

Origine du phénomène d'ensablement déduite par combinaison entre télédétection et techniques sédimentologiques : application au bassin côtier de Tarfaya, sud-ouest marocain

Zakaria SALTANI*, Aicha BENMOHAMMADI et Mohamed BELABED

Equipe géosciences de l'environnement, LBEQ, Université ibn Tofail, Kenitra, Maroc

* Correspondance, courriel : zakaria.sa@gmail.com

Résumé

Il est clair que le sable a toujours existé au niveau du bassin côtier de Tarfaya, c'est ce qu'atteste l'étude du cadre géologique et structural qui révèle d'ores et déjà la relation étroite entre l'histoire géologique et structurale de cette région et les phénomènes dunaires qui l'ont affecté dans le passé et qui continuent de sévir dans la région. Cette relation se traduit par l'orientation préférentielle Nord/Sud ou Nord-Nord-Est / Sud-Sud-Ouest des massifs dunaires holocènes et des courants sableux atlantiques ayant fonctionné depuis le quaternaire et fonctionnant actuellement sans se soucier de la géomorphologie de la zone, qui a son tour, offre un domaine facilement franchissable par sa simplicité et son aspect tabulaire peu ou non végétalisé. Quant au climat, c'est celui des régions arides, caractérisé par de faibles précipitations et des vents assez forts pour une mobilisation et un transport du matériel sableux, et qui prennent en général des directions allant du NNE vers le SSO.

Mots-clés : *télédétection, Lagune de Khnifiss, bassin côtier de Tarfaya, sédimentologie.*

Abstract

Origin of the phenomenon of sanding by combination between remote sensing and sedimentologic technics: application of coastal tarfaya basin, southwest moroccan

All the geological and structural study's in the coastal basin of Tarfaya attest that sand has always existed in this area, it reveals the relationship between the geology and structure of the region, and the phenomena which have affected dune in the past and that continue to exist in our study area. This relationship is reflected in the preferred orientation north/south or north-north-east / south-southwest of massive Holocene dunes and sandy Atlantic currents that have run since the Quaternary and currently operating without worrying about the geomorphology of the area which provides an easily field crossed by its simplicity and tabular appearance with little or no vegetation. The climate is that of arid regions, characterized by low rainfall and winds strong enough to mobilize and transport sandy material, which usually take directions from NNE to SSW.

Keywords : *remote sensing, Khnifiss lagoon, coastal Tarfaya Basin, sedimentology.*

1. Introduction

La lagune de Khnifiss appartient à l'ensemble du bassin côtier de Tarfaya. Au niveau de cette zone du Sahara atlantique marocain, la mise en mouvement de sable s'impose et devient très menaçante au cours de ces dernières décades. La lutte contre le phénomène de l'ensablement dans cette zone du Maroc exige la connaissance des principaux facteurs conditionnant la propagation du matériel sableux, à savoir la zone littorale, le relief et le vent. Les conditions particulières réalisées dans ce secteur entre ces trois facteurs sont telles que le phénomène de l'ensablement sur ce tronçon de la côte atlantique marocaine est porté à son paroxysme. Pour apporter des éléments de réponse à notre problématique, nous nous sommes fixé deux objectifs principaux qui abordent à la fois l'échelle régionale du phénomène et l'échelle particulière (ou granulaire), et ce à travers la combinaison de deux techniques complémentaires, en premier lieu la télédétection spatiale à travers l'imagerie satellitaire Landsat TM pour l'élucidation de l'origine des ensablements constatés. En second lieu l'application des techniques sédimentologiques : Granulométrie et Morpho-scopie, pour l'identification de l'origine du matériel mis en mouvement dans la zone d'étude.

2. Contexte d'étude

La zone d'étude fait partie d'un environnement où le sable constitue un élément caractéristique (30 % de la zone d'étude est totalement couverte de dépôts sableux plus ou moins épais), l'accumulation de cet élément sous forme d'amas ainsi que sa mise en mouvement font de cette zone un espace où l'ensablement constitue un caractère généralisé, et par conséquent constitue un risque majeur qui menace la lagune de Khnifiss ainsi que l'ensemble des régions avoisinantes.

