblés sous Erdas afin de créer une mosaïque couvrant toute la zone d'étude (Fig. 3).

Il est à signaler que la définition d'une ligne de référence du trait de côte est un problème délicat (Robin 2002, Faye *et al.* 2008). Dans le cas traité, l'étude est basée sur la ligne de rivage instantanée, étant donné que le littoral de Saïdia a un marnage très faible (microtidal). En outre, les effets de la marée sont négligeables et leur impact sur les variations morphologiques du littoral est insignifiant (Jimenez *et al.* 1997, Suanez & Simon 1997, Durand 2000). La position occupée par le trait de côte a été identifiée et cartographiée sur l'ensemble des images.

Il faut noter également que, bien que la comparaison cinématique des photographies aériennes permet d'observer l'évolution du trait de côte comme l'ont signalé de nombreux auteurs (Smith & Zarillo 1989, Paxion & Cohen 2002, Halouani *et al.* 2007), ces photographies présentent néanmoins de nombreuses déformations géométriques (Thieler & Danforth 1994). Ces dernières sont à l'origine d'erreurs de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres entre la photographie et la réalité (Aernouts & Héquette 2006). Durand (1998) a indiqué l'existence de trois erreurs possibles : les deux premières sont engendrées par le processus de correction des photographies alors que la troisième est une erreur de mesure qui intervient sur les photographies corrigées. Dans le présent travail, les marges

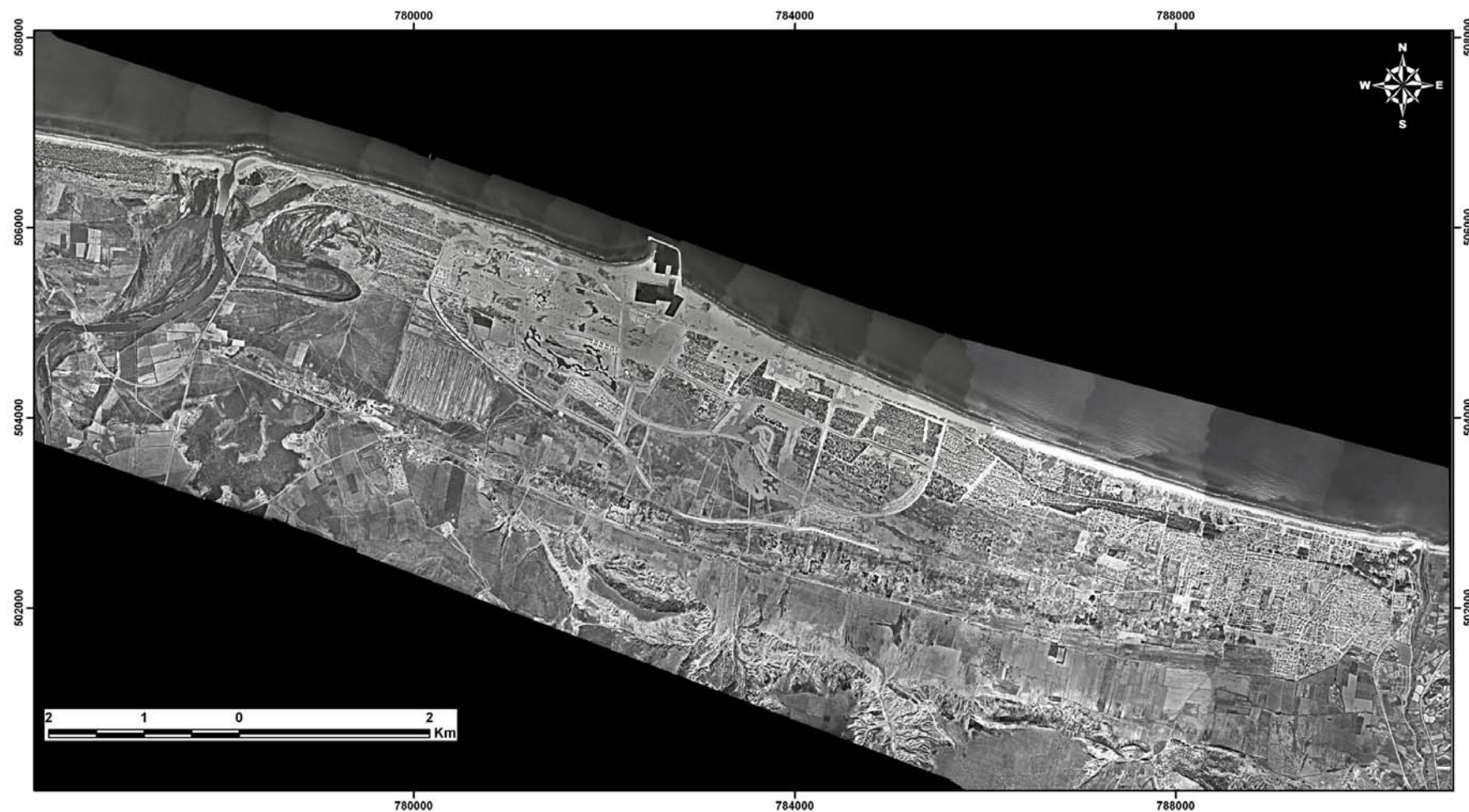


Figure 3. Mosaïque de photographies aériennes de la baie de Saïdia en 2006.
Figure 3. Mosaic of aerial photographs of the Bay of Saïdia in 2006.

d'erreur inhérentes à la correction géométrique ont été mesurées à partir du décalage des positions des éléments fixes (intersection des routes les plus proches du littoral) entre les photographies corrigées et le document de référence. Ainsi, les mesures donnent une estimation avec une marge d'erreur moyenne de ± 9 m selon les secteurs. Cette marge reste conforme aux valeurs proposées par plusieurs auteurs qui l'estiment à ± 10 m (Crowell *et al.* 1991, Douglas & Crowell 2000, Lafont & Suanez 2005, Niazi 2007, Halouani *et al.* 2007). Elle correspond au repérage des points amers sur la photographie aérienne et à l'erreur résiduelle calculée par le logiciel pour l'ensemble des points amers. La troisième erreur est associée au repérage du trait de côte, celle-ci est de ± 1 m. L'erreur maximale possible s'élève ainsi à ± 10 m, soit ± 20 m si l'on veut comparer la position du trait de côte correspondant à deux dates différentes.

