



Modélisation du transport éolien dans le système dunaire: cas de la plage d'Essaouira (Maroc)

Jules DEMOMENT ¹, Sanae CHARIQ ², Abdelhadi EL MIMOUNI ²,
Mouncef SEDRATI ¹, Fouad LOTFI ³, Fadma TOUFIQ ²

1. Laboratoire Géosciences Océan, Geo-Ocean UMR 6538, Université Bretagne Sud, Université de Bretagne Occidentale, CNRS, Ifremer, Vannes, France.
2. Laboratoire de Géomorphologie et Environnement, Facultés des Lettres et Sciences Humaines de Marrakech, Maroc.
a.elmimouni@uca.ma
3. Faculté polydisciplinaire Taroudant, Université Ibn Zohr, Exploration et Gestion des Ressources Naturelles et Environnementales – EGERNE, Hay El Mohammadi (Lastah), BP 99, 271, CP 83000 Taroudant, Maroc.

Résumé :

Essaouira, possède des plages qui sont exposées toute l'année à des vents N- NNE engendrant des déplacements des sédiments le long des plages sur la côte. Ce phénomène est en grande partie responsable de la formation, puis du déplacement de dunes le long de la plage. Au regard des résultats des études, le littoral d'Essaouira présente un milieu dynamique avec des vitesses de vents qui marque une intensité maximale en après-midi. Le flux est assez important est de l'ordre de 0,5 à 2 kg/mn/m². Ces valeurs ont permis de constater un déplacement rapide des dunes de 30 cm/jour à 60 cm/jour en fonction de l'intensité et de la vitesse du vent. C'est un transit du Nord de la plage où elles naissent jusqu'à l'embouchure de l'Oued Ksob où elles perdent leurs stocks de sable petit à petit.

Mots clés :

Transport sableux, Pièges à sables, Leatherman, Dune, Littoral, Essaouira, Maroc.

Abstract:

Essaouira's beaches are exposed during the whole year to the N- NNE sea winds, and causing sediment movements along the coast. This phenomenon is largely responsible of the formation and then the dunes movement along the beach of Essaouira. Considering the results of this studies, the Essaouira coast presents a very dynamic area, characterized by an important wind velocity recorded Its maximum in afternoons. The flow is quite significant, around 0.5 to 2 kg/min/m². These values made it possible to observe a rapid movement of the dunes from 30 cm/day to 60 cm/day depending on the

Hors session

intensity of the wind speed. It is a transit from the North of the beach where they are born to the outlet of Ksob Oued, where they lose their sand stocks smoothly.

Keywords:

Sand transport, Sand traps, Leatherman, Dune, Coastline, Essaouira, Morocco.

1. Contexte et objectifs de l'étude

Essaouira (70 000 hab.) "ville des vents" dont les vents dominants prennent une direction N à NE proviennent des alizés favorisant le transport éolien qui cause l'ensablement des aménagements de la ville du Nord vers Sud. La lutte contre le déplacement naturel et l'ensablement a démarré au début du XXème siècle (LAHMADI, 2013) grâce à la plantation d'une végétation variée et adaptée au climat semi-aride de la région (Acacia cyanophylla, Juniperus phoenicea, eucalyptus...). Toutefois, la récolte sauvage du bois et le prélèvement illégal des sables pour la construction accentuent le déplacement des dunes (SIMONE, 2000).

L'étude des déplacements des sables a fait l'objet d'une multitude de mission de terrain dont l'objectif est de quantifier le taux de sables transportées par le vent, et de mesurer la vitesse de déplacement des dunes. C'est dans cette optique que cette étude a été entreprise au Nord de l'Oued Ksob afin de préciser les déplacements des barkhanes en haut de la plage durant plusieurs mois. Cette étude intègre un contexte hydro-sédimentaire dynamique a été entreprise afin d'évoquer également les conséquences de la mise en service d'un important barrage à 30 km en Amont de l'Oued Ksob.