2-1. Situation géographique

La lagune de Khnifiss est située sur la côte atlantique marocaine à 28° 02' 25" de latitude Nord et 12° 13' 66" de longitude Ouest. Avec une orientation parfaitement perpendiculaire au trait de côte, la lagune renouvelle ses eaux par des échanges avec l'océan qui se font à travers une passe d'une centaine de mètres de largeur et de quelques mètres de profondeur (5 à 6m). La lagune possède également un chenal principal d'une vingtaine de kilomètres [1] qui se termine par une Sebkhia appelé Sebkhia TAZGHA, siège d'importantes exploitations de sel.

2-2. Formations géologiques et caractères édaphiques

2-2-1. Formation Géologiques

La zone d'étude se situe dans la partie Nord-Ouest du « Bassin côtier de Tarfaya » qui constitue lui-même la partie septentrionale du « Bassin de Lâayoune-Boujdour » [2]. Les formations géologiques font partie des séries du Crétacé et du Miocène, elles sont subhorizontales ou légèrement ondulées, et sont recouvertes dans la partie occidentale du bassin par des dépôts marins du Moghrébien (Plio-pléistocène) qui en accentuent encore l'allure tabulaire. Le Bassin de Lâayoune-Boujdour présente des formations mésozoïques dont le Crétacé constitue l'essentiel, on le retrouve dans les oueds et les Sebkhias. Des formations cénozoïques présentes au niveau du bassin, sont formées surtout du Mio-pliocène, et recouvrent en pseudo-concordance le Crétacé supérieur dans la partie occidentale du bassin et constituent les falaises côtières depuis Tarfaya jusqu'à la plage de Mégriou. Quant aux formations plio-pleistocènes, elles sont dominées par la présence du Moghrébien qui constitue l'essentiel du Quaternaire dans cette région ainsi que la quasi-totalité des affleurements de notre secteur d'étude.

Cette formation se présente sous la forme d'une dalle grésocalcaire épaisse en moyenne de 15 mètres (sa puissance varie entre 5 et 25 m). Le Moghrébien passe ensuite à des niveaux azoïques à stratification entrecroisée, ces dépôts marquant le retrait de la mer. Par endroits des dépôts gréseux lapidifiés appelés dunes "postmoghrébiennes" se superposent au Moghrébien. L'ensemble de la dalle moghrébienne est discordant sur le Crétacé marin et, au Sud de Tarfaya sur du "Mio-pliocène". L'Ouljien se présente sous la forme de rares lambeaux de terrasses marines de grès de plage, de poudingues et de grès fossilifères. Ces dépôts oulijens ne dépassent guère 5 mètres d'altitude. De toutes les formations géologiques présentes dans la zone d'étude, la dalle moghrébienne revêt une importance capitale en raison du rôle qu'elle joue dans la genèse des dépôts de sable et dans l'approvisionnement des apports éoliens en sédiments.

2-2-2. Caractères édaphiques

Au niveau de la zone d'étude, les sols sont en général peu évolués, souvent pierreux ou salins. On peut davantage parler de morphogenèse que de pédogenèse. Il s'agit souvent de minces couches sédimentaires (alluviales) à fertilité faible, qui ont été déposées dans les fonds de vallées et les lits d'oueds par les crues. Elles ont peu évolué et ont donné tout au plus des sols isohumiques que l'on rencontre au fond des vallées. En dehors de celles ci, les sols sont des sols minéraux bruts, sableux ou limono-sableux.

2-3. Cadre structural

L'aspect quasi-tabulaire des formations géologiques, est affecté par une tectonique qui a engendré des déformations, fracturations et bombements, qui s'organisent selon deux directions principales [3]; La première orientée SSW-NNE et la seconde orientée WSW-ENE. Ces directions correspondent à orientation d'un réseau de diaclases et d'accidents morphologiques qui affectent le Moghrébien (*Figure 1*), dont les plus importants sont: La côte entre Foum Agoutir et Tarfaya, La falaise d'Ed Dzeroua, Les accidents d'Asselsoul et d'Aouzizane, Le bombement de Taoulekt, L'orientation des sebkhas Tah, Tizfourine Toukat.