Les mesures de l'évolution de la position du trait de côte à Saïdia ont été effectuées au niveau de 84 transects couvrant toute la zone d'étude (Fig. 5). Les résultats sont associés soit à un recul de la ligne du rivage, soit au contraire à une progradation.

RÉSULTATS

Évolution du trait de côte de 1958 à 1963

L'analyse des photographies aériennes de l'année 1958 montre que la partie aval de l'oued Moulouya est méandriforme, et que l'embouchure est de direction NE-SW, avec une rive droite convexe et beaucoup plus développée que la rive gauche (Fig. 4, A). Le panache, comme en témoigne la couleur blanche sur le cliché, progresse à l'intérieur de la mer, alors que, du côté de la rive droite, des chenaux abandonnés sont bien visibles.

En 1963, le cours inférieur s'est décalé d'environ 2 km vers l'Ouest avec une nouvelle orientation de l'embouchure (N-S). L'embouchure de 1958 de direction NE-SW est encore active en 1963. On note un élargissement très net du cours d'eau et de l'embouchure ; cette dernière mesurait environ 150 m en 1958 alors qu'elle dépasse 400 m en 1963 (Fig. 4, A).

Les deux rives de la Moulouya ont connu une érosion notable de 1958 à 1963 entre les transects 68 et 77 (Fig. 5). Le recul du trait de côte a atteint plusieurs dizaines de mètres. En effet, un retrait de 80 m est enregistré au niveau du transect 69, ce qui représente une importante vitesse d'érosion, dépassant 4 m/an durant cette période pour les deux rives. Toutefois, une nette diminution du rythme d'érosion est observée vers l'Est (Fig. 5).

Plus à l'Est, entre les transects 67 et 58, zone qui correspond à l'implantation du port actuel, l'évolution de la ligne du rivage est plus complexe. Des valeurs fortement positives sont observées, indiquant une progression du rivage de plus d'une centaine de mètres dans l'ensemble. Latéralement, des vitesses d'avancée du rivage de plus de 20 m/an sont enregistrés entre 1958 et 1963 (Fig. 5).

À partir du transect 57, au niveau du secteur Est de la plaine côtière de Saïdia, la tendance de l'évolution du rivage est inversée ; les vitesses du recul du trait de côte sont importantes atteignant par endroit 7 m/an.

À l'extrémité orientale de la plaine, à 3 km de l'oued Kiss, les vitesses de recul diminuent nettement et atteignent un rythme qui ne dépasse pas 1 m/an, à l'exception des transects 1 à 3, avec une moyenne de 0,72 m/an reflétant ainsi une faible érosion, voire une stabilité de la plaine dans ce secteur.

Évolution du trait de côte de 1963 à 1988

Cette période est caractérisée par une progression de 40 à 125 m de la zone côtière au niveau de l'embouchure de la Moulouya ; soit une vitesse de 1,6 à 5 m/an (Fig. 5), alors que la largeur du chenal dans la zone côtière a fortement régressé, son étendue ne dépasse pas 70 m (Fig. 4, B). L'ancienne embouchure de 1958 est complètement abandonnée, avec une nette érosion des deux rives. La rive droite a reculé de plus de 300 m depuis 1963, soit plus de 10 m/an, atteignant jusqu'à 375 m au niveau du transect 71, soit l'équivalent d'un rythme de 15 m/an (Fig. 5). Ce recul du trait de côte s'étend sur une distance de plus de 2 km le long de la rive droite, mais devient moins important vers l'Est. Cette évolution confère au littoral de la plaine côtière une morphologie plus rectiligne (Fig. 4, B).

À partir des transects 60 à 23 on assiste plutôt à une avancée du trait de côte de 10 à 209 m (transect 56) avec des vitesses annuelles allant de 0,4 à 8,3 m (Fig. 5).

Au delà de cette zone, et hormis les fluctuations des mouvements du rivage qui ont été, d'ailleurs, dans leur majorité incluses dans la marge d'erreur des mesures, les secteurs à l'Est n'ont pas connu de variations significatives.

Évolution du trait de côte de 1988 à 2006

Durant cette période, le delta n'a pas présenté de changements majeurs dans sa morphologie globale (Fig. 4, C). Cependant, un recul du trait de côte de 100 m au niveau de l'embouchure avec un retrait annuel de l'ordre de 5 m/an est observé. Ce recul s'étend sur une distance de près de 4 km vers l'Est (transect 76 à 60) avec des vitesses allant de 1 à 5 m/an (Fig. 5).

Les zones d'accrétion se manifestent en particulier, au niveau des deux digues du port de plaisance de Saïdia où on enregistre une avancée de l'estran de 44 m contre la jetée Ouest et de 41 m contre la jetée Est. Cette accrétion continue sur plus de 2 km à l'Est et peut atteindre 40 m par endroits, soit une moyenne de 2 m/an. Mais à partir du transect 32, à 3 km de l'oued Kiss, on assiste à une érosion significative de la plage de Saïdia, allant de 4 m à 60 m ; soit à une vitesse de 0,2 à 3 m/an et une moyenne de recul de 1 m/an au niveau de ce secteur (Fig. 5).

