



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mostefa Ben Boulaïd Batna-2-

Institut des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de Géographie et Aménagement du Territoire

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCOTRAT EN SCIENCES

Option : Aménagement du Territoire

Présentée par :

Nouar BOULGHOBRA

Thème

**Recherche sur la dynamique éolienne dans la
plaine du Tidikelt (Sahara méridional algérien),
en vue de la protection de la ville d'In-Salah
contre le risque d'ensablement**

Jury :

Président	Mr.	Mehdi KALLA	Professeur	Univ. Batna 2
Rapporteur	Mme.	Hadda DRIDI	Professeur	Univ. Batna 2
Examineur	Mr.	Makhlouf HADJAB	Professeur	Univ. M'Sila
Examineur	Mr.	Mohamed Saïd GUETTOUCHE	Professeur	Univ. USTHB
Examineur	Mr.	Makhlouf BOUTIBA	Professeur	Univ. USTHB
Examineur	Mr.	Hassen BENMESSAOUD	Maitre de conférences	Univ. Batna 1

2018

Dédicaces

Ma mère et mon père, mon frère et mes sœurs, mon épouse, mon fils et ma fille

Pr. Azeddine Mebarki

Sheikh Abdelhamid Merabta

Remerciements

Ma vive reconnaissance est adressée à **Mme. Hadda DRIDI**, professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherche doctorale, pour ses conseils, orientations et encouragement.

Je tiens à remercier **Mr. Mehdi KALLA**, professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd - Batna 2, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté de juger, évaluer et promouvoir cette recherche :

Mr. Makhlouf HADJAB, professeur à l'université Mohamed Boudiaf – M'Sila ;

Mr. Mohamed Saïd GUETTOUCHE, professeur à l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene – Alger ;

Mr. Makhlouf BOUTIBA, professeur à l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene – Alger ;

Mr. Hassen BENMESSAOUD, maitre de conférences à l'université El Hadj Lakhdar – Batna 1.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre Premier : Aspects physio–géographiques et climatiques	4
1. Localisation	5
2. Aspect topographique	5
2.1. Le plateau de Tademaït	5
2.2. La dépression d’In–Salah	9
3. Aspect géologique	9
3.1. Les formations dunaires	9
3.2. Le Quaternaire récent	10
3.3. Le Tertiaire continental	10
3.4. Le crétacé inférieur ou Continental Intercalaire	10
4. Ensembles géomorphologiques	10
4.1. Plateau calcaire du Tademaït	10
4.2. Les formations dunaires	13
5. Sols et végétation	13
6. Conditions climatiques et aridité	14
6.1. Une carence aigue en précipitations et en humidité	17
6.2. Un régime thermique extrême	17
6.3. Type de climat et aridité	17
6.4. Un régime de vent puissant et à direction dominante	20
7. Conclusion	24
Chapitre Deuxième : Déplacement des Sables et Régime du Vent	25
1. Introduction	26
2. Données aérologiques	26
3. Méthodes	26
3.1. Régime des temps calmes et vents efficaces	27
3.2. Variabilité directionnelle des vents	28
3.3. Déplacement potentiel des sables	30
3.3.1. Notion de la vitesse seuil d’arrachement du sable	30
3.3.2. Calcul du déplacement potentiel de sable	30
3.3.2.1 Modèles de quantification de déplacement des sables	30
3.3.2.2 Modèle de Fryberger et Dean (1979)	33
Module de la résultante	33
Angle d’orientation	34
Coefficient de migration	34
3.3.3. Classification de l’environnement éolien et régime du vent	34
4. Résultats et discussion	36
4.1. Régime mensuel, annuel et interannuel de déplacement des sables	36
4.2. Régime du vent	37
5. Conclusion	41

Chapitre Troisième : Morphologie des dunes de sable et sédimentologie des sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa	42
1. Généralités sur les dunes de sable éolien	43
1.1. Le vent comme agent érosif	43
1.2. Le mouvement du sable	43
1.3. Classification des édifices dunaires	45
1.3.1. Classification de McKee (1979)	46
1.3.1.1. Type de dune basique (simple)	46
a. La dune barkhanique	46
b. La dune linéaire	49
c. La dune pyramidale	49
1.3.1.2. Type de dune composée	49
1.3.1.3. Type de dune complexe	49
1.3.2. Classification de Mainguet (1984)	49
1.3.3. Classification de Pye et Tsoar (2009)	50
1.3.3.1. Dunes accumulées sous l'effet d'obstacles topographiques	51
1.3.3.2. Dunes auto-accumulées (autogènes) liées à la rugosité du terrain ou la fluctuation aérodynamique	51
1.3.3.3. Dunes développées sous l'influence de la végétation (dunes phytogènes)...	52
1.3.3.4. Dune parabolique	52
1.3.3.5. Dune linéaire végétalisée	52
1.3.3.6. Dune en monticule (hummock dune)	53
2. Types et morphologie des dunes de l'Erg Sidi Moussa	55
3. Caractérisation sédimentologique des sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa	59
3.1. Analyse granulométrique	59
3.1.1. Méthode	60
3.1.1.1. Paramètres et indices granulométriques	61
3.1.1.2. Paramètres de position	62
3.1.1.3. Paramètres de dispersion	63
3.1.1.4. Paramètres de forme (asymétrie et acuité)	64
3.1.2. Résultats.....	65
3.1.2.1. Distribution granulométrique	65
3.1.2.2. Indices granulométriques	70
a. Diamètre moyen M_z	70
b. Dispersion (classement)	70
c. Asymétrie (skewness)	71
d. Acuité/aplatissement (kurtosis)	71
3.1.3. Discussion	71
3.2. Analyses morphoscopique	75
3.2.1. Introduction	75
3.2.2. Méthode	76
3.2.3. Résultats et discussion	77

3.2.3.1. Catégories morphoscopiques	77
3.2.3.2. Distribution spatiale	80
4. Conclusion	84
Chapitre Quatrième : Mobilité, migration et morphodynamique des dunes barkhaniques	85
1. Estimation de la mobilité des dunes selon Lancaster (1988)	86
1.1. Introduction	86
1.2. Données et méthode	86
1.3. Résultats et discussion	87
2. Géodynamique des dunes barkhaniques (période 2002–2013)	90
2.1. Introduction	90
2.2. Données et méthode	90
2.3. Résultats et discussion	93
3. Caractéristiques morphométriques des dunes barkhaniques et effet sur la vitesse de déplacement (période 2013–2016)	96
3.1. Méthode	96
3.2. Résultats et discussion	99
4. Conclusion	103
Chapitre Cinquième : In–Salah au péril du risque d’ensablement	107
1. Ensablement à In–Salah : Risque ou plutôt une catastrophe ?	108
2. Techniques de réduction des dommages	113
2.1. Introduction.....	113
2.2. Rappel de quelques techniques de lutte contre l’ensablement	113
2.2.1. Palissade en palmes sèches	114
2.2.2. Quadrillage en palme	114
2.3. Protection des routes, villages et palmeraies	116
2.3.1. Technique de Drâa pour la protection des routes	116
3.1.1. Description	116
3.1.2. Principe de fonctionnement d’un Drâa	116
3.1.3. Cas de régime éolien unimodal	117
3.1.4. Cas de régime éolien bimodal	117
2.3.2. Technique d’El-Methana	117
2.3.3. Technique de l’Afreg pour la protection des villages et palmeraies	120
2.3.3.1. Afreg d’arrêt (perpendiculaire au vent)	120
2.3.3.2. Afreg de défilement (oblique au vent)	120
2.3.3.3. Afregs en successions	121
3. Conclusion	123
Conclusion générale	124
Références bibliographiques	127
Liste des figures	138
Liste des tableaux	142
Résumé en français.....	144

Résumé en anglais	146
Résumé en arabe	148

Introduction générale

Les régions arides et semi arides occupent presque le tiers de la surface terrestre (Goudie, 2013) ; la sécheresse est le caractère principal de ces régions qui se trouvent au péril d'une importante carence pluviométrique et hygrométrique, de températures élevées et de très faibles taux de couverture végétale (Mainguet, 1999).

Selon la convention internationale des nations unies sur la lutte contre la désertification (ONU, 1994), le terme désertification désigne toute dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines. L'érosion éolienne est particulièrement le facteur le plus aggravant de la désertification, il s'agit des processus de détachement, de transport et de dépôt des particules du substratum quel qu'il soit par l'action du vent qui, joue un rôle majeur dans le tri et la redistribution latérale des particules de sables (Lundholm, 1979 in El-Ghannouchi, 2007).

Faisant partie des régions hyperarides, le grand Sahara s'étend sur 8 millions de km² dont les ergs n'occupent que le cinquième de sa superficie (Capot-Rey, 1953 in Oulehri, 1992). Selon Capot-Rey (1970), le mot erg en arabe maghrébin désigne un massif de dunes vives dépourvues de végétation et par conséquent individuellement mobiles, présentant des formes complexes et couvrant de grandes étendues (Capot-Rey, 1970). Ces ergs sont principalement façonnés par le vent de surface qui est l'agent érosif le plus déterminant du modelé géomorphologique (Mainguet, 1991), où le régime éolien qui inclut la fréquence, magnitude et direction du vent est le principal facteur qui influence la forme, la géodynamique, l'accumulation et la migration des dunes de sable (Cooke et Warren, 1973 ; Lancaster, 1995; Pye et Tsoar, 2009). Cependant, seulement un vent efficace ayant une vitesse en dessus du seuil d'arrachement peut avoir un effet érosif important (Bagnold, 1941).

Le Sahara algérien prend position au sein du Grand Sahara, cette vaste étendue comprend plusieurs grands systèmes dunaires tels le Grand Erg Oriental (200 000 km²), le Grand Erg Occidental (80 000 km²), Erg Issaouane (38 000 km²), Erg Chech ... (figure 1), ces ergs représentent des stocks de plusieurs milliards de mètres cubes de sable, et sont composés de différents types de formations et d'édifices dunaires qui se distinguent les

unes des autres de part son processus de genèse, morphologie, dynamique et environnement éolien.

Les dunes barkhaniques se forment sous les régimes éoliens unimodaux, ces dunes sont très dynamiques et leur aptitude à la migration (Lancaster, 2009) constitue un danger réel vis-à-vis les installations humaines et socioéconomiques (Khalaf et Al-Ajmi, 1993 ; Hamdan et al., 2016 ; Boulghobra et al., 2016). De ce fait, il est important de mesurer leur vitesse et direction de mouvement afin de pouvoir considérer leur couloir de transit lors de l'installation de nouvelles infrastructures socioéconomiques ainsi protéger celles existantes.

La ville d'In-Salah (50 000 habitants en 2013) et ses agglomérations se situe dans la plaine du Tidikelt, juste en aval sous le vent du champ barkhanique de l'Erg Sidi Moussa, cette position fait que toutes ses installations humaines, socioéconomiques et agricoles se présentent comme obstacles aux sables en transit et aux dunes migrantes en provenance de l'Erg, d'où l'incessante exposition au risque d'ensablement dans cette régions (Dubost, 2002 ; Boulghobra et al., 2014).

L'objectif de cette recherche est de caractériser la dynamique éolienne dans le système dunaire de Sidi Moussa entant que source d'approvisionnement en sédiments, de part sa capacité au transport des sables et à la migration des dunes barkhaniques, et ce ayant recours aux différentes données physiographiques, climatiques, aérologiques et télédéfectées. Sur la base des résultats issus de cette analyse, des propositions de réduction des dommages à In-Salah en aval (zone d'accumulation des sables) seront suggérées.

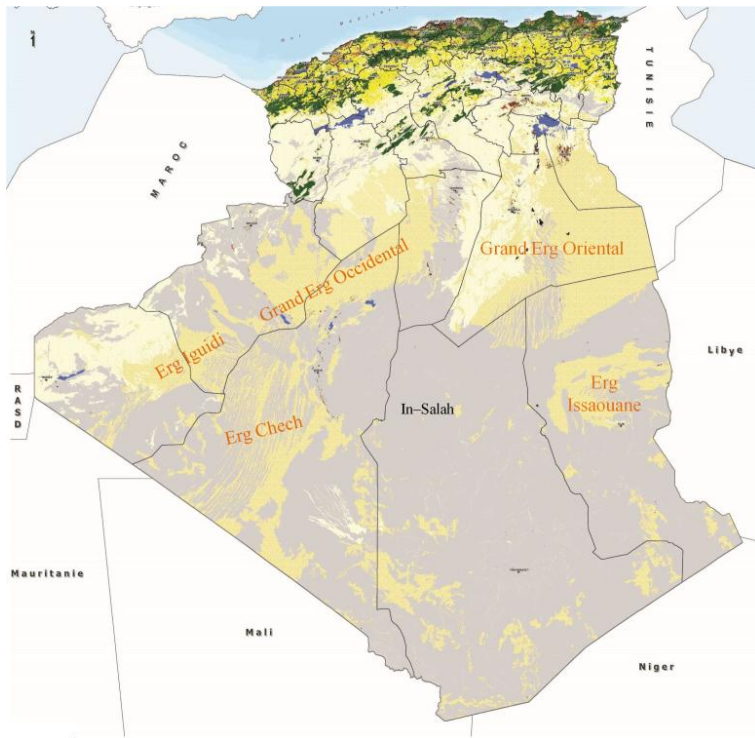


Figure 1. Localisation des grands systèmes dunaires en Algérie, modifiée après INSID (2011)

Chapitre Premier

Aspects physio–géographiques et climatiques

1. Localisation

Le domaine du Tidikelt se situe au Sahara méridional algériens, il est limité au nord par le plateau calcaire du Tademaït, au sud par les monts Mouydir et Adrar n'Ahnet, à l'est par les monts Tassili n'Ajjer, et à l'ouest par le Touat et la marge inférieure de la vallée de la Saoura. Il s'agit d'une vaste dépression occupée de plaine sédimentaire allongée et orientée nord est–sud ouest (250 x 50 km²), aux piedmonts sud du plateau de Tademaït qui culmine à 450 m (Figure 2).

Au centre du Tidikelt, entre les latitudes 27°07' – 27°16' nord et les longitudes 2°23' – 2°39' est, se trouve le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa, qui occupe la position en amont (coté au vent) au nord est de l'agglomération urbaine d'In–Salah. En comparaison avec les autres systèmes globaux d'actions éoliennes en Algérie et au monde, cet Erg composé de dunes de sables barkhaniques est considéré comme petit système dunaire, vu que sa superficie est seulement d'environ 110 km². Cependant, il est reconnu d'être un environnement de haute énergie éolienne associé à un puissant régime de vent de caractère unimodal, avec la prédominance de dunes de sables de formes barkhaniques extrêmement actives (Verlaque, 1958; Breed et al., 1979; Warren et Knott, 1979, Boulghobra et al., 2014; Boulghobra, 2016).

La région d'étude appartient à la wilayate de Tamanrasset, dont la commune d'In–Salah est l'agglomération urbaine principale, entourée d'agglomérations secondaires avoisinantes qui sont : Sahela Foukania, Sahela Tahtania, Igostène, Hassi El–Hajar, Foggaret El–Arab, Foggaret Ezzoua et El–Barka.

2. Aspect topographique

Le relief de la région d'In–Salah est –en gros– composé de deux ensembles topographiques de natures contrastées, et sont du nord au sud (figure 3) :

2.1. Le plateau de Tademaït

Occupe la partie nord et culmine à 460 m, son altitude s'abaisse progressivement vers le sud et l'ouest pour avoisiner les 350 m. Sa surface – généralement plane – compte

quelques fois des éléments plus soulevés, ils correspondent à des buttes témoins résultant d'une importante action d'érosion hydrique.

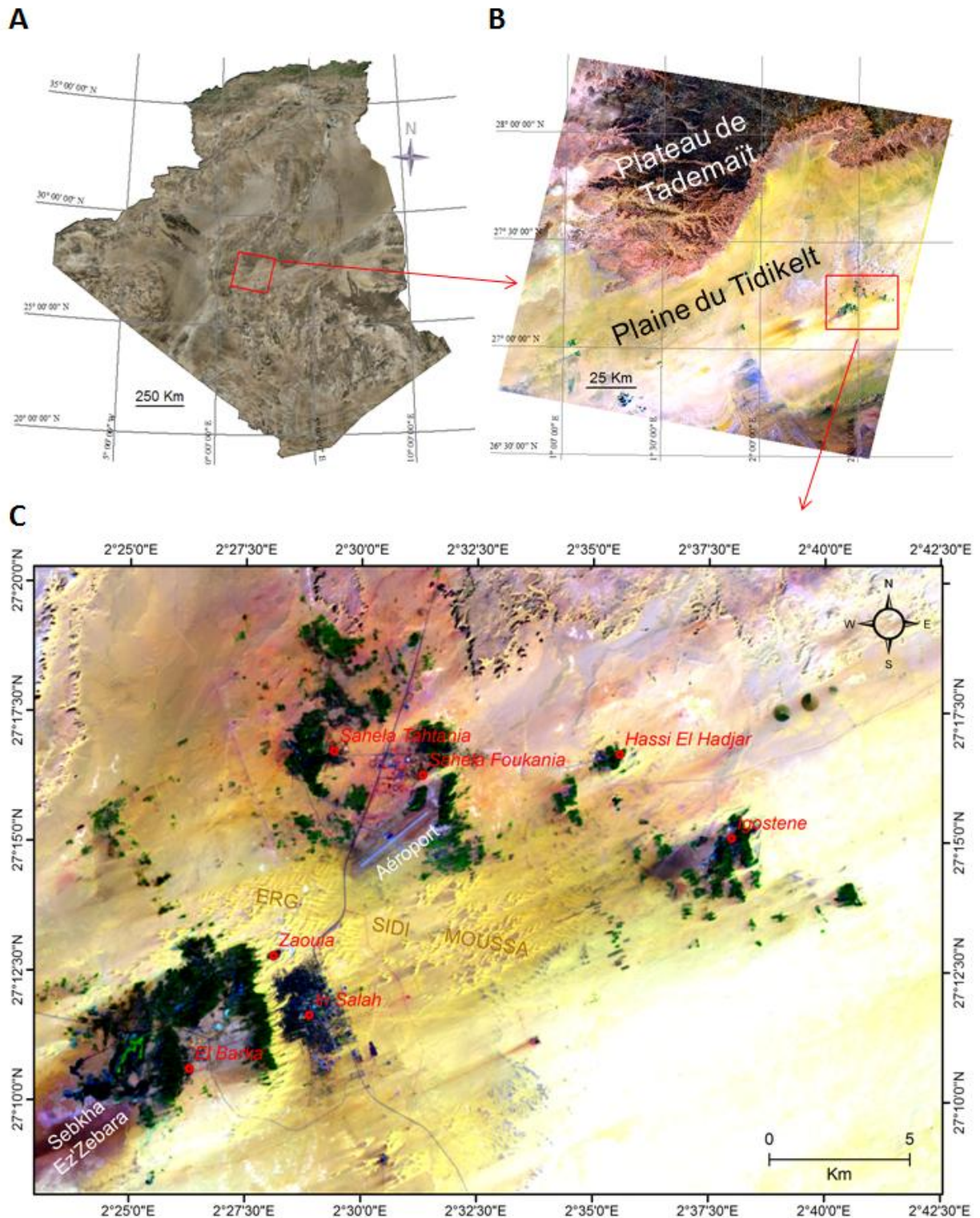


Figure 2. Carte de géo-localisation de la région d'étude. (A) Situation de la plaine du Tidikelt en Algérie, (B) Localisation de la région d'étude vis-à-vis le plateau de Tademaït et la plaine du Tidikelt, basée sur la composition colorée (fausses couleurs) des bandes RGB : 541 du capteur Thématique Mapper de Landsat daté 2011 (www.usgs.gov), (C) Région d'étude montrant le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa, basée sur la composition colorée des bandes 652 de l'image satellitaire Landsat 8 OLI datée 2016

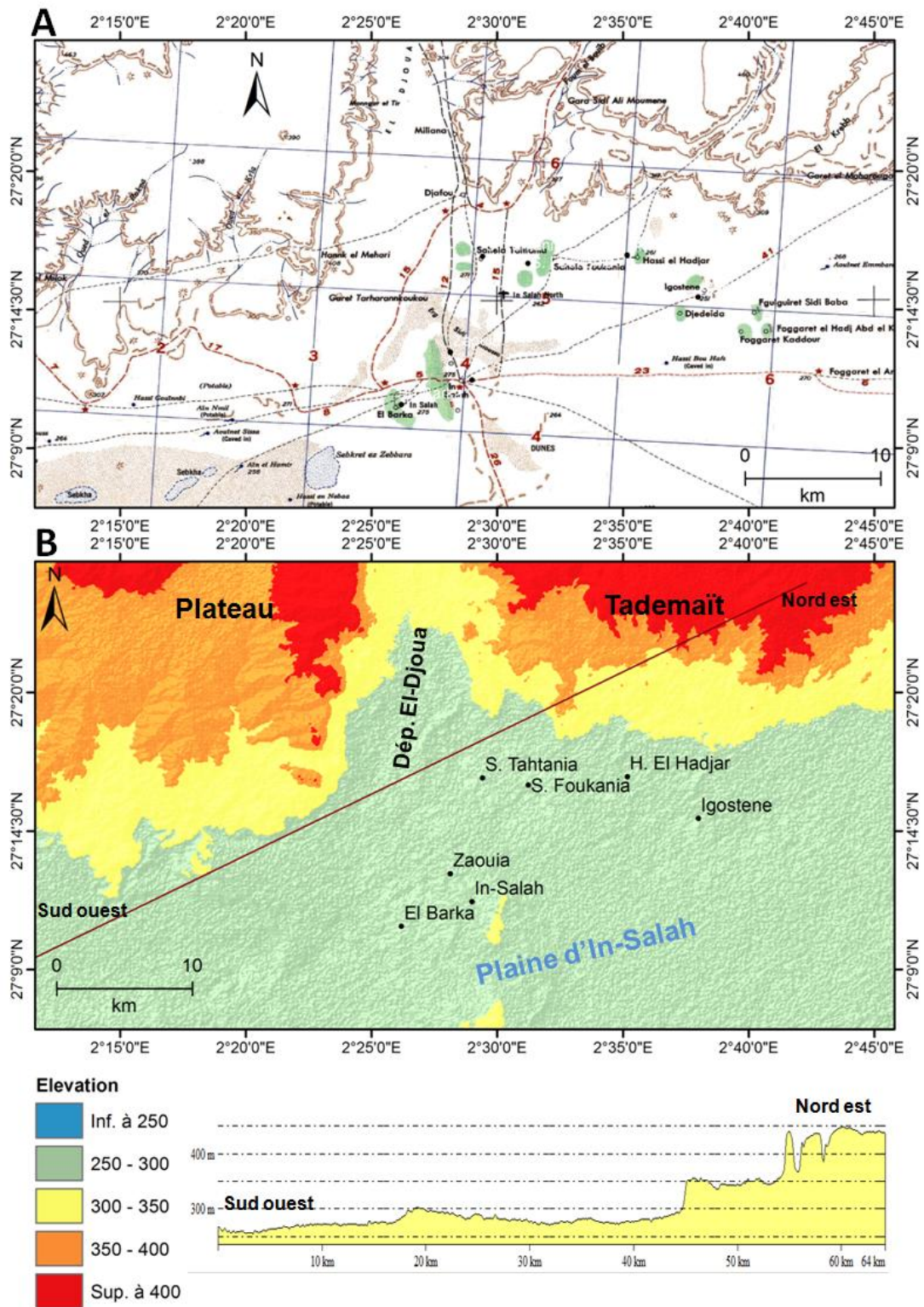


Figure 3. Traits topographiques de la région d’In-Salah. (A) Extrait de la carte topographique In-Salah à (1/250.000) feuille NG 31–2, série P502, éditée par le service cartographique de l’armée des Etats Unis d’Amérique, 1953, (B) Model numérique d’élévation SRTM de Aster (résolution spatiale 90m), montrant les classes d’altitude (en mètre) et profils topographiques

Les rebords sud du plateau ont un aspect festonné en raison de la présence d'un dense réseau hydrographique intermittent, ces oueds prennent naissance à la surface du plateau et s'écoulent vers les dépressions au sud, dont la vallée d'El-Djoua orientée nord-sud (6 km de largeur) est façonnée par l'oued Souf, le plus important cours d'eau dans la région. En allant vers le sud, le passage du plateau à la dépression d'In-Salah se fait par un ensemble de talus étagés et séparés par des petits ensembles plats tels Hank El-Mahri et Gour Habdada.

2.2. La dépression d'In-Salah

Correspond à une plaine allongée et orientée nord est-sud ouest avec un léger dénivelé, où l'altitude passe de 313 m à Foggaret Ezzoua (nord est) à 256 m près de la cuvette de Fersig Moulay Tayeb (sud ouest).

Dans la plaine d'In-Salah, le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa est entouré d'agglomérations dont la ville d'In-Salah à l'extrême sud ouest est la principale localité, on y observe l'existence de la culture du palmier-dattier, de routes, points d'eau et Foggaras (systèmes d'irrigation traditionnels).

3. Aspect géologique

En se référant à la carte géologique d'In-Salah Follet (1951), il s'avère que les affleurements géologiques s'échelonnent depuis le quaternaire récent jusqu'au crétacé inférieur, communément appelé continental intercalaire (figure 4).

3.1. Les formations dunaires

Ces édifices dunaires anciens correspondent à des accumulations de sables de couleur rougeâtre, dont la barkhane et dune transversales représentent les formes dunaires prédominantes. Ayant une hauteur qui peut dépasser les 15 m, ces dunes de sable représentent l'essentiel du système dunaire de l'Erg Sidi Moussa en amont d'In-Salah, ajoutées à d'autres formes d'accumulation liées à l'existence d'obstacles artificiels telles les palmeraies, dans la partie au vent des localités Sahela Tahtania, Sahela Foukania, Igostène, Foggaret Ezzoua et Foggaret El-Arab.

3.2. Le Quaternaire récent

Il occupe la dépression d'El-Djoua mais surtout la partie centrale de la plaine d'In-Salah, il s'étend du nord est près d'Igostène au sud ouest à Garet Ezzerga en passant par In-Salah. Il est principalement constitué des sédiments sableux mélangés à des dragées de quartz issus de la décomposition de la dalle siliceuse du plateau de Tademaït.

3.3. Le Tertiaire continental

Il affleure à l'Ouest de la dépression d'El-Djoua, les dépôts constitués de sable et d'argile sont coiffés par une dalle calcaire qui fossilise ce dépôt.

3.4. Le crétacé inférieur ou Continental Intercalaire

C'est l'affleurement dominant dans la région d'étude, il est principalement composé de grès tendres et d'argiles, il correspond aux piedmonts sud du plateau de Tademaït et comporte des glacis, cônes de déjection éoliens et fluvio-lacustres.

La dépression d'El-Djoua laisse distinguer trois ensembles lithologiques :

- L'ensemble inférieur : à base de sables et d'argiles sableuses en association avec de l'halite des dalles gréseuses qui sont souvent silicifiées.
- L'ensemble médian : à base d'argiles graveleuses avec la présence de débris de bois silicifiée.
- L'ensemble supérieur : à prédominance sableuse avec la présence d'argile.

4. Ensembles géomorphologiques

4.1. Plateau calcaire du Tademaït

À base de formations tendres et recodables du continental intercalaire, le plateau de Tademaït culmine à 460 m, ses rebords sud marqués par une intense érosion hydrique suite à l'action de plusieurs oueds intermittents, dont encore des buttes résiduelles y'témoignent (figure 5).

La dépression d'El-Djoua sépare le plateau en partie est et ouest, ceci est dû à un ancien écoulement de direction nord-sud qui se jette à sebkha Ez'zebara au sud ouest d'In-Salah. Cette vallée comporte des glacis qui témoignent des activités d'érosion qui a marqué la région. Au bas fonds de la dépression, on constate l'existence de nebkas et l'évolution de végétation spontanée profitant des anciens dépôts fluviatiles, ainsi la présence de dépressions gypso-salines fermées qui coïncident avec le lit mineur de m'ancien talweg principal. L'absence de granulométrie fine des sédiments dans cette vallée permet de déduire une importante action de déflation éolienne.

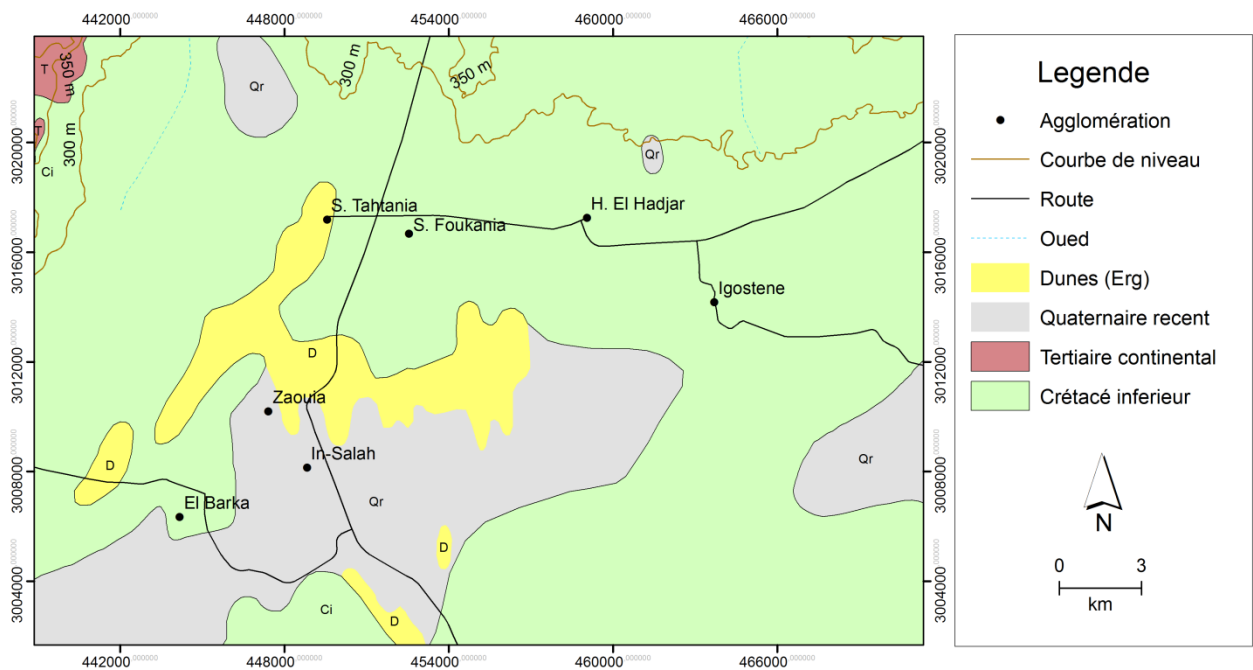


Figure 4. Carte géologique de la région d’In–Salah à une échelle de 1/500.000, digitalisée après Follot (1951).Centre de Recherches Sahariennes. Système de projection Transverse Universelle de Mercator, zone 31



Figure 5. Butte–témoin de l’action de l’érosion hydrique dans le continental intercalaire des rebords sud du plateau de Tademaït

4.2. Les formations dunaires

L'Erg Sidi Moussa est la formation dunaire aux traits distinctifs dans la région, il est composé de plusieurs types d'édifices éoliens et tous, représentent des stades de développement de dunes barkhaniques sous un régime de vent unimodal c.à.d. de direction privilégiée et dominante (figure 6A).

L'Erg en lui-même est une zone d'auto accumulation liée à la diminution de la vitesse des vents, mais plus en amont on peut distinguer des zones de déflation communément appelées Reg, qui correspondent aux espaces de transport de sable ; dans ces zones, la granulométrie des particules est plutôt grossière à cause du départ des éléments plus fins par les vents efficaces vers le sud est de la plaine (figure 6B).

Les manifestations de la dynamique fluviale sont présentes grâce au ravinement puissant qui, autrefois a engendré l'incision mécanique de la roche-mère du plateau, dont les débris quartzeux qui résultent vont être décomposés et alimenter le système dunaire en matériaux sédimentaires.

5. Sols et végétation

En milieux hyperarides, les extrêmes climatiques tels le prolongement des hautes températures, vents et carences en pluie et en humidité, sont des facteurs favorables aux actions de désagrégation mécanique de la roche-mère. Cependant, ils représentent des contraintes à l'initiation des processus de décomposition chimique comme l'hydrolyse ou l'oxydation, ce qui donne lieu à des sols sahariens en état brut et squelettique, constitués surtout de minéraux et très peu évolués (pauvres en matière organique).

Selon BNEDER (2002), les sols dans la région d'In-Salah sont en majorité halomorphes ayant une teneur en sel très élevée, ils sont drainants grâce à leur texture grossière. Le taux de calcaire actif est très bas, leur salinité est principalement due à la présence d'une nappe chargée qui remonte par capillarité (figure 7A).

Ce sont des sols qui se développent sur un relief plat, à facies végétal constitué de *nebkha* de *Zygophyllum album* et parfois de *Tamarix gallica* avec quelques efflorescences

salines. Une coupe pédologique près d'In-Salah a permis de distinguer caractéristiques suivantes :

0–20 cm : Jaune, pale, structure très peu nette, quelques racines, texture sableuse, effervescence à Hcl nulle, limite nette régulière.

20–35 cm : Jaune très pale, structure à tendance continue, activité biologique nulle, effervescence à Hcl nulle, limite irrégulière.

35–75 cm : Jaunâtre, structure continue, aucune activité biologique, effervescence à Hcl nulle, texture sablo-argileuse.

En milieux arides, le couvert végétal maintient le sol et réduit –par conséquent– l'effet de l'érosion éolienne, ceci signifie qu'un sol à couvert végétal clairsemé, rabougri ou inexistant est plus vulnérable aux actions éoliennes (FAO, 2010).

Dans la région d'In-Salah, les conditions climatiques et édaphiques ne permettent pas le développement d'une végétation dense ; cependant, des plantes dites spontanées et adaptées aux environnements sahariens, en forme d'arbre, arbuste ou buissonnante, ces plantes se développent aux bas fonds des lits d'anciens oueds ou en milieu dunaire (figure 7B). On peut distinguer quatre principales espèces : *Tamarix gallica* (ar. Fersig), *Tamarix articulata* (ar. Tarfa ou attèle), *Zygophyllum album* (Aggaya) et *Aristida pyngens* (Drine). À noter que le taux de recouvrement de ces plantes demeure insuffisant pour atténuer l'action du vent, d'autant plus que leur état est en dégradation continue.

6. Conditions climatiques et aridité

En régions arides, l'aridité est principalement due aux extrêmes climatiques telles les hautes températures et faibles précipitations, ceci se traduit en une importante perte par évaporation et donne lieu à une balance déficitaire en pluie et humidité (Mainguet, 1999), l'action du vent est par la suite exercée sur des sols secs, meubles et dénudés, et par conséquent très exposés aux actions de l'érosion éolienne (Goodie, 2013).

Cette section s'intéresse à la caractérisation du climat dans la région d'In-Salah, par l'analyse des principaux éléments qui influencent le déplacement des sables et la

migration des dunes, à savoir la température, les pluies, l'humidité et le vent qui, est le facteur climatique majeur en érosion éolienne de part son vitesse, direction et fréquence, une analyse aérologique approfondie sera présentée au chapitre deuxième.

À l'instar des régions sahariennes en Algérie qui souffrent d'une importante rareté en postes météorologiques, notre région d'étude ne compte qu'une seule station, celle d'In-Salah aéroport (latitude 27.2, longitude 2.5, altitude 280 m), cette station fait partie du réseau de l'Office National de Météorologie et offre des séries de données fiables, continues et relativement récentes couvrant une période de 27 ans (1988–2014).

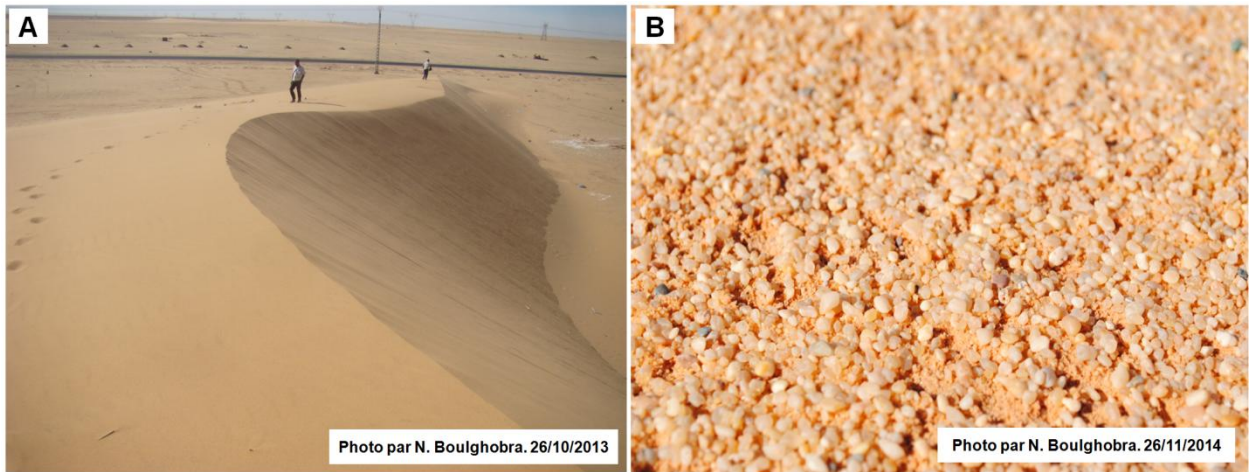


Figure 6. Quelques formations géomorphologiques dans la région d'étude : (A) Dune barkhanique, (B) Reg en amont de l'Erg Sidi Moussa (surface de déflation)

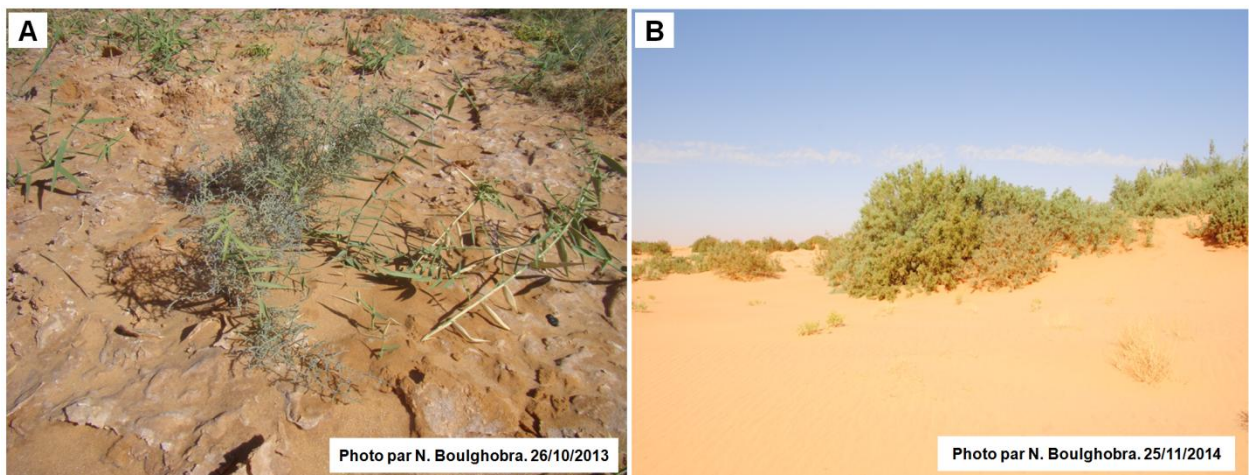


Figure 7. (A) Sol halomorphe près d'In-Salah, noter l'existence de la croue saline de couleur blanchâtre, engendrée par la cristallisation des sels suite à l'évaporation de l'eau en provenance de la remontée de la nappe ; (B) Arbustes de Tamarix articulata près d'Igostène, In-Salah

6.1. Une carence aigue en précipitations et en humidité

La région d'In-Salah appartient au régime des alizés loin des zones tropicales humides, ici l'air a tendance à descendre vers le sol, et ceci se traduit en une faible humidité qui engendre de faibles précipitations (figure 8), la moyenne des lames d'eau précipitées en 25 ans est seulement de l'ordre de 14 mm. Ce déficit pluviométrique est associé à une importante irrégularité interannuelle, le maximum de pluie est enregistré en 1990 avec 71 mm, tandis que le minimum est observé en 2002 avec seulement 1mm précipité en mois d'octobre ; soit un écart-type de 15 mm avec un coefficient de variation qui dépasse les 100%.