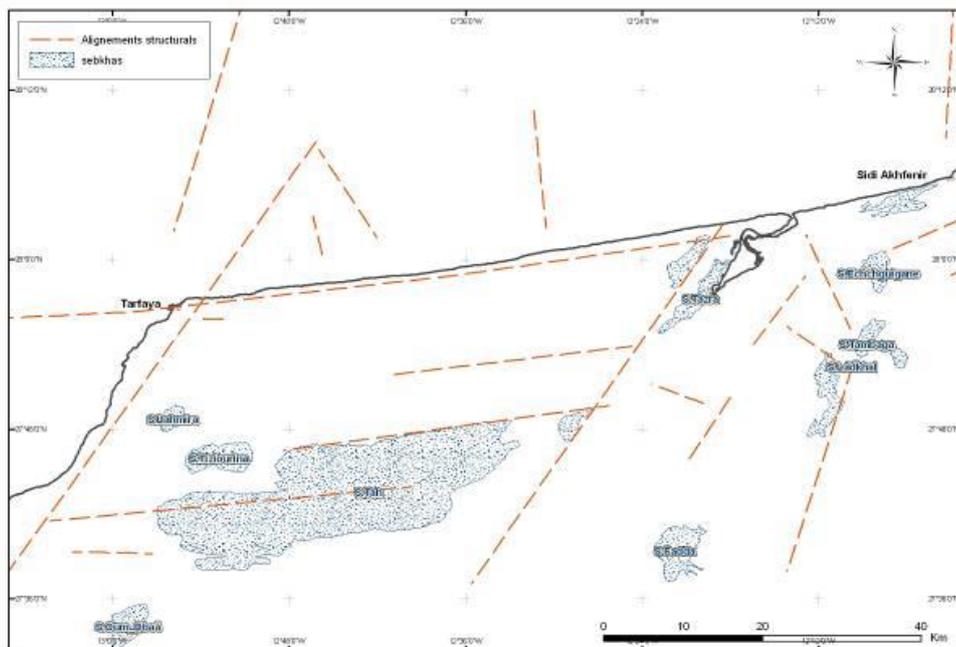


Figure 1 :- Principaux alignements relevés au niveau de la zone d'étude [1]

2-4. Géomorphologie

Le caractère plat constitue l'allure générale du relief au niveau de la zone d'étude. Cependant plusieurs unités géomorphologiques peuvent y être distinguées. Une plate forme côtière présente sur la totalité de la zone d'étude, et dont la superficie prend de l'importance en allant vers le sud et sud-ouest, Il s'agit d'une plaine constituée majoritairement par un plateau calcaire relativement plat dont l'altitude oscille autour de 30 m [4]. Ce vaste étendu offre un espace favorable pour la mise en mouvement d'énormes masses de sable, Les dunes de la région étudiée sont constituées majoritairement par des barkhanes [5,6], qui se prolongent plus loin au sud de Tarfaya sur plusieurs centaines de kilomètres. Cette plate forme est bordée par des falaises vives constituent sa limite côtière et dont les altitudes varient entre 0 m et 20 m. A l'intérieur des terres s'élèvent d'importants entablements Hamadiens qui dépassent les 200 m s'altitude. Les Hamadas sont découpées par oued Khaoui En Naam et par la vallée d'oued Awedri. Plusieurs Sebkhhas caractérisent la zone d'étude, ce sont d'importantes dépressions sans écoulement [2] de dimensions très variables dont la plus spectaculaire est celle de « Sebkhha Tah » qui dépasse les -60 m de profondeur [3].

2-5. Cadre climatique

La zone d'étude appartient à l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud marqué par la présence des alizés et cela par son appartenance au domaine boréal de l'alizé maritime, dont l'indice RDP/DP est de l'ordre de 0,91, ce qui le rend l'un des vents les plus constant au monde [7]. Ces vents sont fréquents de mars à septembre avec une quasi-exclusivité durant les mois d'été [8], leur vitesse atteint les 34 m/s et dont les plus forts proviennent du secteur Nord-Nord-est [5] (*Figure 2*).