Signalons que les barres pré-littorales sableuses immergées situées à l'Est et au-delà du port se sont appauvries en sédiments ; une quantité non négligeable

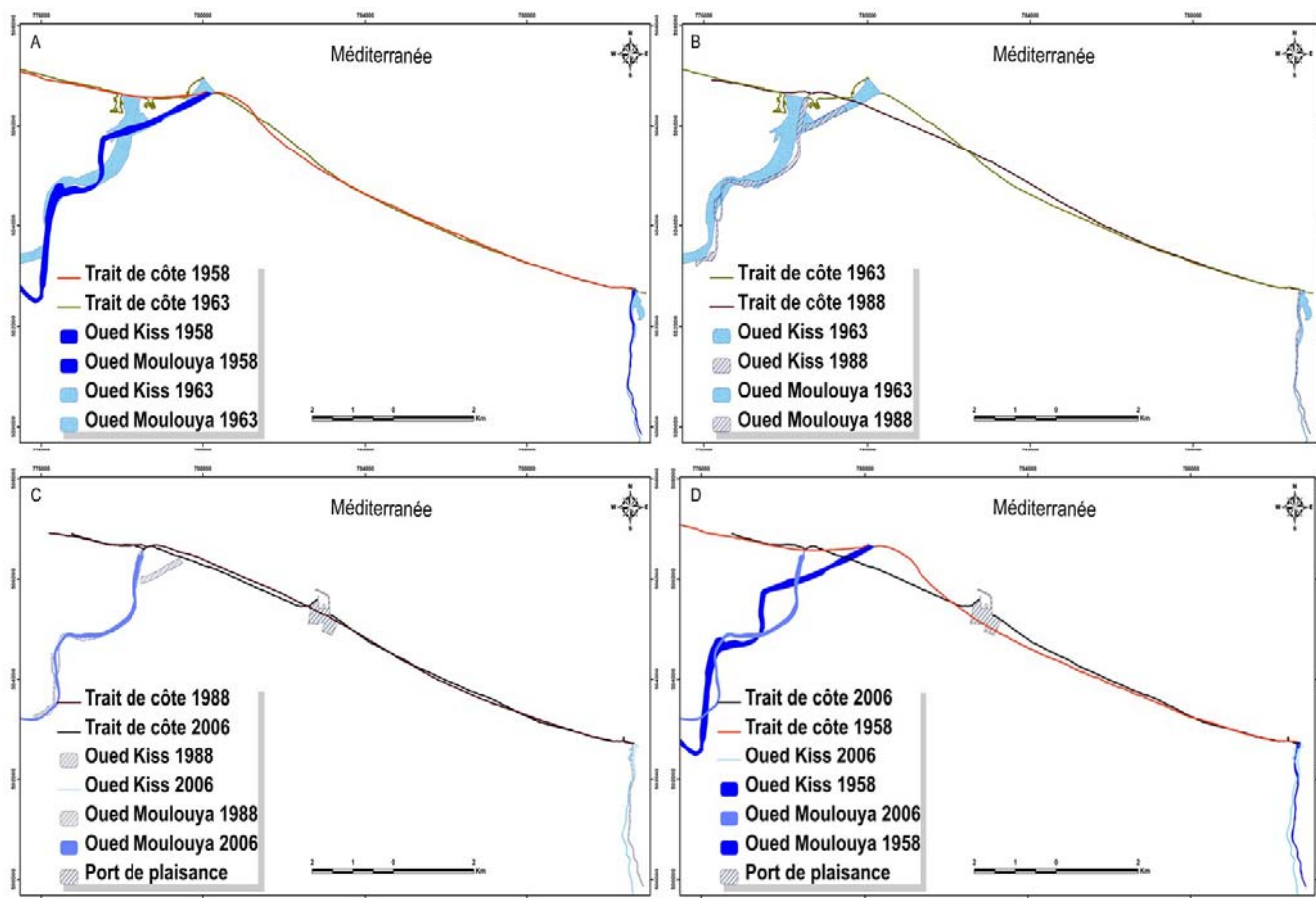


Figure 4. Variations de la morphologie de l'Oued Moulouya entre 1958 et 2006. A) entre 1958 et 1963 ; B) entre 1963 et 1988 ; C) entre 1988 et 2006 ; D) entre 1958 et 2006.

Figure 4. Morphological changes of Oued Moulouya between 1958 and 2006. A) between 1958 and 1963 ; B) between 1963 and 1988 ; C) between 1988 and 2006 ; D) between 1958 and 2006.

remonte vers la plage contre la jetée Est par l'effet des houles de l'Est. Ceci est attesté par la photo-interprétation et le suivi de terrain. Par ailleurs, l'engrèvement de la plage de la jetée Ouest serait le résultat de l'accumulation des sédiments provenant de la Moulouya et qui sont redistribués par le transit littoral dominant de l'Ouest.

Évolution globale du trait de côte de 1958 à 2006

L'examen de l'évolution du trait de côte entre 1958 et 2006 montre que l'embouchure de la Moulouya a connu une variation morphologique assez remarquable. Au niveau de la rive droite le recul de la ligne de rivage a été supérieur à 400 m, atteignant un pic de 480 m au niveau du transect 70 (Fig. 5, D). De telles valeurs se traduisent par des vitesses d'érosion extrêmement élevées allant d'environ 9 à 10 m/an. La rive gauche a été globalement marquée par une légère progradation et par l'édification d'une flèche sableuse parallèlement au trait de côte caractérisant les embouchures fluviales dominé par la vague.

Au niveau de la zone centrale de la plaine côtière de Saïdia, une avancée de la ligne de rivage de 0,34 à 2,52 m/an a été observée ; cette accrétion était importante entre les années 1963 et 1988. La représentation graphique

des variations spatiales de la position du trait de côte montre que la quantité du sédiment qui a alimenté la zone médiane de la plaine côtière aurait une double origine, le transfert des sédiments arrachés à la rive droite de la Moulouya et les apports de ce dernier (Fig. 5).

À l'extrémité orientale, au niveau de la plage de Saïdia l'érosion est moins spectaculaire puisque la moyenne du recul du trait de côte est de l'ordre de 0,62 m/an ; l'évolution de cette partie de la zone côtière est relativement stable.

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Deux travaux récents ont traité la problématique de l'évolution du littoral de Saïdia par photo-interprétation ; il s'agit de ceux de Bouabdallah & Larue (2009) et de Salmon *et al.* (2010). Les recherches des deux premiers auteurs sont basées leur sur une série de photographies aériennes arrêtée en 2004 sans inclure celles de 1963. Or, cette période a connu des événements hydrologiques catastrophiques ayant marquée une période importante de l'évolution de littoral de Saïdia.