L'humidité relative est extrêmement faible durant toute l'année, les valeurs mensuelles oscillent entre 14 % en juillet et 40 % en janvier, avec une moyenne annuelle qui ne dépasse pas les 26 %.

6.2. Un régime thermique extrême

En raison de sa position au sein du grand Sahara, In-Salah est marquée par une importante continentalité et absence de masses d'aire humide, ceci se traduit en une aridité exceptionnelle et des températures extrêmes durant toute l'année.

La température moyenne annuelle est de 26.7 °C. Néanmoins, les températures maximales sont régulièrement en dessus de 46 °C de juin à septembre, avec un maximum qui peut dépasser les 50 °C en juillet ; selon Perret (1935), une température exceptionnelle (56.3 °C) a été enregistrée en 1914, les températures minimales sont de même autour de 30 °C. Outre, d'octobre à mai, les maxima sont en dessus de 22 °C avec un maximum aussi en juillet de l'ordre de 31 °C, avec une moyenne des minima d'environ 9 °C en décembre. De ce fait, la période sèche s'étale sur toute l'année (figure 9).

6.3. Type de climat et aridité

Le calcul du quotient climatique de L. Emberger (1955) pour In-Salah donne la valeur suivante :

$$Q_2 = \frac{2000P}{M^2 - m^2} = 13.8 \quad (1)$$

Avec : la pluie moyenne annuelle $P = 14$ mm

la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud $M = 45.7$ °C

(Juil.)

la moyenne des températures maximales du mois le plus frais $m = 7.5$ °C (Jan.)

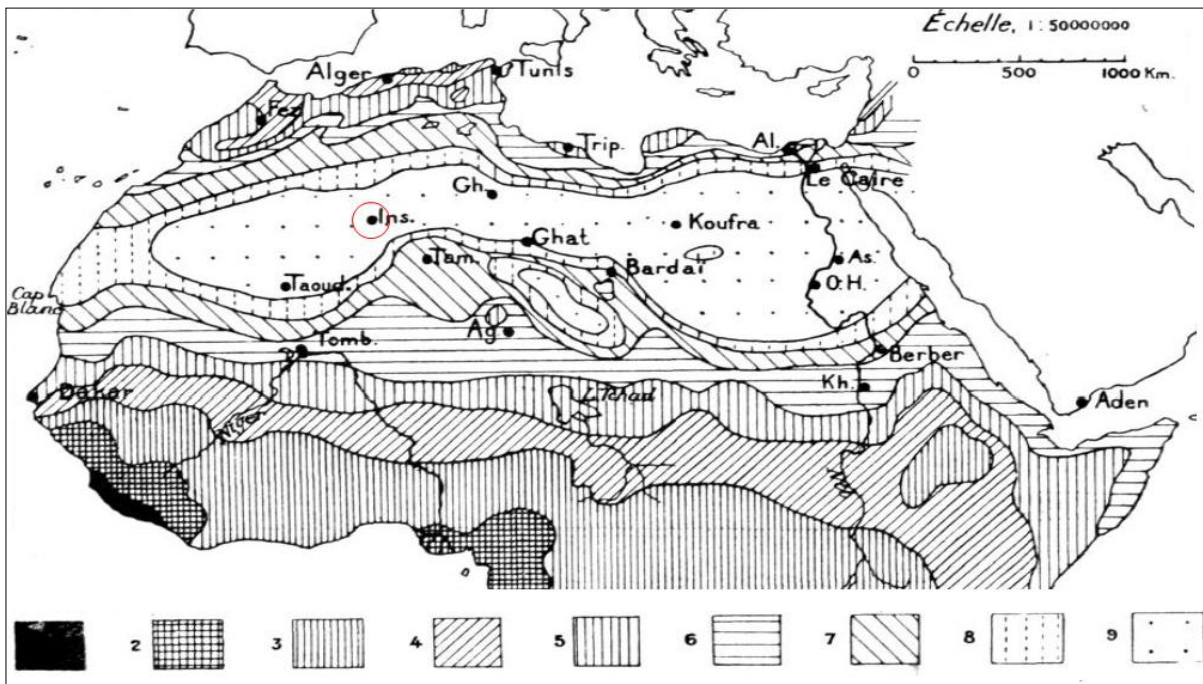


Figure 8. Hauteurs des précipitations annuelles en Afrique d'après A. Thévenet, A. Bernard et R. de Flotte de Roquevaire in Perret (1935). Légende : (1) Sup. à 4 m ; (2) 2-4 m ; (3) 1-2 m ; (4) 500 mm-1 m ; (5) 250-500 mm ; (6) 100-250 mm ; (7) 50-100 mm ; (8) 20-50 mm ; (9) Inf. à 20 mm

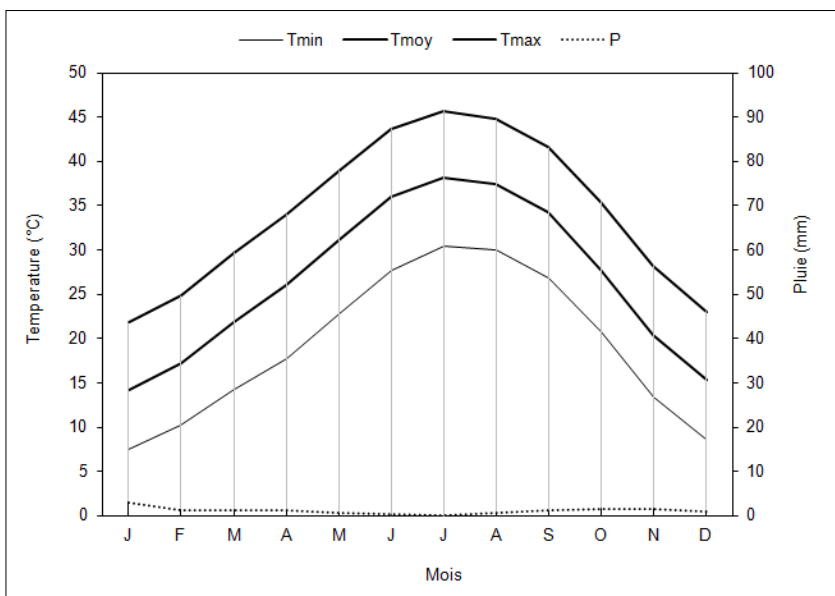


Figure 9. Températures moyennes annuelles et diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls (1953) pour la station d'In-Salah (1988-2014)

Cette valeur permet de classer In–Salah parmi les régions appartenant à l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud, marquée par une aridité prolongée, par des températures élevées et très faibles pluies durant toute l'année (figure 10).

Par ailleurs, le degré d'aridité d'une région peut être défini par l'indice d'aridité suggéré par E. De Martonne (1926) faisant intervenir la pluie et la température, l'application pour la station d'In–Salah durant la période 1988–2014 donne le résultat suivant :

$$I = \frac{P}{T + 10} = 0.38 \quad (2)$$

Avec : la pluie moyenne annuelle $P = 14 \text{ mm}$

la température moyenne annuelle $T = 26.7 \text{ °C}$

Selon E. De Martonne (1926), un climat peut être classé en fonction de la valeur de son indice d'aridité I comme suit (tableau 1). La valeur de I est à peine en dessus du 0, ce qui indique que la région d'In–Salah est d'un climat hyper aride à couvert végétal insignifiant.

Tableau 1. Types de climat en fonction de l'indice d'aridité de E. De. Martonne (1926)

Valeur de I	Type de climat	Type de végétation potentielle	Exemple
0 – 5	Hyper aride	Désert absolu	Vallée de la mort, USA
5 – 10	Aride	Désert	Désert du Sahara
10 – 20	Semi Aride	Steppe	Sahel, Kalahari
20 – 30	Semi humide	Prairie naturelle, forêt	Région de Marseille
30 – 40	humide	Forêt	Région de Lille
40 – 55	humide	Forêt	Rouen

6.4. Un régime de vent puissant et à direction dominante

En régions arides, le vent est l'élément climatique le plus déterminant dans le processus du modelé éolien, au déplacement des sédiments, formation des corps dunaires et migration des dunes de sable (McKee, 1979).

L'action du vent dépend de sa vitesse, fréquence et direction, ce sont les vents puissants qui dépassent le seuil de transport de sédiments (12 nœuds/seconde ce qui est l'équivalent d'environ 6 m/s), fréquents dans le temps et ayant une direction privilégiée, qui peuvent déplacer les sédiments et changer le paysage saharien.

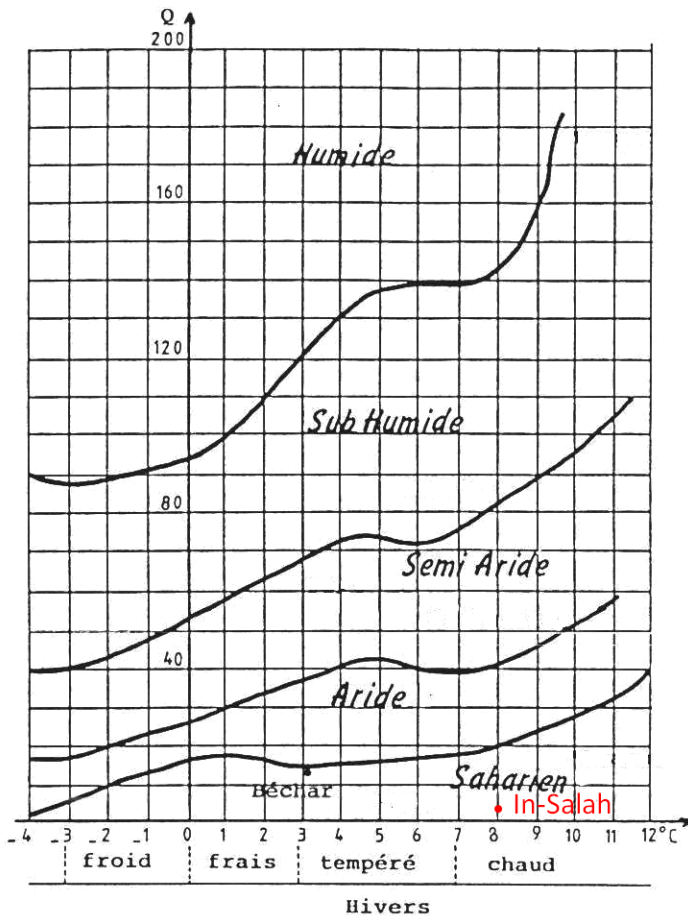


Figure 10. Position d’In-Salah dans le climagramme de L. Emberger (1955)

En se basant sur la littérature disponible portant sur les vents au Sahara algérien (Capot-Rey, 1946 ; Perret, 1935), et en faisant une analyse basique des données anémométriques de la station d’In-Salah aéroport, on peut comprendre l’intensité et la distribution temporelle du vent à In-Salah, ainsi sa fréquence directionnelle. En notant qu’une analyse plus détaillée sera entamée dans le chapitre deuxième.

À partir de la rose des vents (figure 11), on constate que le temps calme (vitesse nulle) est seulement de l’ordre de 18 %, ce qui reflète une importante activité éolienne durant toute l’année. Outre, on remarque la supériorité de la fréquence des vents de l’est-nord-est (ENE) avec une fréquence de 24.7%. Cette direction dominante correspond au vent dit Alizé continental qui règne en été comme en hiver (figure 12, figure 13) dans cette partie du Sahara, dont sa genèse est étroitement liée avec les positions des zones à hautes et basses pressions atmosphériques.

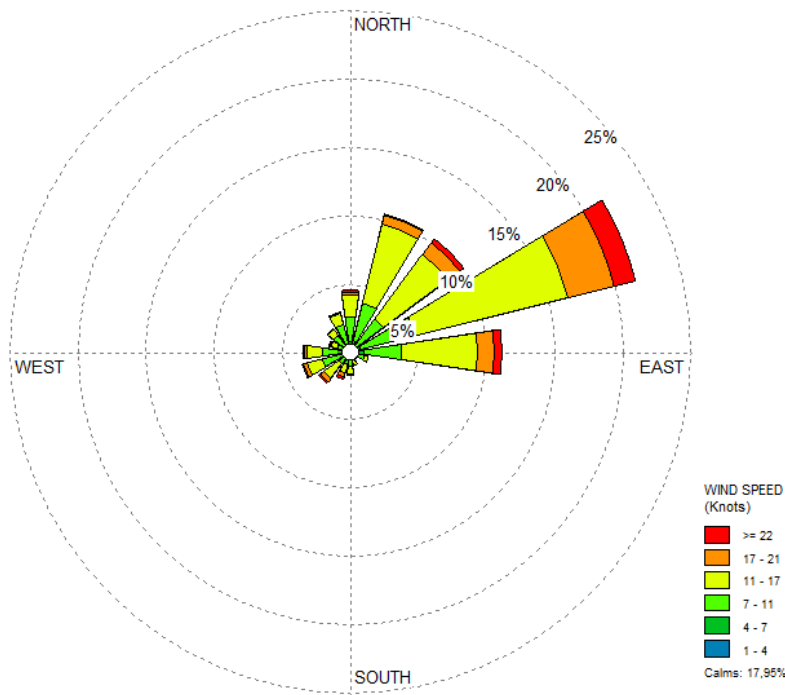


Figure 11. Rose des vents montrant la variabilité fréquentielle et directionnelle des classes de vitesse des vents, à la Station d’In-Salah aéroport pour l’année 2014. Notez la dominance des vents en provenance de l’est nord est (Boulghobra, 2016)

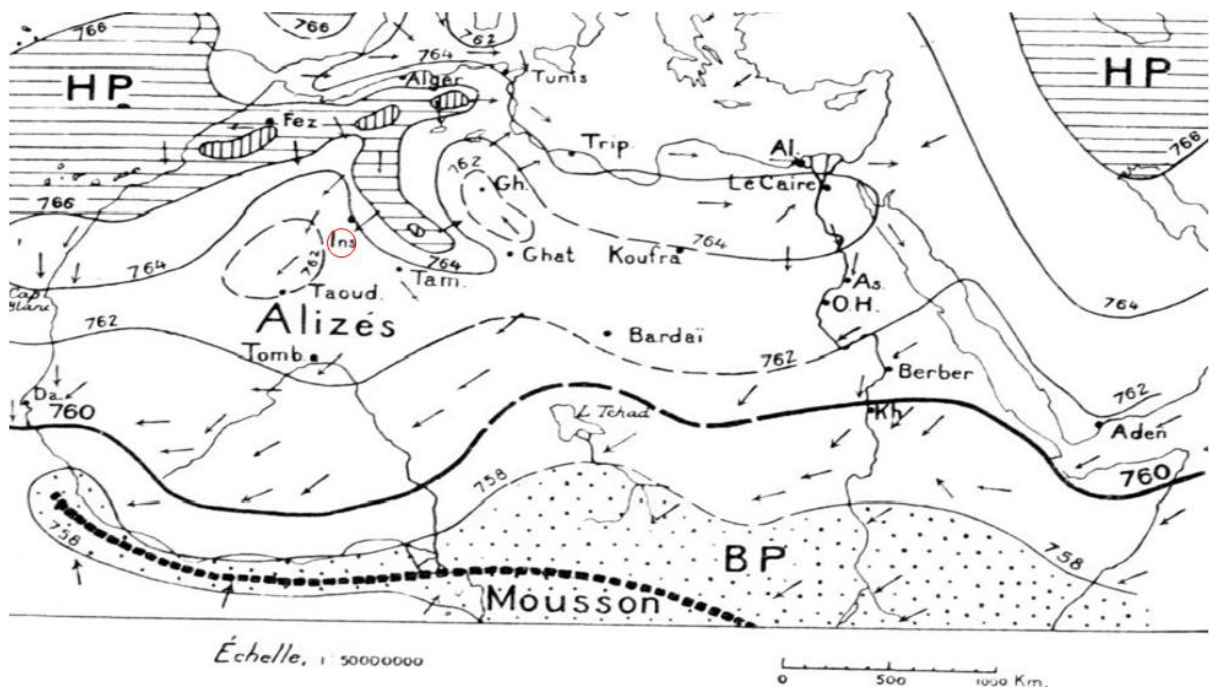


Figure 12. Allure probable des isobares (pressions moyennes réduites) et vents dominants au sol dans le Sahara, en mois de Janvier (Perret, 1935)

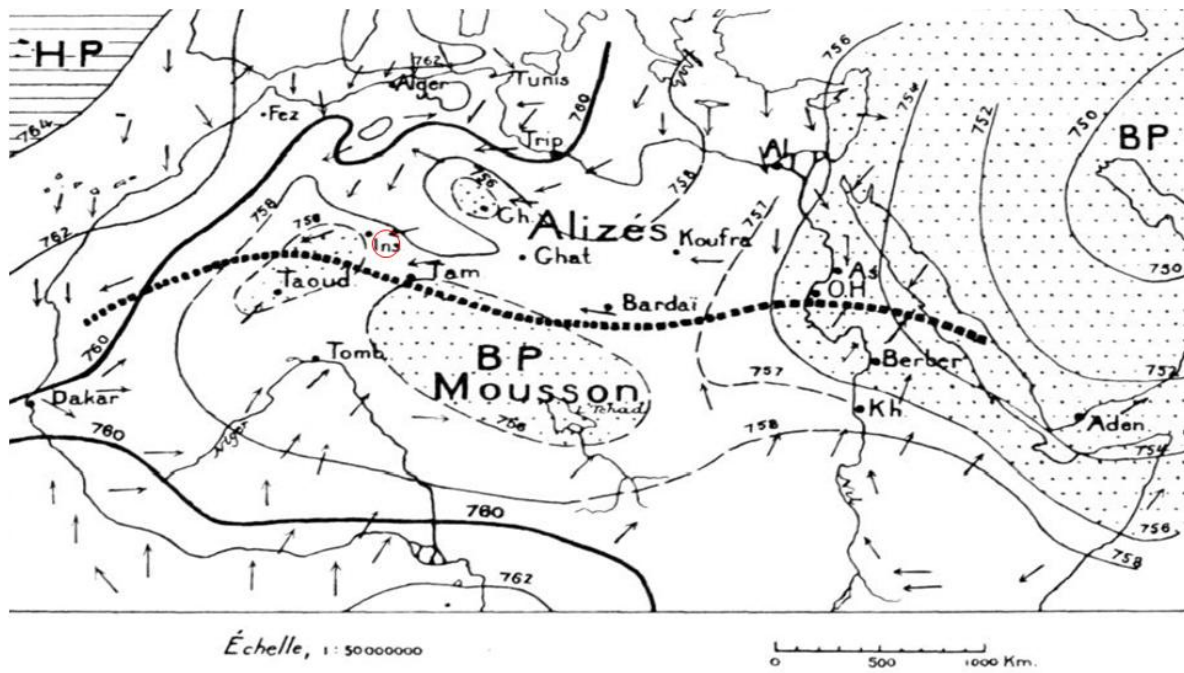


Figure 13. Allure probable des isobares (pressions moyennes réduites) et vents dominants au sol dans le Sahara, en mois de Juillet (Perret, 1935)

7. Conclusion

L'étude des éléments du milieu naturel révèle que la plaine du Tidikelt et le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa en particulier, présente des conditions hautement favorables au développement des actions de l'érosion éolienne, au déplacement des sables dunaires et à la migration des dunes de sable.

La configuration topographique du terrain qui se présente en une étroite dépression allongée, plane et dépourvue de couverture végétale efficace, est associée à des conditions géologiques et géomorphologiques présentant un milieu riche en sédiments détritiques et facilement mobilisables.

Le climat est du type hyperaride, et se distingue par une sécheresse prolongée, une carence pluviométrique sévère et des températures extrêmement élevées, ce qui représente des conditions favorables à l'érosion la dégradation des sols, il en résulte que les vents efficaces et dominants dans la région peuvent transporter les sables mobiles et les dunes actives à partir de leur source au nord est vers le sud ouest, ce qui met la ville d'In-Salah en une réelle situation de risque d'accumulation de sables.

Chapitre Deuxième

Déplacement des Sables et Régime du Vent

1. Introduction

Il s'agit de déterminer le régime éolien, et son effet sur le transport des sables et le modelé dunaire de l'Erg Sidi Moussa, à travers l'analyse des vents dominants et efficaces, ayant la capacité de transport des particules sableuses (Fryberger et Dean, 1979 ; Callot, 1987).

Pour ce faire, on a adopté une démarche qui consiste à :

- Etude de la distribution des classes du vent y compris les temps calmes, afin de déterminer la variabilité temporelle et directionnelle des vents dominants et efficaces
- Quantification du déplacement des sables dans la région d'In-Salah ayant recours à la formule de Fryberger et Dean (1979). Ceci a pour but de pouvoir classer la région d'étude en matière d'énergie éolienne, détermination du régime du vent efficace, estimer le volume et la direction de déplacement des sables aux échelles : annuelle, interannuelle et mensuelle.

2. Données aérologiques

La station d'In-Salah aéroport fournit des séries de données climatiques comprenant des enregistrements anémométriques, il s'agit de données du vent enregistrées à 10m en dessus du sol, tels qu'il est requis par l'Organisation Mondiale de la Météorologie. Cette série de données anémométriques couvre une période de dix ans (2005–2014), période conventionnellement nécessaire pour le calcul de la capacité de transport des sables et, la détermination du régime global des vents efficaces.

La résolution temporelle de la série des données du vent est de 24 enregistrements par jour, chaque valeur constitue la moyenne de plusieurs mesures instantanées à un intervalle temporel de 5 minutes. Au total, 82473 observations en état brut sont tabulées par vitesse exprimée en nœud (1 nœud = 0,514444 m/s), et par direction exprimée en degré azimutal (par rapport au nord géographique dans le sens horaire).

3. Méthodes

3.1. Régime des temps calmes et vents efficaces

La dépression du Tidikelt et précisément In–Salah est parmi les régions les plus ventées en Algérie (Kasbadji–Merzouk, 1999), la vitesse moyenne du vent à une hauteur de 10 m est de 10 nœuds (5.1 m/s) durant la période 2005–2014. Cependant, cette valeur moyenne est souvent dépassée et la vélocité du vent peut atteindre 40 nœuds (20.6 m/s).

La période allant de la fin du printemps à l’été (avril à aout) est marquée par une importante action éolienne (tableau 1), celle–ci est confirmée par les valeurs élevées des vitesses du vent qui oscillent entre 10.3 nœuds (avril) et 11.9 nœuds (juillet). Contrairement, cette période est caractérisée par les valeurs les moins élevées des fréquences du temps calme (vélocité nulle) durant l’année, qui varient de 9 % en juillet 19 % en avril.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que les vents efficaces soufflent durant toute l’année (en dessus de 42 %), avec une supériorité remarquable durant les mois allant de mai à aout, dont les fréquences d’occurrence sont de l’ordre de 50, 56, 59 et 61 % pour les mois de juin, mai, aout et juillet, respectivement. En fait, cette période est la plus marquée par les événements éoliens extrêmes telles les tempêtes de sable, et c’est durant ces mois que l’essentiel du transport des sables devrait se produire (tableau 2 ; figure 14).

Tableau 2. Pourcentage des temps calmes, fréquences mensuelles d’occurrences (en %) des classes de vitesse du vent (en nœud), et vitesses moyennes mensuelles du vent à la station d’In–Salah aéroport (2005–2014)

Mois	Classes de vélocité (nœud)						Vitesse moyenne (nœud)
	Calme (%)	Inf. à 11	11 – 16	17 – 21	Sup. à 21	Total (%)	
J	24	32	27	13	4	100	9.5
F	24	33	28	11	4	100	9.3
M	22	36	28	12	2	100	9.3
A	19	32	30	14	4	100	10.3
M	14	31	33	19	4	100	11.3
J	15	36	34	13	3	100	10.4
J	9	30	42	16	3	100	11.9
A	10	31	41	15	3	100	11.5
S	17	39	32	10	1	100	9.4
O	19	37	33	10	2	100	9.6
N	26	33	30	9	1	100	8.6
D	23	31	31	13	2	100	9.5
Année	19	33	32	13	3	100	10.0

3.2. Variabilité directionnelle des vents

L'analyse de la variabilité directionnelle des données horaires du vent laisse constater que 60 % des vents dans la région d'In-Salah soufflent en provenance du secteur nord-est, ceci englobe la direction est-nord-est qui s'impose comme direction dominante avec une fréquence de l'ordre de 24.7 %, et les directions est et nord-est avec respectivement 12.1 et 10.7 % respectivement (tableau 3, figure 15).

Tableau 3. Variabilité directionnelle des fréquences (%) des classes de vitesse (nœud) pour la station d'In-Salah aéroport (2005–2014)

Directions	Classes de vitesse (nœud)						Total
	1 – 4	4 – 7	7 – 11	11 – 17	17 – 21	Sup. à 22	
N	0.3	0.5	1.5	0.9	0.2	0.0	3.5
NNE	0.3	0.6	2.8	4.3	1.0	0.1	9.1
NE	0.2	0.4	2.6	5.3	2.0	0.3	10.7
ENE	0.4	0.8	4.7	11.4	5.9	1.4	24.7
E	0.5	0.8	3.1	5.0	2.2	0.5	12.1
ESE	0.2	0.2	0.6	0.3	0.1	0.0	1.5
SE	0.1	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.7
SSE	0.1	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.9
S	0.2	0.3	0.6	0.3	0.1	0.0	1.5
SSW	0.1	0.2	0.6	0.4	0.2	0.1	1.5
SW	0.1	0.3	0.8	0.8	0.3	0.1	2.4
WSW	0.3	0.5	1.5	1.1	0.4	0.1	3.9
W	0.4	0.5	1.4	1.0	0.3	0.1	3.7
WNW	0.2	0.2	0.5	0.3	0.1	0.0	1.3
NW	0.2	0.3	0.7	0.3	0.0	0.0	1.5
NNW	0.2	0.5	1.1	0.6	0.1	0.0	2.5
Toutes les directions	3.9	6.4	23.1	32.4	13.0	2.7	81.5
Calmes							18.5
Total							100

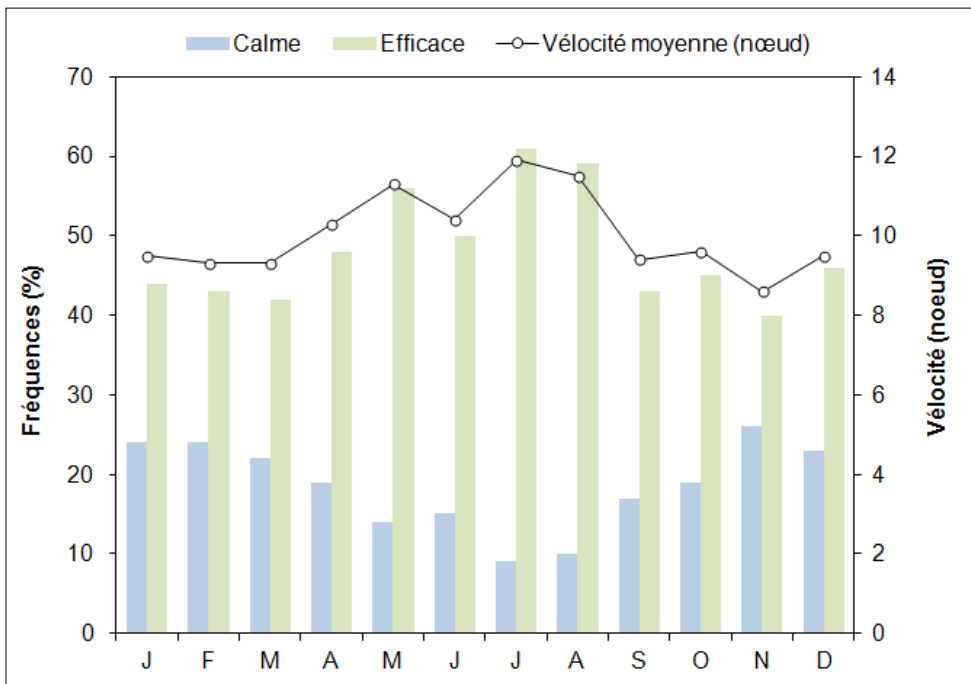


Figure 14. Fréquences mensuelles des temps calmes et vents efficaces, et vélocité moyenne mensuelle dans la station d’In-Salah aéroport (2005–2014)

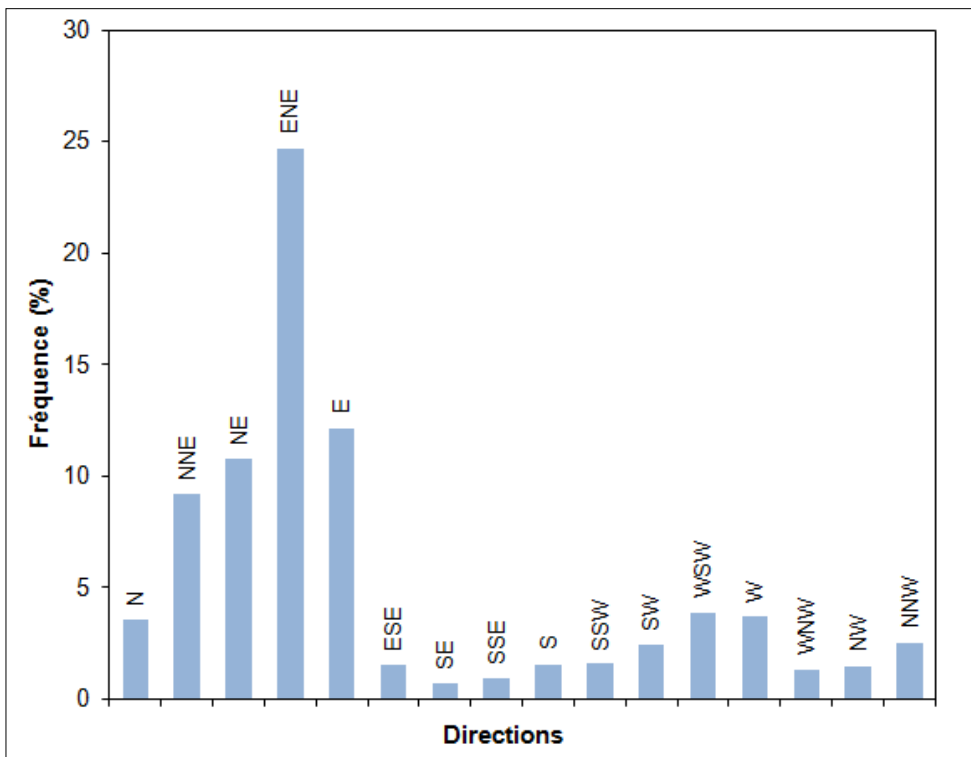


Figure 15. Fréquences directionnelles des vents pour la station d’In-Salah (2005–2014)

3.3. Déplacement potentiel des sables

3.3.1. Notion de la vitesse seuil d'arrachement du sable

Le mouvement des particules de sable est initié par les vents à vitesse dépassant une certaine valeur dite vitesse seuil (critique), qui dépend surtout de la taille des grains de sable. Bagnold (1941) suggère de calculer cette vitesse selon la formule suivante :

$$V_c = A \sqrt{\frac{d_s - d_f}{d_f} g D_{50}} \quad (3)$$

où V_c : Vitesse critique

A : Coefficient dépendant de la taille de grain

d_s : Densité de l'air

d_f : Densité des grains

g : Constante de gravité

D_{50} : Diamètre médian de grain

Cependant, la vitesse seuil de mise en mouvement des sables est difficilement calculable car elle dépend de paramètres granulométriques qui nécessitent des analyses au laboratoire, état de la végétation et rugosité du sol qui, souvent sont difficiles à déterminer avec exactitude. Pour cela, Fryberger et Dean (1979) suggèrent d'adopter la valeur de 12 nœuds (6 m/s) pour estimer le déplacement des grains de sable ayant un diamètre moyen de 0.23 à 0.27, en environnements secs et de faible couvert végétal.

3.3.2. Calcul du déplacement potentiel de sable

3.3.2.1 Modèles de quantification du déplacement des sables

Le déplacement potentiel (anglais : Drift Potential DP) est la méthode la plus acceptée pour exprimer la capacité de transport des sables en mouvement, durant lequel le flux du sable est directement proportionnel au cube de la vitesse du vent (Pye et Tsoar, 2009).

L'obtention de la formule de calcul du déplacement potentiel des sables s'est effectuée après une multitude de formules, qui ont été développées dans de différents

environnements éoliens, en se basant sur des données climatiques et expérimentales (Greeley et Iversen, 1985).

La plupart des formules utilisées pour calculer le taux de transport du sable q à partir des données de vitesse du vent sont dérivées de travaux expérimentaux théoriques et en soufflerie. Ces expressions ont tendance à suivre une fonction exponentielle de la vitesse seuil d'arrachement des particules u_* selon la forme générale :

$$q = Au_*^b \quad (4)$$

Les formules de Bagnold (1941) et Kawamura (1951) correspondant respectivement aux équations 5 et 6 sont les plus utilisées pour calculer le taux de transport du sable :

$$q = C(d/D)^{0.5} u_*^3 p / g \quad (5)$$

$$q = K_k (u_* - u_{*t})(u_* + u_{*t})^2 p / g \quad (6)$$

- q : Taux de transport de sable (g/s)
- C : Constante (1.8)
- d : Diamètre de grain
- D : Diamètre standard de grain (0.25 mm)
- p : Densité de l'air
- g : Constant de gravité
- K_k : Constante (2.78)
- u_{*t} : Vitesse seuil d'entraînement de grain

Les tests empiriques réalisés par Sarre (1987) montrent que la formule de Bagnold (1941) prédise des valeurs considérées comme trop basses pour des valeurs élevées de la vitesse seuil d'arrachement. Cependant, l'expression de Kawamura (1951) est plus précise quand aux faibles valeurs de la vitesse seuil.

Cependant, ces expressions n'intègrent que l'effet de la taille des grains sur la vitesse seuil, alors qu'il est possible que la taille des grains peut avoir un effet important sur le mode de transport et par conséquent le taux de déplacement des sables.

Zingg (1953) a utilisé une fonction de puissance $\frac{3}{4}$ en intégrant une constante C_2 de valeur 0.83 :

$$q = C_2 (d / D)^{3/4} u_*^3 p / g \quad (7)$$

Selon Owen (1964), cette expression est plus précise sur une plus large gamme de tailles de particules que la formule de Bagnold (1941).

Toutes les formules se sont basées sur des tests théoriques et expérimentaux en supposant un lit de transport plat. Cependant, une surface en pente peut affecter à la fois le mouvement des grains en saltation et la valeur du seuil de mouvement. Selon Howard et al. (1977) in Wiggs (1992), le transport du sable est renforcé par un gradient descendant.

Lettau et Lettau (1975) ont proposé une formule de calcul du transport potentiel des sables qui se présente comme suit :

$$q = V^{*2} (V^* - V') \frac{c'' \theta}{g} \quad (8)$$

où q : Quantité du sable transporté

g : Constante de gravité

c'' : Constante empirique liée à la taille des grains de sable

θ : Densité de l'air

V^* : Vitesse du vent

V' : Vitesse seuil d'arrachement du sable

Avec :

$$c'' = c' \left(\varphi / \varphi^* \right)^n \quad (9)$$

où c' : Constante universelle pour le sable = 6.7

φ : Diamètre des grains de sable transporté

φ^* : Diamètre standard = 0.25

n : Constante empirique

3.3.2.2 Modèle de Fryberger et Dean (1979)

En se référant à Lettau et Lettau (1975), Fryberger et Dean (1979) ont développé une équation dite pondérée, c'est la formule la plus acceptée pour l'estimation du potentiel de transport des sédiments, et la détermination de l'énergie éolienne en association avec les formes dunaires existantes. Ce modèle a été largement utilisé pour analyser la relation entre le régime éolien et les formes dunaires dans différents environnements au monde, permettant ainsi la comparaison des résultats obtenus par différentes recherches (e.g., Wasson et Hyde, 1983; Callot et Oulehri, 1996; Bullard et al., 1996; Pearce et Walker, 2005; Al-Awadhi et al., 2005; Hereher, 2010; Jewell et Nicoll, 2011; Hereher, 2014).

La formule pondérée de Fryberger et Dean (1979) ne considère que les enregistrements des vents à vitesses égales ou dépassant le seuil d'arrachement (12 nœuds), elle se présente comme suit :

$$Q = V^2 (V - V_t) t \quad (10)$$

où Q : Déplacement potentiel annuel de sable

V : Vitesse moyenne à 10 m de hauteur durant le temps t .

V_t : Vitesse seuil d'arrachement

t : Temps de persistance du vent en %

Le déplacement potentiel de sable est exprimé en Unité Vectorielle UV, comme il peut l'être en mètre cube, sachant que 1 UV de déplacement potentiel est l'équivalent de 0.07 m³ de sable transporté à travers 1 m de terrain (Fryberger et al., 1984).

$V^2(V - V_t)$ est un facteur de pondération, qui est proportionnellement dépendant de la vitesse des vents, ses valeurs sont ensuite divisées par 100 pour réduire la magnitude, et simplifier le traçage des roses de déplacement du sable.

- **Module de la résultante**

Le module de la résultante MR (anglais : Resultant Drift Potential RDP) correspond au net du déplacement potentiel en matière de magnitude, c'est la somme de transport des sables des 16 directions. Selon Al–Awadhi et al. (2005), il se calcule selon la formule:

$$RDP = \sqrt{C^2 - D^2} \quad (11)$$

Avec:

$$C = \sum(UV) \sin \theta \quad (12)$$

$$D = \sum(UV) \cos \theta \quad (13)$$

où UV : Déplacement potentiel pour chaque direction en UV

θ : Milieu de la classe de direction

- **Angle d'orientation**

Il s'agit de la direction de déplacement de sable en degrés (anglais: Resultant Drift Direction RDD), selon Al–Awadhi et al. (2005), il se calcule comme suit :

$$RDD = a \tan(C/D) \quad (14)$$

- **Coefficient de migration**

Correspondant au ratio RDP/DP, cet indice qui exprime la variabilité directionnelle des vents efficaces est compris entre 0 et 1 : les valeurs proches de 0 indiquent une importante variabilité tandis que les valeurs proches de 1 signifient une faible variabilité, et que les vents efficaces soufflent d'une seule direction dominante.

3.3.3. Classification de l'environnement éolien et régime du vent

Selon Fryberger et Dean (1979), un environnement est classé en termes d'énergie éolienne en fonction de la valeur du déplacement potentiel DP : environnement à faible

énergie éolienne ($DP < 200$ VU), moyenne ($200 < DP < 400$ VU), et haute (400 VU $< DP$).

Par ailleurs, le régime des vents efficaces de tout système dunaire est le facteur principal qui contrôle le type et la forme des accumulations sableuses dominantes, on parle ainsi de régime :

- Unimodal: caractérisé par une faible variabilité directionnelle ($0.7 < RDP/DP$) qui aboutit à la formation de dunes transverses et barkhanes.
- Bimodal: marquée d'une variabilité intermédiaire ($0.3 < RDP/DP < 0.7$) et est associé généralement aux dunes du type linéaire (appelée Sif).
- Complexe: caractérisé par une importante variabilité des vents efficaces ($0.3 > RDP/DP$), ce qui engendre la formation de dunes pyramidales appelées dunes du type Ghourd ayant la forme en étoile (tableau 4, figure16).

Pour le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa, le déplacement potentiel et ses paramètres dérivés ont été calculés pour la période 2005 – 2004, l'environnement éolien ainsi le régime des vents efficaces ont été déterminés et discutés, en association avec les types de formations dunaires existant dans le système dunaire.

