

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER).

Makhlouf BOUTIBA*, Naïma ZAOURAR, Mohamed Saïd GUETTOUCHE*
et Louis BRIQUEU*****

RESUME

Les variations de la ligne de rivage à toutes les échelles comportent des informations fondamentales sur la dynamique du système côtier et son évolution morphologique. Nous avons étudié l'évolution de la ligne de rivage de la côte algéroise sur une longueur de 60 km, allant de l'embouchure de l'oued Réghaïa à l'est, à l'embouchure de l'oued Mazafran à l'ouest. Les variations de la ligne de rivage le long de cette portion côtière ont été obtenues à partir de photographies aériennes orthorectifiées et géo-référencées prises entre 1959 à 2003. Les fluctuations du taux net de variation sont évaluées durant les périodes 1959-1999 pour les lignes de la côte ouest et de la Baie d'Alger, et 1959-2003 pour la côte est. L'analyse spectrale par Transformée de Fourier des fluctuations du taux net de variation pour les trois lignes de rivage, montre un comportement en loi d'échelle, caractéristique des signaux stochastiques non stationnaires auto affines. Cette observation nous a conduit à utiliser une Transformée en Ondelettes Continue comme outil d'analyse des fluctuations des lignes de côte le mieux adapté pour quantifier l'existence de corrélations à longue portée associées aux propriétés d'invariance d'échelle que présentent ces signaux. En effet, les exposants de la loi d'échelle estimés par Transformée en Ondelettes Continue pour chacune des trois lignes de rivage qui font l'objet de l'étude varient localement dans l'intervalle $[1,23, 1,80]$, confirmant ainsi les propriétés d'auto-affinité associées aux corrélations à longue portée de ces fluctuations. L'observation des propriétés d'auto-affinité suggère fortement que ces corrélations sont liées aux phénomènes d'érosion- accréation de l'évolution du trait de côte, en relation avec le processus de réplication du transport des sédiments par un modèle stochastique de diffusion. Dans ce contexte, le point d'intérêt de notre démarche est d'apporter des éléments prédictifs de l'évolution morphologique de cette côte à l'échelle décennale pour une meilleure gestion et prévision des risques littoraux.

Mots clés - Photographie aérienne - Orthorectification - Ligne de rivage - Fractal - Exposant d'échelle.

* Laboratoire de Géomorphologie FSTGAT-USTHB mboutiba61@yahoo.fr; msguettouche61@yahoo.fr

** Laboratoire de Géophysique FSTGAT-USTHB naimazaourar@yahoo.fr

*** Laboratoire Géosciences Université Montpellier II-CNRS louis.briqueu@gm.univ-montp2.fr

- Manuscrit déposé le 05 Avril 2005, accepté après révision le 03 Juin 2008.

WAVELET ANALYSIS OF THE HISTORICAL SHORELINE CHANGES BETWEEN THE RIVERS MOUTHS OF REGHAÏA AND MAZAFRAN (WILAYA OF ALGIERS).

ABSTRACT

The variations of shoreline position include, in all scales, fundamental information on the dynamic of the coastline system and its morphological evolution. In this study, we examine the modifications of Algiers coast shoreline that spread on a length of 60 km going from the river mouth of Reghaïa in the East to the river mouth of Mazafran in the West. The variation of shoreline along this coastline portion were obtained from aerial, orthorectified and geo-referenced photographs, covering the time period from 1959 to 2003. This study revealed that the shoreline of the Wilaya of Algiers underwent generalized and moderate erosion. The obtained values of the shoreline change are -0.036 m/year for the Algiers bay coast, -0.199 m/year for the coast situated between Ras Acrata and the river mouth of Mazafran and -0.43 m/year for the sector localized between Cape Matifou and the river mouth of Reghaïa. Spectral analysis using Fourier transform of shoreline fluctuations for the three coastline sectors displays a scaling behaviour and reveals the self affinity character of the data set. This self-affinity behavior indicates that the shoreline change signal is nonstationary. This observation led us to use the continuous wavelets transform as tools of analysis of the shoreline change signal. Indeed, this tool is the most adapted to quantify the existence of any long-range correlation associated to the properties of scale invariance present in this signal. The scale law exponents evaluated by the continuous wavelet transform for each of the three shorelines vary from 1.35 to 2.27. These results confirm the properties of self-affinity associated to the long-range correlations of shoreline fluctuations. The observation of the self-affinity properties suggests strongly that those correlations are associated to the phenomena of erosion - accretion of the shoreline evolution. A stochastic diffusion model of sediment transport replicates the observed self-affinity behavior observed along the Wilaya of Algiers shoreline changes. In this context, the goal of our approach is to bring susceptible elements of answer to predict the evolution of the morphological aspects of this coast on a decennial time scale for a better management and forecasting of the coastline risks.

Keywords - Aerial photographs - Orthorectification - Shoreline - Fractal - Scale exponent.

ANALYSE PAR ONDETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAÏA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

INTRODUCTION

Divers processus physiques (chutes de pluies, débit des rivières...) recouvrant de multiples domaines d'application présentent des comportements en loi d'échelle (Hurst et al., (1965; Mandelbrot et Ness, 1968; Mandelbrot, 1983). Au vu de ces travaux, ces comportements appelés processus en « $1/k^\beta$ », sont considérés comme une manifestation plus ou moins universelle de la variabilité des signaux à structures complexes. Ces signaux montrent un comportement en loi d'échelle, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent aucune échelle caractéristique, mais qu'ils présentent, au contraire, des détails à toutes les échelles. Les principales caractéristiques de ces signaux sont de ce fait liées à des concepts tels que : fractalité, auto-affinité ou dépendance à longue portée. Le processus géologique qui aboutit à la morphologie d'une côte comprend des aspects aléatoires (Tebbens et al., 2002), c'est à dire non contrôlés par des processus

entièrement déterministes. En cela, les lignes de côte sont un des archétypes le plus souvent évoqué pour illustrer la notion de fractales.

La côte algéroise qui s'étend sur 60 km entre l'embouchure de l'oued Réghaïa à l'est et celle de l'oued Mazafran à l'ouest (fig. 1) est une unité morphologique remarquable. Elle est formée d'une succession de plages sableuses, interrompues dans sa partie centrale par la côte rocheuse qui s'étend de l'Amirauté du port d'Alger jusqu'à Ras Acrata (Aïn Benian). Durant ces dernières décennies, cette côte a connu d'importantes variations de la ligne de rivage, mettant en péril son potentiel touristique. Ainsi, sur bon nombre de plages, le recul de la ligne de rivage s'est beaucoup accentué au cours de ces dernières années. Ce recul est lié aux effets cumulés des tempêtes, particulièrement quand ils se combinent à des interventions humaines incontrôlées.

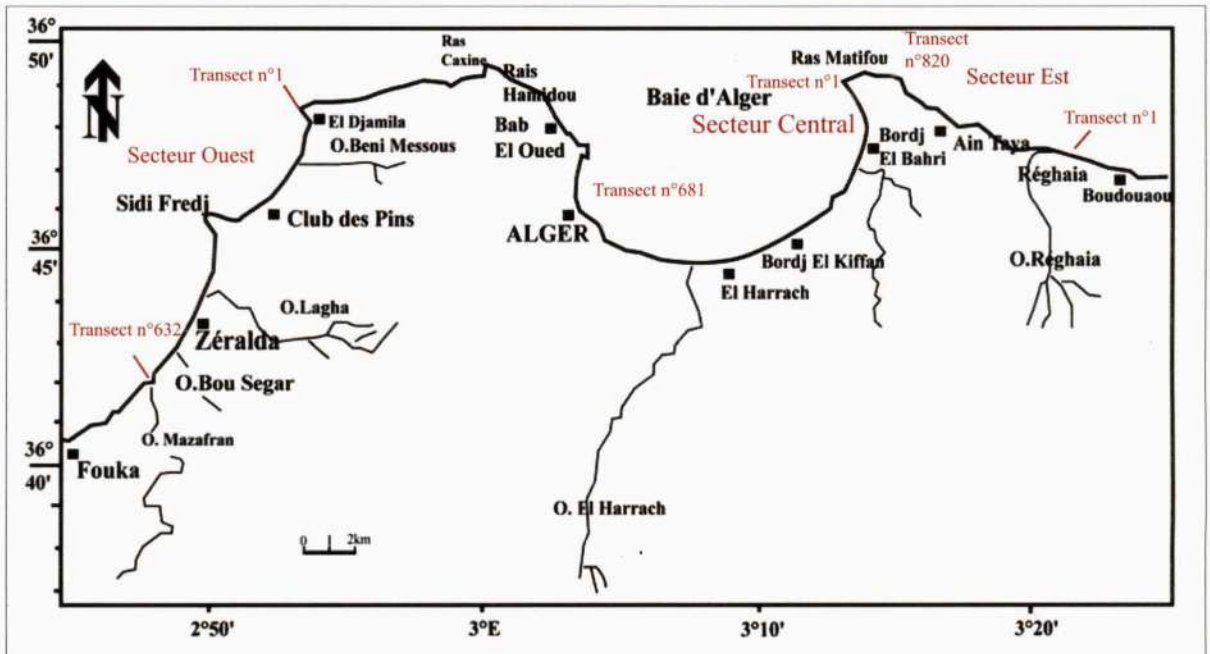


Fig. 1 - Localisation des trois zones d'étude est, centre et ouest le long du littoral algérois.

