

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Chimie Industrielle

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie de l'Environnement

Thème

**ETUDE DE LA CONTRIBUTION DU VENT A LA
PROGRESSION DE L'ENSABLEMENT DANS LES HAUTS
PLATEAUX ALGERIENS**

Par

LOUASSA Samira

Devant le jury composé de

F. HANNANE
N. KASBADJI. MERZOUK
M. BOUGHEDAOU
M. AMIRAT
M. MERZOUK

Professeur, U.de Blida
Directeur de recherche, CDER, Alger
Maitre de conférences, U.de Blida
Maitre de conférences, U.S.T.H.B, Alger
Maitre de conférences, U. de Blida

Président
Examinatrice
Examineur
Examineur
Rapporteur

Blida, Juin 2010

RESUME

Les données vent relatives aux 5 stations météo de la région ouest des hauts plateaux algériens ont été traitées afin de déterminer les régimes de vent. Les paramètres de Weibull ont été déterminés globalement et par secteur. Les variations sectorielles des vitesses de vent ont été déterminées aux échelles du jour et de l'année. Les directions dominantes, au sens des vitesses pondérées, ont été dégagées pour chaque station. En considérant la vitesse seuil de déplacement des grains de sable, les fréquences cumulées des vents efficaces ont été estimées. Ainsi, les périodes (mois et heures) propices aux vents de sables ont été déterminées. Les données relevées durant les observations de vents de sables ont été traitées et utilisées pour la validation.

Les résultats montrent que la fréquence des vents calmes est prépondérante pour toutes les stations avec un maximum de 45% enregistré à Ain Sefra. Les directions dominantes annuelles sont Sud, Sud-Ouest à Naâma, EL Bayadh et Ain Sefra, Nord-est à Mécheria et Nord, Nord-est à El Kheither. Les directions dominantes des vents efficaces sont Sud à Naâma et El Bayadh, Sud-ouest à Ain Sefra et El Kheither et Nord-ouest à Mécheria. A l'exception de Mécheria, les fréquences maximales de vents actifs sont observées entre 15h et 18h. A Naama et El Kheither et Ain Sefra le printemps et l'été sont les saisons les plus ventées. Pour les autres stations les vents efficaces sont également observés en Automne.

ABSTRACT

The wind data for the 5 weather stations located in the western Algerian highlands have been processed to determine wind patterns. The Weibull parameters were determined overall and by sector. The sectorial variations of wind speeds were determined at daily and yearly scale. The dominant wind directions, in the weighted wind speed sense, have been identified for each station. Considering the wind speed threshold of moving sand particles, the cumulative frequencies of active winds were estimated. Thus, periods (months and hours) favourable to sandstorms have been determined. The data collected during observations sandstorms were processed and used for validation.

The results show that, the frequency of calm winds is predominant in all stations, with a maximum of 45% recorded at Ain Sefra station. The yearly prevailing wind directions are South to South-west in Naama, El Bayadh and Ain Sefra, North-east in Mecheria and North to North-east in El Kheither. The prevailing directions of active winds are South in Naama and El Bayadh, South-west to Ain Sefra and El Kheither and North-west in Mecheria. Except Mecheria, the maximum frequencies of active winds are observed between 15h and 18h. In Naama, El Kheither and Ain Sefra, spring and summer are the most windy seasons. For the other stations, the active wind speeds are observed in autumn.

ملخص

معطيات الرياح للخمس محطات الواقعة في الجهة الغربية للهضاب العليا الجزائرية قد تمت دراستها لتحديد أنماط الرياح. عوامل Weibull عامة والخاصة بتوزيع اتجاهات وسرعة الرياح قد تم تقييمهما. التغيرات في اتجاه و سرعة الرياح قد حددت على مستوى السنة واليوم. الاتجاهات السائدة للرياح باستعمال السرعة الموزونة استخرجت بالنسبة لكل محطة. بلنظر للسرعة الأدنى لتحرك الرمال قييمت النسب التراكمية للرياح الفعالة. الفترات الزمنية (ساعة و الشهر) الملائمة للعواصف الرملية قد حددت. المعطيات المسجلة خلال ملاحظة العواصف الرملية قد تمت دراستها واستعملت للمقارنة.

تشير النتائج أن الرياح الهادئة سائدة في كل المحطات ولكن النسبة القصوى والتي تقدر ب 45 % تم تسجيلها في عين الصفراء. الاتجاهات السائدة السنوية للرياح هي كالتالي جنوبية إلى جنوبية غربية في البيض، النعامة و عين الصفراء، شمالية شرقي في المشرية ، شمالية إلى شمالية شرقي في الخيثر. أما بالنسبة لاتجاهات الرياح الفعالة فهي كالتالي جنوبية في النعامة و البيض ، جنوبية غربية في عين الصفراء و الخيثر و شمالية غربية في المشرية. في ما عدا المشرية ، النسبة القصوى للرياح الفعالة قد سجلت بين الساعة 15 و 18. يعتبر فصلي الربيع والصيف من أكثر الفصول التي ترتفع فيها نسبة هبوب الرياح خاصة في منطقة النعامة ، الخيثر و عين الصفراء أما بالنسبة للمحطات الأخرى فان نسبة هبوب الرياح مرتفعة أيضا في الخريف.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail de mémoire a bénéficié de la contribution de nombreuses personnes que je souhaite remercier ici.

L'étude a été menée sous la direction de Monsieur **M. MERZOUK** Maitre de conférences à l'université de Blida, qu'il en soit vivement remercié pour son aide, ses nombreux conseils, et surtout pour sa patience et son soutien inconditionnel tout au long de ce mémoire. Ce fut un enchantement de travailler avec lui.

Je remercie Monsieur **F. HANNANE** Professeur à l'université de Blida, d'avoir bien voulu accepter la présidence du jury et cela malgré ses nombreuses occupations.

Je remercie particulièrement Madame **N. KASBADJI. MERZOUK** Directeur de recherche au CDER, pour sa précieuse aide et pour l'intérêt qu'elle a accordé à ce travail en acceptant de participer au jury du mémoire pour évaluer ce travail.

Je remercie également Monsieur **M. BOUGHEDAOU** Maitre de conférences à l'université de Blida, d'avoir bien voulu participer au jury du mémoire.

Je tiens à remercier également Monsieur **M. AMIRAT** Maitre de conférences à l'U.S.T.H.B, pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.

Je remercie Monsieur **S. OUZANE** et Monsieur **M. HOUARI** du Département chimie industriel pour leur inestimable contribution.

Je remercie B. LAOUN, en particulier, pour son aide à trouver certaines références bibliographiques, sans oublier mes amis Hassiba, Naima, Dalila, Rabiaa et Hamida.

TABLE DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	12
1. DESERTIFICATION ET ACTIVITES EOLIENNES	
1.1. Introduction.	14
1.2. Forme de dégradation des sols	14
1.3. Aridité	15
1.4. Facteurs climatiques	16
1.5. Causes anthropiques	16
1.6. Erosion éolienne	19
1.7. Processus de l'érosion	21
1.8. Facteurs de l'érosion éolienne	22
1.9. Paramètres influent sur l'érosion éolienne	28
1.10. Mécanismes de transport à l'échelle des mouvements globaux	32
1.11. Différents modes de transport à l'échelle des particules	33
1.12. Zones de transport éolien	35
1.13. Conclusion	40
2. POSITION DU PROBLEME	
2.1. Introduction	41
2.2. Considérations générales de la zone d'étude	41
2.3. Facteurs contribuent à la dégradation du milieu steppique	42
2.4. Etat des parcours	44
2.5. Présentation de la zone d'étude	45
2.6. Efforts de l'Algérie pour la lutte contre la désertification	51
2.7. Position du problème	53
2.8. Conclusion	54
3. CARACTERISATION EOLIENNE DE LA ZONE D'ETUDE	
3.1. Introduction	56
3.2. Vents Efficaces	56

3.3. Modèles d'ajustement	56
3.4. Caractérisation des stations	64
3.5. Conclusion	98
4. VENTS EFFICACES ET VENTS DE SABLE	
4.1. Introduction	100
4.2. Objectifs	100
4.3. Méthodologie	101
4.4. Résultats	101
4.5. Etude des vents de sable	104
4.6. Validation	111
4.7. Conclusion	112
CONCLUSION GENERALE	113
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS	116
REFERENCES	118
ANNEXE1 : METHODES DE LUTTE CONTRE L'EROSION EOLIENNE	
ANNEXE2 : PRESENTATION DES REGIMES DE VENT SOUS FORME DES ROSES DES VENTS	
ANNEXE3 : PARAMETRES DE WEIBULL POUR LES 5 STATIONS	
ANNEXE4 : PRESENTATION DES REGIMES DE VENT DE SABLE SOUS FORME DES ROSES DES VENTS	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Bilan des forces qui agissent sur un grain de sable de diamètre (D_p) avec (F_r) force résultante	21
Figure 1.2	Vitesse du vent en relation avec le flux en saltation	24
Figure 1.3	Fréquence d'observation des jours avec déflation en fonction de la vitesse du vent ($m\ s^{-1}$) à la station de Gouré en 1984	25
Figure 1.4	Vitesse seuil d'érosion en fonction de diamètre des particules	26
Figure 1.5	Effet de la végétation sur le transport des particules par le vent	29
Figure 1.6	Forces de cohésion dues à la présence d'eau autour des particules	30
Figure 1.7	Flux d'érosion en relation avec le contenu en humidité	31
Figure 1.8	L'humidité du sol en relation avec le flux de saltation	31
Figure 1.9	Mouvements des grains du sol sous l'effet du vent, en fonction de leur taille	34
Figure 1.10	Morphologie de la barkhane	38
Figure 2.1	Situation géographique de la zone des "hautes plaines occidentales algériennes"	42
Figure 2.2	Evolution des steppes d'alfa dans les Hautes Plaines du Sud-Oranais	44
Figure 2.3	Evolution de la pluviosité (1907-2003) dans le Sud Oranais (Méchéria et El Bayadh)	48
Figure 3.1	Histogrammes en fréquences de la distribution annuelle des vitesses du vent pour les 5 stations considérées	66
Figure 3.2	Histogrammes en fréquences des vitesses du vent durant une journée type pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama, Mécheria)	68
Figure 3.2	Histogrammes en fréquences des vitesses du vent durant une journée type pour les 2 stations (Ain Sefra et El Kheither)	69

Figure 3.3	Variation journalière de la vitesse moyenne pour les 5 stations	70
Figure 3.4	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Bayadh	71
Figure 3.5	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à El Bayadh	72
Figure 3.6	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à El Bayadh	72
Figure 3.7	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à El Bayadh	73
Figure 3.8	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à El Bayadh	74
Figure 3.9	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Nâama	75
Figure 3.10	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à Nâama	76
Figure 3.11	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à Nâama	76
Figure 3.12	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à Nâama.	77
Figure 3.13	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-est à Nâama	78
Figure 3.14	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Nâama	78
Figure 3.15	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Mécheria	79
Figure 3.16	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-est à Mécheria	80
Figure 3.17	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Ouest à Mécheria	80

Figure 3.18	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à Mécheria	81
Figure 3.19	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Mécheria	82
Figure 3.20	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Kheither	83
Figure 3.21	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-est à El Kheither	84
Figure 3.22	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à El Kheither	84
Figure 3.23	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Ouest à El Kheither.	85
Figure 3.24	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à El Kheither	86
Figure 3.25	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à El Kheither	86
Figure 3.26	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Ain Sefra.	87
Figure 3.27	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à Ain Sefra	88
Figure 3.28	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Ain Sefra.	89
Figure 3.29	Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à Ain Sefra.	89
Figure 3.30	Variation directionnelle et journalière de la vitesse moyenne pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama et Mécheria)	92
Figure 3.30	Variation directionnelle et journalière de la vitesse moyenne pour les 2 stations (El Kheither et Ain Sefra)	93
Figure 3.31	Variation saisonnière des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations	94
Figure 3.32	Variation mensuelle des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations	96

Figure 3.32	Variation mensuelle des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations (suite)	97
Figure 4.1	Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama et Mécheria)	102
Figure 4.1	Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 2 stations (El Kheither et Ain Sefra)	102
Figure 4.2	Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents de sable avec les vitesses moyennes correspondantes pour les 3 stations	105
Figure 4.3	Variation journalière de la vitesse moyenne des vents de sable	106
Figure 4.4	Variation saisonnière des distributions des vitesses de vent de sable enregistrées pour les 3 stations	107
Figure 4.5	Variations mensuelle des fréquences des vents de sable pour les 3 stations.	108
Figure 4.6	Variations mensuelle des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations	109
Figure 4.7	Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations	110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Classification de l'aridité	16
Tableau 1.2	Vitesse seuil d'érosion pour quelques pays	24
Tableau 1.3	Vitesse seuil et vitesse de friction seuil mesurées à 60 cm au dessus du sol	25
Tableau 1.4	Classes granulométriques selon Atterberg	27
Tableau 2.1	Variation des précipitations (mm/an) dans les trois stations de la zone d'étude	47
Tableau 3.1	Inventaire des données vent utilisées.	64
Tableau 3.2	paramètres vent calculées pour les 5 stations (toute direction confondues)	67
Tableau 3.3	Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station d'El Bayadh	94
Tableau 4.1	Inventaire des données vent utilisées	110

INTRODUCTION GENERALE

Selon l'atlas mondial [9] sur la désertification, environ 39 % de la surface terrestre sont recouverts de zones arides, semi-arides ou subhumides sèches. Si l'on y ajoute les zones hyperarides, presque la moitié de la surface terrestre totale, soit 47 %, est constituée de terres sèches. Cette vaste étendue abrite à peu près un cinquième de la population humaine mondiale et représente pour cette raison l'une des régions les plus importantes de la planète [9].

Les zones sèches subissent des dégradations globalement rassemblées sous le terme « désertification ». Selon les définitions clefs de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, le terme désertification désigne la 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 [2].

La désertification concerne donc un processus de dégradation des terres lié à des facteurs naturels exacerbés par l'action de l'homme.

Le vent est l'un des facteurs naturels déterminants dans le processus de dégradation des sols dans les zones arides. Le sol, la couverture végétale et l'action humaine sont des facteurs passifs qui interviennent dans le développement et l'accélération de l'érosion dans ces régions.

Le sol présente une résistance à l'influence du vent par l'intermédiaire des propriétés internes comme la cohésion qui existe entre les particules du sol, par la présence d'un taux d'humidité suffisant au maintien des grains au sol, et par la granulométrie de ces mêmes particules.

Le but de notre étude n'est pas de vérifier la contribution du vent au processus de désertification mais d'estimer l'importance de cette contribution par rapport aux autres facteurs de dégradation des sols.

L'étude est structurée en quatre chapitres : Le premier chapitre est une synthèse de la recherche bibliographique en rapport avec le sujet et en particulier la caractérisation éolienne et la contribution du vent au processus d'ensablement.

Le second chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude à savoir la partie ouest des hauts plateaux algériens et qui englobe les sites suivant : El Bayadh, El Kheither, Nâama, Mécheria et Ain Sefra, région fortement soumise à l'avancée du processus de l'ensablement.

Le troisième chapitre concerne la caractérisation éolienne de la région, en utilisant des données vent (vitesses et directions) trihoraires récentes fournie par l'ONM (Office National de la Météorologie) pour les 5 stations implémentées dans la zone et représentant plus de 10 années de mesures continues.

Les paramètres caractéristiques sont estimés par ajustement des données traitées au sens du maximum de vraisemblance en utilisant la distribution hybride de Weibull.

Le quatrième chapitre est consacré à l'estimation des fréquences directionnelles des vents efficaces et leur comparaison avec les données relatives aux mesures effectuées durant les périodes de vent de sable observées.

L'étude a porté sur la détermination des directions dominantes annuelles, la distribution journalière, saisonnière et mensuelle de la vitesse du vent, ainsi que la détermination des paramètres de Weibull (facteur de forme et facteur d'échelle) et des fréquences cumulées des vents efficaces horaires et directionnels.

En fin les méthodes les plus connues et les plus utilisées dans le domaine de lutte contre l'ensablement par différents pays du monde sont représentés en annexe trois.

CHAPITRE 1

DESERTIFICATIONS ET ACTIVITES EOLIENNES

1.1 Introduction

La désertification est une dégradation du milieu créée par certaines conditions réunies comme l'aridité, la sécheresse et la surexploitation. La dégradation des terres est la perte de certaines qualités propres, ou la diminution dans leur capacité à assurer des fonctions essentielles : biologiques, écologiques, économiques, voire sociales. Cette dégradation est liée à la détérioration des composantes ou de leurs liens fonctionnels [1].

La désertification se manifeste généralement par une baisse de la fertilité des sols, une érosion éolienne et hydrique, une réduction des réserves en eau, une disparition à long terme de la végétation naturelle, un encroûtement, remise en mouvement des dunes et des événements extrêmes [2 - 4].

Aujourd'hui, les terres arides de tous les continents sont dégradées par la surexploitation des sols, le surpâturage, le déboisement et les mauvaises pratiques en matière d'irrigation. Cette dégradation est généralement due aux pressions économiques et sociales, aux mécanismes du commerce international, aux lois nationales et à des coutumes inadéquates en matière de gestion des terres, à la sécheresse et au manque de connaissances. Cette dégradation conduit à une série de problématiques comme l'abandon complet de terres agricoles, qui mène à la crise alimentaire rencontrée bien souvent dans les régions arides, les régimes fonciers et la stabilité politique ainsi que d'autres questions environnementales, telles que les changements climatiques, la diminution de la biodiversité et les ressources en eau douce [5].

1.2 Forme de dégradation des sols

La désertification se manifeste généralement par la dégradation des sols. Cette dégradation revêt différentes formes. Elle peut être physique, chimique ou biologique.

1.2.1 Dégradation physique

Ce type de dégradation est du essentiellement à l'érosion éolienne et hydrique qui provoque des pertes quantitatives et qualitative des matériaux qui compose le sol et qui sont préjudicieuses à sa productivité. Une autre forme de dégradation physique est la compaction des sols c'est-à-dire la diminution de la porosité qui réduit l'infiltration et accélère les ruissèlements, elle affecte aussi la colonisation du sol par les racines des plantes, réduisant leur résistance au ruissèlement et leur capacité d'extraction d'élément minéraux nécessaires à leur croissance. La compaction affecte surtout les sols limoneux et les sols argileux. Ce type de dégradation est du essentiellement au surpâturage et à l'intensification de la culture mécanisée [6].

1.2.2 Dégradation chimique

Cette dégradation est caractérisée par une chute de fertilité due à une carence en élément nutritifs comme le phosphore, le potassium et le calcium avec une faible teneur en matière organique qui est due à la diminution des particules fines par l'érosion éolienne du fait que la plus grande part de la matière organique est combinée avec les particules fines transportées par le vent. Elle est également due à la mise en culture des sols. L'utilisation massive d'engrais minéraux peut entraîner aussi un appauvrissement des sols en bases (acidification), et en matières organiques. Cette dégradation entraîne une diminution en productivité et une croissance en défrichement [3 - 7].

1.2.3 Dégradation biologique

Celle-ci se manifeste essentiellement par la baisse du taux de matière organique qui maintient la fertilité du sol et donne une certaine résistance au sol vis-à-vis de la dégradation physique. Elle participe aussi à la capacité d'échange, cationique c'est-à-dire sa capacité de fixer des nutriments, elle limite l'acidification du sol, alimente la microfaune et par sa minéralisation, fournit des éléments fertilisants aux cultures [6].

1.3 Aridité

L'aridité est le facteur commun entre les zones arides, semi-arides et subhumides sèches. L'aridité est caractérisée par des précipitations annuelles

faibles, et très irrégulières dans le temps et dans l'espace et notablement inférieures à l'évaporation potentielle annuelle. En zone aride, il pourrait s'évaporer 10 à 20 fois plus d'eau qu'il n'en tombe chaque année, des indices ont été définis pour classer les zones climatiques en fonction de leur degré d'aridité (tableau 1.1). L'indice d'aridité (I_a) est le rapport entre la moyenne des précipitations annuelles (MP) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) ($I_a = MP/ETP$) [1,8].

Tableau 1.1 : Classification de l'aridité [8].

Zone	Indice d'aridité I_a	Pluviométrie (mm/an)
Sub-humide sèche	0.5 – 0.65	/
Semi-aride	0.2 – 0.5	200 – 500
Aride	0.05 – 0.2	50 – 200
Hyper-aride	< 0.02	0 – 50

1.4 Facteurs climatiques

1.4.1 Sécheresse

La sécheresse, est un facteur temporaire causé par les fluctuations du climat. Les activités des zones touchées par la sécheresse sont toujours influencées, au moins partiellement, par la diminution de la disponibilité en eau. Il y a toujours un lien entre l'eau et la désertification. L'eau, qu'elle provienne de la pluie ou d'autres sources, apporte au sol l'humidité nécessaire à la croissance de la couverture végétale. Toute dégradation de la couverture végétale est presque toujours accompagnée par un ensablement des zones voisines, des infrastructures, des terres de cultures, et parfois des villes qui accélère le processus de désertification [9, 10].

1.5 Causes anthropiques

L'accroissement de la croissance démographique dans les zones arides et les besoins des hommes, notamment liés à la nourriture et à l'habitat, sont susceptibles de croître continuellement. Afin de les satisfaire, les hommes

élargissent leur occupation des sols, prélèvent de plus en plus de ressources et développent les cultures et l'élevage [1,3].

1.5.1 Surpâturage

Le surpâturage par le bétail est peut-être parmi les plus importantes activités humaines qui dégradent les prairies. Par l'accroissement du nombre de troupeaux et/ou de la durée de présence du troupeau dans une parcelle. En relation avec l'accroissement démographique de la population humaine et les conséquences de la sédentarisation. La charge animale entraîne le surpâturage, donc la dégradation des parcours [1].

Le surpâturage entraîne également une modification de la couverture végétale. Il y a diminution de la production végétale consommable, parfois raréfaction du nombre des espèces présentant un intérêt pastoral et, éventuellement, une extension des espèces inalliables (non appréciées du bétail). Le surpâturage présente le grave inconvénient, s'il est pratiqué au moment de la pousse des espèces annuelles, empêcher ses espèces d'achever leur cycle, de produire des graines et donc de renouveler le stock de graines de ces parcours [11].

Les effets du surpâturage sur les communautés végétales et les sols sont considérés comme destructrices. Il réduit la canopée et expose le sol à l'action directe des vents et des pluies, provoque la perte du carbone organique et l'azote, l'épuisement des propriétés biologiques du sol, la destruction de la structure de la couche arable et la compaction du sol par suite de piétinement. En retour, ces processus augmentent l'encroûtement, réduisent l'infiltration et diminuent la rugosité de la surface [12 - 16].

La continuité du surpâturage crée des conditions favorables à l'érosion éolienne et par conséquent mène à la désertification. Le surpâturage augmente l'albédo, par suite de dégradation de la végétation. N'importe quel changement d'albédo peut provoquer des influences significatives sur la température et l'humidité du sol.

Les déchets des animaux peuvent être le facteur primaire qui a favorisé les niveaux élevés du Phosphore. La végétation pérenne originale de la steppe est remplacée par des espèces annuelles qui avec le temps finissent par disparaître [11, 17].

1.5.2 Mise en culture

L'accroissement de la population et des besoins de plus en plus importants entraîne une extension des zones de mise en culture sur des sols peu propices à l'agriculture avec une capacité de réserve en eau faible, ce qui est un lourd handicap pour des régions où les précipitations sont très insuffisantes pour assurer la croissance des plantes d'une part et d'autre part à des zones qui sont traditionnellement réservées à d'autres activités [18, 19].

Les pratiques culturales inadaptées entraînent souvent l'érosion du sol notamment par les labours dans le sens de la pente. En effet, les sillons tracés constituent des canaux privilégiés dans lesquels la rapidité d'écoulement des eaux génère une érosion intense. D'autres pratiques culturales sont également à l'origine de l'érosion des sols tels que la jachère cultivée et l'introduction de la charrue à disques [18].

Le labourage a un effet considérable sur le placement et la distribution des résidus de récolte. En conséquence, les différentes opérations de labourage exposent le sol à l'action directe du vent pendant de longues périodes [20]. Les opérations de labourage répétées et l'utilisation d'engins mécaniques peuvent affecter la fraction érodable directement par la destruction des agrégats bruts et leur transformation en agrégats plus petits et facilement transportés par le vent [21].

L'intensification des cultures pourrait engendrer une baisse de fertilité des sols si aucune mesure d'amendement et de restitution de la fertilité des sols n'est prise en considération dans le système culturale. En effet, pour les cultures irriguées la salinisation est d'autant plus rapide et importante que l'eau d'irrigation est chargée en sels, que l'évapotranspiration est forte, que les sols sont lourds (texture argileuse) et que la nappe phréatique est proche de la surface, soit à cause d'un mauvais drainage, soit à cause d'une remontée induite par la sur-irrigation.

La salinisation se traduit par une dégradation de la qualité des sols, une difficulté d'absorption d'eau par les cultures et par conséquent, une diminution de la productivité des terres irriguées [22].

1.6 Erosion éolienne

L'érosion éolienne est un processus important de dégradation des sols dans les régions arides et semi-arides. Elle a des effets négatifs non seulement sur les propriétés du sol mais également sur l'environnement, et la santé humaine [23].

L'érosion éolienne est un processus qui affecte les caractéristiques extérieures et le potentiel biologique des sols par la perte des particules fines qui sont riches en matériaux tels que l'azote, le phosphore, et la matière organique [24].

Les pertes des particules fines peuvent avoir comme conséquence un déclin apparent dans la qualité du sol et mener à la destruction partielle ou totale de la productivité de sol en augmentant la densité en bloc, la porosité et la capacité de rétention en eau, la destruction de la structure du sol et la stabilité des agrégats, ainsi que le stockage et la disponibilité des éléments [7, 25].

Au niveau des plantes la déflation peut diminuer l'épaisseur de la surface et mettre les racines des plantes à nu ce qui provoque la mortalité de la plante. Le dépôt peut avoir comme conséquence l'enterrement de la végétation, et s'il se produit à un taux plus grand que le taux de croissance verticale d'une plante, peut avoir comme conséquence sa mortalité. Quand les grains de sable en saltation frappent une plante, l'excès d'énergie cause des dommages physiques, ces grains peuvent abîmer les feuilles ou les arracher.

Si ces dommages physiques n'ont pas directement comme conséquence la mortalité de la plante, ils peuvent ralentir sa croissance.

Au niveau des croûtes l'excès de l'énergie cinétique des particules en saltation peut aussi provoquer la destruction des croûtes fragiles et exposer le sol à une érosion plus importante [26].

Le déplacement des particules est contrôlé par plusieurs facteurs :

- les conditions météorologiques quotidiennes et saisonnières, y compris des vents turbulents capables de déplacer les particules du sol, les précipitations, l'évaporation, l'humidité et la température,
- la rugosité de la surface qui dépend de la présence des roches, des irrégularités topographiques, la végétation et les croûtes [25, 27],
- les caractéristiques statiques comme la taille et la forme des particules et leur distribution ainsi que les caractéristiques dynamiques comme la taille,

- des agrégats et leur distribution. Et le contenu en sel et en matière organique,
- Les pratiques du sol comme le labour, le reboisement et les pratiques d'irrigation [28].

Le processus éolien se produit à de multiples échelles :

- A petite échelle le vent peut transporter les particules à partir de l'espace entre les plantes et les déposer à proximité d'autres plantes,
- A l'échelle locale le vent peut transporter des particules d'un terrain à un autre terrain adjacent et transporter les fines particules sur de longues distances,
- A l'échelle régionale le vent est un processus géomorphologique important,
- À l'échelle globale, la poussière émise dans une région du monde peut traverser de très longues distances et se déposer dans une autre région du monde.

Le processus éolien ne peut avoir lieu que si l'érosivité du vent est supérieure à l'érodibilité de la surface.

L'érosivité du vent est typiquement définie comme étant la contrainte de cisaillement exercée par le vent sur la surface du sol, elle est directement proportionnelle au taux d'augmentation de la vitesse de friction du vent dans les conditions de neutralité thermique, soit :

$$\tau = \rho u^2$$

Avec ρ la densité de l'air et τ la contrainte de cisaillement

L'érodibilité de la surface est typiquement liée à la vitesse friction seuil, vitesse au-dessous de laquelle le flux de saltation ne se produira pas. Cette vitesse dépend du sol et de la végétation. Pour les sols, elle est en grande partie déterminée par la texture telle que les particules dont le diamètre est compris entre 80-120 μm sont les plus facilement transportables avec la vitesse friction seuil la plus faible, de la quantité de protection fournie par la présence de croûtes non érodables et de l'humidité de la surface [26].

1.7 Processus de l'érosion

L'air est un fluide caractérisé par une faible densité comparé avec d'autres fluides. Cependant cette densité limite la taille des particules que l'air peut transporter. La viscosité moléculaire est la capacité d'un fluide de résister à la déformation. Tous les fluides montrent le comportement visqueux en se déformant sous l'effort. Cependant, le point auquel un fluide est déformé par une force donnée varie avec le fluide considéré. Puisque l'eau est plus visqueuse que l'air, il se déplace moins facilement, mais une fois qu'elle se met en mouvement elle peut porter plus de particules que le vent en se déplaçant à la même vitesse donc la viscosité d'un fluide détermine sa capacité de charge.

L'érosion est la perte de matériel du sol (particules, aliments et matière organique) à un certain endroit, un ensemble de processus se produit avant que l'érosion puisse être établie. D'abord, le matériel doit être détaché ou délogé [29]. Le flux d'air exerce une contrainte de cisaillement (τ) qui tend à arracher les grains du sol. Le mouvement des particules ne se produit que lorsque la force du vent exercé sur les grains du sol devient supérieure aux forces qui les maintiennent au sol. L'entraînement des particules dans un flux de fluide est contrôlé par la force de gravité qui les tire de nouveau vers la surface et donc à leur poids, (P). Chaque particule a sa propre vitesse de déplacement, cette vitesse dépend de la taille, de la forme et de la densité des particules, de la viscosité et la densité du fluide, des forces de cohésion inter particulaires (I_p), et des forces capillaires (F_c) [29 - 31].

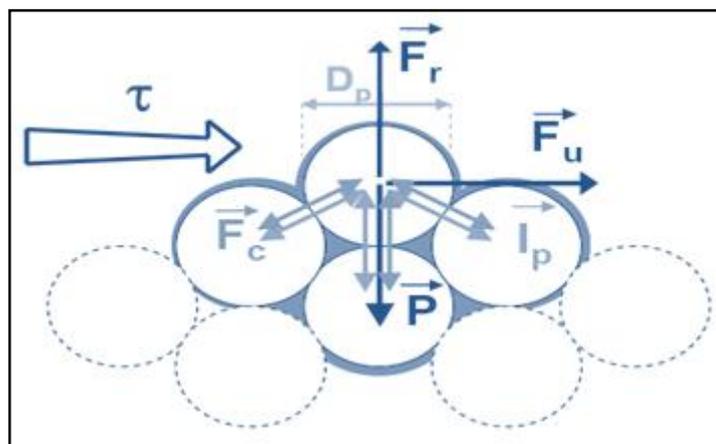


Figure 1.1: Bilan des forces qui agissent sur un grain de sable de diamètre (D_p) avec (F_r) force résultante [30].

La vitesse et la turbulence du fluide peuvent maintenir des particules entraînées, mais une fois que la vitesse diminue, en raison de la rugosité accrue de terrain, la capacité de transport diminue et le dépôt des grosses particules commence. Si la vitesse diminue encore les particules plus fines seront également déposées [29].

1.8 Facteurs de l'érosion éolienne

Les principaux facteurs de l'érosion éolienne sont le vent et le sol.

1.8.1 Le Vent

Les différences de température dans l'horizontale engendrent des différences de pression. Ce sont ces variations horizontales dans la pression qui font que les vents soufflent : l'atmosphère cherche à équilibrer la pression en déplaçant de l'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Plus la différence de pression est grande, plus les vents sont forts et plus qu'on s'élève dans les latitudes, plus la force de Coriolis diminue et plus la force du gradient de pression sera faible et plus le vent sera faible. Aussi sauf indication contraire, seule sa composante horizontale est considérée [32 - 34].

Le vent est caractérisé par une vitesse et une direction, quand on parle de la direction du vent, on parle toujours de la direction à partir de laquelle il souffle. Quant à sa vitesse, c'est une moyenne de son régime stable établie sur une période donnée et elle est exprimée en m/s, km/h ou en nœuds. En altitude, le vent a tendance à souffler de façon assez uniforme et ne change pas de direction ou de vitesse. Près de la surface, cependant, le vent subit l'influence du frottement et de la topographie. Le frottement ralentit le vent au-dessus des surfaces rugueuses alors que la topographie, le plus souvent, produit des changements localisés dans la direction et la vitesse [33, 34].

Le vent possède une nature turbulente. Il existe trois types de turbulence: thermique, mécanique et de cisaillement. Les turbulences thermiques surviennent lorsque le sol reçoit un maximum d'énergie du soleil, l'air au voisinage du sol est réchauffé et c'est là que peut débuter un mouvement ascendant de l'air. Il se forme alors des cellules convectives. Les turbulences mécaniques surviennent au fil des irrégularités du sol. Les turbulences de cisaillement sont dues pour leur part à une différence de direction du vent à des altitudes différentes. Le point de friction

entre deux couches d'air se déplaçant dans des directions différentes provoque une sorte de friction qui engendre la turbulence [33].

1.8.1.1 Régimes éoliens

Selon le changement de la direction du vent les régimes du vent change comme suit :

- a) les vents en conjonction : ce régime est appelé unimodal est correspond à une direction dominante; un régime est unimodal serrés lorsque les vents sont situés dans une fourchette étroite et unimodal dispersé lorsque la fourchette est large, c'est le régime des alizés. Un régime monodirectionnel peut comporter des vents de diverses directions mais seule une direction possède des vents efficaces c'est à dire ayant la capacité de prendre en charge des particules. Pour des sables éoliens typiques la vitesse de prise en charge se situe entre 3,5 et 4 m/s.
- b) les vents en opposition : correspond à un régime de deux directions dominantes faisant entre elles un angle de 180°C : le chergui et le sahéli du Maroc méridional, l'alizé et le sirocco des sud algérien et tunisien, la mousson et l'alizé du Sahel.
- c) les vents incidents : ce sont les vents de régime bidirectionnels ou localement les régimes monodirectionnels subdivisés par les obstacles topographiques; multidirectionnels : ce sont des régimes complexes qui comportent au moins trois directions dominantes [35].

1.8.1.2 Vitesse seuil d'érosion :

La vitesse seuil est un paramètre très important dans la prévision de l'érosion éolienne, elle est définit comme étant la vitesse minimale exigée pour lancer la déflation des particules du sol. Le maintien des grains au sol est du a la taille et la densité des particules, à l'humidité de la surface qui contribue fortement, par l'adhésion et les forces capillaires qui contribuent à garder les particules ensemble [36, 37].

1.8.1.3 Vitesse seuil d'érosion pour quelque pays

On considérera comme vent efficace un vent dont la vitesse est susceptible de déplacer des grains de sable. Naturellement la vitesse efficace dépend de la

granulométrie, de la densité des grains de sable et de la hauteur par rapport au sol et peut être variable d'une région à une autre. Voici quelques exemples des vitesses seuil d'érosion déterminée par quelques pays. Ainsi on constate que la vitesse seuil varie de 4 à 12 m/s, elle augmente à chaque fois que la hauteur par rapport au sol augmente et la granulométrie des particules diminue.

Tableau 1.2 : Vitesse seuil d'érosion pour quelques pays

pays	Granulométrie du sol (mm)	Hauteur par rapport au sol (m)	Vitesse seuil d'érosion (m/s)
Mongolie intérieure (Chine). [38]	sable grossier (0,2-2 mm) sable fin (0.02-0.2 mm)	2 m	4 m/s
nord de la chine. [39]	-	11 m	5.8 - 6.2 m/s
sud marocain. [40]	-	-	4.5 m/s
Nord du bassin de Quito. [41]	Sable (0,05 et 0,2 mm)	-	4 à 7 m/s
Tunisie. [42]	argile et matière organique (d= 0,1 mm) particules fine (0,0003 - 0,0005 mm)	0,01 m du sol	4.9 m/s 8,2 m/s

- Au Tibet, pour des grains de sable de diamètre $d=0.232$ mm la vitesse seuil d'érosion à 1m au dessus de sol est de 4.35 m/s [43].

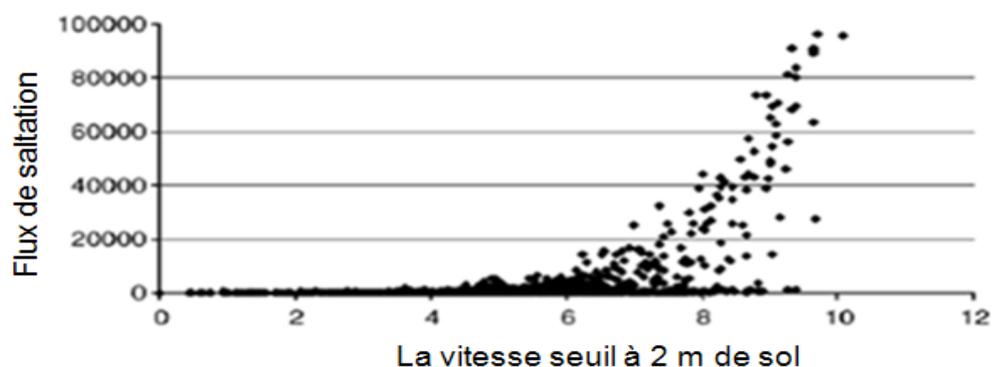


Figure 1.2 : Vitesse du vent en relation avec le flux en saltation [43].

Tableau 1.3 : Vitesse seuil et vitesse de friction seuil mesurées à 60 cm au dessus du sol désert de Shapotou en chine [44].

d (mm)	0.8-1	0.63-0.8	0.56-0.63	0.5-0.56	0.4-0.5	0.25-0.4	0.2-0.25	0.15-0.20	0.1-0.15
U_{τ} (m/s)	0.51	0.50	0.49	0.47	0.45	0.41	0.39	0.31	0.27
U_t (m/s)	12.15	11.35	9.90	9.60	8.21	7.59	7.11	5.56	4.73

- En 1984, dans la région de Gouré, au Niger oriental, le vent initialise l'érosion dès 6 m/s et plus de 5% des vents ≥ 7 m/s mettent des particules minérales en suspension. Ces résultats sont en parfait accord avec les résultats de Ozer (2000) obtenus à la station 'voisine' de Zinder pour la période 1987 à 1997 [45].

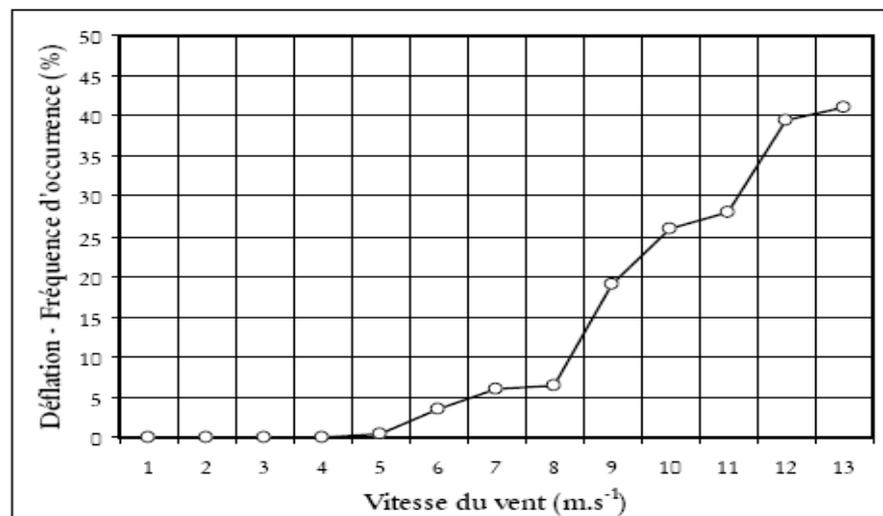


Figure 1.3 : Fréquence d'observation des jours avec déflation en fonction de la vitesse du vent (m/s) à la station de Gouré en 1984 [45].

- Les résultats présentés dans la figure ci-dessous sont réalisés avec une surface de sol plane et homogène lorsque la surface est irrégulière la vitesse seuil pour la mise en mouvement des particules peuvent être sensiblement abaissée, la vitesse est fonction uniquement de la granulométrie du sol. Les autres facteurs ne sont pas pris en considération [46].

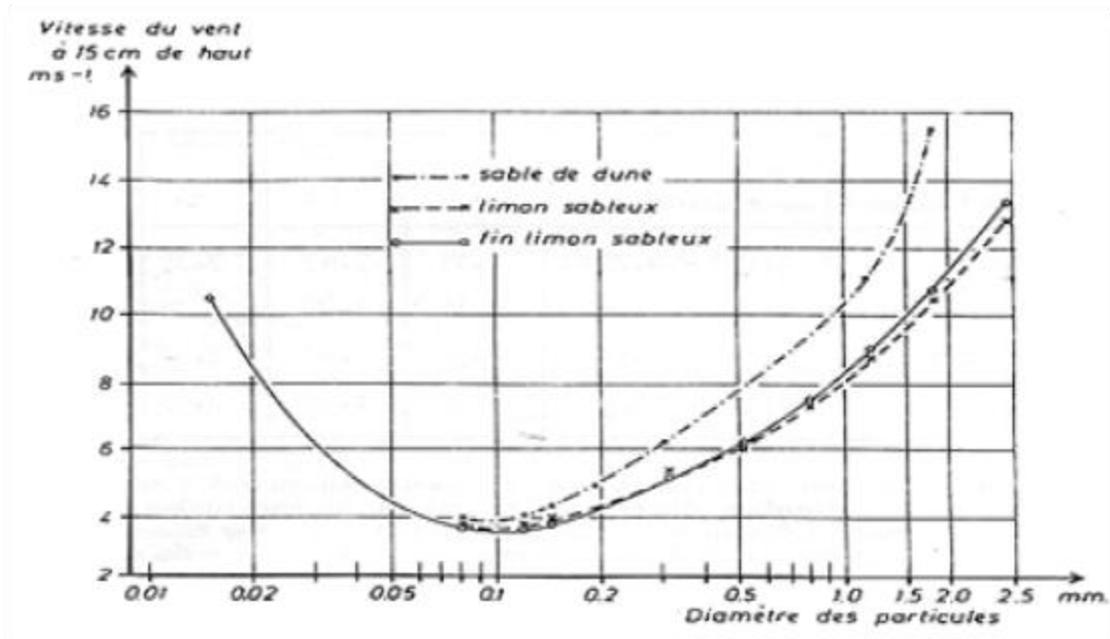


Figure 1.4 : Vitesse seuil d'érosion en fonction de diamètre des particules [46].

1.8.2 Le sol

Le sol est un facteur très important dans l'érosion éolienne, La susceptibilité des sols à l'érosion par le vent dépend en grande partie des agrégats qui composent le sol ceci en fonction de leur taille et de leur distribution et leur composition [20].

1.8.2.1 Granulométries du sol

La composition granulométrique est employée dans la classification du sol et l'estimation de sa structure, de son érodibilité et de sa perméabilité à l'eau et de leurs propriétés biologiques, chimiques et physiques. Elle est aussi utilisée comme un indicateur très utile de l'érosion éolienne et l'ampleur de la désertification par une diminution considérable des particules très fines et une augmentation de la fraction des particules grosses [47].