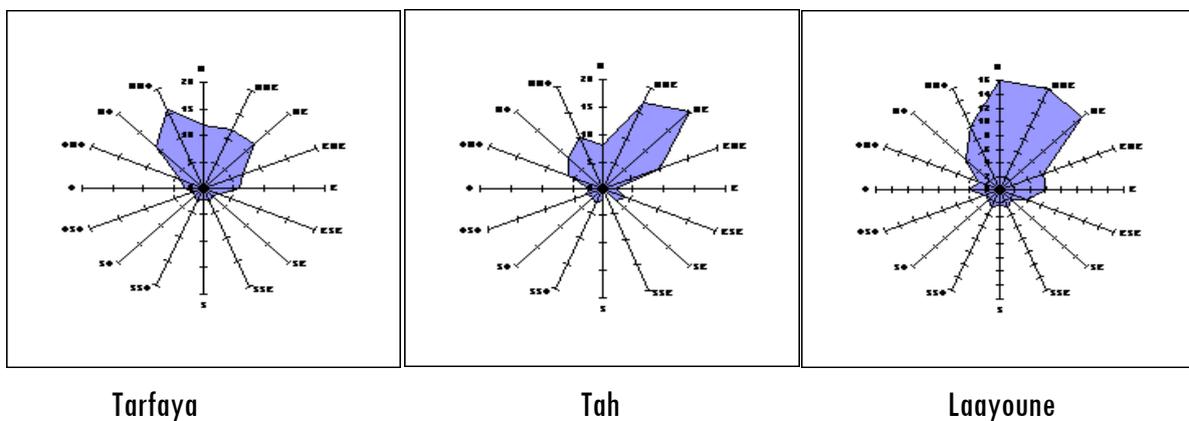


Figure 2 : *Roses de vents dans les stations de Tarfaya, Tah et Laayoune [9]*

La zone d'étude a un caractère aride, à l'image du caractère fondamental des domaines sud atlantiques [9]. Les précipitations sont très faibles et souvent compensées par des précipitations occultes [10], la pluviosité moyenne ne dépasse guère les 100mm/an, et constitue le seul apport d'eau douce au niveau de la lagune de Khnifiss. Le climat de la zone d'étude est caractérisé aussi par : Une forte nébulosité, avec une moyenne annuelle de cinq dixièmes. Elle diminue du littoral vers l'intérieur du continent ; un régime thermique modéré, avec une température moyenne de l'ordre de 19°C ; une forte humidité qui diminue en s'éloignant de la côte, avec une moyenne annuelle de 80% à Tarfaya, 70% à Laayoune et 60% à Tah ; des valeurs d'évaporation potentielle très élevées en comparaison avec la pluviométrie de la région. Ce qui explique la menace permanente de dessiccation du sol et du balayage des faibles épaisseurs de limons fertiles disponibles au niveau des vallées.

3. Matériel et méthodes

L'étude du phénomène d'ensablement au niveau de la lagune de Khnifiss a nécessité une intervention sur deux échelles ; une étude macroscopique à travers l'usage de l'imagerie satellitaire et une seconde microscopique qui s'intéresse aux grains de sable proprement dite à travers les analyse granulométriques et morpho-scopiques.

3-1. Utilisation des images satellitaires

Dans la présente étude, le choix du type d'image satellitaire fut exigé par le vaste étendu que prend le phénomène dans son évolution. Il s'est avéré que l'usage d'image Landsat7 TM de différentes dates (1987, 1988 et 2003) fut utile, d'autant plus que ce type d'image sont dotées de sept bandes dont les résolutions sont de 28 m et couvre des domaines spectraux allant du bleu du visible à l'infrarouge thermique. La souplesse numérique et les attraits multi-spectraux de l'imagerie satellitaire en ont rapidement fait un atout complémentaire, voire supplémentaire, aux missions de terrain. Avant tout usage toutes images satellitaires doit subir une série de prétraitements qui améliore la qualité et la fiabilité de l'image. Ces prétraitements se résument dans deux étapes : Une correction géométrique : un traitement qui consiste à corriger les distorsions liées à la rotation terrestre et aux effets d'altitude. Les scènes d'images satellitaires dont on dispose bénéficient déjà d'une correction géométrique ; une amélioration du contraste de l'image : ce traitement repose sur la redistribution des valeurs pixellaires afin que ces dernières couvrent un intervalle compris entre 0 et 255.

