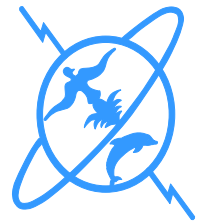


UNIVERSITÉ MOHAMMED V – AGDAL  
FACULTÉ DES SCIENCES  
Rabat



N° d'ordre 2382

## THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par

**Abdelilah El GHANNOUCHI**

**Discipline :** Géologie Appliquée  
**Spécialité :** Géo-environnement

**Titre :**

***DYNAMIQUE EOLIENNE DANS LA PLAINE DE SOUSS :  
APPROCHE MODELISATRICE DE LA LUTTE CONTRE  
L'ENSABLEMENT***

**Soutenu le :** 10/11/2007  
Devant le jury

**Président :**

Mr. Mohammed ZAHRAOUI : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. Rabat

**Examineurs :**

Mr. Mohammed EL WARTITI : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. Rabat

Mr. Mohammed EL YOUSSE : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. Rabat

Mr. Benacer EL MAHI : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. Rabat

Mr. Driss FADLI : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. Rabat

Mr. Hafid SABER : Prof. de l'Enseignement Supérieur, Fac. Sc. El Jadida

Mr. Nouredine BOUAOUDA : Ingénieur à l'I.A.V, Rabat

# TABLE DES MATIERES

<b>LISTES DES FIGURES</b> .....	4
<b>LISTES DES TABLEAUX</b> .....	5
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	6
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	10
<b>1<sup>ère</sup> PARTIE : ASPECTS PHYSIQUES</b> .....	13
<b>CHAPITRE I : CADRE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL</b> .....	14
INTRODUCTION .....	15
I- AXES STRUCTURAUX DU BASSIN VERSANT DE SOUSS.....	16
II- STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE.....	16
1. Les formations Précambriennes .....	17
2. Les formations Paléozoïques.....	20
3. Les formations Mésozoïques .....	23
4. Les formations Cénozoïques .....	23
5. Quaternaire.....	24
CONCLUSION.....	34
<b>CHAPITRE II : CADRE GEOMORPHOLOGIQUE</b> .....	35
I- LES MONTAGNES.....	36
II-LA PLAINE DE SOUSS.....	36
<b>CHAPITRE III: CADRE HYDROLOGIQUE</b> .....	39
I-BASSIN VERSANT DE SOUSS.....	40
II-HYDRODYNAMISME LITTORAL.....	42
<b>CHAPITRE IV: CADRE PEDOLOGIQUE</b> .....	44
INTRODUCTION.....	45
I-SOLS ISOHUMIQUES.....	45
II-SOLS PEU EVOLUES.....	47
<b>CHAPITRE V:CADRE CLIMATIQUE</b> .....	48
I. LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES .....	49
1.1- Précipitations.....	49
1.2- Températures.....	51
1.3- Aridité .....	53
1.4- Evaporation et Evapotranspiration.....	55
1.5- Hygrométrie.....	57
1.6- Insolation.....	57
1.7- Vent.....	57
II.CLASSIFICATION CLIMATIQUE.....	59
CONCLUSION .....	60
<b>2<sup>ème</sup> PARTIE : ETUDE MORPHOSEDIMENTAIRE DU SYSTEME DUNAIRE DE SOUSS</b> .....	61
<b>CHAPITRE I: MORPHOGENESE ET EROSION EOLIENNE</b> .....	62
INTRODUCTION.....	63
I-SYNTHESE DES TRAVAUX ANTERIEURS.....	63
II-MECANISME DE L'EROSION EOLIENNE.....	65
<b>CHAPITRE II: SEDIMENTOLOGIE</b> .....	80
INTRODUCTION.....	81
I-MATERIEL ET METHODES.....	81
1. Fraction Fine.....	81
2. Calcimétrie.....	81
3. Granulométrie.....	82
4. Morphoscopie.....	85
II.RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	87
1- Evolution de la fraction fine .....	87
2- Calcimétrie.....	87
3- Granulométrie.....	89
3.1-Expression graphique.....	89
3.2-Indices numériques.....	91
3.3-Test FICHER.....	93
3.4-Test FREIDMEN.....	95

4- Morphoscopie.....	97
CONCLUSION .....	98
<b>CHAPITRE III: CARTOGRAPHIE EVOLUTIVE .....</b>	<b>99</b>
INTRODUCTION.....	100
I- NOTION DU SYSTEME GLOBAL D’ACTION EOLIENNE (S. G. A. E).....	100
1. Choix et présentation du site.....	102
1. Localisation du site.....	103
2. Topographie du site.....	103
II- MATERIEL ET METHODES.....	103
1. Investigation de la photo-aérienne.....	104
2. Cartographie.....	107
3. Résultats et Interprétations.....	109
III. NOTION DU « FLEUVE DE SABLES ».....	114
1. Définition.....	114
2. Orientation.....	114
3. Forme générale .....	114
3.1- Dynamique du « Fleuve de Sables » .....	114
3.2- Géodynamique des Barkhanes .....	115
3.3-Morphologie des formations barkhaniques.....	115
3.3-Associations barkhaniques.....	118
3.4- Cordon barkhanoides .....	118
Conclusion.....	118
<b>3<sup>ème</sup> PARTIE : QUANTIFICATION DE L’EROSION EOLIENNE DANS LE SYSTEME DUNAIRE DE</b>	<b>120</b>
<b>SOUSS.....</b>	<b>120</b>
<b>CHAPITRE I:MODELE DE DEPLACEMENT POTENTIEL DES SABLES (D.P.S).....</b>	<b>121</b>
INTRODUCTION.....	122
I-METHODOLOGIE .....	122
1. Calcul du Déplacement potentiel des sables DPS.....	122
2. Choix de la vitesse seuil d’arrachement.....	124
3. Direction résultante en °N et son potentiel de migration (MR).....	124
4. Variabilité directionnelle (MR/CT).....	125
5. Quantification des déplacements sableux.....	125
6. Rose des déplacements sableux .....	126
7. Capacité de transport des sables.....	126
II- RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	126
1. Régime des vents .....	126
2. Régime des vents efficaces.....	127
3. Rose des déplacements potentiels des sables.....	128
4. Variabilité directionnelle.....	129
5. Quantification du DPS en masse et en volume.....	129
CONCLUSION .....	129
<b>CHAPITRE II : MODELE EXPERIMENTAL: QUANTIFICATION DE L’EROSION EOLIENNE PAR LES</b>	<b>132</b>
<b>ECHANTILLONNEURS DE TYPE (B.S.N.E) .....</b>	<b>132</b>
INTRODUCTION.....	133
I- MATERIEL ET METHODES.....	133
1. Dispositif de Mesure.....	135
2. Mesures et Observations.....	135
3. Traitement des données.....	138
II-RESULTATS ET INTERPRETATION.....	142
Profil de la charge éolienne.....	142
1. Variation de la charge avec la hauteur de capteurs.....	143
2. Variation de la charge le long de Transect.....	144
3. Variation de la charge avec le type de dune.....	146
4. Variation de la charge avec la position du Mat.....	148
5. Variation saisonnière de la charge éolienne.....	150
6. Estimation du transit éolien.....	151
<b>CHAPITRE III: METHODES GRAPHIQUES D’ESTIMATION DES TRANSITS EOLIENS: ABAQUE DE</b>	<b>155</b>
<b>THOMAS.....</b>	<b>155</b>