Tableau 4. Classification de l'énergie éolienne et régime du vent en fonction du déplacement potentiel et la variabilité directionnelle du vent, selon Fryberger et Dean (1979) et Lancaster (1995)

DP (UV)	RDP/DP	Variabilité directionnelle	Environnement éolien	Régime du vent	Forme dunaire
< 200	< 0.3	Forte	Faible énergie	Complexe, bimodal large	Pyramidale
200–400	0.3–0.7	Moyenne	Moyenne énergie	Bimodal large, étroit,	Linéaire
> 400	> 0.7	Faible	Forte énergie	Unimodal large, étroit,	Barkhanique

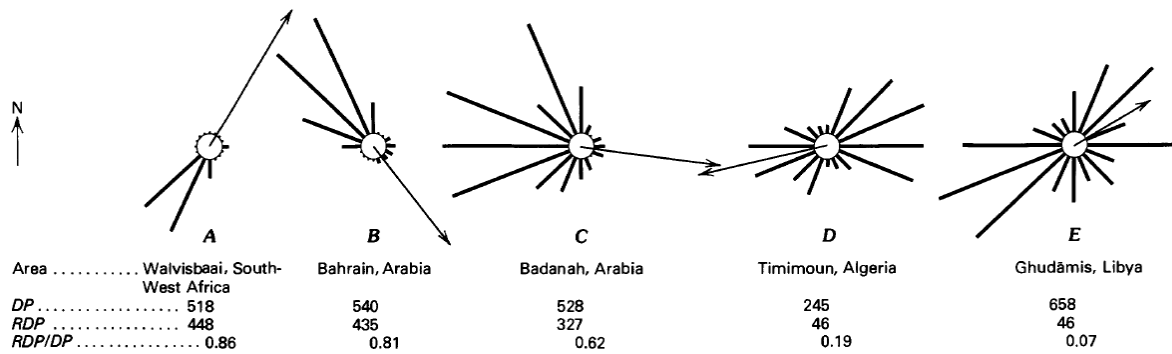


Figure 16. Principaux types de roses de déplacement potentiel des sables et régimes des vents selon Fryberger et Dean (1979) : (A) Unimodal étroit ; (B) Unimodal large; (C) Bimodal étroit ; (D) Bimodal large ; (E) Complexe (McKee, 1979)

4. Résultats et discussion

4.1. Régime mensuel, annuel et interannuel de déplacement des sables

Similairement au régime des vents efficaces, les déplacements potentiels des sables présentent une variabilité temporelle, les quantités mensuelles de déplacement des sables varient de 40 UV (Novembre) à 93 UV (Mai); la région d’In–Salah est marquée d’un printemps et été à haute aptitude de transport avec des maximums en juillet (79 UV), en avril (83 UV) et mai (93 UV). Le net du transport de sable (module de la résultante) varie de 26 UV en novembre à 72 UV en juillet, ce qui correspond –respectivement– à 2 et 5 m³ de sable transporté à travers chaque 1 m de sol par mois.

Allant de 50° en mars à 76° en juillet, les angles d’orientation exprimant les directions de transport à In–Salah indiquent que les sables se déplacent uniformément vers le sud–ouest avec une fréquence de 86 %, avec la dominance des vents de l’est–nord–est (47 %) ; cette stabilité directionnelle se traduit par une faible variabilité directionnelle, où le ratio RDP/DP est en dessus de 0.52 pour tous les mois de l’année; une variabilité directionnelle encore plus faible (les vents viennent de la même direction) coïncide avec les saisons d’hiver et de l’été, où l’indice de variabilité est de 0.92 en juillet, 0.89 en décembre, 0.84 en août et 0.78 en janvier.

Pour l’ensemble de la période 2005 – 2014, la région d’In–Salah manifeste une forte valeur de déplacement potentiel et de déplacement net (785 et 560 UV respectivement).

Selon la classification de Fryberger et Dean (1979), le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa peut donc être classé parmi les environnements à forte énergie éolienne.

Le tableau 5 et la figure 17 montrent que le régime interannuel de déplacement potentiel de sable est marqué par une importante variabilité. De 2005 en 2014, la capacité de transport varie entre 404 UV (2009) à 1160 UV (2012), induisant que toutes les années ont été marquées par une forte énergie.

Il a été constaté que les années à capacité de transport élevée se sont distinguées par de forts pourcentages des vents efficaces (W), ex. 2012 (1160 UV – 56 %) et vice versa, ex. 2008 (600 UV – 42 %).

La forte relation entre les DP (UV) et W (%) est confirmée par une valeur significative (0.99) du coefficient de corrélation linéaire. Du point de vue statistique, et durant la période considérée, le déplacement potentiel est positivement proportionnel avec les vents efficaces selon la formule :

$$DP = 43W - 1294 \quad (11)$$

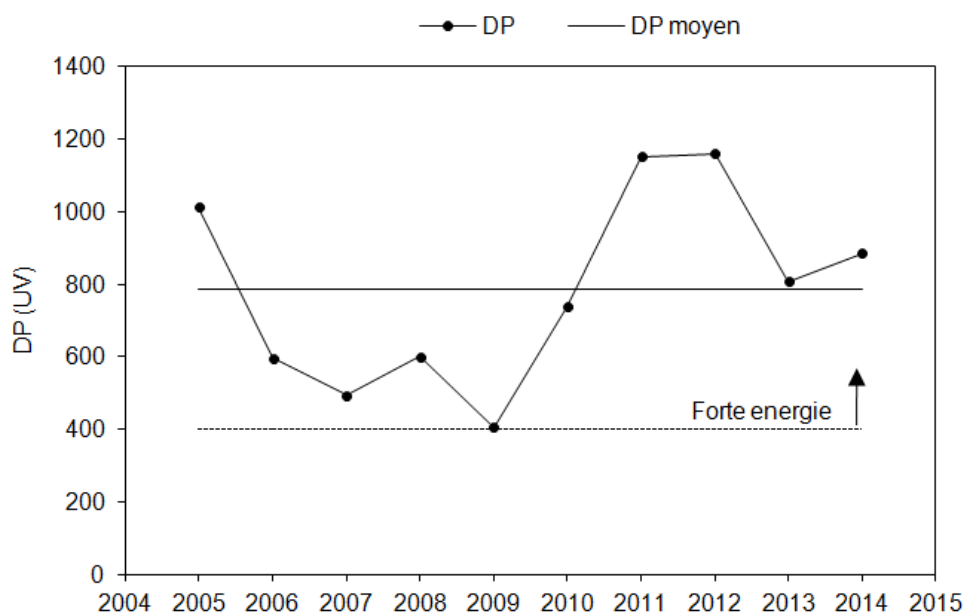


Figure 17. Variations interannuelles des déplacements potentiels annuels pour la station d'In-Salah (2005–2014), notez que toutes les années ont une valeur de DP en dessous du seuil de forte énergie éolienne

4.2. Régime du vent

La rose annuelle des sables (figure 18H) montre que les vents efficaces et conséquemment le transport des sables, se fait vers le sud-ouest et surtout vers l'ouest-sud-ouest (RDD= 64°) qui figure comme direction dominante, ceci donne lieu à une faible variabilité de la direction (RDP/DP = 0.71).

Par conséquent, et en plus du fort caractère de l'énergie éolienne de la région, le régime du vent à In-Salah peut être qualifié d'unimodal large, vu que la distribution directionnelle des vents efficaces met en évidence la direction est-nord-est comme un mode prééminent par rapport aux autres directions.

Les résultats obtenus conviennent à ceux obtenus par Breed et al. (1979) qui estiment le DP à 541 UV, le module de la résultante à 454 UV, et conséquemment l'indice de variabilité directionnelle à 0.83, les dunes de sable de l'Erg Sidi Moussa se déplacent donc sur des terrains plats et peu couverts de végétation sous le vent en accordance avec les vents de l'alizé continental qui prédomine dans la région (Boulghobra et al., 2014), car In-Salah est située au sud de la zone des vents hivernaux de l'ouest, aussi bien que l'activité des cyclones frontaux est plus importante au nord de l'Algérie (Breed et al., 1979).

Ces résultats confirment aussi Warren et Knott (1979) in Brookfield et Ahlbrandt (1983), qui qualifient le régime du vent dans le petit Erg Sidi Moussa d'unimodal fort et est associé à des dunes barkhaniques. Ainsi, on peut déduire que la formation, la morphologie et géodynamique des dunes mobiles à In-Salah sont le résultat d'un régime éolien stable et uniforme, et d'un processus éolien de longue durée.

Tableau 5. Récapitulatif mensuel des déplacements potentiels, modules de la résultante, angles d'orientation et indices de variabilité des vents pour la station d'In-Salah (2005–2014)

Mois	DP (UV)	RDP (UV)	RDP (m ³ /m)	RDD (degré)	Direction de déplacement	RDP/DP
J	76	59	4	67	Ouest Sud Ouest	0,78
F	65	44	3	62	Ouest Sud Ouest	0,68
M	57	30	2	50	Sud Ouest	0,52
A	83	46	3	55	Sud Ouest	0,56
M	93	60	4	63	Ouest Sud Ouest	0,65
J	65	42	3	65	Ouest Sud Ouest	0,64
J	79	72	5	76	Ouest Sud Ouest	0,92
A	71	60	4	70	Ouest Sud Ouest	0,84
S	42	29	2	64	Ouest Sud Ouest	0,70
O	55	40	3	61	Ouest Sud Ouest	0,73
N	40	26	2	64	Ouest Sud Ouest	0,63
D	58	52	4	61	Ouest Sud Ouest	0,89
Année*	785	560	39	64	Ouest Sud Ouest	0,71
Année**	541	454	32		Ouest Sud Ouest	0.83
* Cette recherche						
** Breed et al., 1979						

Tableau 6. Récapitulatif annuel des ratios des vents efficaces W, déplacements potentiels DP, modules de la résultante RDP, et indices de variabilité directionnelle RDP/DP pour la station d'In-Salah (2005–2014)

Année	W (%)	DP (UV)	RDP (UV)	RDP (m ³ /m/année)	RDD (degré)	RDP/DP
2005	53	1012	743	52	67	0,73
2006	44	596	409	29	61	0,69
2007	41	494	365	26	60	0,74
2008	42	600	392	27	59	0,65
2009	44	404	315	22	64	0,78
2010	46	737	436	31	67	0,59
2011	58	1152	927	65	65	0,80
2012	56	1160	921	64	67	0,79
2013	48	806	520	36	62	0,65
2014	50	885	543	38	64	0,61
Période	48	785	560	39	64	0,71

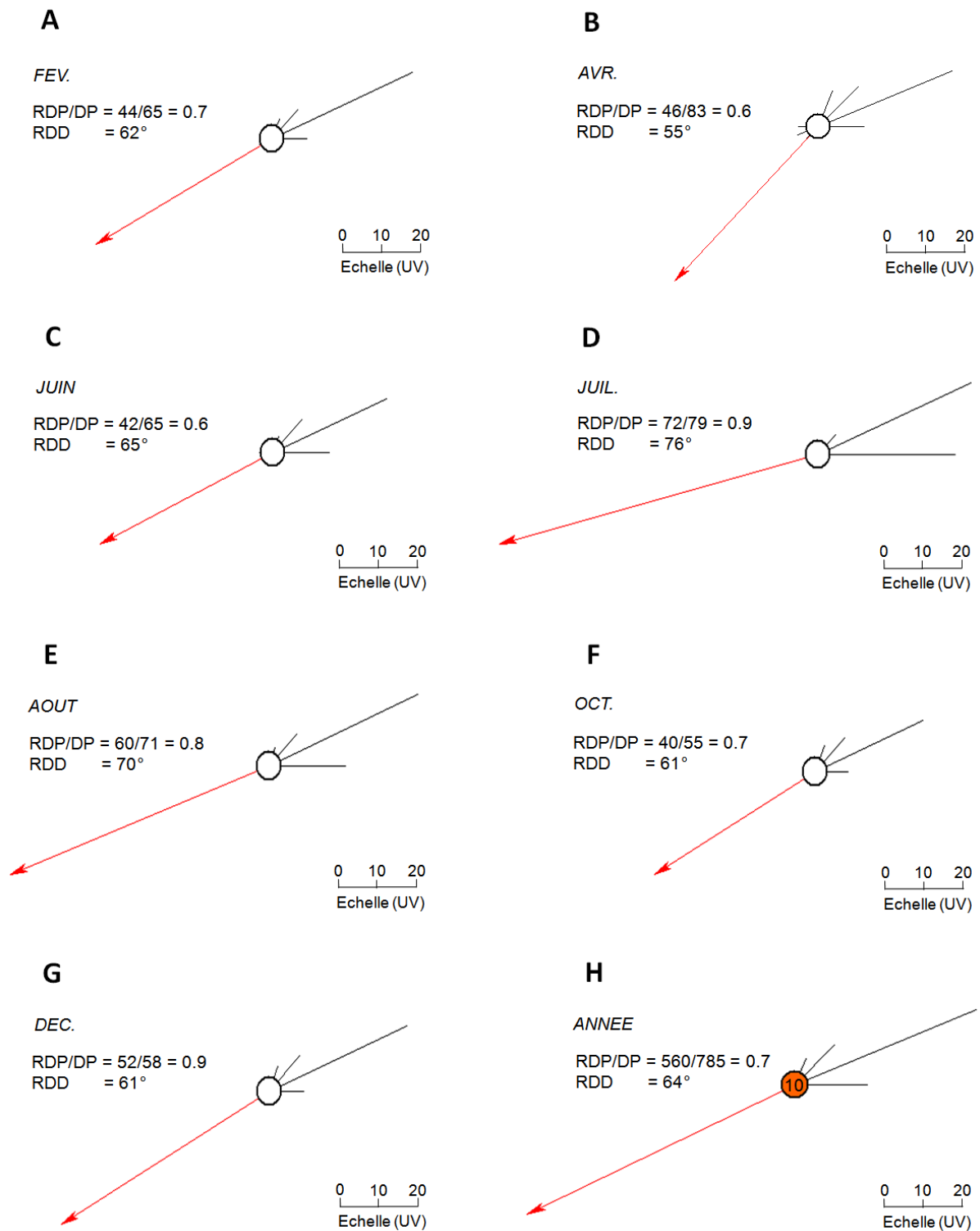


Figure 18. De (A) à (G) Roses de déplacement potentiel des sables pour 7 mois de l'année, chaque vecteur représente le déplacement potentiel pour chacune des 16 directions vers le cercle au centre du diagramme, la longueur de la flèche rouge correspond à la valeur du module de la résultante RDP, tandis que sa direction indique la tendance de transport des sables. (H) Rose des sables annuelle pour l'ensemble de la période, le chiffre dans le cercle est un facteur de réduction par lequel, le DP de chaque direction est divisé pour simplifier le traçage du diagramme. Chacune des roses mensuelles et annuelles montre la prédominance des vents venant de l'est-nord-est vers l'ouest-sud-ouest

5. Conclusion

L'application du modèle de Fryberger et Dean (1979), ayant recours aux données aérologiques de la station In-Salah aéroport pour la période 2005–2014, a permis l'appréciation des aptitudes de la région d'In-Salah au transport du sable, et la caractérisation de l'environnement en matière d'énergie éolienne.

La capacité de transport CT (déplacement potentiel DP) est estimée à 785 Unités vectorielles, tandis que le module de la résultante MR est de 560 Unité vectorielle, soit 39 m^3 de sable transporté à travers chaque 1 mètre de surface terrestre par an ; ceci permet de classer le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa parmi les environnements à haute énergie éolienne avec un maximum de transport durant les mois de printemps et de l'été.

Le calcul de l'angle d'orientation des vents efficaces (64°) laisse constater la stabilité et l'uniformité des directions de déplacement des sables vers l'ouest-sud-ouest (ville d'In-Salah) durant toute la période considérée.

Le coefficient de migration des sables CM (RDP/DP) est de l'ordre de 0.71, ceci implique une très faible variabilité directionnelle des vents efficaces, et que le régime des vents est du type unimodal large associé à des dunes de sable du type barkhanoïde.

Chapitre Troisième

Morphologie des dunes de sable et sédimentologie des sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa

1. Généralités sur les dunes de sable éolien

1.1. Le vent comme agent érosif

Le vent résulte de l'inégalité de la pression atmosphérique liée aux variations des facteurs météorologiques ou de la topographie, autrement dit, c'est le mouvement de l'air résultant des différences de pression, le flux d'air se déplace d'une région de haute pression à un autre de faible pression, et plus les différences de pression sont importantes plus la vitesse du vent sera plus forte.

Le vent peut être caractérisé par sa direction, orientation et vitesse exprimée généralement en m/s, km/h ou en nœud (1 nœud= 0,514444 m/s). Deux types de flux d'air peuvent être distingués : 1) un flux turbulent qui est caractérisé par des tourbillons dans lesquels il y a un mouvement de particules autour d'un axe, dont la vitesse est inversement proportionnelle à la distance de l'axe et elle peut atteindre cinq fois la vitesse du vent non perturbé. Les tourbillons d'air peuvent se déplacer ou être stationnaires, ces derniers sont plus permanents dont leur formation est surtout contrôlée par des obstacles topographiques ; 2) un flux laminaire qui correspond à des lignes aérodynamiques parallèles, ces dernières sont plus rapides à l'atmosphère par rapport à la surface de la terre (Mainguet, 1995).

1.2. Le mouvement du sable

Le transport éolien des sédiments résulte de l'interaction entre le vent et la surface de la terre, c'est un processus complexe englobant plusieurs modes de déplacement qui, peuvent se produire plus ou moins simultanément (Bagnold, 1941).

La compréhension du fonctionnement des procédés de transport des sédiments, nécessite la connaissance des caractéristiques pertinentes de l'état de surface (ex. texture des sédiments, taux de recouvrement végétal, type de la croûte et degré de cohésion) ainsi que la dynamique du flux d'air à la surface (Lancaster, 1995).

Selon Bagnold (1941), le transport éolien se distingue en 3 modes principaux et ce, dépend principalement de la granulométrie des sédiments (figure 19) :

Les particules fines de taille allant du moins de 20 à 70 μm correspondent plutôt à de la poussière et sont transportées par suspension. Il ya mise en suspension de la poussière dans l'air lorsque la vitesse des fluctuations verticales associées aux turbulences de l'air est supérieure à la vitesse de retombée des particules (loi de Stokes), qui se maintiennent en altitude (jusqu'à 3000 m) et se mettent en migration pour de longues distances (parfois des milliers de kilomètres) sous l'effet des tourbillons turbulents du vent (Mainguet, 1995).

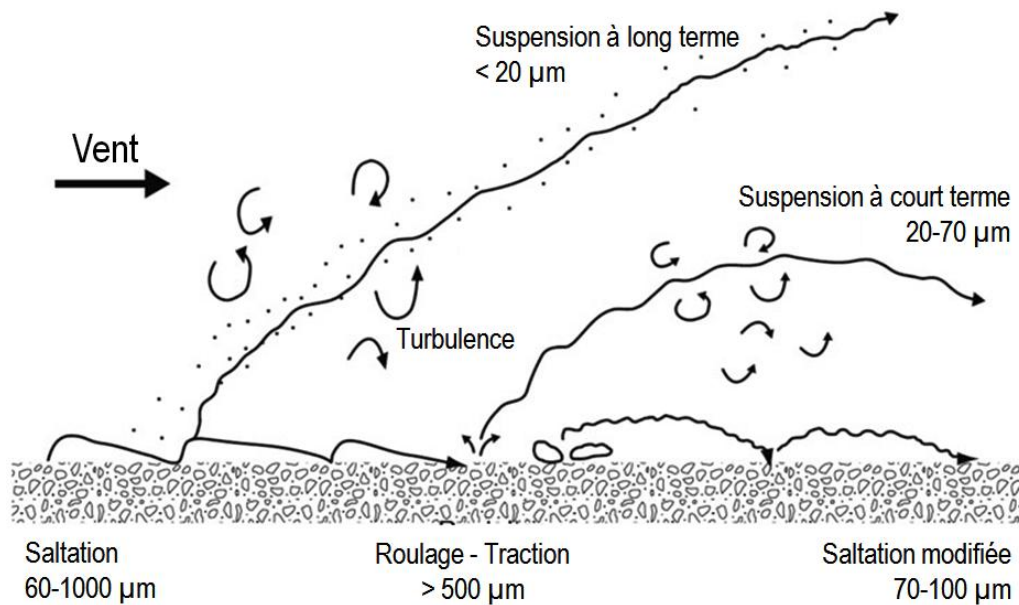


Figure 19. Modes de transport des particules de sable selon Bagnold (1941), modifiée après Lancaster (1995)

Les grains de sable ayant un diamètre d'environ 60 à 1000 μm se déplacent par saltation, il s'agit du mode de transport le plus dominant selon lequel le nuage des grains de sable meut en faisant des séries de sauts sur de courtes distances (environ 10 cm).

Durant la saltation, les grains de sable se soulèvent de façon verticale, se déplacent en faisant une action de rotation, et puis retombent vers le bas selon un angle α exprimé par l'équation de Bagnold (1941) :

$$V^*/V = \tan \alpha \quad (15)$$

Où V^* est la vitesse terminale de chute du grain de sable (m/s), et V est la vitesse de l'air (m/s) ; la rugosité du substrat est un facteur favorisant lors de la saltation, qui devrait être plus active sur un substrat cohérent que sur un terrain meuble.

Les particules de taille supérieure à 500 μm (0.5 mm) se déplacent aussi par saltation et plus précisément par roulement et traction, car leurs tailles sont trop importantes pour que le vent puisse les soulever.

1.3. Classification des édifices dunaires

L'accumulation des sables éoliens est souvent due à la diminution de la vitesse du vent (en dessous de la vitesse seuil d'entraînement), perdant alors sa capacité de transport, mais elle peut aussi être liée à des facteurs physiques comme l'existence d'obstacles souvent de nature topographique (Tsoar, 2001).

Les dunes de sable éolien sont définies comme l'accumulation de sable entraîné et déposé par le vent, ils sont généralement composés de grains de quartz et de feldspath avec un diamètre allant de 0,062 à 2 mm (Lancaster, 2009).

La longueur maximale d'une dune peut varier de moins de 1 m à plusieurs dizaines de kilomètres, tandis que sa hauteur peut varier de quelques dizaines de centimètres à plus de 150 m ; de grosses dunes peuvent se superposer pour donner lieu à des méga-dunes, comme elles peuvent être reliées entre elles pour former une chaîne ou un champ de dunes (Pye et Tsoar, 2009).

La formation des dunes de sable est principalement contrôlée par la vitesse, la direction et la fréquence du vent, l'importance du flux sableux, et aussi la présence des plans d'eau et le taux de recouvrement en végétation (McKee, 1983).

L'accumulation des sables éoliens se manifeste à une multitude de types et variétés d'édifices sableux, dont la distinction est généralement basée sur les caractéristiques et critères suivants :

- 1) La taille des particules des grains de sable ;

- 2) La forme, le nombre et l'orientation du front de la dune (surface de la pente sous le vent) ;
- 3) Présence des obstacles topographiques ou végétaux ;
- 4) Energie de l'environnement éolien et régime du vent efficace (intensité et variabilité directionnelle) ;
- 5) Aptitude dynamique et activité de surface ;
- 6) Abondance des stocks (flux) sableux et approvisionnement en sédiments ;
- 7) Type du substrat (nature du lit de transport des sédiments) ;
- 8) Etat du bilan sédimentaire en termes de gain ou de perte des sédiments.

De nombreuses tentatives de classification des dunes de sable ont été faites en fonction des critères descriptifs et quantitatifs susmentionnés.

1.3.1. Classification de McKee (1979)

McKee (1979) propose un système de classification descriptif basé sur la forme de la dune, en plus du nombre et de l'orientation des flancs de dunes (figure 20), il distingue entre :

1.3.1.1. Type de dune basique (simple)

Une dune simple consiste à une dune individuelle spatialement séparée des dunes avoisinantes, dont la longueur d'onde (distance la plus courte entre la crête d'une dune à l'autre) est généralement de 10 à 500 m.

a. La dune barkhanique

La dune barkhanique est parmi les dunes basiques les plus courantes, il s'agit d'un édifice en forme de croissant, à concavité sous le vent possédant un versant raide d'éboulement suivi d'une aire de déflation ou de moindre dépôt, une barkhane parfaite possède un axe de symétrie qui est également l'axe de migration, cet axe est orienté perpendiculaire à la direction d'un vent monodirectionnel (Callot, 1987).

Le type de dunes barkhanoides (ayant la forme en croissant) comporte la simple barkhane individuelle, la chaîne barkhanique qui correspond à des lignes parallèles de barkhanes

chevauchées, et les dunes transverses qui consistent à des édifices sableux ayant l'aspect de chaînes parallèles, rectilignes et peut sinueuses.

Les barkhanes se forment dans des zones ouvertes à régime éolien unidirectionnel (Fryberger et Dean, 1979 ; Pye et Tsoar, 2009) ou à régime bimodal étroit avec un flux sableux limité (Bourke et Goudie, 2009).

La formation des deux cornes (bras) de la barkhane est due à la différence du taux et de la vitesse de la saltation et l'accumulation des sables le long de la surface de la dune ; sur les bords de la dune, c'est le processus de saltation qui prédomine en raison de l'accélération de la vitesse du vent dans ces zones, le mouvement des sables est conséquemment plus rapide aux bords de la dune qu'à sa crête, entraînant la formation et l'élongation des cornes, d'où la forme typique du croissant.

Une barkhane se déplace par l'érosion du côté au vent de la dune (dos) simultanément avec la déposition et l'avalanche des sables sur le flanc sous le vent formant le front de la barkhane (Tsoar, 2001).

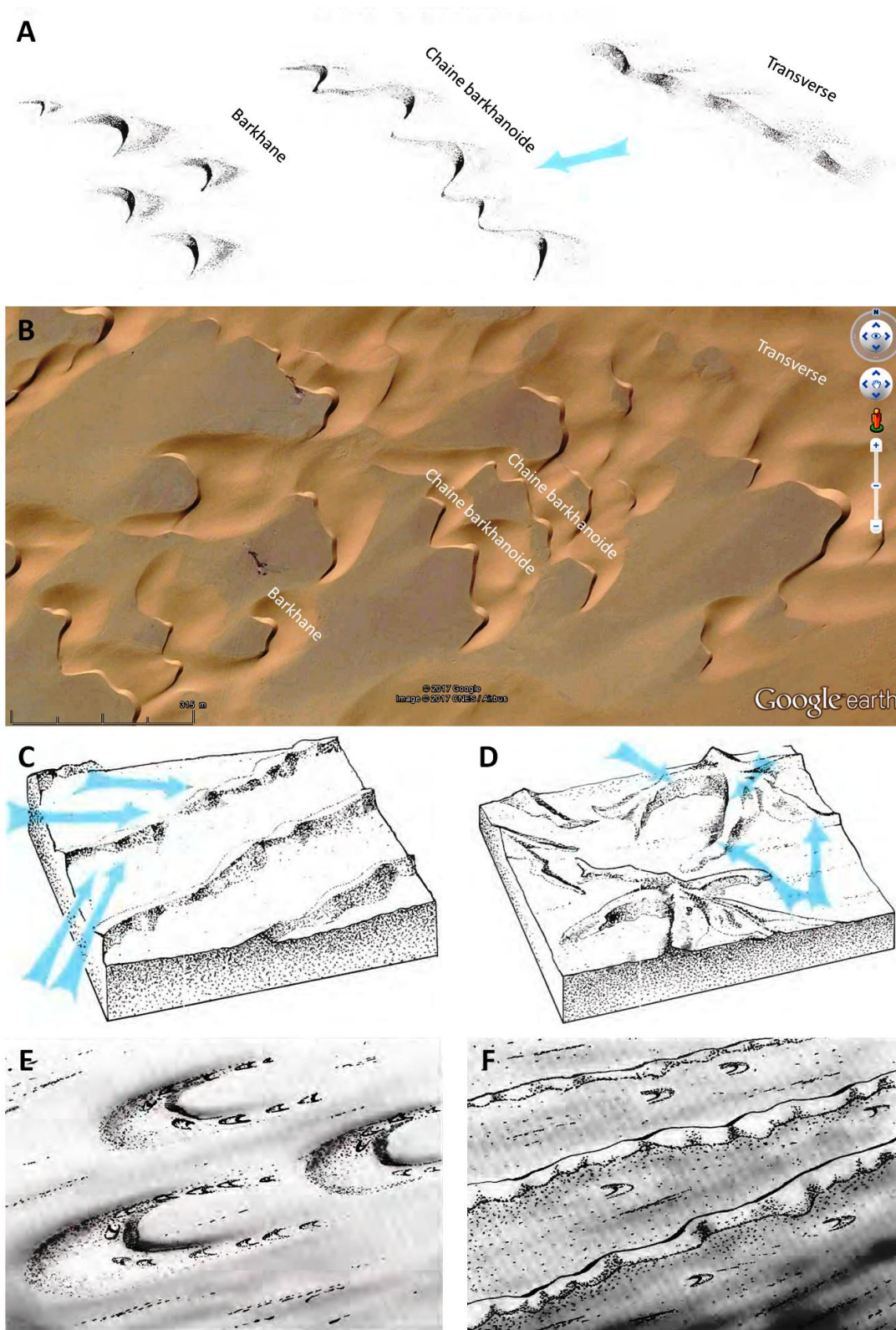


Figure 20. Principaux types de dunes selon McKee (1979) : (A) Séquence de développement de dune barchanique simple ; (B) Séquence de développement de dune barchanique simple dans l’Erg Sidi Moussa à In-Salah (Google Earth) ; (C) Dune linéaire simple ; (D) Dune pyramidale simple ; (E) Dunes composées de petites et grosse barchanes (mégadune) ; (F) Dunes complexes à dunes linéaires avec dunes barchaniques en interdunes, la flèche bleu indique la direction des vents dominants (McKee, 1979)

Les dunes barkhanoides se caractérisent par la présence d'un seul flanc disposé perpendiculaire à la direction du vent, ils se présentent souvent en forme de séquence dont l'évolution morphodynamique à partir de la dune transverse jusqu'à la simple barkhane, est principalement due à la diminution de l'approvisionnement en sable.

b. La dune linéaire

Communément connue sous l'appellation arabe « Sif », elle consiste à une chaîne rectiligne manifestant ou non un aspect ondulé, avec la présence d'un flanc incliné du côté sous le vent (front) et un autre du côté au vent (dos), cette dune résulte d'un vent bidirectionnel ayant deux directions convergentes.

c. La dune pyramidale

Appelée aussi « Ghourd » de l'arabe, est une dune à multiples flancs qui résultent d'un régime éolien multidirectionnel, une dune pyramidale est caractérisée par une multitude de bras allongés (plus de 3) qui s'étendent vers l'extérieur de la dune et se divergent à partir du corps central de la dune, d'où l'appellation de « dune en étoile ».

1.3.1.2. Type de dune composée

Les dunes composées consistent à l'association de deux (ou plus) du même type de dunes simples, souvent cette combinaison est due à une superposition (chevauchement) ou une collision.

1.3.1.3. Type de dune complexe

Il s'agit de l'association de deux (ou plus) types différents de dunes simples chevauchées, donnant naissance à des mégadunes ; une chaîne d'étoiles comme exemple résulte de la superposition de rangées parallèles de dunes linéaires et des dunes pyramidales.

1.3.2. Classification de Mainguet (1984)

Mainguet (1984) introduit la notion du bilan sédimentaire pour caractériser les dunes de sable dans un système global d'action éolienne SGAE. On parle de bilan sédimentaire positif lorsque le dépôt est quantitativement plus élevé que l'exportation, le bilan est dit

en équilibre lors de l'égalisation de l'arrivage et du départ des sédiments, et un bilan sédimentaire négatif lorsque dans un secteur soumis à des vents porteurs de particules sableuses, la déflation et l'exportation sont supérieures à l'apport.

Sur cette base, les dunes sablo-éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories :

- 1) Les dunes de dépôt formées dans un environnement éolien à bilan sédimentaire positif, comprenant les dunes transverses dans un régime éolien unidirectionnel, les dunes linéaires (Sifs) sous un régime bidirectionnel et les dunes pyramidales sous un régime de vent multidirectionnel.
- 2) Les dunes d'érosion formées dans des milieux à bilan sédimentaire négatif, englobant les dunes longitudinales et paraboliques.

Tableau 7. Classification des dunes de sable en fonction du bilan sédimentaire selon Mainguet (1984)

Bilan sédimentaire	1. Positif	2. Négatif
	Apport > départ	Apport < départ
	Accumulation dominante	Déflation dominante
Régime éolien	Types de dunes	Types de dunes
Unidirectionnel	Edifice barkhanique	Dune longitudinale (à pavage de type Reg)
	Barkhane	Edifice parabolique (présence du couvert végétal)
	Chaîne barkhanique	
	Dune transverse	
Bidirectionnel	Dune linéaire (Sif)	
Multidirectionnel	Dune pyramidale (Ghourd)	

1.3.3. Classification de Pye et Tsoar (2009)

Pye et Tsoar (2009) classent les dunes de sable en trois grandes catégories compte tenu du processus de l'accumulation : 1) dunes dont le développement est lié aux obstacles topographiques, 2) dunes auto-accumulées (dunes autogènes) et 3) dunes dont le développement est fortement influencé par la végétation (dunes phytogènes).

1.3.3.1. Dunes accumulées sous l'effet d'obstacles topographiques

L'interception d'un vent chargé de sédiments par un obstacle topographique (falaise ou butte par exemple) induit la séparation du flux d'air autour de l'obstacle, en affectant sa vitesse et direction et en créant des zones d'accélération (turbulence) et de décélération (Bagnold, 1941 ; Pye et Tsoar, 2009).

Trois types d'accumulations peuvent avoir lieu dépendamment de la vitesse du flux d'air et la hauteur de l'obstacle : accumulations au front de l'obstacle du côté au vent (Echodune et climbing dune en anglais), accumulations à la surface de l'obstacle (Cliff-top accumulation en anglais) et, en fin des accumulations du côté sous le vent de la crête de l'escarpement (Leedunes et falling dunes en anglais) (Figure 21).

1.3.3.2. Dunes auto-accumulées (autogènes) liées à la rugosité du terrain ou la fluctuation aérodynamique

En cas de vent puissant dépassant la vitesse seuil d'arrachement, et en l'absence d'obstacle de nature topographique ou végétale, les grains de sables en mouvement ont tendance à s'auto-déposer et former des édifices éoliens. Cette tendance est due au changement de la rugosité du substrat de transport, le passage d'une surface rugueuse (gravier) à une surface lisse (sable fin) provoquera une forte baisse de la vitesse d'arrachement conduisant à l'accumulation des sédiments sableux (Greeley et Iversen, 1985).

L'auto-accumulation des sables éoliens est principalement affectée par l'hétérogénéité de la rugosité du substrat de transport qui, détermine la vitesse du vent près de la surface, et ceci a une influence significative sur le taux de transport des sédiments et la morphologie des dunes. Pour un édifice sableux, Il est évident que la vitesse du vent sur le flanc du côté au vent est plus élevée que celle sur le flanc sous le vent, cette variabilité des vents et des apports en sable produit un changement dans la morphologie des dunes en la remodelant en un nouvel état d'équilibre, où l'apport entrant des matériaux est égal au apport sortant ; dans cette condition d'équilibre, la dune est dite en état stable, où elle préserve sa forme et sa taille lors de son déplacement (Bagnold, 1941; Tsoar, 1985).

Selon la classification de Pye et Tsoar (2009), les dunes auto-accumulées se distinguent en dune barkhanique, dune en bouclier, chaîne barkhanoïde, dune transverse, dune linéaire (Sif) dépourvue de végétation et dune pyramidale (Ghourd). La genèse et la morphologie des dunes auto-accumulées sont principalement contrôlées par la variabilité directionnelle des vents efficaces (régime des vents) et l'abondance des apports en sédiments (figure 22).

1.3.3.3. Dunes développées sous l'influence de la végétation (dunes phytogènes)

Ce sont des dunes formées à cause de l'existence de la végétation.

1.3.3.4. Dune parabolique

Une dune parabolique est d'une forme en U avec des bras parallèles stabilisés par un couvert végétal modérément dense, la longueur de ces bras peut atteindre 1 km, tandis que le front de la dune est actif et non végétalisé, il peut atteindre une hauteur de 70 m et avance sous l'effet des vents par avalanche. Ce type de dune est communément trouvé en plusieurs régions côtières semi arides à subhumides mais peut être trouvé en régions arides, sa formation est due à un régime de vent unidirectionnel avec présence du couvert végétal.

1.3.3.5. Dune linéaire végétalisée

Une dune linéaire végétalisée est caractérisée par un profil arrondi, dont la hauteur peut atteindre des dizaines de mètres et la longueur peut s'étendre sur des dizaines de kilomètres. Ce type de dune est principalement fréquent dans le désert du Kalahari en Afrique et le désert de l'Australie.

La couverture en végétation peut être partielle ou entière, comme elle peut être abondante en bas de la dune et clairsemée sur sa crête, ce qui détermine son degré de stabilité ; ces dunes ont le caractère exclusif de la capacité à la jonction, où la convergence de dunes adjacentes peut donner naissance à une seule chaîne en forme de Y.

Outre la présence du couvert végétal, une dune linéaire végétalisée se distingue d'une dune linéaire non végétalisée (Sif) de part son élongation en direction du vent le plus puissant, son alignement droit sans tortuosité et sa jonction en forme de Y (Tsoar, 2001).

1.3.3.6. Dune en monticule (hummock dune)

Le terme dune en monticule peut être utilisé pour décrire tout édifice sableux, de forme irrégulière et partiellement ou entièrement végétalisée, ceci inclut les nebkas et les rebdous en régions côtières comme en milieux arides.

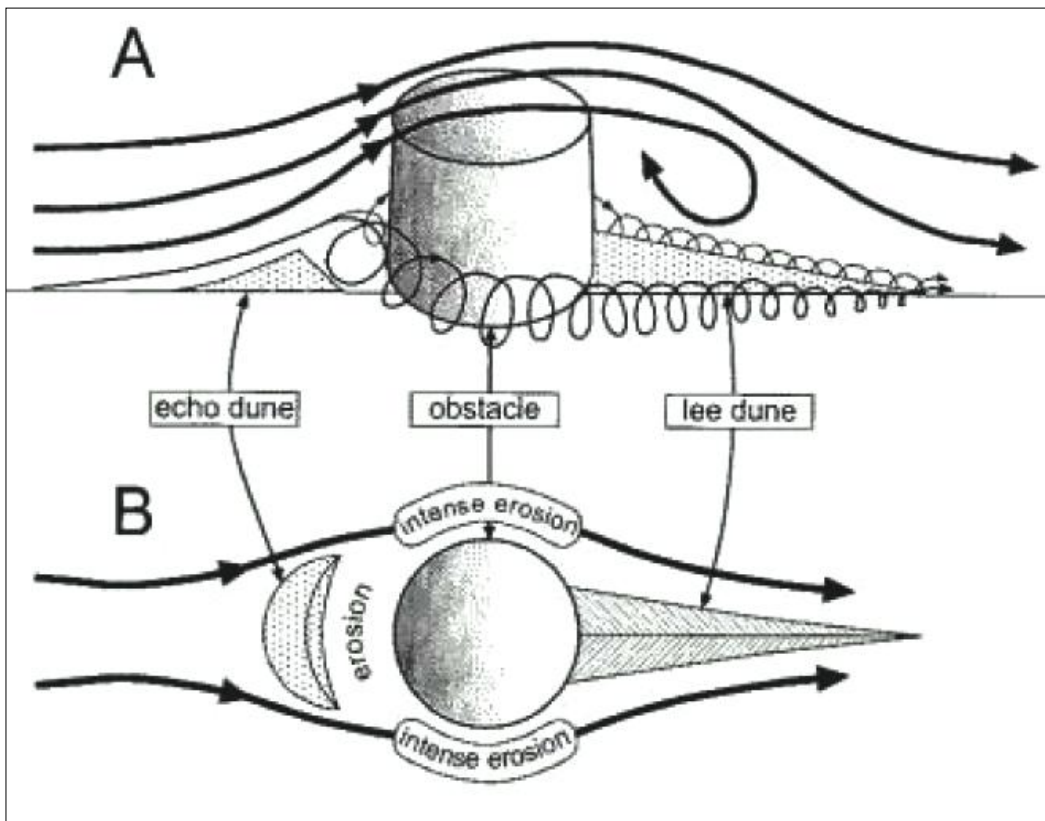


Figure 21. Effet d'un obstacle sur l'accumulation de sable du côté au vent et sous le vent : (A) Vue de côté, (B) Vue en plan (Pye et Tsoar, 2009)

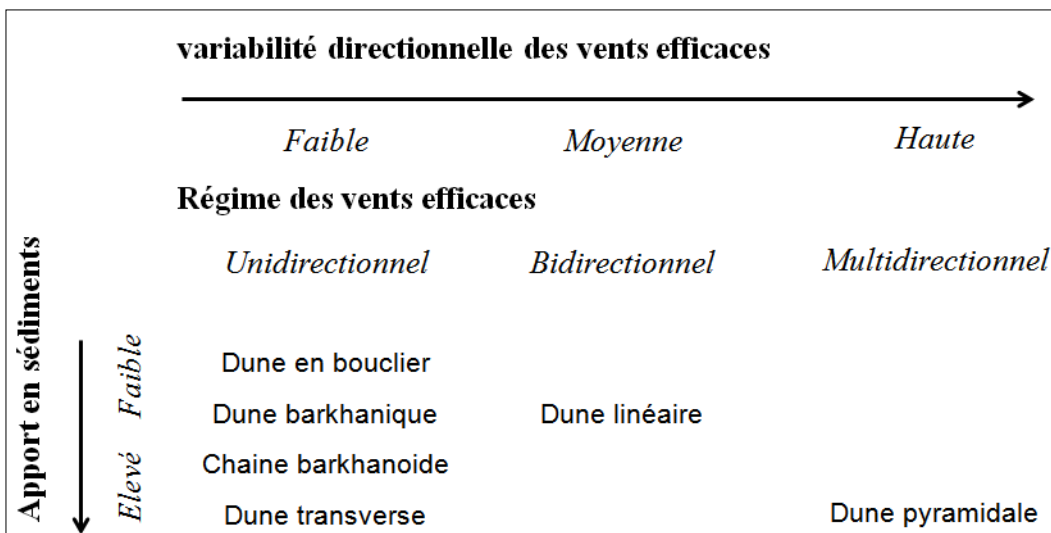


Figure 22. Types de dunes auto-accumulées en fonction de l'abondance des flux sableux et le régime du vent, après McKee (1979)

2. Types et morphologie des dunes de l'Erg Sidi Moussa

En plus de l'investigation du terrain, les images satellitaires couvrant la région d'In-Salah à moyenne et à haute résolution, ont permis l'identification de l'essentiel des caractéristiques des dunes de sable de l'Erg Sidi Moussa (figure 23).