La texture du sol ou la composition du sol (matière organique, argile, carbonate...etc.) n'a aucun effet sur l'énergie des liaisons interparticulaires mais a un effet indirecte sur la susceptibilité du sol à l'érosion éolienne. En effet leur combinaison avec d'autres facteurs (exp l'humidité) contrôle des propriétés importantes du sol comme l'encroustement, la taille des agrégats et leur formation. Et par conséquent détermine l'intensité de la saltation et le sandblasting [48 - 50].

Le sable se compose dans la plupart du temps de quartz qui a une densité de 2650 kg/m^3 soit 2000 fois plus que la densité l'air. Le diamètre des grains passe de 0,05 mm (sable très fin) à 2 mm (sable très grossiers) [51].

D'après l'endroit et la distance parcourus le sable peut être classé en sable allochtone ou sable autochtone

- Le sable allochtone

Le sable est dit allochtone quand il provient des terres lointaines en parcourant de longues distances. Ce transport porte exclusivement sur les particules dont le diamètre est inférieur à 0,05 mm. Le sable local est plus grossier.

- Le sable autochtone

Le sable est dit autochtone quand il vient des terres locales en parcourant de courtes distances. Le sable d'origine locale peut provenir :

- de la décomposition et l'abrasion des roches gréseuses et des sédiments du sol
- de la désagrégation des sols alluviaux après la disparition du couvert végétal
- des limons charriés par les oueds durant la saison humide et accumulés dans les bassins versants de ces cours d'eau. Après assèchement durant la saison sèche ils sont transportés par le vent. Le sable autochtone a une couleur brunâtre assez foncée tandis que celui d'origine allochtone est plus clair, jaunâtre [52].

Le tableau 1.3 représente la répartition des dimensions des grains établie par Atterberg.

Tableau 1.4 : Classes granulométriques selon Atterberg [53].

Diamètre des particules (mm)	Nom
$X < 0,002$	Argile
$0,002 < X < 0,02$	Limon
$0,02 < X < 0,2$	Sable fin
$0,2 < X < 2$	Sable grossiers
$2 < X < 20$	Gravier

1.9 Paramètres influent sur l'érosion éolienne

L'intensité de l'érosion éolienne est contrôlée par plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

1.9.1 Hauteur de rugosité aérodynamique

La hauteur de rugosité aérodynamique est l'un des principaux paramètres qui contrôle l'érosion éolienne. Elle est définie comme étant la hauteur au-dessus de la surface pour laquelle la vitesse moyenne du vent s'annule la rugosité de la surface dépend de la présence d'éléments inertes comme les agrégats de grande diamètre qui sont difficilement transportables par le vent, les cailloux, la végétation permanente, la présence des roches et les irrégularités topographique, ou à la présence d'éléments qui peuvent varier au cours du temps, comme la strate herbacée en zone semi-aride.

La rugosité aérodynamique peut être reliée à des grandeurs caractéristiques de ces obstacles présents à la surface, et plus particulièrement à leur densité. Ce paramètre, représentant le rapport entre la surface frontale des obstacles et la surface totale, elle varie en fonction des dimensions des obstacles (hauteur et largeur) et leur nombre [54, 27].

Pour les surfaces cultivées la rugosité de la surface dépend des opérations de labour. Ces opérations peuvent augmenter la rugosité de la surface par la production de grands agrégats et par la création des sillons qui attrapent les particules en saltation [55].

1.9.2 La végétation

La présence de végétation protège la surface du sol contre la force érosive du vent par recouvrement d'une fraction de la surface et la formation d'une zone sous le vent où la vitesse du vent est considérablement réduite.

Augmente la rugosité du sol et absorbe une fraction de l'énergie éolienne, piège les particules du sol en mouvement en réduit le flux horizontal et vertical en fournissant des lieux pour le dépôt des particules, l'interception et le piégeage des fines particules augmente la disponibilité des éléments nutritifs nécessaires à la croissance de la plante.

La plante par sa présence crée un ombre qui affecte l'humidité du sol par la diminution de la quantité de radiation solaire.

Permet un changement de microclimat et favorise la décomposition des résidus végétaux et améliore la quantité de matière organique nécessaire pour la stabilité et la résistance de la plante.

En plus les plantes agissent en tant qu'obstacles qui diminuent les ruissèlements et permet le piégeage des éléments du sol transporté dans l'écoulement et stabilise le sol par les racines [56].

L'effet de la végétation dépend de la taille, de la forme, de l'espacement et de l'arrangement des éléments de végétation et des débris végétaux, il a été montré qu'une couverture végétale de 35-40% protège le sol de manière significative [57, 58, 26] et diminue la vitesse du vent de 50–60% à une hauteur de 20 cm au dessus du sol [59, 60].

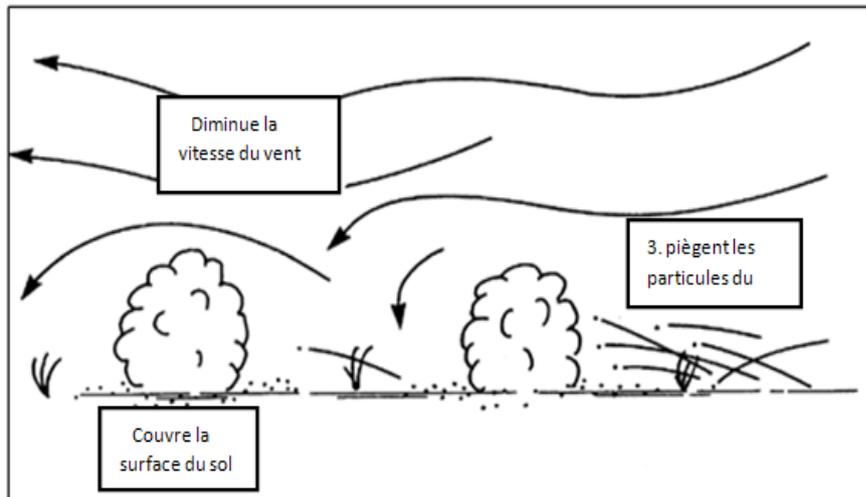


Figure 1.5 : Effet de la végétation sur le transport des particules par le vent [26].

1.9.3 L'humidité du sol

L'humidité du sol contribue considérablement aux développements des forces de cohésion entre les grains du sol ce qui augmente la résistance du sol à l'érosion et donc influence directement sur la vitesse du vent exigée pour le déclenchement du mouvement de sable.

L'humidité du sol augmente la stabilité des agrégats sèche par leur cimentation en présence de certaines substances inorganiques comme les argiles et les limons. Ceci en plus de son effet sur le développement du couvert végétal et le contrôle de la formation et la distribution d'une croûte protectrice [61]. L'humidité est conservée dans le lit de sable par deux processus :

1. l'eau forme un film autour de la surface des grains ce film est due à l'absorption de l'eau par la surface de la particule (c'est-à-dire l'adhérence)
2. Une fois ce film établi, l'éventuel excédent d'eau du sol est alors utilisé pour remplir les interstices entre les grains du sol et le développement des forces capillaires

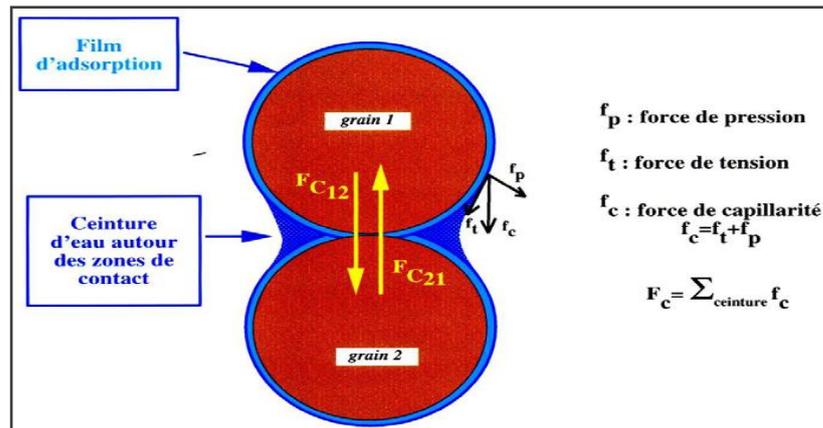


Figure 1.6 : Forces de cohésion dues à la présence d'eau autour des particules [30].

Ces forces se conjuguent pour retenir l'eau dans la matrice des sédiments et avec l'action de la force gravitationnelle, augmenter la résistance des particules à l'érosion éolienne. [62, 30].

D'après des expériences, le seuil critique d'humidité pour freiner le transport des sédiments a été établi entre 4% et 6% [63]. En outre d'autres expériences fixent cette valeur à 2%. Ainsi que d'autres supposent que le contenu d'humidité nécessaire pour le contrôle de l'érosion est de 8%, cependant d'après la figure 1.7 on peut constater que ce contenu d'humidité est nécessaire pour les grandes vitesses ≥ 12 m/s [64].

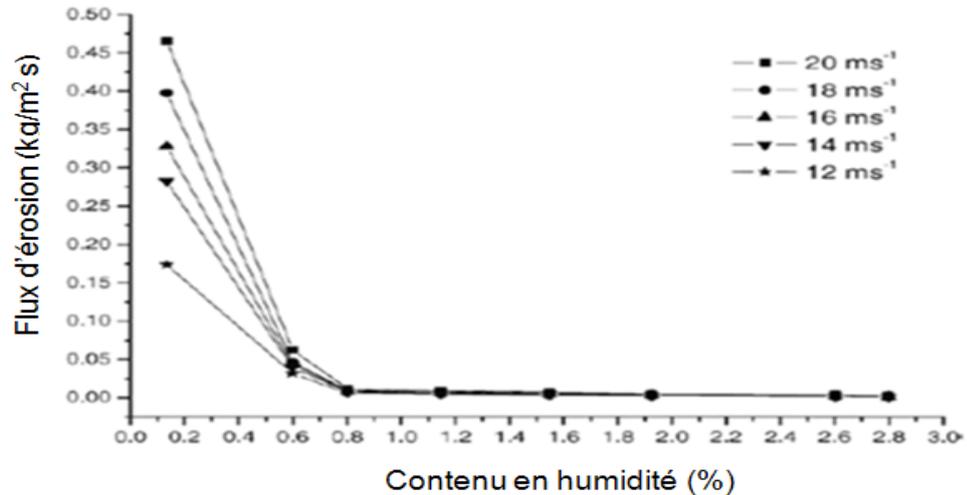


Figure 1.7 : Flux d'érosion en relation avec le contenu en humidité [64].

D'après (Michel J.P.M. Riksen) [43] l'érosion éolienne s'arrête une fois que la vitesse du vent est inférieure à 3.5 m/s ou le contenu en humidité dépasse 2% (figure 1.9).

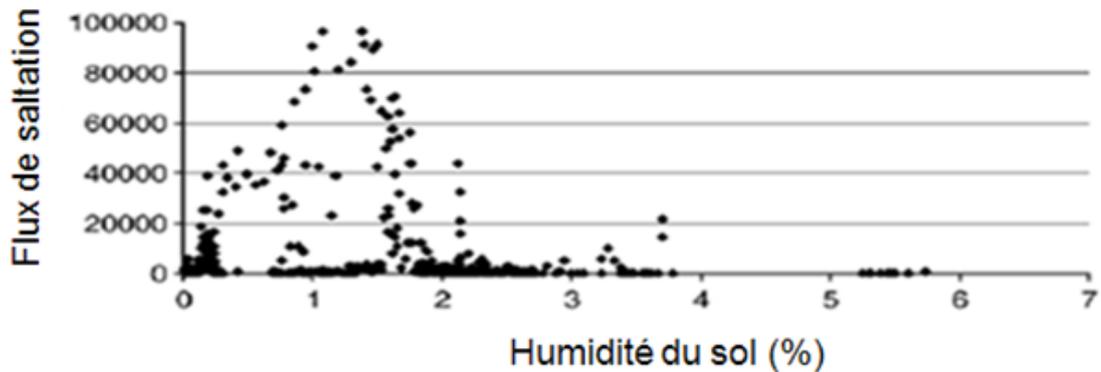


Figure 1.8 : Humidité du sol en relation avec le flux de saltation [43].

1.9.4 Les croûtes

Les croûtes augmentent la stabilité du sol et réduisent l'érosion éolienne et hydrique. Elles peuvent être développées sur les dunes, sur les dépressions ouvertes, sur les sols à acidité élevée et dans les plaines. [65].

Il existe plusieurs types de croûtes parmi lesquelles :

Les croûtes de fusion se forment sur des sols avec un contenu élevé de particules fines. Elles peuvent efficacement limiter la saltation par l'augmentation de la cohésion des agrégats du sol ; une explication probable est que les liaisons

argile-argile sont plus fortes que les liaisons entre l'argile et les particules grosses, et que la résistance des agrégats augmente avec le contenu en argile. Cette différence de texture a un impact sur le type de croûte qui peut être formée après les précipitations [66].

Les croûtes physiques se forment par la présence d'une concentration importante d'argiles, provenant de l'abrasion des roches, ou l'accumulation des particules fine en suspension dans l'air. Ces particules fines d'argile sous l'effet des gouttes de pluie cimentent les particules plus grandes pour former une couche mince sur la surface des sols et limitent les particules libres. Les sols sableux sont très sensibles à l'encroutement ainsi qu'à l'érosion [65,67].

Les croutes biotiques ou biologiques se forment par deux mécanismes de liaisons :

- 1) Les excréments extracellulaire comme le mucilage et les polysaccharides qui forme un film mince le long des murs des cellules et permet l'attachement des particules.
- 2) les croissances filamenteuses par enchevêtrement comme une natte mince et flexible lie l'ensemble de petites particules dans de plus grandes particules ce qui augmente la rugosité de la surface et diminue la vitesse du vent en plus elles donnent au croute une résistance importante à l'abrasion et la rupture causée par les particules en saltation et donc une résistance à l'érosion et contribuent à la fertilité du sol par le piégeage des poussières et le maintien des précipitations [65, 68 - 70].

Les croûtes de sel : se forment par l'ascension et l'évaporation des eaux de la nappe, phréatique ou de la zone vadose à la surface du sol, provoque la cristallisation des minéraux qu'elles contiennent. Ces eaux d'origine phréatique remontent par capillarité jusqu'à la surface, puis s'évaporent en cristallisant les sels solubles tels que les gypses, les carbonates et plus rarement de la silice [65,68].

1.10 Mécanismes de transport à l'échelle des mouvements globaux

1.10.1 L'avalanche

Ce phénomène est du à la saltation. Les particules en saltation à leur retombé provoquent le départ d'une quantité importante de particules fines. Aussi

lorsque le vent souffle sur une surface dépourvue de sa couverture végétale il provoque un balayage du sol et par conséquent il se charge en particules. Sa charge augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum où la quantité perdue égale la quantité gagnée. Cette charge maximale du vent en particules est sensiblement la même pour tout les types du sol et même sur les dunes ; par contre la distance nécessaire pour cette saturation dépend de la sensibilité du sol à l'érosion. L'avalanche est donc la capacité du vent à ce chargé de particules.

1.10.2 Le triage

Le vent a tendance à déplacer les particules très fines et très légères plus facilement que les particules grosses. Donc le vent sépare le sol en différentes catégories d'éléments selon leur diamètre par saltation, reptation ou suspension et à différentes distances [46].

1.10.3 L'abrasion

L'abrasion éolienne est le résultat des particules en saltation ces dernières a leur retour en surface sont mises en contact avec le sol et les sédiments qui sont présents sur la surface du sol, ce contact provoque leur rupture, leur polissage et leur déplacement. Et par conséquent les sols sont érodés et de grandes quantités de poussières sont dégagées en suspension ce qui provoque la dégradation du sol. L'abrasion éolienne des sols et des sédiments dépend d'une variété de facteurs, y compris la composition minérale, la granulométrie des particules, la couverture de la surface, le microrelief extérieur, et les caractéristiques du vent [71].

1.11 Différents modes de transport à l'échelle des particules

Le mouvement de sable par le vent est un processus physique important dans l'érosion éolienne et les tempêtes de sable, il a des impacts sur l'environnement naturel et les activités humaines. En fonction de leur taille et des conditions atmosphériques les particules du sol sont transportées par le vent selon trois modes de transport : la saltation, la suspension et la reptation en surface, figure 1.10 [28].

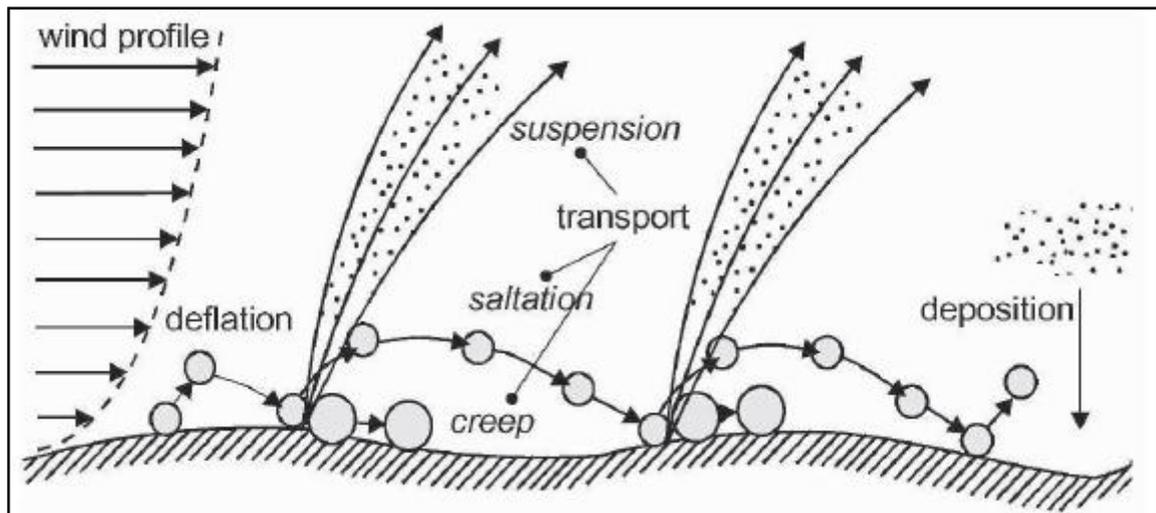


Figure 1.9 : Mouvements des grains du sol sous l'effet du vent, en fonction de leur taille [28].

1.11.1 La saltation

La saltation est le premier mode de transport, parce qu'il représente 50% à 75% de la quantité totale transportée et il est la cause des deux autres modes de transport la reptation et la suspension [72 – 74].

La saltation concerne les particules dont le diamètre est compris entre 60 et 1000 μm . Le mouvement des particules en saltation est une série de sauts successifs [73, 75, 76] à l'intérieur d'une couche dont la hauteur varie de 1 à 1.5 m [77].

Les particules en saltation sont généralement concentrées dans une hauteur qui varie de 0.10–0.15 m au dessus du sol [74].

Après avoir sauté, les particules retombent sous l'action de la pesanteur [73, 76]. La trajectoire d'une particule en mode de saltation est une montée verticale avec un angle de 55° suivi d'un mouvement horizontal et d'un retour à la surface sous un angle de 10° [78].

Les agrégats en saltation à leur retombées provoquent un bombardement des agrégats présents en surface. En effet, en raison de l'inélasticité au choc, une fraction de l'énergie cinétique des agrégats entraînés par saltation est transformée en chaleur lors du choc avec le sol. Le reste est utilisé pour libérer les fines particules en suspension des agrégats eux-mêmes ou de la surface du sol (sandblasting) [76, 79].

1.11.2 La suspension

Influencées par les fluctuations de la vitesse à travers la couche limite, les particules dont le diamètre est inférieur à 60 μm sont transportées en suspension [74].

Les particules les plus fines (de diamètre \leq de 20 μm) peuvent rester en suspension dans l'atmosphère pour plus d'une semaine. Ces particules fines constituent les aérosols minéraux qui sont transportés sur de longues distances depuis les zones sources et se déposent par des processus secs-et-humides [77].

Les aérosols minéraux ont des conséquences nombreuses. Ils participent à la redistribution de matière entre les écosystèmes continentaux et océaniques par une désertification dans les zones sources et un enrichissement du milieu dans les zones de retombée océanique ou continentale. Ils conduisent à la diminution de la fraction fine du sol et par conséquent diminuent la qualité du sol et sa capacité de production [54, 79 - 81].

1.11.3 La reptation

Les particules les plus grossiers (dont le diamètre est $>$ 1000 μm) sont trop lourdes pour quitter la surface. Sous l'action du vent elles glissent ou roulent sur la surface dans un mouvement de reptation [73, 76].

1.12 Zones de transport éolien

D'après le Système Global d'Action Éolienne les zones de transport éolien sont regroupées en trois unités principales selon leur budget sédimentaire et la direction du vent [84].

1.12.1 Aires sources ou aire de départ

Le sable est à l'origine de l'attaque des roches ou des surfaces par un vent chargé de particules et notamment les grains en quartz en provoquant des fragmentations. Ce phénomène est appelé corrasion ou abrasion

- A l'échelle du millimètre l'abrasion provoque au niveau des roches des trous des plis et des rainures
- A l'échelle du centimètre les roches peuvent être façonnées et érodées en des formes distinctives nommées : ventifacts

- A l'échelle du mètre la corrasion délimite des buttes allongées aux profils longitudinaux, hautes parfois de plusieurs mètres (les yardangs) [82].
- en milieux alluviaux caillouteux le vent emporte la matrice sableuse en laissant des galets façonnés en dreikanter (Caillou de forme pyramidale à trois côtés taillés par l'action des vents de sable du désert, terme d'origine allemande).
- et en milieu sableux le vent opère un vannage qui à l'échelle géologique, laisse au stade terminal un pavage de déflation (c'est une surface où les éléments grossiers prédominent par l'enlèvement et le balayage des éléments plus fins par les vents.)
- la déflation participe également au façonnement d'édifices éoliens individuels ou coalescents comme les dunes paraboliques et les cordons longitudinaux ainsi que les plaines alluviales une fois la couverture végétale disparue sous l'effet du pâturage et l'éradication des espèces ligneuses [84, 85].

Pendant la saison humide les particules désagrégées s'accumulent au niveau des dépressions, des cours d'eau et des oueds. Mais après assèchement, durant la saison estivale, ces zones constituent des zones importantes de matériaux éolisables [85]. On peut donc dire que les zones sources sont des zones de départ avec un budget sédimentaire négatif [84].

1.12.2 Aires de transit

Ce sont les zones où il y a un passage du vent sans qu'il n'y ait accumulation et sont de trois types :

- les voiles sableux sont des surfaces planes étendues caractérisée par l'absence de tout obstacle orographique ce qui empêche l'accumulation sous forme dunaire à leur niveau. Par conséquent elle participe avec sa fraction fine dans l'alimentation des vents de sable. Ces surfaces n'ont pas de relief précis ce qui rend difficile la détermination du sens de leur déplacement
- les couloirs orographiques sont des couloirs étroits où le vent est accéléré par l'effet venturi ce qui donne naissance à des vents de sable.

- les plateaux rocailloux sont des surfaces recouvertes de cailloux. Ils sont caractérisés par des vents forts à leur niveau ce qui ne permet pas l'accumulation [85].

1.12.3 Aires d'accumulation

Ce sont des aires à budget sédimentaire positif par l'accumulation de particules. Lorsque le vent faiblit et perd de sa vitesse, il dépose les matériaux qu'il transporte et donne naissance à des accumulations sableuses de différentes formes et tailles connues sous le nom de dunes.

Les principaux facteurs qui commandent le développement et le type de dunes sont la taille des grains, l'humidité du sol, la végétation, la distance par rapport à la source, le régime du vent et la disponibilité du sable.

Les accumulations sableuses les plus connues sont

1.12.3.1 Les barkhanes

Les barkhanes se forment lorsque le vent souffle régulièrement dans la même direction pendant toute l'année et que les quantités de sables transportées ne sont pas suffisantes pour couvrir le domaine entier d'accumulation.

Les barkhanes ont la forme d'un croissant [86 - 89]. Elles se décomposent en deux parties :

Un dos et une face d'avalanche respectivement exposé et abrité du vent. Les dunes ont une hauteur comprise entre 1,5 et 10 m. Dans quelques cas exceptionnels elles peuvent atteindre 50 m. Tandis que leurs bases sont généralement de 40 à 150 m de long et 30 -100 m de large. Le dos de la barkhane est incliné avec un angle compris entre 5 - 20° et la face sous le vent est inclinée avec un angle de 30 à 35° [89].

Les barkhanes présentent des déplacements rapides (de 20 à 70 m/an) [91].

Le vent qui rencontre le dos de la barkhane érode ce dernier et conduit à une accumulation de sable au niveau de la crête. Une congère se forme et finit par se déverser sur la face d'avalanche. Le sable circule donc d'une face à l'autre [90].

Il existe aussi un flux latéral sur le dos de la dune qui permet d'alimenter les cornes en continu, assurant ainsi la stabilité de la forme [87, 88].

Du point de vue mathématique, la forme de la barkhane est symétrique dans la direction du vent, mais dans la nature il existe de nombreux facteurs, comme l'irrégularité des vents ou l'inclinaison des surfaces conduisant à des formes asymétriques [91].

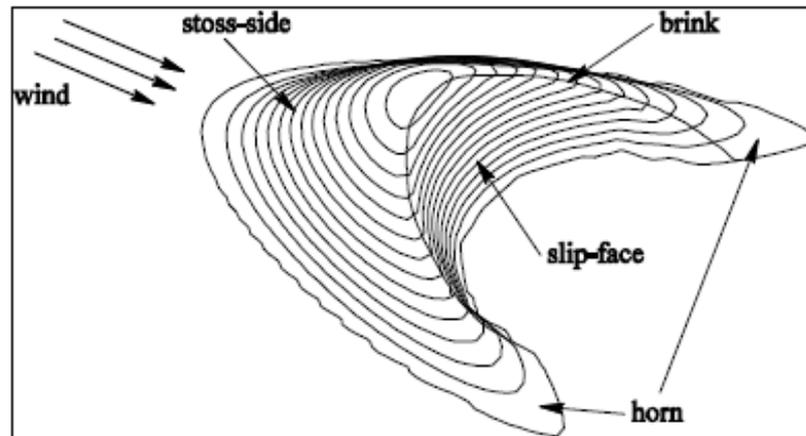


Figure 1.10 : Morphologie de la barkhane [89].

1.12.3.2 Dunes en étoiles

Ce sont des accumulations sableuses sous forme de pyramide irrégulière avec trois ou plusieurs bras s'étalant à partir du sommet. Les bras changent dans la longueur, la largeur, le nombre, et la forme mais chacun d'eux glisse d'une façon distincte [92].

Les dunes en étoile sont constituées par des vents multidirectionnels, c'est-à-dire des vents qui soufflent de différentes directions à différentes périodes de l'année, les dunes en étoile peuvent atteindre une hauteur de 200 m. Elles sont à l'origine des dunes linéaires, des dunes paraboliques ou des dunes transversales. Ces dernières, à cause de l'apport continu du sable par le vent, se déversent et forment des bras selon la direction du vent. En raison de la rotation dans le sens des aiguilles d'une montre des courants éoliens, pendant les 24 heures, la dune devient stable et maintient sa position et sa forme pendant plusieurs années. Peut de changements peuvent être observés dans une période d'un mois [83, 93].

1.12.3.3 Rides éoliennes

Les rides éoliennes sont des ondulations normales ayant une longueur de quelques centimètres, mais les rides les plus grandes ou méga rides ont une

hauteur qui va jusqu'à 1 m et une longueur qui va jusqu'à 20 m. La longueur des rides est d'environ six fois la longueur moyenne de reptation.

Les rides éoliennes sont perpendiculaires à la direction de vent et se forment parce que les grains les plus grandes se déplacent plus lentement que les grains les plus petits et s'accumulent d'une manière décroissante (des plus grandes au plus petites) en créant une rugosité de la surface qui se forme sous forme de rides.

D'une façon générale, la longueur des rides augmente avec l'augmentation de la vitesse bien que ces rides s'aplatissent complètement et disparaissent en présence des vents très forts [83].

1.12.3.4 Dunes transversales

Quand la quantité du sable transporté par le vent est importante plusieurs édifices barckaniques se forment et au fur à mesure qu'elles se déplacent elles se rassemblent en bandes perpendiculaires à la direction du vent. Les dunes transversales se forment sous l'influence d'un vent unidirectionnel

1.12.3.5 Dune longitudinale

Ce type de dune se forme sous l'influence d'un vent bidirectionnel ou un vent monodirectionnel divisé par des irrégularités topographiques.

Les dunes longitudinales ont la forme de longues bandes parallèles à la direction de vent. Les dunes transversales et les dunes longitudinales ont une hauteur moyenne de 8,5 m [94 - 96].

1.12.3.6 Dune parabolique

C'est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval ou sous forme de « V » à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation.

Sa disposition par rapport à la direction du vent est inverse à celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée [52, 98].

1.12.3.7 Nebkas

Les nebkas sont des monticules de sable qui se forment dans les climats arides, semi-arides et subhumides dans le désert et des endroits côtiers.

La végétation, la vitesse du vent et la disponibilité d'une source de sable sont les facteurs primaires qui influencent le développement de nebkas.

Les caractéristiques physiques de la plante au sommet de la nebka augmentent la rugosité, obstruent le flux d'air et réduisent son énergie permettant la déposition en éliminant l'érosion.

La végétation emprisonne les particules de sable et maintient la forme de la nebka. Le type, la hauteur, la densité, le taux de recouvrement, et l'angle du repos jouent un rôle fondamental dans le développement de la nebka semi-sphérique et conique.

Il y a plusieurs types de nebkas, les nebkas semi-sphérique et conique. Les nebkas à flèche de sable et les nebkas buissonnantes [98]. Les nebkas ont été jugées comme indicateur de l'érosion éolienne et la dégradation des terres arides [99].

Leur occurrence est associée à une dégradation de la végétation et une activité humaine intense. Ces reliefs éoliens représentent l'ultime indicateur à la résistance des terres sèches à l'aridité et le surpâturage. Elle indique une mobilité de sable à l'échelle locale [100].

1.13 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, on a commencé par définir la désertification et leur lien avec les différents facteurs climatiques et anthropiques.

Dans la deuxième partie on a défini l'érosion éolienne et les différents paramètres qui influent sur ce phénomène.

Dans notre cas d'étude, on s'intéresse à la vitesse du vent en relation avec la granulométrie du sol parce que l'érosion éolienne ne peut se produire que si le vent est suffisamment fort c'est-à-dire que sa vitesse atteint une certaine limite pour laquelle puisse déplacer les gains du sol pour cela, on a cité les vitesses seuil déterminées par plusieurs pays en fonction de la granulométrie du sol, et on a constaté que cette vitesse diffère d'un pays à l'autre mais elle tourne en générale autour de 4 m/s. Ensuite on a défini les différents modes de transport éolien que ce soit à l'échelle des mouvements globaux ou à l'échelle de la particule et on a terminé ce chapitre par les différentes zones de transport.

CHAPITRE 2 POSITION DU PROBLEME

2.1 Introduction

L'Algérie fait partie des zones arides et semi-arides qui sont vulnérables et souffrent de sécheresses chroniques. Ce qui entraîne de forts déficits hydriques et par conséquent une forte contrainte sur le milieu naturel, les activités socio-économiques et le bien être des populations et intensifient considérablement le phénomène de désertification qui affecte déjà gravement le pays [101].

La dernière sécheresse, qui marqué l'ensemble du pays depuis déjà deux décennies, a entraîné une diminution remarquable des ressources en eaux avec une grande sévérité dans la région Ouest où le taux de réduction atteint 40% [102].

La dégradation du milieu naturel se traduit par une baisse de la productivité des terres agricoles et des parcours, une diminution des ressources en eau, une dégradation des écosystèmes et un assèchement des oueds. Les régions les plus touchées en Algérie sont les hauts plateaux et la steppe. Celles-ci constituent de véritables potentiels agricoles et assurent la sécurité alimentaire du pays [101].

Des données récentes montrent que près de 600.000 ha de terres en zone steppique sont totalement désertifiés sans possibilité de remontée biologique et près de 6 millions d'hectares sont très menacées par l'érosion éolienne et hydrique [11].

2.2 Considérations générales de la zone d'étude

Les hautes plaines sud-oranaises font partie d'un ensemble géographique connu sous le nom de "steppe algérienne". Il s'agit d'un espace spécifique situé entre deux chaînes montagneuses : l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au sud (figure 2.1).

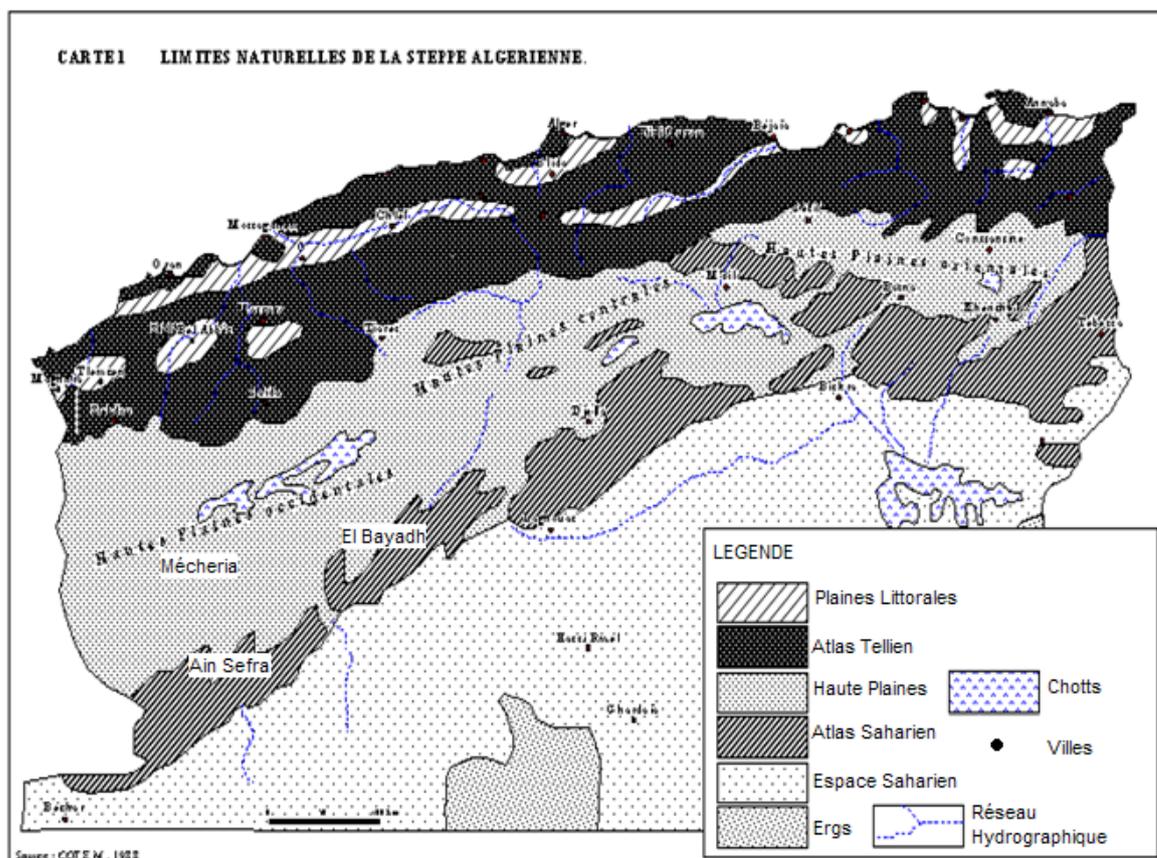


Figure 2.1 : Situation géographique de la zone des "hautes plaines occidentales algériennes" [103].

Ils ont un caractère surtout steppique à dominante agro-pastorale, avec les limitations qu'oppose ce type d'activité sur le milieu naturel déjà fragile et qui contribue à l'accentuation du processus de désertification [101, 103].

2.3 Facteurs contribuent à la dégradation du milieu steppique

1. La pression démographique et l'augmentation des besoins de la population qui conduit à une surexploitation des arbres et arbustes à des fins domestiques ou médicinales.
2. Le défrichement des sols, déjà fragiles, par des pratiques de labour inadéquates au profit des cultures céréalières ce qui expose les sols dénudés à l'action érosive du vent ; et il ne reste que des sols caillouteux et squelettique sans aucune importance [101, 104, 18].
3. La charge pastorale potentielle est d'environ 10 fois supérieure à la charge réelle des parcours. Ce qui conduit à la consommation des bonnes espèces pastorales, avant d'avoir eu le temps de fructifier ou de former des

repousses pour les saisons à venir. Leur système racinaire dépérit et elles disparaissent à jamais du faciès en laissant la place à des espèces inappréciées telles que *Atractylis serratuloides* et *Peganum harmala*. Le résultat de cette transition régressive est la diminution de la richesse floristique et donc de la biodiversité [11].

4. L'irrigation mal maîtrisée avec des eaux le plus souvent saumâtres entraînant la salinisation des sols et le relèvement de la nappe phréatique [101, 105].
5. La sédentarisation qui conduit au surpâturage surtout dans les périodes sèches où la demande des herbivores dépasse largement les disponibilités fourragères. Ainsi de 1983 à 1985, le déficit fourrager a été de 54 % par rapport à la charge d'équilibre. A l'époque du nomadisme, une gestion rationnelle de l'espace et du temps est réalisée à travers deux mouvements essentiels : « l'achaba » qui consiste à remonter les troupeaux dans les zones telliennes pendant les 3 à 4 mois de l'été, pour profiter des sous-produits de l'agriculture et les pailles des terres céréalières et pendant les 3 mois de l'hiver « l'azzaba » conduisant les pasteurs et leur cheptel vers les piedmonts nord de l'Atlas saharien. Ces deux déplacements permettent l'utilisation des zones steppiques uniquement au printemps où la végétation est maximale. Cette combinaison induisait une optimisation dans l'utilisation des parcours steppiques qui sont utilisés pendant 1/3 de l'année. Ce la permettait à la végétation de se régénérer pour maintenir l'équilibre et le pouvoir de survivre pendant les sécheresses cycliques. Aujourd'hui on note une importante régression du nomadisme qui ne subsiste que de façon sporadique. Les déplacements de grande amplitude ne concernent que 5% de la population steppique. La population nomade ne s'est pas sédentarisée totalement, mais elle est devenue semi-sédentaire. Les déplacements sont plus restreints (10 à 50 km) [106, 107].
6. La dégradation des points d'eau engendrée par le piétinement des animaux sur un rayon qui peut s'étendre à 5 km autour du point d'eau ou d'une agglomération. Pour un point d'eau la surface dégradée peut atteindre 80 km² et pour une commune steppique qui possède 10 points d'eau connaissant le même rythme de piétinement, la surface dégradée est de

80 000 ha. Ce qui représente une surface énorme, sachant qu'il existe plusieurs dizaines de points d'eau répartis sur la steppe [108]. Ce piétinement contribue à la dénudation et au tassement du sol, à la constitution d'une couche très dure en diminuant l'infiltration des eaux et l'augmentation des risques de ruissellement [108, 109].

2.4 Etat des parcours

Les travaux effectués sous climat aride montrent que la dégradation des terres et la désertification commencent souvent par la réduction ou la destruction du couvert des plantes pérennes, c'est le cas de l'alfa (*Stipa tenacissima* L.). C'est une plante pérenne qui a la capacité de résister à la sécheresse et de ce fait permet la protection du sol et diminue l'érosion éolienne [106].

Cette dégradation est marquée par le passage des steppes d'alfa vers d'autres formations caractérisées par des espèces peu ou pas palatables, réduisant ainsi la qualité des parcours comme celles à armoise blanche (*Artemisia herba-alba* Asso) ou à sparte (*Lygeum spartum* L.) [110, 106].

La régression de l'alfa s'est nettement accélérée à partir des années 1980, telle que la production de l'alfa est passée de 36.588 tonnes en 1984 à 4000 tonnes seulement en 1990 [101]. La figure 2.2 représente la chute de la surface alfatière au cours du dernier siècle. On remarquera que la chute est particulièrement dramatique ces 50 dernières années [106].

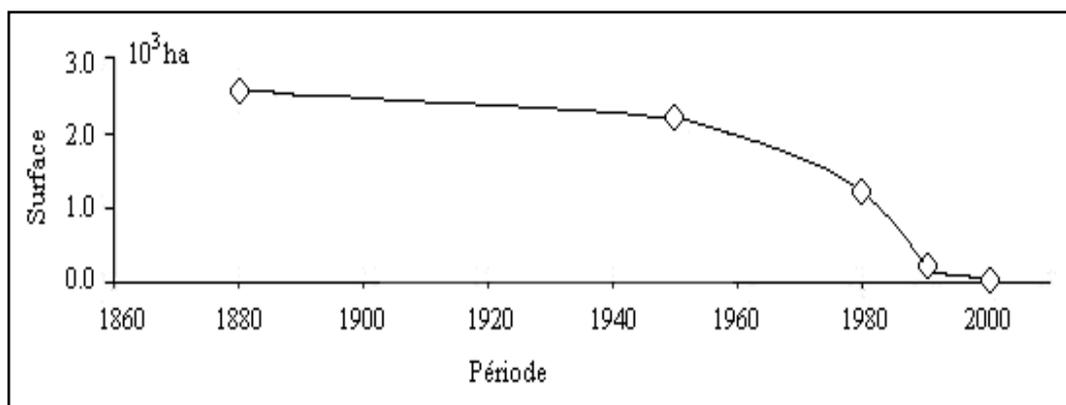


Figure 2.2 : Evolution des steppes d'alfa dans les Hautes Plaines du Sud-Oranais [106].

Cette dégradation est caractérisée par

- la réduction des disponibilités fourragères,
- la précarité de l'élevage ovin,
- l'ensablement des agglomérations et des voies urbaines,
- la rupture de l'équilibre du système d'organisation pastoral traditionnel
- l'apparition d'un paysage dunaire.
- la stérilisation de milliers d'hectares de terres, des villages entiers ont été déjà abandonnés et des investissements énormes sont consentis pour dégager les voies de communications (route, rail) et les centres de vies [101].

2.5 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la partie sud-ouest des hauts plateaux et elle englobe les zones suivantes : Nâama, Mécheria, Ain Safra, El Bayadh et El Kheither. La wilaya de Naâma est une immense plaine déprimée située entre les deux atlas ; l'atlas tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud, à l'ouest elle est limitée par la frontière Algéro-Marocaine et à l'est par la wilaya d'EL Bayadh.

La wilaya de Naâma s'étend sur une superficie de 29825 km² pour une population de 164894 habitants.

Les terres steppiques de la région de Naâma sont beaucoup plus destinées au pastoralisme qu'à l'agriculture en sec ou irrigué, les parcours steppiques représentent 2 550348 ha c'est-à-dire 86% de la surface totale de la wilaya par contre les surfaces agricoles s'étendaient sur une superficie de 20000 ha en 2002 ; [111].

Mécheria et Ain Safra sont deux communes qui appartiennent à la wilaya de Naâma, Mécheria se trouve à l'est avec une population de 54627 habitants [114, 114]. Tandis qu'Ain Safra se trouve au sud avec une population de 36577 habitants [111].

2.5.1 Extension de l'ensablement dans la zone d'étude

Le processus de désertification dans la zone d'étude est, aujourd'hui, décelable par l'œil de l'observateur.

Des études diachroniques ont montré que des faciès ont complètement disparu et sont remplacés par d'autres qui sont indicateurs d'une dégradation intense et quelque fois irréversible avec l'installation progressive d'une couverture

sableuse qui avec le temps permet la formation des micro-dunes donnant lieu à un paysage pré-désertique [109].