<b>I.METHODOLOGIE.....</b>	<b>156</b>
<b>II.RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>157</b>
<b>CHAPITRE IV : RELATION ENTRE LES POSITIONS, LES CONFIGURATIONS DE L'ANTI-CYCLONE DES AÇORES ET LE DEPLACEMENT SABLEUX SAISONNIER DANS LE SYSTEME DUNAIRE DE SOUSS.....</b>	<b>154</b>
<b>SOUSS.....</b>	<b>160</b>
<b>I-APERÇU GENERAL SUR L'ANTICYCLONE DES AÇORES .....</b>	<b>161</b>
1. Définition.....	161
2. Mécanisme des formations.....	161
3. Caractéristiques .....	161
4. Trajectoire .....	161
5. Classification .....	162
6. Cartographie des positions saisonnières des Açores .....	162
7. Capacité de transport .....	163
8. Estimation du gradient de pression.....	164
<b>4<sup>ème</sup> PARTIE : EVALUATION DES METHODES DE LUTTECONTRE L 'ENSABLEMENT DANS LA PLAIN DE SOUSS.....</b>	<b>165</b>
<b>CHAPITRE I : PRESENTATION DES METHODES.....</b>	<b>167</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>167</b>
<b>I-METHODES TRADITIONNELLES .....</b>	<b>167</b>
1. Accumulations sableuses.....	167
2. Migration dunaire.....	168
<b>II-METHODES MODERNES.....</b>	<b>168</b>
1. STRATEGIE d'intervention.....	168
2. Techniques de fixation.....	169
2.1. Lutte mécanique.....	169
2.2. Lutte biologique.....	172
2.3. Lutte physico-chimique.....	174
<b>III-EVALUATION DES METHODES DE LUTTE CONTRE L'ENSABLMENT.....</b>	<b>176</b>
1. Le cordon littoral.....	176
2. Les brises vents.....	176
3. La fixation du système dunaire.....	177
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>179</b>
<b>RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>183</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>186</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure.1	:	Situation géographique de la zone d'étude dans le bassin versant de Souss.....	15
Figure.2	:	Schéma géologique du bassin versant de l'oued Souss. Source : Document digitalisé d'après le schéma originel In " Ressources en eau du Maroc - Tomme 3 " .....	18
Figure 3	:	Carte structurale schématique du substratum de la vallée de Souss. Source : D'après la carte structurale originelle de R. Dijon, 1969 .....	22
Figure 4	:	Granulométrie moyenne des sables vifs (Weisrock et al, 2002).....	26
Figure.5	:	Coupe synthétique des accumulations dunaires du littoral des Chtoukas-Ouest.....	30
Figure.6	:	Coupe synthétique des accumulations dunaires du littoral des Chtoukas-Est.....	30
Figure.7	:	Caractéristiques du bassin versant de Souss.....	37
Figure 8	:	Carte pédologique de la région Souss -Massa « Choubert 1957 modifiée ».....	44
Figure.9	:	Carte de répartition des précipitations moyennes pour le mois d'octobre (1960-1998).....	47
Figure.10	:	Variation de la moyenne annuelle des températures maximales et minimales de 1950 à 1985 (Source : <i>Météorologie Nationale</i> ).....	50
Figure.11	:	Diagramme ombrothermique de BABNOULS et GAUSSEN, 1953 pour le bassin du Souss.....	52
Figure 12	:	Direction des vents dominants dans la plaine de Souss (d'après OCHACHAM, 1990).....	55
Figure.13	:	Vents- Sécheresse- Sol '' (D'après Coudé-Gausсен. G, 1994).....	61
Figure.14	:	Relation entre le pourcentage d'agrégat et la vitesse seuil d'entraînement (W.G. NTCKLLNG & J.A. GILLIES, 1987).....	64
Figure. 15	:	Relation entre la granulométrie et le mode de transport et d'accumulation (D'après RL Folck, 1959).....	65
Figure. 16	:	Edifices sableux de la zone d'accumulation des sables.....	73
Figure. 17	:	Variation de la fraction fine dans le système dunaire de Souss.....	82
Figure. 18	:	Evolution des carbonates dans le système dunaire de Souss.....	82
Figures. 19 a, 20a et 21 a	:	Courbes des fréquences.....	84
Figures. 19 b, 20 b et 21 b	:	Courbes cumulatives.....	84
Figure.22	:	Evolution de la taille moyenne des sédiments dans le système dunaire de Souss.....	85
Figure.23	:	Processus de la dynamique éolienne.....	88
Figure.24	:	Diagramme de Friedman.....	90
Figure.25	:	Evolution de la morphoscopie des sédiments dans le système dunaire de Souss.....	91
Figure.26	:	Profil topographique pour la réalisation des cartes d'occupation des sols.....	101
Figure.27	:	Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss (1969).....	103
Figure.28	:	Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss (1986).....	104
Figure.29	:	Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss (1990).....	105
Figure.30	:	Carte de l'avancée du front du système dunaire de Souss entre 1969 et 1992.....	106
Figure.31	:	Processus d'accumulation et de progression des barkhanes.....	110
Figure.32	:	Rose d'origine des vents au niveau du système dunaire de Souss.....	120
Figure.33	:	Régime des vents efficaces au niveau du système dunaire de Souss.....	120
Figure.34	:	Rose du déplacement potentiel des sables.....	121
Figure.35	:	Rose des directions des migrations des sables.....	121
Figure.36	:	Etude comparative du DPS dans le système dunaire de Souss.....	124
Figure.37	:	Situation des transect A,B,C dans le système dunaire de Souss.....	127
Figure.38	:	Schéma de l'échantillonneur BSNE standard Frayear, 1986).....	130
Figure.39	:	Variation de la charge moyenne du vent avec la hauteur des capteurs.....	136
Figure.40	:	Variation de la charge moyenne du vent par transect.....	137
Figure.41	:	Variation de la charge des sédiments érodés par transect par type de dune.....	138
Figure.42	:	Variation de la charge moyenne des capteurs par type de dune.....	140
Figure.43	:	Variation de la charge moyenne du vent par type de dune par transect.....	140
Figure.44	:	Variation de la charge moyenne du vent par position des mâts par rapport à la dune.....	142
Figure.45	:	Variation de la charge moyenne du vent par position des mâts par transect.....	142
Figure.46	:	Variation de quantité des sédiments érodés par mât par transect C durant la saison hivernale.....	144
Figure.47	:	Abaque de Thomas pour l'estimation du débit solide éolien (Thomas 1975).....	148
Figure.48	:	Bilan du transit éolien annuel 1994-1995.....	150
Figure.49	:	Bilan du transit éolien annuel résultant.....	150
Figure.50	:	Variation saisonnière du gradient pression.....	156
Figure.51	:	Limites des techniques de fixation des dunes dans le système dunaire de Souss.....	169

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	:	Les températures moyennes annuelles pour la vallée du Souss.....	49
Tableau II	:	Moyenne annuelle des températures maximales et minimales de 1950 à 1985.....	49
Tableau III	:	Indice de De Martonne pour les surfaces des sous-bassins et du bassin versant.....	51
Tableau IV	:	Comparaison entre les caractéristiques du vent et de l'eau.....	63
Tableau V	:	Bilan sédimentaire et types de dépôts (D'après M. MAINGUET, 1984).....	71
Tableau VI	:	Valeurs des indices granulométriques au niveau du système dunaire de Souss.....	86
Tableau VII	:	Evolution du Stock et déplacement sableux au sein du « Fleuve de sable » de Souss.....	111
Tableau VIII	:	Résultats de L'Analyse de la Variance.....	135
Tableau IX	:	Efficacité de la fixation mécanique et biologique.....	145
Tableau X	:	Efficacité de fixation dans le transect C par rapport aux transects A et B.....	145
Tableau XI	:	Comparaison des méthodes d'estimation du flux de l'érosion éolienne. ....	151

## REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce domaine ont été effectués au sein du laboratoire de Géologie Appliquée du Département de la Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université Mohamed V de Rabat, en collaboration avec l'Institut Agronomique et Vétérinaire (IAV) Hassan II de Rabat. .

Je demeurerai très reconnaissant envers mon encadrant, Monsieur Mohamed El WARTITI, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et Chef de l'UFR Ressources Minières, Ressources en Eau et Environnement pour la confiance qu'il m'a accordé en me proposant ce sujet. Je le remercie vivement pour son encadrement, sa disponibilité, sa patience et pour tous les moyens nécessaires qu'il a mis à ma disposition pour la réalisation de ce travail. Ses conseils et directives judicieux m'ont permis de surmonter les différentes difficultés et de mener à bien mes investigations. Qu'il trouve ici l'expression de mon estime et de mon profond respect.

Mes remerciements et ma reconnaissance s'adressent aussi à Monsieur Mohammed ZAHRAOUI, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat. Vous me faites le grand honneur en acceptant de présider le Jury de cette thèse malgré vos diverses occupations au sein du Département de Géologie. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma haute considération.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude aux autres membres de Jury : Monsieur Mohammed EL YOUSSE, Monsieur Benacer EL MAHI et Monsieur Driss FADLI, Professeurs à la Faculté des Sciences de Rabat et Monsieur Hafid SABER, Professeur à la Faculté des Sciences D'EL JADIDA. Vous me faites le grand honneur en acceptant de juger ce travail malgré vos occupations multiples.

Mes sincères remerciements au Personnel du Département de Géologie .En reconnaissance de votre soutien et de votre sympathie, veuillez croire en ma profonde estime.

Je rends Hommage par ce travail à mes Défunts parents qui m'avaient tant encouragé pour avancer dans mes études.

Mes remerciements et toute ma reconnaissance s'adressent aux autres membres de ma famille, en particulier à mon frère Mustapha pour son aide précieuse et ses encouragements le long de mon parcours universitaire.

Je suis tant redevable également à mon épouse qui m'a constamment encouragé et soutenu le long de ce travail.

Enfin, je remercie tous mes amis (es) pour leur aide et toute autre personne qui a contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.



## RESUME

La région de Souss connaît de graves problèmes écologiques, liés à l'érosion éolienne et à la migration des dunes qui accélèrent le processus de la désertification. Cette région est actuellement sous la menace de l'invasion par des sables de son infrastructure de base (routes, canaux d'irrigation, champs de culture...etc.) dont l'impact socio-économique se traduit par la baisse de la production agricole et la réduction des espaces pastoraux, autant de facteurs qui alimentent l'exode rural massif vers la ville d'Agadir et les centres urbains avoisinants et à la réduction des opportunités d'emploi pour une grande partie de la main d'œuvre traditionnellement employée dans les activités agropastorale.

Le présent travail propose des approches modélisatrices et expérimentales complétées par une étude morphosedimentaire et la cartographie évolutive des sols qui ont mis en évidence les limites des opérations de fixation mécanique et biologique au niveau de l'erg de Souss, puisque, les surfaces ensablées continuent de progresser avec une vitesse annuelle de 10 m/an.