Les dunes du type et sous types barkhanoides sont clairement reconnaissables dans le système dunaire : dune transverse, crête barkhanoïde, barkhane, bouclier barkhanique et dièdre.

Composées essentiellement de barkhanes juxtaposées et fusionnées en forme de lignes parallèles, les dunes transverses et les crêtes barkhanoides occupent la partie amont de l'Erg Sidi Moussa (partie au vent à l'est), elles se trouvent aussi dans la partie nord-est de l'agglomération d'In-Salah.

Toutes ces dunes barkhanoides sont orientées par leurs axes perpendiculairement à la direction des vents, c.à.d. que leurs flancs du côté sous le vent font face au secteur sud-ouest, en bonne concordance avec la direction des vents efficaces et la tendance de la direction résultante de déplacement potentiel des sables.

Les barkhanes individuelles (simple) et isolées représentent la forme barkhanoïde prédominante, avec une largeur qui varie de 80 à 300 m.

Les boucliers et dièdres barkhaniques sont très peu répandus, ils se trouvent généralement dans les parties aval sous le vent du système dunaire et, correspondent à des stades de développement morphologique des dunes barkhaniques.

A partir des mesures sur terrain et images satellitaires, il ressort que la hauteur des barkhanes est en général comprise entre 20 et 30 m, et que leur espacement est de 80 m en minimum.

Les dunes barkhaniques associées sont aussi identifiées avec une largeur qui peut atteindre les 400 m et un espacement variable.

Les barkhanes de moindres tailles sont le plus souvent symétriques, tandis que les barkhanes les plus larges sont généralement asymétriques, où la corne sud de la barkhane peut présenter plus d'élongation vers le sud-ouest.

Le phénomène de chevauchement est souvent observé suite à la superposition des barkhanes récentes plus actives sur les anciennes barkhanes moins actives.

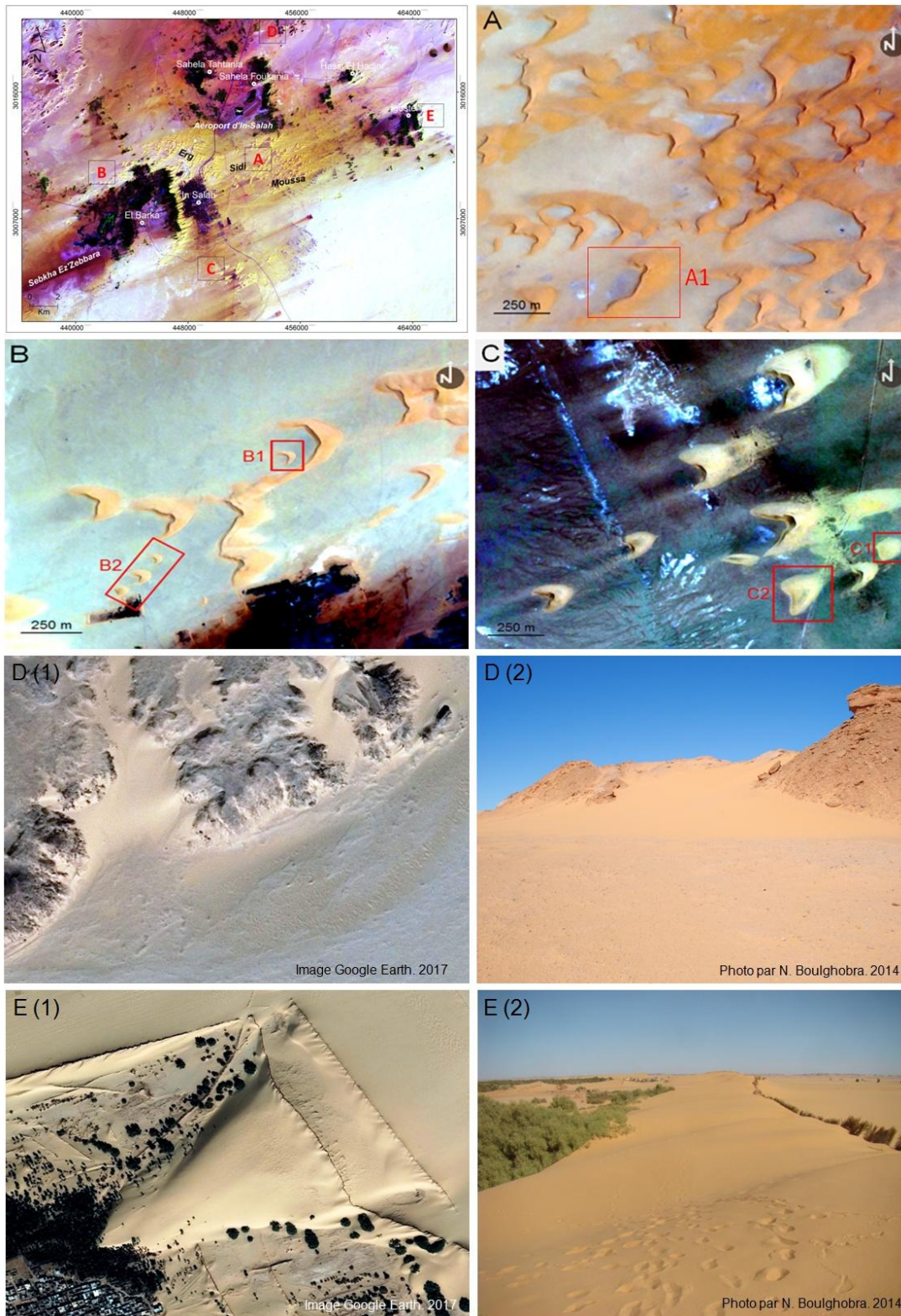


Figure 23. Imagerie à haute résolution (Google Earth) illustrant l'essentiel du modelé dunaire dans l'Erg Sidi Moussa. (A) Champs de crêtes barchanoïdes et barchanes associées, (A1) Dune barchanique asymétrique, (B) Barchanes associées, (B1) et (B2) Petites dunes barchaniques générées de grande barchane, (C) Zone de barchanes isolées, (C1) et (C2) Correspondent à un bouclier et dièdre barchanique respectivement, (D) Placage éolien lié à un obstacle topographique (rebords sud du plateau de Tademaït), (E) Accumulation liée à un obstacle artificiel (palmeraie ou palissage) près d'Igostène au nord-est d'In-Salah

L'investigation de quelques paramètres morphométrique des barkhanes montre que la hauteur moyenne est d'environ 14 m (de 5 à 24 m), tandis que la largeur varie entre 50 et 335 m (148 m en moyenne).

Les barkhanes les plus hautes sont généralement plus larges et plus rapprochées (espacement réduit), ces dunes prédominent dans les parcelles pilotes 2, 3, et 4 en arrière (est) et au centre du système dunaire ; dans de telles zones à budget sédimentaire positif avec un important approvisionnement en sable, la taille des dunes augmente considérablement à cause des phénomènes de collision et de chevauchement, qui sont des phénomènes fréquents dans les environnements à haute énergie éolienne.

Contrairement aux zones 2, 3 et 4, les parcelles 1 et 5 occupent respectivement le front et la marge du système dunaire. Dans ces zones, l'alimentation en sédiments s'abaisse à cause de la distance par rapport aux zones sources de sable, ce qui mène à la diminution de la hauteur et largeur des dunes barkhaniques, en même temps que l'espacement devient plus important à cause de la non-survenance de la collision.

Selon Lancaster (2009), l'asymétrie des dunes barkhanoides avec la présence d'une pente convexe est la première réaction morphologique des formations sableuses à un régime éolien unidirectionnel.

L'asymétrie des dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa peut être attribuée à trois raisons principales:

(1) Une asymétrie de la distribution directionnelle des vents (McKee, 1966): vu que les vents efficaces à In-Salah sont plus orientés sud-ouest en mars (RDD = 50°) et avril (RDD = 55°) ;

(2) La collision de petite dune avec l'une des cornes (dans notre cas, il s'agit de la corne sud) d'une barkhane de plus grande taille (Bourke, 2010), qui est un phénomène fréquemment rencontré et qui peut expliquer la taille exceptionnelle de quelques dunes barkhaniques dans l'Erg Sidi Moussa ;

(3) Effet de la topographie vu que le terrain sur lequel l'Erg Sidi Moussa s'est formé et s'y déplace présente une légère pente vers le sud (dépressions, bas fonds, zones de

sebkha), les cornes sud (senestres) peuvent s'étonger en suivant cette inclinaison qui favorise le déplacement des sables sous l'effet de la gravité.

Par ailleurs, les facteurs susmentionnés peuvent agir simultanément ce qui aboutit à la déstabilisation de l'une des cornes d'une barkhane, donnant lieu à une série de petites barkhanes récentes générées de l'une des cornes de la grande dune (Elbelrhiti et al., 2008) ; et vu la petite taille de ces dunes récentes, elles peuvent se déplacer plus rapidement que leur dune génératrice (Figure. 23B2).

En gros, l'Erg Sidi Moussa manifeste les traits typiques d'un système dunaire barkhanique, et qui reflète parfaitement son environnement éolien : les dunes barkhaniques sont situées dans les marges sud et sud-ouest de l'Erg, cette disposition spatiale est principalement attribuée à l'abondance du flux sableux qui s'abaisse graduellement du nord-est vers le sud-ouest, et c'est pourquoi les dunes transverses et crêtes barkhanoides se situent à l'arrière de l'Erg, et les dunes barkhaniques isolées se trouvent à son front, représentant une zone à flux sableux abondant et limité respectivement (Eastwood et al., 2011; Goudie, 2013).

3. Caractérisation sédimentologique des sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa

3.1. Analyses granulométriques

L'étude granulométrique d'un ensemble sédimentaire est une approche essentielle à la détermination de l'environnement sédimentaire, la dynamique de transport, de dépôt et de développement des formes éoliennes.

L'analyse granulométrique de la fraction sableuse d'un sédiment (diamètre de 0.05 à 2 mm) consiste à l'étude de la distribution des grains en fonction de leur taille, dont l'objectif est la mesure des dimensions et des variations des tailles des grains, et la connaissance de la fréquence statistique des différentes classes granulométriques, et ainsi déduire les vitesses seuils de transport.

Les caractéristiques granulométriques des sables éoliens sont étroitement liées à l'intensité de la dynamique des dunes, disponibilité des apports sableux, couvert végétal et distance de transport à partir des zones sources (Wang et al., 2003).

De multiples recherches antérieures ont montré que la distribution granulométrique des sables dunaires éoliens est un facteur déterminant dans la morphodynamique des dunes (ex. Bagnold, 1937; Tsoar, 1986; Pye et Tsoar, 1990; Lancaster, 1995), et ce en étudiant la granulométrie des sables de différents types de dunes et dans de divers régimes éoliens (ex. Bagnold, 1941; Lancaster, 1986 ; Watson, 1986).

3.1.1. Méthode

Onze (11) échantillons de sables dunaires sont prélevés des crêtes de dunes barkhaniques dans l'Erg Sidi Moussa, ces échantillons répondent au critère de la bonne répartition spatiale afin de pouvoir analyser l'effet de l'emplacement de la dune dans le système dunaire sur la distribution granulométrique des sables (figure 24).

Le nombre des échantillons peut être considéré comme représentatif, sachant que les échantillons de sable prélevés des crêtes de dunes barkhaniques présentent une faible variabilité en valeurs des paramètres statistiques en comparaison avec le reste des types de dunes (Al-Dousari et al., 2008), particulièrement quand les prélèvements présentent une bonne répartition spatiale le long d'un petit système dunaire comme c'est le cas de l'Erg Sidi Moussa.

Au laboratoire agro-pédologique du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (Touggourt), les 11 granulats ont été analysés selon la méthode classique de tamisage sec (Berthois, 1959; Verger, 1963), chaque granulats de 100 g de sable est soumis à un triage mécanique dans une colonne de tamis superposés répondant à la norme Afnor, chaque tamis est composé de mailles carrées de tailles décroissantes du haut vers le bas selon une progression géométrique de raison racine carrée, et dont le diamètre des mailles est compris entre 2 et 0.05 mm (2000–50 μm). A la base, la colonne des tamis est équipée d'une secoueuse électrique vibrante, ainsi le refus issu du tamisage à durée de 10 minutes pour chaque granulats est précisément pesé (figure 25), dépouillé et reporté sur des courbes granulométriques ayant pour abscisse le diamètre des gains de sable en échelle logarithmique (en micron), et pour ordonnée les fréquences en échelle arithmétique (en pourcent).

3.1.1.1. Paramètres et indices granulométriques

Sur la courbe cumulative, on distingue les paramètres empiriques de dispersion appelés les fractiles qui, représentent la taille des particules correspondant à un pourcentage cumulé particulier ; ils se subdivisent en:

Centiles : $C_1, C_2 \dots$; tailles de particules correspondant aux pourcentages 1 %, 2 % ...

Déciles : $D_{10}, D_{20} \dots$; tailles de particules correspondant aux pourcentages 10 %, 20 %

...

Quartiles : Q_1, Q_2 et Q_3 ; tailles de particules correspondant aux pourcentages 25, 50 et 75 %.

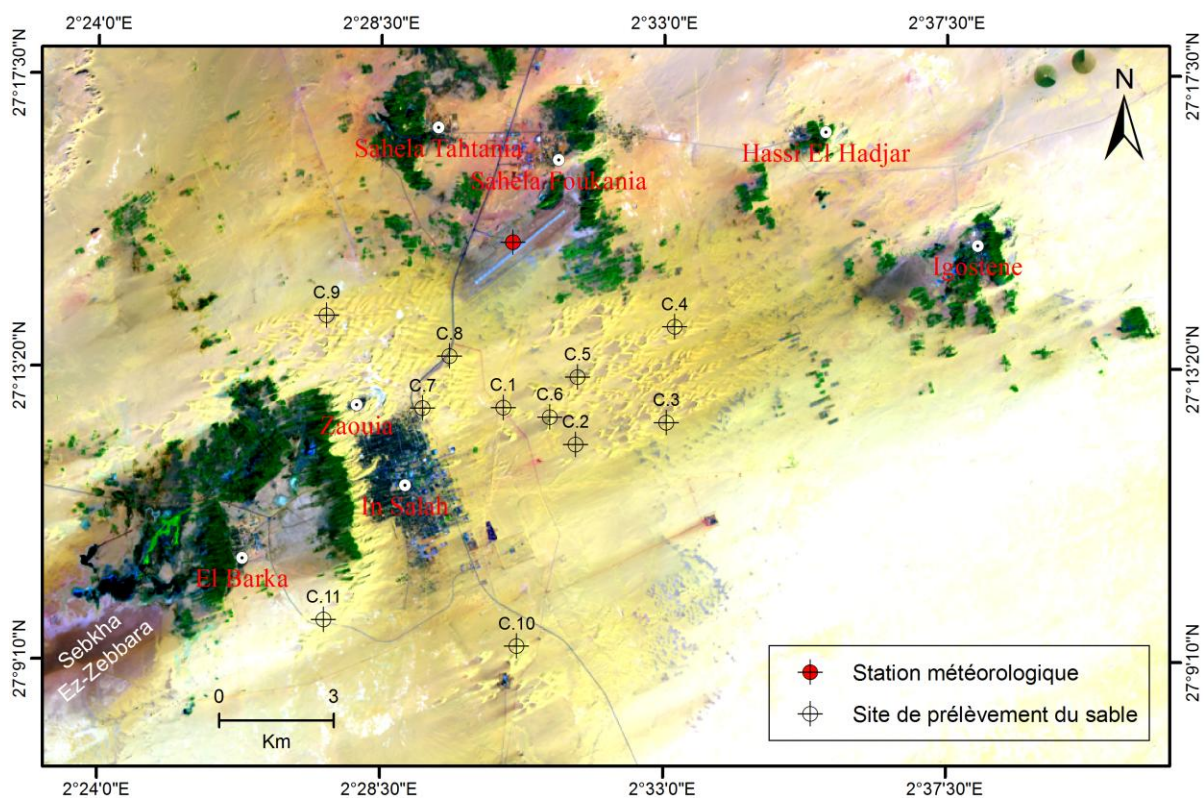


Figure 24. Carte des sites de prélèvement des échantillons de sable pour analyses sédimentologiques, superposés à une composition colorée des bandes 652 de l'image satellitaire Landsat datée 2016 (www.usgs.gov)



Figure 25. Dépouillement des résultats de l'analyse granulométrique au laboratoire

Les fractiles sont utilisés au calcul des différents paramètres granulométriques qui, peuvent être exprimés en mm comme en unité dite phi (φ), qui est selon Krumbein (1938) la transformation logarithmique de l'échelle de Wentworth (1922), basée sur le logarithme négatif binaire de la taille du grain.

$$D(\varphi) = -\frac{\log D(mm)}{\log 2} \quad (16)$$

$$D(mm) = 2^{-D(\varphi)} \quad (17)$$

$D(\varphi)$: Diamètre de grain en unité phi

$D(mm)$: Diamètre de grain en unité mm

3.1.1.2. Paramètres de position

Permettent la détermination de la puissance du transport ainsi que les conditions de dépôts.

Le mode correspond au diamètre de grain de sable le plus fréquent.

La médiane (Md ou P_{50} ou Q_2) est la valeur du diamètre telle que 50 % de la distribution ait une taille inférieure, et 50 % une taille supérieure.

Le diamètre moyen Mz est la taille moyenne des grains, il s'exprime selon la formule de Folk et Ward (1957) en unité φ (phi) et se calcule comme suit :

$$Mz(\varphi) = \frac{P_{16} + P_{50} + P_{84}}{3} \quad (18)$$

Selon Thomas (1987), les sables peuvent être classés en fonction du diamètre moyen Mz en 4 classes (tableau 8).

Tableau 8. Echelle interprétative des valeurs du diamètre moyen d'un ensemble sédimentaire

$Mz(\varphi)$	Mz (mm)	Interprétation
0 – 1	1 – 0.5	Sable grossier
1 – 2	0.5 – 0.25	Sable moyen
2 – 3	0.25 – 0.125	Sable fin
3 – 4	0.125 – 0.062	Sable très fin

3.1.1.3. Paramètres de dispersion

L'écart type Ec est utilisé à l'appréciation du triage du matériel sableux ; parmi bien d'autres, l'indice de dispersion D_{FW} de Folk et Ward (1957) est le plus représentatif car il fait intervenir les extrémités de la courbe dans la détermination du triage du sédiment, il se présente comme suit :

$$D_{FW}(\varphi) = \frac{P_{84} - P_{16}}{4} + \frac{P_{95} - P_5}{6.6} \quad (19)$$

Tableau 9. Echelle interprétative des valeurs de l'indice de dispersion (écart type) de Folk et Ward (1957) d'un ensemble sédimentaire

$D_{FW}(\varphi)$	Triage du sédiment
0 – 0.35	Très bien trié
0.35 – 0.5	Bien trié
0.5 – 0.71	Assez bien trié
0.71 – 1	Moyennement trié
1 – 2	Mal trié
2 – 4	Très mal trié

3.1.1.4. Paramètres de forme (asymétrie et acuité)

Les paramètres de forme mesurent l'allure de la distribution de part et d'autre de la médiane, ainsi il apprécie la non-normalité de la distribution des tailles par rapport à la loi de Gauss-Laplace.

L'asymétrie d'un ensemble sédimentaire Sk_I (de skewness en anglais) se calcule selon la formule de Folk et Ward (1957) et s'interprète selon l'échelle au tableau 10.

Les valeurs de l'indice d'asymétrie Sk_I oscillent entre -1 et 1 , les valeurs positives indiquent que la fraction grossière est plus importante donc mieux classée que la fraction fine, tandis que les valeurs négatives indiquent que la fraction fine est mieux classée que la fraction grossière.

$$Sk_I(\varphi) = \frac{P_{16} + P_{84} - 2P_{50}}{2(P_{84} - P_{16})} + \frac{P_5 + P_{95} - 2P_{50}}{2(P_{95} - P_5)} \quad (20)$$

Tableau 10. Échelle interprétative des valeurs de l'asymétrie d'un ensemble sédimentaire

$Sk_I(\varphi)$	Interprétation
1 – 0.3	Asymétrie du coté des très fins
0.3 – 0.1	Asymétrie du coté des fins
0.1 – (-0.1)	Symétrie
(-0.1) – (-0.3)	Asymétrie du coté des grossiers
(-0.3) – (-1)	Asymétrie du coté des très grossiers

L'acuité K_G (de kurtosis en anglais) mesure l'angularité/l'aplatissement d'une courbe donnée, une courbe d'une distribution peut être symétrique mais peut différer d'une courbe normale par son degré d'aplatissement.

L'acuité K_G selon Folk et Ward (1957) se calcule par la formule 18, et s'interprète selon le tableau 11.

$$K_G = \frac{P_{95} - P_5}{2.44(P_{75} - P_{25})} \quad (21)$$

Tableau 11. Appréciation de la répartition d'un ensemble sédimentaire en fonction de l'acuité

K_G	Interprétation	Signification
Sup. à 3	Répartition extrêmement leptokurtique	Sédiment bien trié
3 – 1.5	Répartition très leptokurtique	
1.5 – 1.1	Répartition leptokurtique	
1.1 – 0.9	Répartition mésokurtique	Sédiment mal trié
0.9 – 0.67	Répartition platykurtique	
Inf. à 0.67	Répartition très platykurtique	

3.1.2. Résultats

3.1.2.1. Distribution granulométrique

Il s'agit de la classification des sables en déterminant la fraction de chaque groupe de taille de grain (tableau 12). Les graphiques de la figure 26 correspondent aux courbes granulométriques des 11 échantillons prélevés des crêtes de dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa.

Les sables étudiés ne comportent pas la classe des sables très grossiers (1000–2000 μm), tandis que les sables grossiers (500–1000 μm) sont peu présents à l'exception des échantillons C.1, C.3 et C.9 avec successivement des fréquences de l'ordre de 29.4, 22.2 et 14.2 %.

Cependant, les granulats étudiés sont majoritairement composés de sables moyens (250–500 μm) qui composent de dominantes fractions allant de 43.4 % (C.8) à 95.3 % (C.2).

A l'exception de l'échantillon C.7 qui est essentiellement composé de sables fins (100–250 μm) avec une fréquence de l'ordre de 73.4 %, les autres échantillons comportent peu de grains de cette taille, avec des fréquences qui varient de 2.6 % (C.2) à 29,7 % (C.8).

Les sables très fins (50–100 μm) sont très peu existants dans les échantillons C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6 et C.7 situés en amont (nord est) de l'erg avec des fréquences allant de 0.4 à 7.6 %, et ce contrairement aux échantillons C.8, C.9, C.10 et C.11 situés en aval (sud ouest) du système dunaire, qui présentent de plus importantes fractions allant de 11,8 à 18,5 %.

A l'exception de l'échantillon C.7 ayant un mode (diamètre de grain offrant la fréquence la plus élevée) de l'ordre de 0.250 mm (sable moyen), les sables de l'ensemble des échantillons sont caractérisés par des valeurs pics de fréquences relatives aux tailles 0.315 mm (échantillon C.6), et 0.400 et 0.500 mm (le reste des granulats), ainsi ces 3 modes correspondent à des sables grossiers.

L'inspection des histogrammes des fréquences simples laisse constater que les échantillons allant de C.1 à C.6 présentent des distributions monomodales vers les sables grossiers avec très peu de grains fins, tandis que les échantillons allant de C.8 à C.11 présentent des distributions bimodales ayant un mode dominant vers les grossiers et un autre mode d'une moins importante fréquence dans la classe des très fins (80 et 100 μm).

Tableau 12. Fréquences (en %) des classes granulométriques (en μm) des sables de l'Erg Sidi Moussa (crête barkhanique)

Éch.	Sable très fin 50 – 100 μm	Sable fin 100 – 250 μm	Sable moyen 250 – 500 μm	Sable grossier 500 – 1000 μm	Sable très grossier 1000 – 2000 μm
C.1	6,4	13,9	50,2	29,4	0,0
C.2	0,6	2,6	95,3	1,5	0,0
C.3	0,4	3,1	74,3	22,2	0,0
C.4	2,2	7,7	85,3	4,9	0,0
C.5	2,5	8,2	88,8	0,5	0,0
C.6	2,6	24,4	72,8	0,2	0,0
C.7	7,6	73,4	18,8	0,1	0,0
C.8	18,5	29,7	43,4	8,0	0,0
C.9	16,3	13,9	55,1	14,2	0,0
C.10	23,6	17,7	53,8	4,3	0,0
C.11	11,8	26,0	62,0	0,1	0,0

Tableau 13. Récapitulatif des paramètres et indices granulométriques des sables de l'Erg Sidi Moussa (crête barkhanique), calculés selon Folk et Ward (1957)

Éch.	Mode (mm)		Md (mm)		Mz (mm ; φ)		ID _{FW} (φ)		Sk ₁ (φ)		K _G	
C.1	0.500	Gros.	0.440	Moy.	0.36 ; 1.46	Moy.	0.82	Moy. trié	-0.57	Vers les T. Gros.	1.64	T. leptokurtique
C.2	0.400	Moy.	0.370	Moy.	0.35 ; 1.50	Moy.	0.29	T. bien trié	-0.21	Vers les G.	1.55	T. leptokurtique
C.3	0.500	Gros.	0.460	Moy.	0.44 ; 1.17	Moy.	0.33	T. bien trié	-0.27	Vers les G.	1.47	Leptokurtique
C.4	0.500	Gros.	0.400	Moy.	0.39 ; 1.36	Moy.	0.41	Bien trié	-0.39	Vers les T. Gros.	1.86	T. leptokurtique
C.5	0.400	Moy.	0.360	Moy.	0.35 ; 1.53	Moy.	0.42	Bien trié	-0.37	Vers les T. Gros.	2.08	T. leptokurtique
C.6	0.315	Moy.	0.280	Moy.	0.27 ; 1.88	Moy.	0.38	Bien trié	-0.25	Vers les Gros.	1.59	T. leptokurtique
C.7	0.250	Moy.	0.210	Fin	0.19 ; 2.36	Fin	0.54	A. bien trié	-0.32	Vers les T. Gros.	1.35	Leptokurtique
C.8	0.500	Gros.	0.250	Moy.	0.22 ; 2.19	Fin	1.01	Mal trié	-0.22	Vers les Gros.	0.74	Platykurtique
C.9	0.500	Gros.	0.360	Moy.	0.26 ; 1.96	Moy.	1.08	Mal trié	-0.58	Vers les T. Gros.	0.98	Mésokurtique
C.10	0.400	Moy.	0.300	Moy.	0.23 ; 2.12	Fin	1.05	Mal trié	-0.50	Vers les T. Gros.	0.66	T. platykurtique
C.11	0.400	Moy.	0.280	Moy.	0.24 ; 2.08	Fin	0.75	Moy. trié	-0.50	Vers les T. Gros.	1.08	Mésokurtique
Moyenne	–	–	0.337	Moy.	0.30 ; 1.78	Moy.	0.64	A. bien trié	-0.38	Vers les T. Gros.	1.36	Leptokurtique

Md : Médiane ; Mz : Diamètre moyen ; Ec : Indice de dispersion ; Sk₁ : Asymétrie (Skewness) ; K_G : Acuité (Kurtosis)

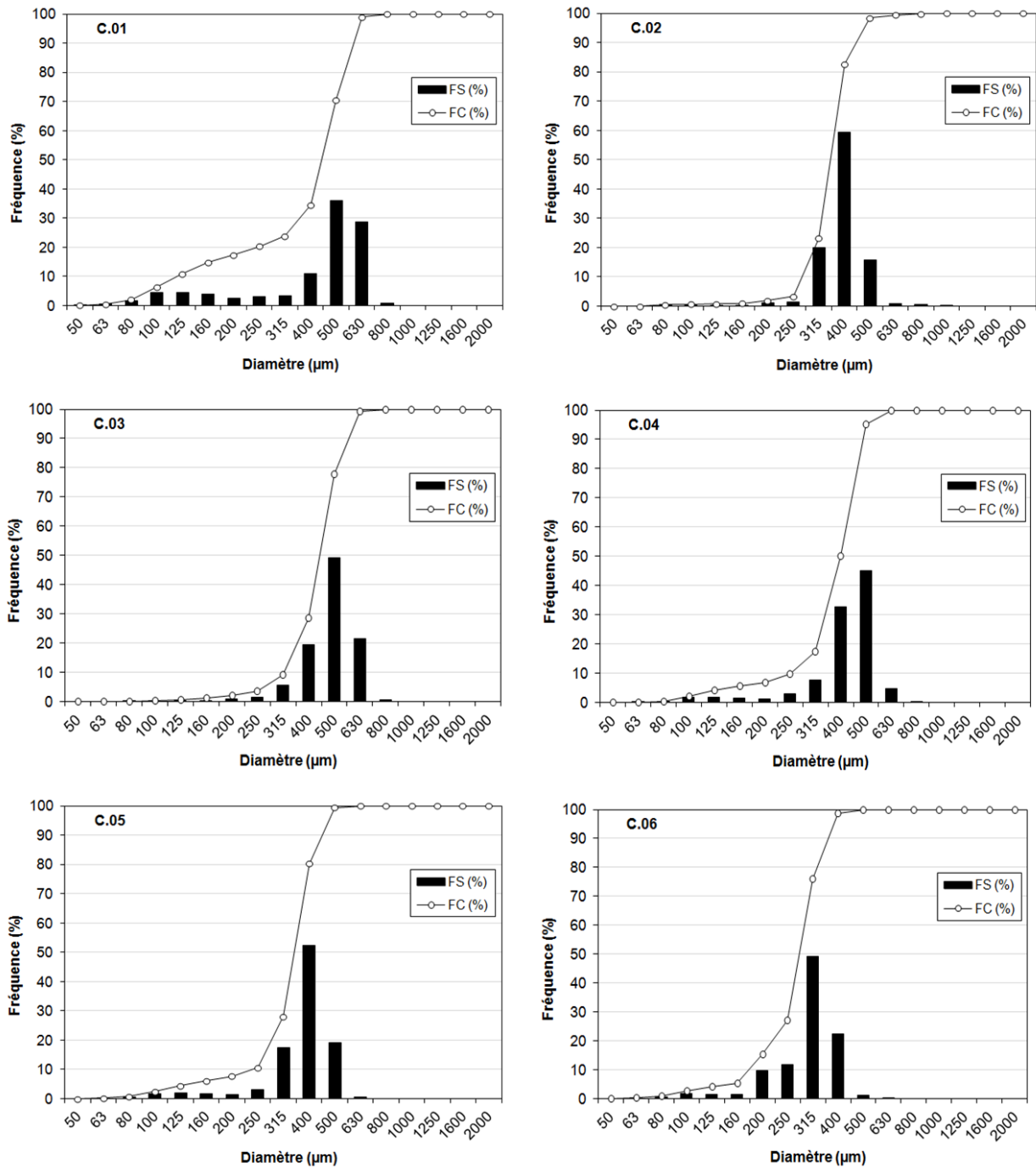


Figure 26. Courbes granulométriques et distributions des fréquences simples (FS) et fréquences cumulées (FC) des tailles de grains de sable de l'Erg Sidi Moussa

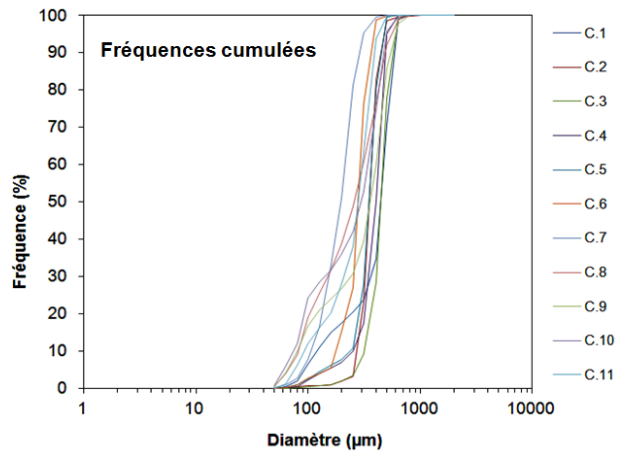
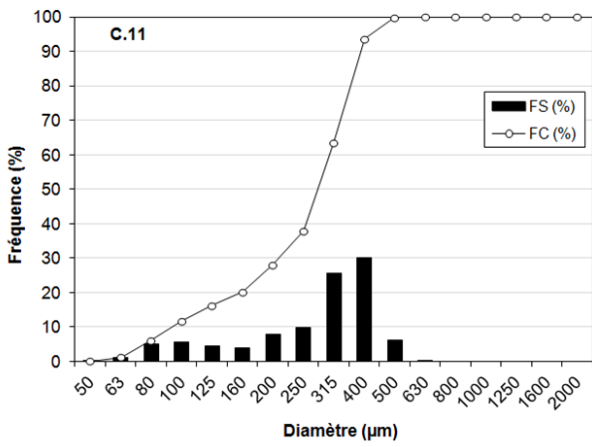
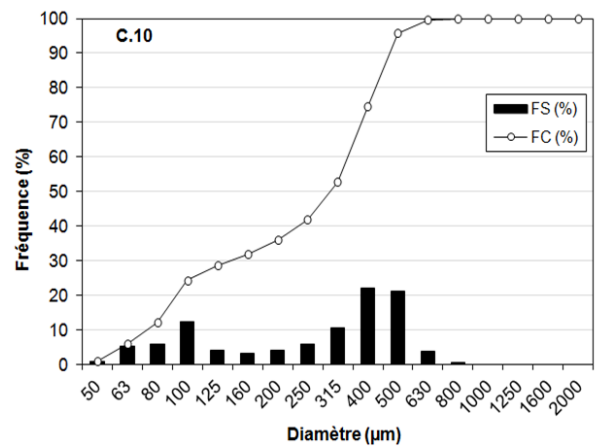
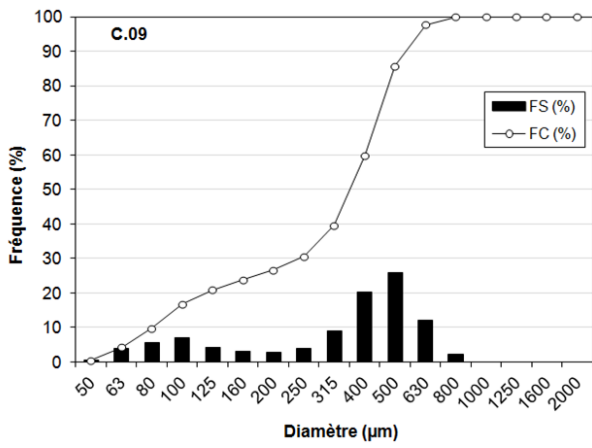
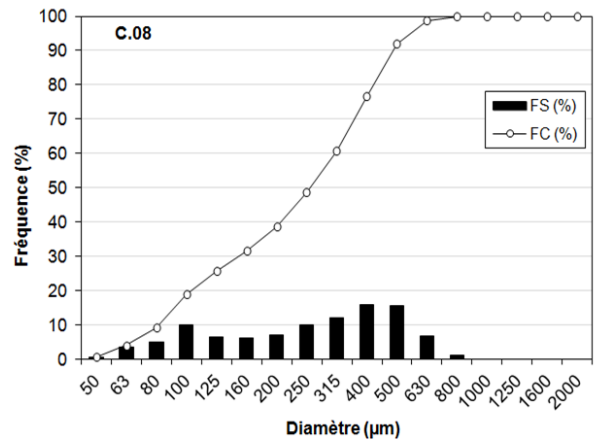
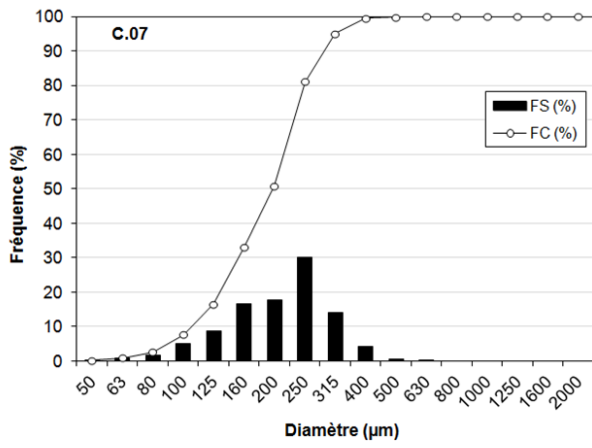


Figure 26. Suite

De même, les courbes des fréquences cumulées semi-logarithmiques des sables dunaires présentent des allures différentes, les courbes cumulatives relatives aux distributions des échantillons allant de C.1 à C.7 ont généralement la forme d'un « S » bien redressé, à forte pente vers les grossiers avec un étalement vers les fins, ce qui reflète un sédiment bien classé qui s'est accumulé dans des conditions peu agitées.

Cependant, les courbes cumulées relatives aux échantillons C.8 à C.9, C.10 et C.11 qui sont en général des sédiments d'aval à distributions bimodales, manifestent de fortes pentes du côté des tailles grossières ainsi du côté des moyennes et fines, cette allure signifie une accumulation moins classée dans des conditions plus agitées.

3.1.2.2. Indices granulométriques

a. Diamètre moyen M_z

Les valeurs du diamètre moyen M_z des 11 échantillons sont comprises entre 0.19 et 0.44 mm (2.36 et 1.17 \emptyset), avec une moyenne de l'ordre de 0.30 mm (1.78 \emptyset), ceci signifie que les crêtes des dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa sont essentiellement composées de sables moyens (tableau 13).

Ajoutés à l'échantillon C.9 (0.26 mm), les échantillons allant de C.1 à C.6 ont des diamètres moyens compris entre 0.25 et 0.50 mm (2–1 \emptyset), ce qui indique qu'ils se composent de sables moyens ; cependant, les échantillons C.7, C.8, C.10 et C.11 font partie de la classe des sables fins car les valeurs de M_z sont comprises entre 0.25 et 0.125 mm (3–2 \emptyset).

b. Dispersion (classement)

L'indice de dispersion D_{FW} de Folk et Ward (1957) oscille entre 1.08 et 0.29 \emptyset , ceci permet de considérer les échantillons C.2 et C.3 comme très bien classés, C.4, C.5 et C.6 comme bien classés, C.7 comme assez bien classé, C.1 et C.11 comme moyennement classés et les échantillons C.8, C.9 et C.10 comme mal classés.

La valeur moyenne de l'ensemble des échantillons étudiés est de l'ordre de 0.64 ϕ , ceci signifie que les sables de crête des dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa sont généralement assez bien classés.

c. Asymétrie (skewness)

L'indice d'asymétrie Sk_I présente des valeurs négatives comprises entre -0.21 et -0.58ϕ , avec une moyenne de l'ordre de -0.38 , signifiant que les courbes granulométriques des 11 échantillons présentent une asymétrie positive vers les sables grossiers et très grossiers, donc un meilleur tri granulométrique des sables grossiers suite à une forte énergie éolienne et un long remaniement.

d. Acuité/aplatissement (kurtosis)

Les valeurs de l'indice d'acuité K_G varient entre 2.08 et 0.66 ϕ ; la majorité des échantillons se caractérisent par des distributions à courbes granulométriques platykurtiques à très platykurtiques (C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7), ce qui indique qu'il s'agit de sables très bien triés avec une distribution monomodale à dominance de particules grossières; les courbes des échantillons C.9 et C.11 présentent des allures mésokurtiques, donc composés de sables moyennement triés, tandis que les échantillons C.8 et C.10 sont composés de sables mal triés (courbe platykurtiques et très platykurtiques), ces échantillons se caractérisent par une distribution plutôt bimodale : mode principal vers les sables grossiers et un autre secondaire vers les fins.