Map showing the location of the study eastern, center and western areas along the Algiers coast.

La modélisation des fluctuations des lignes de rivage par des processus stochastiques auto-affines ouvrent de nombreuses perspectives, complémentaires aux modélisations déterministes de l'évolution morphologique des littoraux sableux. Dans l'espace des fréquences, nous montrons que la densité spectrale des séries spatio-temporelles résultant de l'observation du trait de côte suit une loi d'échelle « $1/k^\beta$ », caractéristique des signaux stochastiques non stationnaires auto-affines. La variabilité ou l'irrégularité exprimée par ces fluctuations, présente des corrélations positives (mouvement persistant) ou négatives (mouvement anti-persistant) entre les données successives. Pour répondre à l'enjeu d'une identification objective de la nature des corrélations que présentent la variabilité d'une ligne de rivage, nous proposons un algorithme d'analyse des signaux stochastiques (Zaourar *et al.*, 2006) qui tire partie des propriétés de deux techniques puissantes de détection : une analyse locale par Transformée en Ondelettes Continue combinée à l'utilisation des propriétés multiéchelles des signaux. La méthode permet alors de quantifier statistiquement les fluctuations de régularité des signaux par le calcul de l'exposant spectral de la loi d'échelle qui caractérise les propriétés statistiques de corrélation du processus sans aucun *a priori* quant à la structure du signal. Le but de notre démarche consiste donc à décrire quantitativement les différentes formes d'expression de la variabilité obtenue à partir des fluctuations du taux net d'évolution de la ligne de rivage qui sont des éléments importants dans la compréhension et la modélisation de la variation du trait de côte.

1. ACQUISITION ET PRETRAITEMENT DES DONNEES

L'analyse des variations historiques du trait de côte du littoral algérois à partir de photographies aériennes non corrigées, peut être entachée de beaucoup d'erreurs du fait de l'inexacti-

tude géographique de ces photographies. En effet, pour un même secteur photographié, les éléments formant le relief sont restitués à des échelles différentes. C'est pour cette raison que la photographie aérienne doit être corrigée pour avoir la même échelle sur toute son étendue.

Nous avons réalisé le scannage des photographies aériennes en format image-Tif avec une résolution de 1200 DPI afin de conserver la qualité des photographies et d'obtenir une précision métrique du travail (Kraus et Waldhölzl, 1998; Nebiker *et al.*, 2000). Afin de corriger les déformations liées à la prise de vue optiques et celles engendrées par les mouvements de l'avion (Dolan *et al.*, 1980; Anders et Byrnes, 1991; Crowell *et al.*, 1991; Moore, 2000), ces photographies sont rectifiées à l'aide du logiciel SIG (Système d'Information Géographique) : ERDAS Imagine®. Nous avons placé au moins 6 points de contrôle bien espacés sur chaque photographie aérienne sélectionnée. L'erreur quadratique moyenne est maintenue à moins d'un pixel, qui est approximativement égale à 1.5 m à une échelle de 1:10.000 et approximativement à 4m à une échelle de 1:20.000. Nous avons finalement appliqué le logiciel MapInfo® sur les photographies aériennes géo-référencées afin de digitaliser la ligne de rivage. La nuance radiométrique associée à la partie sèche et la partie humide de la plage est définie sur l'ensemble des photographies. La ligne de rivage correspond donc à l'interface des pixels blancs (sable sec) et des pixels sombres (sable mouillé). Tous les fichiers vecteurs de la ligne de rivage sont convertis au même système de projection Universal Transverses Mercator (UTM), WGS 84, fuseau 31. Par la suite, nous avons calculé le taux d'évolution entre deux missions aériennes (érosion ou accrétion), ainsi que le taux net sur la totalité de la période couverte par les photographies aériennes (tabl. I).

Le taux net a été calculé selon la méthode dite « Endpoint method » proposée par Fenster

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

et Dolan (1994). Cette méthode consiste à calculer la différence nette entre deux positions de la ligne de rivage et diviser par l'intervalle de temps qui sépare les dates des deux lignes de rivage. Les résultats des taux nets globaux sont représentés par zone géographique par les figures n° : 2, 3 et 4, et pour chacune de ces zones, nous avons analysé les taux par intervalle de temps (tabl. II). Compte tenu de la marge d'erreur admise lors de la manipulation des photographies aériennes estimée à ± 5 mètres et compte tenu de la durée d'observation de 44 années en moyenne. Les valeurs du taux net de la variation de la ligne de rivage inférieures à 0,113 mètres par an restent incertaines.

2. ANALYSE DES VARIATIONS HISTORIQUES DES TAUX NETS DU TRAIT DE COTE DU LITTORAL ALGEROIS

La variation de la position de la ligne de rivage dépend de plusieurs facteurs, tel que les houles, les régimes de courants, les variations eustatiques du niveau de la mer, la fréquence des tempêtes, le bilan des apports sédimentaires et les activités humaines (Boutiba, 2006). Dans ce qui suit, nous présentons les résultats et les discussions de l'analyse diachronique à différents pas de temps des variations historiques de la ligne de rivage le long de la côte sableuse (orientale,

Tableau I - Nombre de photographies aériennes scannées par mission entre 1959 et 2003
Number of aerial photographs covering the time period from 1959 to 2003

Année de la mission	Echelle de la photographie	Nombre de photographies scannées
1959	1 :25.000è	62
1972	1 :20.000è	56
1973	1 :20.000è	09
Juillet 1980	1 :10.000è	09
Août 1980	1 :10.000è	49
Octobre 1980	1 :10.000è	117
1984(orthophotos)	1 :5000è	20
1999	1 :20.000è	56
2003	1/10.000è	72

Tableau II - Variations du taux net et des exposants spectraux moyens $\beta(z)$ de la côte est
Variation of shoreline positions and average spectral exponent $\beta(z)$ along the east coast

Périodes	1959 - 1972	1972 - 1980	1980 - 1984	1984 - 2003	1959 - 2003
Taux net	-7,89	5,86	-7,27	-7,46	-0,43
$\beta(z)$	1,78 \pm 0,57	0,4 \pm 0,30	1,68 \pm 0,50	1,69 \pm 0,56	1,80 \pm 0,58

centrale et occidentale) du littoral de la wilaya d'Alger. Nous avons estimé la valeur du taux net à partir des taux nets moyens de la variation de la ligne de rivage calculés sur 2134 transects, régulièrement espacés de 10 m, sur une période allant de 1959 à 1999 pour les lignes de la côte ouest et de la Baie d'Alger, et 1959 à 2003 pour la côte est. Leurs localisations par zone sont représentées sur la figure 1 par le positionnement des transects extrêmes.

La côte orientale

Le diagramme du taux net d'évolution de la côte sableuse orientale située entre Cap Matifou et l'oued Réghaïa, (fig. 2) montre une tendance générale vers le recul $-0,433$ m/a. En effet, on

observe que sur ces 820 transects, environ 720 (soit 79,26% de la longueur totale de la côte) sont en érosion et seulement 170 (soit 20,73% de la longueur totale de la côte) sont en accrétion. Cependant, sur une période de 44 ans allant de 1959 à 2003, bien que les résultats indiquent un recul global de la ligne de rivage, nous relevons en quelques endroits des engraissements du trait de côte. Les extractions de sable le long de la côte est de la wilaya d'Alger depuis la fin des années 1970 et jusqu'à nos jours ont considérablement réduit le stock sédimentaire et ont engendré des impacts négatifs sur la dynamique côtière. Dans la plupart des cas, ces prélèvements ont induit d'importantes modifications du milieu côtier et ont accéléré le recul de la ligne de rivage qui est estimé de $-0,43$ à $-0,45$ m/an.