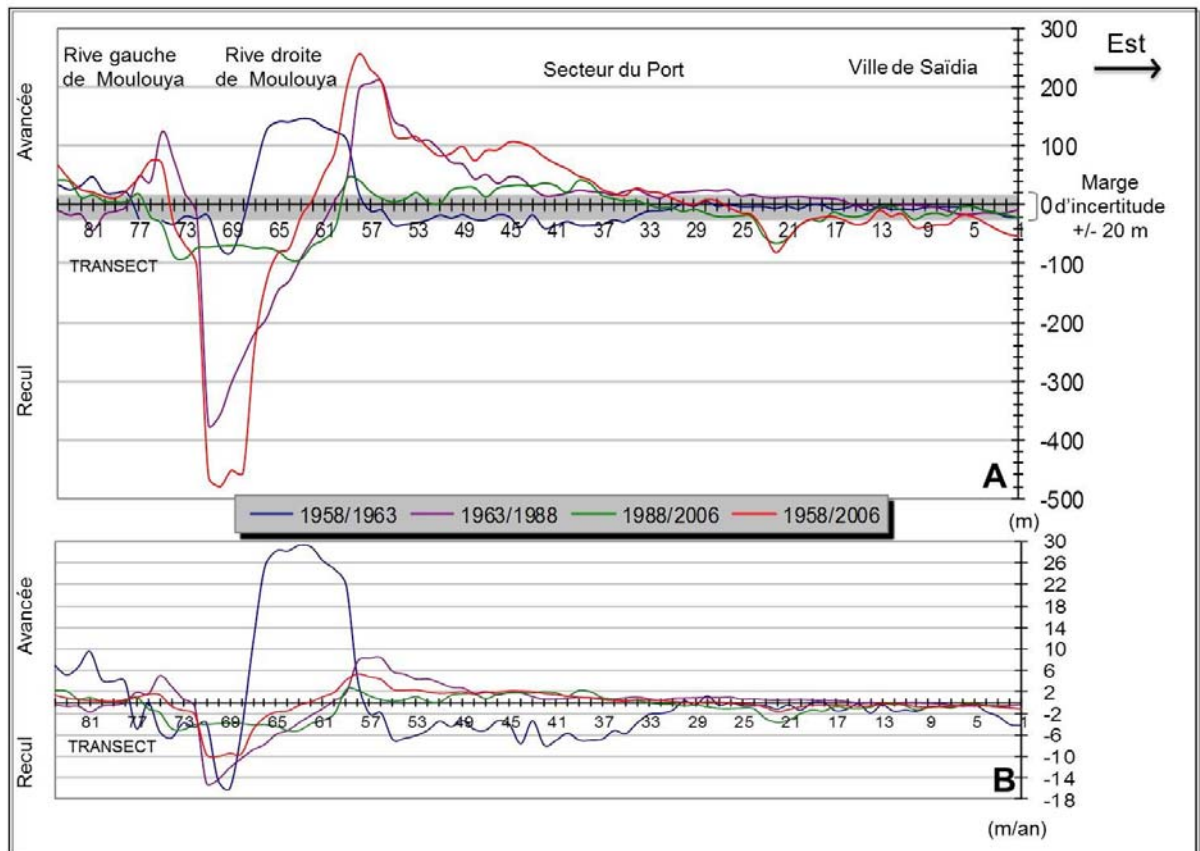
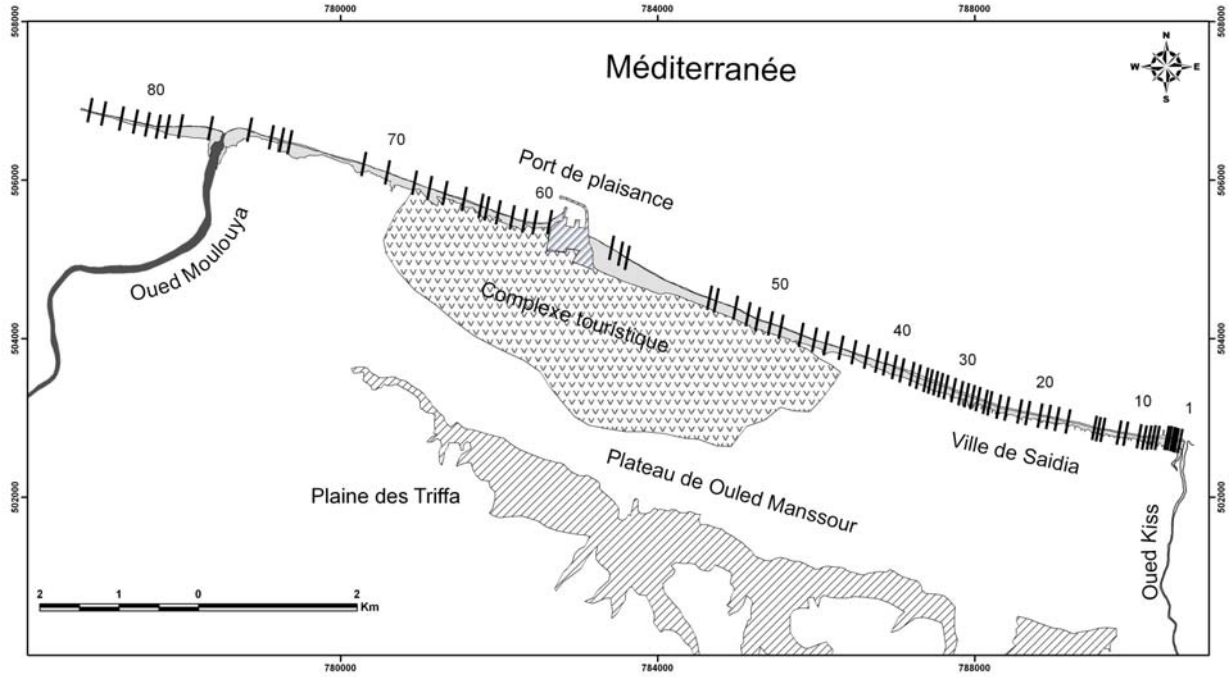


Figure 5. A) Évolution de la position du trait de côte dans la baie de Saïdia entre 1958 et 2006 ; B) Vitesses annuelles de l'évolution du trait de côte pour les périodes 1958-1963, 1963-1988, 1988-2006 et 1958-2006.