2. Localisation et caractéristiques et du site d'étude

2.1 Localisation géographique et géographie du secteur

La région d'Essaouira est délimitée au Nord par le cap *Hadid* et au Sud par le cap *Sim* avec un linéaire côtier de près de 34 km sur la façade Atlantique marocaine (31°30N, 9°50 W) (Figure 1). Cette zone possède des environnements d'une grande diversité morphologique à savoir : des baies, des estuaires, des plages sableuses et des côtes rocheuses avec falaises.

La baie d'Essaouira est délimitée au Nord par des aménagements portuaires et au sud par l'Oued Ksob matérialisé par la présence des barkhanes objet de cette étude (Figure 1). La zone d'étude s'étend depuis la plage de l'Oued Tensift au Nord jusqu'au l'Oued Souss au sud.



Figure 1. Localisation du secteur d'étude au Sud de la ville d'Essaouira, (Google Earth, Modifier).

2.2 Climat

La plage d'Essaouira est influencée par une marée mésotidale, connaît une température douce toute l'année (16-28°C) dont une conséquence de puissants vents qu'on les mêmes caractéristiques que les vents des alizés, et qui rafraichissent l'air de la zone. Les précipitations sont faibles à Essaouira (moy. 350 mm/an) en raison du climat semi-aride de la région caractérisé par l'individualisation de 2 principales saisons. La quasi-totalité des précipitations a eu lieu durant la saison humide de l'année (Octobre à Mars). En effet, la saison sèche peut durer jusqu'à 7 mois avec des pics durant les mois de Juillet et d'Août (EL MIMOUNI, 2009)..

3. Matériels et méthodes

3.1 Principe et échantillonnage

Le prélèvement des échantillons de sable destinés à l'étude des barkhanes est primordiale pour déterminer la vitesse de transport et la taille des grains de sables à déplacer. L'analyse granulométrique sert à préciser la taille des particules afin déterminer la source des flux sédimentaires constatés sur la dune. Le traçage des itinéraires est permis grâce à la mise en place de plusieurs pièges à sable de type Leatherman constitués par un tube de 12 cm de diamètre où deux fentes de 6cm de large ont été découpées (Figure 2) (BRETEL. & LEVOY, 2002). Le principe d'une telle installation est de pouvoir déterminer l'origine et le moment du déplacement. La durée de récolte des mesures s'étale de 10 à 20 minutes, permettant de récolter des échantillons plus de 1 kg de sédiment par piège. Les tubes sont enterrés au niveau de l'ouverture de la front et couvrent le dos du barkhane à différents endroits. Les échantillons récoltés sont pesés pour un traçage du maximum de transport. d'autres sont prélevés au niveau du dos et des cornes et sont destinés à l'analyse granulométrique.

Hors session

3.2 Calcul du taux de transport

Les conditions de vents nécessaires au calcul des formules de taux de transport sont offert sur le site windguru.cz dont on peut obtenir les prévisions du vent à l'échelle mondiale.

Concernant les prévisions de vent, le modèle prend en compte des données mesurées par une station à 20 km au large d'Essaouira qui enregistre les conditions de vent à 10 m de haut. Par la suite, un modèle météorologique (GFS) est utilisé pour affiner ces prévisions.

Les formules les plus utilisées pour calculer le taux de transport théorique sont celle de BAGNOLD (1935) et de ZINGG (1953). Ces équations permettent de comparer le transport sédimentaire éolien théorique avec celui calculé à partir des échantillons récoltés avec les pièges de sable (CHAIBI *et al.*, 2014).