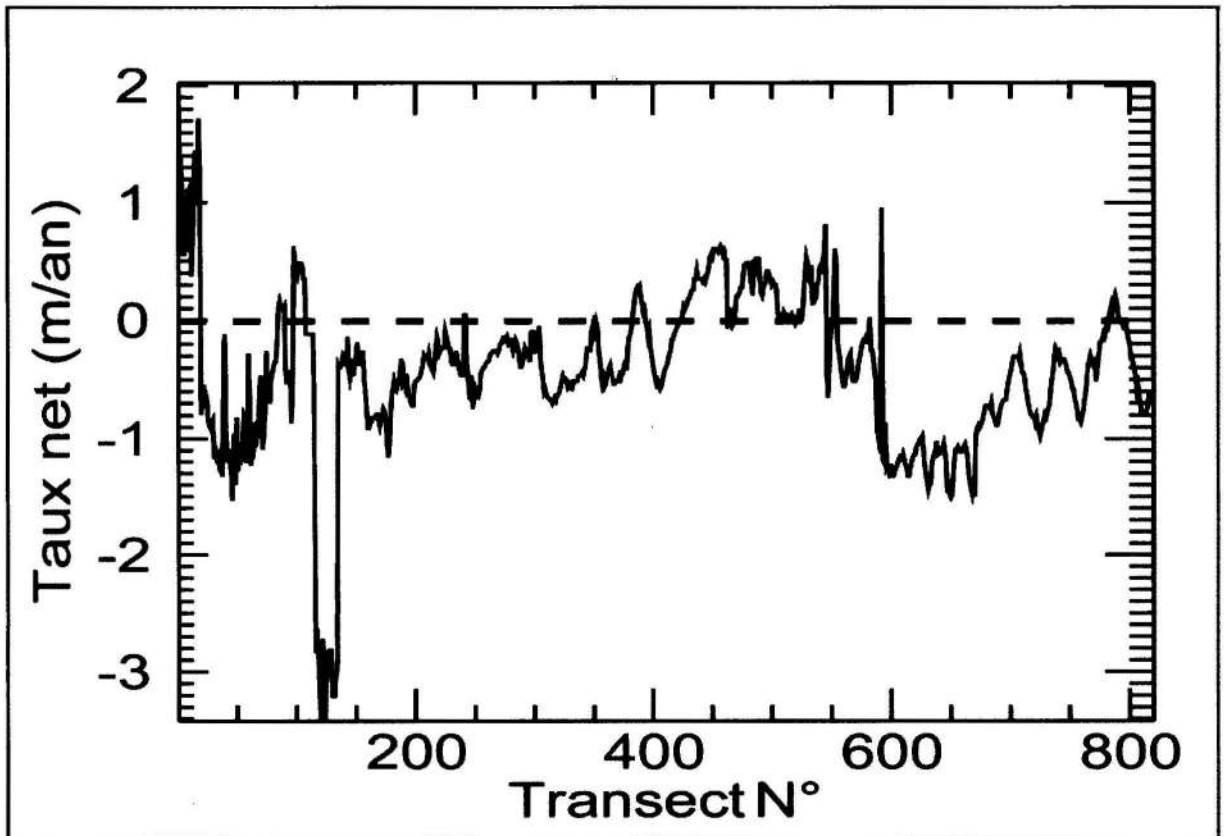


Fig. 2 - Evolution moyenne de la position de la ligne de rivage entre oued Réghaïa et cap Matifou durant la période 1959 - 2003.

Average evolution of shoreline position between river of Réghaïa wadi and Cape Matifou during the period 1959 - 2003.

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

La côte centrale (Baie d'Alger)

L'analyse des taux nets moyens des variations historiques de la position de la ligne de rivage le long de la côte de la Baie d'Alger (fig. 3) sur une période de 40 ans allant de 1959 à 1999, montre des résultats irréguliers. Les valeurs du taux net moyen enregistrées oscillent entre $-0,06$ m/an à 3 m/an avec une valeur moyenne de $-0,036$ m/an. Durant cette même période, la tendance à l'érosion s'affiche presque au niveau de toutes les stations. Le recul de la ligne de rivage reste modeste. Le taux net de récession enregistré oscille entre $-0,56$ m/an et $-2,43$ m/an dans les parties est et centrale de la Baie au droit des transects allant de 1 à 523. Néanmoins, la partie occidentale de la baie a connu une importante avancée de la ligne de rivage. Les valeurs du

taux net observées oscillent entre $0,06$ m/an et 3 m/an. Les forts taux d'engraissement $1,25$ m/an à 3 m/an sont enregistrés au niveau de Hussein Dey au droit des transects 650 à 681. Soulignons que cette importante avancée de la côte n'est pas due à un apport naturel des sédiments mais à un apport artificiel (zone de remblai).

La côte occidentale

De Ras Acrata à l'est, à l'embouchure de l'oued Mazafran à l'ouest, nous enregistrons dans ce secteur une tendance générale vers une récession du trait de côte (fig. 3) pour toute la période allant de 1959 à 1999. Ce démaigrissement des plages varie de $-0,062$ m/an à $-1,68$ m/an avec une valeur moyenne de $-0,19$ m/an. Les

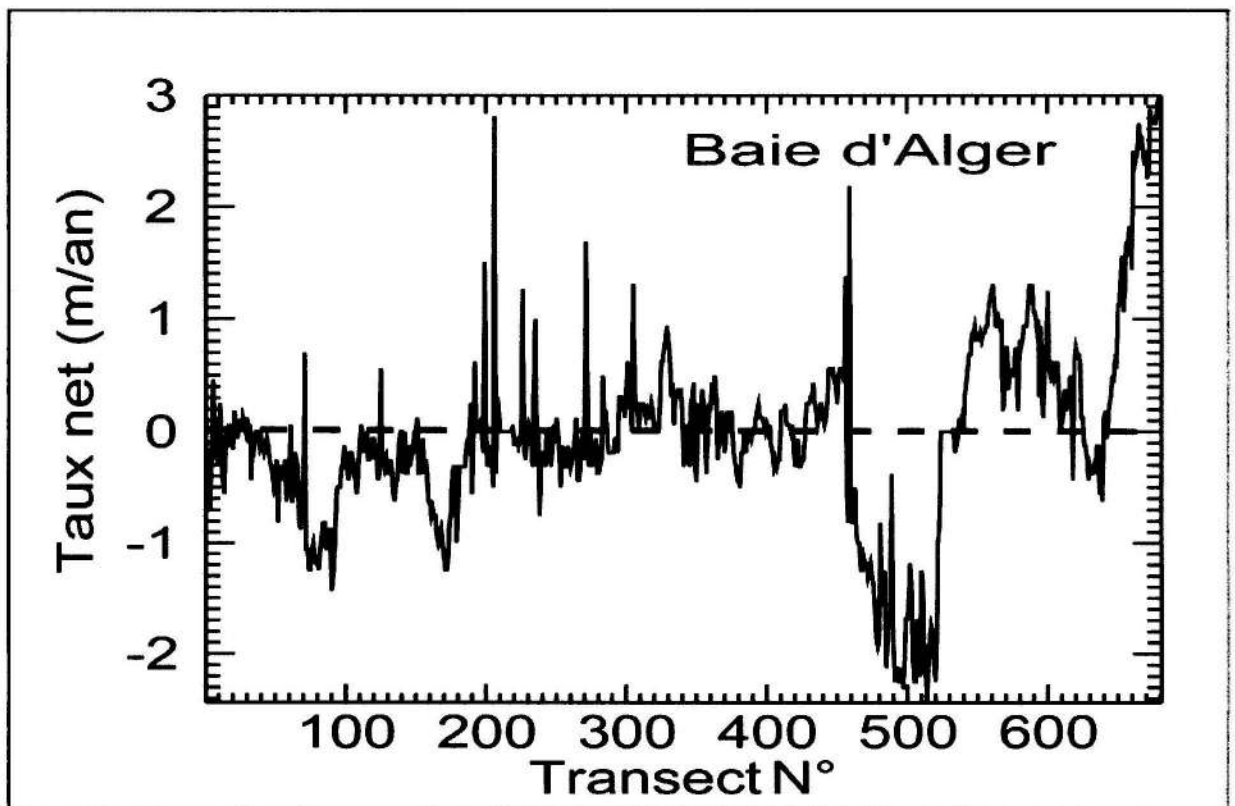


Fig. 3 - Evolution moyenne de la position de la ligne de rivage le long de plages sableuses de la Baie d'Alger durant la période 1959 - 1999

Average evolution of shoreline position along sandy beaches of the Algiers Bay during the period 1959 - 1999.

taux nets de recul les plus élevés $-1,0$ m/an à $-1,68$ m/an s'observent au niveau des stations 486 à 501. Cependant, des engraisements modérés de l'ordre de $0,062$ m/an à $0,66$ m/an sont localisés au droit des transects 41 à 83 et 383 à 401.