La quantification du flux de l'érosion éolienne par les échantillonneurs de sables de type B.S.N.E standard montre que la source de l'ensablement correspond aux zones actives de la déflation occupées par les dunes paraboliques fixées mécaniquement ou biologiquement.

Le modèle de déplacement potentiel des sables a mis en évidence les zones de transport des sables par les alizés « Sahel » sous forme de courants dunaires transversales et barkhanes orientés ONO-ESE.

Il en ressort que toute stratégie de lutte contre l'avancé des sables, doit intervenir en amont pour stabiliser la zones de déflation occupée les premières dunes paraboliques du Nord du système dunaires de Souss, et en aval pour fixer les zones de transport ciblant les dunes transversales à l'ouest et les barkhanes à l'Est de l'erg.

**Mots clés :** Modélisation, dynamique éolienne, déplacement potentiel des sables, échantillonneur des sables BSNE standard, système dunaire de Souss,.

## SUMMARY

The region of Souss knows serious ecological problems, bound to the wind erosion and the migration of the dunes that accelerate the process of the desertification. This region is currently under the threat of the invasion by sands of his/her/its basis infrastructure (roads, channels of irrigation, fields of culture...etc.) whose socioeconomic impact is translated by the decrease of the agricultural production and the reduction of the pastoral spaces, as many factors that nourishes the massive farming exodus toward the city of Agadir and the neighboring urban centers and to the reduction of the opportunities of employment for a big part of the work hand traditionally employee in the activities agropastorale.

The present work proposes some approaches experimental and empirical completed by a survey sediment logy and the evolutionary cartography of soils that put in evidence the limits of the mechanical and biologic fixing operations to the level of the erg of Souss, since, the dunes continues to progress with a yearly speed of 10 m/an.

The quantification of the flux of the wind erosion by the catcher of sands of B.S.N.E type standard watch that the source of the blinding corresponds to the active zones of deflation occupied by the fixed mechanically parabolic dunes or biologically.

The model of potential displacement of the sands put in evidence the zones of transportation of the sands by the trade "Sahels" as currents dunaires transverse and barchans oriented ONO-ESE.

It takes out again of it that all strategy of struggle against the advanced of the sands, must intervene upstream to consolidate the zones of occupied deflation the first parabolic dunes of the North of the system dunaires of Souss, and downstream to fix the zones of transportation targeting the transverse dunes to the west and the barchans in the East of the erg.

**Key words:** Modeling, wind dynamic, potential displacement of the sands, catcher standard BSNE, System dunes of Souss,

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Sur les huit millions de Km<sup>2</sup> du Sahara marocain, seul un cinquième de sa surface est recouvert par des ergs (*CAPOT-RAY, 1953*). Ce paysage saharien sans cesse façonné par les vents, se rencontre aussi bien dans la partie orientale de ce grand désert que dans sa partie occidentale, appelé « Sahara Atlantique ». Dans cette région s'étend des « courants sableux atlantiques », sous forme de longues bandes de dunes orientés NNE-SSW, parallèles au littoral (*MAINGUET, 1984*).

La région de Souss au sud du Maroc connaît de graves problèmes écologiques, liés à l'érosion éolienne et à la migration des dunes qui accélèrent davantage le processus de la désertification. Elle vit actuellement sous la menace de l'invasion de ses infrastructures de base par des sables (routes, canaux d'irrigation, champs de culture...etc.). Sur le plan socio-économique ce phénomène est à l'origine de la baisse de la production agricole et la réduction des espaces pastoraux, ce qui alimente l'exode rural massif vers la ville d'Agadir et les centres urbains avoisinants.

Face à l'ampleur du phénomène, il était important, dans le cadre du présent travail, de dépasser l'aspect descriptif du phénomène, en se focalisant sur des méthodes modélisatrices et expérimentales en vue de moderniser le dispositif de lutte contre l'ensablement dont les techniques n'ont pas changé depuis les années cinquante.

C'est dans cette optique que trois objectifs ont été fixés :

1. Evaluer l'évolution du bilan sédimentaire dans le système dunaire de Souss en vue de déceler les zones vulnérables aux processus de la dynamique éolienne ;
2. Tester et évaluer des méthodes modélisatrices et expérimentales destinées à estimer les flux des déplacements sableux ;
3. Utiliser ces méthodes pour évaluer l'efficacité du dispositif mis en place pour lutter contre le phénomène de l'ensablement et d'y apporter les remèdes nécessaires.

Pour cela, le plan d'étude adopté s'articule autour de quatre parties principales :

- ✎ La première consiste à placer le système dunaire de Souss dans son contexte géologique pour mettre en évidence les agents dynamiques qui agissent sur son équilibre sédimentaire.
- ✎ La deuxième partie est consacrée à la sédimentologie et l'élaboration des cartes d'occupation des sols, afin de délimiter les zones vulnérables à l'érosion éolienne ; de préciser l'origine, l'évolution et la migration du matériel sableux du système de Souss.
- ✎ La troisième partie est destinée à tester et à évaluer deux modèles d'estimation du flux sableux dans le système dunaire du Souss et le placer dans son cycle climatique ; il s'agit du :
  - Modèle du déplacement potentiel sableux proposé par *BAGNOLD, 1954*, amélioré par *FRYBERGER, 1979* et simplifié par *OULHRI, 1992* qui repose sur la vitesse seuil d'arrachement des grains de sables par le vent.
  - Modèle expérimental développé par *FRYREAR, 1986* qui repose sur la charge du vent par les capteurs de piégeage du sable de type **(B.S.N.E)** standard.
- ✎ La quatrième partie est consacrée à l'évaluation de dispositif de lutte contre l'ensablement installé depuis les années cinquante, à la lumière des résultats obtenus par la validité des méthodes testées.

En fin nous terminerons par une conclusion générale sous forme de synthèse et de suggestions sur quelques voies d'approfondissement de la recherche dans ce domaine.

# 1<sup>ère</sup> Partie :

## ASPECTS PHYSIQUES

# Chapitre I

## CADRE GEOLOGIQUE

## INTRODUCTION :

Le système dunaire de Souss se situe entre les latitudes (30°39'N, 9°53'W) et (27°58'N, 12°51'W). Il constitue actuellement un vaste erg « fleuve de sable » au sud de l'embouchure de l'Oued Souss. Ce système s'étale sur une surface de 60 Km<sup>2</sup>, sur lequel s'est développée une végétation relativement importante. Il est orienté NNO-SSE, limité au Nord par l'oued Souss, à l'Est par la Ksima Oustaniene, au Sud par la route Nationale d'Ait Melloul et à l'Ouest par l'océan Atlantique (figure 1).

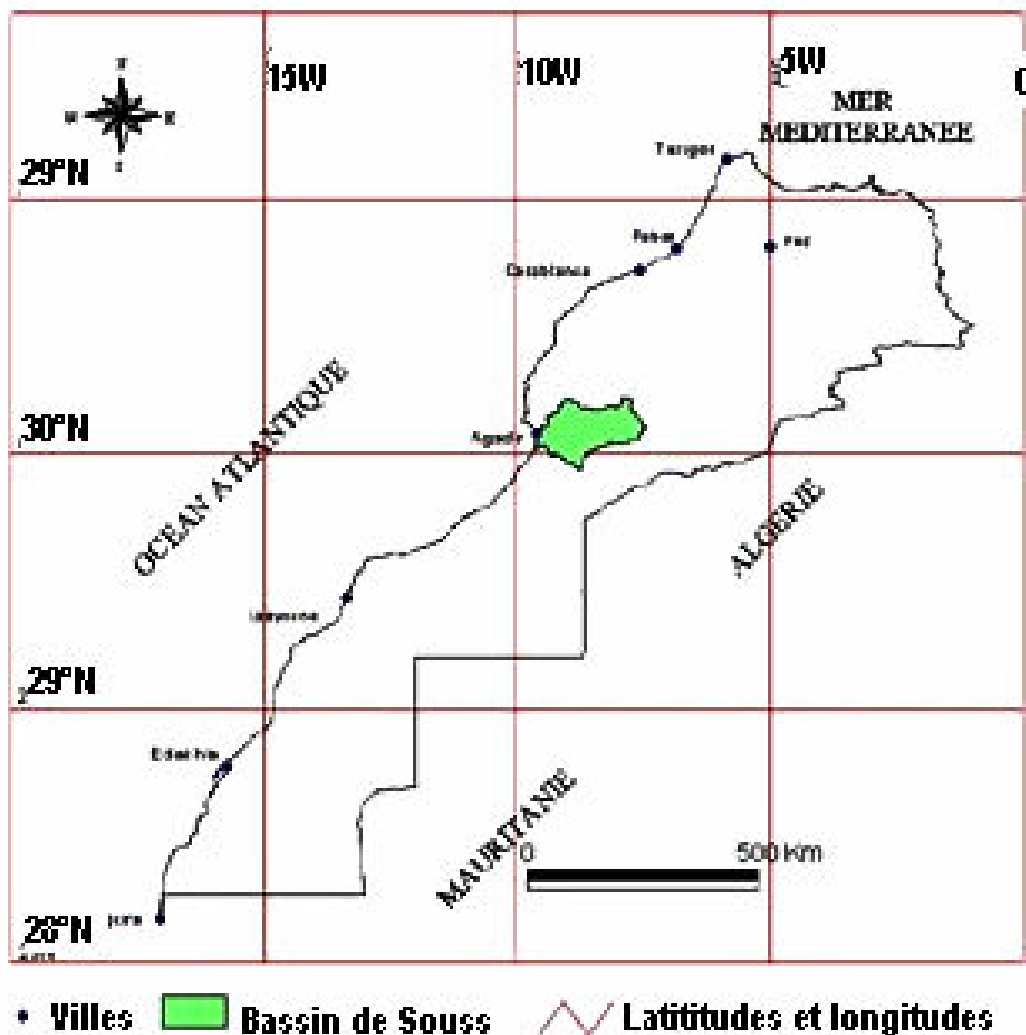


Fig.1 : Situation géographique de la zone d'étude dans le bassin versant de Souss.