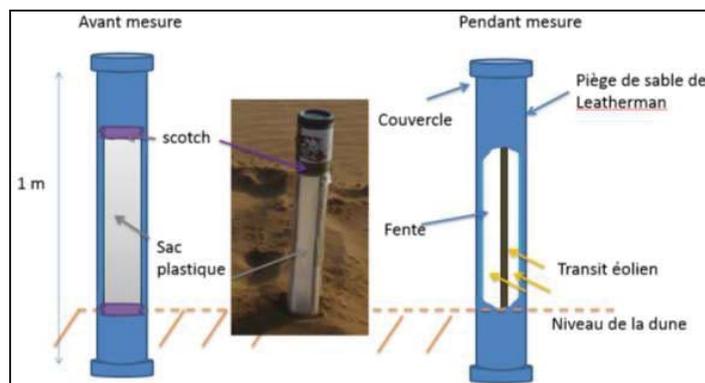


Figure 2. Schéma illustratif du piège de sable de LEATHERMAN (1978) utilisé.

L'application de ces équations nécessite la détermination de la vitesse au seuil d'arrachement, selon l'équation (1) :

$$u_{*c} = K \times \sqrt{[(\rho_s - \rho_a) \times g \times D_{50} / \rho_a]} \quad (1)$$

le taux de transport en g/s/cm selon BAGNOLD (1935) :

$$Q = K \times (D_{50} / D)^{0,50} \times (\rho_a / g) \times u_*^3 \quad (2)$$

et le taux de transport selon ZINGG (1953)

$$Q = K \times (D_{50} / D)^{0,75} \times (\rho_a / g) \times u_*^3 \quad (3)$$

où Q = taux du transport en g/s/cm ; K = coefficient d'ajustement (1,5 pour les sables homogènes ; 1,8 pour les sables bien classés ; 2,5 pour les sables mal classés) ; D_{50} = la taille moyenne des sables étudiés en mm ; D = la taille théorique d'un grain moyen standard (0,250 mm) ; ρ_a = la densité de l'air ($1,226 \times 10^{-3}$ g/cm³) ; g = l'accélération par la gravité (980 cm/s²) et u_* la vitesse de frottement en cm/s ; avec un vent enregistré à 10m/s, qui est la vitesse des alizés mesurée sur le terrain le jour de l'échantillonnage.

4. Résultats

4.1 Conditions de vent à Essaouira

Les données fournies par le site web windguru montrent en moyenne des vents provenant en grande partie du Nord puisqu'il est normal en cette saison que les alizés maritimes soufflent vers le Sud et le Sud Ouest. L'intensité de ces vents, et les prévisions coïncident également aux observations constatées sur le terrain (Figure 3).

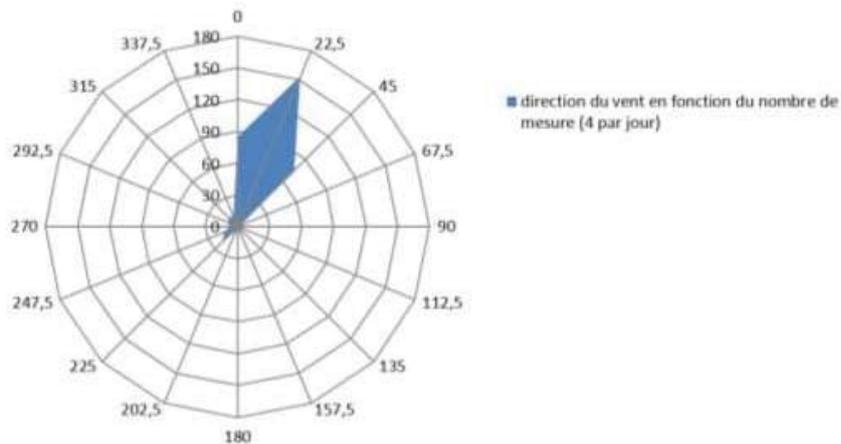


Figure 3. Rose des vents des conditions prédites d'avril à juin par la station de mesure d'Essaouira (données Windguru).