Figure 5. A) Coastline evolution in the Bay of Saïdia between 1958 and 2006 ; B) Annual velocities of the changing coastline for the periods 1958-1963; 1963-1988; 1988-2006 and 1958-2006.

De leur côté, Salmon *et al* (2010) ont étudié la même problématique que celle du présent article. Toutefois, la méthodologie de traitement des données disponibles est assez différente ; la démarche adoptée a porté sur l'analyse de l'évolution de l'embouchure de la Moulouya et de la plage à partir d'une interprétation visuelle de données de télédétection. En revanche, le présent article traite la cinématique du trait de côte en se basant sur le traitement par photo-interprétation numérisée d'une série de photographies aériennes dont les clichés ont été corrigés, géoréférencés, et assemblés. Ceci a permis de créer une mosaïque couvrant toute la zone d'étude pour l'ensemble des missions traitées, en tenant compte de la marge d'erreur engendrée par la correction des photographies aérienne. Certes, l'analyse diachronique de photographies aériennes verticales et de cartes topographiques est très utile pour préciser la cinématique des littoraux sableux à l'échelle mi-séculaire. Selon Durand (1998), cette méthode reste délicate à réaliser car de nombreuses erreurs sont possibles lors de la comparaison des photographies aériennes. Il est donc nécessaire d'estimer ces risques d'erreur et de déterminer une marge d'erreur qu'il ne faut pas négliger. Une telle démarche est en effet indispensable pour conduire l'interprétation des résultats. Dans l'étude de Salmon *et al.* (2010), l'assemblage des clichés n'a pas été réalisé pour les différentes missions sur toute la zone d'étude et la marge d'erreur n'a pas été prise en considération.

De plus, le travail de Salmon *et al.* (2010) a porté sur le traitement des différentes missions par secteur, alors que dans la présente recherche, les mesures de l'évolution de la position du trait de côte ont été effectuées au niveau de 84 transects couvrant toute la zone d'étude avec des mesures précises, permettant la comparaison de la position du trait de côte d'un document à l'autre. Ceci a permis de calculer et d'évaluer la cinématique du trait de côte avec précision au niveau de petites parcelles le long de la zone d'étude et entre les différentes missions traitées. La mission photographique du 8 mars 2006 avec 9 bandes et environ 100 clichés a nécessité un travail rigoureux pour créer une mosaïque couvrant toute la zone d'étude. Avec sa résolution de 1 m elle fournit des informations précises grâce à une erreur minime.

Évolution du trait de côte de 1958 à 1963

L'analyse de la cinématique du trait de côte de la plaine côtière de Saïdia entre les années 1958 et 1963, a révélé un changement morphologique notable. Une érosion quasi générale a affecté cette plaine, d'une manière assez marquée au niveau de l'embouchure de la Moulouya. Signalons, cependant, qu'une progradation est observée dans la partie centrale de la plaine.

Cette évolution de la plaine côtière de Saïdia serait le résultat de l'action combinée des facteurs géologiques liés au contexte géodynamique de ce bassin, des processus climatiques caractérisés par des périodes de sécheresse saccadée, intermittentes avec des périodes de crues parfois catastrophiques, et des facteurs hydrodynamiques locaux, en particulier les vagues de tempête d'Est assez violentes.

Le fait marquant durant cet intervalle est le changement spectaculaire de la morphologie de l'embouchure de la Moulouya résultant essentiellement des facteurs hydrologiques. En effet, l'année 1963 a été caractérisée par une forte crue, attestée par la largeur du cours d'eau à cette époque. Les débits de l'oued enregistrés au mois de mai de cette année sont de 7400 m³/s, les apports solides ont été estimés à 160.10⁶ tonnes (Heusch 1982). Ce flux d'eau chargé de sédiments a tronqué la plage à l'Ouest de l'embouchure en creusant un deuxième chenal orienté N-S (Fig. 4,A). Les deux rives de l'ancienne embouchure ont été le siège d'une érosion qui dépasse parfois 4 m/an, résultant des processus hydrodynamiques dominés par la houle.

Le secteur situé sur la rive gauche de l'oued Kiss est caractérisé par une érosion disparate ; sa partie ouest a connu un retrait de la ligne de rivage dont la vitesse peut atteindre 7 m/an, alors que celle de la partie Est du même secteur n'est que de 0,72 m/an. Cette évolution résulterait de la complexité du processus hydrodynamique au niveau de cette zone. L'érosion globale est générée par les vagues de tempête qu'a connue l'année 1963 ; cette érosion est atténuée dans la partie Est par l'accumulation progressive du transfert littoral de l'Est de l'oued Kiss encore actif à cette période.

Néanmoins, la zone centrale de la plaine côtière est le siège d'une accrétion notable de l'ordre de 20 m/an du fait que cette zone est alimentée par un double apport : les sédiments érodés de la rive droite de l'oued Moulouya et les apports de ce dernier. Ces sédiments sont redistribués par la dérive littorale prépondérante de direction Ouest-Est au niveau de la plaine de Saïdia. Ceci est attesté, d'ailleurs, par le développement des flèches sableuses sur la rive gauche de la Moulouya et celle de Kiss et la dissymétrie de leurs deux rives (Irzi 2002, Boumeaza 2002).