## I- CADRE GEOLOGIQUE

Le bassin de Souss constitue une dépression côtière au front de la partie occidentale de la chaîne Haut Atlasique. Il couvre une superficie de 5500 Km<sup>2</sup> et se situe dans le sud-ouest marocain (figure 2a) ; soit approximativement entre 9°6' et 7°47' de longitude ouest et entre 29°70' et le 31°11' de latitude nord. Il est délimité par l'Océan atlantique à l'ouest, le massif éruptif de Siroua à l'est, la chaîne alpine du Haut Atlas au nord et le bombement anticlinal de l'Anti-Atlas occidental au sud.

Ce bassin ébauché lors de l'ouverture de l'océan Atlantique au Trias, se prolonge probablement à l'Ouest de cet océan. Il est limité au Sud et à l'Est par l'Anti Atlas (figure 2b). Au Nord, il bute contre le Haut Atlas occidental dont il est actuellement l'avant pays. La surface et le périmètre du bassin global valent respectivement 17916 km<sup>2</sup> et 761 km.

Le bassin du Souss a donc une forme allongée, six fois plus longue que large, ce qui est normal pour des oueds comme celui du Souss qui ont un long trajet (219 km). Cette forme favorise donc les faibles débits de point de crue avec un temps important d'acheminement de l'eau à l'exutoire.

### I. Les axes structuraux du bassin versant de Souss :

De point de vue structural, *NAIRN et al, 1980* décrivent le bassin de Souss comme une structure synclinale d'âge Tertiaire. Les déformations visibles au sein du bassin sont récentes; ainsi, dans sa partie occidentale, *AMBROGGIE, 1963* distingue plusieurs plis et flexures de direction Est Ouest à Nord Est - Sud Ouest, affectant les niveaux Quaternaires (figure 2b).

### II. Stratigraphie et lithologie :

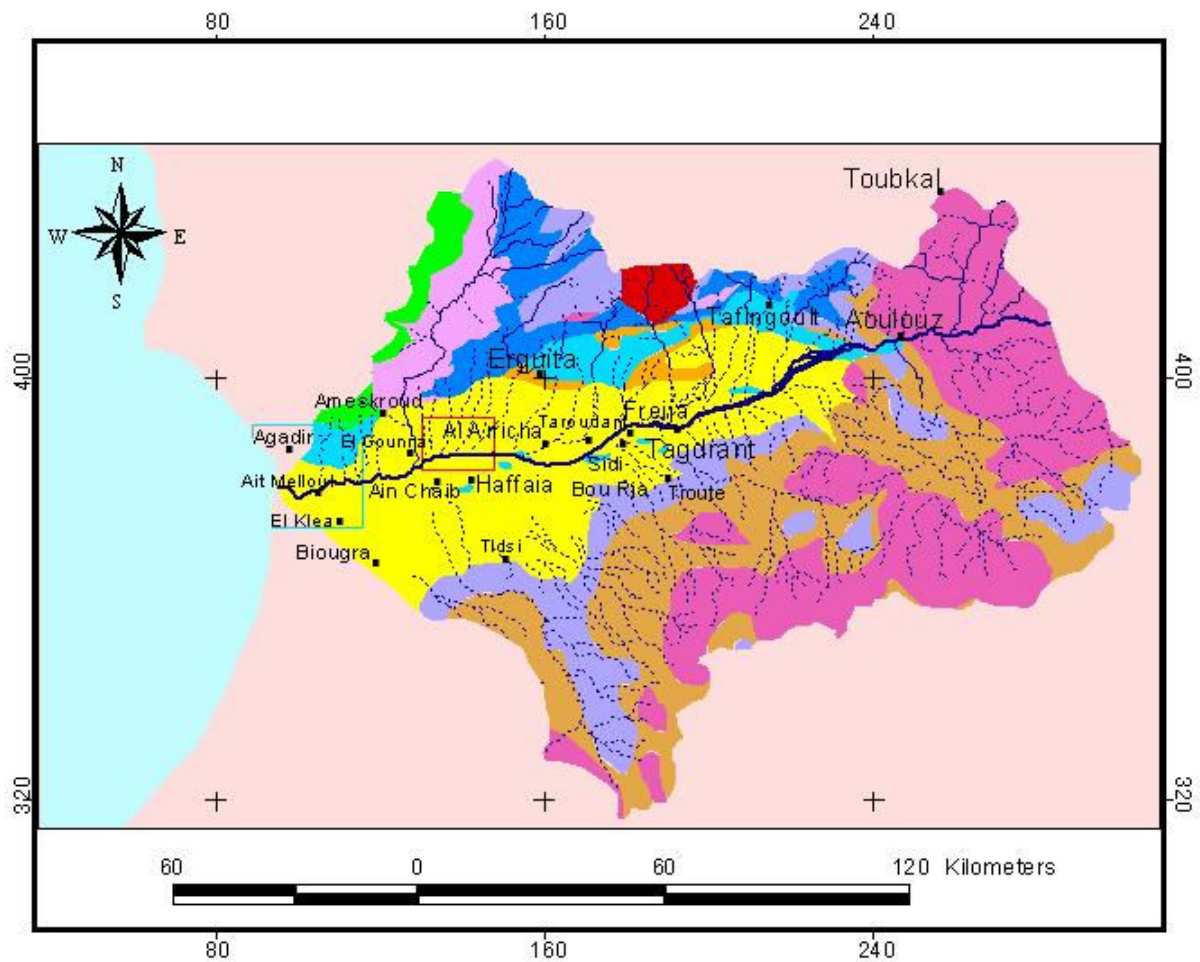
Du point de vue stratigraphique, les formations Méso- Cénozoïques sont de natures détritiques, évaporitiques et carbonatées, dépassant parfois 6000 m d'épaisseur (figure 2b). Elles recouvrent une épaisse série de sédiments paléozoïques qui affleurent au sud,

dans l'Anti Atlas et à l'Est du couloir d'Argana. En général, dans la région d'Agadir, la couverture sédimentaire montre des variations d'épaisseur sur une distance de 50 Km, le front montagneux implique d'Est en Ouest le substratum Paléozoïque, les terrains Triasiques du couloir d'Argana et la couverture Jurassico-Crétacé du domaine d'Ida ou Tanout.

### **1. Les formations Précambriennes :**

Au Sud du bassin de Souss, dans l'Anti Atlas (Ifni et Kerdous), les formations Précambriennes sont généralement constituées de roches éruptives métamorphiques. Elles sont recouvertes en discordance par les dépôts de « l'Infracambrien » marquant une sédimentation sous une faible tranche d'eau. Cette sédimentation très dominante, persiste durant le Paléozoïque inférieur.

La sédimentation commence avec des dépôts lacustres qui correspondent à des conglomérats et à des grès. Ensuite une invasion marine a favorisé le dépôt d'intercalations de calcaire et de marnes. Ces carbonates sont généralement stromatolitiques.



Réseau hydrographique

- Cour principal de l'oued Souss
- Cours d'eau perennes
- Cours d'eau temporaires
- Océan atlantique
- Contour de la zone Sud
- Contour de la zone Ahmar Boudhar

Stratigraphie

- Plioquaternaire : Alluvions, sables, limons, calcaires lacustres
- Eocène et Oligocène : Marnes phosphatées et marnocalcaires
- Crétacé : Marnes et marnocalcaires. Calcaires (Turonien)
- Jurassique : Marnocalcaires. Calcaires (Lias)
- Trias : Marnes, grès et dolérite
- Complexe métamorphique hercynien du Tichka
- Primaire (Acadien à Autunien) : Schistes et grès
- Primaire (Géorgien) : Schistes et calcaires
- Infrecambrien (Adoudounien) : Calcaires et conglomérats
- Précambrien indifférencié : dédimentaire, éruptif et métamorphique

**Fig2 : Schéma géologique du bassin versant de l'oued Souss**

Source : Document digitalisé d'après le schéma original In " Ressources en eau du Maroc - Tomme 3 "

## 1.1. Précambrien :

*NELTNER, 1941 et CHOUBERT, 1952* l'ont subdivisé en Précambrien ancien, moyen et supérieur.

- *Précambrien Ancien :*

On le rencontre dans les boutonnières de Kerdous et de Zenaga. Il se caractérise par des roches plus ou moins métamorphisées où l'on distingue des quartzophyllades, des micaschistes et des pegmatites.