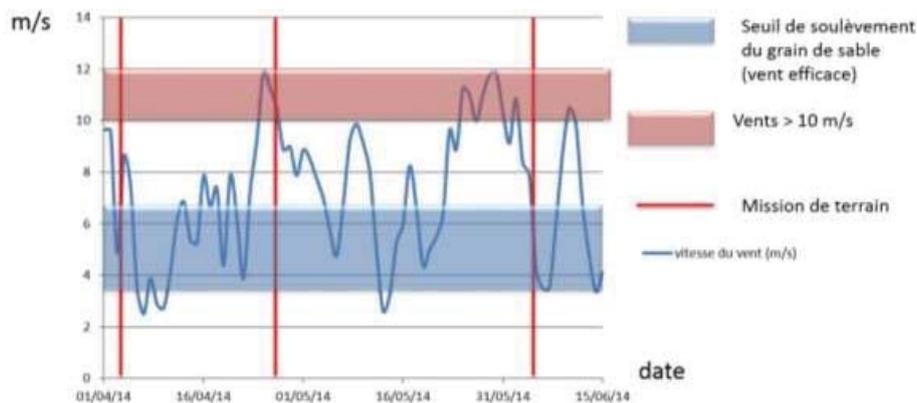


Figure 4. Représentation des conditions du vent couvrant la période d'étude (données Winguru).

L'interprétation de la figure 4 nous permet de formuler une première idée des tendances concernant l'hydrodynamisme éolien pendant la période d'étude. Ainsi, on remarque que les vents sont pratiquement tous les jours assez puissants pour faciliter le mouvement du sable. En effet, on constate que le seuil à partir duquel le vent est "efficace", est de l'ordre d'une vitesse du vent sur la journée dont 80% du temps au-dessus de 4 m/s que l'on prendra comme limite de vitesse du vent au seuil d'arrachement (vent actif). Durant cette étude de missions de

Hors session

terrain, les vitesses du vent étaient très intenses les après-midis pendant les deux premières missions à l'encontre de la dernière où le vent était pratiquement inexistant ou on avait noté l'absence de déplacement éolien.

4.2 Granulométrie et transport éolien

4.2.1 Mission I

Cinq pièges de sables ont été implantés durant cette première mission. L'analyse des échantillons nous montre la présence d'un sable fin assez homogène avec des tailles de grains situés majoritairement entre 120 et 450 μm (Figure 5) ayant été classé en trois classes : Classe I : 100-200 μm , Classe II : 200-300 μm , Classe III : >300 μm . La taille moyenne des grains est de 234 μm et avec une DL_{50} de 220 μm . Ces résultats ont servi à déterminer le transport théorique de sable éolien et de comparaison aux résultats des mesures effectuées.

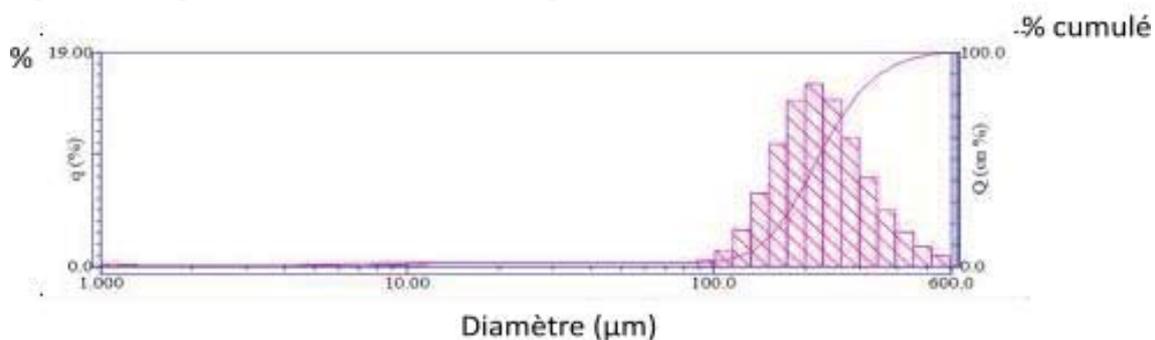


Figure 5. Répartition granulométrique de l'échantillon de sédiment n°6 prélevé au niveau du dos de la barkhane.