Il ressort de l'analyse des trois parties de la ligne de rivage de la wilaya d'Alger étudiées, que les vitesses de migration du trait de côte présentent des fluctuations importantes en amplitude dans l'espace des mesures. D'un point à un autre, pour une période d'observation donnée, elles peuvent atteindre jusqu'à 4 mètres. Leurs distributions le long du trait de côte sont-elles aléatoires ou bien au contraire régies par

des processus cachés de nature stochastique ? Autrement dit, les accroissements des vitesses de migration du trait de côte sont-ils indépendants ou au contraire corrélés entre eux ? Pour répondre à ce type de questions, il convient d'explorer ces signaux dans l'espace des fréquences. Nous avons, pour cela, tout d'abord procédé à leur étude par Transformée de Fourier (TF). Les résultats relatifs aux trois signaux "taux nets" représentés dans les figures 2 à 4 sont illustrés dans la colonne gauche (fig. 5). On montre ainsi que la densité spectrale de ces trois séries spatio-temporelles calculée par TF présente des comportements dits en $1/k^\beta$ caractéristiques des signaux non stationnaires auto-affines, k étant ici le nombre d'onde. Au travers de ces

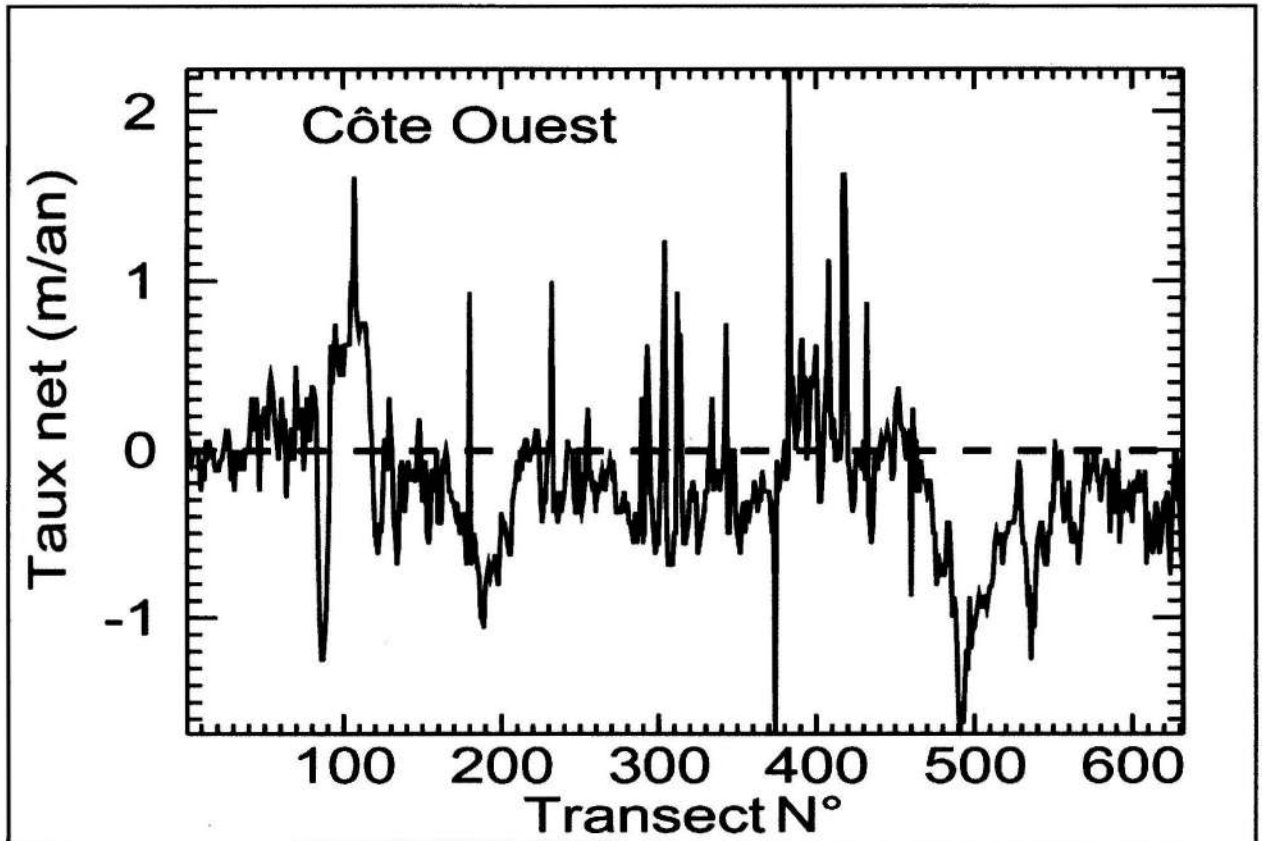


Fig. 4 - Evolution moyenne de la position de la ligne de rivage entre Ras Acrata et l'embouchure de l'oued Mazafran durant la période 1959 - 1999.

Average evolution of shoreline position between Ras Acrata and the river mouth of Mazafran during the period 1959 - 1999.

trois exemples, on vérifie que, tout comme les côtes rocheuses (Mandelbrot et Ness, 1968; Mandelbrot, 1983), les lignes de rivage des côtes sableuses sont des objets fractals régis pas des lois d'échelle.

3. ANALYSE EN ONDELETTES DE PROCESSUS A INVARIANCE D'ECHELLE

3.1. Modélisation des processus à invariance d'échelle

Le mouvement Brownien fractionnaire (mBf) $B_H(z)$ de paramètre H (Mandelbrot et Ness, 1968), parce qu'il est gaussien, est l'un des modèles mathématiques les plus utilisés pour décrire de telles fluctuations aléatoires des processus à invariance d'échelle. En effet, le mBf est un processus fractal dans le sens où il possède des propriétés statistiques d'auto affinité d'ordre H , c'est-à-dire que si on dilate un tel processus par un facteur λ , on retrouve le même processus amplifié par un facteur λ^H : $B_H(\lambda z) \equiv \lambda^H B_H(z)$, où \equiv signifie l'égalité des distributions de dimension finie. Dans l'espace des fréquences, la densité spectrale des mBf est proportionnelle à l'inverse du nombre d'onde (Mandelbrot et Ness, 1968; Mandelbrot, 1983) :

$$S(k) \sim k^{-\beta} \quad (1)$$

L'exposant de la loi puissance est une fonction linéaire du nombre de Hurst caractéristique du processus fractal : $\beta = 2H + 1$, H étant compris entre 0 et 1, H étant lui-même lié à la dimension fractale par la relation : $d = 2H - 1$. Pour accéder à cette dimension, il suffit de déterminer l'exposant spectral β . Pratiquement, β représente la pente du spectre de puissance dans un diagramme en échelle log-log (fig. 5). Pour $\beta < 2$, les accroissements sont corrélés négativement (le mouvement est dit antipersistant) et les trajectoires sont d'autant plus irrégulières

que β est plus proche de 1. Pour $\beta > 2$, les accroissements sont corrélés positivement (le mouvement est dit persistant) et les trajectoires tendent à être d'autant plus régulières que β se rapproche de 3. Enfin, pour $\beta = 2$ (cas du mouvement brownien ordinaire), les corrélations sont nulles, confirmant que les accroissements sont dans ce cas, statistiquement indépendants.

3.2. Rappel sommaire de la théorie de la Transformée en Ondelettes Continue

L'étude des corrélations, donc la détermination de l'exposant de la loi puissance qui régit la distribution de la densité spectrale repose sur l'analyse fréquentielle des signaux dont la Transformée de Fourier reste l'outil le plus communément utilisé. Mais cette utilisation systématique se heurte à deux difficultés majeures : d'une part, par nature les signaux stochastiques de type mBf, sont non stationnaires. Le calcul de leur TF n'a, à la limite, pas de sens en soi. D'autre part, et surtout, tel ou tel signal peut être fractal par morceau, voire multi-fractal, autrement dit de dimension fractale d , donc l'exposant spectral β de la loi puissance, peut varier d'un point à un autre du signal. Dans de tels cas, la Transformée de Fourier, parce qu'elle est globale, ne permet pas d'accéder à ces informations locales. Par contre, la Transformée en Ondelettes Continue (TOC), elle, permet de le faire en toute rigueur.