- *Précambrien Moyen « Acadien »*

De l'Ouest de l'Anti-Atlas jusqu'à la boutonnière d'El Graraa, il correspond une série quartziques. Sur l'accident majeur de l'Anti-Atlas, on retrouve les deux séries précédentes surmontées par une épaisse série basique et ultrabasique à El Graraa, c'est la série ophiolitique qui correspond à un morceau de fond océanique (*LEBLANC, 1976*). Le Précambrien moyen au Nord de l'accident majeur est caractérisé par des conglomérats et des flyschs très épais.

- *Précambrien Supérieur :*

Il est formé essentiellement par des roches plutoniques acides, des granites et des granodiorites; ces roches sont connues dans la boutonnière d'Ifni et celle de Jbel Siroua.

## 1.2. Eocambrien :

*CHOUBERT, 1952* y distingue deux systèmes :

- ✎ Le système d'Ouarzazate : marqué par un volcanisme intense (des roches acides) et par la présence de dépôts continentaux.
- ✎ L'Adoudounien :
  - L'Adoudounien inférieur : est représenté par des calcaires et pélites, c'est une série transgressive qui arrive jusqu'à la région de Zagora à l'Est de l'embouchure de l'oued Draa au Sud.
  - L'Adudounien supérieur : est marqué par une deuxième série transgressive qui arrive jusqu'au Sarhro, déposant essentiellement des calcaires.

## 2. Les formations Paléozoïques :

La connaissance du Paléozoïques de l'Anti-Atlas est essentiellement l'œuvre de *CHOUBERT, 1945, 1952 et DESTOMBES, WILLEFERT, 1941.*

### 2.1. Le Cambrien :

#### ☞ Le Cambrien Inférieur :

Il est caractérisé par la série schisto-calcaire ou étage d'Amonslek, plus haut par la série schisteuse ou étage d'Issfene. Au-dessus vient la série de grès terminaux ou étage d'Asrhir.

#### ☞ Le Cambrien Moyen :

Transgressif par rapport aux grès terminaux, il est constitué généralement par des schistes à protonelides sur lesquelles se développe la puissante série de schistes à paradoxides.

### 2.2. L'Ordovicien :

La série Ordovicienne est une série épicontinentale terrigène qui représente une alternance de formation argilo-pellitiques et grès-quartzique.

Les affleurements Ordoviciens les plus anciens se composent d'argilites micacées gris et de grès, qui reposent sur les dépôts du Cambrien moyen à l'Ouest de Jbel Tachilla. Les argilites ont jusqu'à 2000 m d'épaisseur et sont intercalées parfois par des grès (*CARLIER, 1977*). L'Ordovicien supérieur se compose de minces conglomérats à tillites.

### 2.3. Le Silurien :

Le Silurien dans ce domaine est constitué essentiellement par des formations argileuses. Il est généralement argileux. Ces argiles sont riches en matière organique, ce qui leur confère une couleur sombre visible dans des lits qui s'intercalent de temps en temps dans les grès. Ces dépôts résultent de l'invasion marine qui suit la phase de glaciation ordovicienne.

## 2.4. Le Dévonien :

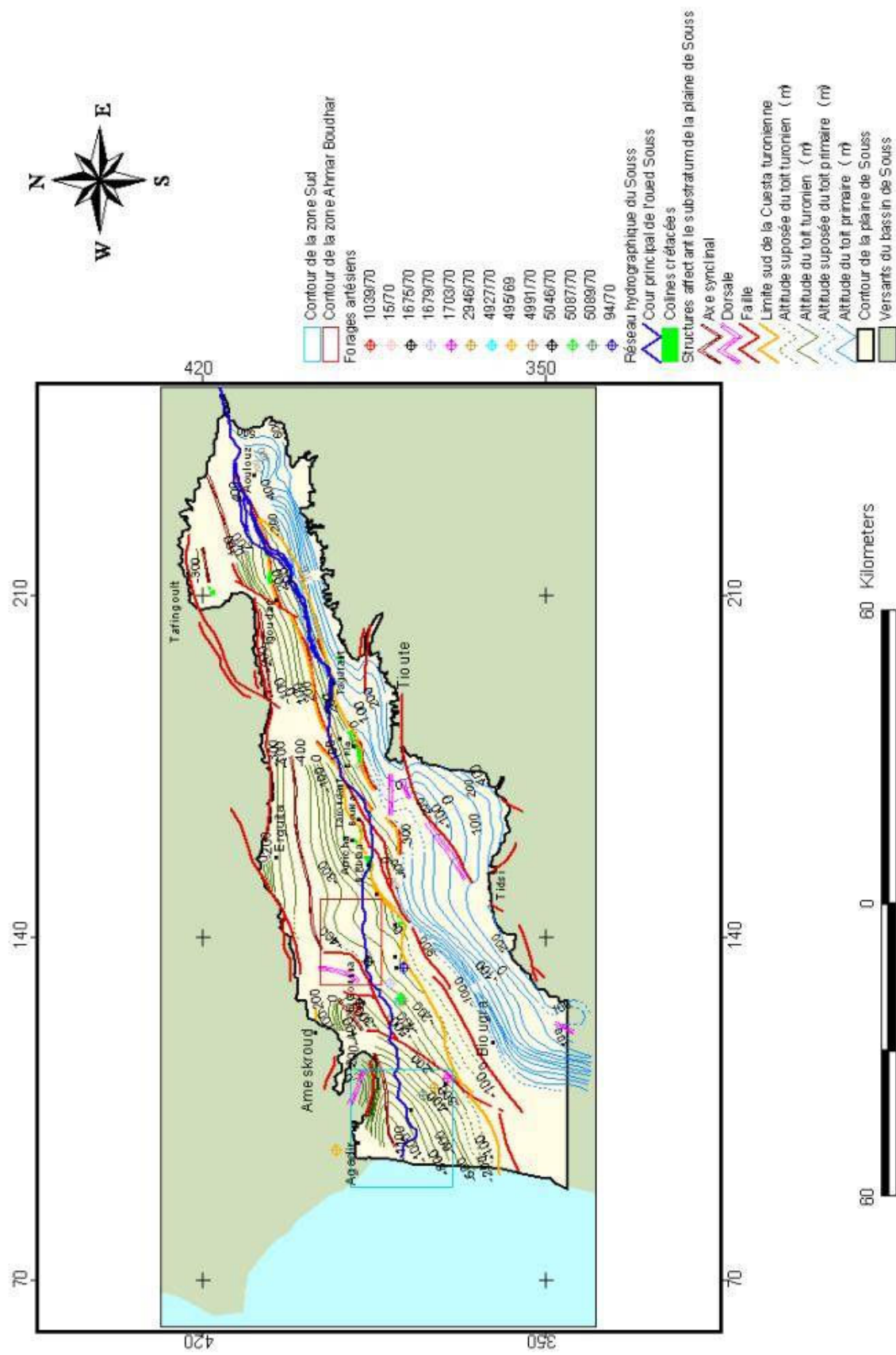
Il présente une grande diversité de faciès et d'épaisseur. La vallée de Draa est marquée par la dominance de grès et de pélites, alors que les séries orientales « Tafilalte » sont plutôt à dominance calcaire.

Le Dévonien inférieur est représenté par des argiles silteuses et des calcaires (*BOUDDA et al, 1981*). Les dépôts du Dévonien moyen, sont constitués d'argiles et des calcaires épais en partie récifaux, peuvent atteindre 3400 m d'épaisseur (*CARLIER, 1977*). Les séries du Dévonien supérieur sont aussi représentées par des carbonates (*BOUDDA et al, 1981*) et des minces argiles et grès. Cette succession devient de plus en plus mince vers le Sud.

## 2.5. Le Carbonifère :

- ✎ Le carbonifère inférieur est représenté par une sédimentation argilo-gréseuse.
- ✎ Durant le carbonifère supérieur, la sédimentation est caractérisée par les gypses.
- ✎ Au Namurien se produit une arrivée massive de grès continentaux. *MICHARD, 1976* montre la présence localement sous ces grès d'un paléosol formés aux dépens des argiles et de calcaires Namuriens. Vient ensuite se déposer une série argilo-gréseuse rouge renfermant des débris de fourragères d'âge Stéphanien.

Les seuls sédiments du Carbonifère identifiés autour du bassin de Souss, sont d'âge Stéphanien-Autunien. Au cours de cette période, des cuvettes postérieures à l'orogénèse hercynienne, occupait la zone de Souss et des sédiments lacustres stéphaniens se sont déposés. Ils affleurent dans la vallée d'Argana et dans la partie orientale du Haut Atlas Occidental. Ils sont constitués de conglomérats, de grès, des siltes, d'argiles noires riches en matière organique admettant de minces couches de charbon. La succession va jusqu'à 1200 m dans la vallée d'Argana (*MICHARD, 1976*).



**Fig3 : Carte structurale schématique du substratum de la vallée de Sous**  
 Source : D'après la carte structurale originale de R. Dijon, 1969  
 In " Hydrogéologie de la vallée de Sous "

### 3. Les formations Mésozoïques :

#### 3.1. Le Trias-Jurassique :

*MICHARD, 1976* a montré que le Trias détritique rouge avec une intercalation de basalte détritique ; le Lias et le Dogger sont réduits, lacunaires et sont surtout calcairo-dolomitiques. Le Jurassique supérieur est marno-calcaire très rarement gréseux.