A titre d'exemple dans la commune de Mécheria on assiste à une dégradation intense des formations d'alfa qui sont passés de 11.18 à 2.37% et une extension des surfaces occupées par les espèces psamophytes considérées comme un indice d'ensablement très avancé en plus de l'apparition des espèces comme *Peganum harmala* *Salsola vermiculata* et *Noea microphila* qui présentent un indicateur d'un surpâturage très important [112].

Des villes comme Méchéria ou Nâama sont victimes de vents de sables de plus en plus fréquents [104].

Le réseau routier souffre d'ensablement sur de longues distances. Cet aspect représente un risque grave pour les populations. Le nombre de décès causés par les accidents de la route dans la wilaya de Nâama a été évalué à plus d'une vingtaine en 2001. Le même problème est marqué pour la voie ferroviaire d'ont l'ensablement des voies a conduit en plusieurs occasions à couper la voie. En fait, ce sont les équipements collectifs et parfois des habitations toutes entières qui ont été évacuées à cause de l'ensablement. Dans la wilaya de Naâma un village entier a été abandonné car envahi par le sable.

D'après des estimations faites par (Bensaid, 2006), à l'aide des images satellitaires, la wilaya de Naâma a une superficie totale ensablée de 42% ce qui est équivalent à une surface de 1252650 hectares et cela entre 1957 et 2002.

Ces chiffres sont alarmants et montrent l'ampleur du problème dans cette partie de la région steppique [111].

L'ensablement se trouve presque partout. Aucun secteur n'est pratiquement épargné. Dans les agglomérations (maisons ou équipements), dans les voies de communication, dans les terres agricoles, le sable prend de plus en plus de place et gêne les hommes là où ils sont dans leur vie quotidienne.

Cet aspect est devenu une actualité dans la région ; dès que le vent souffle, les gens s'attendent à des accumulations sableuses qui s'installent après une heure seulement de passage.

En avril 2002 dans le périmètre de mise en valeur agricole de Draa Lahmar se situant dans la commune d'El Bayadh le vent a ensablé toute une partie des exploitations en une heure ; ce qui indique la gravité du problème auquel est confrontée la steppe actuellement [108].

2.5.2 Précipitations

Les écosystèmes steppiques sont marqués par une grande variabilité mensuelle et surtout annuelle des précipitations et une grande tendance à l'aridité [109]. C'est le cas pour El Bayadh. Elle est passée du semi-aride supérieur au semi-aride moyen, Mécheria n'est pas loin de l'étage semi-aride inférieur après avoir été dans le semi-aride moyen [108]. La diminution des précipitations est de l'ordre de 18 à 27% et la durée de la saison sèche aurait augmenté de 2 mois entre 1913-1938 et 1978-1990 [11, 110].

Cette variabilité est due à l'existence de gradients ; à savoir :

- Un gradient longitudinal : la pluviosité augmente d'Ouest en Est. Ce gradient est dû à deux phénomènes : à l'Ouest, la Sierra Nevada espagnole et l'Atlas marocain agissent comme écran et éliminent ainsi l'influence atlantique. A l'Est, les fortes précipitations sont attribuées aux perturbations pluvieuses du Nord de la Tunisie.
- Un gradient latitudinal : les précipitations moyennes annuelles diminuent du Nord vers le Sud. Cette diminution est due à la grande distance traversée par les dépressions qui doivent affronter sur leur parcours les deux chaînes atlassiques.
- Un gradient altitudinal universel qui varie en fonction de l'éloignement de la mer [107].

L'Evolution de la pluviosité de 1907 à 2003 dans le Sud Oranais (Mécheria et El Bayadh) est représentée dans la figure 2.3. La pluviosité représente une variabilité remarquable et une tendance à la diminution d'une année à l'autre. Cette diminution est enregistrée dans le tableau 2.1 pour les stations de El Kheither, Mécheria et Ain Sefra.

Tableau 2.1 : Variation des précipitations (mm/an) dans les trois stations de la zone d'étude [107].

période stations	1913-1930	1952-1975	1975-1990	Diminution (%)
El kheither	208	184	166	18
Mécheria	293	310	213	27
Ain Sefra	192	194	156	20

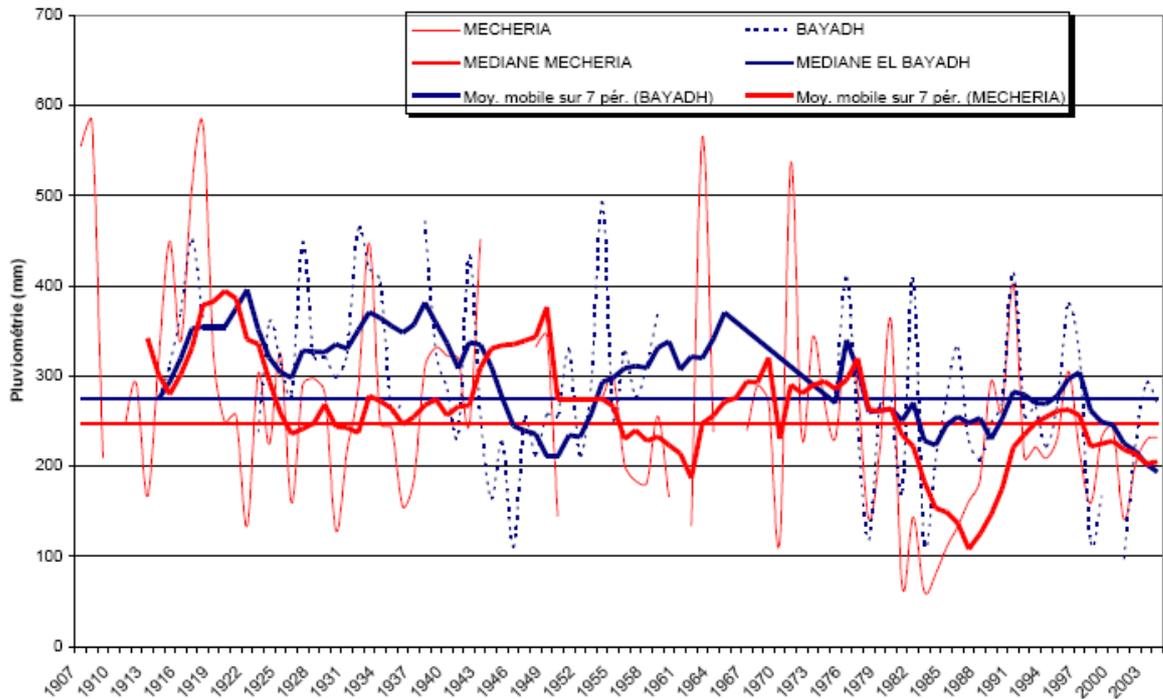


Figure 2.3 : Evolution de la pluviosité (1907-2003) dans le Sud Oranais (Méchéria et El Bayadh) (Hirche, 2007) [110].

2.5.3 Température

La température varie d'une manière très importante entre l'Hiver et l'Eté avec des écarts de température diurnes de l'ordre de 20°C, la région est caractérisée par des fortes chaleurs en été avec des températures moyennes maximales allant de 33°C à 38°C et un Hiver très froid avec des températures moyennes minimales très basses allant de - 2 à + 4°C. Janvier reste le mois le plus froid et juillet le mois le plus chaud [107, 109].

2.5.4 Sol

Les sols steppiques sont le plus souvent peu profondes avec une texture sablo-limoneuse, ils sont caractérisés par la présence d'accumulation calcaire, la faible teneur en matière organique (1.88 ± 0.36 %). Le sol avec ces caractères présente la grande vulnérabilité vis-à-vis des changements naturels ou anthropique, ce qui le rend sensible à l'érosion et à la dégradation [106, 11]. La zone steppique représente une mosaïque de plusieurs types de sols.

2.5.4.1 Sols minéraux bruts

Les sols minéraux bruts sont formés par l'apport d'érosion, l'apport alluvial et l'apport éolien.

- ❖ L'apport d'érosion forme les couches superficielles des fortes pentes et les sommets des djebels. Ces sols sont caractéristiques des forêts et des matorrals [107, 111].
- ❖ L'apport alluvial s'accumule au niveau des oueds. Il a une texture sableuse, une forte charge caillouteuse et une profondeur variable.
- ❖ L'apport éolien constitué de sable formant des dunes plus au moins mobiles et constituent un domaine privilégié pour la végétation psammophile à *Aristida Pungens* et *Arthrophytum Scoparium* [111].

2.5.4.2 Sols peu évolués

Regroupant :

- les sols d'origine colluviale sur les piedmonts des djebels et les glacis.
- les sols d'origine alluviale constituant les lits d'oued, les zones d'épandage et les dayas qui représentant les terres de culture.
- les sols d'origine éolienne avec des formations sableuses fixées [107].

2.5.4.3 Sols calcimagnésiques

Regroupant les sols carbonatés qui sont les plus répandus dans les écosystèmes steppiques où ils représentent de vastes étendues encroûtées [107].

2.5.4.4 Sols isohumiques

Sont représentés dans les glacis d'érosion polygéniques du Quaternaire récent. Ils regroupent les sols à encroûtement calcaire ou gypseux. On les retrouve dans les régions arides lorsque les précipitations sont inférieures à 200 mm/an [107].

2.5.4.5 Sols halomorphes

Regroupent les sols salins, ces sols sont généralement profonds et localisés dans les chotts et les sebkhas. Ils sont pauvres en matière organique, et se développent sur des matériaux alluviaux à texture sablo-limoneuse [107, 111].

2.5.5 Analyse granulométrique du sol

L'analyse granulométrique pour certains endroits de la steppe sud occidentale algérienne comme : Mosbah, El Bayadh, le Sud du chott Chergui et le Nord-est de djebel Antar a marqué la prédominance de sables fins qui ont un diamètre compris entre 0.08 et 0.16 mm. Ce sable est prélevé en bas du talus de la barkhane du coté face au vent. Pour le sable de la crête, son diamètre oscille entre 0.125 et 0.315 mm [111].

2.5.6 Végétation steppique

Les steppes algériennes sont dominées par différents forme végétales

2.5.6.1 Steppes à alfa (*Stipa tenacissima*)

L'alfa présente une forte amplitude écologique. Elle colonise tous les substrats géologiques de 400 à 1 800 m d'altitude et présente une faible valeur fourragère. Cependant, les inflorescences sont très appréciées [11, 107].

2.5.6.2 Steppes à armoise blanche (*Artemisia herba alba*)

L'armoise est une espèce très résistante à la sécheresse, elle s'étale sur les zones d'épandage dans les dépressions et sur les glacis encroûtés avec une pellicule de glaçage en surface. De plus elle constitue les meilleurs parcours de ce fait elle est utilisés pendant toute l'année et en particulier en mauvaises saisons. Elle constitue des réserves importantes et représente une bonne résistance à la pression animale, en particulier ovine. Le type de faciès dégradé correspond à celui de *Peganum harmala* dans les zones de campement et autour des points d'eau [107, 11].

2.5.6.3 Steppes à sparte (*Lygeum spartum*)

Ces steppes occupant les glacis d'érosion encroûtés recouverts d'un voile éolien sur sols bruns calcaires, halomorphes dans la zone des chotts. L'espèce *Lygeum spartum* ne présente qu'un faible intérêt pastoral. Elles sont peu productives mais constituent cependant des parcours d'assez bonne qualité. Leur intérêt vient de leur diversité floristique et de leur productivité relativement élevée en espèces annuelles et petites vivaces [11, 107].

2.5.6.4 Steppes à remt (*Arthrophytum scoparium*)

Cette végétation forme des parcours qui présentent un intérêt assez faible sur le plan pastoral. Elle est surtout exploitée par les camelins [107, 11].

2.5.6.5 Steppes à psamophytes

Ce type d'espèce est lié à la texture sableuse des horizons de surface et aux apports d'origine éolienne. Ces formations sont des indicateurs d'un ensablement très important. Elles suivent les couloirs d'ensablement et se répartissent également dans les dépressions constituées par les chotts. Ces formations sont généralement des steppes graminéennes à *Aristida pungens* et *Thymellaea microphyla* ou encore des steppes arbustives à *Retama raetam* [107, 104].

2.5.6.6 Steppes à halophytes

La végétation halophile très répéter autour des dépressions salées. La nature des sels, leur concentration et leur variation dans l'espace créent une zone particulière de ce type de végétation. Les espèces les plus répandues dans ces formations sont : *Atriplex Halimus*, *Atriplex glauca*, *Suaeda fruticosa*, *Frankenia thymifolia*, *Salsola sieberi* et *Salsola vermiculata*. Ce type de steppe est très recherché par les pasteurs [107].

2.6 Efforts de l'Algérie pour la lutte contre la désertification

Les politiques de lutte contre la désertification ont été nombreuses et diversifiées à différentes périodes au niveau des steppes algériennes depuis l'indépendance.

Dès les premières années de l'indépendance, l'Algérie lance un vaste programme de lutte contre l'érosion :

Le programme de Défense et Restauration des Sols (DRS). Ce programme a pour but de freiner l'érosion et améliorer les revenus des riverains à travers la plantation d'espèces arboricoles [113].

De 1962 à 1969 il ya eu la mise en place les chantiers populaires de reboisement (CPR). A ce stade 99.000 ha de plantations forestières ont été réalisés dans le cadre de l'amélioration et l'aménagement des parcours et la lutte contre l'érosion éolienne [104].

Dans les années 1970, un programme appelé « barrage vert » vise l'arrêt de l'avancée du désert par la création d'une bande forestière de près de 1000 km de long à partir des frontières Marocaines à l'Ouest aux frontières Tunisiennes à l'Est, sur 20 km de large [114].

A cause du manque d'études préalables aux opérations de reboisement le "barrage vert" a été une erreur technique : il est difficile de faire pousser des arbres sur des sols souvent inadaptés et sans irrigation prolongée. En plus, le choix de l'espèce, le pin d'Alep, très vulnérable à la chenille processionnaire, n'a pas été scientifiquement réfléchi [104, 115].

Le non prise en compte des réalités socio-économiques de la région et en particulier de l'homme, en tant que facteur important dans la dégradation des sols et des parcours par ces activités, dont le surpâturage, est considéré comme la principale cause, de l'échec suivie par les incendies de forêts. Résultat un taux de réussite pour les plantations de l'ordre de 42%, varie d'une région à l'autre [116, 116].

Aujourd'hui, il ne reste que certaines traces de pins d'Alep rabougris au niveau des piémonts Nord de l'Atlas Saharien où l'espèce a pu se développer correctement [104].

Ce barrage vert a été suivi par des efforts de fixation des dunes. La technique consiste à élever des murets (tabias) surmontés de brise-vents secs tout en plantant, au pied des tabias, des espèces forestières adaptées.

La Direction Générale des Forêts entreprend dans les années 80 l'installation de pépinières forestières. Pour faciliter aux agriculteurs a participés dans la plantation des arbres [113].

En 1983 l'adoption du dossier steppe permet la création du Haut Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS), institution publique sous tutelle du Ministère de l'agriculture afin de mettre en place une politique de développement intégré en tenant compte des aspects sociaux -économiques de la steppe et d'impulser le développement global de cette partie du pays. La réhabilitation des parcours dégradés est menée par des mises en défens et des plantations d'atriplex, la création de quelques zones d'épandage, la multiplication de points d'eau.

En plus le HCDS en collaboration avec la Conservation des Forêts lance la mise en défens de 3 millions d'hectares (sur plus de 20 millions) ainsi que la réhabilitation de 300 000 ha par la plantation pastorale.

A ses débuts, le HCDS n'a jamais élaboré une stratégie globale et cohérente de développement durable des zones steppiques, se contentant de réalisations ponctuelles, non intégrées dans une vision d'ensemble. C'est aussi ce qui explique la poursuite du processus de désertification des régions steppiques [104].

En 1987 la création du plan national de lutte contre la désertification qui ce charge de l'Intensification et extension du barrage vert avec une approche agro-sylvo-pastorale.

L'Algérie étant dans la totalité de son territoire sujette à la désertification, elle a signée en 1994 la Convention des Nations Unies de Lutte contre la Désertification. Dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification cette convention est entrée en vigueur le 26/12/1996 ce qui a donnée une nouvelle impulsion aux directions concernées par ce sujet avec la mise en place des plans, des études et des programmes multisectorielles, en élaborant des stratégies pour un développement durable et une préservation de l'environnement dans les zones concernés par ce problème et mettant des perspectives et des systèmes de suivi-évaluation pour la renforcer son fonctionnement [116].

L'année 2000 a vu le développement d'un Plan National de Développement Agricole (PNDA) qui prend comme stratégie le développement durable et intégré pour la lutte contre la pauvreté en milieu rural et la mise en place d'un programme de type agro-sylvo-pastoral, et dans le but de garantir la réussite de ce programme la population locale été invitée à participer dans différents activités pour l'application des mesures de conservation et de gestion des ressources naturelles, en particulier de l'eau et des sols [113].

2.7 Position du problème

La communauté scientifique essaie également à participer dans la proposition des solutions pour un développement durable, dans un cadre de synergie des Conventions environnementales. A cet effet, les recherches au niveau des projets régionaux sont attachées à démontrer l'interaction des

différents facteurs qui contribue au problème de désertification en développant une concertation scientifique et en mettant en synergie leurs résultats basés sur des séries de données sur un pas de temps suffisamment long qui permettent de déterminer des tendances évolutives des systèmes atteints par la désertification et participe par leur connaissance dans la prise des décisions politiques.

Le développement technologique a permis, ces dernières années, l'émergence de nouvelles méthodes de surveillance des écosystèmes naturels par les images satellitaires et la télédétection qui permettent de compléter les observations sur le terrain et de réaliser des études diachroniques. Le suivi des changements écologiques et des pratiques sociales, grâce à la télédétection, a permis d'évaluer la désertification sur de grandes étendues et de mieux comprendre les mécanismes qui conduisent au processus. [105]

A ce titre, l'objet de présent mémoire porte sur la détermination de la contribution du vent dans le processus de l'ensablement dans la partie Sud-ouest des hauts plateaux, zone soumise à une déflation permanente provoquant ainsi la dégradation du milieu et la désertification.

Cette étude est réalisée par l'utilisation des données anémométriques ce qui a permis la détermination des directions dominantes du vent efficace (vent capable de transporter les grains de sable) ainsi que leurs vitesses moyennes dans les stations étudiées et de ce fait permettre aux décideurs de prendre les mesures de protections et de lutte qui conviennent pour chaque station.

2.8 Conclusion

Le processus de désertification des zones steppiques Algériennes ne s'est pas arrêté et s'est même amplifié ces dernières années.

L'aridité, la sécheresse, la pression démographique, le surpâturage, l'irrigation mal maîtrisée, le défrichement, la sédentarisation, l'extension des terres cultivées, la dégradation des points d'eau, constituent les causes principales de la dégradation de la couverture végétale et l'apparition de nouvelles espèces considérées comme indicateur de dégradation.

Le sol, moins protégé par la couverture végétale et par son faible taux de matières organiques devient de plus en plus sensible à l'érosion éolienne et hydrique et plus susceptible à la dégradation, qui entraîne des conséquences néfastes que se soit sur le plan écologique ou socio-économique.

Pour protéger la steppe et maitre fin a cette dégradation, l'Algérie a entrepris un ensemble d'action et de mesures stratégique pour lutter contre le processus de désertification.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION EOLIENNE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1 Introduction

La force d'entraînement du vent, qui cause le mouvement des particules au sol, a un rapport significatif avec la vitesse du vent.

Les autres caractéristiques importantes, liées à la vitesse du vent, sont la fréquence et la direction.

La direction et la vitesse du vent sont mesurées dans les stations météorologiques. Le vent, est mesuré généralement à la hauteur de 10 m du sol. Il est fortement influencé par les conditions topographiques locales.

La présente étude porte sur la détermination du rôle du vent sur le phénomène de l'érosion éolienne dans la région ouest des hauts plateaux algériens. La distribution hybride de Weibull a été utilisée pour l'ajustement des données vent (vitesse et direction) tri horaires fournies par l'ONM au sens de maximum de vraisemblance.

La direction du vent est exprimée en degrés, la référence étant la direction Nord. Les données récupérées auprès de l'ONM et portant sur des périodes continues supérieures à 10 ans ont été traitées sous Matlab, afin de caractériser la distribution du vent dans la zone d'étude.

3.2 Vents Efficaces

Un vent est dite efficace quand sa vitesse est capable de déplacée les grains de sable. Naturellement cette vitesse dépend de la granulométrie et de la densité des grains de sable et varie d'une région à une autre.

D'après les travaux de Messen [94] et Bensaid [111] le vent peut être considéré comme efficaces à partir d'une vitesse appelée vitesse seuil et elle est de 4 m/s.

3.3 Modèles d'ajustement

Un nombre de fonctions de densité de probabilité (pdf) on été utilisées dans plusieurs études afin de décrire la distribution fréquentielle de la vitesse du vent.

Actuellement, c'est la distribution de Weibull qui est la plus extensivement employée et admise dans la littérature spécialisée sur l'énergie éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelable [117].

3.3.1 Modèle de Weibull

Le modèle de Weibull fournit une approximation étroite aux lois de probabilité de beaucoup de phénomènes normaux. Elle a été employée pour représenter la distribution de la vitesse de vent pour l'application dans des études de charges de vent pendant quelque temps.

Ces dernières années, une grande attention a été concentrée sur ce modèle pour les applications de l'énergie éolienne et maintenant elle est employée pour donner l'évaluation de la vitesse de vent dans le système de prévision d'érosion éolienne. Les paramètres de la distribution de Weibull peuvent estimer la vitesse du vent ainsi que sa direction [118, 119].

L'avantage de l'utilisation de ce modèle est dû à sa plus grande flexibilité et simplicité et également parce qu'il peut donner un meilleur ajustement des distributions observées de la vitesse du vent, et au fait qu'il suffit de deux paramètres pour la définition du modèle [117 - 119].

La densité de probabilité du modèle de Weibull, appliqué à la distribution de la vitesse du vent, est donnée par :

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (3.1)$$

Avec :

- V : Vitesse du vent
- $f(V)$: Fréquence de la vitesse,
- k et C : Paramètres de Weibull, k étant le facteur de forme et C le facteur d'échelle [117 - 120].

L'allure de la distribution de Weibull dépend de ces deux paramètres. Ainsi pour $k = 1$ la distribution prend la forme d'une loi exponentielle, alors que pour des valeurs de $k \geq 2$ la distribution devient de plus en plus étroite et se rapproche d'une loi binomiale.

L'étroitesse de la distribution indique la concentration des vents au tour d'une valeur précise. Dans ce cas on dit que le vent est constant (sa vitesse varie assez peu). Pour les valeurs de $k < 2$ on dit que le vent est dispersé.

Le facteur d'échelle « C » indique si un site est venté. Une forte valeur de C indique que le site est très venté. Autrement on peut dire que le site est moins venté [120,123, 124].

3.3.2 Distribution hybride de Weibull

La distribution hybride de Weibull est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrés sur un site donné, est supérieure ou égale à 15% [123, 124]. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - f_0) \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0 \quad (3.2)$$

$$f(V) = f_0 \quad \text{pour } V = 0 \quad (3.3)$$

Avec :

f_0 : Fréquence des vitesses nulles.

a) Vitesse moyenne [117, 125, 126].

- Selon le modèle de Weibull ; la vitesse moyenne est donnée par :

$$\bar{V} = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.4)$$

- Selon le modèle hybride de Weibull ; on obtient :

$$\bar{V} = (1 - f_0) C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.5)$$

b) Ecart type

- Selon le modèle de Weibull ; l'écart type de la distribution est donné par :

$$\sigma = C \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2} \quad (3.6)$$

- Selon le modèle hybride de Weibull ; le même écart type est donné par :

$$\sigma = C \sqrt{(1 - f_0) \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left(\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right)^2 \right]} \quad (3.7)$$

Avec :

- Γ : Fonction Gamma ; définie par [125] :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt \quad (3.8)$$

Avec :

x : Paramètre de la fonction Γ

t : Variable d'intégration

c) Fonction de répartition [126, 117].

- La fonction de répartition de la loi de Weibull est donnée par :

$$F(V) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp \left(- \left(\frac{V_x}{C} \right)^k \right) \quad (3.9)$$

Et son complément par :

$$1 - F(V) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp \left(- \left(\frac{V_x}{C} \right)^k \right) \quad (3.10)$$

- La fonction de répartition selon la loi hybride de Weibull est donnée par :

$$F(V) = (1 - f_0) \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = (1 - f_0) \exp \left(- \left(\frac{V_x}{C} \right)^k \right) \quad (3.11)$$

3.3.3 Distribution de Rayleigh

Le modèle de Rayleigh est un cas particulier et simplifié du modèle de Weibull. Il correspond au cas où le facteur de forme du modèle de Weibull est égal à 2 [125].

La densité de probabilité du modèle de Rayleigh est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right) \quad (3.12)$$

Un des avantages les plus distincts de la distribution de Rayleigh est que la densité de probabilité et la fonction de distribution cumulative pourraient être obtenues à partir de la valeur moyenne de la vitesse de vent [124, 125].

3.3.4 Estimation des paramètres de Weibull

Les paramètres de Weibull sont estimés à partir des données de la vitesse du vent avec plusieurs méthodes. Parmi les méthodes les plus utilisées dans la recherche on peut citer : la méthode graphique, la méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type, la méthode des moindres carrés, la méthode de maximum de vraisemblance ainsi que la méthode du maximum de vraisemblance modifiée.

3.3.4.1 Méthode graphique

Avec cette méthode il est nécessaire d'utiliser la fonction de probabilité cumulative qui correspond à l'équation (3.10). Avec une double transformation logarithmique de cette équation on peut obtenir la formule suivante :

$$\log[-\log(1 - F(V))] = k \log V - k \log C \quad (3.13)$$

En posant :

$$Y = \log[-\log(1 - F(V))] \quad \text{et} \quad X = \log V \quad (3.14)$$

On obtient un modèle linéaire :

$$Y = aX + b \quad (3.15)$$

Le tracé de $\log[-\log(1 - F(V))]$ en fonction de $\log V$ nous donne une droite de pente égale à k et l'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées nous donne la valeur du produit $(-k \log C)$, soit :

$$a = k \quad (3.16)$$

$$b = -k \log C \quad (3.17)$$

$$\text{D'où : } C = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (3.18)$$

- Cette droite peut être tracée à la main sur un papier graphique spécial de Weibull ou déterminée en utilisant une régression des moindres carrés qui puisse être exécutée sans le tracé d'un graphique des données [108,122, 126].
- Cette méthode manque de précision du fait de la double transformation.

3.3.4.2 Méthode de la vitesse moyenne et de l'écart type

L'utilisation de cette méthode pour le calcul des paramètres de Weibull (k) et (C) n'est possible que si la vitesse moyenne et l'écart type sont connus. Propriété que l'on peut déterminer directement à partir des données en utilisant la distribution statistique, [121]. Le facteur de forme et le facteur d'échelle sont donnés, respectivement, par [121,125] :

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad (3.19)$$

et

$$C = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (3.20)$$

Où la vitesse moyenne est donnée par :

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3.21)$$

La variance σ^2 relative à la vitesse du vent est donnée par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \quad (3.22)$$

Avec :

N : nombre d'observations

3.3.4.3 Méthode de maximum de vraisemblance

La fonction vraisemblance s'applique au modèle de Weibull comme elle s'applique au modèle hybride de Weibull, mais dans le cas où les fréquences nulles dépassent 15% on multiplie la vitesse moyenne et l'écart type par $(1-f_0)$ pour corriger leur valeur. La fonction de vraisemblance est donnée par [117, 119, 126] ;

$$L_v = \prod_{i=1}^N f(V_i) = \prod_{i=1}^N \frac{k}{c} \left(\frac{V_i}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V_i}{C}\right)^k\right) \quad (3.23)$$

On prenant le logarithme de l'équation (3.23) on obtient :

$$\log L_v = \sum_{i=1}^N \log[f(V_i)] = N[\log k - k \log C] + (k-1) \sum_{i=1}^N \log(V_i) - C^{-k} \sum_{i=1}^N (V_i)^k \quad (3.24)$$

La fonction de vraisemblance sera maximale pour :

$$\frac{\partial(\log L_v)}{\partial k} = \frac{\partial(\log L_v)}{\partial C} = 0 \quad (3.25)$$

Les paramètres k et C seront donc déterminés après résolution du système

$$\frac{\partial \log L}{\partial k} = \frac{N}{k} - N \log C + \sum_{i=1}^N \log(V_i) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{C}\right)^k \log\left(\frac{V_i}{C}\right) = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial C} = -N + \frac{1}{C^k} \sum_{i=1}^N (V_i)^k = 0 \quad (3.27)$$

L'équation (3.27) donne :

$$C^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i)^k \quad (3.28)$$

On remplaçant C^k par son expression dans l'équation (3.26) on obtient l'équation (3.29) qui est fonction uniquement de k et peut être résolue par itérations successives. La résolution se fait, sous Matlab, en initialisant k à 2 et en ne considérant que les vitesses non nulles.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (V_i^k) \log(V_i)}{\sum_{i=1}^N (V_i^k)} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(V_i) \right]^{-1} \quad (3.29)$$

Avec :

V_i : Vitesse du vent

N : Nombre d'observations (vitesses non nulles).

3.3.4.4 Méthode de maximum de vraisemblance modifié

Dans cette méthode le facteur de forme et le facteur d'échelle sont donnés par les équations (3.30) et (3.31) respectivement :

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{V}_i^k) \log(\bar{V}_i) f(\bar{V}_i)}{\sum_{i=1}^n (\bar{V}_i^k) f(\bar{V}_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \log(\bar{V}_i) f(\bar{V}_i)}{(1-f_0)} \right]^{-1} \quad (3.30)$$

$$C = \left[\frac{1}{(1-f_0)} \sum_{i=1}^n (\bar{V}_i^k) f(\bar{V}_i) \right]^{1/k} \quad (3.31)$$

Avec :

\bar{V}_i : Centre de la classe des vitesses i

n : Nombre de classes

$f(\bar{V}_i)$: Fréquence avec laquelle la vitesse de vent fait partie de la classe i

f_0 : Fréquence des vitesses nulles

L'équation (3.30) doit être résolue itérativement. Après quoi l'équation (3.31) peut être résolue explicitement [119, 126].

3.4 Caractérisation des stations

3.4.1 Données Vent

Les données vent utilisées dans cette partie de l'étude sont représentées dans le tableau 3.1

Après le traitement des vides (des données manquantes) par l'enlèvement d'une ligne entière au niveau de la matrice des données, les données ont été regroupées par classes de vitesses et par direction (en considérant 8 directions).

Tableau 3.1 : Inventaire des données vent utilisées.

Stations	Latitude [degré]	Longitude [degré]	Altitude [m]	Période [années]
Nâama	33°16'N	00°18'W	1166	1992-2005
El Bayadh	33°40'N	01°00'E	1341	1995-2005
El Kheither	34°09'N	00°04'E	1000	1990-2000
Mécheria	33°31'N	00°17'W	1149	1990-2003
Ain Sefra	32°45'N	00°36'W	1058	1992-2005

3.4.2 Etude statistique

Les méthodes et les lois utilisées pour la réalisation de cette étude sont :

- 1) - toutes directions confondues
 - la distribution hybride de Weibull, (équation 3.2) ;
 - la vitesse moyenne selon hybride Weibull, (équation 3.5) ;
 - l'écart type selon hybride Weibull, (équation 3.7).
- 2) - étude directionnelle
 - la distribution de Weibull, (équation 3.1) ;
 - la vitesse moyenne selon Weibull, (équation 3.4) ;
 - la méthode du maximum de vraisemblance pour la détermination des paramètres de Weibull k et C , (équation 3.28 et 3.26) ;

3.4.2.1 Modélisation annuelle globale (toutes directions confondues)

La figure 3.1 représente les histogrammes en fréquences de la distribution annuelle des vitesses du vent pour les 5 stations considérées. On peut constater que la fréquence des vents calmes est prépondérante pour toutes les stations avec un maximum de 45% enregistré à Ain Sefra et un minimum de 27% enregistré à El Kheither. Avec un tel taux de fréquences des vitesses nulles la distribution Hybride Weibull s'impose à tous les sites. Hors vitesses nulles le mode de la distribution à El Bayadh et Ain Sefra se situe vers 3 m/s. Toutefois, les fréquences des vitesses supérieures à 5 m/s restent plus importantes à El Bayadh qu'à Ain Sefra. Pour Naâma le mode de la distribution se situe vers 3 m/s, alors qu'à Mécheria il est de l'ordre de 5 m/s. tandis qu'à El Kheither on ne peut rien affirmer attendu que les fréquences des vitesses ont presque le même ordre avec un léger plus pour la vitesse de 2 m/s ; mais la distribution reste équitablement répartie durant l'année. La vitesse maximale enregistrée est de l'ordre de 15 m/s pour toutes les stations sauf à El Kheither ou elle peut atteindre 18 m/s. On peut donc dire que les vents de sable touchent toutes les stations avec une fréquence inférieure pour Naâma et Ain Sefra.

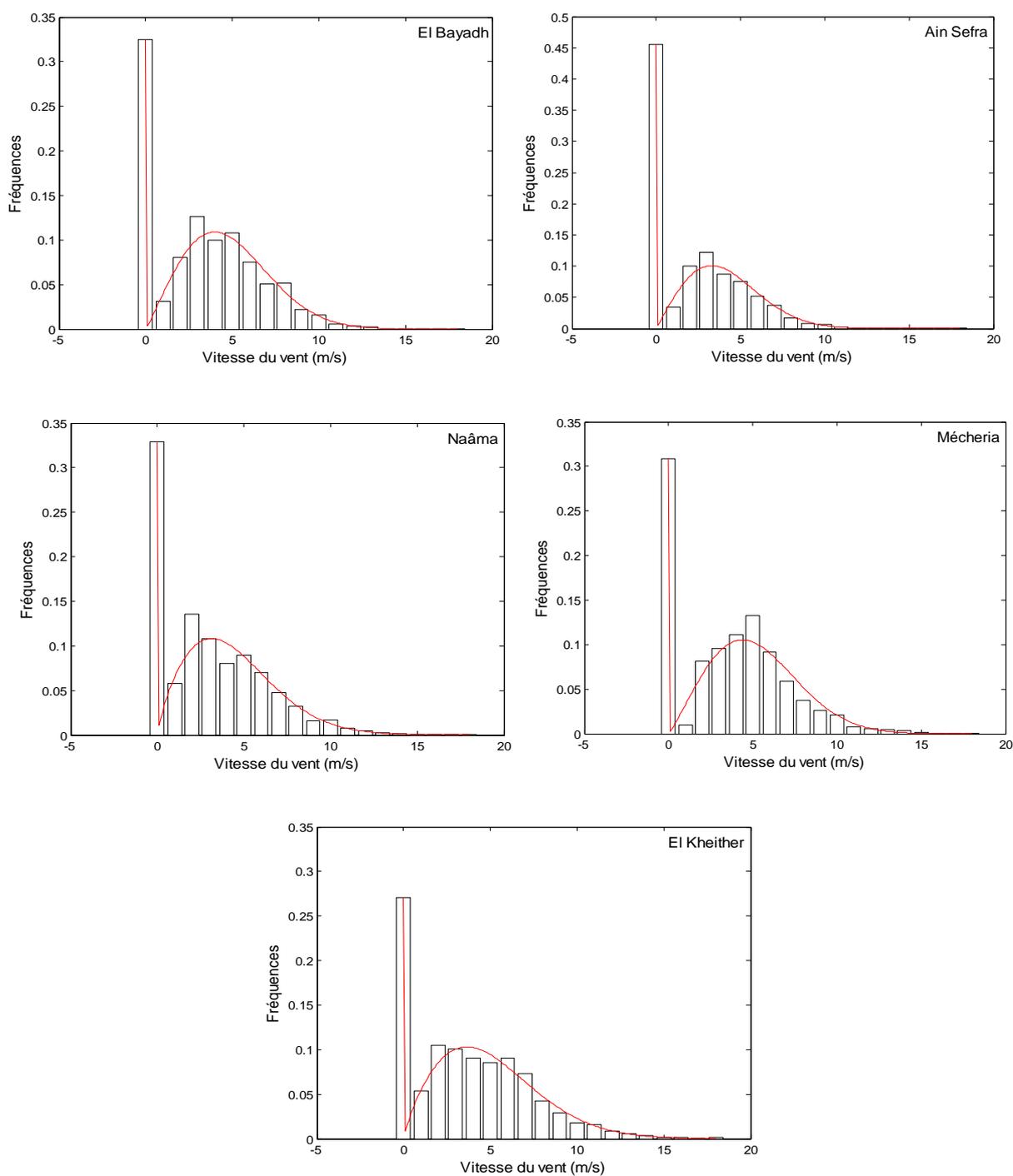


Figure 3.1 : Histogrammes en fréquences de la distribution annuelle des vitesses du vent pour les 5 stations considérées.

3.4.2.2 Détermination des paramètres vent

Le tableau 3.2 nous donne les paramètres vent calculés pour les 5 stations (toute directions confondues). D'après ces paramètres on peut dire que le maximum de fréquence nulle est enregistré à Ain Sefra (45.56%) et le minimum à

El Kheither (27.12%). Avec un facteur de forme inférieur à 2 le vent est dispersé à Nâama et El Kheither pour les autres stations le facteur de forme est supérieur à 2 donc le vent est constant avec une vitesse du vent qui tourne au tour de \bar{V} . Le facteur d'échelle est donc plus élevé pour Mécheria et El Kheither, avec une valeur de l'ordre de 6 m/s. On peut dire que ces deux stations sont les plus ventées. Ces deux stations ont par ailleurs les vitesses moyennes les plus élevées. D'après la variation de l'écart type on peut dire que la vitesse du vent varie moins à Ain Sefra que dans le reste de la zone. Pour mesurer la qualité de l'ajustement on peut calculer le coefficient de corrélation non linéaire par [129]:

$$R = \sqrt{\frac{\sum(\hat{f}-f)^2}{\sum(f-f)^2}} \quad (3.32)$$

Avec :

\hat{f} : Fréquences estimées

Tableau 3.2 : Paramètres vent calculées pour les 5 stations (toute direction confondues)

Station \ Paramètre	f_0 (%)	k	C (m/s)	\bar{V} (m/s)	σ (m/s)	R
El Bayadh	32.51	2.09	5.46	3.27	2.00	0.66
Nâama	32.93	1.79	4.97	2.96	2.10	0.65
Mécheria	30.86	2.14	5.89	3.61	2.14	0.63
El Kheither	27.12	1.81	5.70	3.69	2.48	0.75
Ain Sefra	45.56	2.01	4.65	2.24	1.58	0.79

3.4.2.3 Distribution journalière

En figure 3.2 sont représentées les distributions en fréquences des vitesses du vent durant une journée type pour les 5 stations. L'examen de ces Histogrammes montre que les vitesses nulles sont prépondérantes sauf à EL Bayadh. Le maximum de fréquences nulles se situe le plus souvent à 6h du matin (fin la nuit) et quelque fois vers 3h comme dans le cas de El Kheither. Par ailleurs, à El Bayadh cette fréquence diminue jusqu'à une valeur inférieure à 15%. Période durant laquelle la distribution tend vers une distribution classique de Weibull.