Les résultats des mesures obtenues ont permis de constater que le transit éolien semble bien plus important au milieu du dos de la barkhane par rapport aux côtés de la dune. La vitesse des vents enregistrée varie de 9 à 11 m/s et d'une direction NE-SW, ce qui suffit amplement à provoquer un important transport éolien.

4.2.2 Mission II

Trois pièges de sable ont à nouveau été déployés pendant la deuxième mission afin de comparer les masses des échantillons avec les vitesses de vents enregistrées. Les valeurs obtenues sont très similaires à celles de la première mission, de plus nous avons un vent de NE enregistré à 10 m/s entre 10 h et 13h, soit dans le même ordre de grandeur que la vitesse du vent de la première mission.

4.3 Taux de transport théorique du sédiment éolien

- Vitesse de cisaillement, $U^* = 0,41$ m/s

avec une vitesse de vent de 10 m/s à une hauteur de 10 m

$U_z = 10$ m/s, $k = 0,41$, $D_{50} = 219 \mu\text{m}$, $\rho_{\text{air}} = 1,226$ kg/m³, $\rho_{\text{sable}} = 1500$ kg/m³

- Vitesse au seuil d'arrachement : $u^*_c = 2,43$ m/s

- Taux de transport en g/s/cm (BAGNOLD, 1935) :

$Q = 0,12$ g/s/cm, $Q = 0,72$ kg/min/m²

- Taux de transport (ZINGG, 1953)

$Q = 0,1$ g/s/cm, $Q = 0,6$ kg/min/m²

4.4 Taux de transport observé sur la plage

Les valeurs obtenues grâce à l'échantillonnage sur le terrain sont reportées sur la figure 6. On remarque que l'évolution du taux de transport suit une courbe inverse à la forme de la barkhane. Les valeurs ne descendent pas en dessous 500 g/min/m² et peuvent dépasser 2 kg/min/m². Ainsi, le transport sédimentaire diminue quand on s'éloigne du sommet qu'on se dirige vers les cornes de la dune. Les valeurs de transport sont plus faibles pour la deuxième mission puisque les vitesses de vent ne dépassaient pas 10 m/s pendant la deuxième mission contre 11 m/s pendant la première.

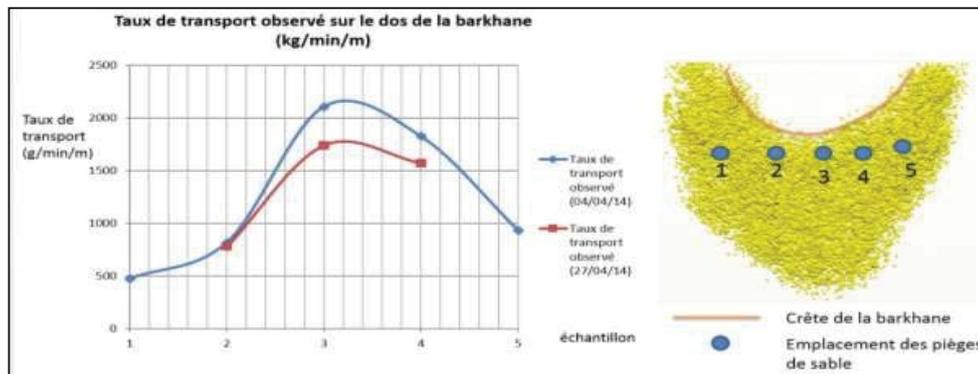


Figure 6. Comparaison du taux de transport observé pendant les deux premières missions.