#### 3.2. Le Crétacé :

*GAUTIER, 1957 et MICHARD, 1976* montrent que le Crétacé supérieur débute vers l'Ouest et l'Anti-Atlas par les grès inférieurs. Au dessus, quelques mollusques indiquant localement un Cénomaniens laguno-deltaïque. Les dépôts continentaux sont suivis par des dépôts franchement marins du Cénomano-Turonien, marquant l'apogée de la transgression.

#### 3.3. Le Cénomaniens :

Il est connu par des faciès de mer confinés (gypse, sel) et par des dépôts détritiques rouges. Dans le golf de Tarfaya, on note une abondance remarquable des dépôts silicifiés, et des niveaux calcaires Sénonien (*CHAUBERT et FAURE MURET, 1970*).

### 4. Les formations Cénozoïques :

#### 4.1. Le Paléocène et l'Eocène :

Ils sont connus dans la région d'Ouarzazate par la série phosphatée et par les faciès à huîtres et oursins qu'on rencontre aussi dans le Souss. L'Eocène est bien développé de Kéndaza, il est représenté par un calcaire lacustre à cératodes, aussi au niveau des formations des Hamadas qui sont continentales, lacustres ou fluviales.

#### 4.2. L'Oligocène :

Il est connu à la partie Hamada et est formé essentiellement de grès rouges et de calcaires lacustres.



### 4.3. Le Miocène :

Il est connu à Guir, Draa et Tarfaya sous forme de grès fins et rose.

## 5. Les formations Quaternaires :

### 5.1. Le modèle actuel dans la Plaine du Souss: dunes littorales et dunes continentales.

Les accumulations sableuses (figure.3) s'étendent sur 60 Km N-S entre l'oued Souss et l'oued Massa et sur 120 Km W-E au maximum entre l'Océan et Taroudannt, le plus souvent sur 50 Km entre l'Océan et l'Anti-Atlas. Les sables forment un manteau plus ou moins continu qui s'épaissit en deux secteurs correspondant respectivement au littoral et au piémont anti-atlasique.

#### 5.1.1. Le secteur dunaire littoral (Chtoukas-Ouest)

Le secteur dunaire littoral (Chtoukas-Ouest) comporte dans le détail 3 systèmes dunaires «linguiformes» (*BATTISTINI, 1964*) :

- ✓ En rive gauche de l'oued Souss se trouve le plus étendu, en forme de triangle dont la pointe s'avance sur 11 Km vers le SE. Il est formé surtout de longues dunes linéaires transverses et d'amas barkhaniques, pour la plupart fixés par des boisements de conifères.
- ✓ Le système de Tifnit n'est fixé que sur sa partie distale; en bordure de l'Océan, il est formé également de grandes dunes transverses découpées par des couloirs de déflation N140° prolongés par des essaims de barkhanes.
- ✓ En rive gauche de l'oued Massa, les amas vifs sont très épais et continus à l'embouchure, escaladant le bas plateau littoral; le vent canalisé par la vallée exporte des barkhanes vers la SE. Des travaux de fixation sont aujourd'hui entrepris à partir de la côte.

Les sables de ces systèmes littoraux sont à l'origine assez grossiers (médianes à 220 microns) et carbonatés (jusqu'à 55% de CaCO<sub>3</sub>) puisqu'ils sont issus directement des plages incorporant beaucoup de débris de coquilles marines. Leur continentalisation est toutefois rapide, puisque, si l'on compare ces sables à leur entrée et à leur sortie du

système (figure 3), les médianes diminuent rapidement (de 220 à 150 microns: la diminution de la taille des grains est de l'ordre de 6 à 10 microns par Km), les carbonates se raréfient ou même disparaissent car les fragments de coquilles subissent un amenuisement qui les transforme en poussières (*COUDE-GAUSSEN et al,1982*); ces sables s'enrichissent donc en quartz, lesquels acquièrent forme et aspect de surface éoliens: à la dimension de 125microns, plus de 90% des grains de quartz sortant du système sont éolisés: ils sont devenus des grains ronds-mats ou émoussés-mats. Cette transformation rapide du matériel est due sans aucun doute à l'efficacité et à la régularité de l'alizé, vent dominant sur le littoral, dévié ici en vent d'WNW par le Haut-Atlas, mais qui retrouve peu à peu sa force et sa direction initiales en se déplaçant vers le Sud.

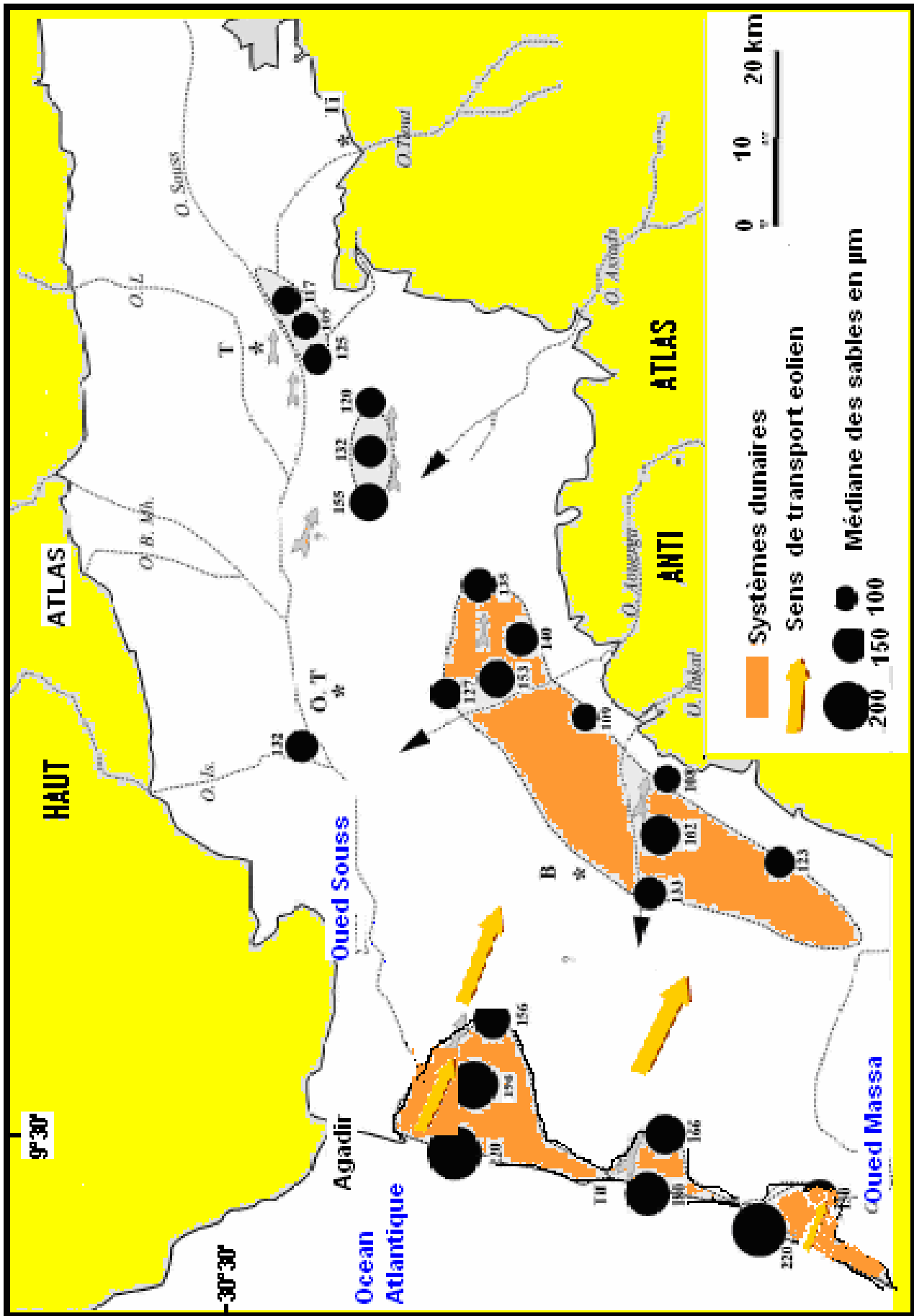


Fig.4 : Granulométrie moyenne des sables vifs (Weisrock et al 2002).