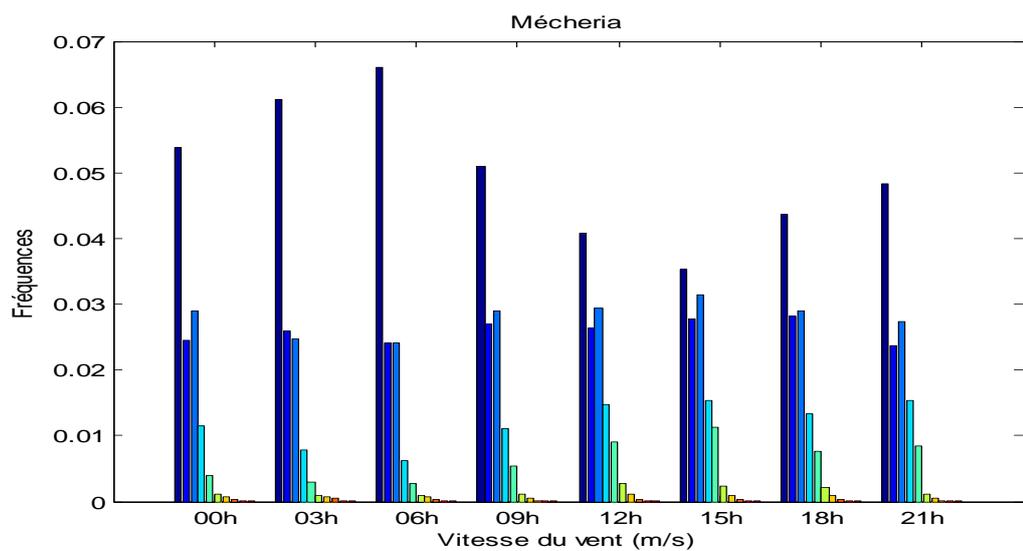
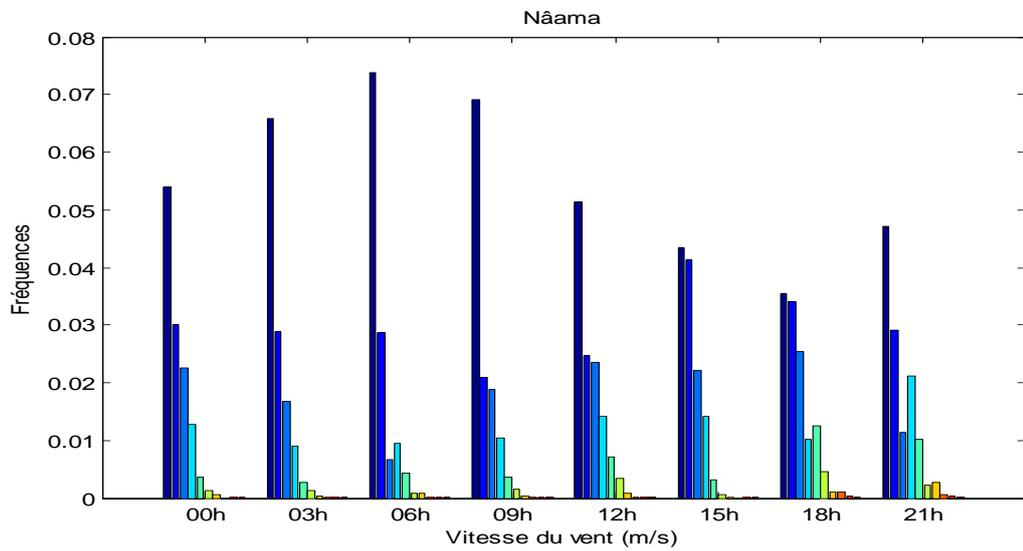
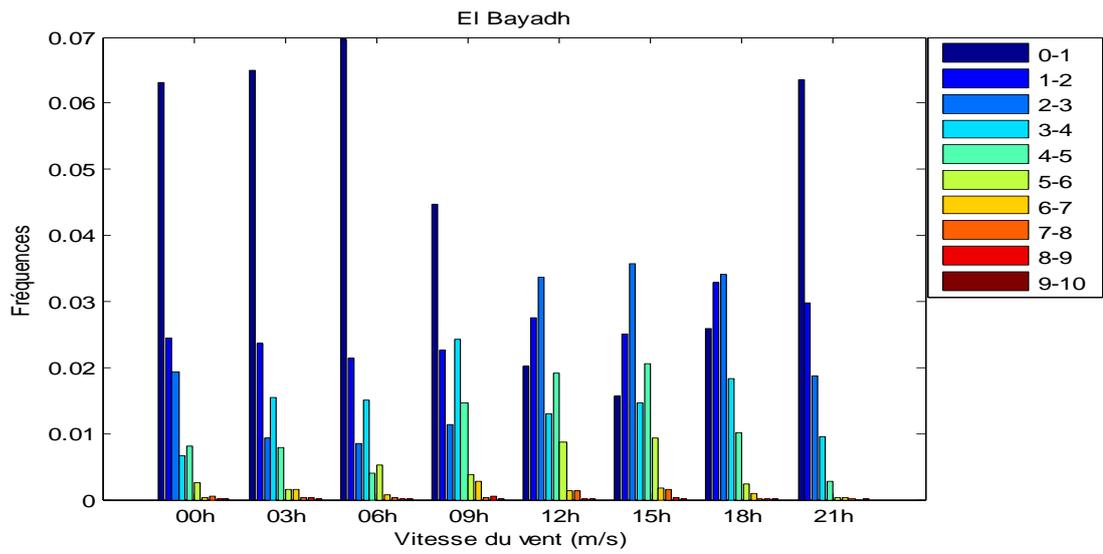


Figure 3.2 : Histogrammes en fréquences des vitesses du vent durant une journée type pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama, Mécheria)

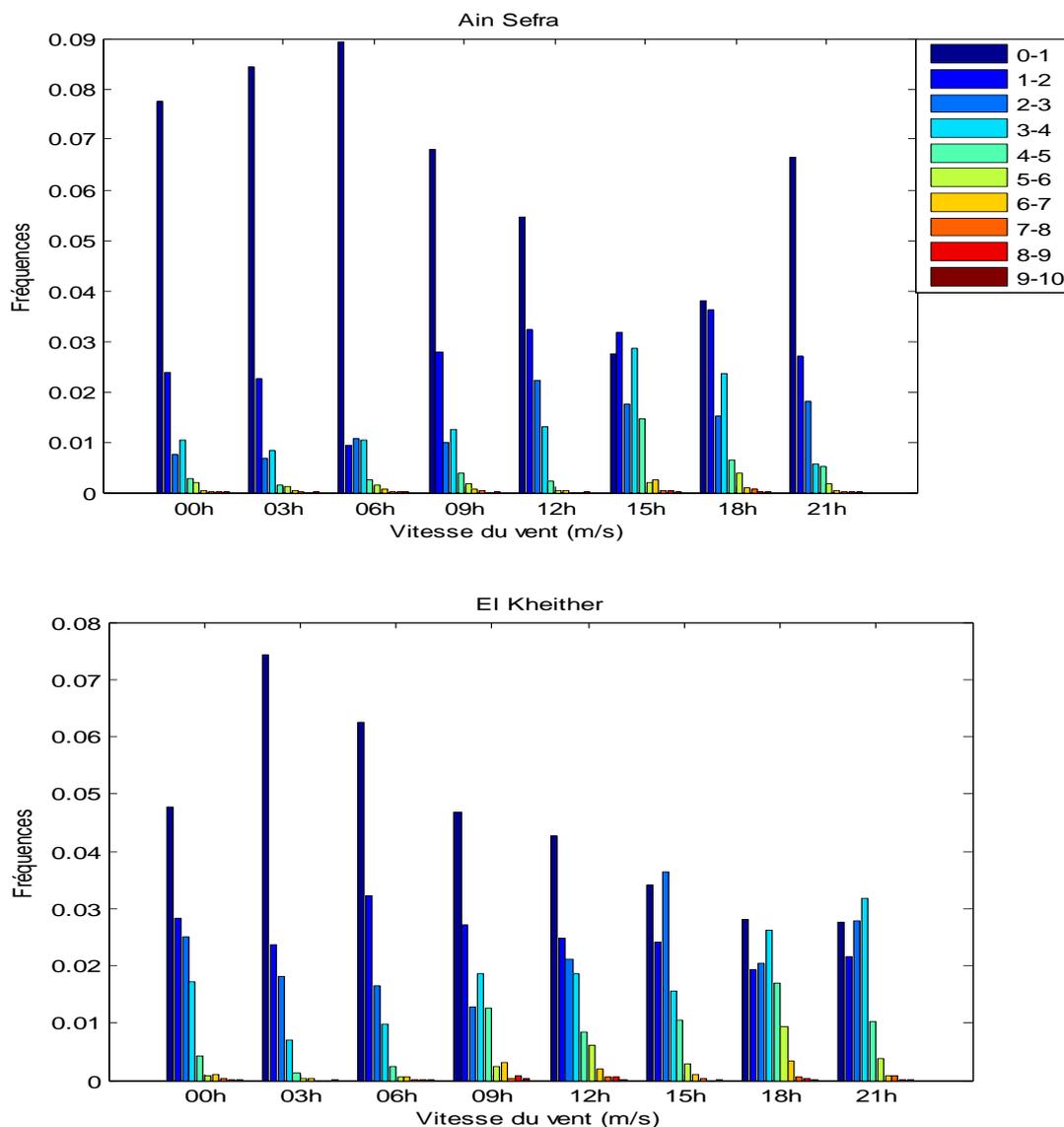


Figure 3.2 : Histogrammes en fréquences des vitesses du vent durant une journée type pour les 2 stations (Ain Sefra, El Kheither).

3.4.2.4 Variation journalière de la vitesse moyenne

La figure 3.3 représente la variation journalière de la vitesse moyenne pour les 5 stations. D'après les courbes on peut constater que la vitesse moyenne la plus élevée (supérieure à 5 m/s) est enregistrée pour El Keither, suivie par El Bayadh et Mécheria. La vitesse du vent est faible à Nâama et très faible à Ain Sefra. La vitesse maximale est enregistrées vers 15h pour toutes les stations et se prolonge jusqu'à 21h pour El Kheither.

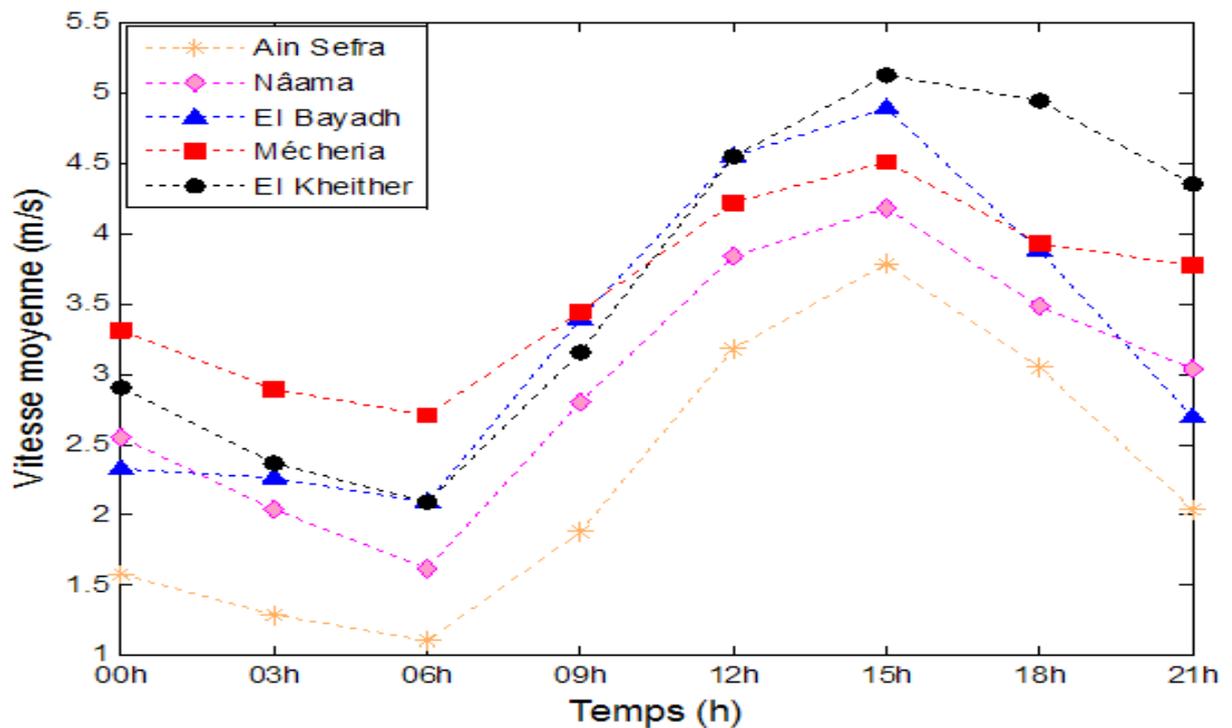


Figure 3.3 : Variation journalière de la vitesse moyenne pour les 5 stations.

3.4.2.5 Etude sectorielle de la distribution de Weibull pour une journée type

Dans cette étude on a choisi uniquement les courbes correspondant aux directions dominantes et aux directions correspondant aux vitesses élevées

3.4.2.5.1 Station d'El Bayadh

3.4.2.5.1.1 Détermination de la direction dominante annuelle pour la station d'El Bayadh

La figure 3.4 représente les variations directionnelles annuelles des fréquences de vent avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Bayadh (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en figure 2.1, annexe 2). On considérant le produit fréquence-vitesse moyenne on peut conclure que la direction dominante du vent durant l'année pour la station d'El Bayadh est la direction Sud avec une vitesse moyenne de l'ordre de 5.6 m/s, et une fréquence qui dépasse 20%, suivie par la direction Sud-ouest. Pour la direction Nord le vent domine en fréquence (25%) mais avec la vitesse efficace

la plus faible (4,3 m/s). Pour les directions Nord-ouest et Sud-est le vent à une vitesse moyenne importante dépasse 5 m/s, mais sa fréquence est faible.

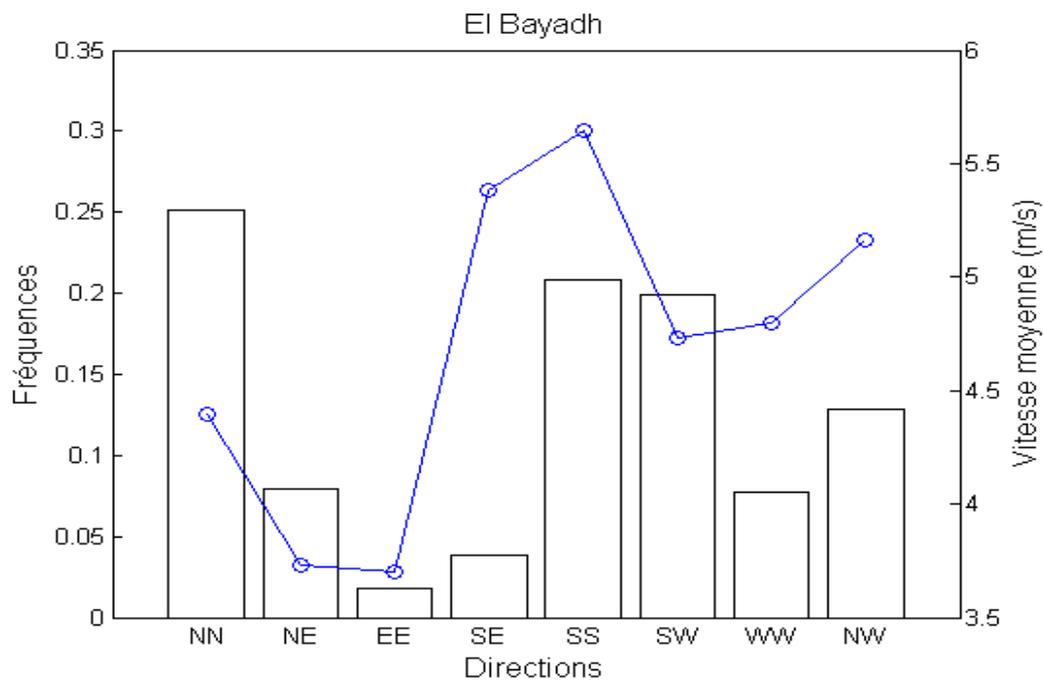


Figure 3.4 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Bayadh.

3.4.2.5.1.2 Modélisation de la vitesse du vent, selon le modèle de Weibull, pour les directions dominantes à El Bayadh

La figure 3.5 représente la distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord. Pour cette direction la vitesse du vent est maximale entre 15h et 18h période durant laquelle le mode de la distribution est de l'ordre de 4 m/s. Le reste de la journée le mode de la distribution est inférieur à 3 m/s.

El Bayadh

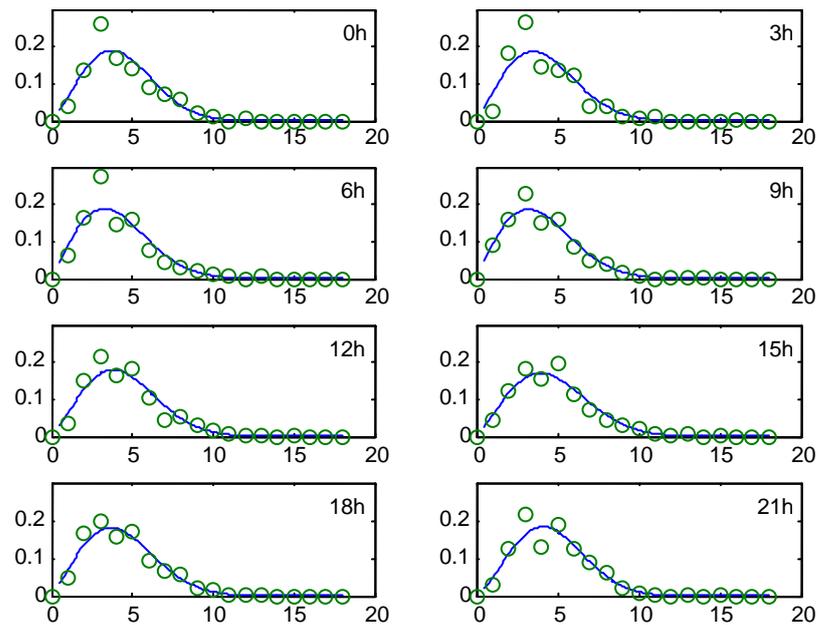


Figure 3.5 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à El Bayadh.

La figure 3.6 représente la distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud. Pour cette direction, le mode de la distribution est supérieur à 5 m/s durant la journée (9h à 15h) et de l'ordre de 5 m/s en absence du soleil (18h à 6h du matin).

El Bayadh

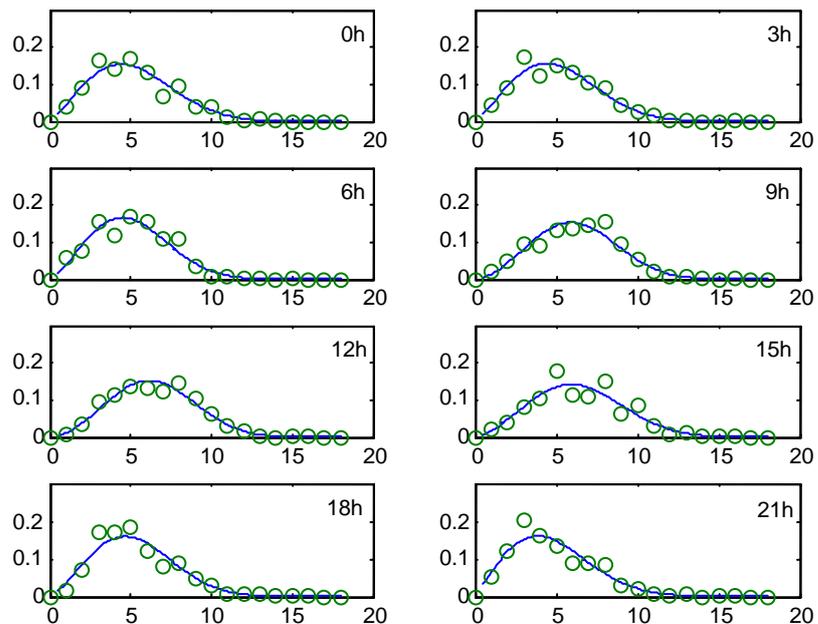


Figure 3.6 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à El Bayadh.

La figure 3.7 représente la distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest. Pour cette direction le mode de la distribution est inférieur à 3 m/s en l'absence de soleil (21h à 6h du matin), et monte rapidement à 5 m/s entre (9h et 18h).

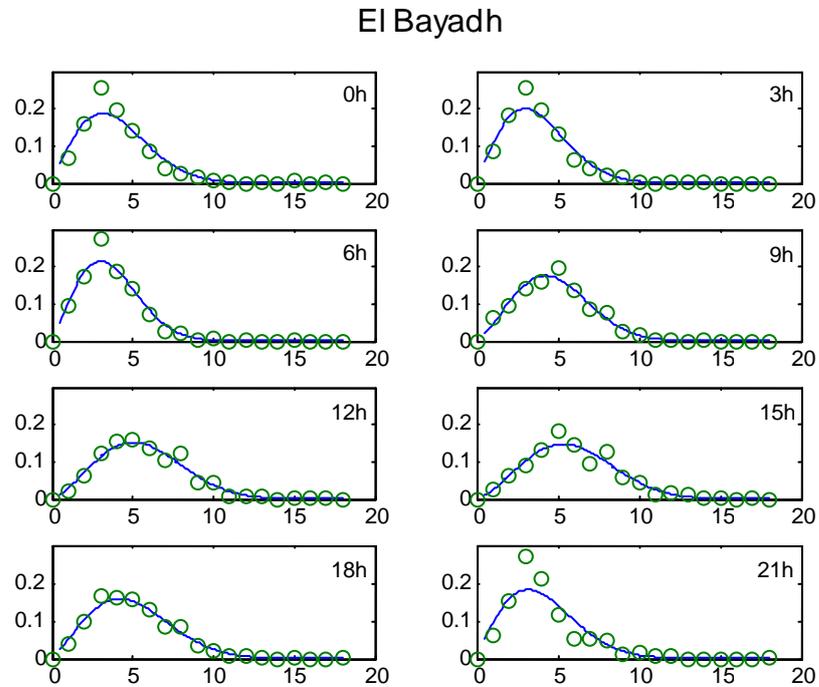


Figure 3.7 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à El Bayadh.

La figure 3.8 représente la distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest. Le mode dans cette direction est de l'ordre de 4 m/s durant toute la journée.

El Bayadh

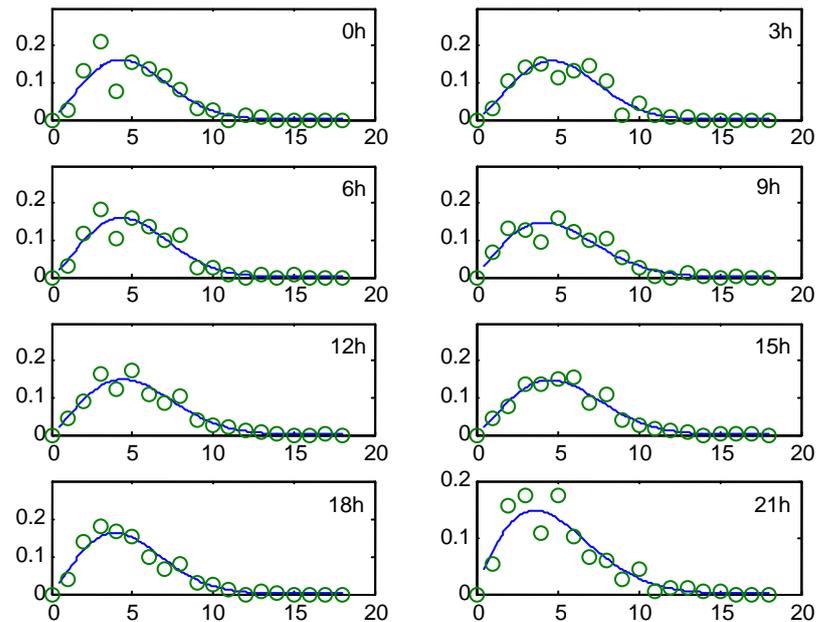


Figure 3.8 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à El Bayadh.

3.4.2.5.2 Station de Nâama

3.4.2.5.2.1 Détermination de la direction dominante annuelle pour la station de Nâama

La figure 3.9 représente les variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Nâama (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en figure 2.2, annexe 2). En considérant le produit $f_i \cdot \bar{v}_i$ on constate que pour la station de Nâama la direction dominante du vent durant l'année est la direction Sud avec une fréquence de 24% et une vitesse moyenne de 4,6 m/s suivie par la direction Nord mais avec de faibles vitesses 4,3 m/s. En troisième position on a la direction Nord-ouest avec la vitesse moyenne la plus élevée 5 m/s. Pour les directions Sud-est, Sud-ouest et Ouest le vent a une vitesse importante (4,6 m/s) mais une fréquence faible ne dépasse pas 11%.

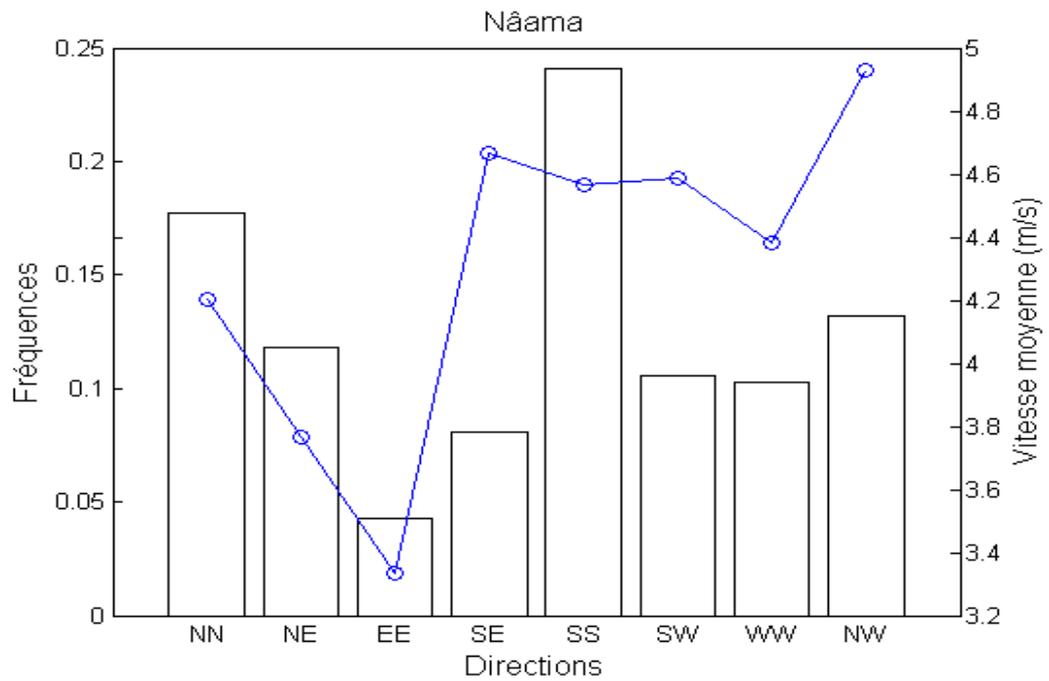


Figure 3.9 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Nâama.

3.4.2.5.2.2 Distribution de la vitesse du vent selon le modèle de Weibull pour les directions dominantes annuelles à Nâama

La figure 3.10 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord. Pour cette direction, la vitesse du vent est assez réduite durant la journée puisque le mode de la distribution est de l'ordre de 3 m/s

Nâama

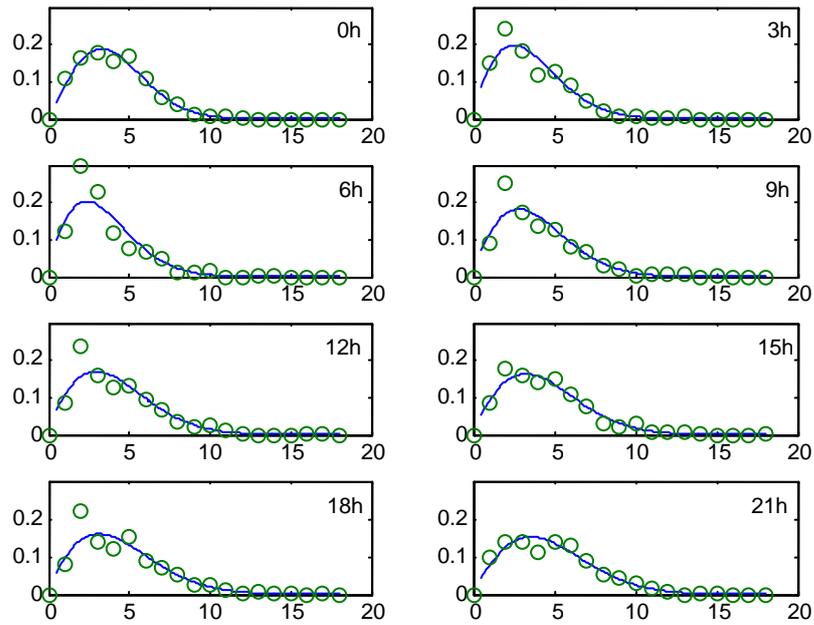


Figure 3.10 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à Nâama.

La figure 3.11 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud. Entre 21h et 6h du matin le mode est compris entre 2 et 3 m/s, ensuite il monte à 4 m/s vers 9h et se stabilise à 5 m/s entre 12h et 15h pour revenir à la valeur 4 m/s à 18h.

Nâama

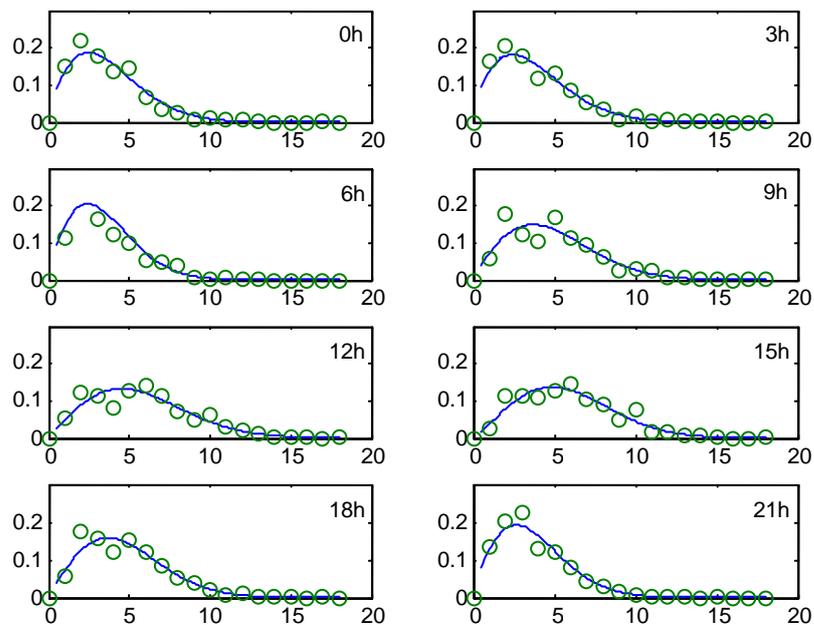


Figure 3.11: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à Nâama.

La figure 3.12 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord-ouest. Entre 18h et 6h du matin le mode tourne autour de 3 m/s. En suite il monte à 4 m/s après le lever du soleil, c'est-à-dire de 9h à 15h, ce qui est important.

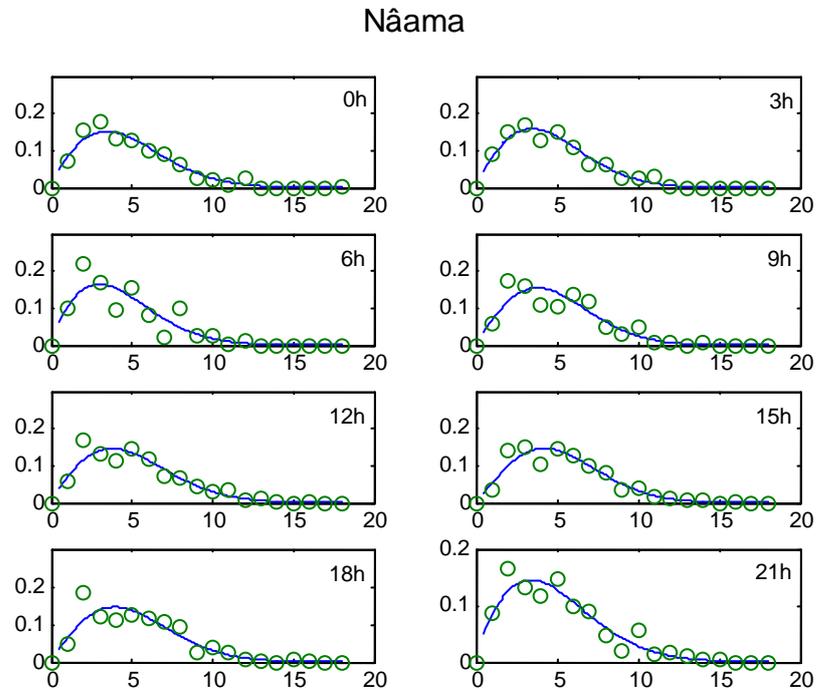


Figure 3.12: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à Nâama.

La figure 3.13 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud-est. D'après les courbes en remarque que la vitesse du vent est importante entre 9h et 12h avec un mode qui tourne au tour de 4 m/s et une vitesse maximale de 15 m/s.

Nâama

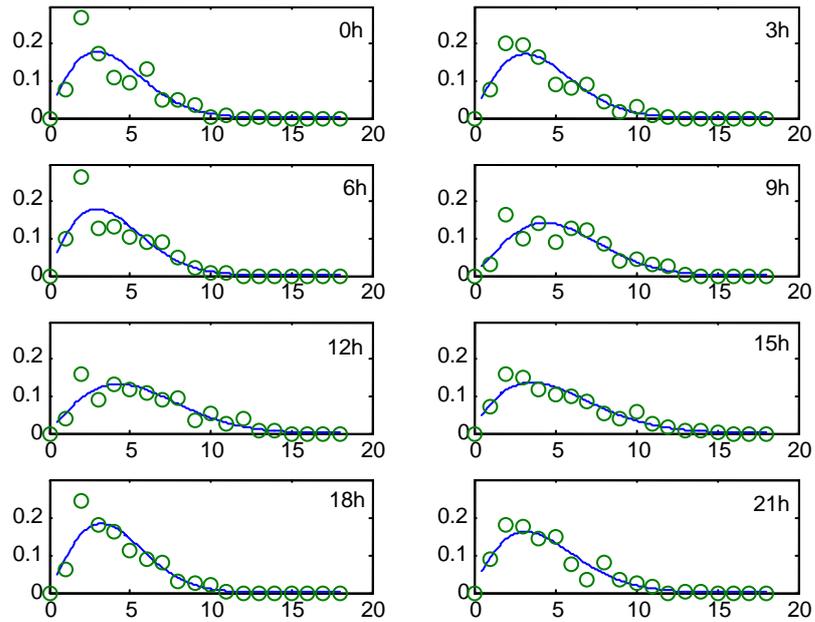


Figure 3.13: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-est à Nâama.

La figure 3.14 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud-ouest. D'après les tracés on remarque que la distribution du vent est identique à celle de la direction Sud-est.

Nâama

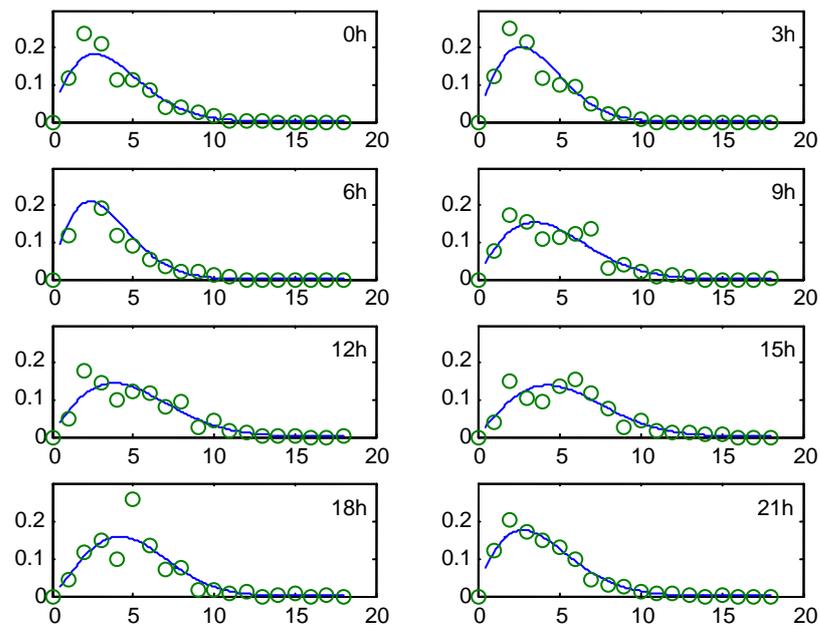


Figure 3.14: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Nâama.

3.4.2.5.3 Station de Mécheria

3.4.2.5.3.1 Détermination de la direction dominante annuelle pour la station de Mécheria

La figure 3.15 représente les variations directionnelles annuelles des fréquences de vent, avec les vitesses moyennes correspondantes, pour la station de Mécheria (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en figure 2.3, annexe 2). Au sens du produit fréquence-vitesse moyenne la direction dominante est Nord-est suivie par les directions Ouest et Nord-ouest. Pour les autres directions et surtout les directions Nord, Sud et Sud-ouest le vent a une fréquence faible mais des vitesses élevées.

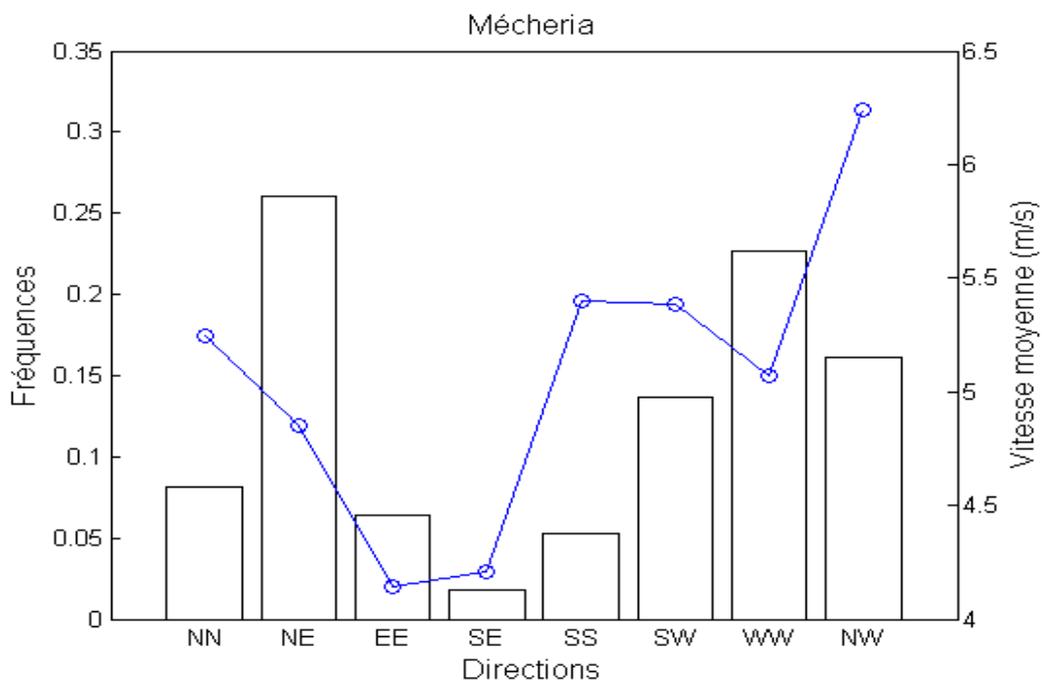


Figure 3.15 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Mécheria.

3.4.2.5.3.2 Distribution de la vitesse du vent selon le modèle de Weibull pour les directions dominantes annuelles à Mécheria

La figure 3.16 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord-est. Pour cette direction le mode est de l'ordre de 5 m/s durant pratiquement toute la journée, avec conservation du profil.

Mécheria

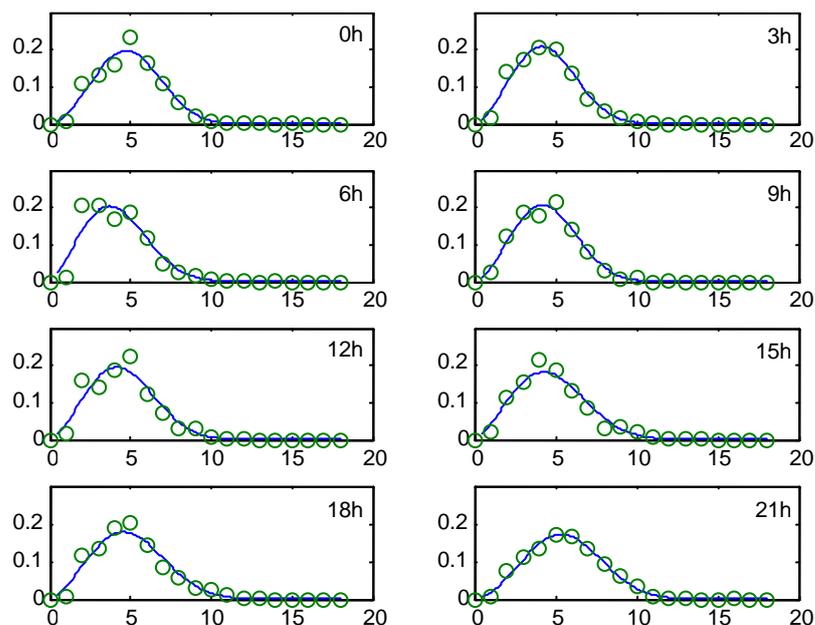


Figure 3.16: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-est à Mécheria.

La figure 3.17 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Ouest. Pour cette direction le mode est de 4 m/s en l'absence du soleil. Par la suite, il monte à 5 m/s entre 9h et 18h.

Mécheria

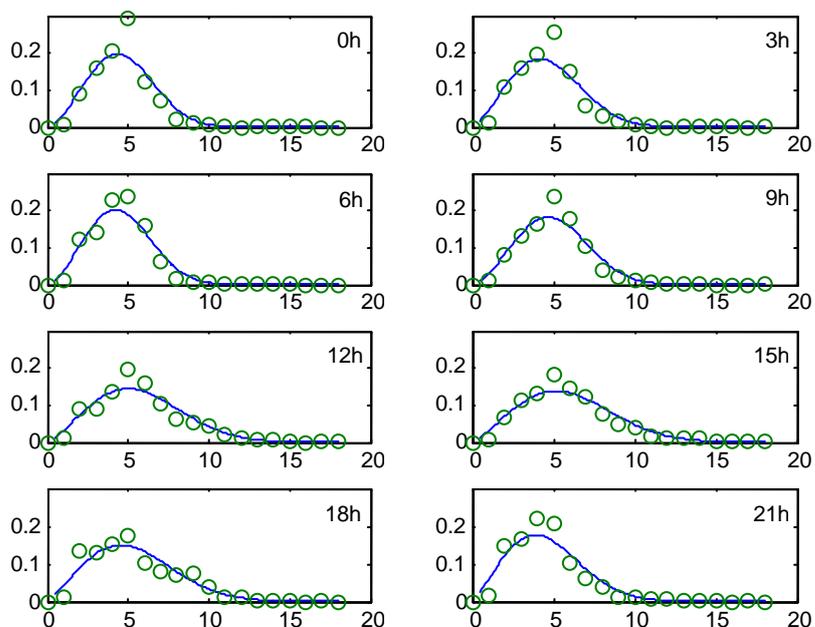


Figure 3.17: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Ouest à Mécheria.

La figure 3.18 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord-ouest. Le mode pour cette direction est important. Il est de l'ordre de 5 m/s durant toute la journée, mais il est moins constant. En observant que les courbes sont très étendues on peut déduire que le facteur d'échelle est élevé mais le facteur de forme est faible.

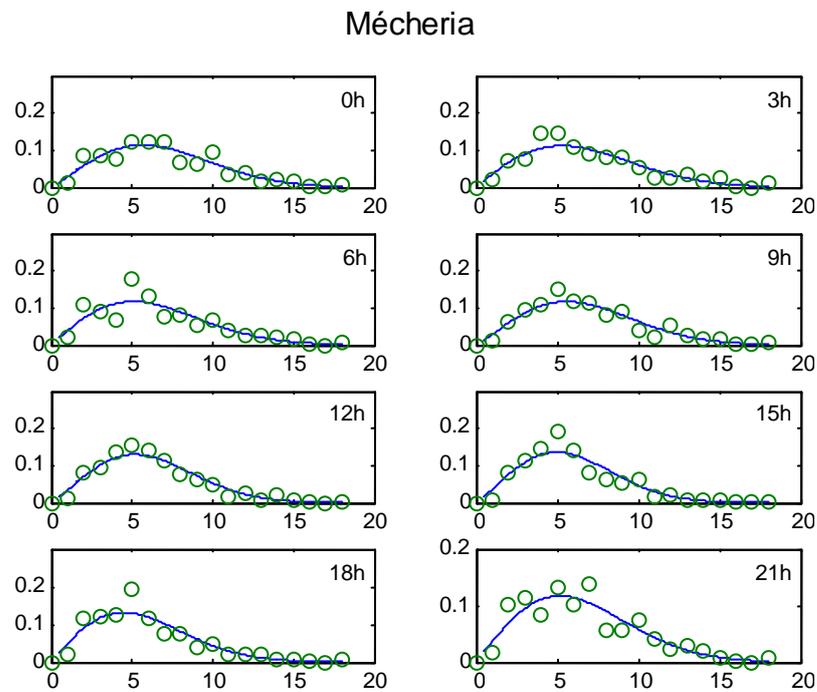


Figure 3.18 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à Mécheria.

La figure 3.19 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud-ouest à Mécheria. Le mode pour cette direction est important avec une valeur de l'ordre de 5 m/s entre 12h et 15h et de 3 m/s le reste de la journée.

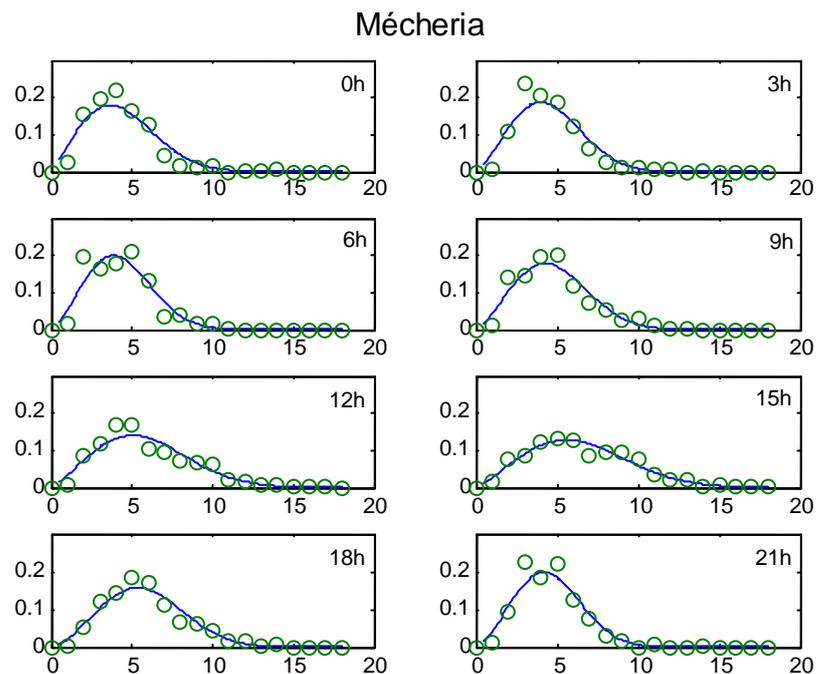


Figure 3.19 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Mécheria.