5. Discussion

Au regard des résultats et des graphes obtenues, il est clair que le littoral d'Essaouira présente un milieu dynamique avec des vitesses de vents qui marquent une intensité maximale en l'après-midi (Figure 7). Ce dynamisme nous est constaté par la quantité de sable transporté tout le long de la plage dont un flux est de l'ordre de 0,4 à 1,2 kg/mn/m². Ces valeurs ont permis de constater un déplacement rapide des dunes de 30 à 60 cm/jour en fonction de l'intensité de la vitesse du vent. La zone semble s'apparentée à une route où l'on constate sans cesse le passage du sable dans des couloirs qui forment au fur et à mesure des traînées de sable fin (PONS *et al.*, 2002). Ces couloirs finissent ensuite par se réunir près du fleuve (Figure 7). C'est un transit du Nord de la plage où elles naissent jusqu'à l'embouchure de l'Oued Ksob où elles perdent leurs stocks de sable petit à petit. Le sédiment s'engouffre alors chaque jour dans le lit de l'estuaire (Figure 7). Ce phénomène est observable à l'œil nu lorsque la vitesse du vent s'élève (EL MIMOUNI & DAOUDI, 2012), puisqu'il est possible de discerner une couche plus claire de sable en suspension de plusieurs dizaines de mètres de large, près de la rive de l'Oued. La granulométrie fine des sédiments ainsi que la disponibilité d'un vent unidirectionnel contribue à créer cette dynamique unique a permis l'observation une telle mobilité le long de la plage (HERSEN, 2004).



Figure 7. Phénomène du transit éolien au Nord de l'Oued Ksob, (Maroc).

Le phénomène de déplacement des barkhanes peut être observé en temps réel, puisque lorsque le vent souffle en direction du Sud, on constate que le front de la dune devient un endroit très turbulent où les sédiments en transit sont piégés dans des courants contraires (HACHEMI & THOMAS, 2013)

Le train de dune est impressionnant puisque 3 barkhanes de plusieurs dizaines de mètres de long se succèdent sur le site d'étude en moins de 3 mois. La mobilité est telle qu'on a l'impression à juste titre que la configuration du terrain change complètement entre chaque mission. La redistribution du sédiment est réalisée grâce à l'effet de chasse de la marée basse, qui va remettre en suspension le sable dans la masse d'eau, puis attirer ces eaux vers la mer (Figure 8). Toutefois, la construction du barrage Moulay Abderrahmane (Zerrar) réduit le débit de l'Oued au minimum et favorise petit à petit la formation d'une petite lagune. En effet on peut observer ce phénomène en été lors de la saison sèche, quand les débits sont vraiment très faibles. En plus du transport des sédiments issus de la plage, on peut voir que le cordon littoral apporte également de grande quantité de sable vers le Sud puisqu'il est capable de recouvrir en partie les barkhanes du site d'étude.



Figure 8. Embouchure du Ksob en été, présence de nombreux galets sur la plage d'Essaouira, (Maroc).

Les galets déposés par les anciennes crues et les sables transportés par les vents en provenance du nord bloquent l'accès de l'embouchure à la mer, ce qui permet la création d'une étendue d'eau plus ou moins douce où les oiseaux viennent se reposer. Le problème est que le vent continue de souffler très fort pendant la saison sèche, et que les sables peuvent tout à fait combler petit à petit la subsidence (EL MIMOUNI, 2009 ; MAANAN, 2003).

6. Conclusion et recommandations

A la suite des campagnes de mesures, les résultats ont montrés que les déplacements éoliens sont considérables le long de la plage allant de 0,5 à 2 kg/mn/m² de sédiments transportés, ce qui explique l'importance d'une fixation des dunes à grande échelle ainsi que son entretien. La raréfaction de la végétation entrainerait une remobilisation des sables et donc des champs de dunes à long terme.

Le problème de l'ensablement du secteur nécessite un suivi de la dune littorale et la surveillance de la forêt qui recouvre les champs de dune semble être une tâche importante dans les années à venir. Ainsi, on peut retenir que la protection restera difficile si on ne réduit pas la liberté de mouvement de la population et des touristes sur ces environnements. La solution viendra peut-être par la mise en place d'aménagements souples (ganivelles, barrières, chemin côtiers) et par un entretien constant des dunes littorales.