### 5.1.2. Le secteur dunaire continental

Le secteur dunaire continental débute donc en réalité déjà aux marges orientales du secteur littoral. Mais il se présente ensuite sur des superficies très vastes comme un manteau plus ou moins épais fixé presque complètement par les cultures, la forêt d'Arganiers et l'urbanisation galopante du «Grand Agadir» vers Massa, Biougra et Ouled Teïma. Si bien que les formes vives sont réduites aux zones marginales du piémont anti-atlasique, couvrant la surface des grands cônes encroûtés selon deux systèmes majeurs (figure 4):

- ✎ Le système des Chtoukas-Est, ou de Biougra, étendu au Sud et à l'Est de cette ville en un vaste arc de cercle adossé à l'Anti-Atlas, sur 20 Km de large et 50 Km de long environ. Il s'agit toujours plus d'un manteau éolien que d'un erg véritable; c'est au SE de Biougra que les accumulations sont les mieux développées, en dunes linéaires de directions variées, séparées par des couloirs de déflation où migrent des barkhanes; contre les premiers contreforts de l'Anti-Atlas se forment des dunes d'escalade (figure 4) ou «climbing dunes» (*TINLEY, 1985*).
- ✎ Le système du Souss central, au Sud de Taroudannt, composé en réalité de plusieurs zones d'accumulations vives distinctes; les deux plus importantes sont celle du Bled Nebak, à la partie distale du cône de l'oued Assads, et celle des Ouled Terna, en rive gauche du Souss à sa confluence avec l'oued Tiout. La première montre surtout des nebkas coalescentes, la seconde un manteau continu suivi de dunes transverses ou mégarides. Mais ces formes sont semi- fixées par des buissons de *Launea nudicaulis*, *Zyzyphus lotus*, *Nicotiana glauca*; et les formes véritablement actives sont réduites. Les deux systèmes ont en commun des sables de dimensions plus réduites que sur le littoral (les médianes varient peu entre 108 et 162 microns), des sables peu carbonatés (entre 0 et 25% de  $\text{CaCO}_3$ ) et des grains de quartz à 125 microns bien éolisés (jusqu'à 97% mais avec des exceptions notables). Mais le gradient général d'amenuisement, de décarbonatation et d'éolisation W-E n'est pas respecté (figures 3), ce qui prouve que les systèmes sont distincts les uns des autres:

Dans le système de Biougra, les plus fortes médianes se situent au centre et non à l'Ouest. Elles sont accompagnées d'un taux de carbonates (25%) qui s'élève brusquement,

suite à la présence de bioclastiques marins en quantité notable (35% de bioclastiques dans les

sables à 200 microns (*ADDELE, 1998*): autant d'indices de l'apparition d'une source nouvelle de sables qui proviennent du remaniement sur place des dunes littorales moghrébiennes (= plio-quadernaires): on sait qu'à cette époque, l'océan s'est avancé de 20 à 40 Km vers l'Est par rapport à sa position actuelle (*AMBROGGI, 1963*). Les sables moghrébiens lorsqu'ils affleurent, sont typiquement littoraux: médianes à 170 microns, 40 à 50 % de bioclastes marins, taux de carbonates élevés; seule l'éolisation des grains de quartz, bien plus forte que dans les dunes actuelles, diffère. Le gradient général reprend ensuite vers l'E et vers le NE, jusqu'à une nouvelle coupure introduite cette fois par l'oued Aouerga: sur la rive droite de cet oued, les médianes se relèvent à 153 microns, le pourcentage des grains éolisés diminue sévèrement (jusqu'à 16%): les sables dunaires sont alors en grande partie issus des apports de l'oued.

Le même phénomène se reproduit encore deux fois vers l'Est, avec les apports de l'oued Assads d'abord, dont les dépôts distaux sont remaniés dans le Bled Nebak, puis surtout avec ceux des oueds Souss et Tiout (zone d'accumulations sableuses d'Ouled Terna). Bien qu'assez proches, ces deux zones ne semblent pas en solution de continuité: les sables de Bled Nebak, bien que plus grossiers au départ, sont nettement plus éolisés que ceux d'Ouled Terna, alors qu'on devrait observer le contraire.

### **5.1.3. Les dunes vives de la Plaine du Souss**

Les dunes vives de la Plaine du Souss occidentale et centrale appartiennent donc à trois systèmes morpho-sédimentaires distincts d'W en E (figure 4):

✎ Le système littoral (Chtoukas-Ouest) qui s'avance jusqu'à Biougra; l'évolution des grains de sable issus des plages y est nette, selon un gradient assez fort d'amenuisement, décarbonatation et éolisation croissants, qui traduit la perte

progressive de puissance de l'alizé de la côte vers l'intérieur et transforme le matériel littoral à gros bioclastes en un matériel fin et quartzeux.

✎ Le système de Biougra (Chtoukas-Est) qui reproduit le même schéma, mais à partir de sables hérités de la dune bioclastique moghrébienne et des apports des petits oueds locaux. L'évolution des grains s'effectue sur une distance W-E plus courte, et en plus selon une direction secondaire parallèle à la bordure anti-atlasique. Le vent qui a repris

vigueur sur les grands espaces cultivés est à la fois freiné et dévié par le relief: les accumulations sont épaisses et escaladent les versants. On a donc affaire ici à un système mixte (marin hérité et continental).

✎ On peut regrouper dans un système du Souss central les trois sous-systèmes des oueds Aouerga, Assads et Souss-Tiuout qui sont tous trois de nature entièrement détritique continentale et situés à la partie distale des cônes de ces oueds où parviennent majoritairement des limons sableux. Ces sous-systèmes sont tous sous le vent d'W dominant, mais le gradient d'évolution y est nettement plus faible que dans les deux premiers, à la fois parce que l'alizé a perdu en puissance et parce que le matériel est dès l'origine plus quartzeux. Dans le détail toutefois, on remarque que ceci n'est pas tout à fait exact pour le Bled Nebak (oued Assads), où l'éolisation est forte: c'est sans doute la preuve d'un façonnement plus long et donc d'une possibilité d'héritage.

## 5.2. Les héritages du Pléistocène supérieur et de l'Holocène.

L'histoire des accumulations sableuses au Pléistocène supérieur et à l'Holocène est fort complexe: sur le littoral, depuis l'Ouljien on trouve les dépôts de 7 générations successives de sables dunaires (*WEISROCK et al, 1999*), (figure 4). Pour examiner les relations entre ces dunes fossiles et les systèmes actuels, les auteurs se sont limités aux trois derniers héritages majeurs: la dune tardi-soltanienne (environ 14000-10000 BP), la dune mellahienne (autour de 5000BP) et la dune «ocre» (autour de 3000 BP), retrouvés également dans l'arrière-pays (figures 4 et 5).

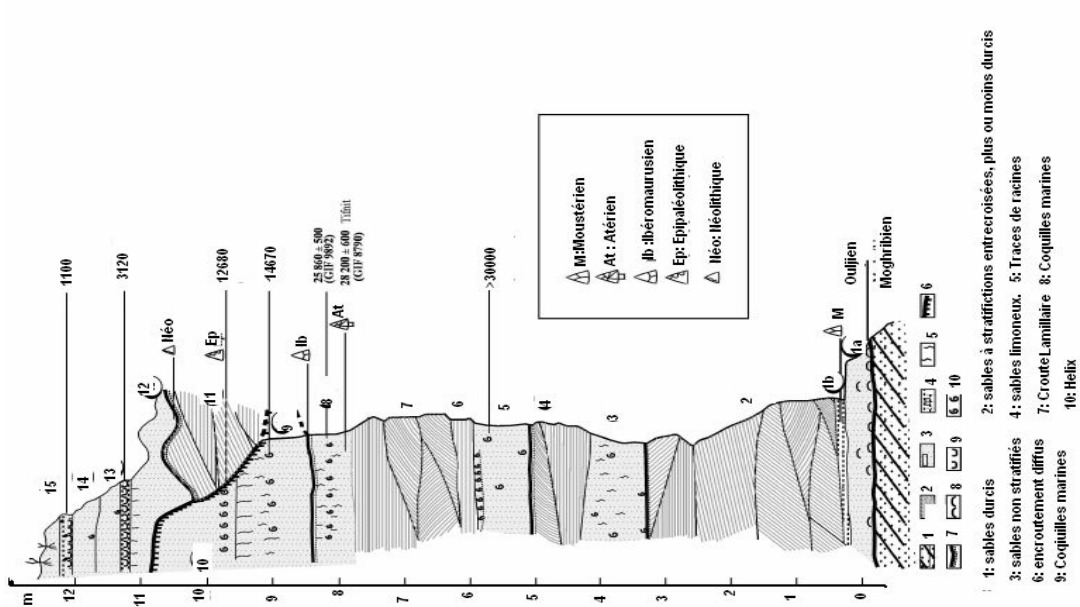


Fig. 5. Coupe synthétique des accumulations dunaires du littoral des Chtoukas-Ouest.

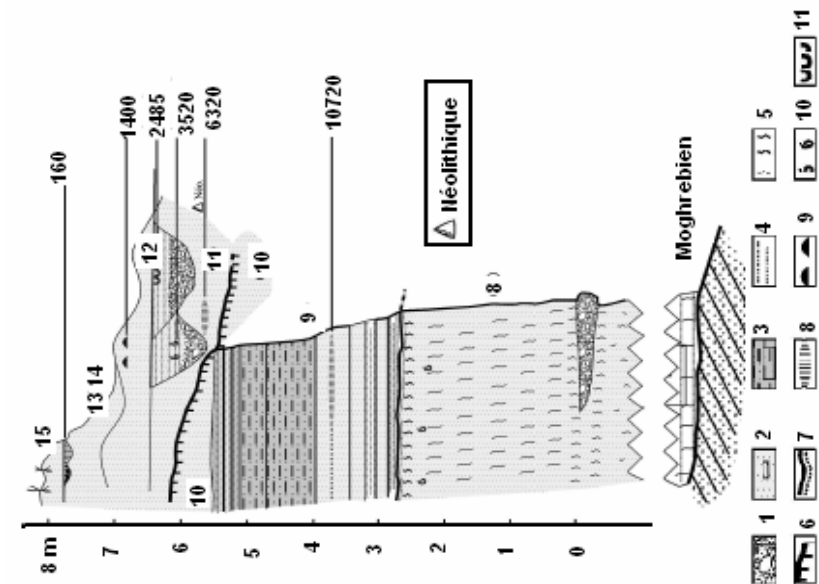


Fig. 6. Coupe synthétique des accumulations dunaires du littoral des Chtoukas-Est.