Au niveau de l'ensemble du champ barkhanique de Sidi Moussa, l'indice d'acuité est de 1.36 ϕ , signifiant que les sables de crêtes barkhaniques sont généralement bien triés, avec une distribution monomodale à dominance de particules grossières (courbe leptokurtique).

3.1.3. Discussion

Les résultats obtenus laissent conclure que les sables de crêtes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa sont essentiellement composés de sables moyens qui sont généralement assez bien classés, présentant une asymétrie vers les particules grossières avec une distribution

monomodale à une dominance et un meilleur tri des sables grossiers (courbe leptokurtique).

Ces résultats concordent avec plusieurs recherches : Binda (1983), Oulehri (1992), El-Ghannouchi (2007), El-Dousari et al. (2008) ont trouvé que les sables de crête barkhanique sont essentiellement composés de sables moyens et moyennement à assez bien classés, de même que Bellair (1953) a trouvé que des sables barkhaniques au Sahara algérien présentent un bon classement et une distribution monomodale, bien que Watson (1986) a trouvé que les sables de crête barkhanique sont mal classés par rapport aux autres positions de la barkhane.

Il est constaté qu'à l'échelle de la dune barkhanique de l'Erg Sidi Moussa, le sable de crête manifeste un caractère grossier de part les valeurs du mode, de l'indice d'asymétrie et d'acuité, ce résultat est aussi obtenu par Alimen (1951), Oulehri (1992) et El-Ghannouchi (2007), lors de l'investigation granulométrique des sables barkhaniques dans différents systèmes dunaires au monde, ces auteurs ont trouvé que les sables de crête sont plus grossiers que ceux du dos et du front de la barkhane, ceci est justifié par la dynamique des flets d'air sur la dune barkhanique, la vitesse de ces filets sur le dos de la dune (coté face au vent) est maximale en proportion à la hauteur de la dune (Finkel, 1959) assurant la mobilisation des sables grossiers vers le haut ; une fois arrivés au sommet, un phénomène de succion intervient du à l'incurvation des filets d'air, ce qui entraîne les particules fines vers le bas et laisse les sables grossiers sur la crête (Melton, 1940).

Cependant, Barndorff-Nielsen et al. (1982), Watson (1986), Lancaster (1989) ainsi que El-Dousari et al. (2008) ont trouvé que la variabilité des caractéristiques granulométriques d'une barkhane suit une tendance constante, caractérisée par la diminution de la taille moyenne des grains du coté face au vent vers le coté sous le vent, et le classement s'améliore en allant vers les bordures de la dune, tandis que les cornes et le milieu de la dune sont mal triés en comparaison avec les autres sites de la dune.

Selon Lancaster (1995), il convient de distinguer 2 modes granulométriques généraux caractérisant les dunes de sables éoliens : (1) dune ayant une crête à particules fines, bien

classées et présentant une meilleure asymétrie vers les particules fines et, (2) dune ayant une crête à particules grossières et mieux classées que les sables des flancs dunaires.

A l'échelle du système dunaire, l'Erg Sidi Moussa présente une diminution du diamètre moyen M_z (figure 27A) du nord-est de l'erg étant composé surtout de barkhanes en position face au vent (anglais : upwind) vers le sud-ouest étant composé de barkhanes en position sous le vent (anglais : downwind), la tendance régressive de M_z est due au tri granulométrique des grains de sable qui résulte de l'augmentation de la distance de transport, les particules sableuses en tendance à devenir plus fines en allant vers le sud-ouest de l'erg, c'est-à-dire en s'éloignant de la zone source des sables.

Ces constats confirment les résultats obtenus par des recherches dans des systèmes dunaires voisins : Oulehri (1992) a trouvé que le diamètre moyen M_z des sables de crêtes barkhaniques dans la région de Laayoune (Sahara Occidental) diminue d'amont en aval du fleuve de sable suivant la direction de transport; de même, El-Ghannouchi (2007) a constaté une tendance régressive du diamètre moyen des sables dunaires d'amont en aval du système dunaire de Souss au Maroc (tableau 14).

Tableau 14. Diamètre moyen et indice de dispersion des sables de crêtes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa, en comparaison avec d'autres dunes barkhaniques dans le Grand Sahara

Auteur	Localisation	Mz (Ø)	D _{FW}
Binda (1983)	Nafud Rumhat (Arabie Saoudite)	1.88	Moyen
Oulehri (1992)	Laayoune (Sahara occidental)	0.19	Grossier
El-Ghannouchi (2007)	Plaine de Souss (Maroc)	1.99	Moyen
Al-Dousari et al. (2008)	Um Urta (Koweït)	1.59	Moyen
Présente recherche	In-Salah (Algérie)	1.78	Moyen

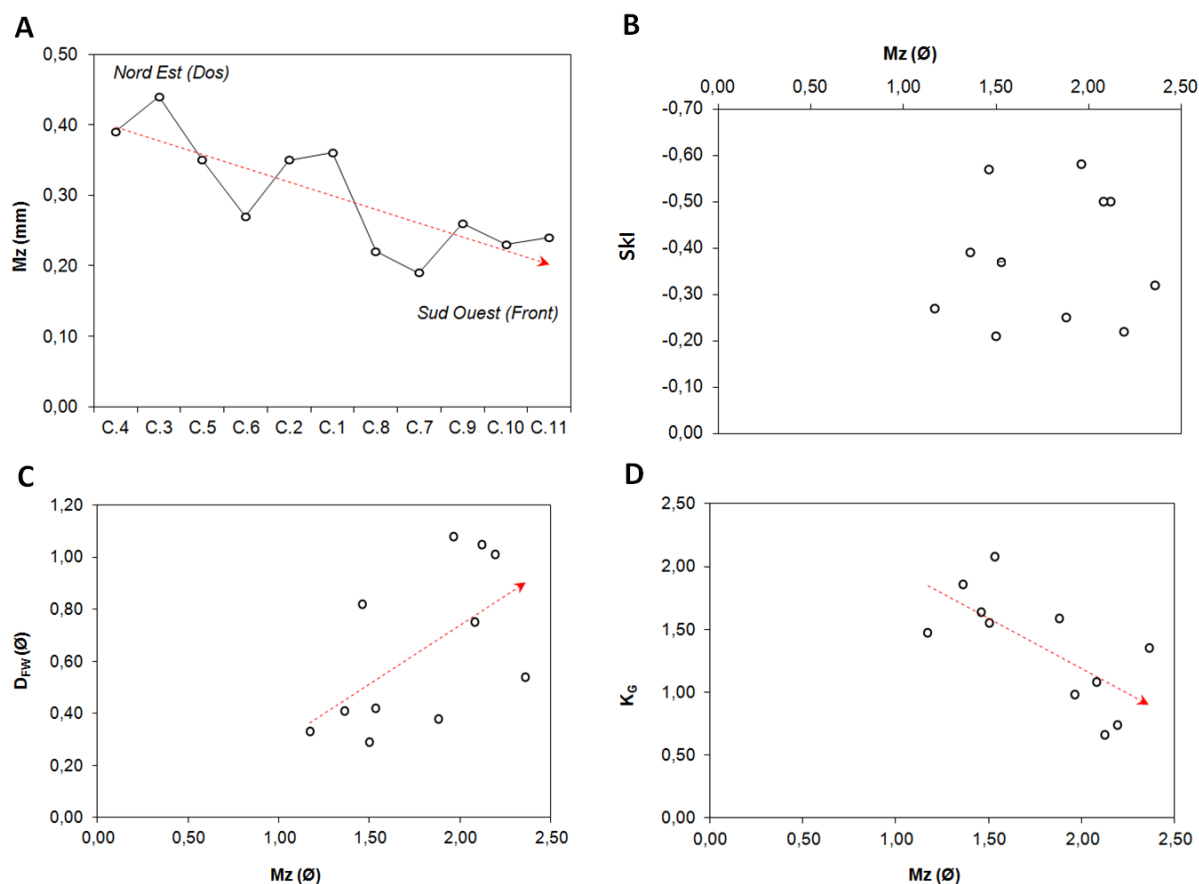


Figure 27. (A) Variation du diamètre moyen des sables de l'Erg Sidi Moussa du nord-est au sud-ouest, noter la diminution de Mz autant que la distance de la source des sables augmente, (B), (C) et (D) Relation du diamètre moyen Mz avec l'indice de dispersion D_{FW}, l'indice d'asymétrie Sk_I et l'acuité K_G

3.2. Analyses morphoscopiques

3.2.1. Introduction

La morphoscopie des grains de sables consiste à la détermination statistique des différents types de grains de quartz détritique dans un dépôt sableux, et plus particulièrement les fractions granulométriques représentatives du sédiment, dont l'objectif est la caractérisation par observation de la forme des grains, leur aspect de surface, les proportions de chaque type de grain et la variation de ces proportions au cours du transport, afin de pouvoir déterminer les conditions de genèse, de transport et de sédimentation (Le Ribaut, 1975 ; Le Ribaut, 1977).

En fonction de leur forme et aspect de surface, les grains de quartz peuvent être classés en 3 principales catégories (Cailleux, 1942 ; Cailleux et Tricart, 1959) :

Les grains Non Usés (NU), qui se caractérisent par leur forme anguleuse, avec des arêtes qui ne présentent pas de traces de polissage ni d'arrondissement, leur aspect de surface est indifféremment mat ou luisant ; cette catégorie de quartz a subi une faible usure suite à un transport sur de faible distance et proche de la zone source des sédiments.

Les grains Emoussés Luisants (EL), présentent des arêtes sub-arrondies et une forme ovoïde ; sous l'éclairage de la loupe binoculaire, ils manifestent un aspect de surface poli et brillant. La présence des Emoussés Luisants indique un transport sur de longues distances en milieux aquatiques continentaux.

Les grains Ronds Mats (RM) ont la forme sub-sphérique ou parfois sphérique, mais contrairement aux Emoussés Luisants, ils s'y distinguent par un aspect de surface dépoli et mat résultant non seulement des actions de choc, mais aussi de corrosion physico-chimique ou de précipitation de silice (Le Ribaut, 1975), les RM indiquent un transport en milieu éolien.

Au cours des stades d'éolisation des sédiments, et en fonction de la puissance de l'agent et la distance du transport, on peut aussi rencontrer des grains de quartz Irréguliers Mats (IM) ou même Sub-Ronds Mats (SRM).

3.2.2. Méthode

Selon Le Ribault (1977), la fraction granulométrique des sables allant de 0.3 à 0.5 mm est susceptible à mieux enregistrer les actions physiques et chimiques de l'environnement de transport et de dépôt.

La préparation et l'analyse morphoscopique des sables sont faites au laboratoire agropédologique du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides, station de Touggourt. Après tamisage à sec, les sables ont subi une attaque à l'acide chlorhydrique HCL pour éliminer les carbonates et sels cristallisés (Figure 28), puis lavés à l'eau distillée et séchés à l'étuve.

On a adopté les méthodes préconisées par Powers (1953) et Cailleux et Tricart (1959), dont la caractérisation morphoscopique se base sur l'observation de l'état de surface des grains (figure 29) de quartz au stéréomicroscope (loupe binoculaire) à un grossissement de l'ordre de x40, le comptage est effectué sur 33 grains de quartz issus des 11 échantillons précédemment prélevés.

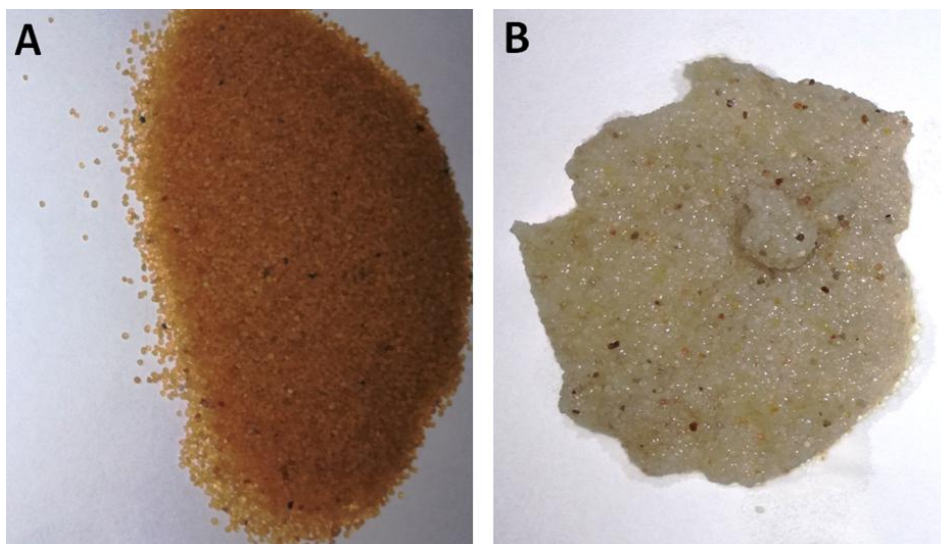


Figure 28. (A) Echantillon de sable (crête barkhanique) de diamètre 0.3–0.5 mm, (B) Sédiment après attaque à l'acide chlorhydrique et lavage à l'eau distillée (non encore séché)

Sphéricité	forte						
	faible						
		0	1	2	3	4	5
		très anguleux	anguleux	subanguleux	subémoussé	émoussé	très émoussé

Figure 29. Echelle de rondeur des grains de quartz selon Powers (1953)

Les résultats traduisant les pourcentages de chaque catégorie morphoscopique sont ainsi dépouillés, représentés et discutés.

3.2.3. Résultats et discussion

3.2.3.1. Catégories morphoscopiques

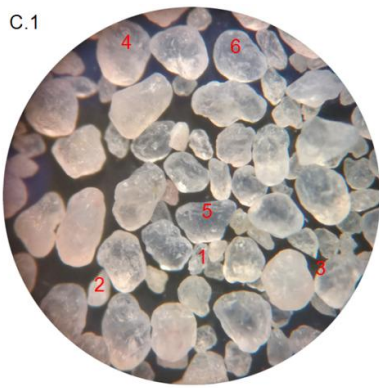
Le comptage et observation des grains de quartz se sont basés sur l'aspect de rondeur des arêtes et le niveau d'éclat de surface. La méthode classique de Cailleux et Tricart (1959) n'a pas abouti à une classification satisfaisante ; néanmoins, la prise en compte du degré de rondeur selon Powers (1953) à permis la distinction des types de grains en 3 grandes catégories : 1) Les Non Usés NU ou Irréguliers IR (Très Anguleux, Anguleux et Subanguleux), 2) Les Emoussés Luisants (Subemoussés, Emoussés et Très émoussés Luisants) et 3) Les Ronds Mats (Subronds et Ronds Mats).

Les pourcentages relatifs à chaque catégorie morphoscopique des 11 échantillons sont portés sur le tableau 15 et photographiées sur la figure 30.

Tableau 15. Proportions spécifiques (en %) de types d'aspect des grains de quartz (crête barkhanique) dans l'Erg Sidi Moussa, In-Salah

Echantillon	TA – A – SA *	SEL – EL – TEL **	SRM – RM ***
C.1	6	82	12
C.2	9	73	18
C.3	3	79	18
C.4	3	82	15
C.5	3	82	15
C.6	9	61	30
C.7	9	64	27
C.8	6	61	33
C.9	9	45	45
C.10	3	79	18
C.11	0	39	61
Moyenne Erg Sidi Moussa	6	68	27
* Très Anguleux – Anguleux – Subanguleux			
** Subemoussé Luisant – Emoussé Luisant – Très émoussé Luisant			
*** Subrond Mat – Rond Mat			

Comme démontré dans les chapitres précédents, la plaine du Tidikelt et ses systèmes dunaires, y compris l'Erg Sidi Moussa est caractérisée par une intense dynamique éolienne, ce qui laisse supposer de fortes activités d'éolisation des sédiments. Cependant, l'observation morphoscopique des grains de quartz de l'Erg Sidi Moussa laisse constater l'importance des processus de transport hydrique.



- 1 Anguleux
- 2 Subanguleux
- 3 Subrond Mat
- 4 Rond Mat
- 5 E moussé Luisant
- 6 Très E moussé Luisant

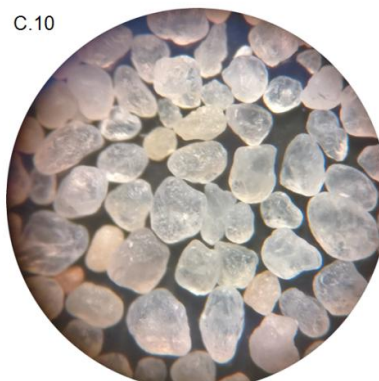
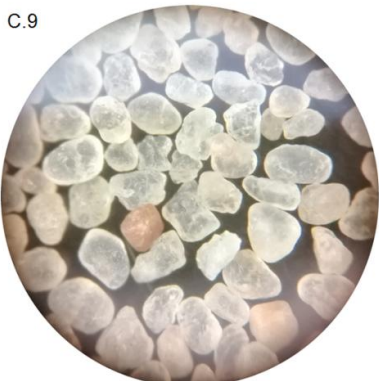
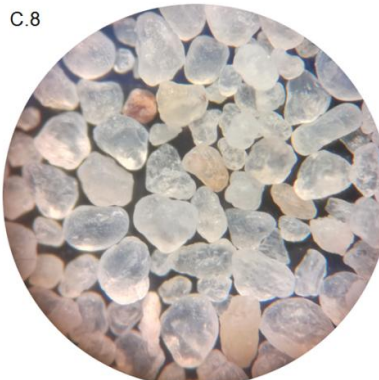
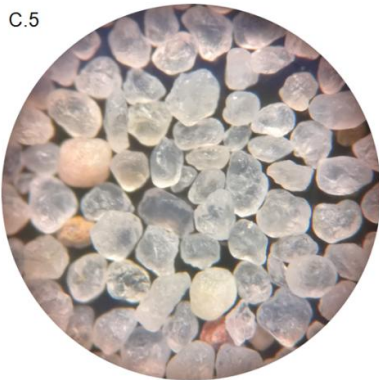
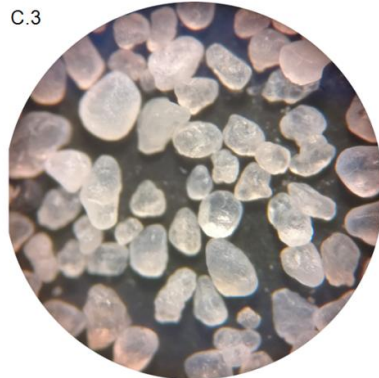
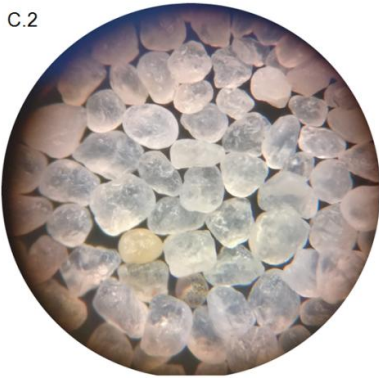


Figure 30. Photographies des grains de quartz prélevés des crêtes barkhaniques dans l’Erg Sidi Moussa observés au stéréoscope, noter la prédominance des grains émoussés à très émoussés luisants, indicateur de transport hydrique

Les grains typiquement non usés sont quasi absents dans les échantillons analysés, cependant on note l'existence de grains irréguliers avec différents degrés d'usure, ces quartz irréguliers sont également très peu abondants dont les proportions variant entre 0 et 9 % avec une moyenne de seulement 6 %. Ces faibles pourcentages indiquent que les sédiments sableux de l'Erg Sidi Moussa se sont accumulés loin de leurs zones sources après avoir été transportés sur de longues distances via un agent de transport à haute capacité érosive. Les grains émoussés luisants prédominent avec un pourcentage moyen de l'ordre de 68 % (39 à 82 %), il s'agit de quartz ayant un contour émoussé ou rond et une surface polie présentant ainsi un aspect de réflexion et de réfraction. Inattendument, l'Erg Sidi Moussa n'est composé que de 27 % en moyenne de grains ronds mats, avec des proportions oscillant entre 12 et 61 % d'un site barkhanique à un autre.

3.2.3.2. Distribution spatiale

La variabilité spatiale des proportions des différents types de quartz met en évidence l'augmentation du pourcentage des ronds mats du nord-est (dos du système dunaire) vers le sud-ouest (front de l'Erg), parallèlement avec la baisse des émoussés luisants (figure 31 et figure 32).

Du point de vue dynamique, l'augmentation des ronds mats et la diminution des émoussés luisants peut s'expliquer par l'accentuation de l'action éolienne autant la distance de la source des sables augmente, où les grains subissant un déplacement par voie éolienne deviennent plus mats et moins luisants, suite aux actions de choc entre les grains de sable, autant la distance de transport augmente et conséquemment le degré d'éolisation.

Ces constats laissent supposer que les sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa sont probablement originaires de la décomposition du turonien (crétacé supérieur) et du continental intercalaire (crétacé inférieur) qui forment l'essentiel des strates du plateau de Tademaït au nord, les matériaux érodés peuvent être transportés vers la plaine au sud via le dense réseau hydrographique à écoulement intermittent composé essentiellement des oueds Souf, Hassi Messaoud, Gouiret et Assabaï, et ce sur de longues distances (peut atteindre 100 km). Une fois déposés aux dépressions au sud, les sables manifestant probablement un degré d'usure hydrique avancé, sont mobilisés par les vents efficaces et

dominants du nord–est et transportés le long du fleuve du sable vers le sud–ouest (figure 33)

Ces résultats concordent avec plusieurs études antérieures : Tricart et Mainguet (1965) ont trouvé que les sables barkhaniques au désert péruvien ne présentent pas un aspect éolien développé, Koull et al. (2016) ont trouvé que les sables dunaires du Grand Erg Oriental (Algérie) sont majoritairement ronds à très ronds, Abu–Zeid et al. (2001) indiquent que les sables éoliens au Sahara des Emirates Arabes sont caractérisés par un aspect rond (34 %) à très rond (37 %), El–Ghannouchi (2007) mentionne que le pourcentage des ronds mats croit et celui des émoussés luisant décroît en direction du transport des sables tout au long du fleuve du sable de Souss au Maroc.

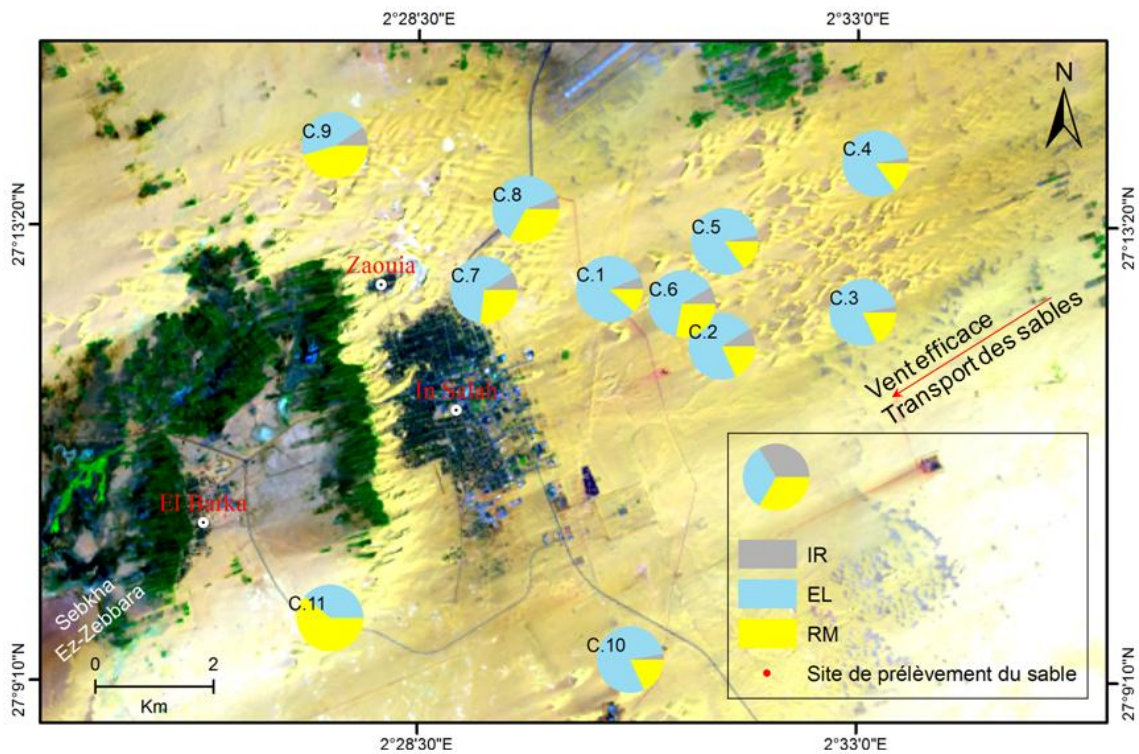


Figure 31. Distribution spatiale et proportions des catégories morphoscopiques des grains de quartz dans l’Erg Sidi Moussa : Irrégulier (IR), Emoussé Luisant (EL) et Rond Mat (RM), noter la dominance des Emoussés Luisants

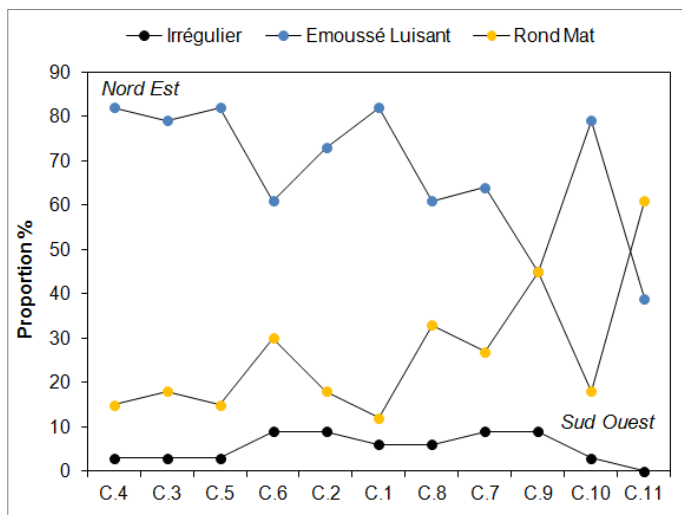


Figure 32. Variation des pourcentages des types de quartz de l’Erg Sidi Moussa du nord-est au sud-ouest, noter la diminution des Emoussés Luisants et l’augmentation des ronds Mats autant que la distance de transport éolien augmente

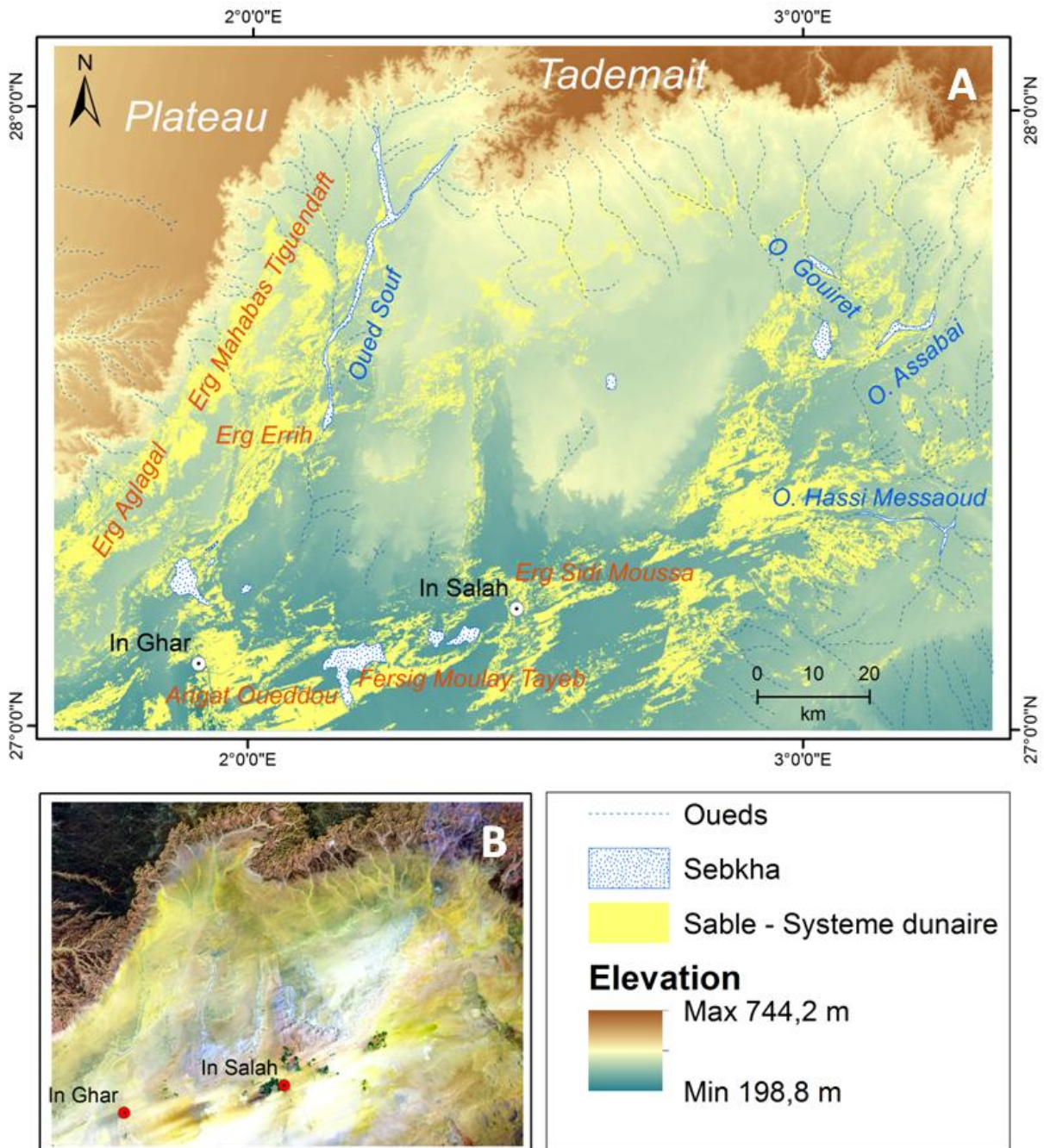


Figure 33. (A) Cartographie vectorielle montrant la source des sables et des systèmes dunaires de la plaine du Tidikelt, noter le sens d'écoulement hydrique en provenance de l'amont (plateau de Tademaït) vers l'aval (dépressions et sebkhas), ainsi le sens de transport éolien du nord-est vers le sud-ouest par les vents efficaces de l'alizé continental, (B) Composition colorée des canaux 652 de l'image Landsat 8 datée 2016 (www.usgs.gov), dont les sables figurent en couleur jaunâtre ; noter l'existence des dépôts sableux résultant de l'érosion de la dalle siliceuse du plateau dans les lits d'oueds à écoulement intermittents

4. Conclusion

L'investigation des caractéristiques morphologiques des dunes de l'Erg Sidi Moussa met en évidence un champ barkhanique typique aux environnements à haute énergie éolienne, à régime de vent unimodal et à flux sableux limité : les barkhanes qui se présentent en forme basique, composée ou complexe, sont orientées nord est – sud ouest similairement à l'angle d'orientation estimé par le model de Fryberger et Dean (1979), elles se développent également à partir des dunes transverses situées au dos de l'Erg du côté face au vent. Lors de leur migration vers le sud ouest, ces barkhanes peuvent manifester des changements morphologiques liés à la collision, au chevauchement et à l'asymétrie et ce, est dû au mode et la distribution des vents efficaces (alizé continental) et la micro topographie.

L'analyse granulométrique laisse conclure que les sables de crêtes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa sont essentiellement constitués de grains moyens et assez bien classés, avec une distribution monomodale à une dominance et un meilleur tri des sables grossiers. En outre, la variabilité granulométrique spatiale présente une tendance régressive face à l'augmentation de la distance de transport, où la taille des sédiments décroît du nord-est de l'Erg (source de sédiments) vers le sud-ouest suite au tri granulométrique des particules sableuses.

Les résultats de l'analyse morphoscopique mettent en exergue la prédominance des grains de quartz de type émoussés luisants, dont la proportion décroît en direction de déplacement des sables à cause de l'intensification de l'éolisation, ce résultat laisse supposer que les sables dunaires de l'Erg Sidi Moussa ont subi un transport hydrique avant d'être repris par les vents de l'Alizé continental : vent efficace et dominant dans la région.

Chapitre Quatrième

Mobilité, migration et morphodynamique des dunes barkhaniques

1. Estimation de la mobilité des dunes selon Lancaster (1988)

1.1. Introduction

L'aptitude des dunes au déplacement est souvent exprimée par des indices de mobilité (Wasson et Hyde, 1983), cette aptitude est surtout dépendante au taux de la couverture végétale, et aux variables climatiques critiques comme les précipitations et l'évapotranspiration. Principalement, trois paramètres s'imposent comme facteurs déterminants: énergie du vent, pluie et évapotranspiration (Lancaster, 1988).

1.2. Données et méthode

L'indice développé par Lancaster (1988) est largement adopté pour la caractérisation de la mobilité des dunes de sable, il se présente comme suit :

$$M = \frac{W}{P/PE} \quad (22)$$

Où W correspond au ratio des vents efficaces, qui représente la fréquence annuelle des vents dépassant la vitesse seuil par rapport au nombre total des observations du vent durant la période 2005–2014.

P/PE correspond à la pluie efficace et est appelé indice d'aridité, c'est le ratio entre la pluie annuelle moyenne P , et l'évapotranspiration annuelle PE calculée selon la méthode de Thornthwaite.

Selon Lancaster (1988), la mobilité des dunes de sable est déterminée en fonction des valeurs critiques de l'indice M comme suit:

- $50 > M$: les surfaces de dunes de sable sont stabilisées par la végétation et les dunes sont inactives ;
- $50 < M < 100$: les dunes sont inactives sauf les crêtes ;
- $100 < M < 200$: les dunes sont actives mais les interdunes sont stabilisées par la végétation ;
- $M > 200$: les dunes sont totalement actives et mobiles.

Pour la période 2005–2014, les pluies annuelles, évapotranspirations et pourcentages des vents efficaces ont été préparés comme valeurs annuelles, pour obtenir les indices d'aridité et de mobilité de dunes, la variabilité temporelle des paramètres climatiques en relation a de même été discutée (tableau 16).

1.3. Résultats et discussion

Dans cette partie du Sahara algérien, les précipitations sont particulièrement rares. A In-Salah, la pluie moyenne annuelle est seulement de 11 mm; dont la distribution est de même caractérisée par une importante variabilité interannuelle, les pluies varient de 3 mm (2013) à 34 mm (2009) avec une forte valeur du coefficient de variation (78 %).

Différemment aux pluies, les taux d'évaporation sont particulièrement élevés à causes des hautes températures et des longues durées d'insolation; les évapotranspirations varient de 1834 mm (2009) à 1971 mm (1998). Par conséquent, les pluies efficaces sont Presque insignifiantes et l'indice d'aridité P/PE est seulement de l'ordre de 0.019.

La ventesse (occurrence des vents puissants) a été moins variable, et le ratio des vents efficaces varie entre 41 % (2007) et 58 % (2011).

Les ratios des vents efficaces ont été mois variables que les pluies et évapotranspirations (coefficient de variation =12 %) et, ce confirme que la pluie efficace P/PE (indice d'aridité) est un facteur déterminant de la mobilité des dunes. Les années ayant les valeurs les plus élevées de M (ex., 2013, 2007, et 2010) ont été marquées par les valeurs les plus faibles des pluies efficaces (0.002, 0.003, et 0.003, respectivement).

Ceci peut être confirmé par la relation étroite entre l'indice de la mobilité des dunes et l'indice d'aridité; le coefficient de détermination R^2 pour une régression de type puissance est de 0.98, signifiant que la valeur de M est inversement proportionnelle à l'indice d'aridité P/PE (figure 34), selon l'équation suivante :

$$M = 53(P/PE)^{-0.98} \quad (23)$$

Les valeurs de l'indice de mobilité de dunes M ont été largement supérieures à 200, elles varient de 2396 (2009) à 31041 (2013) résultant des très faibles valeurs des pluies efficaces P/PE.

La valeur la plus élevée de M correspondant à l'année 2009, est principalement due à la pluie la plus importante et l'évapotranspiration la plus faible (34 et 1834 mm, respectivement) durant toute la décade.

Dans de telles circonstances d'hyperaridité, les dunes de sable de l'Erg Sidi Moussa peuvent être classées comme totalement actives et mobiles durant la période considérée.

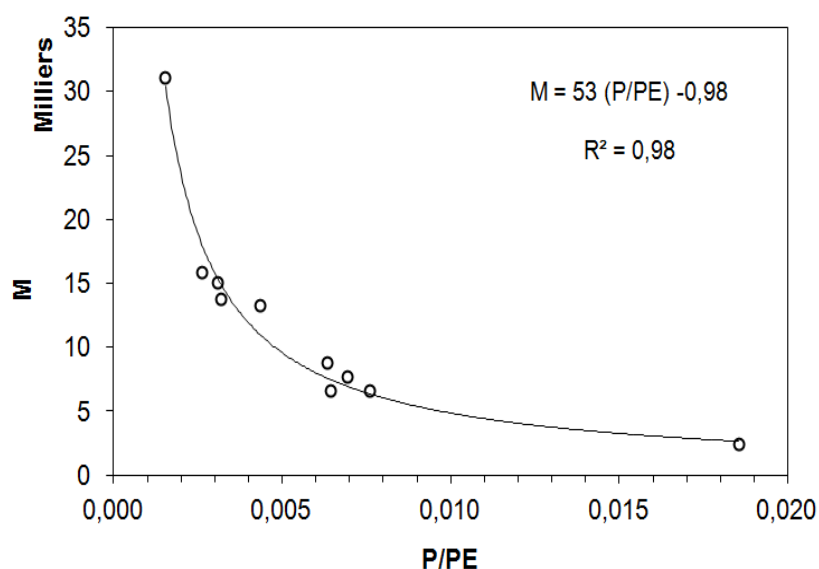


Figure 34. Régression de type puissance exprimant la relation entre l'indice d'aridité P/PE et l'indice de mobilité de dunes de Lancaster (1988) M, pour la station d'In-Salah (2005–2014)

Tableau 16. Récapitulatif annuel des pluies, évapotranspirations, pourcentage des vents efficaces, indices d'aridité et de mobilité des dunes de Lancaster (1988), pour la station d'In-Salah 2005–2014

Année	P (mm)	PE (mm)	Obs. vent	Obs. Vent efficace	W (%)	P/PE	M
2005	13	1870	7871	4159	53	0,007	7601
2006	6	1872	8171	3581	44	0,003	13674
2007	5	1911	8357	3460	41	0,003	15824
2008	12	1865	8266	3472	42	0,006	6528
2009	34	1834	8182	3634	44	0,019	2396
2010	6	1949	8115	3749	46	0,003	15007
2011	8	1835	8290	4767	58	0,004	13190
2012	12	1888	8371	4659	56	0,006	8757
2013	3	1952	8483	4047	48	0,002	31041
2014	15	1971	8366	4161	50	0,008	6535
2005–2014	11	1895	82472	39689	48	0,006	7998

2. Géodynamique des dunes barkhaniques (période 2002–2013)

2.1. Introduction

Le suivi et la cartographie à long terme de la migration de dunes barkhaniques sont parmi les tâches les plus difficiles et coûteuses en géomorphologie quantitative.

Dans de divers environnements à travers le monde, les photos aériennes avant et les données télédéetectées par la suite (années 1970s), ont été un outil efficace pour l'étude des différentes formes de modèles dunaires, leur migration aussi bien que pour la mesure précise de leur vitesse et direction de déplacement (e.x. Breed et Grow, 1979; Breed et al., 1979; Mainguet et al., 2001; Al-Dousari et Pye, 2005; Del Valle et al., 2008; Hereher, 2010).

Par ailleurs, une imagerie satellitaire à haute résolution spatiale couvrant une longue série est une source fiable pour mesurer, suivre et cartographier –le plus précis possible– la vitesse et la direction de mouvement des barkhanes (e.x. Hamdan et al., 2016; Boulghobra, 2016).