Évolution du trait de côte de 1963 à 1988

Bien que l'embouchure de la Moulouya ait connu une légère progradation vers le large entre 1963 et 1988 qui pourrait être attribuée aux apports des crues de 1967, 1968 et 1976, sa rive droite présente globalement un schéma érosif plus agressif que durant la période précédente, avec des rythmes de recul atteignant parfois 15 m/an. Cette évolution serait la conséquence, d'une part, d'une diminution considérable du débit et des apports sédimentaires de l'oued Moulouya par rapport à la période précédente, résultant des effets des sécheresses ayant sévi dans l'Orient du Maroc depuis 1977, et d'autre part, de l'édification des barrages Mohammed V et Mechraa Hammadi qui retiennent une partie non négligeables de sédiments. En effet, le barrage Mohammed V est le réceptacle d'un bassin d'une superficie de 52000 km², soit environ 90 % de l'ensemble du bassin de la Moulouya. Les apports du réseau à ce niveau sont de 26,5 m³/s, correspondant à un apport moyen annuel de 850 Mm³/an, représentant 72 % du débit total de la Moulouya. En aval du barrage Mechraa Hammadi, le cours central est essentiellement alimenté par les apports des résurgences situées au niveau des gorges. Ces apports, estimés de plus de 3 à 5 m³/s, constituent la majeure partie du débit

pendant les étiages. En effet, la capacité de cette retenue était de 750106 m³/an en 1963 ; elle est passée à 331106 m³/an en 2002, soit seulement 44,1 % de sa capacité initiale. Snoussi *et al.* (2002) ont noté que l'efficacité de piège du barrage de Mohammed V est de 93 %. Par conséquent, la partie inférieure de la Moulouya présente un déficit de 72 % du flux d'eau et 93 % du flux de sédiments suite à l'édification de ces deux barrages. En conclusion, ces données prouvent bien que ces interventions anthropiques au niveau de l'arrière-pays de la plaine côtière de Saïdia influent fortement l'évolution de son littoral.

D'autre part, des secteurs en progradation ont été identifiés entre les transects 60 et 14, où elle atteint des vitesses de 8 m/an. Cet engraissement serait le résultat du transit littoral de l'Ouest qui redistribue et redépose une quantité non négligeable des sédiments érodés à la rive droite de la Moulouya.

Durant cette période, les apports de sédiments par la Moulouya et ceux du bas de plage formant les barres pré-littorales sont mobilisés et redistribués parallèlement au rivage par la houle, processus dominant le long de ce littoral. Par conséquent, les deux rives de l'embouchure de la Moulouya acquièrent une morphologie de plus en plus symétrique suite à une tendance à l'équilibre entre les apports continentaux et les processus hydrodynamiques locaux (vague, marée, courants associés, etc.).

Plus à l'Est, la plage de Saïdia, présente un littoral relativement stable avec un équilibre entre les apports sédimentaires et leur redistribution le long du rivage. En effet, le transport longitudinal procure une forme plus rectiligne à ce secteur de la baie.

Évolution du trait de côte de 1988 à 2006

Entre 1988 et 2006, les variations du rivage sont peu significatives par rapport aux périodes précédentes. La plage de la rive droite de la Moulouya montre un retrait du trait de côte moins important alors que l'embouchure manifeste globalement un léger recul. Cette époque est marquée par le rôle dominant des processus hydrodynamiques marins d'une côte dominée par la vague, et où le flux des sédiments de la Moulouya est ralenti à cause des retenues des apports sédimentaires dans les barrages Mechraa Hammadi et Mohammed V, dans un contexte où la sécheresse sévit dans la région.

Cette période est également caractérisée par l'implantation du port de plaisance en 1997, à 4 km de l'embouchure de la Moulouya, comportant une jetée principale de 400 m par rapport au rivage avec une passe d'entrée orienté vers l'Ouest. Cet ouvrage a engendré des modifications notables dans la morphologie de la plage de Saïdia et des dysfonctionnements dans la répartition des sédiments. Le transit sédimentaire dominant vers l'Est a été freiné contre la jetée Ouest où s'est accumulé un stock sédimentaire important. Néanmoins, une autre progradation est enregistrée contre la jetée Est du port. Cette dernière ne serait que le résultat des flux sédimentaires arrachés aux

barres pré-littorales sableuses situées au niveau du bas de plage par les houles NE-SW assez fréquentes. Par ailleurs, la photo-interprétation et les observations sur le terrain montrent que ces barres pré-littorales ont connu un fort démaigrissement manifesté par un amincissement très bien visible sur les photos aériennes à l'Est du site portuaire.

Le port de Saïdia a connu d'importants ensablements au niveau de son ouverture orientée vers l'Ouest juste après l'achèvement des travaux. Récemment, en 2008, ce port a été le siège d'une importante extension vers le large avec un changement de l'ouverture vers l'Est pour protéger l'ancienne entrée vis-à-vis de l'importante dérive sédimentaire.

Quant à la plage située entre la jetée Est et l'oued Kiss, elle est menacée par un fort recul de la zone d'estran d'une moyenne de 1 m/an. Actuellement, cette plage est le siège d'une érosion assez importante générée par les différentes interventions de l'aménagement de Saïdia depuis 2007, en particulier la destruction de la junipéraie et la dévastation totale du cordon dunaire pour dégager la vue sur la mer. La déflation actuelle du sable de la plage de Saïdia, observée sur les ouvrages et la rocade témoigne d'une importante forme d'érosion de l'estran. Ces interventions risquent d'être à l'origine d'un important déficit sédimentaire à court terme.

Actuellement, une sur-fréquentation des plages en période estivale et le piétinement répété par les touristes sont remarqués. Ces comportements incontrôlés engendrent la dégradation et le dysfonctionnement de cet écosystème comportant la zone humide déjà menacée par les facteurs naturels (aridité du climat, élévation du niveau marin, etc.).

CONCLUSION

L'étude de la plaine côtière de Saïdia, à l'aide de la photo-interprétation, des observations de terrain et de l'analyse des corps sédimentaires, a permis la compréhension de l'évolution et du fonctionnement de cette zone côtière dont la genèse remonte à la transgression flandrienne il y a 6000 ans. Elle a permis également de détecter et d'interpréter les événements ayant généré les modifications morphologiques des différents écosystèmes côtiers et de mettre en évidence les impacts des changements naturels et ceux provoqués dans cette zone.