L'usage des images satellitaire consiste à appliquer un certains nombres de traitements. Ces traitements ont l'objectif de masquer certaines informations dans le but d'en ressortir d'autres. Ces informations consistent à ressortir les grands axes structuraux de la zone d'étude, et arriver à faire sortir les accumulations dunaires. A travers les différentes missions de terrains entrepris dans la zone d'étude, il s'est avéré que les accumulations sableuses acquièrent une géométrie particulière sous une forme linéaire, dont l'application de filtres directionnels fut utile. Au niveau de la zone d'étude nous avons eu recourt à l'application de filtres directionnels de Sobel, ce type de filtrage s'appuie sur la modification statistique qui gèrent une distribution binomiale où les valeurs hautes et basses sont associées aux linéaments et les valeurs moyennes aux espaces homogènes [11]. Trois directions de filtrage ont été appliquées : Application du filtre de direction Sud dans le but de faire apparaître les structures EW (**Tableau 1**):

Tableau 1 : Matrice du filtre directionnel Sud [11]

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

Application du filtre NW pour mettre en évidence les structures orientées E-W (**Tableau 2**):

Tableau 2 : Matrice du filtre directionnel NO [6]

1	1	0
1	0	-1
0	-1	-1

Application d'un filtre directionnel N70, qui répond à la forme mathématique suivante (7), où A est l'angle considérée et qui est égale à 70° (**Tableau 3**):

Tableau 3 : Matrice du filtre directionnel Nord 70° [12]

$$\text{Cos A} * \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} + \text{SinA} * \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$

3-2. Echantillonnage et analyses de laboratoire

L'échantillonnage du sable s'est déroulé suivant quatre transects en partant de la côte vers l'intérieur des terres, cette opération a intéressé le sable des accumulations dunaires les plus dominantes et les plus mobiles dans la zone d'étude. Dans le but d'apporter une réponse à la problématique, qui est de dévoiler l'origine des sables, deux critères ont été adoptés ; D'abord le critère granulométrique qui a pour but de définir la texture du sédiment et d'en déduire la compétence des agents de transports et expliquer les conditions de dépôt. Ensuite le critère Morphoscopique, Cette étude permet de percevoir l'histoire antérieure des sables récoltés. Ainsi leur observation se fait sous la loupe binoculaire [13].

4. Résultats et discussion

4-1. Traitements par télédétection

L'application du filtrage directionnel a permis de mettre en exergue différentes structures (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Filtres directionnels appliqués et type de structures rehaussées

Filtre utilisé	Canal utilisé	Direction de la structure rehaussée	Type de structure rehaussée
Nord-Ouest	TM 5	OSO-ENE et NE-SW	-Linéaments structurales (Asselsoul) ; -Trait de côte.
Sud	TM 7	NNE-SSO	Géométrie du cordon dunaire principal.
Nord 70°	Image entière	-	La totalité des champs dunaires

Les trois résultats du filtrage directionnel ont fait l'objet d'une trichromie (**Figure 3**) qui nous permet de mettre en évidence pour la première fois dans cette zone un véritable moteur d'ensablement, à savoir un fleuve de sable qui roule comme son nom l'indique des sables et non des eaux et remonte en amont.

La corrélation entre l'emplacement des sites ensablés ou en cours d'ensablement et la position de ce fleuve fait que son étude est primordiale compte tenu des objectifs fixés.