Actuellement, Google Earth fournit des séries d'imagerie satellitaire à une haute et parfois très haute résolution, ces ressources ont fréquemment été utilisées afin de mesurer le déplacement des dunes barkhaniques. En gros, deux techniques sont largement utilisées : le suivi sur terrain au moyen de GPS (e.x. Besler et al., 2013), ainsi que l'outil de calcul des distances qu'offre le logiciel Google Earth (e.x. Lorenz et al., 2013; Sparavigna, 2013; Hereher, 2014; Zhang et al., 2015).

2.2. Données et méthode

Dans cette recherche, on a eu recours à la méthode de géocorrélation point-à-point (Abou El-Magd et al., 2013) pour la mesure précise de la vitesse de déplacement de barkhanes de l'Erg Sidi Moussa (mètre/année), aussi bien que leur direction de migration (degré).

Cette technique a été appliquée à des images satellitaires fournies par Google Earth, ayant une période plus ou moins longue répondant au objectif de la recherche : 1) les

images à haute résolution du satellite Digital Globe datées 2002–2003 et, 2013) les images à très haute résolution du satellite Pleiades datées 2013 (résolution 2 mètres).

Sous environnement du logiciel ENVI 5.0, les images satellitaires ont été soumises à une correction géométrique en utilisant 4 points d'appui, et ont été projetées selon le Système Transverse Universelle de Mercator zone 31, rehaussées en utilisant un algorithme d'étirage linéaire (en anglais : linear stretch algorithm), et re-échantillonnées on utilisant un filtre médiane 9x9 pour permettre une meilleure visualisation en fausses couleurs, et une visibilité optimale des limites et crêtes des barkhanes.

Cinq (5) parcelles pilotes comptant 29 dunes barkhaniques ont été choisies pour la démarche, ces parcelles pilotes répondent à une bonne et représentative répartition spatiale dans l'Erg Sidi Moussa.

Cette technique devrait être appliquée à des dunes barkhaniques simples, isolées et qui préservent leurs formes après la migration, et ce par la création de trois point repères de format a(x1 ; y1) au flanc et aux deux cornes de la barkhane en état de départ 2002, et un autre point repère de format b(x2 ; y2) aux mêmes endroits de la barkhane en état d'arrivée 2013 (Figure 35).

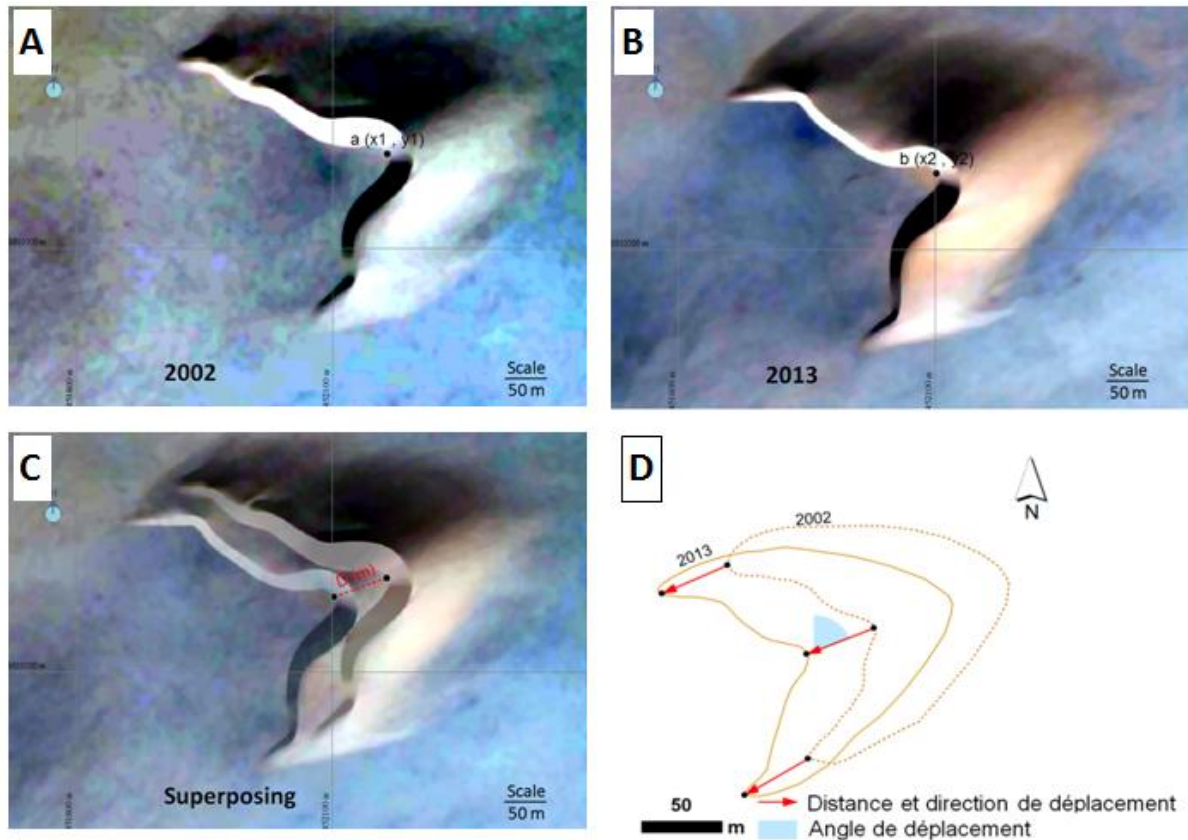


Figure 35. (A) Image du satellite Digital Globe datée 2002 et associée aux points repères de format $a(x_1 ; y_1)$, (B) Image du satellite Pleiades datée 2013 et associée aux points de format $b(x_2 ; y_2)$ (C) et (D) Superposition des 2 images en appliquant une option de transparence au raster et en format vecteur, respectivement

Après l'extraction des coordonnées géographiques des deux points de repères, il est devenu possible de calculer la distance D (mètre) parcourue par la barkhane qui, représente la distance euclidienne entre les deux points, ainsi que l'angle de déplacement A en degré, en utilisant respectivement les équations :

$$D = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (24)$$

$$A = a \tan \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (25)$$

2.3. Résultats et discussion

L'application de la corrélation géographique point-à-point sur les images satellitaires à haute résolution, a permis l'obtention de la distance et la direction de déplacement de 29 dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa (tableau 17 et figure 36).

Les résultats obtenus montrent que durant une période de 12 ans (2002–2013), la vitesse de migration varie de 7 à 18 m/année (12 m/année en moyenne), avec une différence mineure d'une parcelle pilote à l'autre variant entre 11 et 13 m/année, ainsi une différence de vitesse d'une barkhane à l'autre.

Ces résultats confirment Verlaque (1958) in Besler (1982) qui a mentionné que « les dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa se déplacent de façon visible ».

Outre, les angles de migration des barkhanes ont été totalement comprises entre 48° et 83°; cette gamme de valeurs appartient à l'intervalle 33.75–101.25° qui correspond au secteurs nord-est, est-nord-est, et est de la rose des vents et de déplacements potentiels des sables, coïncidant avec la direction des vents efficaces dans la région d'In-Salah.

De même, l'angle moyen de migration des barkhanes, mesuré à partir des images satellitaires ($A = 63^\circ$) manifeste une concordance significative avec l'angle de tendance de déplacement ($RDD = 62^\circ$), calculé selon le modèle de Fryberger et Dean (1979), ce qui reflète sa fiabilité.

Tableau 17. Récapitulatif des vitesses de migration des barkhanes D et angles de déplacement A, pour les cinq parcelles pilotes dans l'Erg Sidi Moussa, In-Salah

Parcelle pilote	No. Barkhane	Période et Long. Période (jour)	Déplacement (m/période)	D (m/année)	A (degré)	RDD (degré)
Parcelle 1	1	20 déc. 2002 à	123	12	51	62
	2		177	17	64	
	3	19. juil. 2013	139	13	66	
	4		101	10	66	
	5		110	10	62	
Moyenne		130	12	62		
Parcelle 2	1	20 déc. 2002 à	97	10	51	
	2		78	8	63	
	3	5 jan. 2013	159	16	58	
	4		98	10	60	
	5		182	18	68	
	6	<u>3669</u>	151	15	55	
Moyenne		128	13	59		
Parcelle 3	1	25 déc. 2003 à	67	7	67	
	2		124	14	67	
	3	5. jan. 2013	81	9	64	
	4		119	13	83	
	5		121	13	69	
	6	<u>3299</u>	100	11	69	
Moyenne		102	11	70		
Parcelle 4	1	25 déc. 2003 à	138	15	68	
	2		148	16	55	
	3	5 jan. 2013	90	10	66	
	4		130	14	62	
	5		108	12	60	
	6	<u>3299</u>	102	11	69	
Moyenne		119	13	63		
Parcelle 5	1	10 oct. 2003 à	87	9	48	
	2		131	14	58	
	3	jan. 5, 2013	77	8	65	
	4		165	18	64	
	5		118	13	57	
	6	<u>3373</u>	82	9	60	
Moyenne		110	12	59		
Moyenne Erg Sidi Moussa		<u>3501</u>	118	12	63	

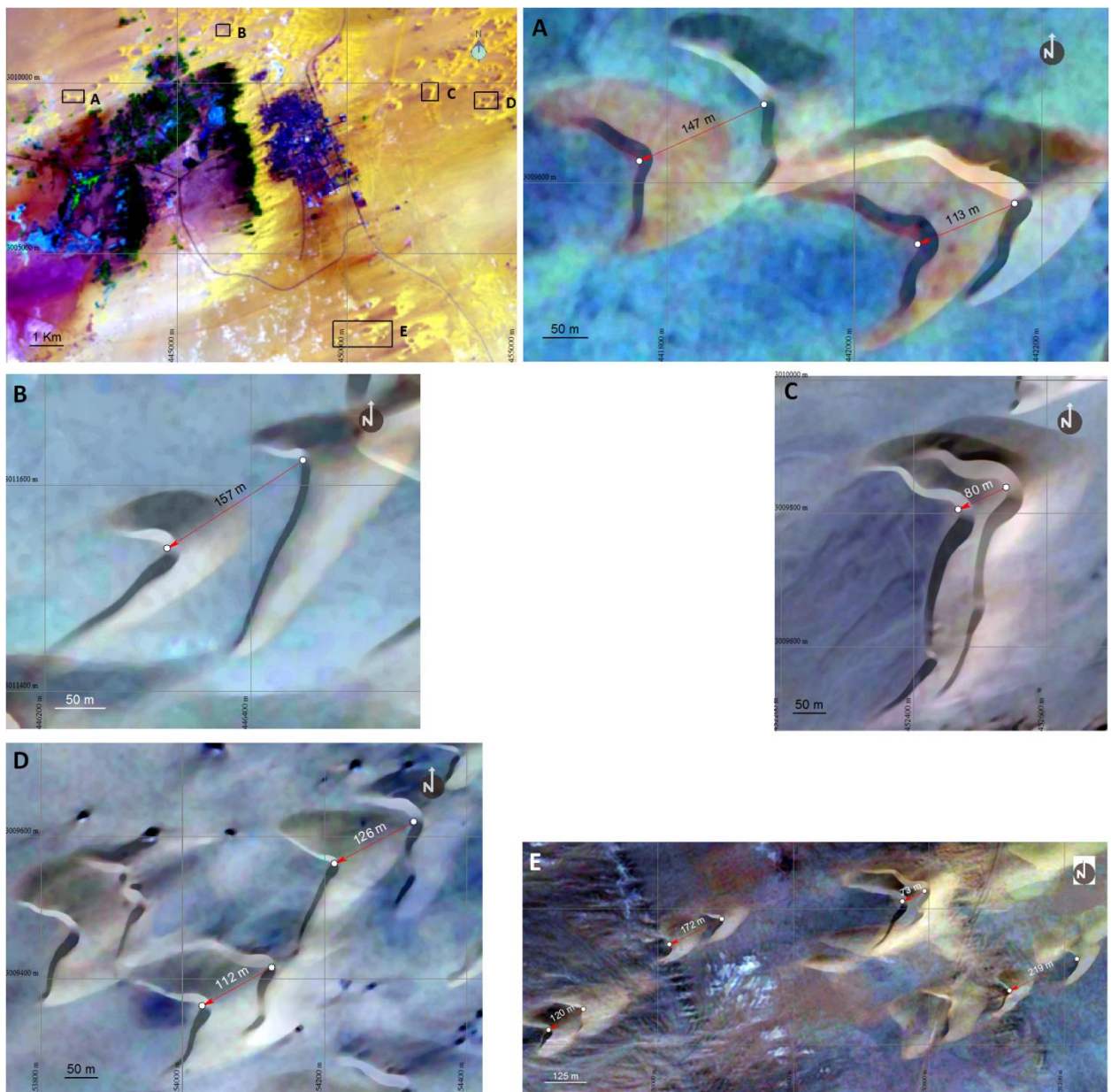


Figure 36. Superposition des images satellitaires bi-date pour illustrer le mouvement des barchanes de 2002 à 2013; les images de (A) à (E) sont des exemples choisis de chaque parcelle pilote, noter que les barchanes se déplacent vers l'ouest-sud-ouest et que les dunes de moindres tailles se déplacent plus rapidement

3. Caractéristiques morphométriques des dunes barkhaniques et effet sur la vitesse de déplacement (période 2013–2016)

Ajouté au régime et énergie des vents, la disponibilité des flux sableux, le couvert végétal et la topographie, le mouvement de dunes barkhaniques est aussi dépendant de ses dimensions et morphométrie, et plus particulièrement la hauteur du flanc, qui est considérée comme le facteur le plus déterminant (Long et Sharp, 1964).

3.1. Méthode

La caractérisation morphométrique d'une barkhane consiste à mesurer ses dimensions à savoir la longueur du flanc au vent (a), la largeur corne-à-corne (c), la hauteur (H) et le ratio longueur/largeur (a/c).

En fait, Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964) suggèrent de classer les formes de dunes barkhaniques en fonction de la valeur du rapport a/c en dune mince, normale, ronde et grosse (tableau 18 et figure 37).

Tableau 18. Forme de dunes barkhaniques et classification morphométrique selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964)

Rapport longueur/largeur (a/c)	Forme de la barkhane
0.125–0.375	Mince
0.376–0.625	Normale
0.626–0.875	Ronde
0.876–1.000	Grosse

12 barkhanes individuelles de l'Erg Sidi Moussa ont été choisies pour être soumises à la caractérisation morphométrique (figure 38), le choix de ces barkhanes pilotes est basé sur deux critères : la taille de la dune en travaillant sur des barkhanes de tailles différentes, et le critère de la bonne et représentative répartition spatiale des barkhanes dans le système dunaire.

Pour chaque barkhane, les paramètres (a), (b), (c), (h) et le ratio (a/c) ont été mesurés, et les barkhanes ont été morphométriquement classées. Les résultats sont illustrés dans le tableau 19.

La détermination de la distance et la direction de déplacement des barkhanes sujettes à la caractérisation morphométrique, a été accomplie ayant recours à l'imagerie satellitaire « Pleiades » de très haute résolution (2 m) fournie par Google Earth, ces images sont prises en deux dates correspondant à 5 janvier 2013 et 3 février 2016.

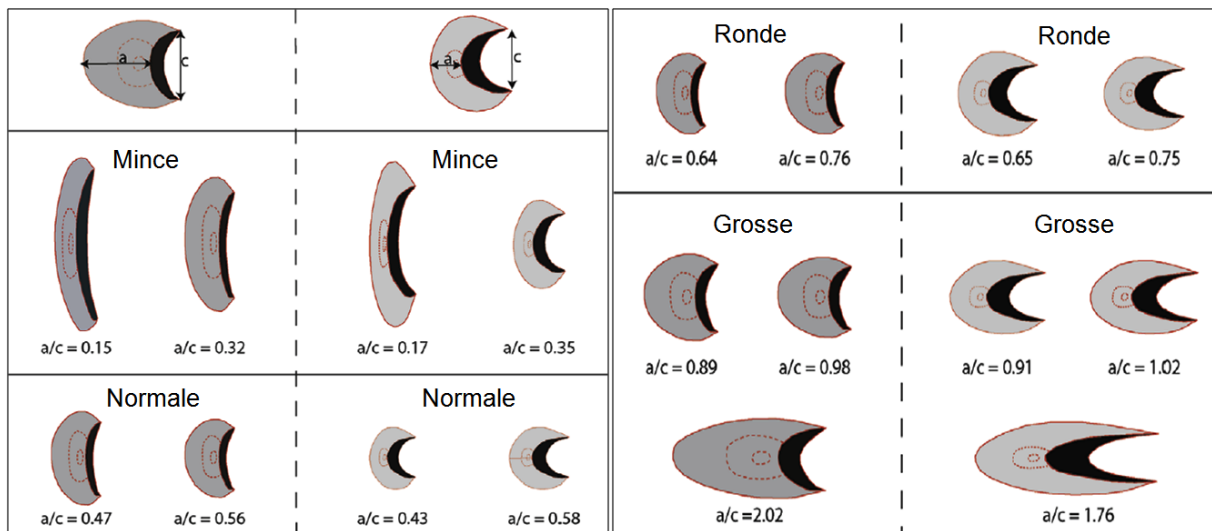


Figure 37. Classification morphométrique des barkhanes selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964)

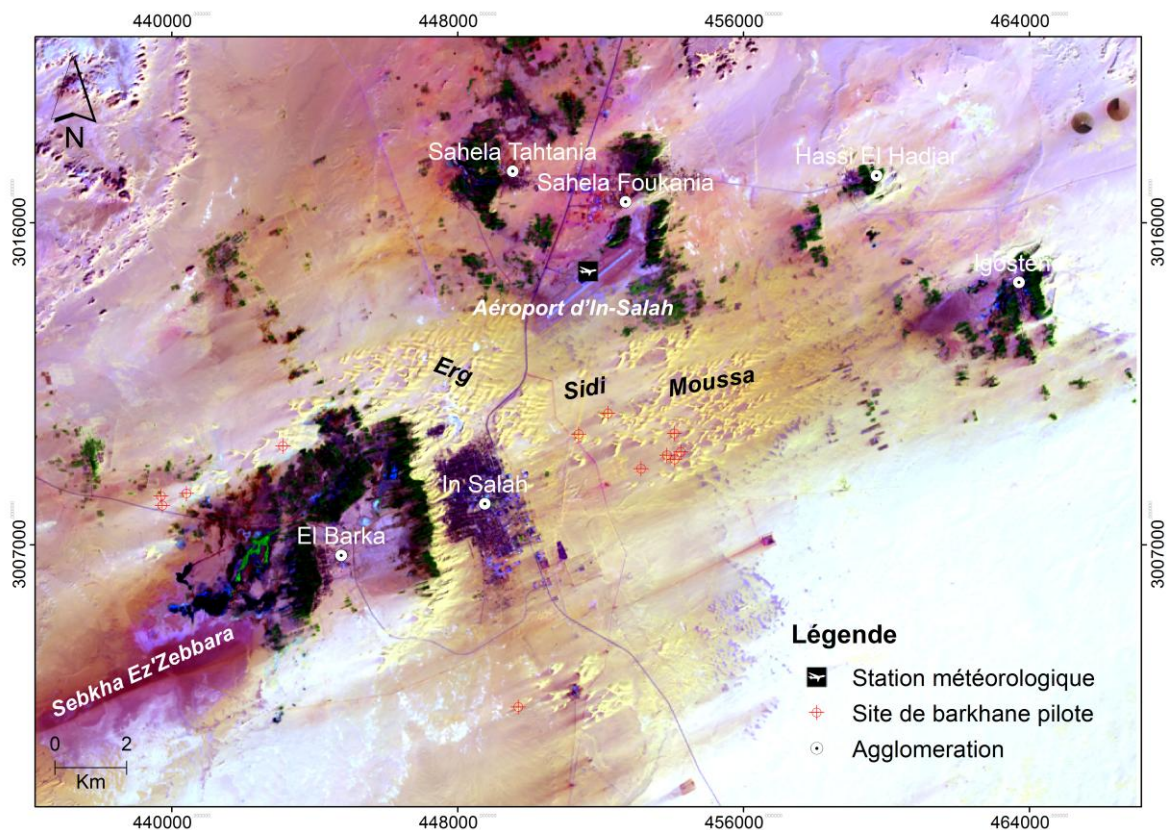


Figure 38. Localisation des dunes barkhaniques sujettes à la classification morphométrique sur image Landsat OLI 2016 (www.usgs.gov)

Les images en format JPEG ont été géométriquement corrigées et projetées au Système Universel de Mercator (zone 32), en utilisant au moins 4 points d'appui, en suite les images issues on été sauvegardées en fausses couleurs et en format Geotiff après avoir subies un rehaussement linéaire afin d'améliorer l'aspect. De même, les périmètres des barkhanes on été tracés par digitalisation et exportés en format Shapefile.

La méthode de géocorrélation point-à-point est aussi utilisée comme expliquée dans la section précédente, et la distance et direction de migration des barkhanes durant la période 2013–2016 sont calculées selon les équations (14) et (15) respectivement (figure 35).

3.2. Résultats et discussion

L'investigation morphométrique des dunes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa présentent une large gamme de valeurs de paramètres morphométriques (tableau 19), la hauteur des barkhanes (H) varie entre 6 et 22 m avec une moyenne de 13 m, la longueur (a) varie entre 73 et 173 m (97 m en moyenne), tan disque la largeur corne-à-corne (c) oscille entre 70 et 336 m avec une moyenne de l'ordre de 159 m. Par conséquent, le ratio a/c est en moyenne d'environ 0.659 avec un minimum de 0.481 (barkhane 5) et un maximum de 1.100 (barkhane 7).

La classification morphométrique des barkhanes selon Bourke et Goudie (2009), révèle une nette dominance des barkhanes de forme normale qui représentent 67 % des 12 dunes expérimentées, ces barkhanes normales se trouvent dans de différents et non spécifiés sites du système dunaire.

Tableau 19. Récapitulatif des principales caractéristiques morphométriques des barkhanes: hauteur H, longueur a, largeur c, forme de barkhane, vitesse de migration V et angle de déplacement A

Barkhane	Hauteur H	Longueur a	Largeur c	Ratio a/c	Variété *	V (m/an)	A (degré)
1	15	96	184	0,522	Normale	15	73
2	11	82	94	0,872	Ronde	15	79
3	15	75	135	0,556	Normale	15	71
4	11	73	141	0,518	Normale	18	71
5	18	100	208	0,481	Normale	13	82
6	22	173	336	0,515	Normale	8	80
7	6	77	70	1,100	Grosse	23	70
8	12	96	164	0,585	Normale	12	79
9	13	120	159	0,755	Ronde	10	72
10	8	106	179	0,592	Normale	17	73
11	13	76	135	0,563	Normale	14	99
12	11	92	108	0,852	Grosse	15	76
Moyenne	13	97	159	0,659	Normale	14	77

Les barkhanes de forme ronde et grosse sont moins fréquentes avec 17 % pour chaque variété, elles se trouvent au front du système dunaire (sud-ouest) dans le coté sous le vent à important approvisionnement en sable, et surtout marqué par de faible vitesse de vent ce qui accroît le processus d'accumulation des sables, et aboutit à un budget sédimentaire positif (Parteli et al., 2007).

Contrairement aux autres variétés, les dunes barkhaniques de forme mince n'ont pas été détectées parmi les dunes investiguées, et ceci est dû à l'importante disponibilité des flux sableux dans le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa.

L'application de la géocorrélation point-à-point aux images satellitaires, a permis la mesure précise de la vitesse et direction de la migration des 12 dunes barkhaniques durant la période 2013–2016 : les résultats obtenus montrent que la vitesse de migration des barkhanes oscille entre 8 et 23 m/an avec une moyenne de 14 m/an pour la période allant de 5 janvier 2013 au 3 février 2016 (figure 39).

De même, les angles de mouvement des barkhanes sont compris entre 70 et 99 degré avec un angle moyen de 77 degré, étant en nette concordance avec la direction

d'orientation des dunes (ouest-sud-ouest), et aussi avec la direction des vents efficaces et l'angle d'orientation résultant RDD estimé par le modèle de Fryberger et Dean (1979).

L'analyse du rapport entre les caractéristiques morphométriques de la barkhane et sa vitesse de déplacement révèle que cette dernière est inversement proportionnelle avec sa hauteur et sa largeur (Figure 40A et figure 40B).

Les dunes barkhaniques les moins hautes et moins larges comme les barkhanes 4 et 7 (11 et 6 m respectivement) sont marquées par des vitesses de déplacement plus élevées (18 et 23 m/an, respectivement), tandis que la dune barkhanique 6 ayant une hauteur plus importante (22 m) s'est moins déplacée avec seulement 8 m/an, de même que cette dernière ayant une importante largeur (336 m) s'est déplacée moins rapidement que la barkhane 7 (23 m/an) qui est remarquablement moins large (70 m).

Ces résultats confirment plusieurs études antérieures, exemples : Long et Sharp (1964) en Californie (Etats Unis), Al-Dousari et Pye (2005) au Sahara du Kuwait et Hamdan et al. (2016) au Sahara d'Egypt. Ces études et autres ont trouvé que la vitesse de déplacement d'une barkhane est inversement proportionnelle avec sa hauteur et largeur (tableau 20).

Tableau 20. Vitesse de migration de dunes barkhanique en fonction de sa hauteur dans quelques régions sahariennes au monde

Localisation	Hauteur (m)	Migration (m/an)	Référence
Salton Sand Sea (Californie)	3.1–8.2	14–27	Long et Sharp (1964)
Al-Huwamiliyah (Kuwait)	2.1–4.1	16–31	Al-Dousari et Pye (2005)
Toshka (Sahara Occidental Egyptien)	2.6–45.8	3.99–7.67	Hamdan et al. (2016)
Pampa de la Joya (Pérou)	1–7	9–32	Finkel (1959)
Laayoune (Sahara Occidental)	8–9	32–36	Oulehri (1992)
In-Salah (Algérie)	5–24	7–18	Boulghobra (2016) - Présente recherche (période 2002–2013)
	6–22	8–23	Boulghobra et Dridi (2016) - Présente recherche (période 2013–2016)

La relation entre la morphologie des barchanes et ses vitesses de déplacement est illustrée dans la figure 40C qui, montre la corrélation du ratio longueur/largeur (a/c) avec la vitesse de migration des 12 barchanes soumises à la caractérisation morphométrique.

Le diagramme montre que la relation entre les deux paramètres est généralement proportionnelle, c.à.d. que plus la dune barchanique se rapproche de la forme grosse (valeur élevée de a/c) plus son mouvement est plus rapide.

Ce résultat est peu constaté dans les recherches similaires; en principe, cette vitesse devrait être inversement proportionnelle avec le ratio de forme a/c (ex. Finkel, 1959 ; Hamdan et al., 2016). Afin de comprendre ce constat, et mieux évaluer l'influence du ratio a/c d'une barchane sur son mouvement, et selon Long et Sharp (1964), il convient de connaître l'état dynamique de la dune qui peut agir différemment comme suit :

- Cas de barchane en cours de croissance : dans de telle condition, une grosse barchane en croissance devrait se déplacer plus lentement qu'une barchane mince, vu que la grosse dune a besoin d'un plus grand volume de flux sableux pour atteindre sa hauteur optimale qui aussi devrait plus considérable par rapport à une dune de moindre taille.
- Cas de barchane en état d'équilibre : en condition d'équilibre, une grosse dune barchanique peut migrer plus rapidement car son mouvement est surtout du au déplacement des grains de sable en provenance du dos (coté au vent) de la dune elle-même ; dans ce cas, le dos de la barchane représente une source importante et très proche d'approvisionnement en sables, qui remplacera le volume des sédiments perdus au niveau des deux cornes de la barchane.

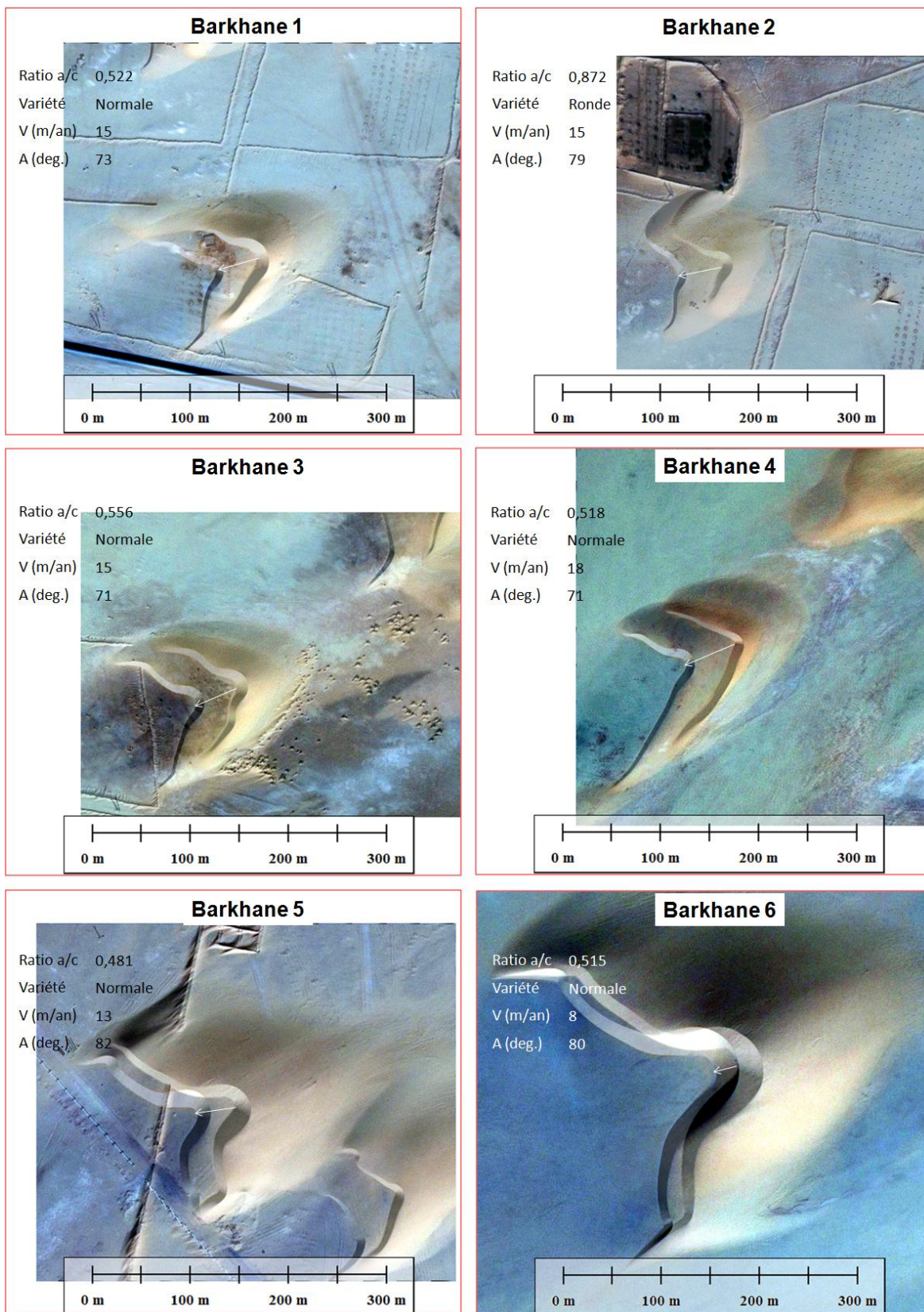


Figure 39. Effet des caractéristiques morphométriques de dunes barchaniques sur la vitesse de déplacement (2013–2016)

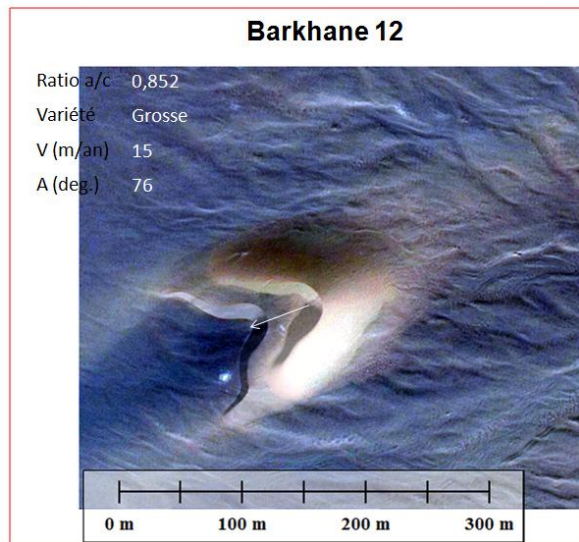
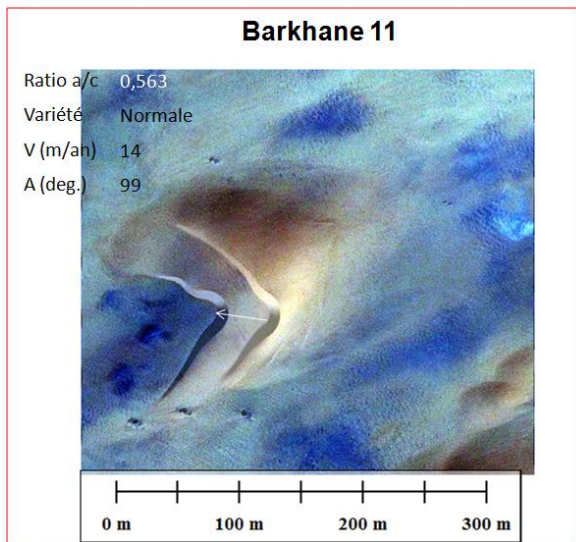
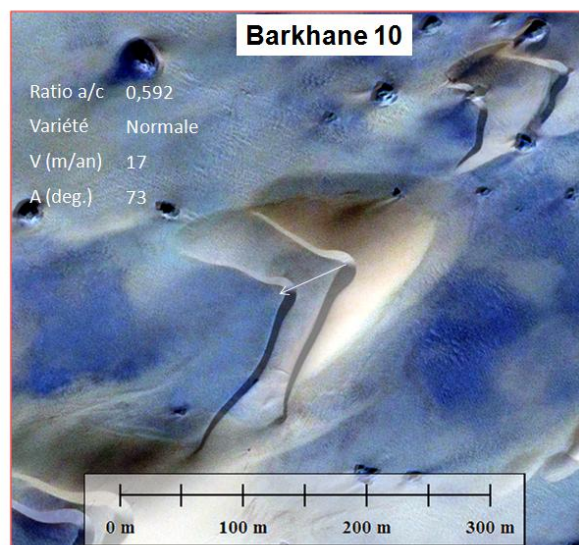
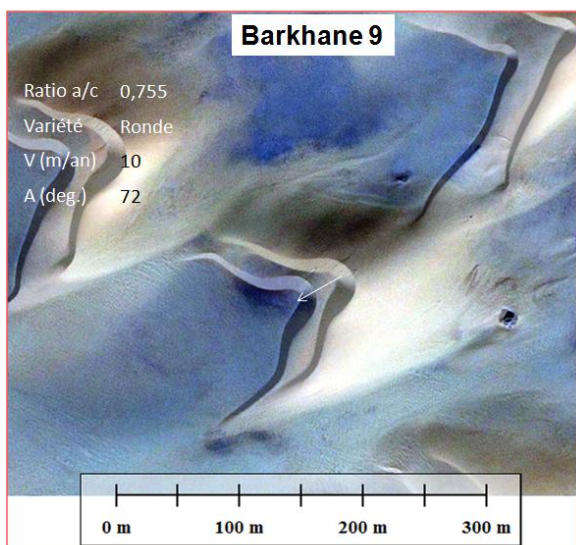
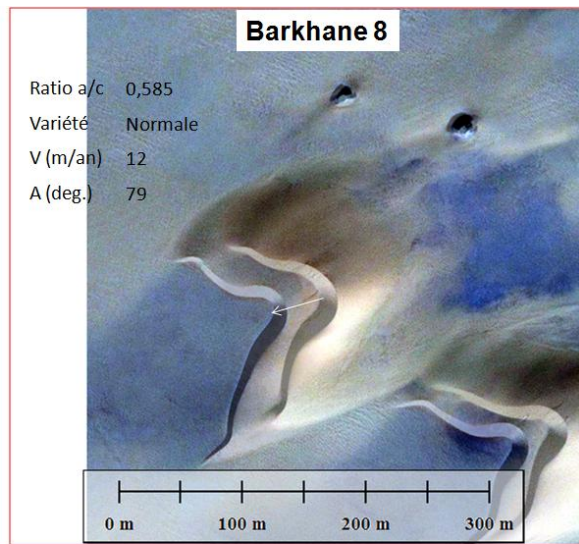
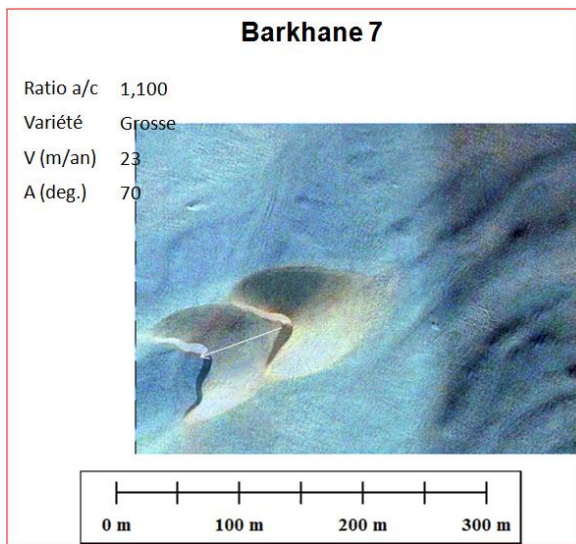


Figure 39. Suite

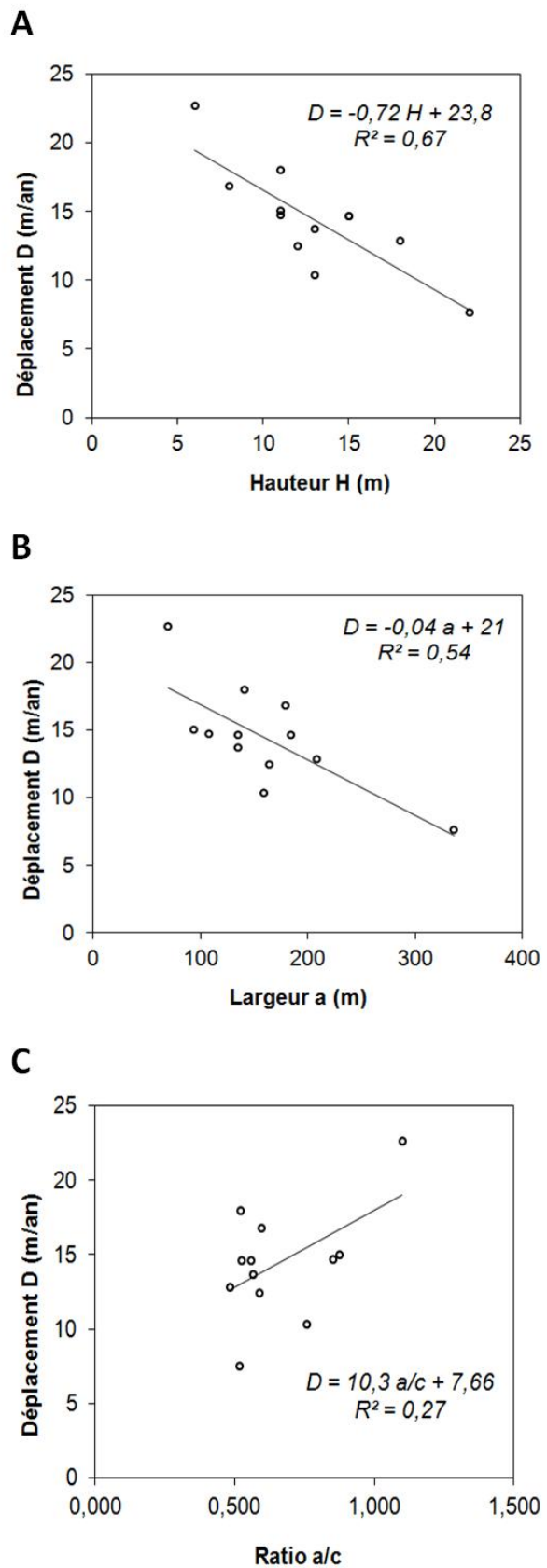


Figure 40. Relation de la vitesse de déplacement de 12 dunes barkhaniques avec leurs paramètres morphométriques : (A) Hauteur, (B) Largeur et (C) Ratio a/c

4. Conclusion

Le recours aux données climatiques de la station In-Salah aéroport (2005–2014) à permis le calcul de l'indice de mobilité de dune M à une loi de Lancaster (1988), le résultat fait ressortir que les dunes de l'Erg Sidi Moussa sont particulièrement prédisposées au déplacement et qu'elles peuvent être complètement actives. Ce résultat est confirmé suite à l'exploitation des images satellitaires à haute résolution et des systèmes d'information géographiques qui, ont permis la calcul précis de la vitesse et la direction de migration des dunes barkhaniques :

Durant la période 2002–2013, les barkhanes de l'Erg Sidi Moussa se sont déplacées de 12 m/an en moyenne selon un angle de l'ordre de 63° , en parfaite concordance avec l'angle d'orientation (64°) estimé à la loi de Fryberger et Dean (1979) ; Durant la période 2013–2016, les barkhanes se sont déplacées à une vitesse de l'ordre de 14 m/an en moyenne selon un angle d'orientation de l'ordre de 77° .