La Transformée en ondelettes a été introduite par le géophysicien Jean Morlet au début des années 80 (Morlet et al., 1982) pour l'analyse de signaux sismiques haute résolution (Grossmann et Morlet, 1984). La transformée en ondelettes permet une décomposition espace-échelle du signal sous forme de combinaison linéaire de fonctions élémentaires à l'aide d'une fonction mère appelée ondelette analysante (Torrésani, 1995; Meyer, 1992; Daubechies, 1992; Mallat, 2000). Une ondelette est une fonction $\psi \in L^2(R)$ de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(z) dz = 0 \tag{2}$$

Les fonctions élémentaires sont construites en dilatant l'ondelette ψ mère par un facteur $a \in R^*$, et en la translatant par $b \in R$:

$$\psi_{ab}(z) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{z-b}{a}\right) \tag{3}$$

La transformée en ondelettes continue du signal (TOC) $s(z)$ à la position b et à l'échelle a est définie par :

$$W_s(a, b) = \langle s, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(z) \psi^*\left(\frac{z-b}{a}\right) dz \tag{4}$$

équation dans laquelle $\langle \cdot, \cdot \rangle$ représente le produit scalaire des deux fonctions dans $L^2(R)$.

Pour que la transformée en ondelettes continue satisfasse l'intuition d'une représentation conjointe en espace et en nombre d'onde de l'information contenue dans le signal $s(z)$, l'ondelette mère doit être une fonction conjointement bien localisée en espace et en nombre d'onde. Cette condition se traduit dans le domaine de Fourier par la condition d'admissibilité :

$$c_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(k)|^2}{k} dk < \infty \tag{5}$$

qui contient la restriction exprimée par la relation (2). Le choix de l'ondelette analysante est fonction du problème traité. Dans le cadre de l'analyse des signaux fractals, l'ondelette de Morlet complexe est utilisée à cause de sa bonne localisation à la fois en espace et nombre d'onde et de son nombre important de moments nuls. Une ondelette qui a n_ψ moments nuls :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} z^n \psi(z) dz = 0, \text{ pour } 0 \leq n < n_\psi \tag{6}$$

est orthogonale au polynôme de degré inférieur ou égal à son nombre de moments nuls. Autrement dit, les coefficients d'ondelettes calculés à partir d'une ondelette à n_ψ moments nuls, reflètent l'information manifestée par les comportements plus irréguliers que la tendance polynomiale du signal analysé. Dans l'algorithme spécifique mis en œuvre, nous avons adopté l'approche proposée par Zaourar et al. (2006) basé sur le théorème de Plancherel suivant lequel la Transformée de Fourier du produit de convolution de deux fonctions est égal au produit simple de leurs Transformées de Fourier respectives. Elle consiste donc en un produit des Transformées de Fourier du signal et de l'ondelette dans l'espace des fréquences moyennant certaines adaptations telles que : $b = z$, qui signifie que la translation b de l'ondelette est effectuée pour chaque

point z du signal et $k = \frac{2\sqrt{a}}{a}$ correspond au nombre d'onde. En tout point de l'espace distance - nombre d'onde exploré, le scalogramme est défini par le carré des coefficients d'ondelettes :

$$P(k, z) = |W_s(k, z)|^2 \tag{7}$$

Aux grands nombres d'onde, le spectre de puissance peut être approximé par une loi de puissance (Torrésani, 1995) :

$$p(k, z) \approx k^{-\beta(z)} \tag{8}$$

où :

$$\beta(z) = 2h(z) + 1 \tag{9}$$

L'exposant spectral local $\beta(z)$ appelé aussi exposant d'échelle, décrit les changements locaux de cette loi. D'un point de vue mathématique, l'exposant de Holder $h(z) = H$ pour tout point z . Il quantifie «la force» de la singularité localisée en z .

3. 3. Analyse en ondelettes des variations de la ligne de rivage

Nous avons représenté (fig. 5 (colonne droite)), les spectres moyens estimés par TOC. Ces spectres sont obtenus en moyennant tous les spectres locaux extraits du scalogramme en chaque point du signal. Si les valeurs des exposants spectraux déterminés à partir des deux analyses spectrales ne sont pas rigoureusement identiques à cause d'une pondération de fait inhérente à la TOC, ils sont toutefois comparables. En tout état de cause, la répartition de la densité spectrale moyenne obtenue par TOC, confirme pleinement le comportement en loi d'échelle des signaux analysés et donne un sens rigoureux au calcul des exposants spectraux globaux ou locaux (Meyer, 1992; Torrèsani, 1995; Mallat, 2000; Holschneider, 1995; Flandrin, 1998). Rappelons que les signaux browniens fractionnaires sont caractérisés par des exposants variant entre 1 et 3. Les pentes des différents spectres calculés par TF et par TOC, montrent que les valeurs moyennes des exposants spectraux varient approximativement entre 1 et 2. Ces premiers résultats confirment que les fluctuations statistiques du taux net de variation des trois lignes de côte analysés s'apparentent donc bien à des mouvements browniens fractionnaires. Il est donc légitime d'étudier les variations locales des exposants spectraux à l'aide des scalogrammes résultant de la TOC (fig. 6, 7 et 8).

Pour illustrer le développement algorithmique mis en œuvre, nous présentons les différentes étapes de l'analyse par ondelettes du taux net des fluctuations de la ligne de rivage de la côte est d'Alger. Nous reportons (fig. 6(a)) les fluctuations mesurant le taux net des variations de la ligne de rivage. La visualisation de ce signal dénote l'aspect irrégulier qui le caractérise. La variabilité est distribuée sur une grande gamme d'échelle. Pour illustrer cette idée, imaginons un microscope révélant toujours de nouvelles structures, statistiquement semblables aux

précédentes, au fur et à mesure que l'on augmente le grossissement. On montrera qu'une telle approche est intéressante dès que l'information pertinente réside dans ses irrégularités plus que dans son amplitude. En effet, la manifestation visuelle de l'invariance d'échelle est reflétée par les structures ramifiées et complexes de l'énergie des coefficients d'ondelettes qui sont la signature de la nature fractale de ce signal (fig. 6 (d)). La morphologie du signal est déchiffrée fidèlement dans le plan espace/ nombre d'onde par le scalogramme avec des niveaux d'énergie moyens variant de -2,5 à -0,5 m^{-1} . La chute brutale du taux net enregistrée entre les transects 100 et 150 (fig. 6 (a)) est remarquablement reproduite par le scalogramme caractérisé par un maximum d'énergie (couleur la plus sombre).

Nous calculons ensuite les exposants spectraux moyens ainsi que les exposants spectraux locaux en chaque point du signal afin d'étudier leurs distributions statistiques. Le spectre d'ondelettes moyen représenté en échelles logarithmiques (fig. 5) montre effectivement une décroissance avec le nombre d'onde dans l'intervalle compris entre -2 et 0,5, correspondant à des longueurs d'onde variant de 3,16 m à 100 m. La pente calculée par ajustement au sens des moindres permet d'estimer l'exposant d'échelle moyen $\beta(z) = 1,79 \pm 0,04$. Conformément aux prédictions théoriques (Zaourar et al., 2006), ce spectre présente la même allure que le spectre global calculé par TF avec un exposant global $\beta = 1,55 \pm 0,06$ (fig. 5). L'examen (fig. 6 (c)) montre que les variations de l'exposant spectral reproduisent clairement les structures de variabilité en chaque point du signal. On peut vérifier que la tendance à l'érosion entre les transects 100 et 200 est bien reconnue par notre graphe de régularité qui se traduit par une augmentation de la valeur de l'exposant de la loi d'échelle. De même, les rares engraisements du trait de côte de cette ligne, observées entre les transects 500 et 600 sont bien retracés par une forte diminution de $\beta(z)$.