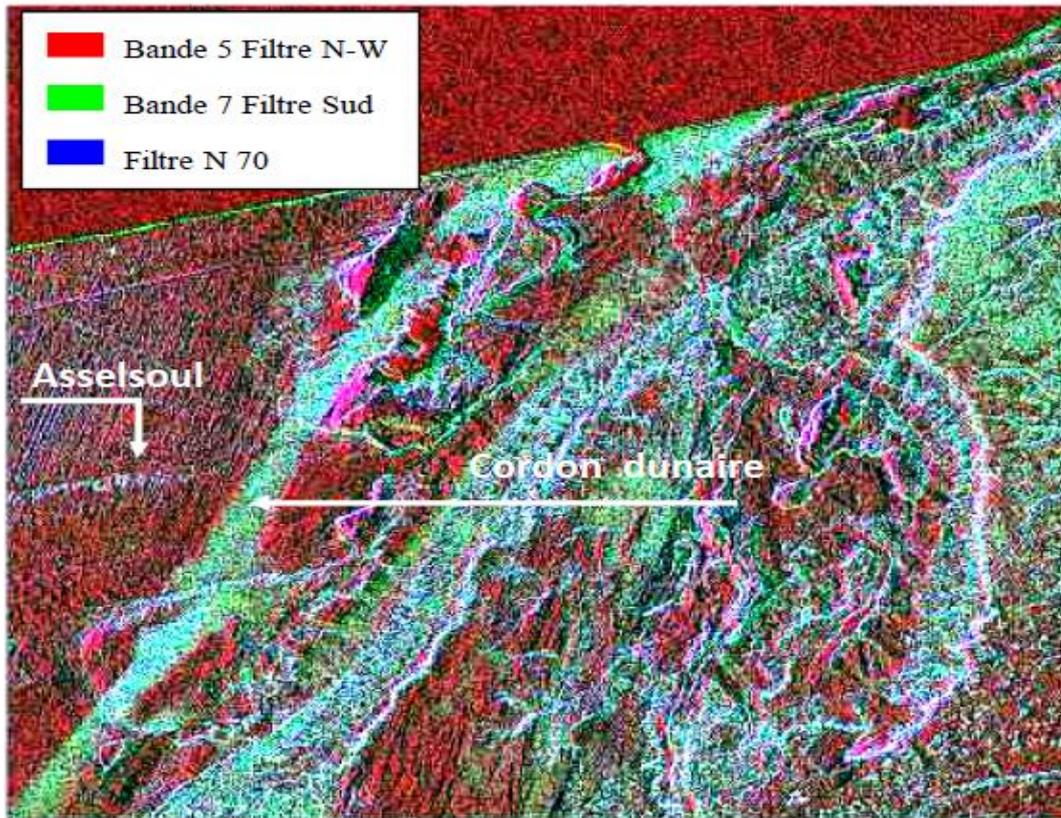


Figure 3 : *Trichromie réalisée à partir des résultats de filtrages directionnels*

Les travaux de terrain montrent que ce fleuve de sable, orienté NNE-SSO est à lui seul responsable des principaux ensablements causés à la lagune de Khnifiss mais aussi au réseau routier et aux autres infrastructures économiques. Cette structure dunaire est alimentée par des apports sédimentaires qui prennent naissance à l'Est de Foug Agoutir (Lagune de Khnifiss). Ce fleuve apparaît sous forme de deux branches localisées de part et d'autre de l'embouchure de la lagune. Ces deux branches se rejoignent au Sud de la Sebkhia Tazgha après un parcours de près de 20 km. Elles forment alors une bande unique large de 21,24 Km qui traverse les sebkhias L'Azayez et Hwiselgah. Les deux branches se séparent quelques kilomètres après la sebkhia Hwiselgah. Les deux branches du fleuve descendent plus loin jusqu'à atteindre la Sakia El Hamra où elles restent nettement individualisées et orientées NNE-SSO.

4-2. Caractères sédimentologiques

4-2-1. Granulométrie

L'étude des caractéristiques granulométriques des échantillons récoltés montre que les dépôts dunaires sont en majorité des sables fins à moyens dont les médianes vont de 0.143 à 0.256 mm. Les sables grossiers se rencontrent rarement et ne sont dus qu'au piégeage générés au niveau des nebkas et buttes. Cela signifierait que la dynamique de transport dans cette zone est élevée. Les courbes granulométriques sont bien redressées, elles ont une forme sigmoïde et une pente importante. Les paramètres sédimentologiques calculés indiquent une dynamique de mise en place d'énergie et de compétence moyenne à forte. En allant du littoral vers l'intérieur des terres on constate une amélioration de l'écart type (< 0.71) et de l'indice de Task (< 2.5). Cette amélioration s'explique par le perfectionnement du tri, ceci s'accompagne parallèlement d'une baisse de la moyenne (*Figure 4*).