7. Références bibliographiques

- BAGNOLD R.A. (1935). *The movement of desert sand*, The Geographical Journal, 85(4), 342–365. <https://doi.org/10.2307/1785593>
- BRETEL P., LEVOY F. (2002). *Quantification théorique des transports éoliens en milieu littoral à court terme : les limites pour une intégration à moyen terme*. VI^{ème} journées Nationales Génie Civil Génie Côtier, Anglet, France, 213-330, doi: 10.5150/jngcgc.2002.023-B
- CHAIBI M., MAANAN M., SABATIER F., CHARI, A., OUGOUGDAL, M.A., MALEK H.A. (2014). *Modélisation du transport éolien dans le système plage-dune de la baie d'El Haouzia (côte atlantique marocaine)*. Géographie Physique et Environnement, Varia, volume 8, 101-119, <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3872>
- EL MIMOUNI A. (2009). *Approche expérimentale de suivi de la dynamique morpho-sédimentaire du littoral d'Essaouira, Maroc : Implications pour un aménagement raisonné*, Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.
- EL MIMOUNI A., DAOUDI L. (2012). *Evolution à moyen terme du contexte hydrodynamique et morpho sédimentaire de la baie d'Essaouira (Maroc atlantique)*. XII^{èmes} Journées Nationales Génie côtier- Génie civil, Cherbourg, Editions Paralia, 273-280, doi: 10.5150/jngcgc.2012.028-E
- HACHEMI K., THOMAS Y.F. (2013). *Analyse de la mobilité d'un champ de barkhane (Mauritanie) à partir des images SAR, UPEC, LGP, SAGEO°13 (Spatial Analysis and GEomatics)*, Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale, 23-26 septembre 2013, Brest, France.
- HERSEN P. (2004). *Morphogénèse et dynamique des barkhanes*. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure. Université Paris VII, France.
- LAHMADI L. (2013). *Rôle de l'Oued de Ksob dans le maintien de l'équilibre dynamique et morpho sédimentaire du littoral d'Essaouira (Maroc)*, Mémoire de stage de fin d'étude, FSTG, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.
- LEATHERMAN, S.P., (1978). *A new aeolian sand trap design*. Sedimentology, 25 (2), 303-306. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1978.tb00315.x>

Hors session

MAANAN M. (2003). *Etude sédimentologique du remplissage de la lagune de Sidi Moussa (côte atlantique Marocaine). Caractérisations granulométrique, minéralogique et géochimique*. Thèse de doctorat, Université Chouaib Doukkali, El Jadida, Maroc.

PONS F., SABATIER F., TANGUY J.M., LAMBERT A. (2002). *Morphodynamique des dunes sous l'effet du vent : approches expérimentables et numériques*. VIème Journées nationales Génie Civil-Génie Côtier, Anglet, France, 187-194, doi: 10.5150/jngegc.2002.020-P

SIMONE C. (2000). *Le géosystème dunaire anthropisé d'Essaouira-Est (Maroc Atlantique) Dynamique et paléoenvironnement*. Thèse de Doctorat, Université Aix Marseille I, France.

VALANCE A. (2013). *Rides et dunes de sable*. Institut de Physique de Rennes, France.

ZINGG A.W. (1953). *Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material*. Proceedings of the 5th Hydraulics conference, Iowa City, USA, Studies in Engineering, vol. 34, Université d'État de l'Iowa, p. 111-135.

8. Webographie

GOOGLE EARTH (2017):

<https://earth.google.com/web/@31.50852988,-9.77100436,5.87514702a,18030.63405099d,35y,0.27519571h,0t,0r/data=OgMKATA>

WINDGURU.CZ (2017):

https://www.windguru.cz/archive.php?id_spot=26&id_model=3&date_from=2009-03-04&date_to=2017-04-12