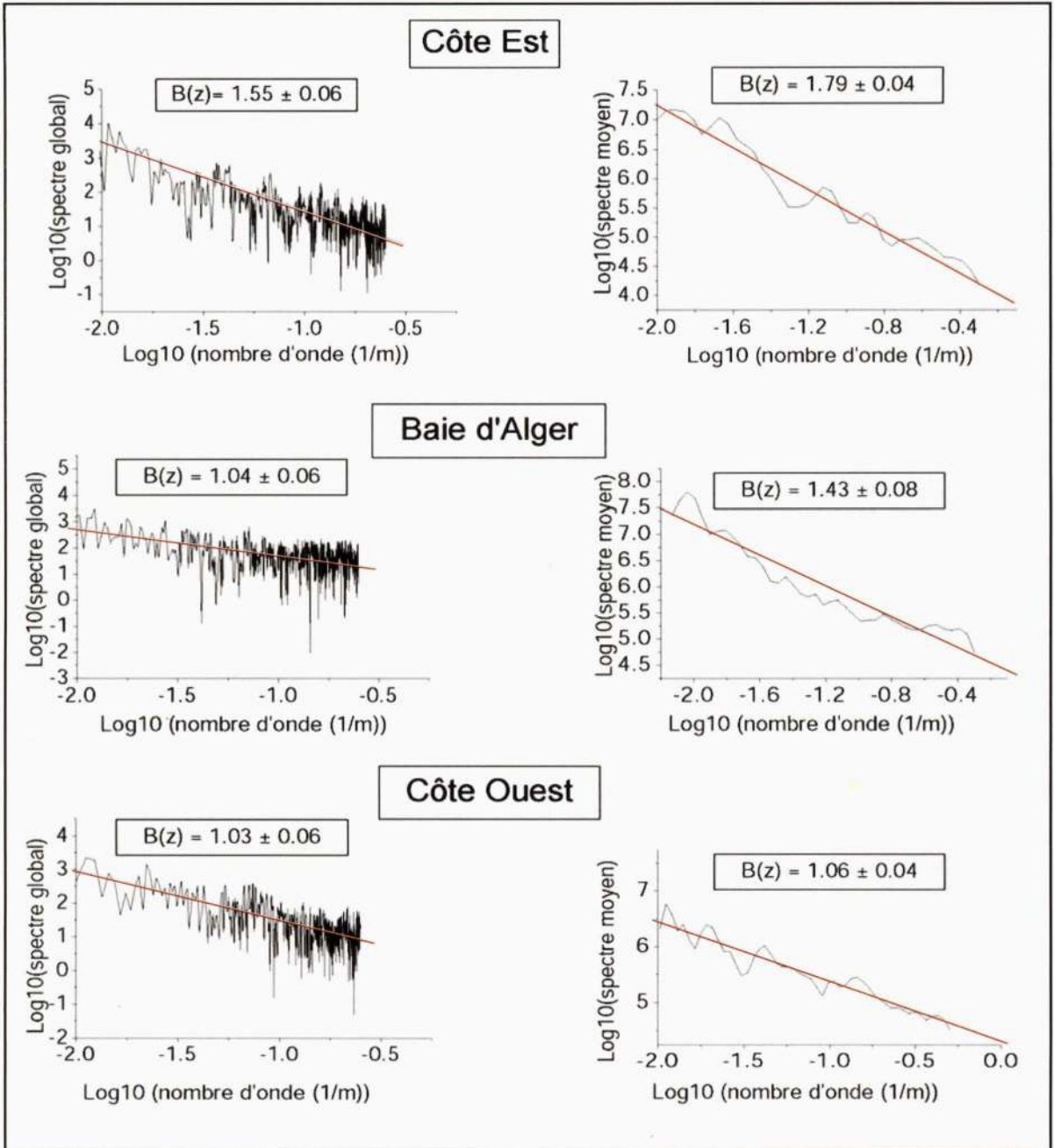


Fig. 5 - Spectre global et spectre d'ondelettes moyen du taux net des fluctuations de trois lignes de rivage du littoral de la wilaya d'Algiers. Les pentes des droites de régression représentent les valeurs de l'exposant spectral. L'ondelette analysante est l'ondelette de Morlet complexe.

Global power spectrum and wavelet average power spectrum of the rate fluctuations along the three shoreline of the Wilaya of Algiers. The straight lines are the linear least squares fitting of estimating β . The analysing wavelet used in this study is the Morlet wavelet.

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

L'histogramme (fig. 6 (d)) des exposants spectraux est estimé à chaque niveau de mesure à partir du comportement en loi de puissance dans les échelles du spectre d'énergie calculé par transformée en ondelettes. La première observation que l'on peut faire à partir de cette figure est que l'histogramme est relativement large et centré autour de la valeur $\beta(z) \approx 1,78$. L'écart à une distribution gaussienne unique confirme la multi-fractalité de ce signal et suggère la présence de plusieurs régimes browniens fractionnaires. Ce résultat justifie, l'écart repro-

duit par les valeurs de l'exposant spectral global et moyen mentionné ci-dessus.

La disponibilité des variations historiques de la position de la ligne de rivage de la côte est sur une période de 44 ans allant de 1959 à 2003 permet d'effectuer une analyse comparative des propriétés d'invariance d'échelle de cette dynamique côtière. Nous résumons dans le tableau n° 2, la valeur moyenne des exposants spectraux $\beta(z)$ estimés par TOC, ainsi que la moyenne des variations du taux net de la position de la ligne de rivage.

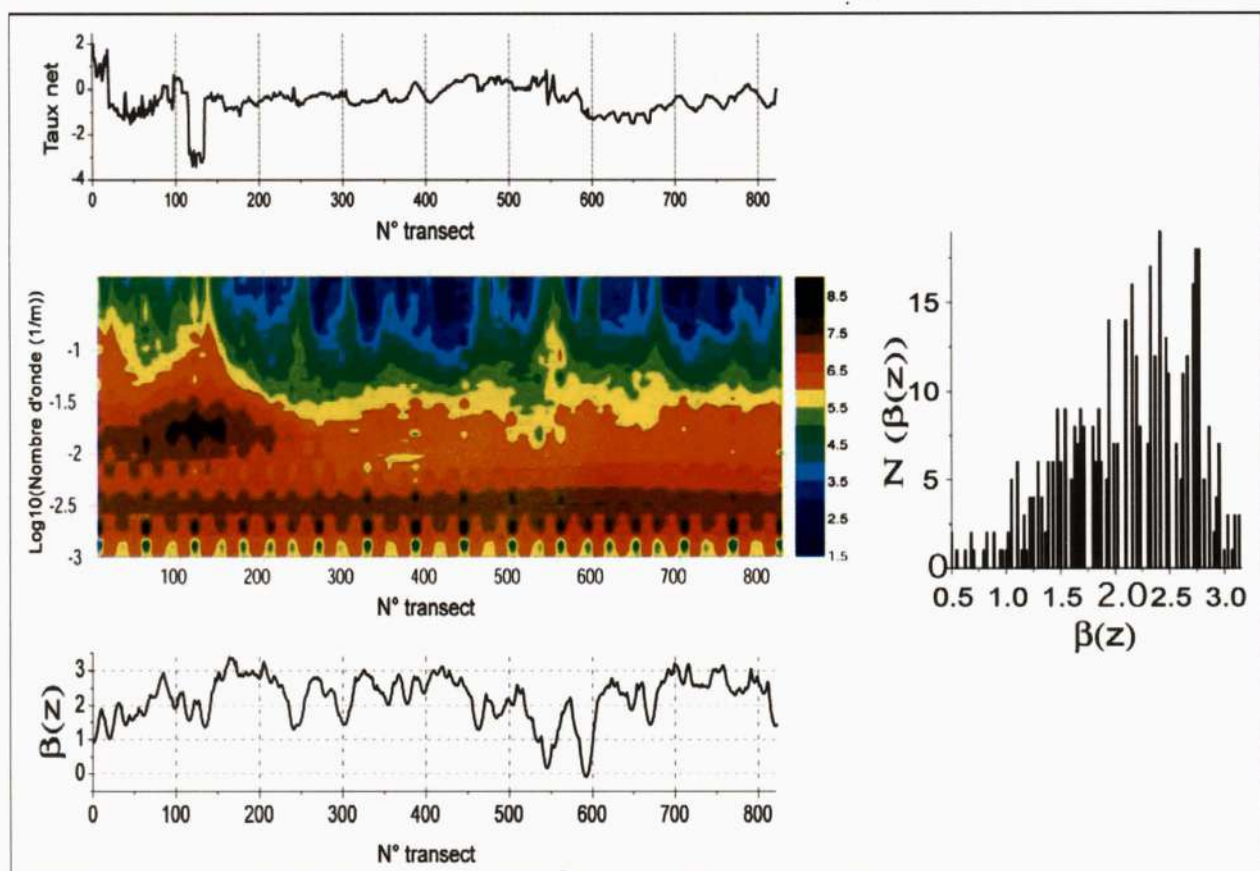


Fig. 6. Analyse en ondelettes du taux net des fluctuations de la ligne de rivage de la côte est d'Alger.

Wavelet analysis of shoreline change along the east coast of Algiers.

(a) Taux net d'évolution (*Shoreline change*). (b) Scalogramme représentant la distribution de l'énergie des coefficients d'ondelettes (*Scalogram displaying the energy distribution of the wavelet coefficients in the depth - wavenumber plane*). (c) Variations de l'exposant spectral $\beta(z)$. L'ondelette analysante est l'ondelette de Morlet complexe (*Local changes of spectral exponent $\beta(z)$. The analysing wavelet used in this study is the Morlet wavelet*). (d) Histogramme de distribution des exposants spectraux (*Histogram of spectral exponent distribution*).

D'une façon générale, on constate une similitude frappante des résultats à toutes les échelles temporelles. Les exposants spectraux varient entre 1,68 et 1,80 quand le taux net affiche une tendance à l'érosion. On peut noter aussi que les distributions des exposants correspondants aux périodes d'érosion sont majoritairement comprises entre 1 et 2, révélant encore une fois des propriétés de corrélation à longue portée. La période 1972 - 1982 se distingue par une valeur positive du taux net d'évolution de la position de la ligne de rivage, illustrant ainsi des caractéristiques d'accumulation. L'exposant spectral marque alors une très nette diminution, soulignant une plus forte hétérogénéité du processus qui évolue vers un phénomène d'accumulation des sédiments.