La différence au niveau du tri s'explique par la différence de dynamique, elle est principalement marine pour les sables de l'estran, alors qu'elle est éolienne et s'affirme de plus en plus avec l'éloignement de la côte. Le passage de l'une à l'autre se fait très vite: les grains acquièrent rapidement un caractère continental amorcé déjà au niveau des dunes bordières littorales développées au niveau des plages.

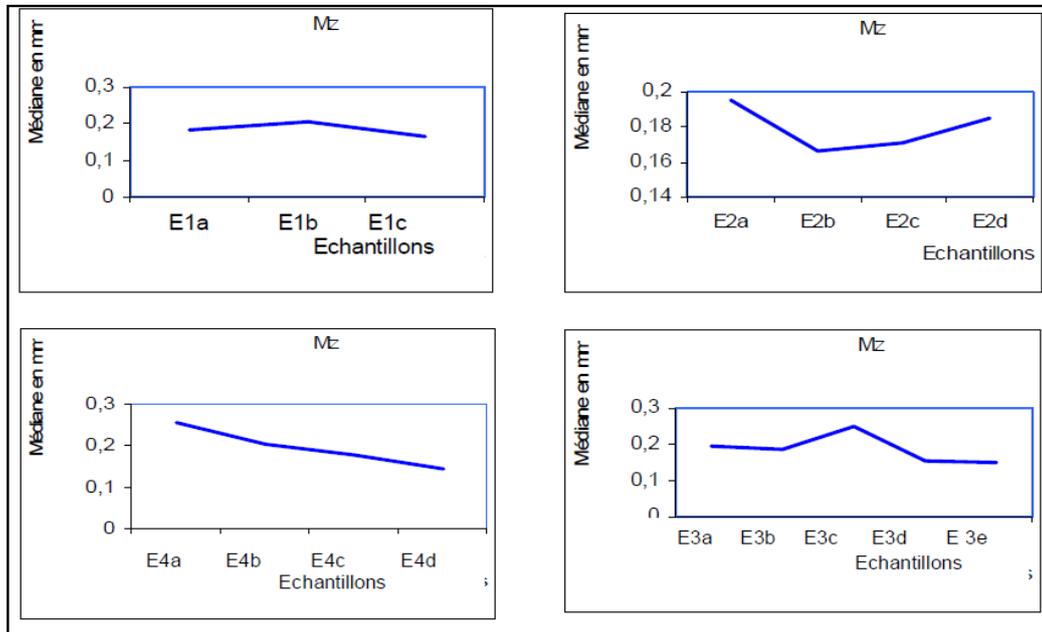


Figure 4 : Variation des Médiane le long des transects d'échantillons

Les sables de plage sont plus fins que ceux de barkhanes qu'ils forment plus loin. Ceci s'explique par le fort pouvoir hygroscopique des grains fins qui s'opposent à leur éolisation. Ainsi sur l'estran, le vent n'emporte que les grains les plus gros, qu'on retrouve dans les premières barkhanes littorales.

4-2-2. Morpho-scopie

Les sédiments dunaires montrent une nette prépondérance des grains picotés dont les taux varient entre 34% à 64 %. Les grains mats occupent la seconde position avec des pourcentages allant de 12% à 36%. On retrouve des picotés luisants, des luisants et des non usés mais à des proportions beaucoup plus faibles. Pour ce qui est de la forme des grains, les sub-émoussés dominent avec des pourcentages allant de 28 % à 58%. Ils sont suivis des émoussés (24% à 56%) et des non usés qui viennent en troisième position (4% à 24 %). On constate que dans les échantillons issus des grandes accumulations dunaires de type Barkhane que les grains mats et les grains picotés prennent des proportions importantes et cela est du à leur éolisation. Les grains picotés luisants, sont observés au niveau des petites accumulations, cela signifie que les grains en question ont subi un façonnement hydrique. L'aspect luisant est le résultat d'un long séjour des grains dans l'eau et aussi d'un brassage mécanique des Grains. Le calcul de l'indice d'émoussé, donne des valeurs qui vont de 0,215 à 0,286, cela indique un émoussé assez important des grains, mais reste proche de celui rencontré dans un milieu aquatique (fluviate ou marin). Cependant on peut dire que l'usure des grains des dépôts dunaires de la zone d'étude, a été acquise lors d'un séjour des grains dans le milieu marin, et que le façonnement éolien des grains n'est pas assez important.