3.4.2.5.4 Station de El Kheither

3.4.2.5.4.1 Détermination de la direction dominante annuelle pour la station d'El Kheither

La figure 3.20 représente les variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Kheither (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en figure 2.4, annexe 2). Au sens du produit fréquence-vitesse moyenne on peut constater que le vent pour cette station est important surtout en vitesse avec une dominance pour les directions Nord et Nord-est, respectivement pour les directions Sud-ouest, Ouest et Nord-ouest le vent est important en vitesse mais avec des fréquences plus faibles.

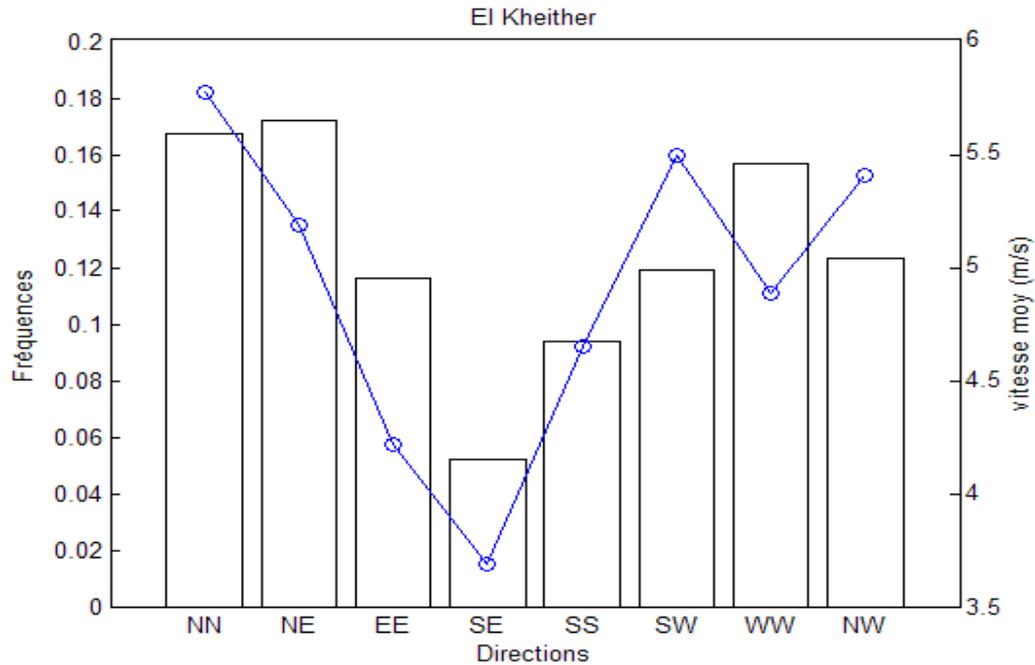


Figure 3.20 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station d'El Kheither.

3.4.2.5.4.2 Distribution de la vitesse du vent selon le modèle de Weibull pour les directions dominantes annuelles à El Kheither

La figure 3.21 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord-est à El Kheither. Le vent dans cette direction est très variable durant toute la journée, le mode est maximal vers 18h avec une vitesse de l'ordre de 7 m/s et minimal entre 3h et 6h du matin avec une vitesse de 3 m/s, le reste de la journée le mode varie entre 4 m/s et 5 m/s.

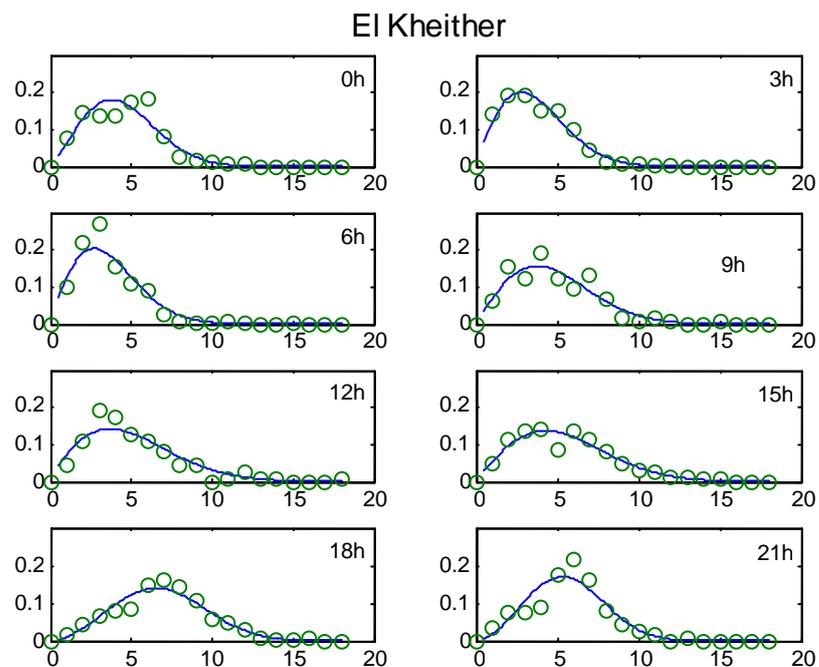


Figure 3.21: Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-est à El Kheither.

La figure 3.22 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord. Pour cette direction le vent est efficace entre 12h et 21h ou le mode est de l'ordre de 5 m/s et atteindre un maximum vers 18h. Le reste de la journée le vent est inactif.

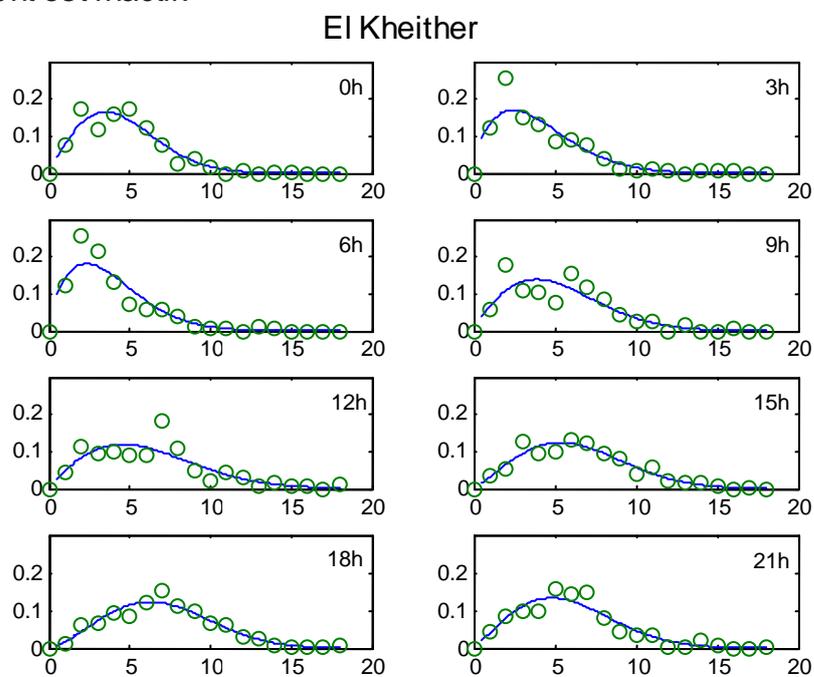


Figure 3.22 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à El Kheither.

La figure 3.23 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Ouest. Selon cette direction le profil est similaire durant toute la journée avec un mode de l'ordre de 3 m/s, sauf vers 15h où le mode passe à 5 m/s.

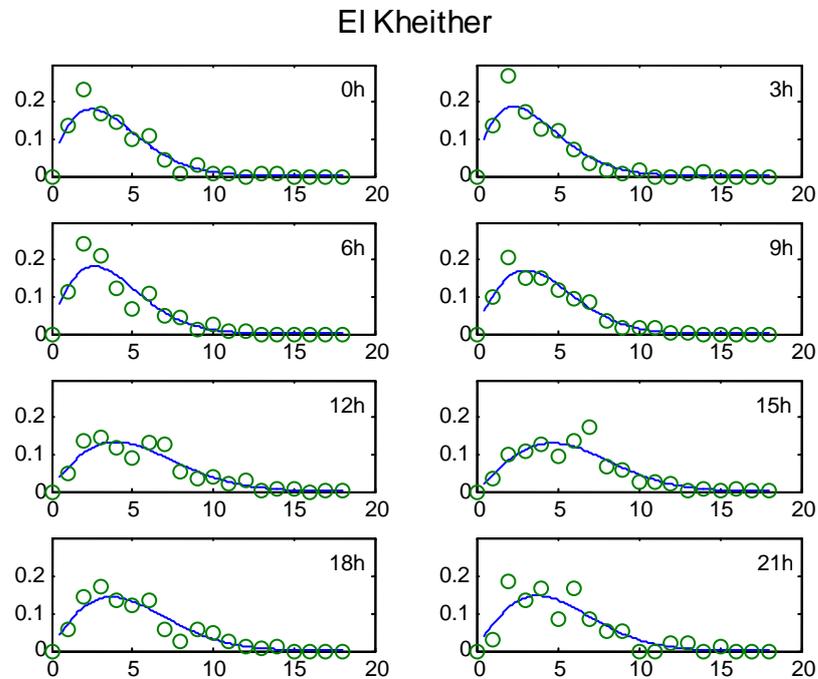


Figure 3.23 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Ouest à El Kheither.

La figure 3.24 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord-ouest. Dans cette direction le mode est inférieur à 3 m/s entre 21h et 6h (en absence du soleil) ensuite il passe à 5 m/s entre 12h et 18h (en présence du soleil).

El Kheither

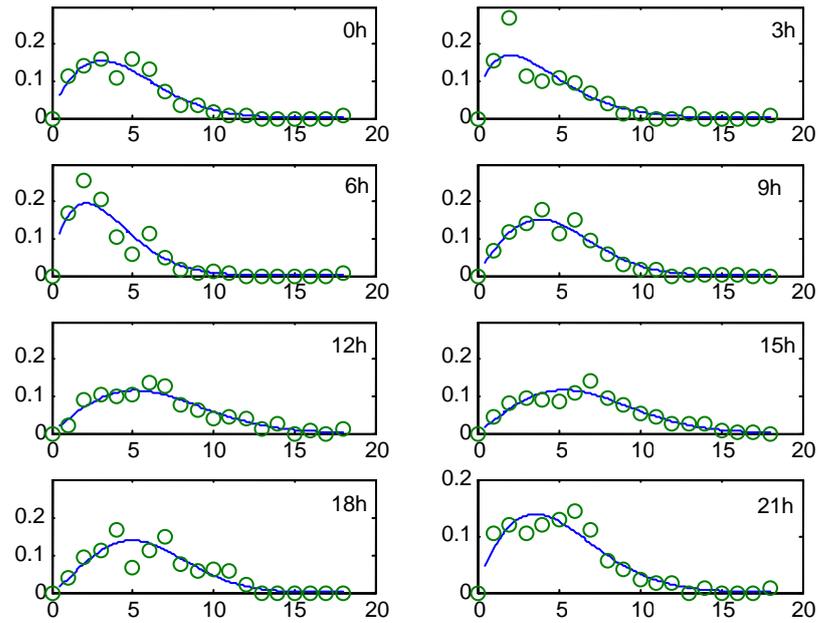


Figure 3.24 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord-ouest à El Kheither.

La figure 3.25 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud-ouest. On remarque à travers les courbes que l'évolution est pratiquement identique à la direction Nord-ouest.

El Kheither

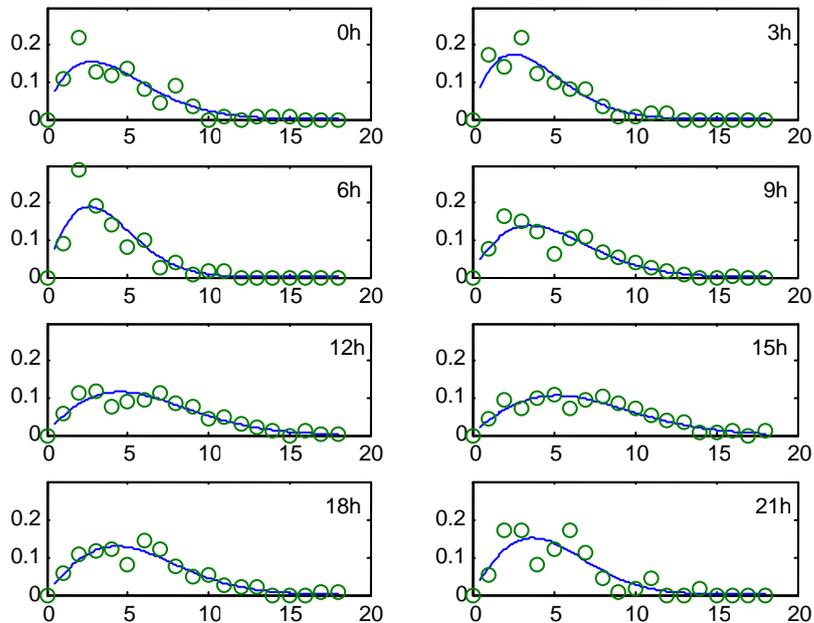


Figure 3.25 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à El Kheither.

3.4.2.5.5 Station de Ain Sefra

3.4.2.5.5.1 Détermination de la direction dominante annuelle pour la station de Ain Sefra

La figure 3.26 représente les variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Ain Sefra (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en figure 2.5, annexe 2). Au sens du produit fréquence-vitesse moyenne, la direction dominante à Ain Sefra est plein Sud suivie par les directions Sud-ouest et Nord pour les directions Sud-est et Nord-ouest l'activité éolienne reste importante

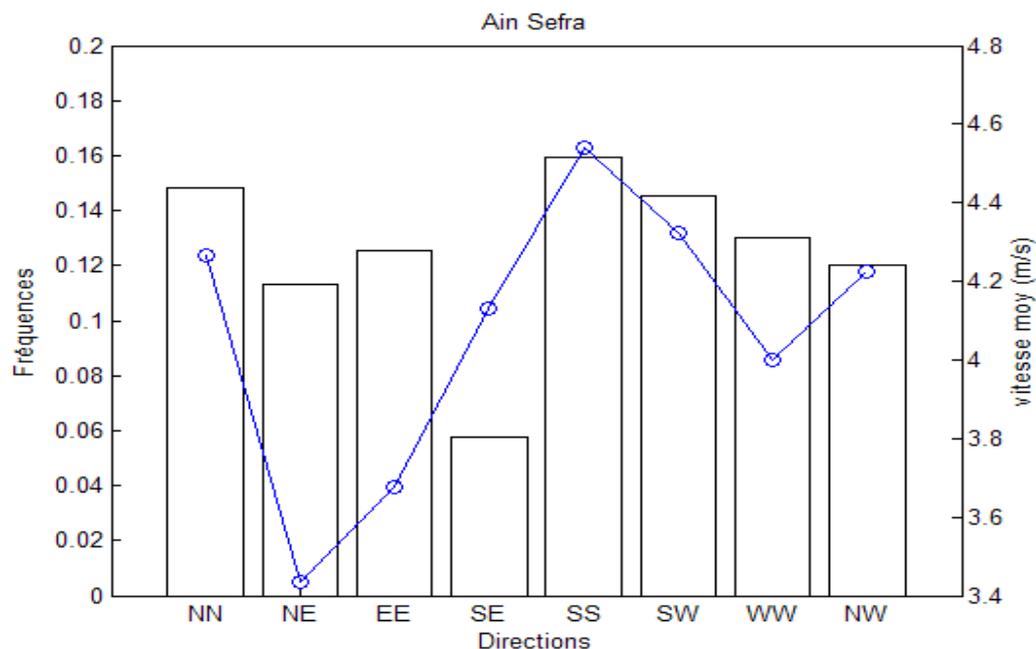


Figure 3.26 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents avec les vitesses moyennes correspondantes pour la station de Ain Sefra.

3.4.2.5.5.2. Distribution de la vitesse du vent selon le modèle de Weibull pour les directions dominantes annuelles à Ain Sefra

La figure 3.27 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud à Ain Sefra. Selon cette direction les vitesses du vent sont assez élevées entre 12h et 18h avec un mode de 5 m/s enregistré vers 15h et une activité réduite dans les autres heures de la journée avec un mode qui tourne au tour de 2 à 3 m/s.

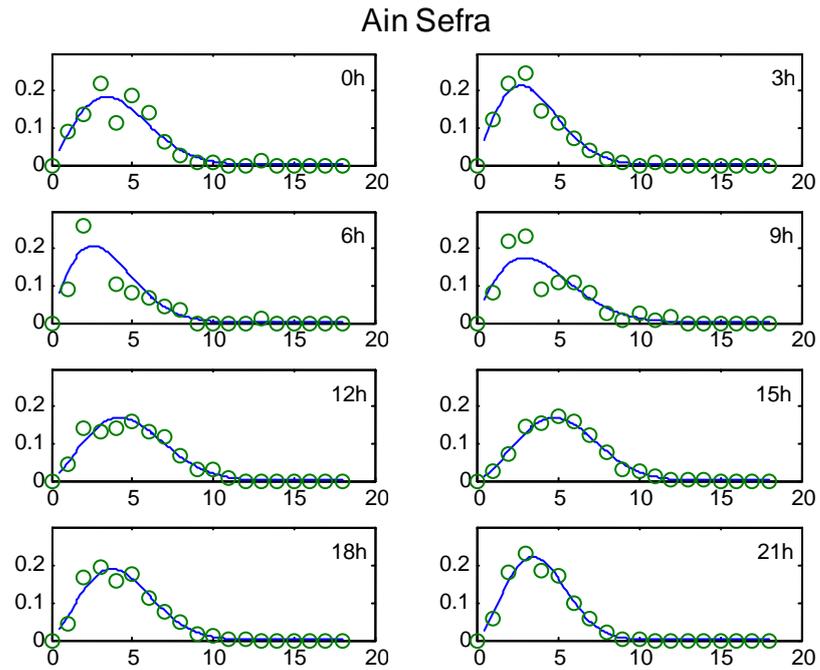


Figure 3.27 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud à Ain Sefra.

La figure 3.28 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Sud-ouest. Pour cette direction le mode est de 2 à 3 m/s entre 21h et 12h pour atteindre un maximum de 5 m/s vers 15h et redescendre à 4 m/s à 18h. Au vu des différentes courbes d'ajustement, on peut affirmer que le choix de la distribution Weibull est parfaitement adapté.

Ain Sfra

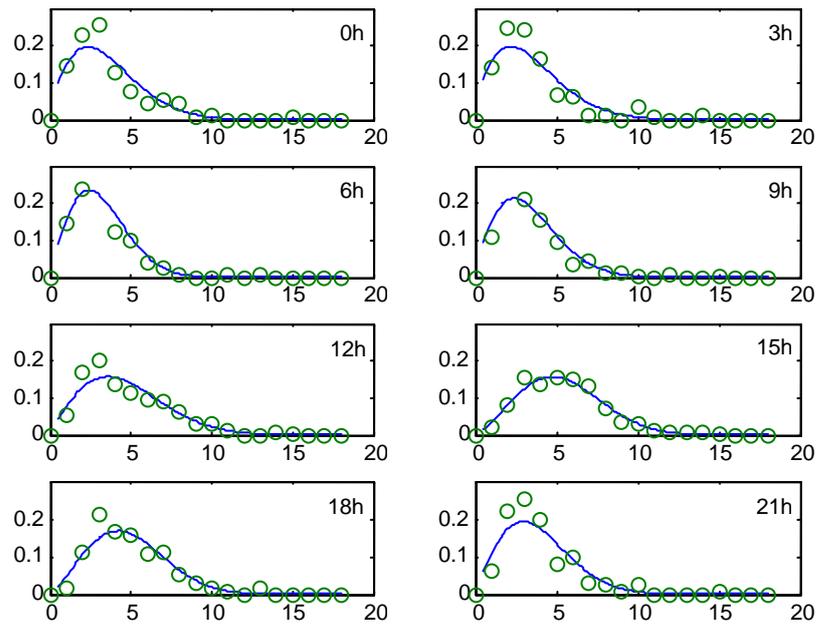


Figure 3.28 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Sud-ouest à Ain Sfra.

La figure 3.29 représente la distribution journalière de la vitesse du vent pour la direction Nord. Le vent dans cette direction est pratiquement inactif durant toute la journée sauf vers 21h où le mode atteint une valeur de l'ordre de 4 m/s.

Ain Sfra

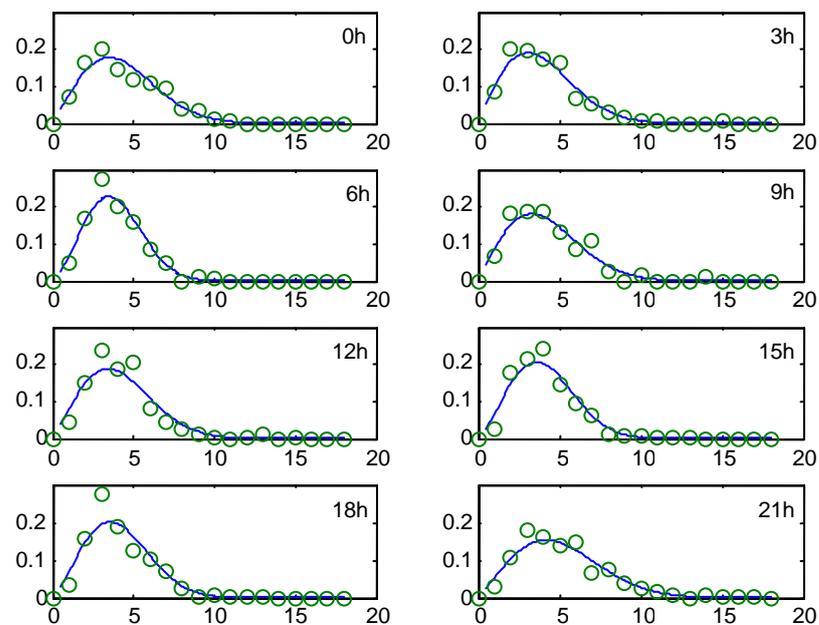


Figure 3.29 : Distribution journalière de la vitesse de vent pour la direction Nord à Ain Sfra.

3.4.2.6 Caractérisation des Régimes de Vent

Les paramètres de Weibull à l'échelle tri horaire, qui caractérisent chaque direction ont été déterminés pour les 5 stations. D'après les tableaux 3.1 à 3.10 en annexe 3. On remarque que ces paramètres sont plus élevés que ceux estimés pour la région centre des Hauts Plateaux [126].

D'après la variation du facteur de forme et du facteur d'échelle on peut constater que la direction dominante ne correspond pas souvent aux directions les plus ventées (facteur d'échelle maximum) et au vent le plus constant (facteur de forme maximum), ainsi :

A El Bayadh et Nâama les directions les plus ventées avec un facteur de d'échelle supérieur à 5 m/s sont Sud, Sud-est, Sud-ouest et Nord-ouest avec un vent plus fort pour la direction Sud de 9h à 15h pour El Bayadh et de 12h à 15h pour Nâama.

De plus, pour Nâama, le vent est dispersé ; car pour toutes les directions le facteur de forme est inférieur à 2.

A Mécheria le vent existe dans toutes les directions avec un facteur d'échelle plus élevé pour la direction Nord-ouest de 21h à 9h du matin. Les vitesses les plus faibles sont enregistrées pour les directions Est et Sud-est.

A El Kheither, le vent est fort pour toutes les directions sauf selon les directions Est et Sud-est. Le facteur d'échelle le plus élevé est de l'ordre de 8 m/s enregistré pour la direction Sud-ouest à 15h.

A Ain Sefra les directions les plus ventées correspondent aux directions Sud, Sud-ouest et Ouest de 12h à 18h avec un vent plus important pour la direction Sud-ouest et cela de 12h à 15h. Pour la variation du facteur de forme selon ces directions, la valeur la plus élevée est de l'ordre de 2.5 pour la direction Sud enregistré vers 15h et inférieure pour les autres directions.

Pour les directions faiblement ventées (facteurs de forme et échelle faibles) durant la journée sont Nord-est et Est pour El Bayadh, Nâama et Ain Sefra et Est et Sud-est pour Mécheria et El Kheither.

3.4.2.7 Variations horaires de la vitesse et de la direction du vent

La figure 3.30 représente Variations horaires de la vitesse et de la direction du vent pour les 5 stations. Ces courbes montrent que les vitesses moyennes varient de 3 à 7 m/s et que les directions correspondant aux vitesses maximales varient selon la station.

Pour Naâma et El Bayadh le vent est plus fort dans la direction Sud suivie par les directions Sud-est et Sud-ouest. Pour la direction Nord-ouest la vitesse du vent est presque constante durant toute la journée avec une valeur de 5 m/s.

A Mécheria la vitesse moyenne maximale est de 7m/s enregistrée pour la direction Nord-ouest de 00h à 9h du matin. Au milieu de la journée la direction du vent devient Sud, Sud-ouest et la vitesse diminue à 6,5 m/s.

A El Kheither les vitesses moyennes les plus élevées sont enregistrées de 12h à 15h pour les directions Sud-ouest et Nord-ouest et vers 18h pour les directions Nord, Nord-est avec une vitesse maximale pour la direction Nord.

A Ain Sefra le vent est plus fort pour les directions Sud, Sud-ouest et Ouest de 12h à 15h.

Par ailleurs, on peut constater que les directions qui correspondent aux vitesses moyennes les plus faibles coïncident avec les directions faiblement ventées, c'est-à-dire les directions Nord-est et Est pour El Bayadh, Nâama et Ain Sefra et Est, Sud-est pour Mécheria et El Kheither et où la vitesse moyenne varie de 3 m/s à 5 m/s.

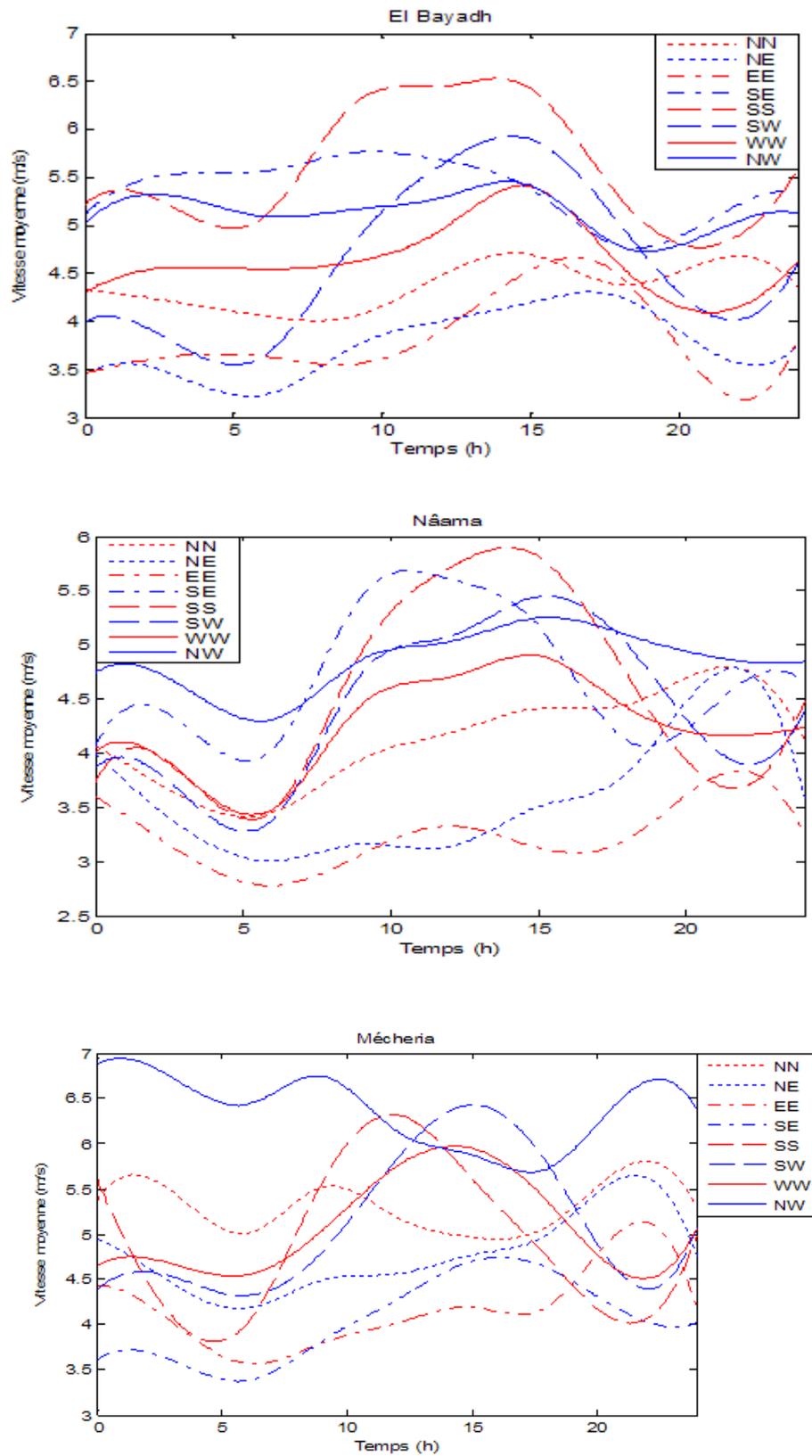


Figure 3.30 : Variation directionnelle journalière de la vitesse moyenne pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama et Mécheria).

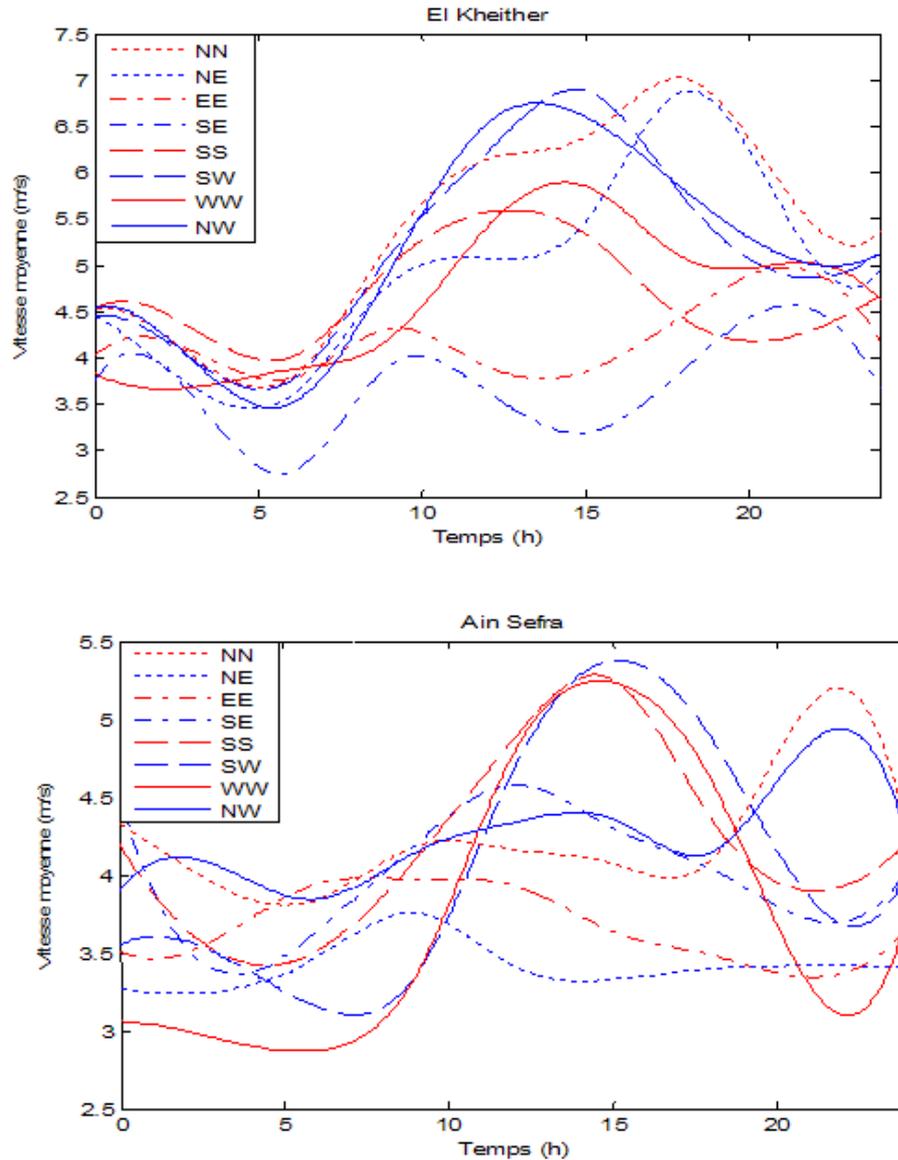


Figure 3.30 : Variation directionnelle journalière de la vitesse moyenne pour les 2 stations (El Kheither et Ain Sefra).

3.4.2.8 Distribution saisonnière

Les courbes de la figure 3.31 représentent la variation saisonnière des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations. On peut y voir que pour Nâama, El Bayadh, Mécheria et El Kheither le printemps, l'été et l'Automne sont les saisons les plus ventées. Pour ces saisons les distributions sont plus ramassées (vitesses régulières) avec déplacement du mode vers la droite (donc des vents plus forts). Pour Ain Sefra le vent est le plus important au printemps.

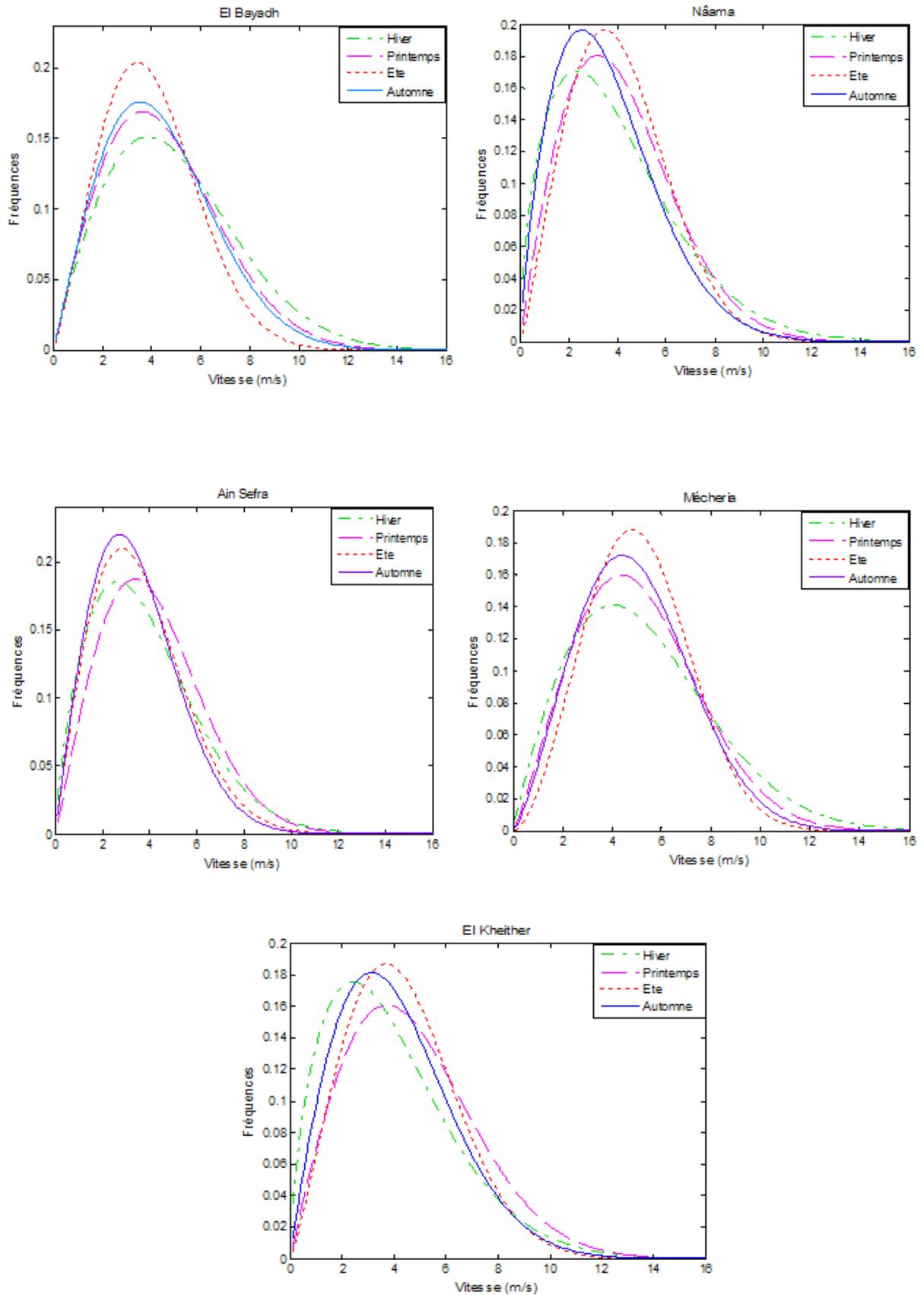


Figure 3.31 : Variation saisonnière des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations.

3.4.2.9 Distribution mensuelle

La figure représente 3.32 la variation mensuelle des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations. A Ain Sefra le vent est faible de Septembre à Mars et important le reste de l'année, mais avec une vitesse faible de l'ordre de 4 m/s et concentrée le plus souvent de 12h à 18h.

A Nâama les vents efficaces existent durant toute l'année, mais le vent le plus fort et qui dure le plus longtemps est observé en Avril et Mai.

Pour les autres stations les vents efficaces sont observés durant toute l'année mais avec des vitesses et des durées plus importantes durant la période s'étalant de Mars à Septembre.

On peut aussi constater que la station d'El Kheither est la plus ventée avec une vitesse de vent de l'ordre de 7 m/s.

Pour toutes les stations, le maximum de vitesse est enregistré vers 15h. Ceci, à l'exception d'El Kheither où la vitesse maximale est enregistrée vers 18h particulièrement entre Avril et Aout.

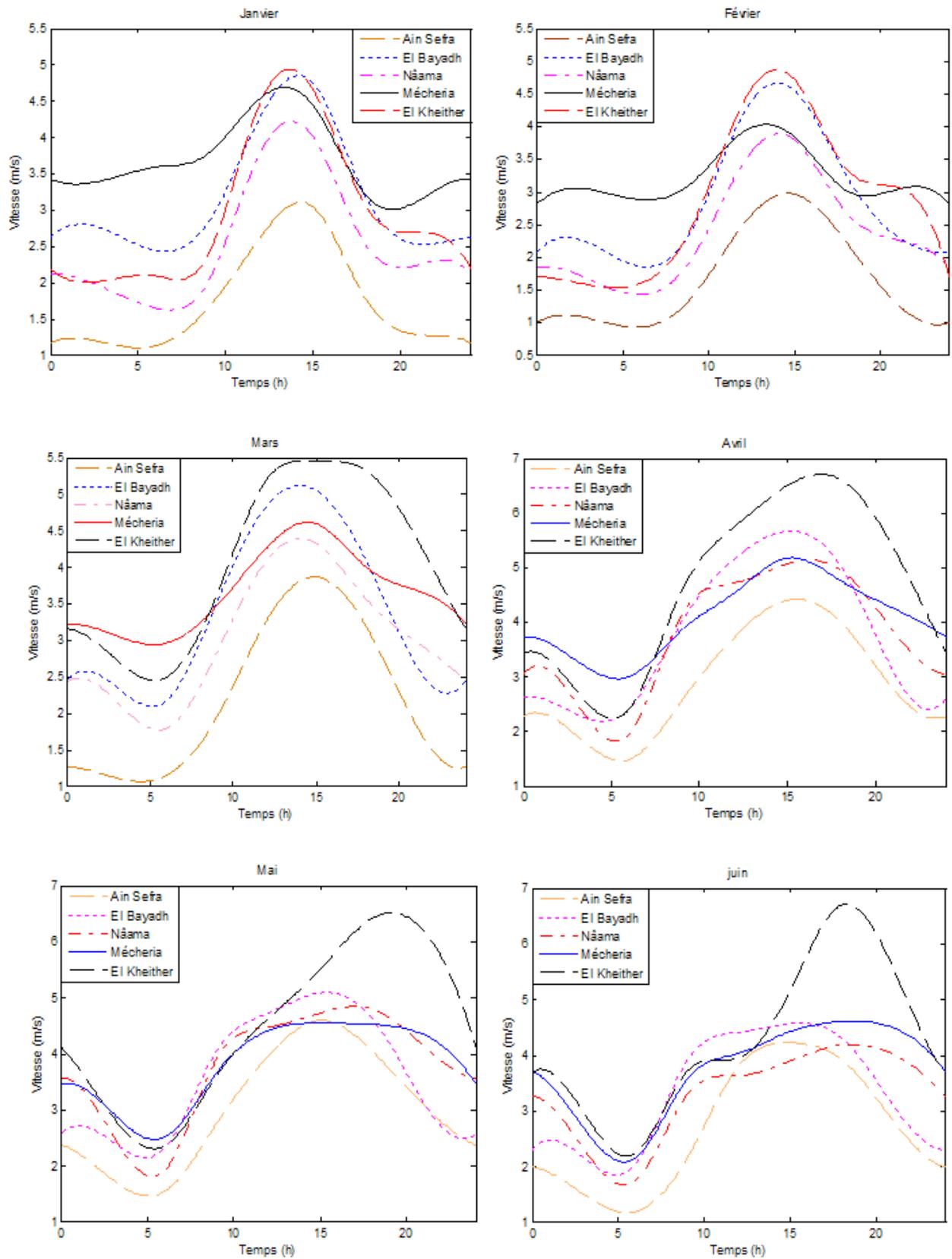


Figure 3.32 : Variation mensuelle des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations.