Nous avons déjà souligné que la période 1984-2003 est caractérisée par une très forte érosion, notamment au niveau de la ligne de rivage située entre Aïn Chorb et Réghaia (fig. 7) avec une valeur moyenne du taux net égale à $-9,31$ m/an.

L'exposant spectral $\beta(z)$ correspondant avec une valeur moyenne de $1,86 \pm 0,06$ retrace parfaitement cette augmentation de l'érosion. On peut facilement vérifier que plus le taux net d'érosion augmente, notamment entre les transects 720 - 730 et 750 - 760, plus l'exposant spectral augmente, atteignant des valeurs maximales supérieures à 2. Toutes ces observations constituent une nouvelle illustration d'une forte tendance à l'érosion qui caractérise cette partie de la côte sur plusieurs échelles temporelles.

Nous avons poursuivi cette étude par une analyse en ondelettes du taux net de variation des lignes de rivage de la Baie d'Alger et de la côte ouest (fig. 8). Pour les deux traits de côte, l'image reflétée par les scalogrammes met bien en évidence les points les plus singuliers, en termes de récession. Les forts taux observés entre les transects 450 et 610 environ pour la Baie d'Alger sont bien indiqués sur le scalogramme par une forte énergie des coefficients d'ondelettes. On peut noter aussi sur le scalogramme

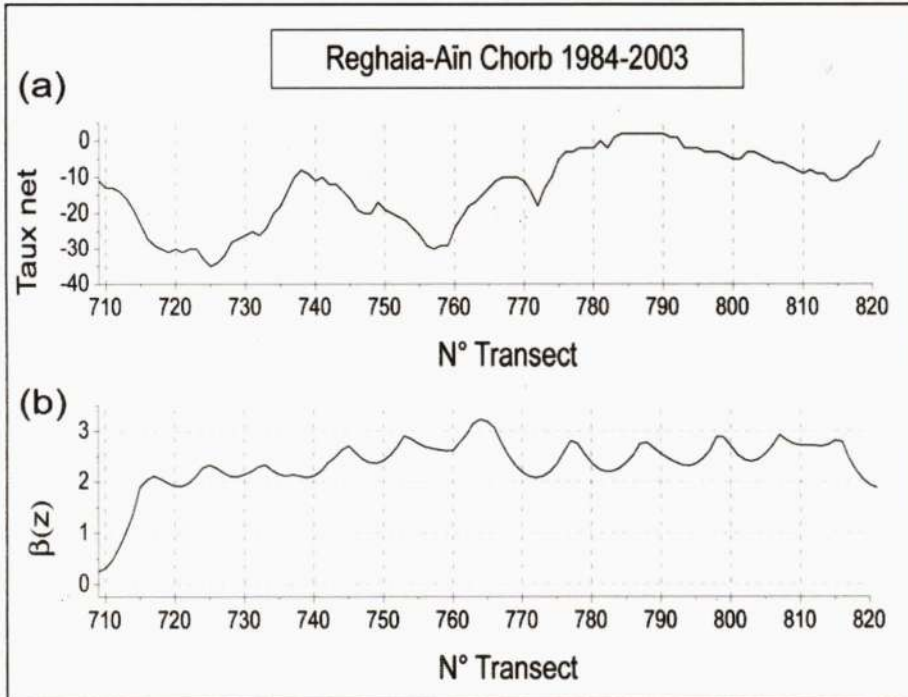


Fig. 7 - (a) Taux net de variation de la ligne de rivage (*Shoreline change*).
(b) Exposant spectral correspondant (*corresponding Spectral exponent B (z)*).

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

représentant la distribution énergétique des fluctuations de la côte ouest, une augmentation de l'énergie avec un maximum au droit du transect 100, en regard avec la valeur du taux net sur le graphe (fig. 8 (a)).

Comme illustré (fig. 8 (c)), bien mieux que le signal, même les plus faibles variations du taux net (fig. 8 (a)), ont une signature en termes d'exposant spectral, apte à dévoiler la dynamique complexe de la variabilité des traits de côte. Pour un taux net de $-0,036$ m/an évalué pour la Baie d'Alger, la valeur moyenne de l'exposant spectral $\beta(z)$ est de $1,50 \pm 0,38$. Pour la côte ouest, la valeur de $\beta(z)$ estimée est de $1,13 \pm 0,35$ pour un taux net considéré de $-0,19$ m/an. Tous ces résultats sont en accord avec la mise en évidence des propriétés d'auto-affinité associées aux corrélations à longue portée de ces deux lignes de rivage.

En raison de l'auto-affinité qui caractérise les fluctuations des lignes de rivage, les processus d'érosion et d'accumulation estimés par le taux net devraient avoir aussi un comportement en loi d'échelle. Nous avons examiné certaines parties de ces deux lignes de rivages révélant des valeurs particulières du taux net de récession. L'exposant spectral affiche une valeur moyenne de $1,45 \pm 0,32$, en accord avec un plus fort taux net de récession enregistré oscillant entre $-0,56$ m/an et $-2,43$ m/an dans la partie est et centrale de la Baie, au droit des transects allant de 1 à 523. Par ailleurs, les engraisements modérés de l'ordre de $0,062$ m/an à $0,66$ m/an localisés au droit des transects 41 à 83 et 383 à 401, enregistrés au niveau de la côte occidentale sont bien mis en évidence par une diminution de l'exposant spectral atteignant la valeur de $0,80 \pm 0,40$. Tous ces résultats confirment la corrélation de

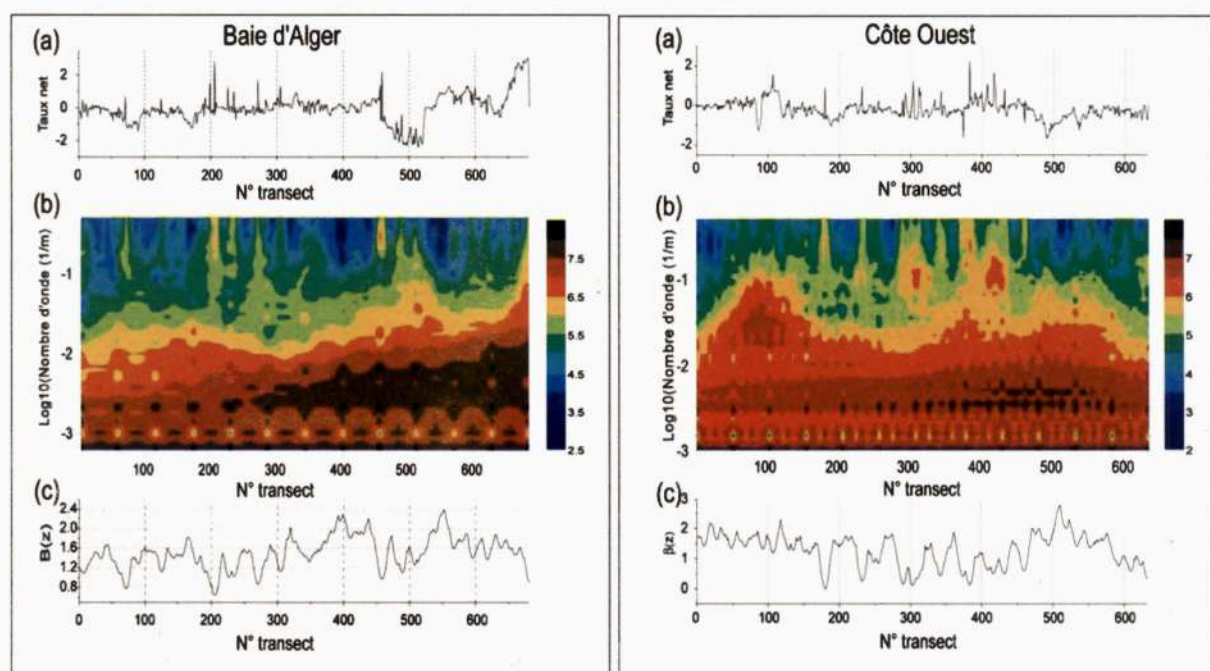


Fig. 8 - Analyse en ondelettes du taux net des fluctuations de la ligne de rivage de la Baie d'Alger et de la côte ouest.

Wavelet analysis of shoreline change along sandy beaches of the Algiers Bay and the west coast.