5. Conclusion

La conjugaison entre plusieurs méthodes de recherche et d'investigation, permet de mettre en relation les différents éléments existants au niveau de la zone d'étude, à savoir, le vent, le relief et le sable. L'origine de l'ensablement et la cartographie des zones ensablées ont été réalisés par l'intermédiaire des missions de terrain et des images satellitaires, dont et l'attrait la souplesse numériques ont permis par l'application de traitements à cerner une problématique difficile et dont l'extension est très importante. L'analyse granulométrique et morphoscopique nous a permis de dévoiler l'origine marine du matériel transporté, et ainsi de cerner la problématique de l'ensablement dans la zone étudiée. Nous espérons avoir contribué par notre quête de l'origine des ensablements à la préservation de la lagune car sa survie et la régulation de son dynamisme dépendent de sa communication avec l'océan qui assure le renouvellement des eaux et l'amélioration de leur qualité d'où toute l'importance du maintien de cette communication.

Références

- [1] - B. KABACHI, "Dynamique hydro-sédimentaire et étude morpho-structurale du bassin océanique aride de Tarfaya" (SW-MAROC) (2001).
- [2] - G. CHOUBERT, A. FAURE MURET & L. HOTTINGER, "Aperçue géologique du Bassin côtier de Tarfaya (Maroc méridional)". Notes et mém. Serv. Géol, MAROC. 175/1 pp.12 -13(1966).
- [3] - L. ORTLIEB, "Recherche sur les formations plio-quadernaires du littoral ouest-saharien". Travaux et documents de l'ORSTOM Paris., pp 17 et 19 (1975).
- [4] - H. ELBELRHITI, "SUIVI MORPHODYNAMIQUE DES BARKHANES PAR COUPLAGE TÉLÉDÉTECTION ET MESURES GPS, APPLICATION AU SUD-OUEST DU MAROC". Revue Télédétection, vol. 10, n° 1, (2011) p. 32-42.
- [5] - G. SAUERMANN, P. ROGNON, A. POLIAKOV et H. J. Hermann, The shape of barchan dunes of southern Morocco. *Geomorphology*, vol. 36, (2000) p. 47-62.
- [6] - H. ELBELRHITI, P. CLAUDIN and B. ANDREOTTI, Barchan dunes corridors: Field characterization and investigation of control parameters, *J. Geophys. Res.* Vol 13. F02S15. Doi :10.1029/2007JF000767(2008).
- [7] - H. ELBELRHITI., Morphodynamique des barkhanes: Etude des dunes du Sud-Ouest Marocain. Thèse Université Paris VII, France. (2005) 165p.
- [8] - A. LAKHDAR IDRISSE, " Etude de fonctionnement et d'organisation de deux milieux paraliques du littoral marocain: la lagune de KHNIFISS (Atlantique) et la baie de M'DIQ (Méditerranée) ", (2004) pp : 14-16.
- [9] - B. OUCHCHAM, "Transit littoral et évolution morpho-sédimentaire de la côte Atlantique Sud Marocaine entre le Cap Ghir et le Cap Juby. Validité du modèle de McLaren et Bowles (1985) ". Thèse. Univ. Med V. Rabat, (1996) 151p.
- [10] - H. DELANNOY, Contribution à l'étude climatologique de la province de Tarfaya (Maroc). In : Contribution à l'étude scientifique de la province de Tarfaya. Trav. Inst. Chér., série générale, vol. 3 (1975) p. 15-60.
- [11] - F. BONN et G. ROCHON, "Précis de Télédétection, v.1. Principes et méthodes". Presses de l'université du Québec/AUPELF. (1992) P 329. 485p.
- [12] - R. M. HARALICK, "Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives ", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence ISSN 0162-8828 CODEN ITPIDJ. vol. 6, no1, (1984) pp. 58-68 (20 ref.).
- [13] - Méthode L.I.G.U.S). "Méthode du laboratoire de l'institut de géographie, Université de Strasbourg". Mise au point par J. Trickart (1958).