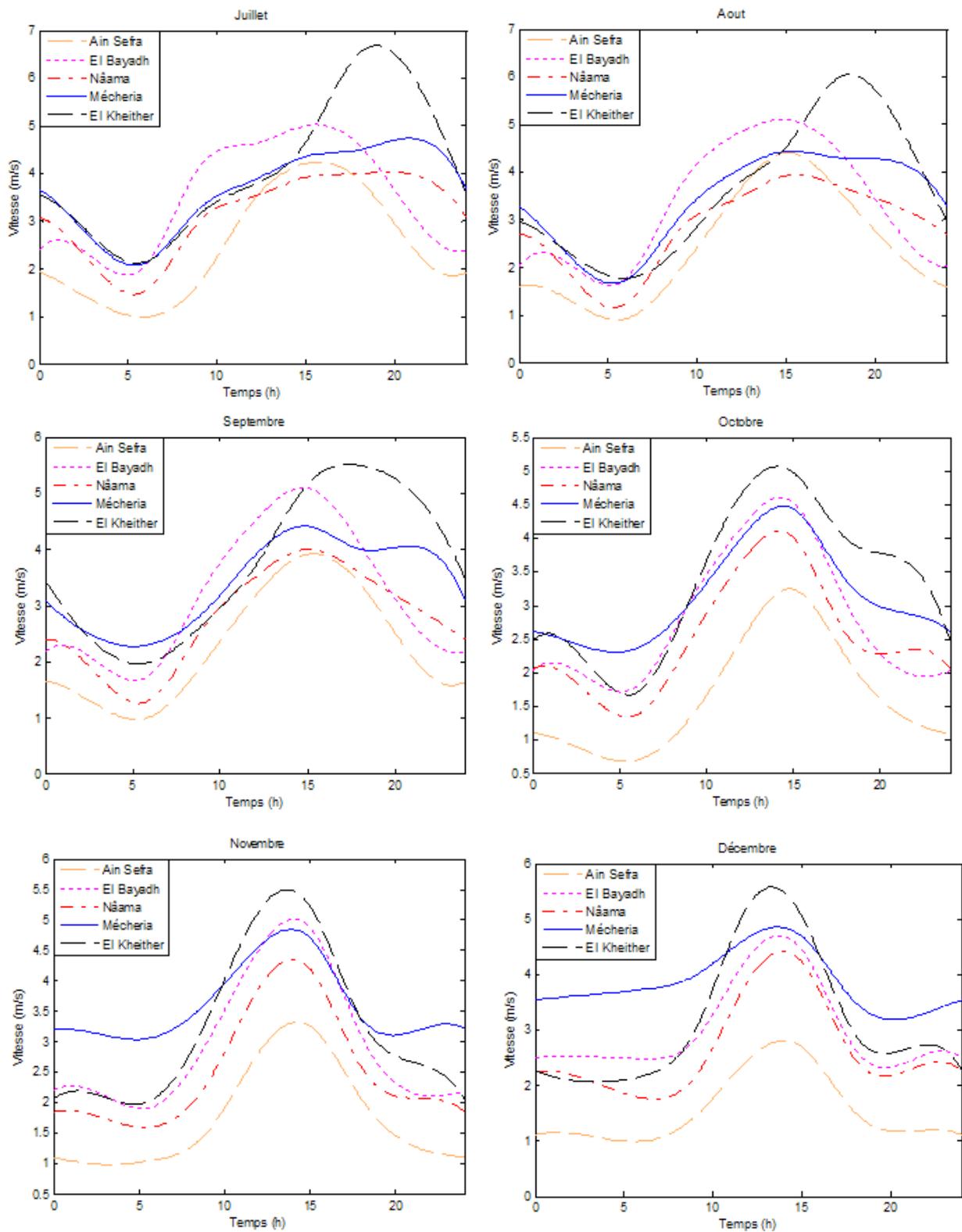


Figure 3.32 : Variation mensuelle des vitesses de vent enregistrées pour les 5 stations (suite)

3.5 Conclusion

La fréquence des vents calmes est prépondérante pour Naâma, Mécheria, El Kheither et Ain Sefra avec un maximum de 45% à Ain Sefra et un minimum de 27% à El Kheither ce qui impose l'utilisation de la distribution Hybride Weibull. Par ailleurs, à El Bayadh cette fréquence diminue jusqu'à 15% où la distribution tend vers une distribution classique de Weibull.

Le maximum de fréquences nulles se situe le plus souvent vers 6h du matin et quelque fois vers 3h comme dans le cas d'El Kheither.

On considérant le produit fréquence-vitesse moyenne, les directions dominantes annuelles sont : Sud à El Bayadh, Nâama et Ain Sefra. Nord-est à Mécheria Nord, Nord-est à El Kheither.

D'après la variation du facteur de forme et du facteur d'échelle on conclue que les directions les plus ventées sont : Sud, Sud-est, Sud-ouest et Nord-ouest à El Bayadh et Nâama avec un vent plus fort pour la direction Sud de 9h à 15h pour El Bayadh et de 12h à 15h pour Nâama.

De plus, pour Nâama le vent est moins constant ; car pour toutes les directions le facteur de forme est inférieur à 2.

A Mécheria le vent est important dans toutes les directions sauf les directions Est et Sud-est. La vitesse moyenne maximale est de 7 m/s enregistrée pour la direction Nord-ouest de 00h à 9h du matin. Au milieu de la journée la direction du vent devient Sud, Sud-ouest et la vitesse diminue à 6,5 m/s.

A El Kheither les directions les plus ventées et qui correspondent aux vitesses moyennes les plus élevées sont : Sud-ouest et Nord-ouest de 12h à 15h et Nord, Nord-est vers 18h avec une vitesse maximale pour la direction Nord.

A Ain Sefra les directions les plus ventées et qui correspondent aux vitesses moyennes les plus élevées sont : Sud, Sud-ouest et Ouest de 12h à 15h. Pour les directions Nord, Nord-ouest le facteur d'échelle est presque constant durant toute la journée avec une vitesse moyenne maximale vers 21h.

Les directions faiblement ventées (facteurs de forme et échelle faibles) sont Nord-est et Est pour El Bayadh, Nâama et Ain Sefra et Est, Sud-est pour Mécheria et El Kheither.

Les saisons les plus ventées sont le printemps et l'été pour toutes les stations. A El Bayadh et Mécheria le vent est également observé en Automne et en Hiver.

A Ain Sefra et Nâama le vent est important en Avril et Mai. Pour les autres stations les vents efficaces sont observés durant toute l'année mais avec des vitesses et des durées plus importantes de Mars à Septembre.

Pour tout les mois, le maximum de vitesse est enregistré vers 15h à l'exception d'El Kheither où la vitesse maximale est enregistrée à 18h particulièrement entre Avril et Aout.

La vitesse maximale enregistrée est de l'ordre 18 m/s à El Kheither et 15 m/s pour les autres stations.

On peut donc dire que les vents de sable touchent toutes les stations mais avec une fréquence et une vitesse inférieure pour Naâma et Ain Sefra.

CHAPITRE 4

VENTS EFFICACES ET VENTS DE SABLE

4.1 Introduction

Les vents de sable ou les lithométéores constituent un ensemble des éléments climatiques qui caractérisent une situation spécifique du temps caractéristiques des latitudes arides et semi-arides.

L'augmentation des fréquences des vents de sable résulte de l'intensification de la circulation méridienne et de la dégradation du milieu naturel.

Un lien très fort existe entre la réduction de la pluviométrie et l'augmentation significative de l'occurrence des lithométéores.

L'Atlas international des nuages (OMM, 1973) définit les lithométéores comme un météore consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses et qui se trouvent plus au moins en suspension dans l'atmosphère ou soulevées par le vent [128].

D'après la vitesse du vent et la visibilité, les vents de sable peuvent être classés en tempêtes de sable violente, tempêtes moyennement violente, chasses poussières élevées ou brumes de poussières.

4.2 Objectifs

Ce chapitre a pour but l'étude de la variation directionnelle journalière et saisonnière des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 5 stations. Ceci dans le but de déterminer les directions dominantes des vents efficaces, ainsi que les heures correspondant aux vents efficaces les plus fréquents.

En seconde partie, une étude est réalisée, par l'utilisation des données vents correspondant aux observations de vents de sable afin de déterminer les directions dominantes des vents de sables, la variation directionnelle de la vitesse moyenne ainsi que la distribution fréquentielle mensuelle pour chaque station.

La dernière partie est consacrée à la validation par comparaison entre les résultats obtenus dans le chapitre 3 et le chapitre 4.

4.3 Méthodologie

D'après des études faites dans la région Sud des hauts plateaux par Messen et Kasbadji Merzouk en 2002 et A. Bensaid en 2006, la vitesse des vents efficace est estimée à 4 m/s. Valeur qui sera adoptée pour l'estimation de la fréquence des vents efficaces.

L'estimation des fréquences cumulées des vents efficaces est effectuée par intégration de la fonction de la loi de Weibull (équation 3.10) au seuil de 4 m/s, [94, 111].

4.4 Résultats

4.5.1 Variations directionnelles et journalières des fréquences cumulées des vents efficaces

En figure 4.1 sont représentées les variations directionnelles et journalières des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 5 stations. L'examen de ces histogrammes montre que les directions dominantes pour les vents efficaces sont Sud pour Naâma et El Bayadh et oscillent entre Sud, Sud-ouest et Ouest à Ain Sefra et ceci en plein milieu d'après midi. De plus, pour la station de Ain Sefra les vents efficaces ont une fréquence importante selon la direction Nord vers 21h.

Pour la station d'El Kheither les vents efficaces sont Sud-ouest et Nord-ouest entre 12h et 15h et Nord, Nord-est le soir à 18h.

Enfin, pour la station de Mécheria le vent efficace est plus fréquent selon les directions Sud-Sud-ouest entre 12h et 15h et selon la direction Nord-ouest le reste de la journée.

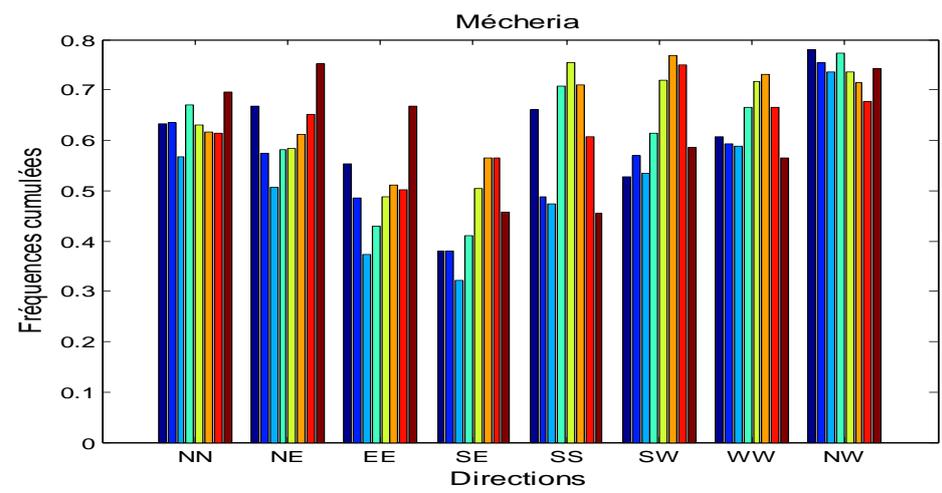
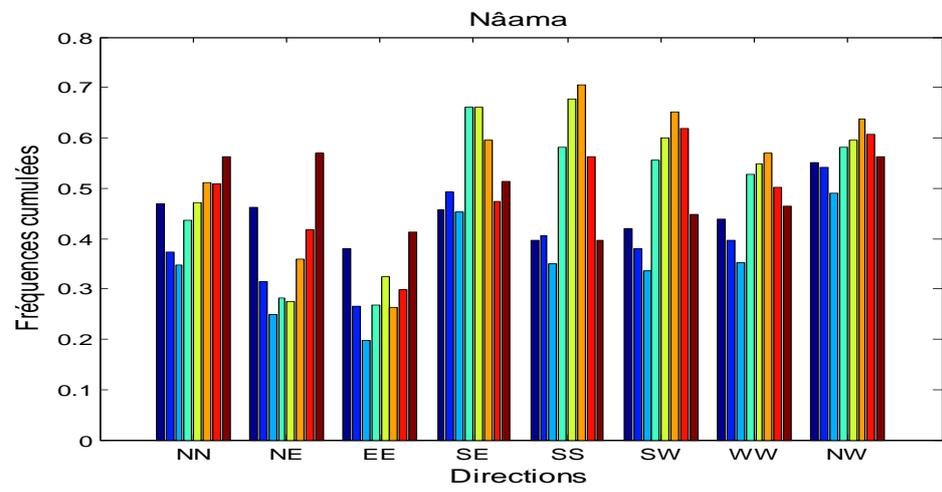
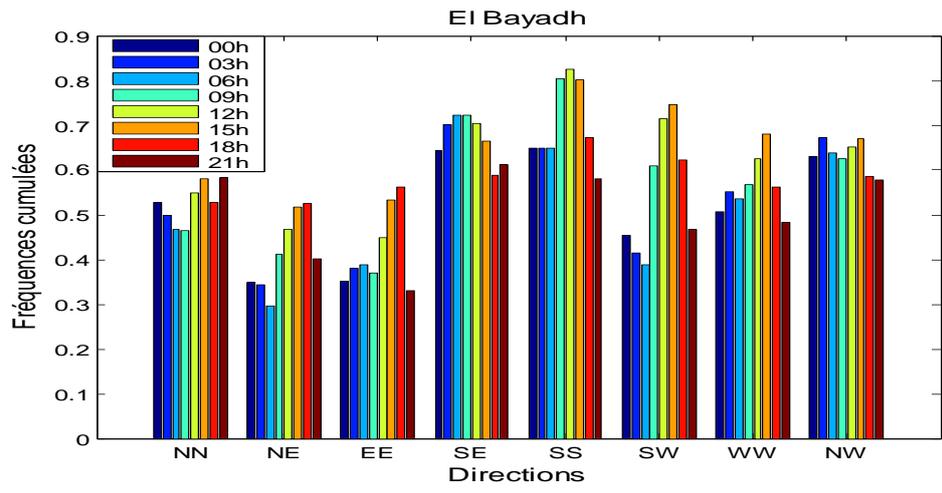


Figure 4.1 : Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 3 stations (El Bayadh, Nâama et Mécheria).

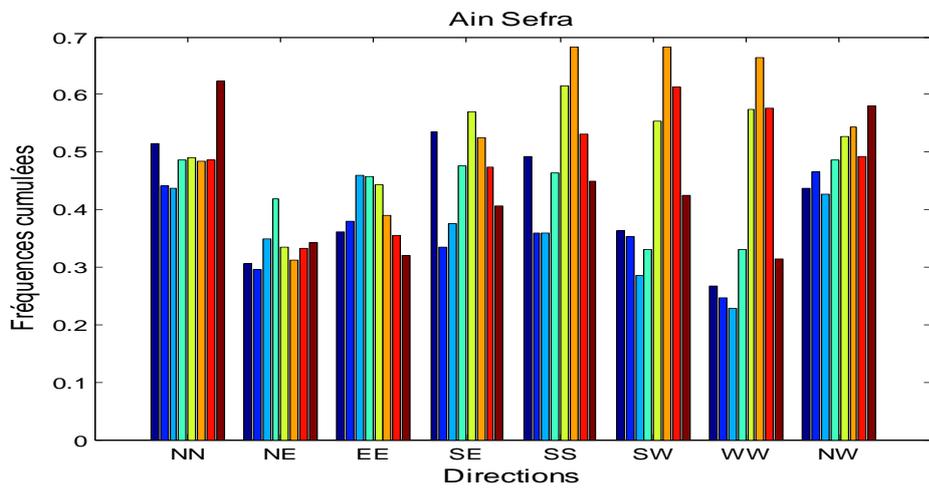
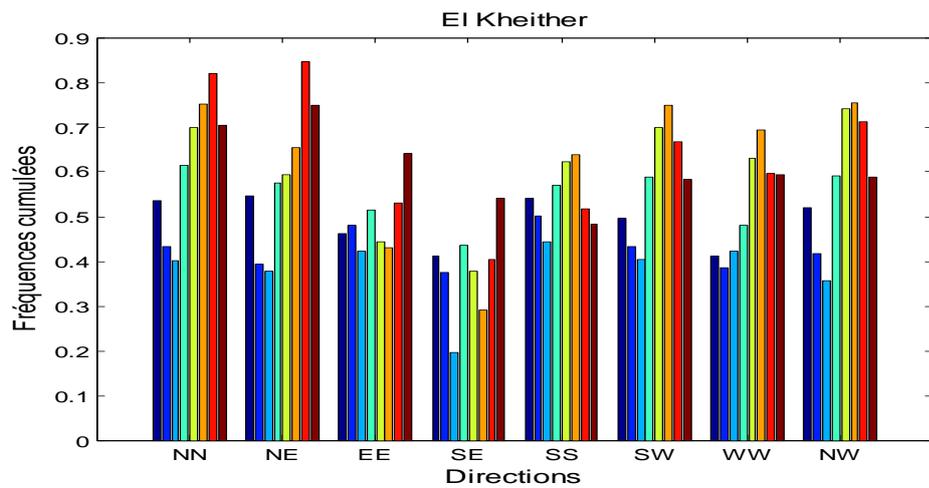


Figure 4.1 : Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents efficaces pour les 2 stations (El Kheither et Ain Sefra)

4.5 Etude des vents de sable

4.5.1 Données

Le tableau 4.1 représente l'inventaire des données (vitesse et direction) tri horaires fournies par l'ONM et correspondant aux périodes d'occurrence des vents de sable dans la région considérée

Tableau 4.1 : Inventaire des données vent utilisées.

Stations	Latitude [degré]	Longitude [degré]	Altitude [m]	Période [années]
Nâama	33°16'N	00°18'W	1166	1999-2005
El Bayadh	33°40'N	01°00'E	1341	2000-2005
Mécheria	33°31'N	00°17'W	1149	1997-2006

4.5.1.1 Variations directionnelles annuelles des vents de sable

La figure 4.2 représente la variation directionnelle annuelle des fréquences des vents de sable avec les vitesses moyennes correspondantes (les mêmes résultats sont représentés sous forme de rose des vents en annexe 4).

On considérant le produit fréquence-vitesse moyenne on conclue que les directions dominantes annuelles pour les 3 stations sont comme suit :

1. A El Bayadh et Nâama la direction dominante des vents de sables est Sud, Sud-ouest. Pour la direction Nord-ouest le vent est fort en vitesse, dépasse 7 m/s à El Bayadh et 9 m/s à Nâama est faible en fréquence avec 9% enregistrée à El Bayadh et 12% à Nâama
2. A Mécheria la direction dominante des vents de sables est Ouest avec une fréquence de 30% suivie par les directions Sud-ouest est Nord-ouest avec une vitesse maximale de 11 m/s enregistrer pour la direction Sud-ouest. Les vents de sable pour les directions Sud-est et Nord ont une fréquence faible ne dépasse pas 5% mais la vitesse est importante elle passe de 7 m/s à 10 m/s respectivement.

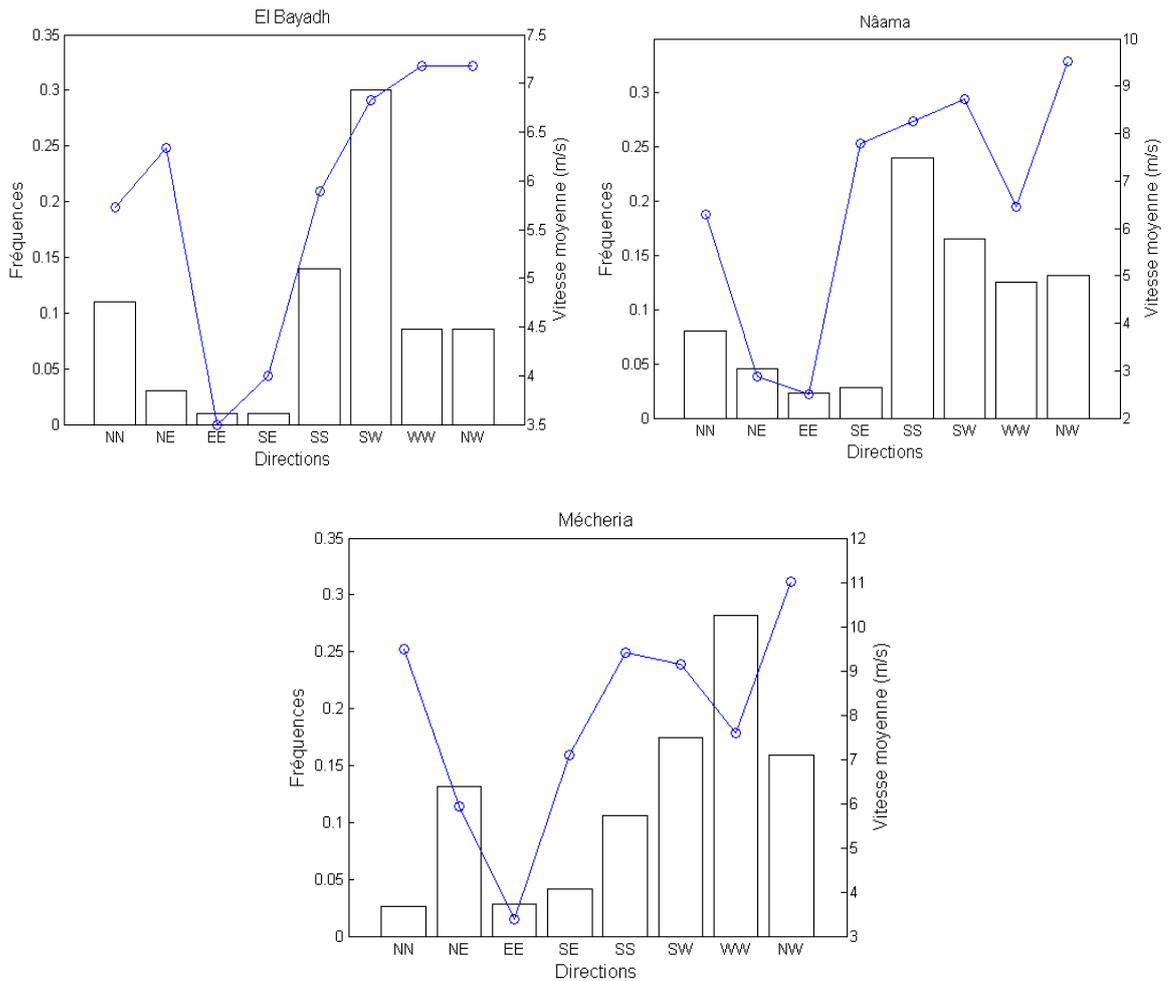


Figure 4.2 : Variations directionnelles annuelles des fréquences des vents de sable avec les vitesses moyennes correspondantes pour les 3 stations.

4.5.1.2 Variation journalière de la vitesse moyenne des vents de sable

La figure 4.3 représente la variation journalière de la vitesse moyenne des vents de sable pour les 3 stations. D'après les courbes on peut noter que, pour les trois stations, les vitesses moyennes des vents de sable les plus élevées sont enregistrées entre 12h et 18h. La vitesse moyenne maximale est enregistrée vers 15h à Mécheria. Pour Nâama et El Bayadh la vitesse moyenne maximale des vents de sable est presque constante entre 12h et 15h avec un léger plus vers 18h à El Bayadh. La vitesse moyenne maximale est de l'ordre de 11 m/s à Mécheria, 9 m/s à Nâama et 8 m/s à El Bayadh. Les vitesses moyennes des vents de sable les plus faibles sont enregistrées entre 21h et 6h du matin pour Nâama et El Bayadh. Pour Mécheria la vitesse du vent est importante de jour comme de nuit. La vitesse la plus faible est de 5 m/s.

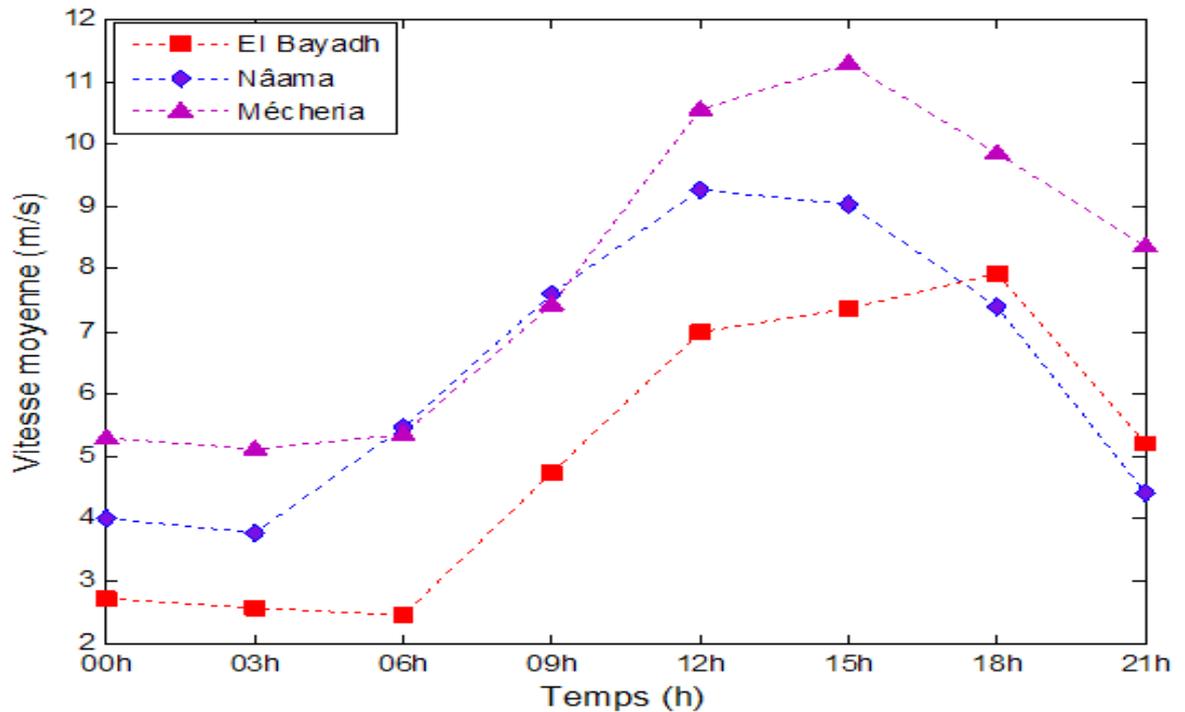


Figure 4.3 : Variation journalière de la vitesse moyenne des vents de sable

4.5.1.3 Distribution saisonnière

Les courbes de la figure 4.4 représentent la variation saisonnière des vitesses de vent de sable enregistrées pour les 3 stations. Pour les trois stations les vents de sable sont observés durant les 4 saisons avec une fréquence plus élevée en Eté, Automne et Printemps. Les vitesses les plus élevées des vents de sables sont enregistrées au Printemps pour Nâama et El Bayadh avec une vitesse moyenne qui varie de 5 m/s à 7m/s respectivement et durant toute l'année à Mécheria. Pour les trois stations on remarque que les vents de sable en Hiver sont faibles en fréquence mais fort en vitesses (déplacement du mode vers la droite) avec des courbes très larges (facteur d'échelle élevé et facteur de forme très faible) donc un vent variable en direction.

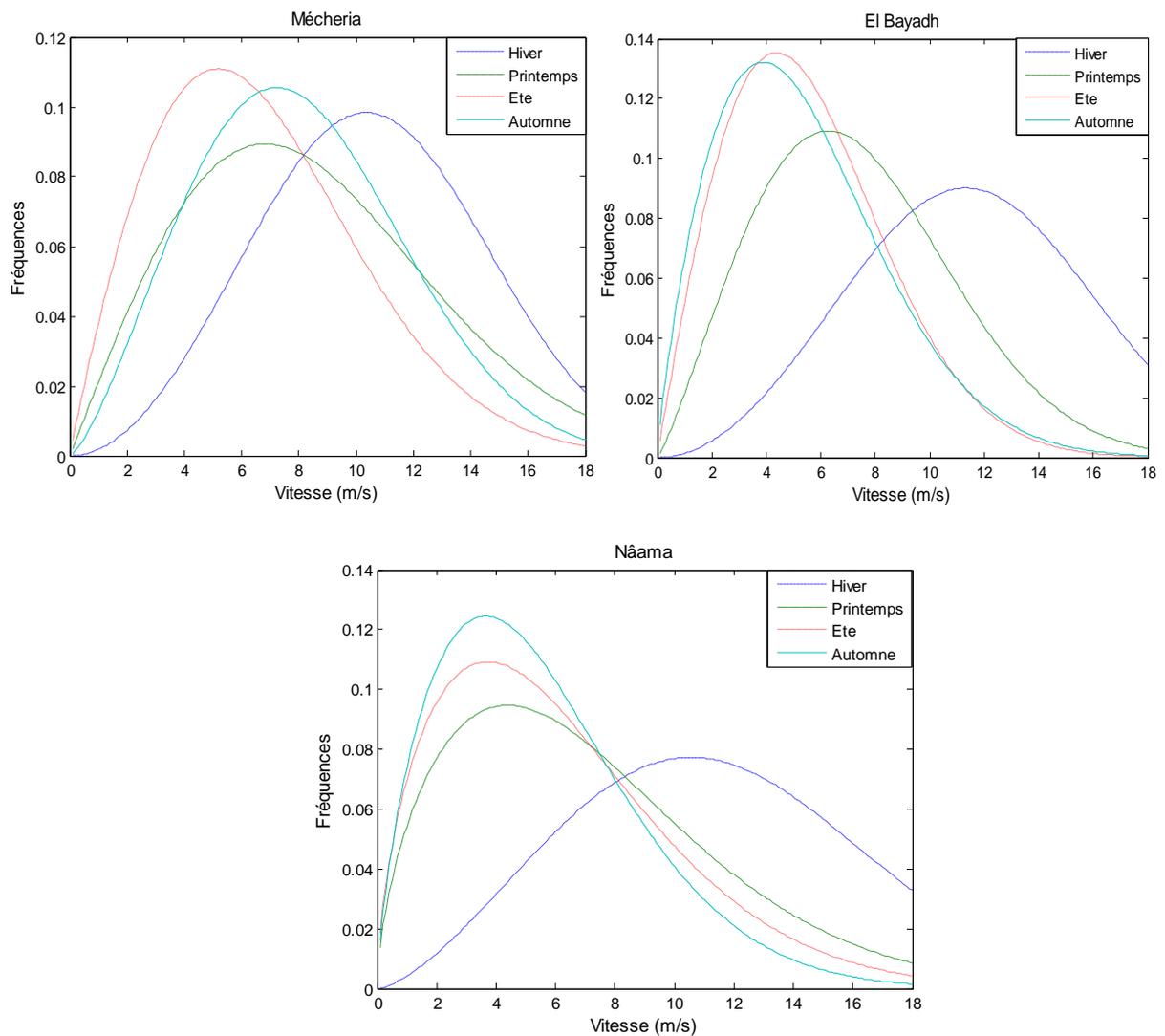


Figure 4.4 : Variation saisonnière des vitesses de vent de sable enregistrées pour les 3 stations

4.5.1.4 Variation mensuelle des fréquences des vents de sable

La figure 4.5 représente la variation mensuelle des fréquences des vents de sable pour les 3 stations.

A El Bayadh l'activité des vents de sable est observée en Avril et Aout (printemps et été).

A Nâama les vents de sable sont observés durant toute l'année avec une activité maximale en Mai, Aout et Septembre.

A Mécheria les vents de sable sont enregistrés durant toute l'année, avec une dominance durant les mois de Février, Avril, Aout et Octobre.

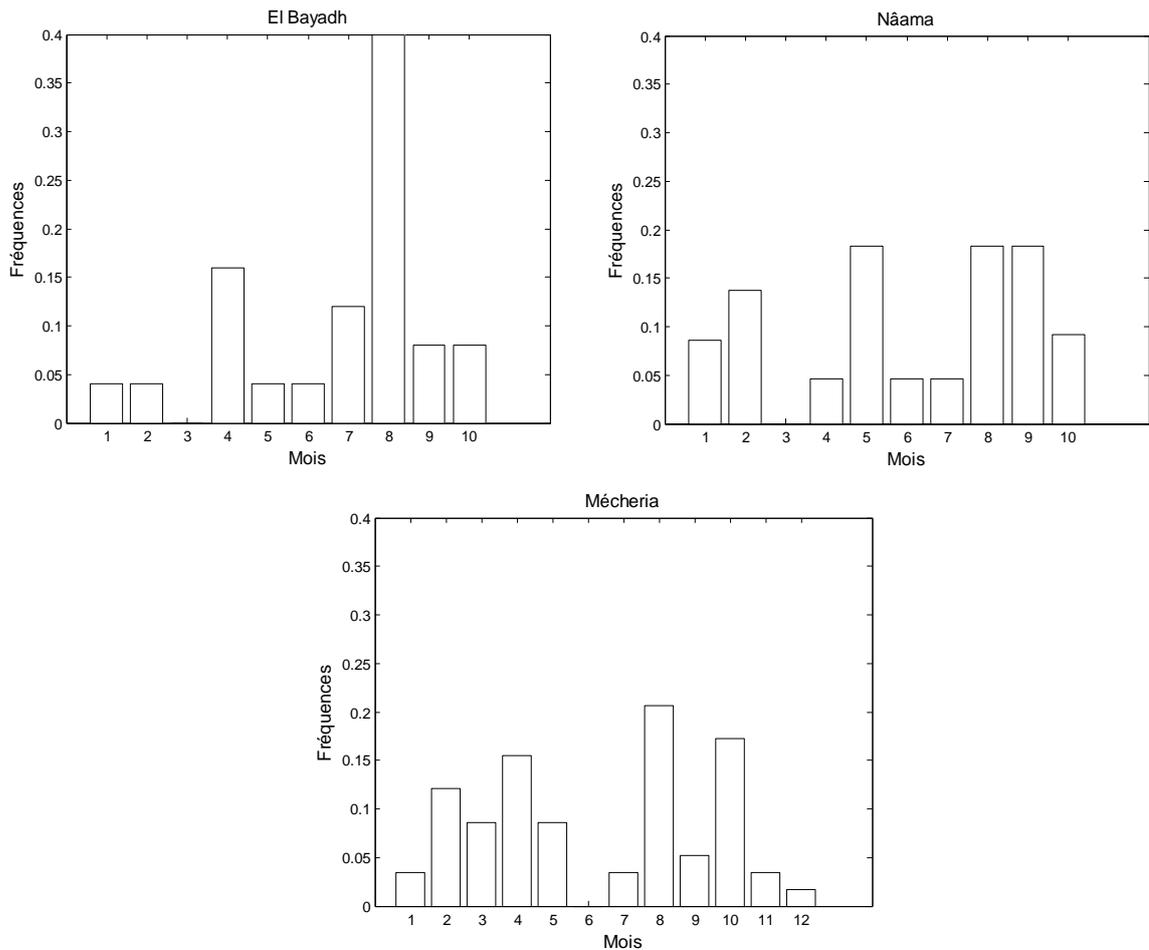


Figure 4.5 : Variations mensuelle des fréquences des vents de sable pour les 3 stations.

4.5.1.4.1 Variation mensuelle des fréquences cumulées des vents de sable

La figure 4.6 représente la variation mensuelle des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations. Pour les trois stations. Les fréquences cumulées des vents de sable sont très élevées en Janvier, Février en plus du mois de Décembre pour la station de Mécheria (l'Hiver). Au Printemps les fréquences cumulées sont importantes en Avril pour El Bayadh et Naâma. En Eté on a le mois de Juin à Naâma et le mois de Juillet à El Bayadh. Pour les deux stations (Naâma et El Bayadh) on remarque qu'il n'y a aucune observation enregistrée pour le mois de Mars.

A Mécheria pendant le Printemps, l'Eté et l'Automne les fréquences cumulées des vents de sable sont presque équitablement réparties.

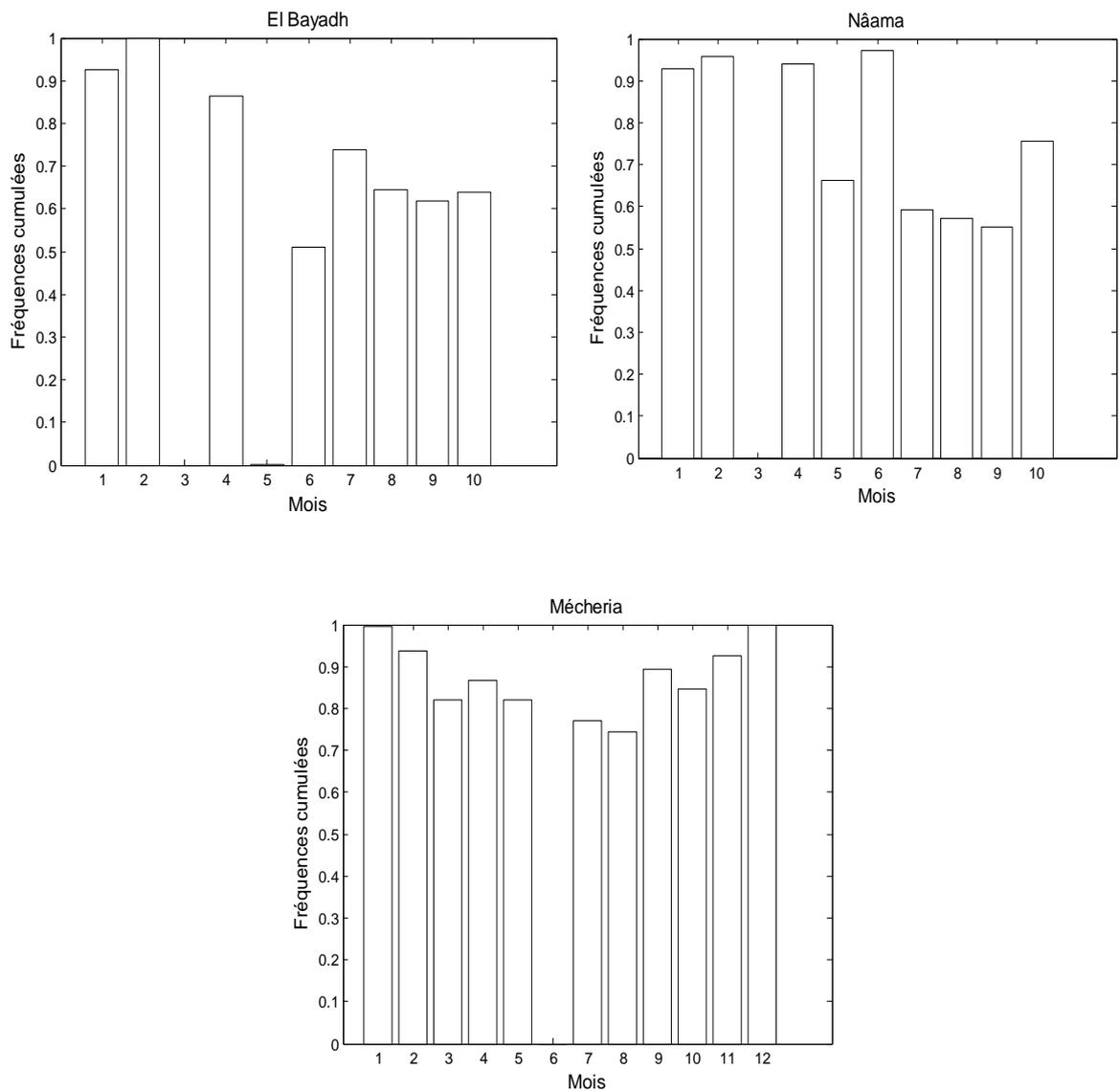


Figure 4.6 : Variations mensuelle des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations .

4.5.1.5 Variations directionnelles et journalières des fréquences cumulées des vents de sable

En figure 4.7 sont représentées les variations directionnelles et journalières des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations. D'après les graphes on constate que les directions dominantes des vents de sable sont : Sud, Sud-ouest et Ouest à Nord-ouest pour Nâama et El Bayadh. A Mécheria les fréquences sont de même ordre pour toutes les directions sauf pour la direction Est et un léger plus pour la direction Nord-ouest avec des fréquences équitablement réparties durant la journée.

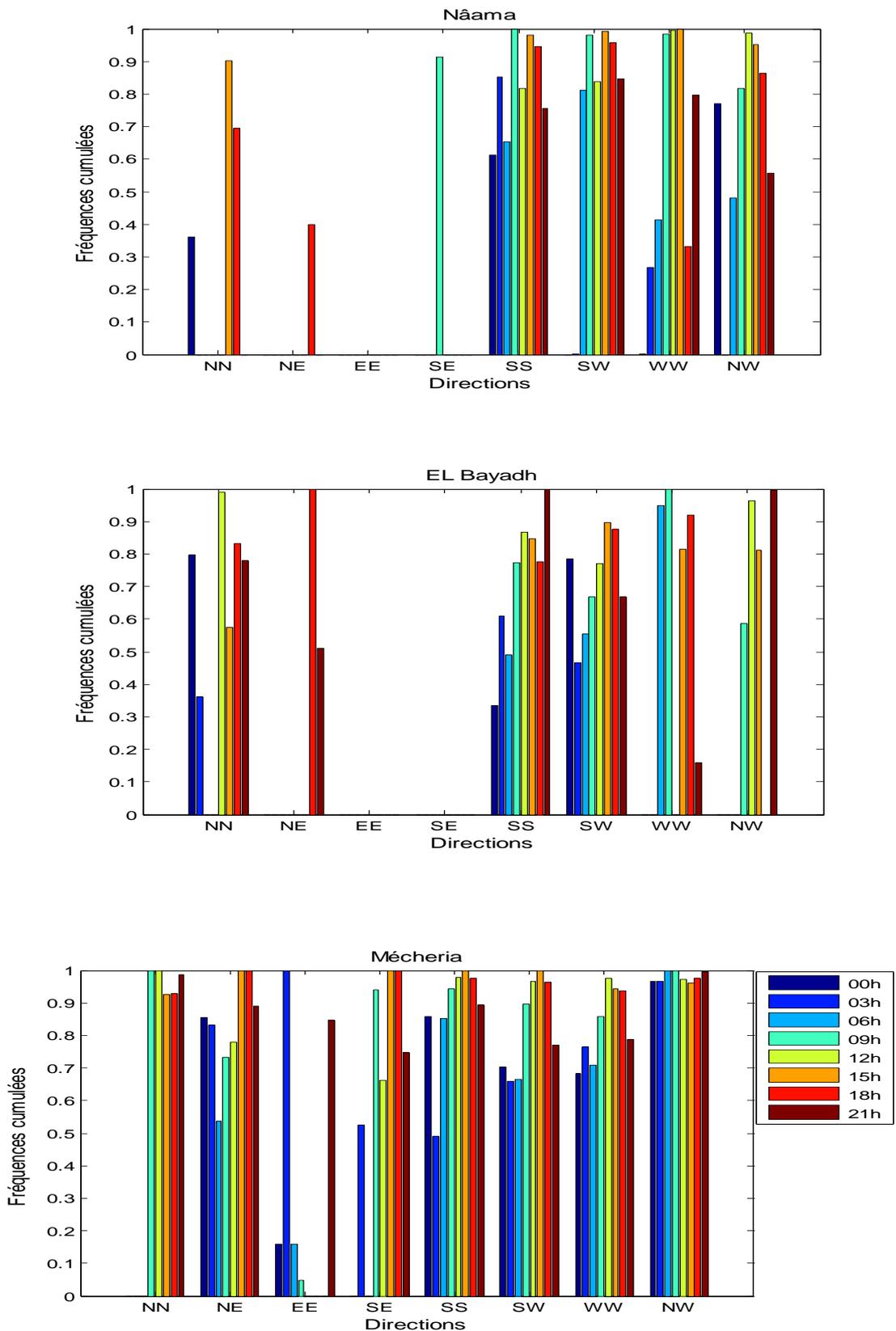


Figure 4.7 : Variations directionnelles journalières des fréquences cumulées des vents de sable pour les 3 stations (Nâama, Mécheria et El Bayadh)

4.6 Validation

On comparant les résultats obtenus dans ce chapitre avec les résultats dans le chapitre 3 on peut noter que les directions dominantes des vents de sables (chapitre 4) coïncident avec les directions dominantes des vents efficaces ainsi que les directions les plus ventées et qui correspondent aux vitesses moyennes les plus élevées (chapitre 3). Ces directions sont Sud-Sud-ouest, Ouest-Nord-ouest pour Naâma et El Bayadh.

A Mécheria les vents de sables existent dans toute les directions sauf pour la direction Est. Ce qui est en accord avec les résultats du chapitre 3.

La vitesse moyenne atteint son maximum entre 12h et 18h pour les trois stations. Dans ce chapitre, la vitesse moyenne la plus élevée est enregistrée à Mécheria suivie par Naâma alors que dans le chapitre précédant c'est El Bayadh qui est en première position suivie par Mécheria. Ceci est dû probablement aux données correspondant aux vents de sable. Données par essence occasionnelles alors que les données du chapitre 3 sont enregistrées en continu, ceci fait que la moyenne diminue. De plus, on peut noter que les vents de sable à Mécheria sont plus forts en vitesses (ils passent de 6 à 11m/s).