Ainsi, ce littoral peut être subdivisé en trois secteurs ayant chacun une évolution particulière marquée par l'influence à la fois des facteurs anthropiques et des processus généraux et locaux, marins et continentaux : un secteur en érosion à l'Ouest ; un secteur en accrétion au centre, et un secteur oriental caractérisé par une zone en cours de régression (Fig. 6). Ce bilan sédimentaire est sous l'influence d'un régime hydrodynamique marqué par une dominance de la houle dans une baie où le marnage est de type microtidal. De tels processus lui confèrent une tendance à une morphologie de plus en plus rectiligne.

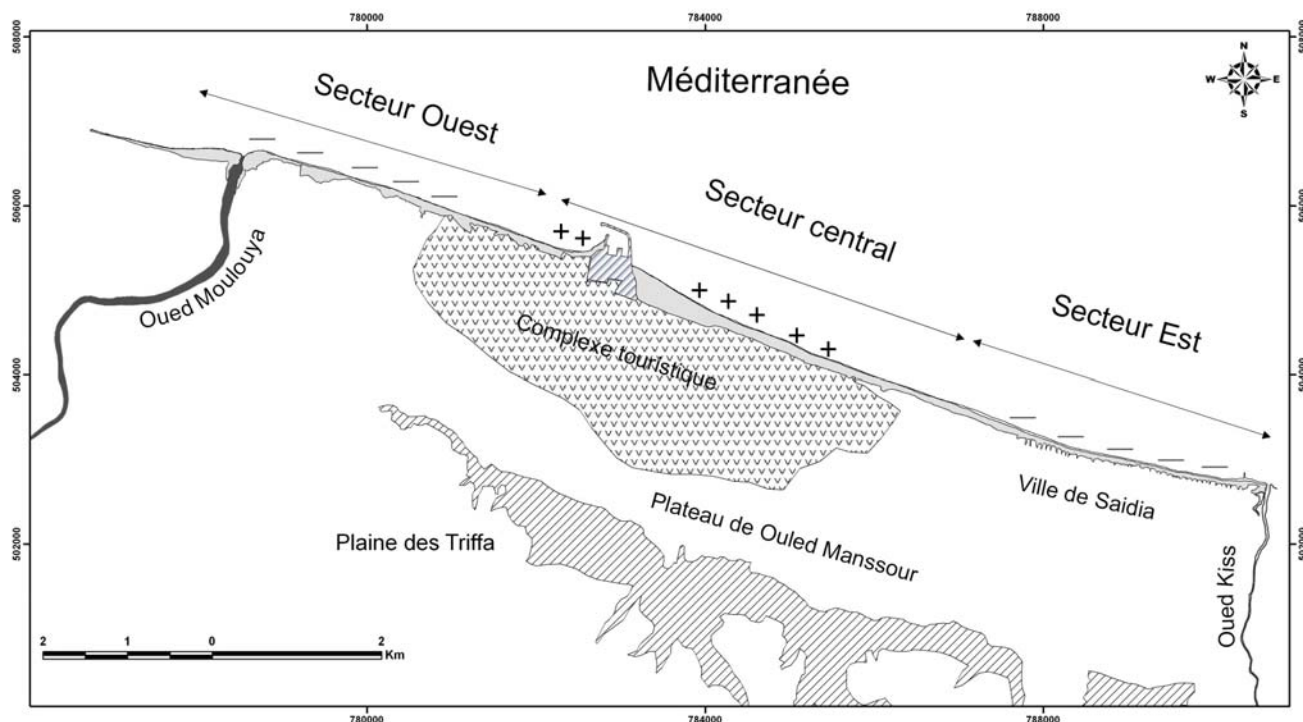


Figure 6. Tendances actuelles de l'évolution du littoral durant la période 1958-2010.
 Figure 6. Current trends of coastal change during the period 1958-2010.

L'érosion du secteur ouest est le résultat d'une diminution des apports de la Moulouya suite à l'édification de deux barrages le long de cet oued, dans un contexte régional marqué par une aridité structurelle.

La mise en place du port de Saïdia et l'exploitation anarchique des sables des dunes bordières ont induit un net recul du trait de côte dans le secteur Est et un fort démaigrissement des barres pré-littorales à l'Est du port.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le projet bilatéral maroco-tunisien (CMPMT) référencé sous le numéro 89/MT/06 et le programme de la Commission Universitaire pour le Développement belge CUI Oujda P3, Activité Eau et Environnement Sous ACT Littoral. Au terme de ce travail, nous remercions pour leur soutien, les Professeurs M. BOUABDELLAH, A. CHAFI, A. ESSADEK de l'université Mohammed Premier, et C. YAICH de l'ENIS de Sfax en Tunisie pour leur soutien à la présente recherche. Nous remercions également les deux évaluateurs de cet article Pr. EMRAN (Institut Scientifique) et un évaluateur anonyme pour leurs remarques pertinentes.

Références

Aernouts D. & Héquette A. 2006. Évolution du rivage et des petits-fonds en baie de Wissant pendant le XXème siècle (Pas-de-Calais, France). *Géomorphol. : Relief, Proces., Environ.*, 1, 49-64.
 Barathon J.J. 1989. *Bassins et littoraux du Rif Oriental (Maroc). Evolution morphoclimatique et tectonique depuis le Néogène supérieur*. Fascicule 13, Centre Inter-universitaire d'Etudes Méditerranéenne, Univ. Poitiers, 531 p.