La détermination des caractéristiques morphométriques des dunes barkhaniques selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964), révèle la dominance de dunes de forme normale, dont le rapport avec la vitesse de déplacement est inversement proportionnel avec la hauteur de la dune (h) et sa largeur (c). Cependant, et on considérant le ratio de forme a/c (longueur/largeur), il a été trouvé qu'une barkhane de forme ronde ou grosse peut se déplacer plus rapidement qu'une barkhane normale, ceci à été attribué à l'état d'équilibre de la dune barkhanique lors de la prise de l'image satellitaire.

Chapitre Cinquième

In–Salah au péril du risque d’ensablement

1. Ensablement à In–Salah : Risque ou plutôt une catastrophe ?

L'ensablement est parmi les risques naturels majeurs auxquels les régions arides et semi arides en Algérie sont sérieusement confrontées. Par définition, il s'agit de l'accumulation des sables éoliens sur les structures artificielles et socioéconomiques, en raison de l'interférence de ces sédiments avec le régime des vents qui les transportent.

Comme discuté dans les chapitres précédents, le milieu naturel à In–Salah de part ses contextes topographique, géomorphologique, climatique, édaphique et biogéographique, recèle des aptitudes importantes au développement de l'érosion éolienne, déplacement des sables et migration des barkhanes.

En amont, face au vent (nord–est), le champ barkhanique de l'Erg Sidi Moussa est un système dunaire à haute énergie éolienne, qui peut transporter des volumes importants de sédiments estimés à $50 \text{ m}^3/1 \text{ m/an}$ grâce à un régime de vent unimodal, puissant, fréquent et très peu variable, les sables et dunes mobiles se déplacent continuellement et rapidement vers le sud–ouest (sous le vent), où la ville d'In–Salah en aval se présente comme seule obstacle et piège à sédiments mobiles en provenance de l'Erg.

Le risque d'accumulation des sables dans le Tidikelt et la région d'In–Salah en particulier n'est pas une problématique récente, la visualisation des images Landsat MSS et TM datées de 1972 et 1987, montre qu'In–Salah, le village de Zaouïa et la palmeraie au sud–ouest étaient déjà en un stade avancé d'ensablement.

L'investigation sur terrain et la visualisation des images satellitaires ont permis de constater que des dizaines de constructions (maisons, écoles, immeubles administratifs), palmeraies, routes et infrastructures gazo–pétrolières ont été partiellement ou totalement abandonnées en raison de l'accumulation incessante d'importantes masses de sable.

En raison de son emplacement en situation sous le vent d'un important stock sableux, Zaouïa en particulier compte de lourdes pertes socioéconomiques, des dizaines de maisons situées dans sa partie orientale face au vent sont définitivement abandonnées, et plusieurs habitants se sont changés de domiciles, ceci a conduit au décroissement du

nombre d'habitants de ce village de 897 en 1998 à 787 en 2008 d'un coté, et l'extension du nouveau bâti vers l'ouest étant en position sous le vent.

L'agglomération chef lieu d'In-Salah est de même atteinte des manifestations d'ensablement surtout dans sa partie nord orientale, on peut également recenser des dizaines de constructions complètement recouvertes de sable et conséquemment abandonnées (figure 41).

L'oasis d'In-Salah a de même subi une nette et forte dégradation, le recours aux images satellitaires de Landsat a permis d'en apprécier les pertes : de 1972 à 2016, une surface de 100 hectares de palmier-dattier est totalement ensablée sous d'immenses volumes de sables, ce qui a engendré la régression de la limite de la palmeraie vers l'ouest, là où des nouvelles mise en valeur ont été implantées mais, qui restent encore confrontées à une autre problématique qui est la salinité des sols à cause de l'existence de sebkha Ez'zebara (figure 42).

En dépit des incessantes pertes liées à l'accumulation des sables, l'espace bâti d'In-Salah et ses agglomérations secondaires sont en nette extension suite à l'essor de la population (tableau 21 et tableau 22), la plupart des agglomérations ont connu une croissance démographique à l'exception de Zaouïa et Hassi Lahdjar, ces dernières ont enregistré une décroissance démographique où 253 habitants de Hassi Lahdjar et 110 de Zaouïa ont quitté leurs domiciles suite à l'ensablement de leurs maisons.

La superficie de l'espace bâti de la ville d'In-Salah a passé de 208 ha en 1972 à 755 ha en 2016 en se propageant –paradoxalement– vers des zones à très haut risque d'ensablement, ce qui augmente le niveau d'exposition au risque et aboutit sûrement à des dégâts incessants.

Tableau 21. Essor démographique à In–Salah et ses agglomérations entre 1998 et 2008 (Office National des Statistiques, In–Salah)

Agglomération	Pop. 1998	Pop. 2008
In–Salah	18101	21897
Igostène	1772	2081
Hassi Lahdjar	1350	1097 (décroissement)
Sahla Foukania	1510	1910
Sahla Tahtania	1403	1874
Zaouïa	897	787 (décroissement)

Tableau 22. Evolution des superficies de l’espace bâti et l’oasis d’In–Salah de 1972 à 2016 (superficies calculées à partir des images Landsat)

Année	Espace bâti (ha)	Palmier-dattier (ha)
1972	208	300
1990	320	312
2005	509	200
2011	631	234
2016	755	300

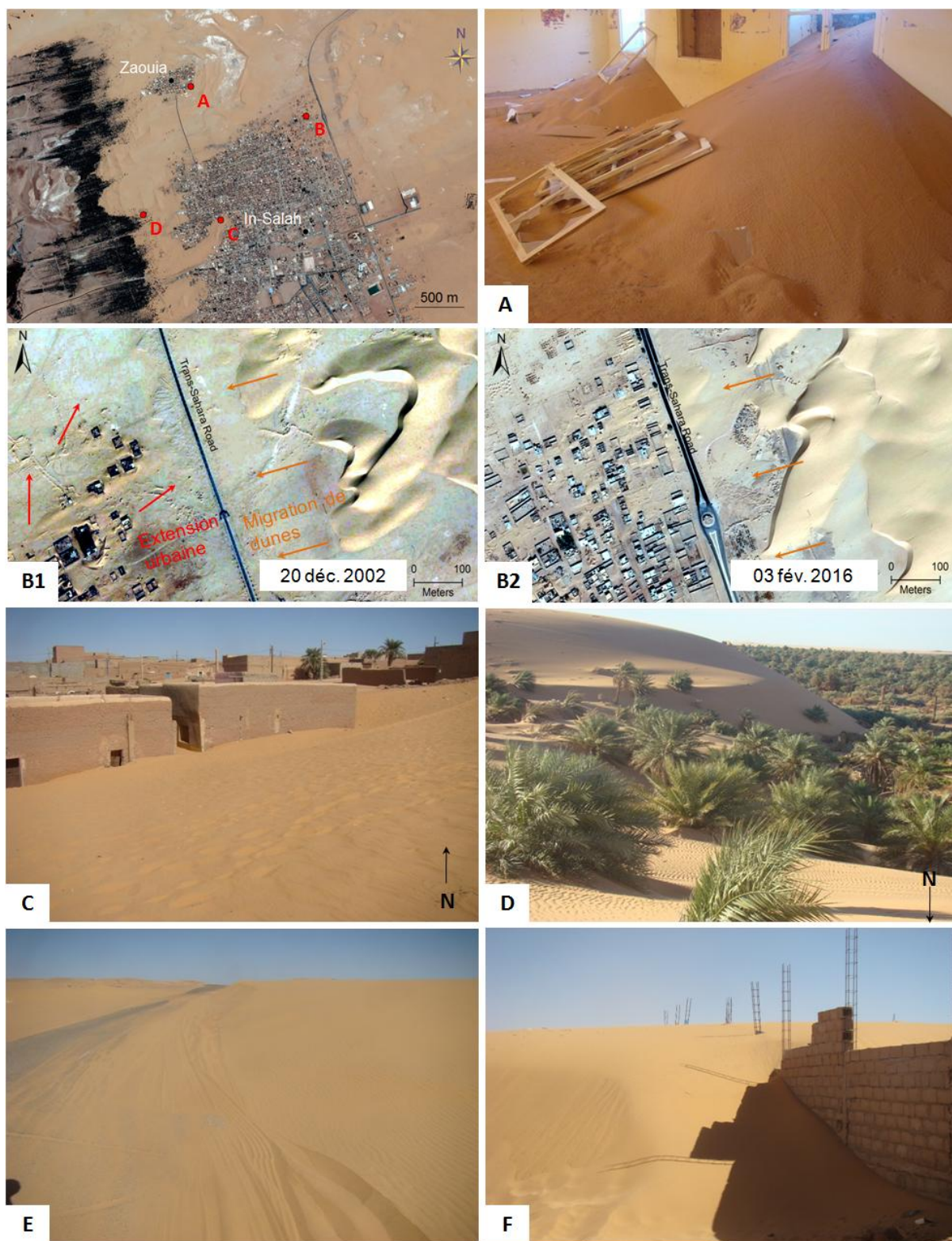


Figure 41. Impacts de l'accumulation des sables dans la ville d'In-Salah : (A) Ecole ensablée et abandonnée à Zaouïa. (B1) et (B2) met en évidence l'extension de l'habitat vers les zones à haut risque, les constructions installées après 2002 ont été conséquemment ensevelies sous les sables. (C) Maisons complètement ensablées. (D) Accumulation de sables sur l'oasis d'In-Salah au sud-ouest. (E) Ensablement de route près d'Igostène. (F) Ensablement de maison en cours de construction à Zaouïa, (photos par N. Boulghobra, 2013 et 2014)

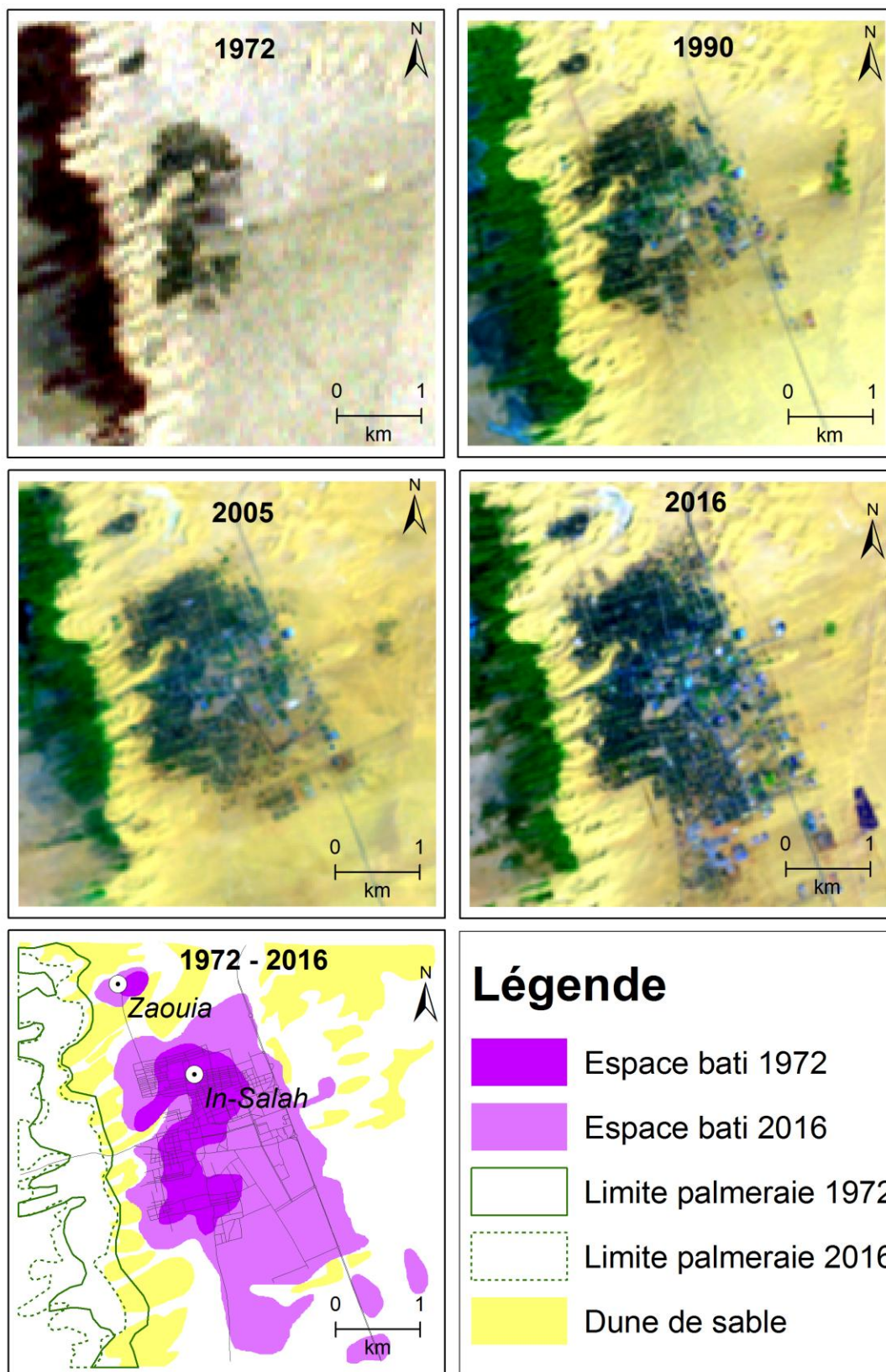


Figure 42. Evolution de l'espace bâti de l'agglomération chef lieu d'In-Salah de 1972 à 2016, noter l'extension urbaine vers les zones à risque et le recul de la palmeraie vers le sud-ouest, suite à l'avancée des accumulations sableuses en provenance du nord-est. Cartes extraites des images satellitaires Landsat MSS (1972), TM (1990, 2011, 2016) et ETM+ (2005), source (www.usgs.gov)

2. Techniques de réduction des dommages

2.1. Introduction

Dans les espaces arido-sahariens, l'ensablement constitue un défi majeur au développement durable: les villages, oasis, cultures, mise-en-valeur, infrastructures routières et ferroviaires, points d'eau ... sont constamment exposés à l'envahissement des sables éoliens en transit et dunes mobiles.

Une lutte curative et durable contre l'ensablement est une tâche extrêmement difficile. Cependant, des techniques de réduction des dommages ont pu être développées au cours des années.

On plus de la connaissance précise des modalités de transport des sables en fonction de la configuration du terrain et de la granulométrie des sables, il est aussi important de savoir la vitesse et la direction des vents efficaces ainsi la dynamique de transport des sables.

En Algérie et espaces sahariens dans le monde, différentes approches ont été adoptées, ces méthodes visent en général à :

- Provoquer le dépôt des sables au niveau du côté face au vent de la zone à protéger ;
- Augmenter le potentiel de transport de sables par le vent à travers la zone à protéger de façon à accélérer le transit des sables ;
- Réduire l'alimentation en sédiments en aval par la fixation des dunes mobiles en amont ;
- Dévier les sables en transit au delà des aires à protéger.

2.2. Rappel de quelques techniques de lutte contre l'ensablement

Actuellement, les savoir faire locaux représentent l'essentiel des techniques de lutte adoptées dans les territoires nord africains, les travaux de la FAO (2010) en Mauritanie, de Sebaa et al. (2015) en Algérie, Oulehri (1992) au Maroc et Sahara Occidental et Ahmed (2006) en Tunisie, mettent en évidence que les communautés locales ont pu s'adapter à leur milieu naturel en développant des moyens de lutte traditionnels, ayant

souvent recours à des produits et matériaux locaux telles les palmes sèches et les tas de remblais à texture grossière.

2.2.1. Palissade en palmes sèches

Un palissage est généralement implanté du côté face au vent des oasis, jouant donc le rôle de brise-vent et d'obstacle physique face aux sables en mouvement, pour faciliter par la suite de mettre en place de la végétation (figure 43A, 43B).

Le bon usage de cette technique a pu donner de résultats probants. Néanmoins, il est possible de rencontrer des contraintes ou dysfonctionnements après ou durant son application :

- Toute brèche dans la palissade peut constituer un siffle-vent qui peut diminuer l'efficacité de la palissade ;
- Une palissade trop proche du site à protéger peut aboutir à l'accentuation de l'accumulation des sables par avalanche, et une dune artificielle peut se former suite au rehaussement continu de la palissade ;
- Une palissade trop dense et peu perméable peut être endommagée suite aux événements éoliens puissants.

2.2.3. Quadrillage en palme

L'objectif de cette méthode est la fixation des surfaces dunaires par le piégeage des sables afin de permettre le croisement de la végétation. Cependant, un quadrillage partiel ou à maille trop large peut provoquer la dégradation du quadrat et ensuite diminuer son efficacité (figure 43C).



Figure 43. (A) Palissade d'arrêt pour protéger les mise en valeur contre la pénétration des sables (El Oued), (B) Palissade d'arrêt pour la protection de palmier dattier (In-Salah), (C) Quadrillage à palmes sèches (In-Salah). Photos par N. Boulghobra

2.3. Protection des routes, villages et palmeraies

Dans cette section du travail, nous allons présenter quelques méthodes efficaces traitement à caractère préventif ou curatif, issues des projets de recherches menés par le centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides dans plusieurs régions du Sahara algérien.

2.3.1. Technique de Drâa pour la protection des routes

3.1.1. Description

La méthode de Draa est un savoir faire traditionnel hérités des anciennes populations de la région d'El Oued, dont son application officielle par les services des travaux publics date de 1965.

Un Drâa du mot 'bras' (ذراع en arabe) correspond à un tas de sable de forme oblongue stabilisé par des matériaux grossiers et/ou pierres, dont l'orientation dépend de la configuration du terrain et la vitesse du vent efficace, les espaces qui existent entre les Drâas vont obliger le vent entrant à travailler contre son impulsion naturelle et à transporter le sable au-delà de la route à protéger (Voisin, 2004).

3.1.2. Principe de fonctionnement d'un Drâa

Face à un obstacle, les filets d'air contournent par le haut et redescendent derrière avant de reprendre (figure 44). Du côté face au vent (A : point d'arrêt), la pression est maximale tandis que la vitesse faible, du point A au point B, la pression décroît ce qui augmente la vitesse des filets d'air y rencontrant une masse d'air comprimé qui leur sert de rampe pour monter au dessus de l'obstacle, sur lequel ils se compriment et accélèrent. Au point C, une deuxième masse d'air sert de rampe de descente, créant à une distance égale à 2 fois la hauteur de l'obstacle (2h) et sur d'une profondeur de 5h (Soltner, 2005). Au côté sous le vent c'est l'air de sillage là ou les filets d'air vont reprendre leur direction initiale.

Un Drâa se caractérise par les dimensions suivantes :

- V1 Distance en verticale entre deux tas de remblais (3–4 m)
- V2 Distance en horizontale entre deux tas de remblais (14–16 m)
- D Distance de la route à protéger (10–15 m)
- H Hauteur (3 m)
- L Longueur (14–16 m)

Un vent traversant un système de Drâas mise en place, peut créer au niveau de chaque tas de remblai des turbulences à une distance de 6 m et sur une profondeur de 15 m, les filets d'air s'engouffrent à une vitesse de 5 m/s et ressortent à 9 m/s, ceci maintient les sables en état de transit empêchant ainsi leur accumulation. A la base de chaque Drâa, il se produit un affouillement éolien, aboutissant au départ progressif des sables de la dune à traiter, en laissant les **Drâas** sur place (figure 45).

3.1.3. Cas de régime éolien unimodal

Dans ce cas, les Drâas sont de forme trapézoïdale et déposés selon un plan incliné vis-à-vis le vent efficace, les couloirs inter Drâas vont se comporter comme canalisateurs et accélérateurs, un effet de Venturi se produit permettant aux filets d'air comprimés de transporter les sables déjà en place au delà de la chaussée, l'efficacité de cette technique est prouvée dans plusieurs régions du Sahara sud oriental algérien (figure 46A).

3.1.4. Cas de régime éolien bimodal

Dans les régions à régime de vent bidirectionnel, le système de Drâas doit être installé de par et d'autre la chaussée de la route à protéger (figure 46B), ce dispositif est appliqué avec succès au niveau de la route reliant Touggourt et Djelfa (figure 46C).

2.3.2. Technique d'El-Methana

Le nom de cette méthode de l'arabe (المطحنة) est relatif à son fonctionnement, il s'agit d'un tas de remblais pointu et de forme conique qui est constitué de matériaux grossiers, El-Methana est à installer sur la crête de grosse dune (figure 46D), dont le principe est le même que celui de Drâa, où les mouvements de turbulences créés autour de cet obstacle rond sont capable à transporter les sables au niveau de sa base, et l'affouillement ainsi généré finira par le départ progressif de la grosse dune et laisser le tas de remblais sur

place. Cette technique est appliquée avec succès au niveau de la RN. 16 reliant Touggourt et El Oued (figure 46E).

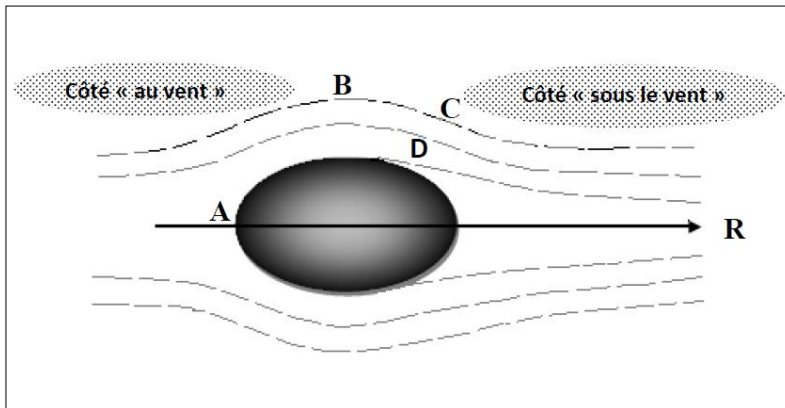


Figure 44. Comportement dynamique des filets d'air face à un obstacle (Mainguet et Remini, 2004)

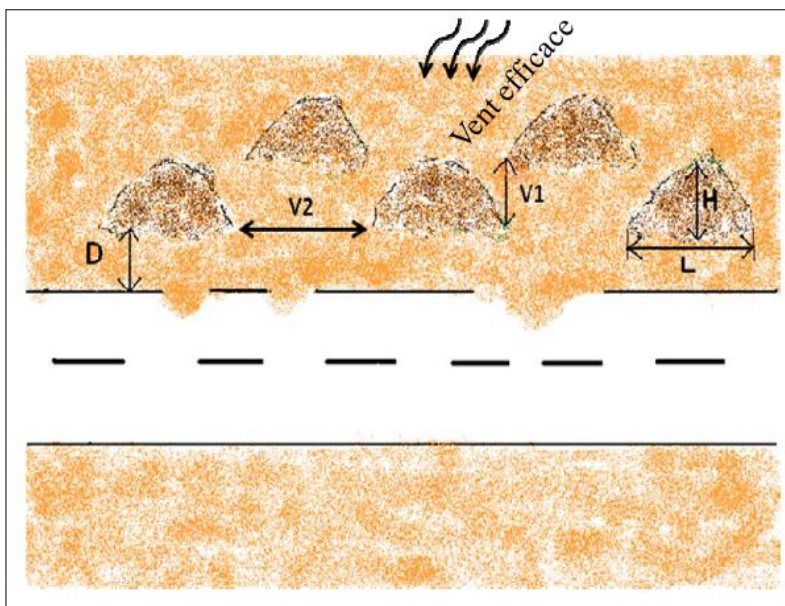


Figure 45. Conception et disposition des Drâas selon Sebaa et al. (2015)

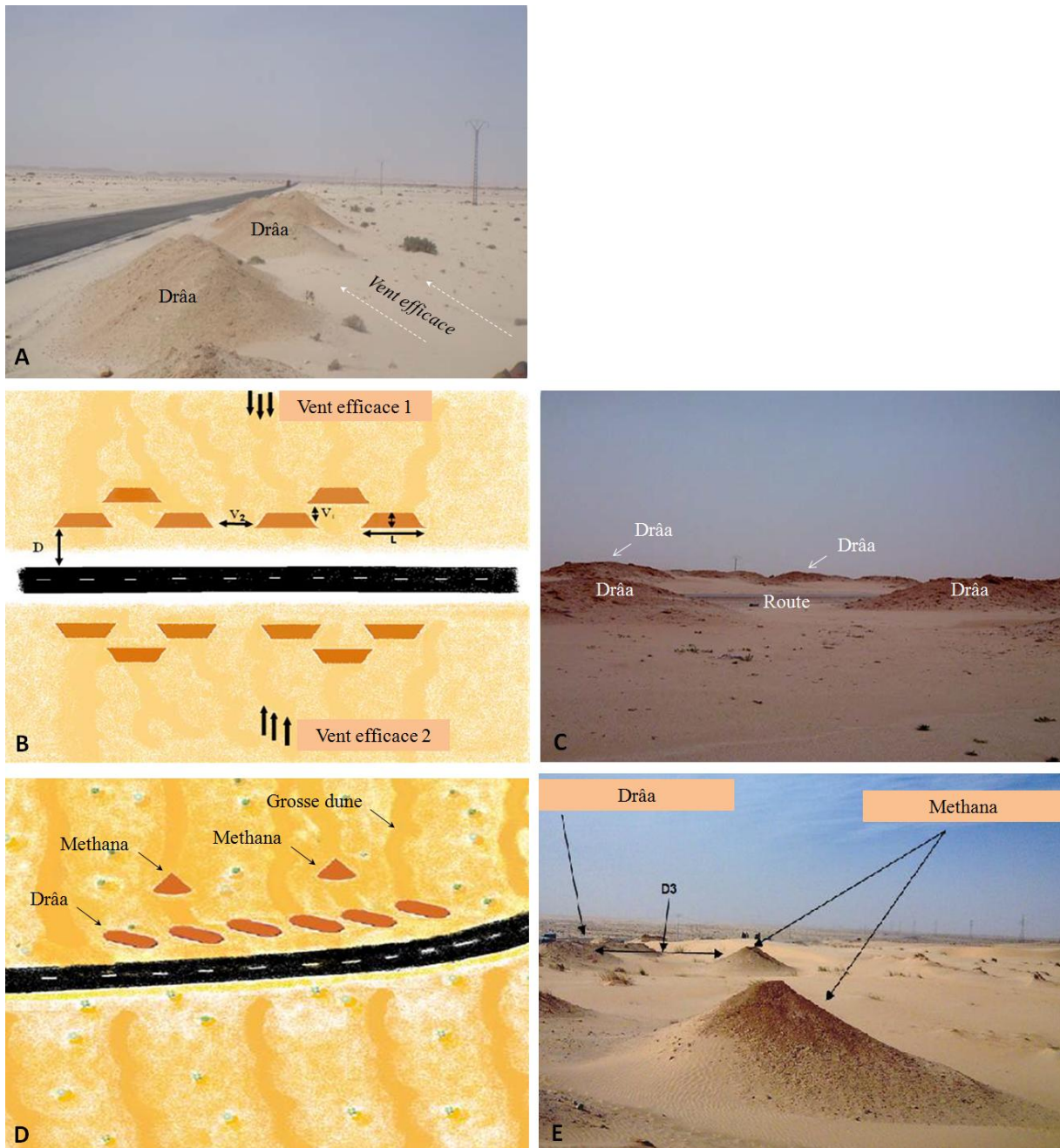


Figure 46. (A) Système de Drâas en cas de vent unidirectionnel, (B) Schéma de système de Drâas en cas de vent bidirectionnel, (C) Application d'un système de Drâas au niveau de la route reliant Touggourt et Djelfa, (D) Schéma de la mise en place du dispositif El-Methana, (E) Application du dispositif El-Methana au niveau de la RN. 16 (Touggourt – El-Oued)

2.3.3. Technique de l’Afreg pour la protection des villages et palmeraies

Cette technique est largement utilisée au sud ouest algérien (Touat, Gourara et Tidikelt), pour la protection des agglomérations, palmeraies et mise en valeur contre la pénétration des sables mobiles.

2.3.3.1. Afreg d’arrêt (perpendiculaire au vent)

L’installation d’un Afreg consiste à enfoncer des palissades en palmes sèches (Jerid) pour freiner l’avancée du sable, les palissades sont alignées perpendiculairement au vent efficace présentant de même un aspect incurvé et dissymétrique. Un Afreg doit être installé à une distance suffisante dans le coté au vent de l’enjeu à protéger (au moins 200–300 m), car l’essentiel des sables en mouvement est arrêté par la palissade, mais le reste pourra pénétrer à travers et se déposer plus loin. Quand la première palissade se couvre entièrement de sable, une autre est installée dessus, la répétition de cette opération engendrera l’augmentation de la hauteur pour former une dune-Afreg (figure 47A, 47B).

2.3.3.2. Afreg de défilement (oblique au vent)

On parle d’Afreg de défilement quand il est orienté 120 à 140 degrés par rapport au vent efficace, dont l’objectif de cette inclinaison est de pouvoir dévier les sables en transit loin de l’enjeu à protéger.

Un deuxième Afreg est installé au coté du premier de façon qu’ils forment un angle de divergence d’environ 140 degrés, ainsi une brèche d’environ 50 m est laissée entre les deux Afregs, ce vide est localement appelé Tassoutta, l’angle de divergence que forment les deux Afregs est conçu pour dévier les sables en mouvement loin de la zone à protéger, en même temps que le Tassoutta aboutie à la création d’une accélération aérodynamique des filets d’air et empêcher le dépôt des sables au niveau de la zone sous le vent du dispositif (figure 47C).

La longueur des deux Afregs et leur angle de divergence sont déterminés en fonction de la forme et l’extension de l’enjeu à protéger. Cette technique a prouvé une bonne efficacité dans plusieurs régions du sud ouest algérien. Cependant, les sables déviés peuvent d’accumuler dans des zones avoisinantes.

2.3.3.3. Afregs en successions

Cette technique est appliquée principalement pour la protection des palmeraies, dont l'objectif de l'installation des Afregs est la diminution de la vitesse du vent, ce qui provoque le dépôt des sables dans le côté face au vent. Quand l'Afreg est entièrement enseveli, les sables ne sont plus piégés et donc peuvent s'accumuler au-delà, on assiste alors à l'installation d'un autre Afreg à 40 m du premier afin de pouvoir désensabler le premier (Figure 47D).

Cela s'explique de la façon suivante : le vent, après s'être délesté de sa charge sur la seconde clôture accroît sa vitesse et dispose ainsi d'un surcroît d'énergie qui lui permet de dégager le sable accumulé par la première. Si à son tour le second Afreg est enseveli, l'édification d'un troisième jouera à l'égard du deuxième le même rôle que celui a joué à l'égard du premier. Il se produit ce qu'on appelle une substitution de charge (Sebaa et al., 2015).

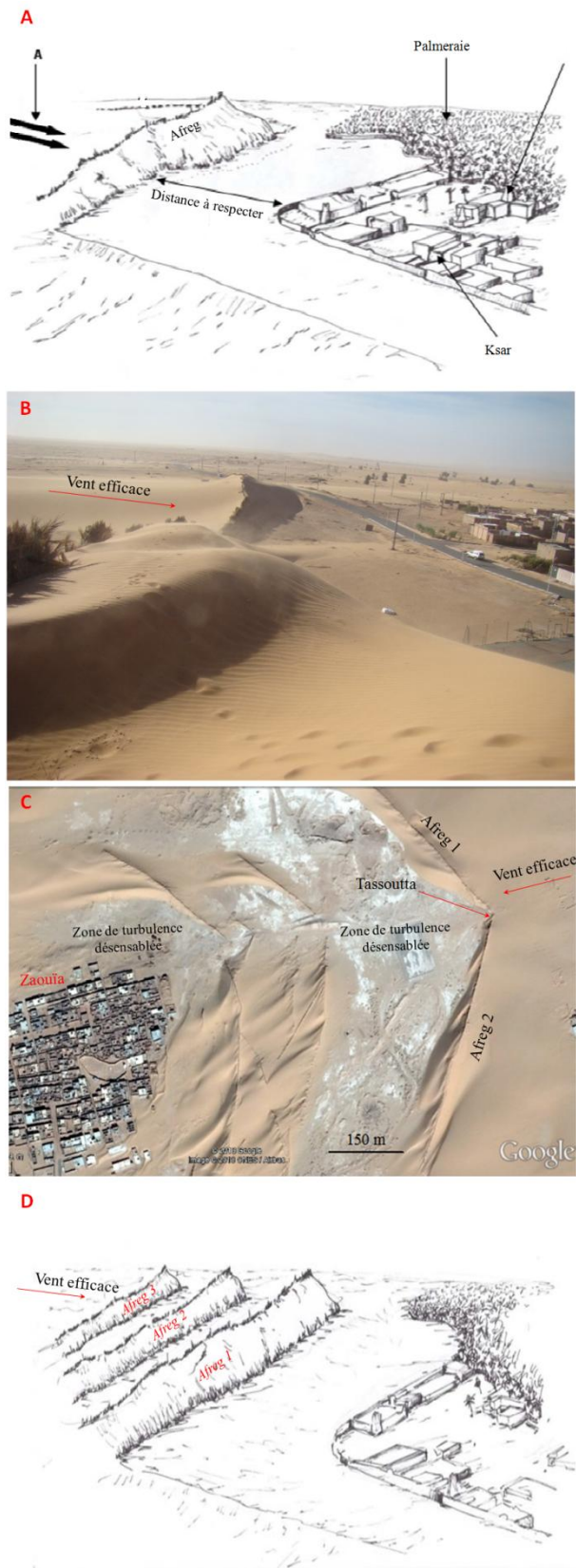


Figure 47. (A) Schéma d'un Afreg d'arrêt selon Sebaa et al. (2015). (B) Photo d'un Afreg d'arrêt installé perpendiculairement au vent efficace (In-Ghar, ouest d'In-Salah). (C) Image Google Earth illustrant un Afreg de défilement à Zaouïa, nord d'In-Salah. (D) Schéma de succession d'Afregs selon Sebaa et al. (2015)

3. Conclusion

Certes, l'exposition au risque d'ensablement dans le Tidikelt et In-Salah en particulier, est liée à son contexte physique et climatique local, régional et continental. Cependant, l'homme a effectivement contribué à l'accentuation de la vulnérabilité et l'aggravation des impacts de la dynamique éolienne et déplacement des sables, entant que processus naturels dans les régions sahariennes.

Les dégâts liés au déplacement et accumulation des sables mobiles dans le territoire d'In-Salah sont perceptibles et particulièrement sérieux, touchant tous les aspects vitaux de la communauté, les infrastructures urbaines, sociales, économiques et agricoles sont continument soumises à un risque naturel très élevé et qui ne cesse de s'aggraver.

Cette recherche recommande l'application de quelques méthodes de lutte contre l'ensablement et l'atténuation des dommages, il s'agit principalement de techniques traditionnelles et de savoir-faire locaux adaptés aux environnements éoliens de régime éolien unimodal, dont l'efficacité a été prouvée dans la région d'In-Salah et dans d'autres régions du Sahara algérien.

Conclusion Générale

Cette recherche s'est intéressée à la quantification de l'érosion éolienne dans le système dunaire de l'erg Sidi Moussa en amont d'In-Salah, ainsi à la caractérisation du risque d'ensablement dans les espaces urbains et ruraux.

L'analyse du cadre physiogéographique met en évidence des conditions particulièrement favorables à la genèse et l'évolution des processus de l'érosion éolienne, de mise en mouvement des sables dunaires et de la migration des dunes de sable.

La sécheresse accrue et l'hyper aridité prolongée du climat contribuent à la forte dégradation des terres donnant naissance à des formations superficielles fragiles, détritiques et fortement mobilisables, ceci permet à l'efficace et dominant Alizé continental de mettre les sable en mouvement et déplacer des dunes de sable continument vers le sud-ouest, en mettant la ville d'In-Salah et ses périphéries en une perceptible situation de risque.

L'application du modèle pondéré de Fryberger et Dean (1979) à permis l'appréciation des capacités éoliennes de la région d'In-Salah, les résultats montrent que le déplacement potentiel de sable DP est de l'ordre de 785 Unités vectorielles et le module de la résultante MR est de 560 UV, ce qui est l'équivalent de près de 40 m³ de sable transportable à travers chaque 1 mètre de surface terrestre par an, valeur due à une énergie éolienne particulièrement forte. L'angle d'orientation des vents efficaces est estimé à 64°, et présente une direction stable et uniforme vers le secteur ouest-sud-ouest (ville d'In-Salah) durant toute la période considérée. De même, Le coefficient de migration des sables CM (0.71) confirme la faible variabilité directionnelle des vents efficaces, et implique un régime de vent fort, unimodal et complètement associé à des dunes de sable barkhanoides.

La morphologie des dunes de l'Erg Sidi Moussa laisse constater la dominance des barkhanoides et ses sous types, le vent Alizé assure la formation des barkhanes à partir des dunes transverses situées face au vent, et ces barkhanes déplacent selon une orientation nord est-sud ouest vers les marges et front de l'erg, et ce en manifestant une

multitude de transformations morphologiques telles la collision, le chevauchement et l'asymétrie, en raison des facteurs topographiques et aérologiques locaux.

La granulométrie des sables des crêtes barkhaniques est principalement composée de grains moyens et assez bien classés, dont la distribution est monomodale à une dominance et un meilleur tri des sables grossiers, ainsi la taille moyenne des sédiments tend à décroître du dos de l'erg au nord-est vers son front au sud-ouest en raison du tri granulométrique des particules. Par ailleurs, la morphoscopie de quartz met en exergue la prédominance des émoussés luisants, dont la proportion décroît aussi en direction de déplacement des sables à cause de l'intensification de l'éolisation, ceci mène à supposer que l'Erg Sidi Moussa s'est déposé à la dépression d'In-Salah suite à un transport hydrique en provenance du plateau de Tademaït, avant que les sables soient repris par l'Alizé continental vers le sud-ouest.

En appliquant la formule de Lancaster (1988), les dunes barkhaniques peuvent être considérées comme totalement actives, cette prédisposition au déplacement est confirmée par l'utilisation d'une imagerie satellitaire à haute résolution et aux systèmes d'information géographiques, cette approche a permis la mesure de la vitesse et la direction de migration des barkhanes durant la période 2002–2013, où les barkhanes se sont déplacées de 12 m/an selon un angle de 63°, et la période 2013–2016 avec une vitesse de 14 m/an et selon un angle de 77°, en concordance avec l'angle d'orientation RDD (64°) estimé au modèle de Fryberger et Dean (1979).

L'investigation morphométrique des dunes barkhaniques selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964) révèle la dominance des dunes de la variété normale, dont la vitesse de migration est inversement proportionnelle avec la hauteur et la largeur. Néanmoins, une barkhane ronde ou grosse en cours de développement peut se déplacer plus rapidement qu'une barkhane normale.

Les sables mobiles et barkhanes migrantes en provenance de l'Erg Sidi Moussa en amont, s'accablent en aval en engendrant continuellement de sérieux dégâts au niveau des espaces urbains et palmeraies.