D'après les résultats obtenus, les saisons les plus ventées sont le Printemps, l'été et l'Automne mais d'après les résultats obtenus dans le chapitre 3 le vent le plus fort et qui dure le plus longtemps est enregistré surtout au Printemps et en Été pour les trois stations ce qui est en accord avec les résultats obtenus pour la variation mensuelle des fréquences cumulées des vents de sable et dans les autres recherches réalisés dans la zone des hauts plateaux ainsi que les observations faites par la population autochtone. Le seul désaccord entre les deux résultats est que l'Hiver est la saison la plus fournie en vents de sable. De plus, d'après les résultats obtenus pour Naâma et El Bayadh on remarque qu'il n'y a aucune observation de vents de sable enregistrée durant le mois de Mars et durant le mois de juin à Mécheria. On peut donc émettre l'hypothèse que les observations réalisées pour les vents de sable manquent probablement de précision et de rigueur (observations notées par l'agent en poste).

4.7 Conclusion

Les directions dominantes des vents efficaces sont Sud-Sud-ouest pour Naâma et El Bayadh et Sud-Sud-ouest et Ouest à Ain Sefra et ceci en plein milieu d'après midi. À El Kheither les vents efficaces sont Sud-ouest et Nord-ouest entre 12h et 15h mais la fréquence maximale est enregistrée vers 18h pour les directions Nord-Nord-est. À Mécheria les fréquences des vents efficaces sont Sus-Sud-ouest entre 12h et 15h et Nord-ouest le reste de la journée

Les directions dominantes des vents de sables sont : Sud-Sud-ouest à El Bayadh et Nâama. A Mécheria les vents de sable existent dans toutes les directions sauf pour la direction Est, avec une vitesse moyenne importante qui passe de 6 à 11m/s.

Les vents de sable sont principalement observés durant le Printemps et l'Eté à El Bayadh et Nâama et durant toute l'année à Mécheria.

Enfin on peut noter qu'à Mécheria et El Bayadh le vent est plus fort en vitesse et en fréquence.

Pour les trois stations, la direction qui correspond à la fréquence la plus faible des vents de sable est la direction Est.

Pour les 5 stations les vents efficaces et les vents de sable existent dans toutes les directions mais leur répartition varie durant la journée pour chaque direction.

CONCLUSION GENERALE

Les données du vent de cinq stations météorologiques des hauts plateaux ouest de l'Algérie ont été traitées afin de déterminer les régimes de vent. Les paramètres de Weibull ont été déterminés par secteur et pour différentes heures de la journée. Ainsi, les variations annuelles, journalières, sectorielles, mensuelle et saisonnières des vitesses de vent ont été aussi déterminées. Les directions dominantes pour les jours qui correspondent aux vent et tempêtes de sable ont été déterminées.

Les résultats montrent que la fréquence des vents calmes est prépondérante pour toutes les stations avec un maximum de 45% enregistré à Ain Sefra et un minimum de 27% à El Kheither.

Les périodes des vents calmes sont généralement observées entre 18h et 6h du matin. Pour les vents actifs, les fréquences maximales sont observées l'après midi vers 15h à EL Bayadh, Naâma et Ain Sefra et en fin de journée vers 18h à El Kheither, la nuit et le matin à Mécheria.

Les vitesses maximales enregistrées sont de l'ordre de 15 m/s pour toutes les stations sauf à El Kheither ou elle peut atteindre 18 m/s.

Les directions dominantes annuelles sont : Sud à Naâma, EL Bayadh et Ain Sefra, Nord-est à Mécheria et Nord, Nord-est à El Kheither.

Les directions dominantes pour les vents efficaces sont Sud pour Naâma et El Bayadh. Pour la station de Ain Sefra les directions dominantes oscillent entre Sud, Sud-ouest et Ouest. Pour la station d'El Kheither les vents dominants sont Sud-ouest, Nord-ouest au milieu de la journée et Nord-Nord-est à 18h. Enfin pour la station de Mécheria le vent efficace est plus fréquent selon les directions Sud-Sud-ouest entre 12h et 18h et selon la direction Nord-ouest le reste de la journée.

La vitesse moyenne maximale varie pour chaque direction au cours de la journée. A Naâma et El Bayadh de 9h à 15h la vitesse est supérieure à 5 m/s pour les directions Sud, Sud-est et Sud-ouest avec un maximum pour la direction Sud. Pour la direction Nord-ouest le vent à une vitesse presque constante durant toute la journée avec une valeur de l'ordre de 5 m/s.

A Mécheria pour la direction Nord-ouest la vitesse moyenne maximale est de 7 m/s (21h à 9h du matin), ensuite la vitesse est maximale pour les directions Sud, Sud-ouest.

A El Kheither la vitesse moyenne est maximale avec une valeur de 7 m/s pour les directions Nord-ouest et Sud-ouest de 12h à 15h et pour les directions Nord, Nord-est à 18h. A Ain Sefra la vitesse moyenne est maximale pour les directions Sud, Sud-ouest et Ouest au milieu de la journée et Nord, Nord-ouest la nuit avec une valeur de 5.5 m/s. Ces directions correspondent aux directions les plus ventées (facteur d'échelle élevé).

Les directions faiblement ventées (facteurs de forme et échelle faibles) et qui correspondent aux vitesses moyennes les plus faibles durant la journée sont Nord-est et Est pour El Bayadh, Nâama et Ain Sefra et Est, Sud-est pour Mécheria et El Kheither.

A Naama et El Kheither et Ain Sefra le printemps et l'été sont les saisons les plus ventées. Pour les autres stations le vent est également observé en Automne. A Ain Sefra le vent est inactif de Septembre à Mars et actif le reste de l'année mais avec une vitesse faible de l'ordre de 4 m/s et une période qui s'étend le plus souvent de 12h à 18h. A Naama le vent le plus fort et qui dure le plus longtemps est observé en Mars et Avril. Pour les autres stations les vents efficaces avec la durée la plus importante sont observés entre Mars et Septembre.

A El Bayadh et Nâama les directions dominantes pour les jours qui correspondent aux observations de vent de sable sont Sud, Sud-ouest, à Nâama et El Bayadh. A Mécheria les vents de sables existent dans toutes les directions sauf pour la direction Est. Ces vents de sable sont observés durant toute l'année à Mécheria et Nâama et pendant le Printemps et l'Été à El Bayadh.

On conclut que les vents de sable touchent toutes les stations avec une fréquence et une vitesse inférieure pour Naâma et Ain Sefra.

Enfin, pour les 5 stations, le vent vient surtout des secteurs Nord, Sud et Ouest la différence réside dans le fait que le vent change de secteur entre la nuit et le jour et d'une saison à une autre ce qui nous mène à conclure que l'ensablement a assez peu de lien avec le vent. Les vrais raisons sont à chercher ailleurs et particulièrement au niveau des activités (ou absence d'activité) humaines.

Les données utilisées dans cette étude sont des données moyennées sur trois heures elles peuvent être considérées comme étant inadaptées à l'étude du transport de sable du fait que le vent est un paramètre météorologique très variable en fonction du temps. Par ailleurs, la mise en mouvement des particules dépend de cette variation, donc pour une étude très précise dans ce domaine il est indispensable de mettre en place des stations qui permettent d'enregistrer les vitesses du vent en continu.

La détermination des directions dominantes des vents efficaces permet aux décideurs de prendre des mesures de protection et de lutte contre le phénomène de l'érosion éolienne et qui s'adapte avec la fréquence et la vitesse du vent.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

C	: facteur d'échelle
CMT	: Co Monomer Technology
D_p	: diamètre de la particule
EE	: direction Est
ETP	: évapotranspiration potentielle
F_c	: forces capillaires
Fr	: force résultante
$F(V)$: fonction de répartition
\hat{f}	: fréquences estimées
HCDS	: Haut Commissariat au Développement de la Steppe
I_a	: indice d'aridité
I_p	: forces de cohésion inter particulaires
L_v	: fonction de vraisemblance
N	: nombre d'observations
n	: nombre de classes
NN	: direction Nord
NE	: direction Nord-est
NW	: direction Nord-ouest
MP	: moyenne des précipitations annuelles
P	: poids de la particule
PNDA	: Plan National de Développement Agricole
R	: coefficient de corrélation non linéaire
SE	: direction Sud-est
SS	: direction Sud
SW	: direction Sud-ouest
U_t	: vitesse seuil
U_{*t}	: vitesse de friction seuil
V	: vitesse du vent
V_i	: vitesse du vent pour la méthode de maximum de vraisemblance
\bar{V}_i	: centre de la classe des vitesses i

\bar{V}	: vitesse moyenne du vent
WW	: direction Ouest
d	: diamètre du grain de sable
f_0	: fréquence des vitesses nulles.
$f(V)$: fréquence de la vitesse
$f(V_i)$: fréquence avec laquelle la vitesse de vent fait partie de la classe i
i	: classe de vitesse
k	: facteur de forme
t	: variable d'intégration
u^*	: vitesse de friction du vent
x	: paramètre de la fonction Γ
Γ	: fonction Gamma.
τ	: contrainte de cisaillement
ρ	: densité de l'air
σ	: écart type

REFERENCES

- [1] CORNET, A (2001), « La Désertification à la croisée de l'environnement et du développement. Un problème qui nous concerne », in Comité Scientifique Français de Lutte contre la Désertification, <http://www.csf-desertification.org/> (20 mars 2005).
- [2] Hountondji, Y-C ; Ozer, P et Nicolas, J ; " Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger", *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, n° 291, (novembre 2004), 1-18.
- [3] Niang, D ; "Fonctionnement hydrique de différents types de placages sableux dans le sahel Burkinabe". Thèse de doctorat n° 3667, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, (octobre 2006), 167 p.
- [4] Nations Unies ; "Elaboration d'une convention internationale sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique", (septembre 1994), 65 p.
- [5] Piersotte, C ; "La lutte contre la désertification", Mémoire de Fin d'Etudes, IGEAT, Université Libre de Bruxelles, (2005), 123 p.
- [6] Jouve, P ; Corbier-Barthaux, C et Cornet, A ; "Lutte contre la désertification dans les projets de développement", CSFD/AFD, (mai 2002), 162 p.
- [7] Zhao, H-L ; Yi, X-Y et al ; " Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia", *Catena*, V. 65, (2006), 71-79.
- [8] Ould Baba Sy, M ; "Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional", Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, (janvier 2005), 271 p.
- [9] Dupuy, A ; Lee, C et Schaaf, Th ; "Actes du Séminaire international sur la lutte contre la désertification : Ressources en eau douce et réhabilitation des terre dégradées dans les zones arides", MAB-UNESCO Zones arides N°. 1 N'djamena, Chad, (du 30 Octobre au 4 Novembre 2000), 135 p.
- [10] Eldridge, D-J and Leysw, J-F ; "Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion", *Journal of Arid Environments*, V. 53, (2003), 457-466.
- [11] Nedjraoui, D ; "Evaluation des ressources pastorales des régions steppiques algériennes et définition des indicateurs de dégradation", <http://ressources.ciheam.org>, 2008.

- [12] Yong-Zhong , S ; Yu-Lin, L and al ; "Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, northern China", *Catena*, V. 59, (2005), 267–278.
- [13] Javier, I ; Matinez, J and Schnabel, S ; "Desertification due to overgrazing in a dynamic commercial livestock–grass–soil system", *ecological modelling*, V. 205, (2007), 277-288.
- [14] Zhao, H-L ; Zhao, X-Y and al ; "Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia", *Journal of Arid Environments*, V. 62, (2005), 309-319.
- [15] Castellano, M.J and Valone, T.J ; " Livestock, soil compaction and water infiltration rate: Evaluating a potential desertification recovery mechanism", *Journal of Arid Environments*, V. 71, (2007), 97-108.
- [16] Li, S.G ; Harazono, Y ; Takehisa, O and al ; "Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia", *Agricultural and Forest Meteorology*, V. 102, (2000), 125-137.
- [17] Huang, D ; Wang, K and Wu, W.L ; "Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China", *Journal of Arid Environments*, V. 70, (2007), 120-136.
- [18] Ghazi, A ; "Problématique de la Désertification en Algérie: Etat et Mesures de Lutte Pour la Protection des Ressources Naturelles" ; dans "Desertification in the Mediterranean Region - a Security Issue", Springer, (2006), 169-185.
- [19] Franchis, L ; Ibanez, F et Benoit, G ; "Les menaces sur les sols dans les pays Méditerranéens", PNUF, PAM, Plan Bleu, Les Cahiers du Plan Bleu n° 2, Sophia Antipolis, (Mai 2003), 70 p.
- [20] López, M.V ; Moret , D ; Gracia, R and Arrúe, J.L ; "Tillage effects on barley residue cover during fallow in semiarid Aragon", *Soil & Tillage Research*, V. 72, (2003), 53-64.
- [21] Hevia, G.G ; Mendez, M and Buschiazzo, D.E ; "Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion", *Geoderma*, V. 140, (2007), 90-96.
- [22] Hamraoui, H; "La Politique en Matière de Gestion, de Suivi, et d'Evaluation de la Qualité des Sols" ; Conférence Internationale Commune sur la lutte contre la désertification et l'impératif international de politique de soutien, Alger, (du 17-19 Décembre 2006).
- [23] López, M.V ; De Dios Herrero, J.M and al; "Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies", *Geoderma*, V. 139, (2007), 407- 411.

- [24] Whicker, J.J ; Pinder III, J.E and Breshears, D.D ;" Thinning semiarid forests amplifies wind erosion comparably to wildfire: Implications for restoration and soil stability", *Journal of Arid Environments*, V. 72, (2008), 494-508.
- [25] MacKinnon, D.J ; Clow, G.D and al ; "Comparison of aerodynamically and model-derived roughness lengths (z_0) over diverse surfaces, central Mojave Desert, California, USA", *Geomorphology*, V. 63, (2004), 103-113.
- [26] Okina, G.S ; Gilletteb, D.A and Herrickc, J.E ; "Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments", *Journal of Arid Environments*, V. 65, (2006), 253-275.
- [27] Reheis, M.C ;" A 16-year record of eolian dust in Southern Nevada and California, USA: Controls on dust generation and accumulation", *Journal of Arid Environments*, V. 67, (2006), 487-520.
- [28] Cornelis, W.M ; "Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments", Chapter 9 dans "Dryland Ecohydrology", , Springer, (2006), 141-159.
- [29] Visser, S.M ; Sterk, G and Ribolzi, O ; "Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions", *Journal of Arid Environments*, V. 59, (2004), 699-717.
- [30] Benoit, L ; "Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle continentale: Analyse climatologique des émissions du nord-est de l'Asie et du nord de l'Afrique", Thèse de doctorat, Université Paris 12 - Val de Marne (Décembre 2005), 215 p.
- [31] Gomes, L ; Arrué, J.L and al; "Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project", *Catena*, V. 52, (2003), 235-256.
- [32] Cabane, F ; "Lexique d'écologie, d'environnement et d'aménagement du littoral", Ifremer, Version 12, France, (2007), 283 p.
- [33] Vickers, G ; Buzza, S ; Schmidt, D ; Mullock, J ; "Le temps dans les prairies, prévision de zone graphique 31 - Région des Prairies", NAV Canada, (2001).
- [34] Déplacements horizontaux de l'air ; <http://www.ffme.fr/index.htm>
- [35] Mainguet. M et F. Dumay, Pourquoi le réseau érosion doit-il faire une place à l'érosion éolienne, Etats de surface du sol et risques de ruissellement et d'érosion. Bulletin - Réseau Erosion, Paris (FRA), (1996), 281-292.
- [36] Cornelis, W.M ; Gabriels, D and Hartmann, R ; "A parameterisation for the threshold shear velocity to initiate deflation of dry and wet sediment", *Geomorphology*, V. 59, (2004), 43-51.

- [37] Rabinovich, E ; Kalman, H ; "Pickup, critical and wind threshold velocities of particles", *Powder Technology*, V. 176, (2007), 9-17.
- [38] Lia, F.R ; Kanga, L.F and al ; "Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China", *Journal of Arid Environments*, V. 62, (2005), 567-585.
- [39] Wang, X ; Eerdun, H and al ; "Significance of variations in the wind energy environment over the past 50 years with respect to dune activity and desertification in arid and semiarid northern China", *Geomorphology*, V. 86, (2007), 252-266.
- [40] Spoerry, S ; "Le retour en eau des khattaras de Jorf, une oasis du Tafilet sud-est du Maroc dynamique de gestion de l'eau", mémoire d'ingénieur, IRC : Montpellier, PNUD : Maroc, IRD, (Novembre 2007), annexe 12.
- [41] De Noni, G ; et Trujillo, G ; "Quelques réflexions au sujet de l'érosion et de la conservation des sols en Équateur", Colloque et Séminaire "Equateur 1986", Ed. de l'ORSTOM, Paris, (1989), 133-143.
- [42] ISESCO ; ACCT ; "La Lutte Contre L'ensablement et la Stabilisation Des Dunes". Actes du Séminaire, Médenine, République Tunisienne, (du 18 au 21 septembre 1996), 205 p.
- [43] Riksen, M.J.P.M ; Goossens, D ; "The role of wind and splash erosion in inland drift-sand areas in the Netherlands", *Geomorphology*, V. 88, (2007), 179-192.
- [44] Dong, Z ; Liu, X ; Wang, H and Wang, X ; "Aeolian sand transport: a wind tunnel model", *Sedimentary Geology*, V. 161, (2003), 71-83.
- [45] Ozer, P ; Bodart, C and Tychon, B ; "Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental, récentes modifications et impacts environnementaux", *Revue européenne de géographie*, n° 308, (mai 2005), 1-24.
- [46] FAO ; "Brise vent et rideaux abris avec référence particulière aux zones sèches", Cahier FAO, conservation N°15, Rome, (1986).
- [47] Su, Y.Z ; Zhao, H.L and al ; "Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification", *Geoderma*, V. 122, (2004), 43-49.
- [48] Qiana, Y.B ; Wub, Z.N and al ; "Ground-surface conditions of sand-dust event occurrences in the southern Junggar Basin of Xinjiang, China", *Journal of Arid Environments*, V. 70, (2007), 49-62.

- [49] Pan, Y.X ; Wang, X.P and al ; "Spatial variability of surface soil moisture content in a re-vegetated desert area in Shapotou, Northern China". *Journal of Arid Environments*, V. 72, (2008), 1675-1683.
- [50] Tsoar, H ; "Sand dunes mobility and stability in relation to climate", *Physica A*, V. 357, (2005), 50-56.
- [51] Herrmann, H.J ; "Aeolian Transport and Dune Formation", *Lect. Notes Phys*, n° 705, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2007), 363-386.
- [52] FAO ; "manuel de fixation des dunes", cahier FAO, conservation 18, Rome, (1988), 68 p.
- [53] Lévêque, P.Ch ; "Ecologie appliquée en génie civil, au génie nucléaire et à l'environnement", Tome -1-, Edition TEC et DOC, Lavoisier, (1983), 993 p.
- [54] Auvray, M ; "Modélisation des émissions d'aérosol minéral en zone sahélienne semi- aride", Rapport de DEA, Universités Paris 7, Paris 12 et Grenoble I, (Juillet 2002), 50 p.
- [55] Zhang, C.L ; Zou, X.Y and al ; "Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel", *Soil & Tillage Research*, V. 75, (2004), 53-59.
- [56] Cortina, J and Maestre, F.T ; "Plant Effects on Soils in Drylands: Implications for Community Dynamics and Ecosystem Restoration" ; Chapter 6 dans "Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change", Springer, (2005), 85-118.
- [57] Li, F.R ; Zhang, H ; Zhang, T.H ; Shirato, Y ; "Variations of sand transportation rates in sandy grasslands along a desertification gradient in northern China", *Catena*, V. 53, (2003), 255-272.
- [58] Riksen, M ; Spaan, W and Stroosnijder, L ; "How to use wind erosion to restore and maintain the inland drift-sand ecotype in the Netherlands", *Journal for Nature Conservation*, V.16, (2008), 26-43.
- [59] Li, X.Y ; Liu, L.Y and Wang, J.H ; "Wind tunnel simulation of aeolian sandy soil erodibility under human disturbance", *Geomorphology*, V. 59, (2004), 3-11.
- [60] Liu, L.Y ; Li, X.Y and al ; "Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China", *Journal of Arid Environments*, V. 68, (2007), 611-623.
- [61] Pelletier, J.D ; "Sensitivity of playa windblown-dust emissions to climatic and anthropogenic change", *Journal of Arid Environments*, V. 66, (2006), 62-75.

- [62] Wang, Z.T ; "Influence of moisture on the entrainment of sand by wind", Powder Technology, V. 164, (2006), 89-93.
- [63] Wiggs, G.F.S ; Baird, A.J and Atherton, R.J ; "The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind", Geomorphology, V.59, (2004), 13-30.
- [64] Han, Q ; and al ; "Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China", Geomorphology, V. 104, (2009), 230-237.
- [65] Langston, G and McKenna Neuman, C ; "An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind erosion: A comparison of the strength properties of biotic and salt crusts", Geomorphology, V. 72, (2005), 40-53.
- [66] Gomes, L ; Rajot, J.L and al ; "Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger", Catena, V. 52, (2003), 257-271.
- [67] Rajot, J.L ; Alfaro, S.C and al; "Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion", Catena, V. 53, (2003), 1-16.
- [68] Zhang, Y.M ; Wang, H.L and al ; "The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China", Geoderma, V.132, (2006), 441-449.
- [69] Mc Tainsh, G and Strong, C ; "The role of aeolian dust in ecosystems", Geomorphology, V.89, (2007), 39-54.
- [70] Zhang, Z ; and al ; "The effect of restored microbiotic crusts on erosion of soil from a desert area in China", Journal of Arid Environments, V. 72, (2008), 710-721.
- [71] Ta, W ; "Scratching technique for the study and analysis of soil surface abrasion mechanism", Geomorphology, V. 92, (2007), 1-11.
- [72] Zhang, W ; Wang, Y and Lee, S.J ; "Two-phase measurements of wind and saltating sand in an atmospheric boundary layer", Geomorphology, V. 88, (2007), 109–119.
- [73] Zhang, W ; Kang, J.H and Lee, S.J ; "Tracking of saltating sand trajectories over a flat surface embedded in an atmospheric boundary layer", Geomorphology, V. 86, (2007), 320-331.
- [74] Yang, P and al ; "Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud: Wind tunnel measurements by Particle Image Velocimetry", Geomorphology, V. 89, (2007), 320-334.

- [75] Alfaro, S.C ; "Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion", *Geomorphology*, V. 93, (2008), 157-167.
- [76] Lee, S.J ; Park, K.C and Park, C.W ; "Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements", *Atmospheric Environment*, V. 36, (2002), 1453-1463.
- [77] Boureboune, L and Benazzouz, M.T ; "Aeolian morphogenesis and strategy of fight against desertification in Algeria (Hodna and Zibans Basin) " dans *Desertification and Risk Analysis Using High and Medium Resolution Satellite Data*", Springer Netherlands, (2009), 91-103.
- [78] Leenders, J.K ; Van Boxel, J.H and Sterk, G ; "Wind forces and related saltation transport", *Geomorphology*, V. 71, (2005), 357-372.
- [79] Zheng, X.J ; Xie, L and Zhou, Y.H ; "Exploration of probability distribution of velocities of saltating sand particles based on the stochastic particle–bed collisions", *Physics Letters A*, V. 341, (2005), 107-118.
- [80] Goudie, A.S ; "Dust storms : Recent developments", *Journal of Environmental Management*, V. 90, (2008), 89-94.
- [81] Goudie, A.S and Middleton, N.J ; "Saharan dust storms: nature and consequences", *Earth-Science Reviews*, V. 56, (2001), 179-204.
- [82] Greeley, R ; Kuzmin, R and Haberle, R. M ; "Aeolian processes and their effects on understanding the chronology of Mars", *Space Science Reviews*, V. 96, (2001), 393-404.
- [83] Stewart Edgell, H ; "Arabian Deserts", Chapter 11, "Mechanisms of sand accumulation", *Collection Earth and Environmental Science*, Springer Netherlands, (2006), 263-279.
- [84] Mainguet, M et Dumay, F ; "Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification", *Les dossiers thématiques du CSFD*, V. 3, CSFD/Agropolis, Montpellier, France, (Avril 2006), 44 p.
- [85] Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique ; *Actes des journées d'étude et sensibilisation sur "la quantification du sable en transit éolien et la lutte contre l'ensablement"*, Ouargla (Alger), 21 et 22 janvier 2007.
- [86] Sauermann, G ; Andrade Jr, J.S and al ; "Wind velocity and sand transport on a barchan dune", *Geomorphology* , V. 54, (2003), 245–255.
- [87] Douady, S ; "Morphogénèse et Auto-organisation dans les Dunes", *Séminaire du Prédoctorat*, France, (14 décembre, 2004).

- [88] Fischer, S and K. Kroy ; "Dynamics of Aeolian Sand Heaps and Dunes: The Influence of the Wind Strength", dans "Traffic and Granular Flow'05", Springer Berlin, (2007), 79-89.
- [89] Herrmann, H.J and P. Rognon ; "La physique des dunes"
<http://www.comphys.ethz.ch/hans/p/292.pdf>
- [90] Yilmaz, L ; "Comparison of the mediterranean coastal dunes with the Californian dunes from the point of coastal morphology", Turkey, (2003), 202-208.
- [91] Herrmann, H.J ; "Pattern Formation of Dunes", Nonlinear Dynamics, V. 44, Springer, (2006), 315-327.
- [92] El Banna, M.M ; "Nature and human impact on Nile Delta coastal sand dunes, Egypt", Environmental Geology, V. 45, (2004), 690-695.
- [93] Wilkins, D.E ; Ford, D. R. L and Clement, D. W. P ; "GPR and GIS use in documenting a distinctive mode of star dune development"
<http://earth.boisestate.edu/home/dwilkins/docs/INQUA%20poster%2011x17.pdf>
- [94] Messen, N ; Kasbadji Merzouk, N et al ; "Contribution à l'étude du vent en rapport avec l'érosion éolienne dans les zones arides", Rapport finale du PNR, projet N°03-02-05-01-05-97-CRSTRA, Biskra(Alger), (2002), 110 p.
- [95] Ha, S ; Dong, G and Wang, G ; "Morphodynamic study of reticulate dunes at southeastern fringe of the Tengger Desert", Chinese Academy of Sciences, V. 42 n° 2. (April 1999), 207-215.
- [96] Li, S ; Liu, X and al ; "A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island", Journal of Geographical Sciences, Springer-Verlag, (2007), 453-468.
- [97] Hugenholtz, C.H ; et al ; "Spatial and temporal patterns of aeolian sediment transport on an inland parabolic dune, Bigstick Sand Hills, Saskatchewan, Canada", Geomorphology, V. 105, (2009), 158-170.
- [98] Li, Z ; Wu, S ; Dale, J and al ; "Wind tunnel experiments of air flow patterns over nabkhas modeled after those from the Hotan River basin, Xinjiang, China (II): vegetated", Front. Earth Sci, V. 2, n° 3, China, (2008), 340-345.
- [99] Dougill, A.J ; and Thomas, A.D ; "Nebkha dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: formation controls and their validity as indicators of soil degradation", Journal of Arid Environments, V. 50, (2002), 413-428.
- [100] Ribolzi, O ; Hermida, M and al ; "Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso", Catena, V. 67, (2006), 145-154.

- [101] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ; Projet national ALG/98/G31, "Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques", Communication Nationale Initiale, Alger, (Mars 2001).
- [102] UMA ; "Programme d'Action Sous-Régional de Lutte contre la Désertification au Maghreb", (Août 1999).
- [103] Hadeid, M ; "La dynamique spatiale d'un milieu steppique – Niveaux et facteurs des transformations", <http://www.ardes.tunet.tn>, (2008).
- [104] Nedjraoui, D et Bédrani, S ; "La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, V. 8, n° 1, (avril 2008).
- [105] Nedjraoui, D, "La Recherche scientifique, un moyen de lutte contre la Désertification", Com. Conf. Intern. Université des Nations Unies, Alger, (Déc. 2006).
- [106] Aidoud, A ; "Changements de végétation et changement d'usage dans les parcours steppiques de l'Algérie", <http://medias.obs-mip.fr>, (2008).
- [107] Nedjraoui, D ; "Profil fourrager", rapport U.S.T.H.B, Alger, (janvier 2001).
- [108] Hadeid, M ; "Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes", <http://vertigo.revues.org/index5368.html>, (avril 2008).
- [109] Nedjraoui, D ; "Les Steppes Algériennes : Zones Sensibles à la Désertification"
- [110] "La surveillance environnementale à long terme en réseau CIRCUM-saharien", Synthèse Afrique du Nord Flore-Végétation-Occupation des terres, Marrakech, CCAM, 26-27/11/2008.
- [111] Bensaid, A ; "Sig et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : Le cas de la wilaya de Naâma (Algérie)", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, (juin 2006), 318 p.
- [112] Haddouche, I ; Mederbal, K et al ; "Caractérisation d'une région stéppique par télédétection cas de la région de Mécheria, Algérie", www.naturevivante.org/documents/teledetection.pdf
- [113] Revues des efforts nationaux contre la dégradation des terres, fiche technique, partie 6, Algérie. <http://www.ifap.org/fr/publications/documents/Desertification-F-part6.pdf>
- [114] Bensaïd, S ; "Bilan critique du barrage vert en Algérie", sécheresse V. 6, n° 3, (septembre 1995), 247-255.

- [115] "Initiative Grande Muraille Verte du Sahara et du Sahel", OSS, CEN-SAD, Note introduction n°3, OSS : Tunis, (2008), 46 p.
- [116] Safar Zitoun, M.M ; Khammar, F and al ; " Rapport national de l'Algérie sur la mise en œuvre de la Convention de Lutte Contre la Désertification", Alger, (Septembre 2004), 35 p.
- [117] Penélope, R and José, A.C ; "Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density distribution: a case study", Energy Conversion and Management, n° 46, (2005), 2419–2438.
- [118] Isaac, Y.F.L ; Joseph, C.L ; "A study of Weibull parameters using long-term wind observations". Renewable Energy, V. 20, (2000), 145-153.
- [119] ZHANG, G-p ; LIU, J-y and al ; "Spatial changes of wind erosion-caused landscapes and their relation with wind field in China". Journal of Geographical Sciences, V. 12, n°2, (2002), 153-162.
- [120] Takle, E.S ; and Brown, J.M ; " Note on the use of Weibull statistic to characterize wind speed data", Journal of Applied Meteorology, V. 17, (1978).
- [121] Kasbadji Merzouk, N ; " Wind energy potential in Algeria", International Journal of Renewable Energy, V. 21, (2000), 553-562.
- [122] Hammouche, R ; "Atlas vent de l'Algérie/ONM", Office des Publications Universitaires (OPU), Alger, (1990).
- [123] Kasbadji Merzouk, N ; Merzouk, M et Messen, N ; "Mass consistent model Application to the desertification phenomena study in the high plains of Algeria", International Journal of Renewable Energy, V. 28, (2003), 655-663.
- [124] Kasbadji Merzouk, N ; "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie". Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Alger, (Mai 2006).
- [125] Naci Celik, A ; "A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey". Renewable Energy, V. 29, (2003), 593-604.
- [126] Seguro, J.V and Lambert, T.W ; "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 85, (2000), 75-84.
- [127] Boumahrat, M et Gourdin, J ; "Méthodes numériques appliquées", Ed. O.P.U, Alger, 1983.

- [128] Nouaceur, Z ; "l'évolution des lithométéores en Mauritanie confirme une plus grande efficacité de l'action éolienne", revue européenne de géographie-nature, paysage et environnement, V. 203, (Décembre 2001).
- [129] Sawadogo, H ; Bock, L ; Lacroix, D ; Prosper Zombé, N ; "Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du Zaï et du compost dans Yatenga (Burkina Faso)", Biotechnol. Agron. Soc. Environ, V. 12, n°3, (2008), 279-290.
- [130] Hien, V ; Bilgo, A ; and al ; "Projet 83 Recherche Sur Des Technologies De Lutte Contre La Désertification au Sahel et Etude de Leur Impact Agro Ecologique", Rapport Final, CSFD, Burkina Faso, (Janvier 2004), 91p.
- [131] Vigiaka, O ; Sterka, G ; Warrenb, A ; Hagen, L.J ; "Spatial modeling of wind speed around windbreaks". Catena, n°52, (2003)273–288.
- [132] Boldes, U ; Golberg, A and al ; "Canopy flow and aspects of the response of plants protected by herbaceous shelterbelts and wood fences". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 90, (2002), 1253–1270.
- [133] Cornelis, W.M and Gabriels, D ; "Optimal windbreak design for wind-erosion Control". Journal of Arid Environments, V. 61, (2005), 315–332.
- [134] Ould Bilal, F ; "Eosion par le vent L'amélioration du couvert végétal reste une solution appropriée", Magazine n° 3919/PAGE 521, (Février 2005).
- [135] Dembele, F ; Karembe, M and al ; "Etude des conséquences des modalités d'utilisation des Terres en zone aride sur la dégradation des milieux physiques et biologiques au Mali (Zone de Bamba)", Rapport Finale, Projet CSFD n° 98002300 - Convention n° 035/00, République du Mali, (Avril 2004), 95 p.
- [136] IRA-IRD ; SERST et CSFD; "Programme sur la Désertification Dans la JeffaraTunisienne : Pratiques et Usages des Ressources, Techniques de Lutte et Devenir des Populations Rurales", Tunisie, (Décembre 2003).
- [137] FAO, "Evaluation des techniques de lutte contre l'ensablement au niveau des pays membres du projet. PROJET RAB / 89 / 034 Stabilisation des Dunes de Sable et Reboisement", (Octobre 1989).
- [138] Qiu, G.Y ; Lee, I-B and al ; "Principles of sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment", Journal of Arid Environments, V. 56, (2004), 449–464.
- [139] Li, X. R ; Kong, D.S and al ; "Changes in soil and vegetation following stabilisation of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China", Plant Soil, V. 300, (2007), 221-231.

- [140] Qu, J ; Zu, R ; Zhang, K and Fang, H ; "Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers", *Geomorphology*, V. 88, (2007), 193-200.
- [141] Li, X.R ; Xiao, H.L and al ; "Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions", *ecological engineering*, V. 28, (2006), 149-157.
- [142] Bannari, A ; Pacheco, A and al ; "Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data". *Remote Sensing of Environment*, V. 104, (2006), 447-459.
- [143] Michael, D.N ; Wenjun, C and al ; "Turbulent exchange processes within and above a straw mulch. Part I: Mean wind speed and turbulent statistics". *Agricultural and Forest Meteorology*, V. 102, (2000) ,139-154,
- [144] Schlechta, E and Buerkertb, A ; "Organic inputs and farmers' management strategies in millet fields of western Niger", *Geoderma*, V. 121, (2004), 271-289.
- [145] Geert, S ; "Flattened Residue Effects on Wind Speed and Sediment Transport. *Soil Sci. Soc. Am. J.* V. 64, (2000), 852–858.
- [146] Li, X-Y ; Liu, L-Y ; Gong, J-D ; "Influence of pebble mulch on soil erosion by wind and trapping capacity for windblown sediment", *Soil & Tillage Research*, V. 59, (2001), 137-142.
- [147] Wanfu, W ; Dong, Z and al ; "The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China". *Environ Geol*, V. 50, Springer-Verlag, (2006), 1077-1083.
- [148] Li, X-Y and Liu, L-Y ; "Effect of gravel mulch on aeolian dust accumulation in the semiarid region of northwest China", *Soil & Tillage Research*, V. 70, (2003), 73-81.
- [149] Dong, Z ; Liu, X and Wang, X ; "Aerodynamic roughness of gravel surfaces", *Geomorphology*, V. 43, (2002), 17– 31.
- [150] Han, Z ; Wang, T and al ; "Chemical stabilization of mobile dune fields along a highway in the Taklimakan Desert of China", *Journal of Arid Environments*, V. 68, (2007), 260–270.
- [151] Nations Unies Conseil Économique et Social; Commission Économique et Sociale Pour l'Asie et le Pacifique ; "Partenariats Multipartites Pour La Promotion Du Développement Durable en Asie et dans le Pacifique: Tempêtes de poussières et de sable: Prévention et lutte", Bangkok, (juillet 2004).

- [152] AIEA CT ; "L'utilisation des techniques nucléaires pour la gestion intégrée du sol, de l'eau et des éléments nutritifs en agriculture pluviale des zones arides et semi arides en Afrique", projet régional RAF/5/048 « Lutte contre la désertification dans le Sahel ». Vienne, (Mars 2002) ,18-22.
- [153] Liu, M-X ; Wang, J-A and al ; "Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland". *Soil & Tillage Research*, V. 90, (2006), 242–249.
- [154] Nordstrom, K.F and Hotta, S ; "Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects", *Geoderma*, V. 121, (2004), 157–167.
- [155] Mainguet, M et Remini, B ; "Le Role Des Mega-Obstacles dans la Formation et Façonnement des Ergs : Quelques exemples du Sahara", *Larhyss Journal*, V. 03, (Juin 2004), 13-23.
- [156] Zhanga, C-L ; Zoua, X-Y and al ; "Engineering measures to control windblown sand in Shiquanhe Town, Tibet" ; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, V. 95, (2007), 53–70.
- [157] Zhenghu, D ; Honglang, X and al ; "Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China", *Geomorphology*, V. 59, (2004), 237–246.

ANNEXE 1

LES METHODES DE LUTTE CONTRE L'EROSION EOLIENNE

5.1 Introduction

Le sol est une des principales bases de la production agricole. Cette ressource est gravement affectée par la perte de la couche arable, la diminution de la fertilité et l'ensablement par suite de différents facteurs parmi lesquels la disparition de la végétation par le surpâturage, l'exploitation excessive du sol, l'érosion éolienne et hydrique. Pour cette raison plusieurs méthodes sont utilisées pour protéger le sol et préserver l'environnement.

5.2 Techniques mécaniques

La stabilisation mécanique est le préalable indispensable à la fixation durable des sables mobiles et des édifices dunaires à court et moyen terme. Elle protège le sol pendant un temps assez long afin de permettre à la végétation de s'installer.

5.2.1 Technique de Zai

C'est une technique traditionnelle réhabilitée au Yatenga (nord du Burkina Faso) entre 1982 et 1984. C'est une technique qui consiste à creuser des trous de 20 à 40 cm de diamètre et de 10 à 15 cm de profondeur pour recueillir les eaux de ruissellement et les laisser s'infiltrer. Le déblai est déposé en croissant vers l'aval pour capter les eaux de ruissellement. La matière organique (fumier ou de compost) est apportée en quantité variable selon les paysans (une poignée, soit environ 600 g/trou) avant la période de semis [129, 130].

5.2.2 Brises vents naturels

Les brises vents ont été employés pendant des siècles pour protéger les récoltes contre le vent et le sol contre l'érosion éolienne. Ils réduisent la vitesse de vent, l'intensité de la turbulence et améliorent le microclimat, ce qui permet un meilleur développement des récoltes [131, 132].

Un brise vent est un obstacle associé généralement à une barrière végétale opposé au vent. Cette barrière peut être composée d'un seul élément ou d'un système d'éléments qui par sa présence dans un flux d'air réduit la vitesse de vent

non seulement au niveau du système lui-même mais également de part et d'autre de cette barrière.

L'efficacité de ces barrières dans la lutte contre l'érosion dépend de plusieurs facteurs comme la porosité et sa distribution, la forme, la hauteur, l'orientation, l'épaisseur et l'espacement elle est aussi influencé par la vitesse du vent et la rugosité de la surface toute au tour de cette barrière la porosité est définie comme étant le rapport entre la surface des ouvertures et la surface frontale totale et elle est exprimé en $m^2 m^{-2}$. La porosité a une influence importante sur la distribution de la vitesse de vent et l'intensité de la turbulence .

La construction de la barrière dépend du but pour lequel elle est faite. Si l'objectif est de protéger un champ contre l'érosion ; les barrières simples à une seule rangée avec une porosité homogène sont les meilleures solutions. Elles protègent une longue distance, occupent une petite surface et nécessitent un coût d'entretien réduit. La hauteur de la barrière doit être supérieure à la hauteur des sauts des grains en saltation, (en général 99% des particules en saltation n'atteignent pas 1m car ceci aura comme conséquence le dépôt du sable sur le côté sous le vent).

Les brises vents les plus optimaux se composent de trois lignes horizontales: une première ligne près de la surface qui contient des herbes, des arbustes, ou des haies, une deuxième ligne à l'altitude moyenne avec de petits arbres, et une troisième ligne à l'altitude élevée composée de longs arbres. Il est important de noter que les arbres, et en particulier les arbustes ou les haies, doivent être couverts de feuilles pendant la période où les vents sont forts [133].

La surface protégée par les brises vent est proportionnelle à la hauteur de cette dernière ; si (h) est la hauteur du brise vent, l'influence de ce dernier s'étend approximativement à 5h du coté au vent et de 30 à 35h du coté sous le vent.

Les barrières très denses (porosité < 20%) peuvent induire un recyclage du vent avec la turbulence accrue. Pratiquement il est difficile de mesurer la porosité des brises vent naturels. La porosité dans ce cas est rapprochée par mesure optique [131].

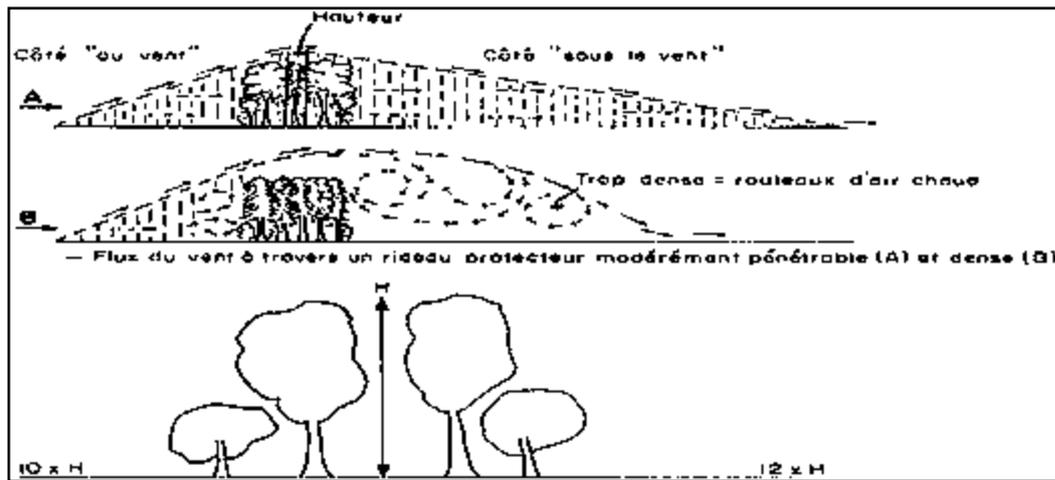


Figure 5.1 : Caractéristiques des brises vent naturelle [134].

5.2.3 Technique des palissades

Les palissades sont des brises vent artificiels poreux et posés perpendiculairement au vent dominant. Ils sont utilisés pour réduire la vitesse du vent et donc son potentiel de transport de sable.

L'étude réalisée sur ce type de barrières se concentre sur le taux de protection et la diminution de la vitesse derrière la palissade c'est à dire la partie sous le vent. Le résultat obtenu confirme qu'une porosité de 30-40% pour les palissades végétale et une porosité de 50% pour les palissades en bois est plus efficace pour réduire les fluctuations moyennes de la vitesse du vent avec une meilleure protection par de multiples rangées que par une seule ligne [76] Si le nombre de lignes est suffisant et la distance interlignes adaptée, l'ouvrage décharge le vent de la totalité de sa charge en sable [135].

Les palissades permettent l'accumulation du sable en mouvement. Cette accumulation aboutit à la formation d'une dune artificielle qui constitue la première phase de la lutte contre l'ensablement.

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la confection de la palissade. Matériel végétal local ou matériaux usinés. Le choix dépend de la disponibilité et du prix de revient [136].