(a) Taux net d'évolution (*Shoreline change*). (b) Scalogramme représentant la distribution de l'énergie des coefficients d'ondelettes (*Scalogram displaying the energy distribution of the wavelet coefficients*). (c) Variations de l'exposant spectral $\beta(z)$. L'ondelette analysante est l'ondelette de Morlet complexe (*Local changes of spectral exponent $B(z)$. The analysing wavelet is the Morlet wavelet*).

l'exposant spectral avec la statistique des mesures du taux net de variation de la ligne de rivage.

4. INTERPRETATION DE L'AUTO-AFFINITE

Nous avons montré qu'en dépit de plusieurs ordres de grandeur des échelles spatiales et temporelles, tous les graphes représentant l'analyse spectrale du taux net de variation des lignes de rivage montrent une auto-affinité statistique et un comportement quasi-uniforme. Toutes ces observations indiquent que l'évolution morphologique d'une ligne de côte est un processus multi-échelle complexe mettant en jeu des mécanismes de rétro-action. Il y a au moins deux causes possibles liées à l'action des vagues, qui sont à l'origine de la non-linéarité du processus (Feder, 1988). La distribution fractale de la taille des vagues, entraîne un forçage non linéaire sur le trait de côte. Alternativement, le caractère fractal de la réfraction des vagues en mer et au niveau de la bathymétrie du littoral produit une distribution non linéaire de l'énergie des vagues le long de la ligne de rivage.

L'analyse spectrale sur une période de 40 ans pour les trois lignes de côte révèle des exposants compris entre 1,23 et 1,80 ce qui situe ces données dans le régime des mouvements browniens anti-persistants ou à corrélation négative entre les données. Ces corrélations indiquent que le processus garde une « mémoire » au sens statistique du terme, c'est-à-dire que la variation de la ligne de rivage en un point donné affecte les variations à la fois des points situés au voisinage de ce point ainsi que les parties éloignées au sein de la section analysée. Des travaux de recherche (Pelletier et Turcotte, 1999) ont montré que l'auto-affinité d'un processus résulte d'un phénomène de transport dans lequel il y a diffusion d'éléments. Le modèle de déposition adopté est celui de la déposition élémentaire avec diffusion en surface (Family, 1990). Les

particules tombent aléatoirement verticalement sur un substrat horizontal et diffusent jusqu'à se stabiliser sur un site plus stable, situé dans un rayon donné (les particules roulent dans les creux). Dans ce modèle, la restructuration est dominante : la surface fractale engendrée est sensible à la taille des échantillons, son comportement appartient à une classe d'universalité caractérisée par les valeurs de ses exposants $\beta(z)$. En particulier, les fluctuations de la surface représentent une série temporelle auto-affine. Une étude menée par Pelletier et Turcotte (1999) montre que ces fluctuations suivent une loi d'échelle avec un exposant $\beta(z) = 1,5$. L'exposant spectral estimé dans le cas de notre étude varie entre 1,23 et 1,80 entre la côte ouest et la côte est, et affiche une valeur de 1,5 pour la Baie d'Alger. Ces résultats confortent notre hypothèse de départ et confirment que les fluctuations du taux net de la côte algéroise peuvent être modélisées par un modèle stochastique de diffusion de transport de sédiment.

5. CONCLUSION

À travers cette étude, nous avons montré que l'évolution morphologique de la côte algéroise sur une période de 40 années est caractérisée par une auto-affinité avec des propriétés de corrélation à longue portée. Pour les trois lignes de rivage étudiées, l'exposant de la loi d'échelle varie de 1,23 à 1,80. La côte est possède l'exposant le plus élevé, en lien avec le plus fort taux d'érosion qui la caractérise. En accord avec les prédictions théoriques, les valeurs élevées de l'exposant indiquent une plus grande persistance. Ces valeurs correspondent, à petite échelle, à un lissage de la forme du trait de côte et se traduisent par une forte érosion. Un modèle stochastique de diffusion de transport de sédiment reproduit le comportement auto-affine observé sur les trois lignes de côte. L'ensemble de ces résultats confirment la pertinence du choix du modèle en $1/k^\beta$ pour l'analyse des fluctuations des lignes de rivage.

ANALYSE PAR ONDELETTES DES VARIATIONS HISTORIQUES DE LA LIGNE
DE RIVAGE ENTRE L'OUED REGHAIA ET L'OUED MAZAFRAN (WILAYA D'ALGER)

A travers l'analyse et la modélisation des données de l'évolution morphologique de la dynamique côtière, nous avons mis en évidence une méthode de prévision robuste capable de décrire les phénomènes d'érosion/accumulation de la dynamique côtière en relation avec les processus de réplication, diffusion et transport des sédiments. Il est important de souligner que les corrélations à longue portée quantifiées par l'exposant de la loi d'échelle confirment une tendance à l'érosion de la dynamique côtière algéroise pour les prochaines années. Toutes ces observations suggèrent que la méthodologie présentée permet de faire des prévisions à long terme, indispensables pour évaluer les différents projets et leurs impacts sur la dynamique côtière.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERS, F. J. AND BYRNES, M. R. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59(1), 17-26.
- BOUTIBA, M. 2006. Géomorphologie dynamique et mouvements des sédiments le long de la côte sableuse jijelienne. *Thèse, Doctorat d'Etat, FSTGAT-USTHB*, 252 p.
- CROWELL, M., LEATHERMANN, S. P. AND BUCKLEY, M. K. 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 839-852.
- DAUBECHIES, L. 1992. Ten Lectures on wavelets, *S/AM. Press, Philadelphia*.
- DOLAN, R., HAYDEN, B. P., MAY, P. AND MAY, S. 1980. The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), 22-29.
- FAMILY, F. 1990. Dynamic scaling and phase transition in interface growth. *Physica*, A 168, 561.
- FEDER, J. 1988. *Fractal*, Ed. Plenum Press, New York.
- FENSTER, M. S. AND DOLAN, R. 1994. Large-scale Reversals in Shoreline Trends along the U.S. mid-Atlantic Coast. *Geology*, Vol. 22, pp. 543-546.
- FLANDRIN, P. 1992. Wavelet analysis and synthesis of Fractional Brownian Motion. *IEEE transformation on Information Theory*, 38. 1992, pp. 910-917.
- FLANDRIN, P. 1998. Temps fréquences 2^{ème} édition revue et corrigée. *HERMES Paris*.
- GROSSMANN, A. AND MORLET, J. 1984. Decomposition of hardy functions into a square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math. Anal.*, 15, 723-736.
- H.LSCHNEIDER, M. 1995. Wavelet an analysis tool. *Clarendon Press, Oxford England*, 423 p.
- HURST, H. E., BLACK, R. P. AND SIMAIKA, Y. M. 1965. Long-term Storage: an experimental study. *Ed. Constable, London*.
- KRAUS, K. ET WALDHÖUSL, P. 1998. Manuel de photogrammétrie, principes et procédés fondamentaux. *Editions Hermes*, 407 p.
- MANDELBROT, B.B. AND NESS, J. W. 1968. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications, *SIAM Rev.*, 10, 422-437
- MANDELBROT, B.B. 1983. The fractal geometry of nature. *Ed. W. H. Freeman, San Francisco*.
- MALLAT, S. 2000. Une exploration des signaux en ondelettes. *Edition de l'Ecole Polytechnique*.
- MEYER, Y. 1992. Ondelettes : Algorithme et Application. *Ed. Armand Colin, Paris*.
- MORLET, J., ARENS, G., FOURGEAU, E. AND GIARD, D. 1982. Wave propagation and sampling theory. *Geophysics*, 47(2), 203-236.
- MOORE, L. J. 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 111-124.
- NEBIKER ET COLL., 2000. Guide assurance de la qualité: photogrammétrie et génération de MNT. http://www.kkva.ch/downloads/richtlinien/photogrammetrie/aaq_photogrammetrie.pdf
- PELLETIER, J.D. AND TURCOTTE, D. L., 1999. Self-affine time series II: Applications and models. *Advances in Geophysics*, 40, 91-166.

- TEBBENS S. F., BURROUFGHS, S. M. AND NELSON, E.E., 2002.** Wavelet analysis of shoreline change on the outer Banks of North Carolin: An example of complexity in the marine sciences. *Colloquium*. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.012582699
- TORRESANI, B. 1995.** Analyse continue par ondelettes. *Inter Editions / CNRS Edition*.
- ZAOURAR, N., HAMOUDI, M. ET BRIQUEU, L. 2006.** Détection des transitions lithologiques de la composante fractale des diagraphies par Transformée en Oddelettes Continue. *C. R. Acad. Sc. Paris* 338 (8), 514-520.
- ZAOURAR, N., BRIQUEU, L., GACI, S., HAMOUDI, M. AND GIBERT, D. 2006.** Sonic Log Analysis with the Continuous Wavelet Transform. *Bulletin du Service Géologique National*. 17(2), 161-181.