Cette recherche suggère l'application de quelques techniques traditionnelles visant l'atténuation des dommages, dont la bonne pratique et l'adoption d'une stratégie globale, participative et intégrée pourront contribuer à minimiser les dégâts, et surtout renforcer la résilience de la population face au risque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abou El-Magd I, Hassan O, Arafat S (2013) Quantification of sand dune movements in the south western part of Egypt, using remotely sensed data and GIS. *Journal of Geographic Information System* 5:498–508

Abu-Zeid M.M, Baghdady A.R, El-Etr H.A (2001) Textural attributes mineralogy and provenance of sand dune fields in the greater Al Ain area United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments* 48:475–499

Ahmed A (2006) La lutte contre l'ensablement en Tunisie, comite de liaison de la route transsaharienne, ministère de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire, Tunisie, 34p

Al-Awadhi J, Al-Helal A, Al-Enezi A (2005) Sand drift potential in the desert of Kuwait. *Journal of Arid Environments* 63:425–438

Al-Dousari A.M, El-Enezi A.K, Al-Awadhi J (2008) Textural variations within different representative types of dune sediments in Kuwait. *Arabian Journal of Geosciences* 1:17–31

Al-Dousari A.M, Pye K (2005) Mapping and monitoring of dunes in northwestern Kuwait. *Kuwait Journal of Science & Engineering* 32(2):119–134

Alimen H (1953) Variations granulométriques et morphoscopiques de sable le long de profils dunaires au Sahara Occidental. In *Actions Eoliennes. Colloques Internationaux*, Centre National de Recherches Scientifiques, Paris. 35: 219–235

Bagnold R.A (1937) The size grading of sand by wind. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 163:250–64

Bagnold R.A (1941) *The Physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London, 265p

Barndorff-Nielsen O, Dalsgaard K, Halcreen C, Kuhlman H, Møller JT, Schou G, (1982) Variation in particle size distribution over a small dune. *Sedimentology* 29:55–65

Bellair P (1953) Sables désertiques et morphologie éolienne, Proceedings of the 19th International Geological Congress, Algiers, 113–117

Berthois L (1959) Techniques de l'analyse granulométrique. Centre Documentaire de l'Université de Paris, 64 p

Besler H, Lancaster N, Bristow C, Henschel J, Livingstone I, Seely M, White K (2013) Helga's dune: 40 years of dune dynamics in the Namib Desert. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 95:361–368

Besler H (1982) A contribution to the aeolian history of the Tanezrouft. *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 59:55–60

Binda P.L (1983) On skewness of some eolian sands from Saudi Arabia. In. Brookfield ME, Ahlbrandt TS (Ed.) *Developments in sedimentology*, vol. 38. Elsevier, Oxford, pp 27–39

BNEDER (2002) Etude de mise en place d'un dispositif de lutte contre l'ensablement des villes d'In-Salah et In-Guezzam et des périmètres adjacents. Conservation des forêts de la wilaya de Tamanrasset

Boulghobra N, Hadri T, Bouhana M, (2014) Using Landsat imagery for monitoring the spatiotemporal evolution of sanding in drylands, the case of In-Salah in the Tidikelt (southern Algerian Sahara). *Geographia Technica* 9:1–9

Boulghobra N, Merdas S, Lakhdari F (2015) Sand encroachment in the Saharan Algeria: the not declared disaster – Case study: In-Salah region in the Tidikelt. *Planet@Risk* 3:1–5

Boulghobra N, Koull N, Benzaoui T (2016) Four decades period of climatic data for assessing the aeolian hazard in the region of Touggourt (Low Algerian Sahara). *Geographia Technica* 11/1:13–22

Boulghobra N, Dridi H (2016) Fine resolution imagery and GIS for investigating the morphological characteristics, and migration rate of barchan dunes in the Erg Sidi Moussa dunefield near In-Salah (Algeria). *Geographia Technica* 11/2:14–21

Boulghobra N (2016) Climatic data and satellite imagery for assessing the aeolian sand deposit and barchan migration as a major risk sources in the region of In-Salah (Central Algerian Sahara). *Arabian Journal of Geosciences* 9:1–15

Bourke M.C, Goudie A.S (2009) Varieties of barchan form in the Namib Desert and on Mars. *Aeolian Res.* 1:45–54

Breed C.S, Fryberger S.G, Andrews S, McCauley C, Lennartz F, Gebel D, Horstman K (1979) Regional studies of sand seas, using Landsat (ERTS) imagery. In: McKee ED (Ed.) *A study of global sand seas, geological survey professional paper*, US government printing office, Washington, pp 305–398

Breed C.S, Grow T (1979) Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing. In: McKee ED (Ed.) *A study of global sand seas, geological survey professional paper*, US government printing office, Washington, pp 253–304

Brookfield M.E, Ahlbrandt T.S (1983) Eolian sediments and processes, *Developments in sedimentology* 38. Elsevier, 671p

Bullard J.E, Thomas D.S.G, Livingstone I, Wiggs G.F.S (1996) Wind energy variations in the southwestern Kalahari desert and implications for linear dune field activity. *Earth Surface Processes and Landforms* 21:263–278

Cailleux A, Tricart J (1959) *Initiation à l'étude des sables et des galets*. Centre Doc. Univ. 1, Paris, 376p

Cailleux A (1942) Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. *Mém. Soc. Géol. Fr.* (fasc. 1–2), 21, 176p

Callot Y, Oulehri T (1996) Géodynamique des sables éoliens dans le Nord-Ouest saharien : relations entre aérologie et géomorphologie, *Geodynamica Acta* 9/1:1–12

Callot Y (1987) Géomorphologie et paléo–environnements de l'Atlas Saharien au Grand Erg Occidental: dynamique éolienne et paléo–lacs holocènes. – Thèse de Doctorat d'Etat Es–Sciences, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 412p

Capot–Rey R (1946) Études récentes sur le climat de l'Afrique du nord et du Sahara. Annales de Géographie, 297:39–48

Capot-Rey R (1953) Le Sahara français. P.U.F., Paris, 564p

Capot-Rey R (1970) Remarques sur les ergs du Sahara. In: Annales de Géographie, Tome 79, 431:2-19

Cooke R.U, Warren A (1973) Geomorphology in deserts. Batsford, London, 394p

Coudé–Gaussen G, Rognon P (1995) Désertification et aménagement au Maghreb. L'Harmattan, 313p

De Martonne E (1926) Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. La Météorologie, pp 449–458

Del Valle H.F, Rostagno C.M, Coronato F.R, Bouza P.J, Blanco P.D (2008) Sand dune activity in north–eastern Patagonia. Journal of Arid Environments 72:411–422

Dregne H.E (1984) Desertification of arid lands. Harwood Acad. Publ., NY, 242p

Dubost D (2002) Ecologie, Aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (Ed.), Biskra, Algérie

Eastwood E, Nield J, Baas A, Kocurek G (2011) Modeling controls on aeolian dune–field pattern evolution. Sedimentology 58:1391–1406

Elbelrhiti H, Andreotti B, Claudin P (2008) Barchan dune corridors: Field characterization and investigation of control parameters. Journal of Geophysical Research 113:F02S15

- El-Ghannouchi A (2007)** Dynamique éolienne dans la plaine de Souss: approche modélisatrice de la lutte contre l'ensablement. Faculté des Sciences, Rabat, Maroc, 193p
- Emberger L (1955)** Une classification biogéographique des climats, recueil. travaux de laboratoire géolo-zoologique, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier 7:3–43
- FAO (2010)** Fighting sand encroachment, lessons from Mauritania. FAO forestry paper 158. Rome, 87p
- Finkel H.J (1959)** The barchans of Southern Peru. *Journal of Geology* 67:614–647
- Folk R, Ward W.C (1957)** Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters'. *Journal of Sedimentary Petrology* 27:3–26
- Fryberger S.G, Al-Sari A.M, Clisham T.J, Rizvi S.R, Al-Hinai K.G (1984)** Wind sedimentation in the Jafurah Sand Sea, Saudi Arabia. *Sedimentology* 31:413–431
- Fryberger S.G, Dean G (1979)** Dune forms and wind regime. In: McKee ED (Ed.) A study of global sand seas, geological survey professional paper, US government printing office, Washington, pp 137–170
- Gausson H, Bagnouls F (1953)** Dry Season and Xerothermic Index. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 88:193–240
- Goudie A.S (2013)** Arid and Semi-arid Geomorphology. Cambridge, 468p
- Greeley R, Iversen J.D (1985)** Wind as a geological process on earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge Planetary Science, Cambridge
- Hamdan M.A, Refaat A.A, Abdel Wahed M (2016)** Morphologic characteristics and migration rate assessment of barchan dunes in the Southeastern Western Desert of Egypt. *Geomorphology* 257:57–74
- Hereher M.E (2010)** Sand movement patterns in the Western Desert of Egypt: an environmental concern. *Environmental Earth Sciences* 59:1119–1127

- Hereher M.E (2014)** Assessment of sand drift potential along the Nile Valley and Delta using climatic and satellite data. *Applied Geography* 55:39–47
- Howard A.D, Morton J.B, Gad-el-Hak M, Pierce D.B (1977)** Simulation Model of Erosion and Deposition on a Barchan Dune. NASA Contractor Report, CR-2838, Washington
- INSID Institut National des Sols, de l'Irrigation et Drainage (2011)** Atlas: Carte d'occupation du sol par wilaya. 150p
- Jewell P.W, Nicoll K (2011)** Wind regimes and aeolian transport in the Great Basin, U.S.A. *Geomorphology* 129:1–13
- Kasbadji Merzouk N (1999)** Carte des vents de l'Algérie – résultats préliminaires –. revue des énergies renouvelables : valorisation 209–214
- Kawamura R (1951)** Study of sand movement by wind. Institute of Science and Technology, University of Tokyo
- Khalaf F.I, Al-Ajmi D (1993)** Aeolian processes and sand encroachment problems in Kuwait. *Geomorphology* 6:111–134
- Koull N, Benzaoui T, Sebaa A, Kherraze M.E, Berroussi S (2016)** Grain size characteristics of dune sands of the Grand Erg Oriental (Algeria). *Journal Algérien des Régions Arides*, 13:10–16
- Krumbein W.C (1938)** Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. *Jour. Sed. Petrology* 8:84–90
- Lancaster N (1986)** Grain size characteristics of linear dunes in the southwestern Kalahari. *Journal of Sedimentary Petrology* 56:395–400
- Lancaster N (1988)** Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa. *Journal of Arid Environments* 14:233–244

Lancaster N (1989) *The Namib Sand Sea: Dune Forms, Processes, and Sediments*, A.A. Balkema, Rotterdam, 200p

Lancaster N (1995) *Geomorphology of desert dunes*. Routledge, London

Lancaster N (2009) *Dune Morphology and Dynamics*. In: Parsons AJ and Abrahams AD (Ed.) *Geomorphology of Desert Environments*, Ed. 2, Springer Science and Business Media, pp 557–595

Le Ribault L (1975) Application de l'exoscopie des quartz à quelques échantillons prélevés en Manche orientale. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 279, No. 1288:279–288

Le Ribault L (1977) *L'exoscopie des quartz*. Masson, 150p

Lettau H, Lettau K (1975) Regional climatology of tundra and boreal forests in Canada. In: Weller G, Bowling SA (Ed.) *Climate of the Arctic*. Proceedings of the 24th Alaska Science Conference, Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, AK, USA, pp 209–221

Long J.T, Sharp R.P (1964) Barchan–dune movement in Imperial Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 75:149–156

Lorenz R.D, Gasmi N, Radebaugh J, Barnes J.W, Ori G.G (2013) Dunes on planet Tatooine: Observation of barchan migration at the Star Wars film set in Tunisia. *Geomorphology* 201:264–271

Lundholm B (1979) Ecology and dust transport. In: C. Morales C (Ed.) *Saharan Dust. Mobilization, Transport, Deposition*. Wiley, New York, pp 61–67

Mainguet M, Dumay F, Ould El Hacem M.L, Maefoudh A (2001) Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo–sahélienne. *Télédétection* 2:129–136

Mainguet M, Remini B (2004) Le rôle des méga-obstacles dans la formation et le façonnement des ergs : quelques exemples du Sahara. *Larhyss Journal* 3:13–23

- Mainguet M (1984)** A classification of dunes based on Aeolian dynamics and the sand budget. In: El-Baz F. (ed). *Deserts and Arid Lands*. M. Nijhoff Publ., Holland, pp 30–58
- Mainguet M (1991)** *Desertification, natural back-ground and human mismanagement*. Springer Verlag, 314p
- Mainguet M (1995)** *L’homme et la sécheresse*. Masson, Paris. 335p
- Mainguet M (1999)** *Aridity: drought and human development*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 302p
- McKee E.D (1979)** *A Study of Global Sand Seas*. Prof. Pap. 1052, U.S. Geol. Survey, Washington, 439p
- McKee E.D (1983)** Eolian sand bodies of the world. In: M.E. Brookfield and T.S. Ahlbrandt (Ed.), *Eolian sediments and processes*. Amsterdam, Elsevier, pp 1–25
- Melton F.A (1940)** A tentative classification of sand dunes and its application to dune history in the southern high plains. *Journal of Geology* 48/2:113–174
- ONU (1994)** *Convention internationale sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique*. Texte final de la convention, 65p
- Owen P.R (1964)** Saltation of uniform grains in air. *Journal of Fluid Mechanics*, 20:225-242
- Oulehri T (1992)** *Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la région de Laâyoune*. Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris 6, 223 p
- Parteli E.J.R, Durán O, Herrmann H.J (2007)** Minimal size of a barchan dune. *Phys Rev E*, 75:1–10
- Pearce K.I, Walker I.J (2005)** Frequency and magnitude biases in the Fryberger’s model, with implications for characterizing geomorphically effective winds. *Geomorphology* 68:39–55

- Perret R (1935)** Le climat du Sahara. In: *Annales de Géographie*. 248:162–186
- Powers M.C (1953)** A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research* 23(2):117–119
- Pye K, Tsoar H (2009)** *Aeolian sand and sand dunes*. Germany: Springer–Verlag, Berlin Heidelberg, 475p
- Rognon P (1998)** Aeolian sand dynamics and protection against sand drift and moving dunes. Proceedings of the international symposium: new technologies to combat desertification, Tehran, Iran, pp 104-110
- Sarre R.D (1987)** Aeolian sand transport. *Progress in Physical Geography*, 11: 157-181
- Sebaa A, Berroussi S, Bouhanna M, Boulghobra N, Hadri T, Koull N, Kherraz M.H, Benzaoui T (2015)** Guide des techniques de lutte contre l'ensablement au Sahara Algérien. (Ed.) Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides, Biskra, Algeria, 84p
- Soltner D (2005)** Les bases de la production végétale. Tome 1, le sol et son amélioration, édition 24, Paris, 472p
- Sparavigna A.C (2013)** A study of moving sand dunes by means of satellite images. *International Journal of Sciences* 2:33–42
- Thomas D.S.G (1987)** Discrimination of depositional environnements using sedimentary characteristics in the Mega Kalahari, Central southern Africa. *Desert Sediments: Ancien and modém*. Geological Society Spécial Publication 35:293–306
- Tricart J, Mainguet M (1965)** Caractéristiques granulométriques de quelques sables éoliens du Désert péruvien: Aspect de la Dynamique des barkhanes. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 15 (7–9):110–121
- Tsoar H (1985)** Profile analysis of sand dunes and their steady state significance. *Geogr. Ann.* 67A:47–59

Tsoar H (1986) Two-dimensional analysis of dune profile and the effect of grain size on sand dune morphology. In: El-Baz F and Hassan MHA (Ed.), *Physics of Desertification*, Martinus Nyjhoff, Dordrecht, pp 94–108

Tsoar H (2001) Types of aeolian sand dunes and their formation. *Geomorphological Fluid Mechanics*, 582:403–429

Verger F (1963) Les techniques d'analyse granulométriques. Centre Doc. Cart. Géogr. C.N.R.S., Mém. Doc., Paris, t.9, fasc. C, 64p

Verlaque C (1958) Les dunes d'In-Salah. Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes. Alger. 17:13–58

Wang X, Dong Z, Zhang J, Qu J, Zhao A (2003) Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology* 161:1–14

Warren A, Knott P (1979) Desert dunes: a short review of needs in desert dune research and a recent study of micrometeorological dune-initiation mechanisms. In: Brookfield ME and Ahlbrandt TS (Ed.) *Eolian sediments and processes*. Elsevier Science, 671p

Wasson R.J, Hyde R (1983) Factors determining desert dune type. *Nature* 304:337–339

Watson A (1986) Grain-size variations on a longitudinal dune and a barchan dune. *Sedimentary Geology* 46:49–66

Wentworth C.K (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geology* 30:377–392

Wiggs G.F.S (1992) Sand Dune Dynamics: Field Experimentation, Mathematical Modelling and Wind Tunnel Testing. PhD Thesis, University of London

Zhang Z, Dong Z, Li C (2015) Wind regime and sand transport in China's Badain Jaran Desert. *Aeolian Research* 17:1–13

Zingg A.W (1953) Wind tunnel studies of movement of sedimentary material.
Proceedings of 5th Hydraulic Conference Bulletin, 34:111-134

LISTE DES FIGURES

1	Localisation des grands systèmes dunaires en Algérie, modifiée après INSID (2011)	3
2	Carte de géo-localisation de la région d'étude. (A) Situation de la plaine du Tidikelt en Algérie, (B) Localisation de la région d'étude vis-à-vis le plateau de Tademaït et la plaine du Tidikelt, basée sur la composition colorée des bandes RGB : 541 du capteur Thématique Mapper de Landsat daté 2011 (www.usgs.gov), (C) Région d'étude montrant le système dunaire de l'Erg Sidi Moussa, basée sur la composition colorée des bandes 652 de l'image satellitaire Landsat 8 OLI datée 2016	7
3	Traits topographiques de la région d'In-Salah. (A) Extrait de la carte topographique In-Salah à (1/250.000) feuille NG 31-2, série P502, éditée par le service cartographique de l'armée des états unis d'Amérique, 1953. (B) Model numérique d'élévation SRTM de Aster (résolution spatiale 90m), montrant les classes d'altitude (en mètre) et profils topographiques	8
4	Carte géologique de la région d'In-Salah à une échelle de 1/500.000, digitalisée après Follot (1951). Centre de Recherches Sahariennes. Système de projection Transverse Universelle de Mercator, zone 31	12
5	Butte-témoin de l'action de l'érosion hydrique dans le continental intercalaire des rebords sud du plateau de Tademaït	12
6	Quelques formations géomorphologiques dans la région d'étude : A. dune barkhanique, B. reg en amont de l'Erg Sidi Moussa (surface de déflation)	16
7	A. Sol halomorphe près d'In-Salah, noter l'existence de la croute saline de couleur blanchâtre, engendrée par la cristallisation des sels suite à l'évaporation de l'eau en provenance de la remontée de la nappe ; B. Arbustes de Tamarix articulata près d'Igostène, In-Salah	16
8	Hauteur des précipitations annuelles en Afrique d'après A. Thévenet, A. Bernard et R. de Flotte de Roquevaire in Perret (1935). Légende : (1) Sup. à 4 m ; (2) 2-4 m ; (3) 1-2 m ; (4) 500 mm-1 m ; (5) 250-500 mm ; (6) 100-250 mm ; (7) 50-100 mm ; (8) 20-50 mm ; (9) Inf. à 20 mm	19
9	Températures moyennes annuelles et diagramme ombrothermique de Gausson et Bagnouls (1953) pour la région d'In-Salah (1988-2014)	19
10	Position d'In-Salah dans le climagramme de L. Emberger (1955)	21
11	Rose des vents montrant la variabilité en fréquentielle et directionnelle des classes de vitesse des vents, à la Station d'In-Salah aéroport pour l'année 2014. Notez la dominance des vents en provenance de l'est nord est (Boulghobra, 2016)	22
12	Allure probable des isobares (pressions moyennes réduites) et vents dominants au sol dans le Sahara, en mois de Janvier (Perret, 1935)	22
13	Allure probable des isobares (pressions moyennes réduites) et vents dominants	23

	au sol dans le Sahara, en mois de Juillet (Perret, 1935)	
14	Fréquences mensuelles des temps calmes et vents efficaces, et vitesse moyenne mensuelle dans la station d'In-Salah aéroport (2005 – 2014)	29
15	Fréquences directionnelles des vents pour la station d'In-Salah (2005 – 2014)	29
16	Principaux types de roses de déplacement potentiel des sables et régimes des vents selon Fryberger et Dean (1979) : A, Unimodal étroit ; B, Unimodal large ; C, Bimodal étroit ; D, Bimodal large ; E, Complexe (McKee, 1979)	35
17	Variations interannuelles des déplacements potentiels annuels pour la station d'In-Salah (2005–2014), notez que toutes les années ont une valeur de DP en dessus du seuil de forte énergie éolienne	37
18	De A à G, roses de déplacements potentiel des sables pour 7 mois de l'année, chaque vecteur représente le déplacement potentiel pour chacune des 16 directions vers le cercle au centre du diagramme, la longueur de la flèche rouge correspond à la valeur du module de la résultante RDP, tandis que sa direction indique la tendance de transport des sables. H, rose des sables annuelle pour l'ensemble de la période, le chiffre dans le cercle est un facteur de réduction par lequel, le DP de chaque direction est divisé pour simplifier le traçage du diagramme. Chacune des roses mensuelles et annuelles montrent la prédominance des vents venant de l'est-nord-est vers l'ouest-sud-ouest.	40
19	Modes de transport des particules de sable selon Bagnold (1941), modifiée après Lancaster (1995)	44
20	Principaux types de dunes selon McKee (1979) : A Séquence de développement de dune barkhanique simple ; B Séquence de développement de dune barkhanique simple dans l'Erg Sidi Moussa à In-Salah (Google Earth) ; C Dune linéaire simple ; D Dune pyramidale simple ; E Dunes composées de petites et grosses barkhanes (mégadune) ; F Dunes complexes à dunes linéaires avec dunes barkhaniques en interdunes, la flèche bleue indique la direction des vents dominants (McKee, 1979)	48
21	Effet d'un obstacle sur l'accumulation de sable au vent et sous le vent : A vue de côté et B vue en plan (Pye et Tsoar, 2009)	54
22	Types de dunes auto-accumulées en fonction de l'abondance des flux sableux et le régime du vent, après McKee (1979)	54
23	Imagerie à haute résolution (Google Earth) illustrant l'essentiel du modelé dunaire dans l'Erg Sidi Moussa. A Champs de crêtes barkhanoides et barkhanes associées, A1 Dune barkhanique asymétrique. B Barkhanes associées, B1 et B2 Petites dunes barkhaniques générées de grande barkhane. C Zone de barkhanes isolées, C1 et C2 correspondent à un bouclier et dièdre barkhanique respectivement. D Placage éolien lié à un obstacle topographique (rebords sud du plateau de Tademaït). E Accumulation liée à un obstacle artificiel (palmeraie ou palissage) près d'Igostène au nord-est d'In-Salah	57
24	Carte des sites de prélèvement des échantillons de sable pour analyses	61

sédimentologiques, superposés à une composition colorée des bandes 652 de l'image satellitaire Landsat datée 2016 (www.usgs.gov)

25	Dépouillement des résultats de l'analyse granulométrique au laboratoire	62
26	Courbes granulométriques et distributions des fréquences simples (FS) et fréquences cumulées (FC) des tailles de grains de sable de l'Erg Sidi Moussa	68
	Suite figure 26	69
27	A Variation du diamètre moyen des sables de l'Erg Sidi Moussa du nord est au sud ouest, noter la diminution de Mz autant que la distance de la source des sables augmente ; B, C et D Relation du diamètre moyen Mz avec l'indice de dispersion D_{FW} , l'indice d'asymétrie Sk_I et l'acuité K_G	74
28	A échantillon de sable (crête barkhanique) de diamètre 0.3 – 0.5 mm, B sédiment après attaque à l'acide chlorhydrique et lavage à l'eau distillée (non séché)	76
29	Echelle de rondeur des grains de quartz selon Powers (1953)	77
30	Photographies des grains de quartz prélevés des crêtes barkhaniques dans l'Erg Sidi Moussa observés au stéréoscope, noter la prédominance des grains émoussés à très émoussés luisants, indicateur de transport hydrique	79
31	Distribution spatiale et proportions des catégories morphoscopiques des grains de quartz dans l'Erg Sidi Moussa : Irrégulier (IR), Emoussé Luisant (EL) et Rond Mat (RM), noter la dominance des Emoussés Luisants	82
32	Variation des pourcentages des types de quartz de l'Erg Sidi Moussa du nord est au sud ouest, noter la diminution des Emoussés Luisants et l'augmentation des ronds Mats autant que la distance de transport éolien augmente	82
33	A Cartographie vectorielle montrant la source des sables et des systèmes dunaires de la plaine du Tidikelt, noter le sens d'écoulement hydrique en provenance de l'amont (plateau de Tademaït) vers l'aval (dépressions et sebkhas), ainsi le sens de transport éolien du nord est vers le sud oued par les vents efficaces de l'alizé continental, B Composition colorée des canaux 652 de l'image Landsat 8 datée 2016 (www.usgs.gov), dont les sables figurent en couleur jaunâtre ; noter l'existence des dépôts sableux résultant de l'érosion de la dalle siliceuse du plateau dans les lits d'oueds à écoulement intermittents	83
34	Régression de type puissance exprimant la relation entre l'indice d'aridité P/PE et l'indice de mobilité de dunes de Lancaster (1988) M, pour la station d'In-Salah (2005 – 2014)	89
35	A Image du satellite Digital Globe datée 2002 et associée aux points repères de format a(x1 ; y1). B Image du satellite Pleiades datée 2013 et associée aux points de format b(x2 ; y2). C et D Superposition des 2 images en appliquant une option de transparence au raster et en format vecteur, respectivement	92
36	Superposition des images satellitaires bi-date pour illustrer le mouvement des barkhanes de 2002 à 2013; les images de A à E sont des exemples choisis pour chaque parcelle pilote. Noter que les barkhanes se déplacent vers l'ouest-sud-	95

ouest et que les dunes de moindres tailles se déplacent plus rapidement

37	Classification morphométrique des barkhanes selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964)	98
38	Localisation des dunes barkhaniques sujettes à la classification morphométrique sur image Landsat OLI 2016 (www.usgs.gov)	98
39	Effet des caractéristiques morphométriques de dunes barkhaniques sur la vitesse de déplacement (2013–2016)	104
	Suite figure 39 ...	105
40	Relation de la vitesse de déplacement de 12 dunes barkhaniques avec leurs paramètres morphométriques : hauteur (A), largeur (B) et ratio a/c (C)	106
41	Impacts de l'accumulation des sables dans la ville d'In-Salah : (A) Ecole ensablée et abandonnée à Zaouïa. (B1) et (B2) met en évidence l'extension de l'habitat vers les zones à haut risque, les constructions installées après 2002 ont été conséquemment ensevelies sous les sables. (C) Maisons complètement ensablées. (D) Accumulation de sables sur l'oasis d'In-Salah au sud-ouest. (E) Ensablement de route près d'Igostène. (F) Ensablement de maison en cours de construction à Zaouïa, (photos par N. Boulghobra, 2013)	111
42	Evolution de l'espace bâti de l'agglomération d'In-Salah de 1972 à 2016, noter l'extension urbaine vers les zones à risque et le recul de la palmeraie vers le sud-ouest suite à l'avancée des accumulations sableuses en provenance du nord-est, cartes extraites des images satellitaires Landsat MSS (1972), TM (1990, 2011, 2016) et ETM+ (2005), source (www.usgs.gov)	112
43	(A) Palissade d'arrêt pour protéger les mise en valeur contre la pénétration des sables (El Oued), (B) Palissade d'arrêt pour la protection de palmier dattier (In-Salah), (C) Quadrillage à palmes sèches (In-Salah). Photos par N. Boulghobra	115
44	Comportement dynamique des filets d'air face à un obstacle (Mainguet et Remini, 2004)	118
45	Conception et disposition des Drâas selon Sebaa et al. (2015)	118
46	(A) Système de Drâas en cas de vent unidirectionnel, (B) Schéma de système de Drâas en cas de vent bidirectionnel, (C) Application d'un système de Drâas au niveau de la route reliant Touggourt et Djelfa, (D) Schéma de la mise en place du dispositif El-Methana, (E) Application du dispositif El-Methana au niveau de la RN. 16 (Touggourt – El-Oued)	119
47	(A) Schéma d'un Afreg d'arrêt selon Sebaa et al. (2015). (B) Photo d'un Afreg d'arrêt installé perpendiculairement au vent efficace (In-Ghar, ouest d'In-Salah). (C) Image Google Earth illustrant un Afreg de défilement à Zaouïa, nord d'In-Salah. (D) Schéma de succession d'Afregs selon Sebaa et al. (2015)	122

LISTE DES TABLEAUX

1	Types de climat en fonction de l'indice d'aridité de E. De. Martonne (1926)	20
2	Pourcentage des temps calmes, fréquences mensuelles d'occurrences (en %) des classes de vitesse du vent (en nœud), et vitesses moyennes mensuelles du vent à la station d'In-Salah aéroport (2005–2014)	27
3	Variabilité directionnelle des fréquences (%) des classes de vitesse (nœud) pour la station d'In-Salah aéroport (2005 – 2014)	28
4	Classification de l'énergie éolienne et régime du vent en fonction du déplacement potentiel et la variabilité directionnelle du vent, selon Fryberger et Dean (1979) et Lancaster (1995)	35
5	Récapitulatif – mensuel – des déplacements potentiels, modules de la résultante, angles d'orientation et indices de variabilité des vents pour la station d'In-Salah (2005–2014)	39
6	Récapitulatif annuel des ratios des vents efficaces W, déplacements potentiels DP, modules de la résultante RDP, et indices de variabilité directionnelle RDP/DP pour la station d'In-Salah (2005–2014)	39
7	Classification des dunes de sable en fonction du bilan sédimentaire selon Mainguet (1984)	50
8	Echelle interprétative des valeurs du diamètre moyen d'un ensemble sédimentaire	63
9	Echelle interprétative des valeurs de l'indice de dispersion (écart type) de Folk et Ward (1957) d'un ensemble sédimentaire	63
10	Échelle interprétative des valeurs de l'asymétrie d'un ensemble sédimentaire	64
11	Appréciation de la répartition d'un ensemble sédimentaire en fonction de l'acuité	65
12	Fréquences (en %) des classes granulométriques (en μm) des sables de l'Erg Sidi Moussa (crête barkhanique)	67
13	Récapitulatif des paramètres et indices granulométriques des sables de l'Erg Sidi Moussa (crête barkhanique), calculés selon Folk et Ward (1957)	67
14	Diamètre moyen et indice de dispersion des sables de crêtes barkhaniques de l'Erg Sidi Moussa, en comparaison avec d'autres dunes barkhaniques dans le Grand Sahara	74
15	Proportions spécifiques (en %) de types d'aspect des grains de quartz (crête barkhanique) dans l'Erg Sidi Moussa, In-Salah	78
16	Récapitulatif annuel des pluies, évapotranspirations, pourcentage vents efficaces, indices d'aridité et de mobilité des dunes de Lancaster (1988), pour la station d'In-Salah 2005 – 2014	89
17	Récapitulatif des distances de migrations des barkhanes D et angles de déplacement A, pour les cinq parcelles pilotes dans l'Erg Sidi Moussa, In-Salah	94

18	Forme de dunes barkhaniques et classification morphométrique selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964)	96
19	Récapitulatif des principaux caractéristiques morphométriques des barkhanes: hauteur H, longueur a, largeur c, forme de barkhanes, vitesse de migration V et angle de déplacement A	100
20	Vitesse de migration de dunes barkhaniques en fonction de la hauteur dans quelques régions sahariennes au monde	101
21	Essor démographique à In-Salah et ses agglomérations entre 1998 et 2008 (Office National des Statistiques, In-Salah)	110
22	Evolution des superficies de l'espace bâti et l'oasis d'In-Salah de 1972 à 2016 (superficies calculées à partir des images Landsat)	110

Résumé

Dans les régions arides et semi arides, l'ensablement constitue l'un des risques naturels les plus préoccupants. Dans cette recherche, des données climatiques et images satellitaires bi-date à haute résolution ont été utilisées pour évaluer le déplacement potentiel de sable et la migration des dunes barkhaniques dans l'Erg Sidi Moussa en amont d'In-Salah. L'application du modèle de Fryberger et Dean (1979) sur les données aérologiques (2005–2014) révèle qu'In-Salah est un environnement de haute énergie éolienne ($DP=785$ unités vectorielles) avec un maximum de transport en mois de mai, avril, juillet et août; le module de la résultante (560 UV) correspond à un taux important de sédiments transportés d'environ $40 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$. L'angle d'orientation de transport est de 64° , ce qui signifie que les sables se déplacent vers les secteurs ouest-sud-ouest. En présentant une faible variabilité directionnelle tout au long de l'année ($RDP/DP=0.71$), le régime éolien à In-Salah est considéré comme fort, unimodal et complètement associé aux dunes du type barkhanoïde. L'analyse granulométrique expose la prédominance des sables grossiers et assez bien triés, présentant une courbe de distribution monomodale vers les particules grossières, il a été aussi trouvé que le diamètre moyen diminue progressivement de la source de sable (nord-est) vers les secteurs sud-ouest. Par ailleurs, l'analyse morphoscopique met en évidence la prédominance des particules de quartz bien arrondies et sphériques, ceci conduit à supposer que ces sédiments ont été transportés par un écoulement hydrique continental avant d'être repris par l'Alizé continental vers les zones au sud-ouest. Les données climatiques de la station In-Salah ont été utilisées pour estimer la mobilité des barkhanes à par la formule de Lancaster (1988); les résultats révèlent que ces dunes pourraient être complètement actives. Outre, les images satellitaires à haute résolution (2002, 2013 et 2016) ont été utilisées pour mesurer avec précision le taux et la direction de migration des barkhanes. Les résultats ont montré que la vitesse de déplacement est d'environ 12 m/a durant la période 2002–2013 et de 14 m/a durant la période 2013–2016; pour les deux périodes, l'angle de déplacement du barchan était orienté vers l'ouest-sud-ouest, conformément à l'angle d'orientation estimé par la formule de Fryberger et Dean (1979). La caractérisation morphométrique des barkhanes selon Bourke et Goudie (2009) après Long et Sharp (1964) montre la dominance de dunes de la variété normale, où leurs taux de mouvement sont en général inversement proportionnels à leur hauteur et à leur largeur. Néanmoins, il a été observé qu'une

barkhane ronde ou grosse en cours de croissance pourrait se déplacer plus rapidement qu'une barkhane normale en état d'équilibre. Afin d'atténuer les dommages et renforcer la résilience de la population d'In-Salah, cette recherche propose l'application de quelques techniques traditionnelles, qui correspondent à des savoir-faire ancestraux dont l'efficacité est prouvée dans plusieurs régions sahariennes en Algérie.

Mots clés

Transport de sable – Migration de barkhane – Imagerie satellitaire – Ensablement –
Technique de protection – Erg Sidi Moussa – In-Salah

Abstract

Sand encroachment is among the most concerning natural risk affecting the arid and semi arid regions worldwide. In this research, climatic data and bi-date fine resolution imagery data have been used to assess the sand drift potential and barchan migration in the Erg Sidi Moussa dunefield. The application of the Fryberger and Dean's (1979) model on surface wind records revealed that In-Salah is high-energy wind environments (DP=785 Vector Unit) with strong May, April, July and August moving-sand periods; with a net drift potential RDP (560 VU) corresponding to an important rate of transported sediments of about $40 \text{ m}^3/\text{m}/\text{year}$. The resultant drift direction RDD for the decade 2005–2014 is about 64° , signifying that sand transport is directed toward the west-south-west sectors. By presenting a low directional variability and a constant steadiness throughout the year (RDP/DP=0.71), wind regime in the Erg Sidi Moussa dunefield could be considered as strong wide unimodal and fully associated with crescent-shaped sand dune type and subtypes. Grain size analysis show the predominance of coarse and moderately well sorted sand, with a unimodal distribution curve toward coarser particles, as well as the sand mean size decreases gradually from the sand source (north east) toward the south west sectors. Besides, the morphoscopic analysis highlights the predominance of well rounded and spherical quartz particles, this leads to suppose that sediments were transported by inland water before being transported again by the prevailing trade winds toward the south-west areas. Climatic data for the station In-Salah airport have been used to estimate the barchan mobility using the Lancaster (1988) formula; results revealed that the sand dunes could be fully active. Besides, fine resolution imagery (2002, 2013 and 2016) have been used to accurately measuring the barchan migration rate and direction, results showed that the barchan movement speed is about 12 m/y for the period 2002–2013 and 14 m/y for the period 2013–2016; during the both periods, barchan displacement angle was fully directed toward the west-south-west, in well accordance with the resultant drift direction. The morphometric characterization of barchan dunes according to Bourke and Goudie (2009) after Long and Sharp (1964) exhibits the dominance of the normal dune variety, where their movement rates are –in general– inversely proportional to their height and width. Nevertheless, it had been observed that a growing pudgy or fat barchan could migrate faster than a normal one in steady-state. This

study suggests the application of some effective, reliable and tested traditional techniques and ancestral know-how, which could mitigate sand encroachment risk and increase the population resilience.

Key words

Sand transport – Barchan migration – Satellite imagery – Sand encroachment –
Protection technique – Erg Sidi Moussa – In-Salah

يمثل تراكم الرمال المتحركة أحد أهم الأخطار الطبيعية التي تعاني منها المناطق الجافة و شبه الجافة. اهتم هذا البحث بتقييم خطر زحف الرمال و حركة الكثبان الرملية في العرق الرمي سيدي موسى بالقرب من عين صالح, و هذا باستعمال البيانات المناخية و صور الأقمار الفضائية عالية الدقة. إن تطبيق النموذج الرياضي العالمي (Fryberger et Dean 1979) على بيانات الرياح لمحطة عين صالح للفترة 2005-2014 بين أن عين صالح تتميز بطاقة ريحية عالية, حيث يقدر حجم الرواسب القابلة للنقل ب $40 \text{ م}^3/\text{م}^2/\text{سنة}$, مع تسجيل أعلى معدلات نقل الرمال خلال أشهر ماي, أفريل, جويلية و أوت. تنتقل الرمال حسب زاوية قدرها 64 درجة نحو الاتجاه غرب-جنوب-غرب تماشيا مع اتجاه الرياح السائدة و الفعالة خلال معظم أوقات السنة, مما أدى إلى سيادة نظام ريحي قوي, أحادي النمط و مترافق كليا مع كثبان رملية برخانية. يبين التحليل الحجمي للرواسب أن حبيبات الرمل في مجملها خشنة و ذات تصنيف جيد نسبيا, كما أنها تبدي توزيعا أحادي النمط باتجاه الأحجام الكبيرة من جهة, ومن جهة أخرى أظهرت الدراسة تناقص الحجم الحبيبي المتوسط ابتداء من مصدر الرمال في الشمال الشرقي للعرق باتجاه جنوبه الغربي. كذلك, أظهر تحليل المظهر الخارجي لحبات الرمل سيادة جزئيات الكوارتز دائرية الشكل لماعة المظهر, مما يرجح فرضية أن الرمال المكونة لعرق سيدي موسى تعرضت للنقل عن طريق مجاري مائية قبل تراكمها في المنخفضات جنوبا و إعادة نقلها عن طريق الرياح. إن تقييم القابلية الحركية للكثبان البرخانية باستعمال البيانات المناخية و اعتمادا على نموذج Lancaster (1988) بين أن هذه الكثبان ذات قابلية معتبرة للحركة كما أنها قد تكون نشطة بشكل كلي, هذه النتيجة أمكن تأكيدها باستعمال مرئيات فضائية عالية الدقة لسنوات 2002, 2013 و 2016 من أجل القياس الدقيق لسرعة و اتجاه حركتها, تبرز النتائج أن سرعة حركة الكثبان الرملية قدرها 12

م/سنة خلال الفترة 2002-2013 و 14 م/سنة خلال الفترة 2013-2016, و في كليهما كانت الحركة باتجاه غرب-جنوب-غرب بشكل متوافق مع زاوية نقل الرمال المقدرة حسب نموذج Fryberger et Dean (1979). بالإضافة الى ذلك, سمحت الدراسة المورفومترية للكثبان البرخانية بتصنيفها حسب معيار الشكل اعتمادا على طريقة (2009) Bourke et Goudie استنادا الى (1964) Long et Sharp, تبين النتائج سيادة الكثبان البرخانية العادية و أن سرعة حركتها متناسبة عكسيا مع عملي الارتفاع و العرض. رغم ذلك, فقد لوحظ أن كثبانا في طور التكون من نوعي Fat و Pudgy قد تتحرك بمعدلات أسرع من بعض الكثبان العادية في حالة توازن ديناميكي. على ضوء الدراسة الدقيقة لأسباب و خصائص خطر تراكم الرمال في منطقة عين صالح, و بغية التحكم في الخسائر الناجمة, يقترح هذا البحث تطبيق بعض التقنيات التقليدية و المهارات الموروثة محليا, و التي أثبتت نجاعتها في عدة مناطق من الصحراء الجزائرية.

الكلمات الدلالية

زحف الرمال – حركة الكثبان البرخانية – مرئيات فضائية – تراكم الرمال – تقنيات الحماية – عرق سيدي موسى – عين صالح