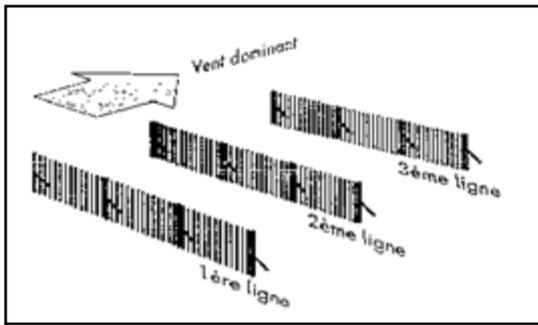


Figure 5.2 : Schéma de principe d'un ouvrage "piège à sable" de 3 lignes [135].

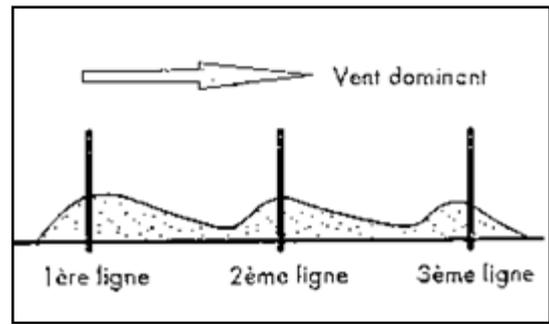


Figure 5.3 : Ensablement de l'ouvrage (Vue de profil) [135].

5.2.3.1 Palissades en fibrociment

Il s'agit de fixer des tôles ondulées en fibrociment au sommet d'une banquette en terre réalisé avec des engins puissants. Cette banquette est d'une hauteur de 1m au niveau du sol avec une largeur basale de 160 cm, et une largeur sommitale de la banquette de 60 cm de part et d'autre de l'axe de la banquette.

La terre qui servira pour la confection des tabias doit être indemne des résidus végétaux et bien tassée afin d'éviter les affaissements. Les tabias doivent être rectilignes, ne présentant pas de sinuosités et perpendiculaires à la direction du vent dominant.

Ces plaques sont perforées de 16 trous de 3 cm de diamètre répartis par rangées de quatre trous, ce qui permet d'obtenir une légère perméabilité de la plaque. Elles sont fixées au milieu et sur le sommet des tabias. Chaque plaque est enfouie sur 0,25 m. Un intervalle de 2 à 4 cm est laissé entre les tôles ainsi posées pour assurer une perméabilité à l'air de la palissade. Il y a lieu de veiller à n'utiliser que des plaques entières et ne présentant pas des angles cassés.

Les plaques, après installation, doivent présenter une rectitude longitudinale et un niveau standard. Avec de faibles vitesses du vent les palissades sont linéaires et espacées de 40 à 100 m mais avec des vitesses élevées, les palissades sont disposées sous forme de carreaux de 25 à 40 m [42].

Les plaques en fibrociment peuvent être remontées et utilisées plusieurs fois ce qui leur donne une durée de vie cinq fois plus supérieure à une palissade végétale [84].

A cause du cout élevé, la fragilité du matériau qui se casse facilement, le danger sur la santé humaine (Amiante) leur utilisation est très limitée [137].

5.2.3.2 Palissades en palmes

La palissade en palme se fait de la même manière que la palissade en fibrociment la différence se résume dans les caractéristiques des palmes. Les palmes utilisées doivent être de bonne qualité, avec un diamètre supérieur ou égal à 2 cm.

Les palmes au sommet du tabia doit être fixées dans une tranchée de 40 cm de largeur et 40 cm de profondeur avec une hauteur de 70 cm et 30 cm de fouille.

Le nombre de palmes de 13-15 palmes/mètre linéaire donne une perméabilité efficace de 40-50%. Avant la fixation ; les bout des palmes doivent être sectionnés pour obtenir des tiges droites pour la verticalité de la palissade.

Dans certaines régions, la palissade est renforcée par l'implantation de piquets de bois tous les 2 à 3 m rattachés aux palmes par du fil de fer et enfoncés sur 30 à 40 cm dans le fossé.

Après l'enterrement de la première palissade, une nouvelle palissade identique à la première doit être installée, Le rehaussement continue jusqu'à ce que la dune atteigne son profil d'équilibre. Les palmes ensevelies confèrent à la dune artificielle une certaine ossature et une plus grande résistance. Les dunes artificielles doivent être placées à 200 ou 300 m du site à protéger [42, 137].

5.2.3.3 Quadrillage losangique

Des palissades disposées en série des quadrillages carrés ou losangés sont utilisées pour la fixation des dunes.

La paille du blé, du riz, des roseaux et d'autres types de plante peuvent être utilisées.

Pour la construction de ces carrées la moitié des plantes utilisées est cachée sous le sol et l'autre moitié est exposée au vent.

D'après Les résultats des expériences sur le terrain et la simulation les scientifiques chinois reconnaissent le maillage d'une hauteur (10 à 20 cm) comme étant le plus raisonnable pour son effet substantiel sur la fixation des dunes et son cout faible. Les dimensions les plus pratiques pour la construction des mailles

vont de 1m à 2 m de côté. Elles ont un effet remarquable sur la diminution de la vitesse du vent, la fixation du sable et la facilité à construire.

Le maillage augmente considérablement la rugosité de la surface et diminue l'intensité du flux de sable de 95% et la vitesse du vent de 20 à 40%. Cette disposition de maillage empêche le transport de sable par le vent et permet son dépôt.

Le maillage permet l'augmentation du contenu en matière organique par l'accumulation de grandes quantités de silt et d'argile, Les résultats indiquent qu'une augmentation continue de la teneur en silt et en argile augmente la quantité de particules fines et améliore la capacité de rétention en eau, la texture du sol et l'épaisseur de la couche arable ce qui permette une bonne remontée des plante et un bon renforcement des racines.

Cette méthode donne des résultats rapides sans aucune pollution. Dans les régions où les précipitations annuelles dépassent 200 mm, des végétaux sont plantés ou semés à l'intérieur des mailles pour renforcer la stabilisation des sables. Après établissement, les mailles se décomposent graduellement pour devenir de la matière organique.

Les inconvénients du maillage sont le coût, la main-d'œuvre et le remplacement des mailles après 3 à 5 ans. Cette technique est très importante dans la protection des chemins de fer et des routes contre l'ensablement. En général, le maillage peut être considéré comme une technique très efficace qui peut être largement utilisée pour la fixation des dunes à travers le monde. [138 - 141].



Figure 5.4 : Technique du quadrillage losangique [138].

5.2.4 Technique de mulch

Utilisé pour bloquer le sable dans les aires de départ ou de transfert, le mulching consiste à couvrir le sable d'objets naturels ou artificiels pour former une couche protectrice selon une densité plus ou moins grande et aussi uniforme que possible afin de supprimer la prise en charge éolienne au niveau du sol, empêcher le mécanisme de saltation, et conserver l'humidité en augmentant la cohésion du sol et permettre la restauration du couvert végétal.

5.2.4.1 Mulch végétal

La technique de mulch consiste à recouvrir le sol entre les récoltes ou quand le couvert végétale est inachevé par des débris végétaux composés de tiges de millet, de branches des arbustes.

La plupart des matériaux sont recueillis sur le terrain lui-même, ou dans les parcelles voisines.

Ce couvert est caractérisé par une hauteur de quelque centimètres et une densité qui peut aller jusqu'à $100 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$.

Cette technique est largement utilisée dans l'agriculture, sylviculture, et l'horticulture.

Les scientifiques ont constaté qu'une couverture de 15% du sol par les résidus de maïs peut réduire l'érosion de 75%. La quantité des résidus estimés pour la protection du sol et généralement inférieur à 2000 kg/ha. Si les résidus couvrent une surface inférieure à 10% leur capacité de protection diminue et peut entraîner à une augmentation de l'érosion à la présence de vent fort par rapport à un sol nu ce qui est expliqué par l'augmentation de la turbulence.

Quant à l'aspect environnemental, le paillage peut avoir plusieurs effets positifs, à savoir

- Limiter le transport des particules par le vent et la pluie et contrôler l'érosion
- l'amélioration de la structure de sol
- l'augmentation du contenu en matière organique et améliore la fertilité du sol
- l'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol
- la réduction de l'évaporation et des variations de température dans le sol
- joue un rôle important dans la fixation de CO₂.

En conséquence, les bonnes procédures de gestion des résidus sur les terres agricoles ont beaucoup d'avantage sur la qualité de sol et la production végétale [142, 143].

Les pertes en matière de paillage est principalement attribuée à l'activité des termites et au piétinement et la consommation par le bétail ou de l'influence conjointe de termites et du bétail [144, 145].

5.2.4.2 Mulch minéral

Le paillage par des cailloux et du gravier est une méthode très ancienne qui a été employée par des fermiers en Chine depuis plus de 300 ans. Elle est également largement utilisée dans le contrôle de l'érosion le long des routes, la stabilisation des versants et la fixation du sol.

Beaucoup d'études ont montré qu'un paillis de caillou ou de gravier est très efficace, il réduit l'évaporation, l'écoulement des ruissèlements, améliore l'infiltration de l'eau et la température du sol et conserve la fertilité.

Le paillage par les cailloux peut contrôler l'érosion éolienne de deux manières : empêcher le transport des particules du sol par le vent et piéger les particules en mouvement.

Les cailloux augmentent la rugosité de la surface et par conséquent absorbent une partie de l'énergie exercée par le vent sur le sol et réduisent la vitesse du vent.

Le taux de recouvrement dépend de la fréquence de la durée et de la vitesse du vent. A un certain taux de recouvrement un niveau d'équilibre est atteint et la vitesse du vent s'annule.

Le gravier contrôle l'érosion éolienne indépendamment de sa forme et de sa taille, ceci est valable pour l'attrapâmes des grosses particules cependant l'attrapâmes des particules fines est d'autant plus important que le diamètre des cailloux est petit. Certaine recherche on exigé un taux de recouvrement de 40% à 75%, pour un contrôle efficace et une rugosité maximale [146 - 149].

5.2.4.3 Mulch chimiques

La recherche sur la stabilisation chimique du sable remonte à 1930. Plus d'un demi-siècle de recherche et de pratique on prouvé que les stabilisateurs chimiques sont particulièrement appropriés à la réduction du transport du sable qui cause des dommages aux chemins de fer et aux routes des déserts.

La stabilisation chimique du sable consiste en la formation d'une croûte résistante qui conserve l'eau du sol, stabilise le sable et empêche l'érosion éolienne.

En général, les espaces intersticiels entre les grains du sable est d'environ 8 μm . Quand un stabilisateur liquide est pulvérisé sur la surface du sable, les gouttelettes plus petites que 8 μm s'infiltreront dans le sable et lient ses particules ensemble, tandis que les gouttelettes plus grandes forment un manteau sur la surface de sable qui protège le sol après consolidation.

Dans l'environnement naturel les produits chimiques qui composent le stabilisateur peuvent changer considérablement par les radiations solaires l'oxydation, l'érosion éolienne, la lixiviation des eaux de pluie, et d'autres facteurs. Au fil du temps, de tels facteurs environnementaux raccourcissent la durée de vie des stabilisateurs, particulièrement dans des régions désertiques en raison des conditions environnementales dures. En plus les stabilisateurs chimiques de sable doivent être non-toxiques, non polluantes et peu coûteux [150].

5.2.4.3.1 L'expérience de quelques pays dans le domaine de stabilisation chimique

Depuis le début des années 70, la République islamique d'Iran utilise des déchets pétroliers pour stabiliser les sables mouvants. Cette méthode n'est guère écologique et nuit à l'environnement, au sol et aux eaux souterraines, mais elle joue un rôle déterminant dans la stabilisation des dunes mobiles, surtout sur les lieux d'exploitation pétrolière exposés à la sécheresse et à des vents forts.

La Chine a utilisé des matériaux chimiques et de paillages plastiques. Selon les résultats de recherches scientifiques, ces produits chimiques permettent bien d'endiguer efficacement les mouvements de sable, mais ils ont des effets négatifs sur l'environnement ainsi que sur la préservation du sol et de l'eau [151].

Au Niger sur des jeunes plants de manguiers et dans plusieurs pays un polymère appelé le CMT (Co Monomer Technology) a été testé avec succès. Le CMT est un polymère organique biodégradable et super-absorbant, capable d'absorber de grandes quantités d'eau. Une faible quantité de ce produit est nécessaire pour emblaver de grandes superficies (5 kg/ha). Dans le domaine de l'agriculture, lorsque des semences en graines sont enrobées par une solution du CMT, leur taux de germination s'accroît, et le temps de cette germination diminue.

Le CMT améliore la santé des jeunes plantules en favorisant un enracinement précoce. Ce produit trouve également son application en foresterie, et surtout en matière de reforestation des milieux arides, car en absorbant les racines des plants, il réduit les chocs lors des transplantations. C'est également un bon isolant thermique. Le CMT est insoluble dans l'eau, il peut en plus conserver sa capacité d'absorption pendant plusieurs années de suite (5 ans sur un sol sableux par exemple) [152].

5.2.5 Le labour

Généralement le labourage augmente la probabilité du transport des particules par le vent, d'autre part le labour permet la destruction de la structure initiale du sol qui se trouve plus émiétté et donc plus vulnérable à l'érosion éolienne, donne des mottes ou agrégats plus humides qui résistent à l'entraînement, et produit des billons et des sillons (espace inter billons) qui augmentent la rugosité de la surface et fournissent des pièges pour les particules en saltation. Pour plus d'efficacité les billons et les sillons doivent être perpendiculaire au vent dominant [153].

Cependant, quand le nouveau sol devient sèche et que les agrégats se cassent, les particules fines deviennent libres et donc susceptibles à l'érosion, et le labourage répété peut créer un sol de structure plus sableuse et moins adhésif. Les billons peuvent être érodés à leurs crêtes, et les sillons peuvent être remplis de dépôt ce qui réduit leur efficacité par le temps. L'utilisation du labourage pour contrôler l'érosion est moins désirable, mais il est souvent moins coûteux. Dans les régions semi-arides où les récoltes préférées par les fermiers pour des raisons économiques ne produisent pas assez de résidu de labourage il peut être la meilleure méthode [154].

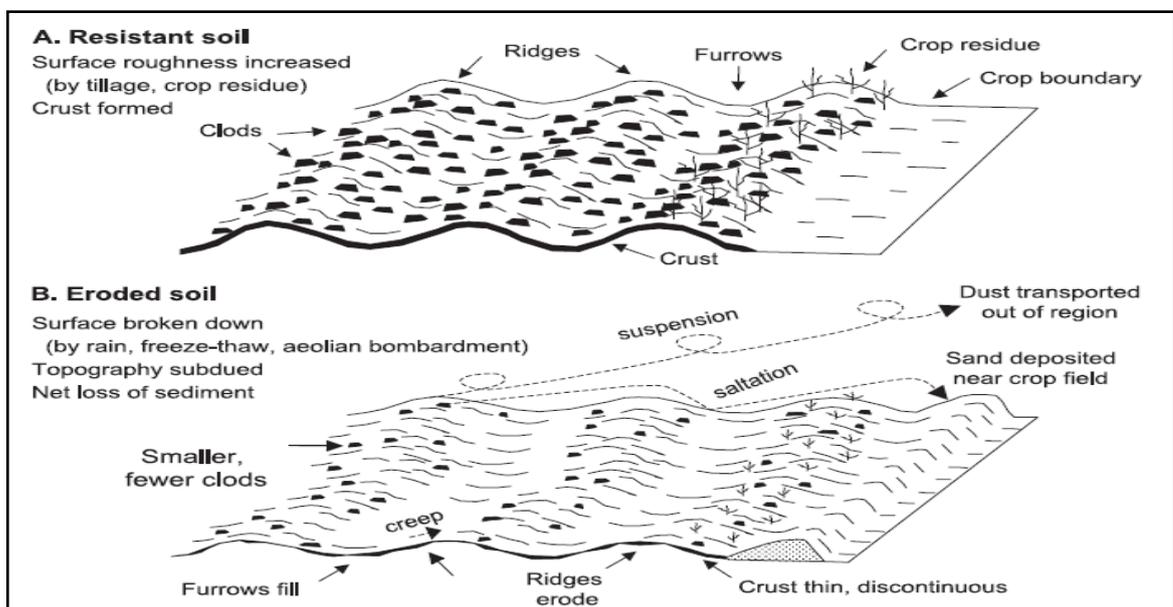


Figure 5.5 : Caractéristiques du champ qui contrôle la susceptibilité à l'érosion éolienne [154].

5.2.6 Méthode aérodynamique de désensablement

Elle est utilisée dans le sud Marocain, pour faire disparaître les petites dunes de 1 à 2 m de hauteur. Les Oasiens utilisent des pierres de 20 à 30 cm de diamètre elles sont déposés le long de la crête des dunes et sont séparées les unes des autres par une distance variant de 0,5 à 1m. Lorsque le vent érosif souffle, les turbulences se créent au niveau de chaque pierre. Ces turbulences augmentent ponctuellement la vitesse du vent et son énergie cinétique lui permettant de mettre le sable en mouvement et les petites dunes s'érodent dans

leur partie supérieure, diminuant progressivement jusqu'à disparition complète [155].

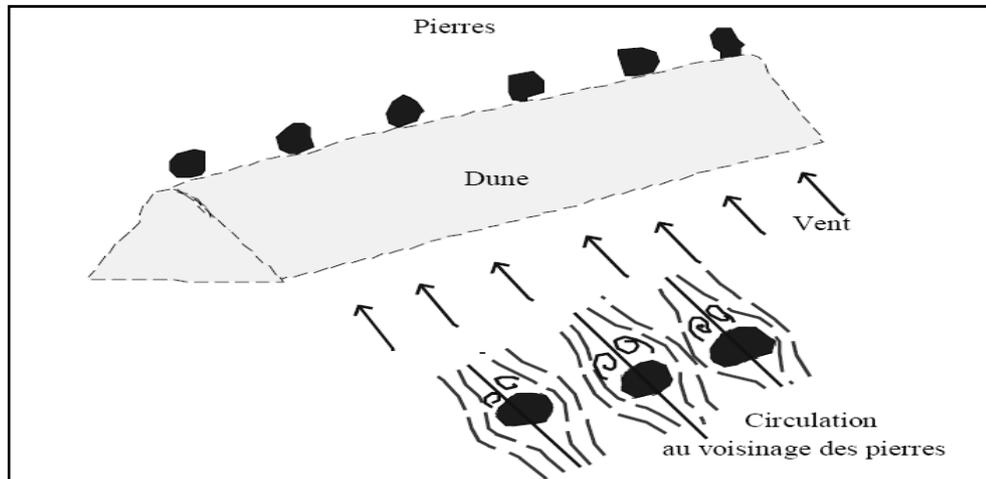


Figure 5.6 : Technique aérodynamique de désensablement cas des petites dunes [155].

5.3 Fixation biologique

Après la stabilisation du sol par des techniques mécanique il est indispensable de fixer le sol d'une manière définitive par la fixation biologique qui est réalisé par la plantation des herbes entre les barrières.

Les études ont démontré que la végétation extérieure, et particulièrement les herbes, peuvent empêcher le vent d'agir directement sur les matériaux extérieurs du sol par recouvrement, peuvent absorber l'énergie éolienne proche de la surface, favoriser le piégeage des poussières et des précipitations, pour éviter la perte d'éléments nutritifs de sol et peuvent aider de ce fait à améliorer la structure de sol, augmenter la capacité de rétention en eau et encourager la colonisation des plantes.

La disponibilité de l'eau est un facteur crucial dans la fixation biologique de sable. La croissance d'arbre exige de grandes quantités d'eau en comparaison avec les herbes qui consomment moins d'eau. Par conséquent, Il est nécessaire d'utiliser des espèces très résistantes à la sécheresse, au climat aride à la structure du sol moins fertile et nécessitant moins d'entretien [156, 157].

5.4 Conclusion

Afin de pouvoir limiter les effets négatifs du phénomène de l'érosion éolienne dans les différents pays du monde et particulièrement dans les zones arides et semi arides, plusieurs études ont été réalisées dans le but d'accéder aux meilleurs procédés de fixation (mécaniques et biologiques) pour atténuer l'avancée du sable et permettre à la végétation de se régénérer.

Cependant les efforts déployés à ce jour demeurent limités en vue à l'étendue des zones à protéger, le manque d'entretien, la disponibilité des matériaux, le coût quelque fois élevée et la main d'œuvre.

Toutefois, pour la réussite des différentes techniques de lutte, plusieurs paramètres doivent être respectés comme :

- le choix du matériau (palmes, plaques de fibrociment, tige, roseau,...etc.) selon la technique utilisée et selon sa disponibilité dans la zone à protéger avec le coût le plus faible.
- pour la technique de palissade, il faut respecter la hauteur, la perméabilité, l'espacement et l'emplacement par rapport à la direction dominante du vent efficace.
- Pour la fixation biologique ou définitive, le choix des espèces les plus résistantes à la sécheresse, l'irrégularité ainsi que la rareté des précipitations et qui s'adaptent mieux avec la qualité du sol qui caractérise les zones arides.
- Au niveau de l'état, il est nécessaire de mettre en évidence des programmes de sensibilisation et invite les populations locales à participer dans la réalisation, la sauvegarde et l'entretien des différentes réalisations.

**ANNEXE 2
PRESENTATION DES REGIMES DE VENT SOUS FORME
DES ROSES DES VENTS**

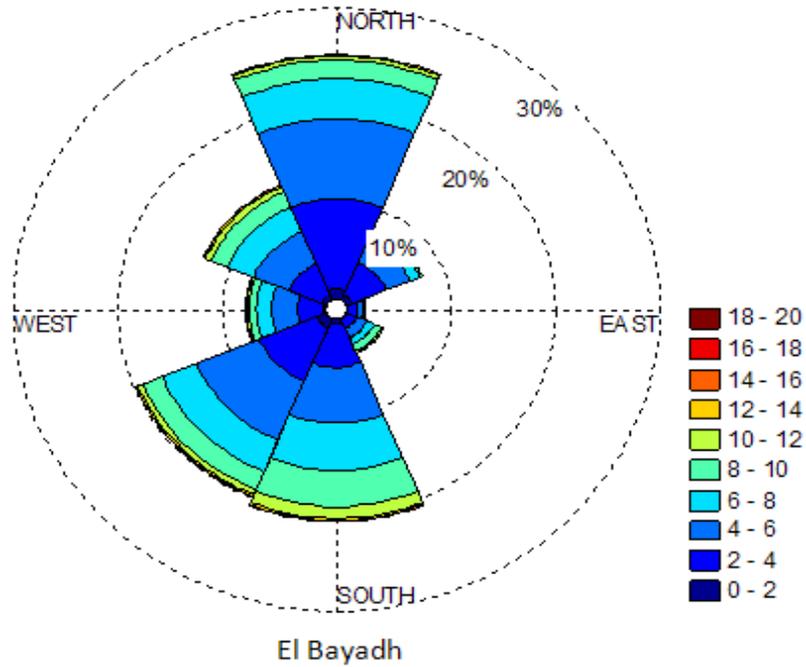


Fig 2.1 : Direction dominante annuelle du vent pour la station d'El Bayadh.

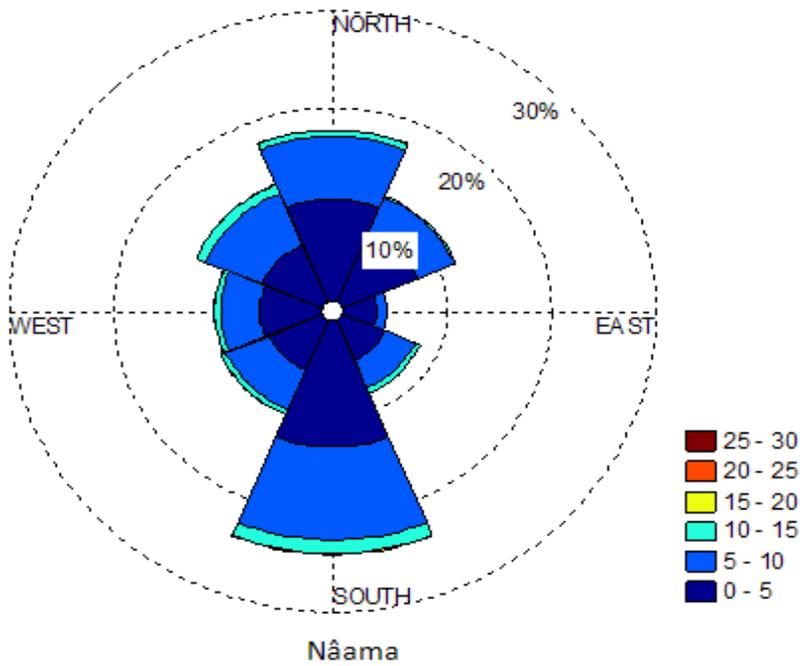


Fig 2.2 : Direction dominante annuelle du vent pour la station de Nâama.

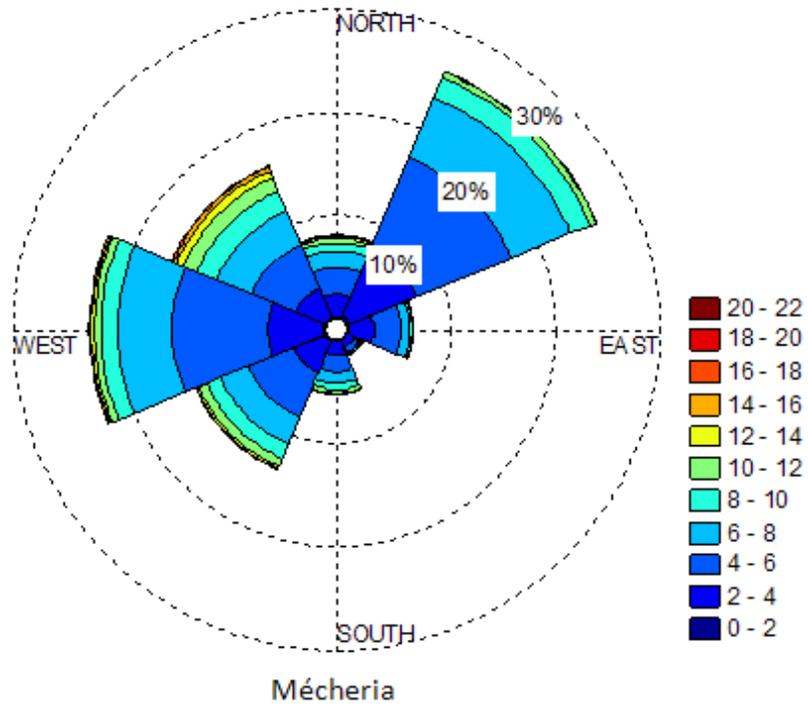


Fig 2.3 : Direction dominante annuelle du vent pour la station de Mécheria.

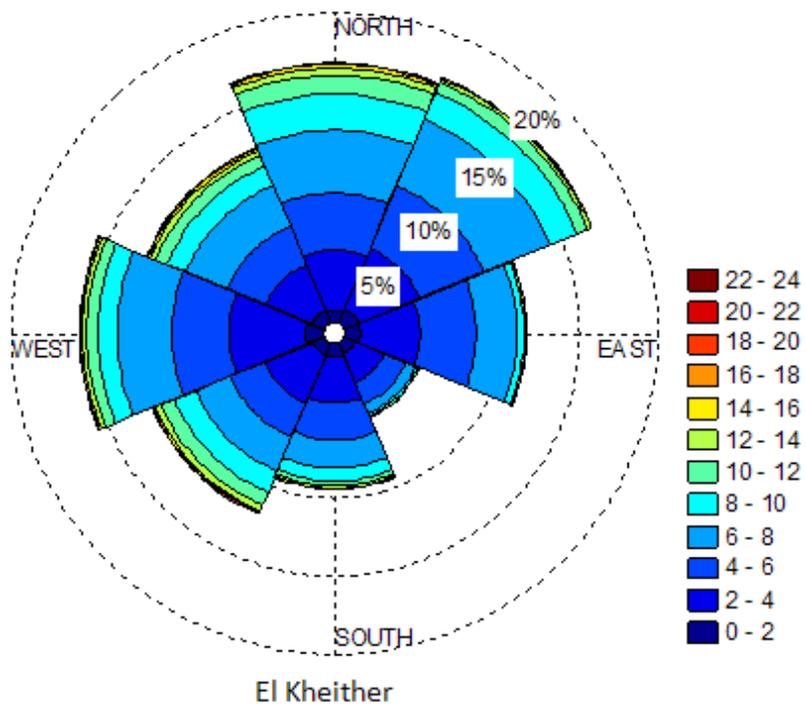


Fig 2.4 : Direction dominante annuelle du vent pour la station d'El Kheither.

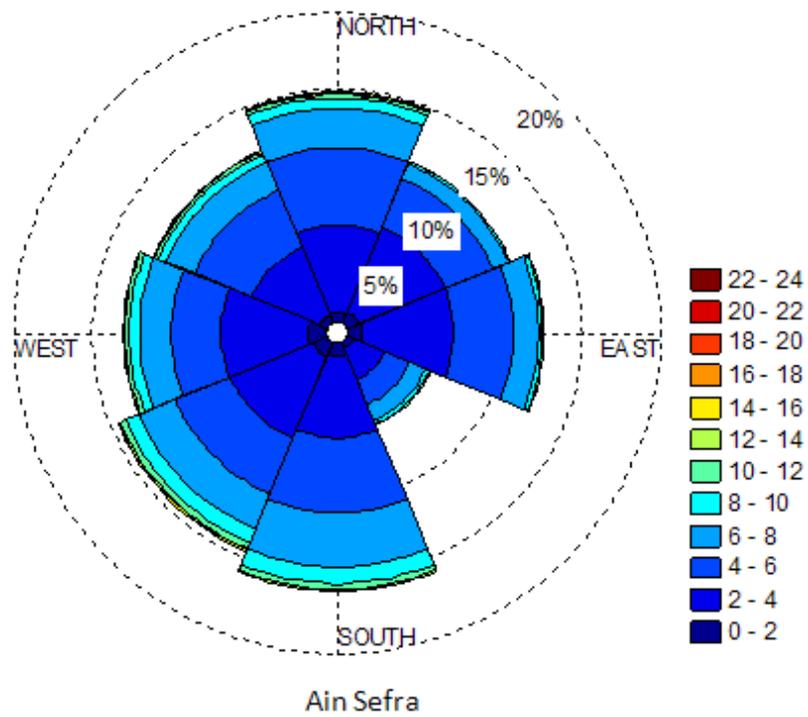


Fig 2.5 : Direction dominante annuelle du vent pour la station de Ain Sefra

ANNEXE 3

PARAMETRES DE WEIBULL POUR LES 5 STATIONS

Tableau 3.1 : Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station d'El Bayadh

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	2.2186	2.1009	2.0129	1.9810	2.1699	2.1523	2.1210	2.3332
NE	2.0071	2.3294	2.1200	2.3418	2.2081	2.4437	2.4029	2.1064
EE	1.9600	1.7148	2.0964	1.9918	2.3078	1.8841	2.3534	2.2221
SE	2.2159	2.3300	2.4995	2.3199	2.2204	2.1371	2.1223	2.0069
SS	2.1692	2.1957	2.3235	2.7029	2.7802	2.5381	2.3181	2.0298
SW	1.9578	1.9803	2.0873	2.3169	2.3645	2.4130	2.1417	1.9412
WW	1.9881	2.0460	1.9193	2.1261	2.2553	2.2688	2.1329	2.1887
NW	2.2000	2.2991	2.2028	2.0077	2.1147	2.1490	2.0667	1.8523

Tableau 3.2 : Variation horaire et directionnelle du facteur d'échelle pour la station d'El Bayadh

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	4.8853	4.7481	4.5770	4.5670	5.0581	5.3021	4.9455	5.2193
NE	3.8937	3.8843	3.6486	4.2087	4.5228	4.7363	4.8009	4.1772
EE	3.9045	4.0797	4.1059	4.0079	4.4059	5.1095	5.0542	3.8176
SE	5.7816	6.2451	6.2667	6.4937	6.4094	6.0661	5.4010	5.6956
SS	5.8947	5.8460	5.7408	7.0298	7.2408	7.2298	5.9679	5.3941
SW	4.5169	4.2583	4.1133	5.4183	6.3524	6.6494	5.6590	4.5991
WW	4.8564	5.1498	5.1173	5.2134	5.5930	6.0984	5.1784	4.6240
NW	5.6753	5.9878	5.7491	5.8273	5.9717	6.1101	5.4023	5.5313

Tableau 3.3 : Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station de Nâama

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	2.0149	1.7658	1.7244	1.8002	1.7727	1.8375	1.7720	1.8650
NE	2.1312	2.1656	2.0091	2.0802	2.0592	1.9954	1.8713	2.0018
EE	1.9971	1.9554	2.0142	1.8578	1.8043	2.2970	1.8575	1.8968
SE	1.8315	1.8732	1.8273	2.0482	1.9259	1.7515	1.9650	1.8094
SS	1.7028	1.6562	1.7606	1.8782	1.9819	2.1333	1.9400	1.7881
SW	1.7383	1.8641	1.7621	1.8517	1.8785	1.9790	2.1215	1.7451
WW	1.6698	1.5260	1.7116	1.9863	1.8339	1.7955	1.7321	1.7217
NW	1.8110	1.8770	1.7566	1.9484	1.8811	2.0281	1.9228	1.7631

Tableau 3.4: Variation horaire et directionnelle du facteur d'échelle pour la station de Nâama

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	4.5880	4.0304	3.8748	4.4333	4.7001	4.9710	4.9971	5.3890
NE	4.5112	3.7351	3.3948	3.5684	3.5383	3.9548	4.2945	5.3377
EE	4.0635	3.4646	3.1413	3.4491	3.7466	3.5293	3.6098	4.2673
SE	4.5743	4.8000	4.5405	6.1406	6.3176	5.8078	4.6388	5.0097
SS	4.1806	4.2541	3.8915	5.5456	6.4402	6.5606	5.3284	4.1797
SW	4.3340	4.0746	3.8036	5.3240	5.7151	6.1384	5.6459	4.5280
WW	4.4899	4.2093	3.9033	5.0127	5.2873	5.5051	4.9595	4.6704
NW	5.3318	5.1912	4.8414	5.4785	5.6625	5.9218	5.7367	5.4827

Tableau 3.5 : Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station de Mécheria

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	1.8821	1.8249	1.6708	2.0635	2.0270	2.1419	2.0004	2.1060
NE	2.7706	2.6030	2.3363	2.5996	2.4742	2.3933	2.4791	2.7352
EE	2.3467	2.6272	2.1484	2.4359	2.7109	2.3863	2.2160	2.5854
SE	1.9108	2.1413	2.5116	1.7308	2.0212	1.9803	2.1111	1.6437
SS	1.9339	2.3326	2.3109	2.3518	2.1885	2.3207	2.3714	1.9031
SW	2.1087	2.3312	2.3773	2.3573	2.2251	2.2429	2.5479	2.5176
WW	2.5716	2.3604	2.5722	2.5727	2.2686	2.2424	2.1630	2.1819
NW	2.0903	1.9744	1.9731	2.1078	2.1435	2.1530	1.9605	1.9945

Tableau 3.6 : Variation horaire et directionnelle du facteur d'échelle pour la station de Mécheria

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	6.0543	6.1547	5.6064	6.2284	5.8520	5.6067	5.7318	6.4630
NE	5.5580	5.0173	4.7154	5.0550	5.1397	5.3805	5.6340	6.3194
EE	5.0013	4.5288	4.0268	4.2801	4.5152	4.7272	4.7339	5.6884
SE	4.0706	4.0659	3.8087	4.2839	4.8218	5.3019	5.2240	4.6425
SS	6.3146	4.6144	4.5342	6.2833	7.1357	6.3340	5.3590	4.5394
SW	4.9477	5.1119	4.8737	5.4171	6.5839	7.2602	6.5195	5.1267
WW	5.2445	5.2706	5.1232	5.6744	6.4936	6.7165	6.0616	5.1631
NW	7.7680	7.5921	7.2603	7.6206	6.9288	6.6345	6.4558	7.3309

Tableau 3.7: Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station d'El Kheither

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	1.9347	1.5973	1.6210	1.8533	1.8724	2.1282	2.3776	2.0773
NE	2.1606	1.9048	1.8801	1.9649	1.8204	1.9655	2.7201	2.7018
EE	2.0539	2.2043	2.2574	2.0844	2.0842	2.0367	1.9565	2.3898
SE	2.0469	2.0242	1.9888	1.8831	1.6254	2.0192	1.4508	1.9288
SS	1.9688	1.9181	1.7526	1.7159	1.6798	1.9658	1.8912	1.8724
SW	1.6394	1.6570	1.7827	1.7607	1.8285	1.8783	1.8914	1.9009
WW	1.6694	1.6319	1.7337	1.8165	1.8343	2.0123	1.8360	1.8797
NW	1.7322	1.4767	1.6031	1.9485	1.9770	2.0365	2.1717	1.7597

Tableau 3.8: Variation horaire et directionnelle du facteur d'échelle pour la station d'El Kheither

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	5.1056	4.4797	4.2290	5.9017	6.9251	7.2071	7.9144	6.6161
NE	5.0385	4.1553	4.0521	5.4103	5.7058	6.1722	7.7335	6.3177
EE	4.5427	4.6003	4.2676	4.8715	4.4132	4.3526	5.0399	5.6105
SE	4.2412	4.0355	3.1237	4.4134	4.0654	3.6079	4.2777	5.1427
SS	5.1187	4.8613	4.5067	5.5849	6.2385	6.0161	4.9804	4.7409
SW	4.9745	4.4494	4.2259	5.7410	7.0023	7.7524	6.4560	5.5288
WW	4.2920	4.1151	4.3525	4.7372	6.0961	6.6032	5.7143	5.6475
NW	5.1007	4.3888	3.9170	5.5654	7.3697	7.4442	6.5681	5.7421

Tableau 3.9: Variation horaire et directionnelle du facteur de forme pour la station d'Ain Sefra

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	2.0367	1.9535	2.4169	1.9846	2.0914	2.3094	2.2492	2.0749
NE	2.1342	2.3554	2.4682	2.4711	2.3488	2.4126	2.2460	1.9887
EE	2.2306	2.0958	2.4157	2.1850	2.0037	2.2169	2.1647	2.2497
SE	1.9376	1.9535	1.5755	1.7856	2.2506	2.2647	2.2434	2.1913
SS	2.0392	1.9496	1.8472	1.8223	2.2475	2.4599	2.2230	2.3777
SW	1.6888	1.6323	1.9140	1.7923	1.9001	2.3138	2.2330	1.9173
WW	1.8862	1.7788	1.8515	1.8165	1.9586	2.2961	2.2790	1.9214
NW	1.9902	1.9868	2.0026	2.0883	2.1969	2.3775	2.1727	1.9483

Tableau 3.10: Variation horaire et directionnelle du facteur d'échelle pour la station de Ain Sefra

	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
NN	4.8876	4.4370	4.3293	4.7211	4.7004	4.5954	4.6289	5.7440
NE	3.6934	3.6740	3.9142	4.2341	3.8507	3.7578	3.8351	3.8614
EE	3.9698	4.0578	4.4414	4.4807	4.4359	4.1069	3.9360	3.7727
SE	5.0985	3.8168	4.0506	4.7181	5.1670	4.8515	4.5608	4.1924
SS	4.7390	3.9534	3.9506	4.6209	5.5072	5.9196	4.9172	4.3960
SW	3.9722	3.9010	3.5511	3.7764	5.2831	6.0657	5.5029	4.3430
WW	3.4494	3.3128	3.2378	3.7785	5.4065	5.9072	5.1962	3.7099
NW	4.3945	4.5768	4.3365	4.6824	4.8964	4.9184	4.6810	5.4603

ANNEXE 4

PRESENTATION DES REGIMES DE VENT DE SABLE SOUS FORME DES ROSES DES VENTS

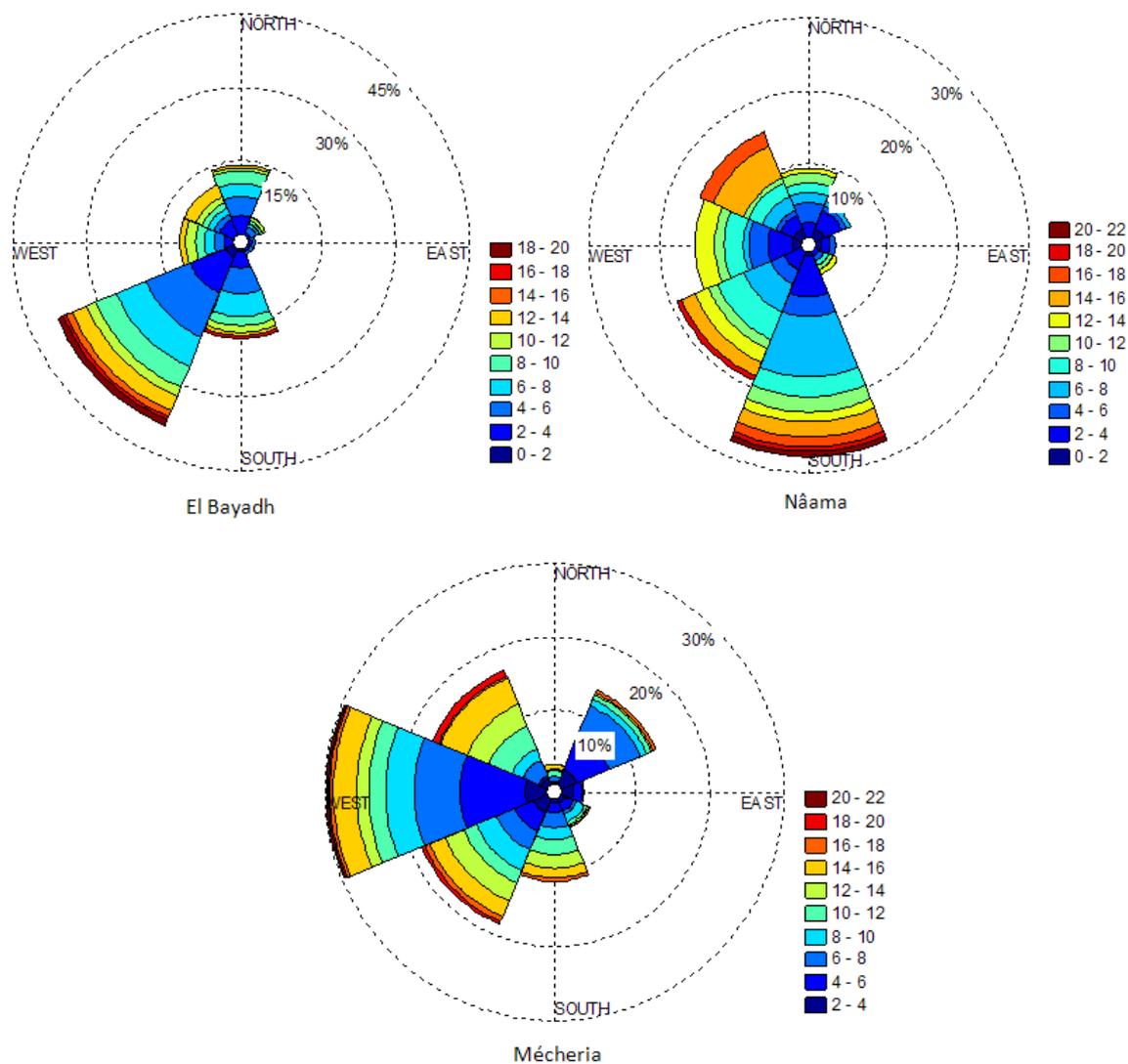


Figure 4.1 : Variations directionnelles annuelles des vents de sable pour les 3 stations (Nâama, Mécheria et El Bayadh).