Bouabdallah M. & Larue J.P. 2009. Évolution du littoral de la baie de Saïdia : dynamique naturelle et impact des aménagements (Maroc oriental). *Physio-Géo.*, 3, 113-130.
 Boumeaza T. 1998. Morphologie et évolution du delta et du littoral de la basse Moulouya, Maroc nord-oriental : apport des images aéroportées et satellitaires. *Géo-observateur*, 8, 65-77.
 Boumeaza T. 2002. *Le cours inférieure de la Moulouya : morphologie quaternaire, dynamique fluviale et morphologie côtière du littoral entre Kebdana et Saïdia (Maroc Oriental, Maroc)*. Thèse, Univ. de Liège, 340 p.
 Crowell M., Leatherman, S-P. & Buckley M-K. 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *J. Coastal Res.*, 7, 3, 839-852.
 Douglas B-C. & Crowell M. 2000. Long-term shoreline position prediction and error progradation. *J. Coastal Res.*, 16, 1, 145-162.
 Durand P. 1998. Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès-Plage à Saint-Cyprien (Roussillon, France). *Géomorphol. : Relief, Proces., Environ.*, 4, 2, 155-166.
 Durand P. 2000. Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. Exemple des plages situées entre les embouchures de l'Aude et de l'Hérault (Languedoc, France). *Photo-Interprét.*, 1, 2, 3-17.
 Faye I., Gourmelon, F. & Diaw, A-T. 2008. Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. *Noroi*, 208, 11-27.
 Gigout M., Mourtier F. & Raynal R. 1957. Sur le Quaternaire récent dans la région de la basse Moulouya, coupe-type du quaternaire récent marocain. *C.R., somm. séances Soc. géol. Fr.*, 6, 101-103.
 Halouani N., Sbatier F., Gueddari M. & Fleury J. 2007. Évolution du trait de côte de Tabarka-Buterfess, Nord-Ouest de la Tunisie. *Méditerr.*, 108, 131-137.

- Heusch, B. 1982. Érosion et transport solide dans les zones semi-arides du Maghreb. Analyse bibliographique, Pr. RAB/80/011/PNUD, 83 p.
- Irzi Z. 2002. *Les environnements du littoral méditerranéen du Maroc compris entre l'oued Kiss et le Cap des Trois Fourches: dynamique sédimentaire et évolution et écologie des Foraminifères benthiques de la lagune de Nador*. Thèse, Univ. Mohammed I, Fac. Sci. Oujda, 291 p.
- Jimenez J-A., Bou J., Ortiz M-A. & Sanchez-Arcilla, A. 1997. Analysing Short-Term Shoreline Changes along the Ebro Delta (Spain) Using Aerial Photographs. *J. Coastal Res.*, 13, 4, 1256-1266.
- Laaouina A. 1990. *Le Maroc nord oriental : reliefs, modelés et dynamique du calcaire*. Pub. Rec. Univ., Oujda, 1, 605 p.
- Lafont L. & Suanez S. 2005. Le SIG comme outil d'aide à la comparaison des plages artificielles méditerranéennes. In : Gourmelon, F. & Robin, M. (éd.). *Traité IGAT : SIG et littoral*. Éd. Hermès, Paris, pp 146-164.
- Niazi S. 2007. *Évaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation*. Thèse Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 232 p.
- Paxion K. & Cohen O. 2002. La baie de Wissant : cent ans d'évolution du rivage. *Mappemonde*, 67, 3, 24-27.
- Perillo G-M-E. 1995. Définitions and géomorphologic classifications of estuaries. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*, 53, 17-47.
- Rampnoux J.P., Angelier J., Colletta B., Fudral S., Guillemin M., & Pierre G. 1997. Sur l'évolution néotectonique du Maroc septentrional. *Géol. médit.*, VI, 4, 439-464.
- Raynal R. 1961. *Plaines et piémonts du bassin de la Moulouya (Maroc oriental) : Étude géomorphologique*. Thèse Univ. Mohammed V., Fac. Lettres, Rabat, 617 p.
- Robin M. 2002. Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In : Baron-Yelles N., Goeldner-Gionella L. & Velut S. (eds) - *Le littoral ; regards, pratiques et savoirs*. Éd. Rue d'Ulm, Presse. univ. École Norm. Sup., Paris, pp. 95-115.
- Salmon M., Sbaï A., Boumeaza T. Benata M. & Ozer A. 2010. L'érosion des côtes meubles de l'extrême nord-est du Maroc. *Revue BSGLG*, Liège, 54, 97-106.
- Sbai A., Bai A., Moussaoui, F. & Oualit, N. 1992. Les régimes des vents au Maroc Oriental. *Méditerr.*, 3-4, 45-52.
- Sedrati M. & Anthony E. 2007. A brief overview of plan-shape disequilibrium in embayed beaches: Tangier Bay (Morocco). *Méditerr.*, 108, 125-130.
- Smith G-L. & Zarillo G-A. 1989. Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photography and beach profiling techniques. *J. Coastal Res.*, 6, 1, 111-120.
- Snoussi M., Haida S. & Imassi S. 2002. Effects of the construction of dams on the Moulouya and the Sebou rivers (Morocco). *Region. Environ. Change*, 3, 5-12.
- Snoussi M., Ouchani T. & Niazi, S. 2008. Vulnerability assessment of the impact of sealevel rise and flooding on the Moroccan coast: The case of the Mediterranean eastern zone. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 77, 206-213.
- Suanez S. & Simon B. 1997. Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral du delta du Rhône (France, Sud-Est). *Photo-Interprét.*, 35, 3-4, 147-158.
- Tesson M. & Genssous B. 1979. Les sédiments superficiels du plateau continental du Rif Oriental. *Mines, Géol. Energ.*, 46, 117-125.
- Thieler E-R. & Danforth W-W. 1994. Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. *J. Coastal Res.*, 10, 3, 549-563.
- Zarki H. 1999. *Evolution de la sédimentation fluviale en basse Moulouya (Maroc) au cours de l'Holocène*. Thèse Univ., Fès, 370 p.
- Zourarah B. 1995. *La zone littorale de la Moulouya (Maroc Nord-Oriental). Transits sédimentaires, évolution morphologique, géochimie et état de la pollution*. Thèse Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 197 p.

Manuscrit reçu le 22 février 2011

Version modifiée acceptée le 24 décembre 2011