### 5.2.1. La dune tardi-soltanienne (figures 5 et 6)

Cette dune a été longtemps confondue avec les limons rose clair du Soltanien supérieur abondamment décrits dans la littérature scientifique marocaine, parce qu'elle occupe la même situation morphostratigraphique, au sommet d'accumulations épaisses de matériaux fins qui constituent des glacis d'accumulation tronqués et encroûtés en surface. D'où la couleur rose pâle ou gris-blanchâtre des sables, riches en concrétions calcaires et amas carbonatés, souvent d'origine racinaire.

Elle est présente dans le substratum des trois systèmes actuels, littoral, Biougra et Souss central. Les sables de cette dune sont uniformément fins (médianes souvent autour de 110 microns) et constituent un manteau éolien d'épaisseur visible très variable y compris sur le littoral, où ils correspondent à une période où ce dernier était encore relativement bas et éloigné d'au moins 5-6 Km du trait de côte actuel. Le fait qu'on les retrouve également loin vers l'intérieur, avec cette fois de fines stratifications, indique un environnement périodes sèches marquées. Toutefois, l'éolisation n'est vraiment accentuée qu'à Biougra et Aït Abouad, où les médianes sont aussi les plus faibles; ceci pourrait indiquer qu'il n'y ait eu alors que deux systèmes: l'un littoral, plus étendu que l'actuel, l'autre continental, toujours alimenté par les oueds. Cette hypothèse s'appuie sur l'existence d'un alizé plus puissant que l'actuel à cette période (*WEISROCK, 1980*). Sur les mêmes sites, les sables actuels sont toujours plus grossiers, ce qui signifie qu'ils ne sont pas issus d'une remobilisation directe de la dune tardi-soltanienne. Lorsque celle-ci affleure en surface, elle est protégée par l'encroûtement lamellaire et les amas carbonatés qui assurent sa cohésion. En revanche, la glaciplanation tardi-soltanienne a été suivie dans tout le Maroc méridional par une profonde incision des oueds (*WEISROCK et al, 1985*) qui a alors permis le remaniement du matériel de cette dune.

### La dune mellahienne (figures 5 et 6)

Cette dune est caractéristique du littoral puisqu'elle correspond à la dernière remontée océanique (= Mellahien au Maroc). Elle est bien caractérisée, à la fois par sa situation et son aspect morphologique comme par les datations  $^{14}\text{C}$  et l'industrie



néolithique qui lui est associée. Sur la côte, la dune Mellahienne est emboîtée dans le matériel plus ancien qui a été incisé par les ravins. Elle se présente sous la forme de dunes littorales de haut de plage, en feuillets entrecroisés aux stratifications très nettes, soulignées souvent par une mince croûte lamellaire blanche. Le long de la côte, ces dunes battues par les embruns ont subi une recristallisation des carbonates qui provoque un début de grésification. Leurs caractéristiques sédimentologiques liées à leur origine littorale sont très nettes: relative grossièreté des sables (médianes à plus de 240 microns), fortes teneurs en bioclastes marins, faible éolisation des grains de quartz. Il s'agit donc bien d'un apport marin nouveau, lié à la transgression. Il a en revanche été très difficile d'identifier le matériel sableux de cette période vers l'intérieur car bien entendu tous ces caractères littoraux disparaissent. Sans datations précises, sur charbons de bois, concordantes autour de 6000 ans BP, on aurait confondu de nouveaux manteaux éoliens de sables fins (médianes autour de 110 microns), gris ou gris rosâtres, contenant aussi des amas carbonatés friables, avec ceux du Tardi-Soltanien. Ils n'ont d'ailleurs été datés que dans le système de Biougra, où ils sont encore quelque peu bioclastiques (environ 20% des grains à 200 microns; comme ceux-ci sont nettement au-dessus des médianes, on peut estimer qu'ils sont remaniés du Moghrébien). Ce remaniement a été préparé par la profonde incision qui sépare le Tardi-Soltanien du Mellahien. Faute de datations, on ne peut pour l'instant rattacher à cette période une dune bien développée en rive gauche de l'oued Souss, dans une situation morphostratigraphique toutefois identique. La situation au maximum océanique Mellahien ne semble donc pas très différente de l'actuelle.

### **5.2.3. La dune «ocre» proto-historique (figures 5 et 6)**

C'est la dune la plus visible dans le paysage du Souss, à la fois par sa couleur, son extension à tous les secteurs et ses relations évidentes avec les dunes vives. Il s'agit d'un manteau éolien peu épais (dépassant rarement 1 m d'épaisseur), peu carbonaté (sauf quand il contient des bioclastes comme sur le littoral, ou des thanatocoenoses d'Hélicidés), donc aux grains libres, très «propres» à la loupe binoculaire, prêts à être remobilisés. Ces grains sont fins (médianes ne dépassant pas 120 microns et se tenant

presque toujours autour de 110 microns), très bien triés et relativement bien éolisés, surtout dans le système de Biougra. Cette dune est donc surtout quartzeuse, y compris sur le littoral, ce qui implique une activité éolienne marquée sur tout l'ensemble de la région. D'un point de vue chronologique, cette dune recouvre un outillage néolithique à patine éolienne visible dans les aires de déflation. Elle recouvre aussi des coquilles marines associés à des foyers sur la côte, des fragments de coquilles d'œufs d'Autruche dans l'arrière-pays, dont les dates  $^{14}\text{C}$  s'échelonnent entre 3120 +/-120 et 1100 +/- 50 ans BP.

Sur la côte, on voit aisément que cette dune ressemble beaucoup plus à celle du Tardi-Soltanien qu'à la dune Mellahienne; la première a pu être remobilisée après son incision et son remaniement fluviaux à l'Holocène inférieur et moyen. Cette observation n'est plus valable dans le système de Biougra, où les dunes Mellahienne et protohistorique ont pratiquement les mêmes caractéristiques à l'exception de la teneur en bioclastes marins : ceux-ci encore nombreux dans la dune Mellahienne (de l'ordre de 20%), disparaissent dans la dune ocre (environ 2%), preuve supplémentaire d'une forte activité éolienne. Le remaniement de dunes plus anciennes et leur tri éolien accentué peut-il expliquer le brusque et spectaculaire changement de couleur des sables. *GLENNIE, 1970* indique que la rubéfaction des grains de quartz due au polissage ne respectant que les fissures à remplissages d'oxyde de fer est un indice d'aridification prononcée. *COUDE-GAUSSSEN et ROGNON, 1993* ont émis au contraire l'hypothèse d'un «apport saharien de limons bruns piégés dans le Souss en contexte humide à l'Holocène». Or les sables ocres du Souss succèdent chronologiquement et morphologiquement aux dépôts de basses terrasses des oueds (*ROHDENBURG, 1977 et WEISROCK, 1980*): leur extension généralisée à la plaine montre qu'ils résultent au moins partiellement d'apports de sables nouveaux, qui ne peuvent être, en rive gauche du Souss, que d'origine anti-atlasique. Lorsqu'on connaît l'importance du stock d'altérites et de sols fersiallitiques encore disponible dans ce massif (*OLIVA, 1972*), on peut estimer que ces grains de sable rubéfiés sont en grande partie hérités.

## CONCLUSION :

Dans le Souss, les systèmes dunaires actuels et passés sont d'abord essentiellement des systèmes littoraux plus que continentaux, parce que l'Océan est le premier fournisseur de sable et que le vent dominant est l'alizé dévié par le relief en vent de secteur W. Vers l'intérieur, l'alimentation sableuse par les oueds, est plus ponctuelle dans l'espace et le temps, de moindre volume et la puissance du vent dominant diminue. Cette situation est acquise depuis fort longtemps et les héritages jouent un grand rôle dans cette stabilité, puisque l'influence des grandes dunes du Moghrébien est encore sensible dans le dispositif actuel du système de Biougra, à 30 Km de la côte. Dans la tranche chronologique considérée ici, un nouvel apport de sables marins s'effectue tout au long de la transgression Mellahienne et la situation actuelle s'installe.

La situation était différente en période régressive, permettant aux apports continentaux de prendre un peu plus d'importance: au Tardi-Soltanien, le matériel se «continentalise», y compris à l'emplacement de la côte actuelle. Mais cette explication n'est pas recevable pour la dune ocre qui apparaît en période encore globalement transgressive. Dans les deux cas (Tardi-Soltanien et Holocène supérieur), le développement de dunes continentales succède à deux périodes de forte activité des oueds (Soltanien supérieur et Holocène moyen): les systèmes les plus étendus correspondent donc à la constitution de stocks sédimentaires disponibles lorsque l'apparition ou le renforcement de la sécheresse autorise la mobilisation éolienne.

## Chapitre III:

# **CADRE GEOMORPHOLOGIQUE**

## **I. LES MONTAGNES**

Elles comprennent le Haut-Atlas, l'Anti-Atlas et le massif de Siroua (figure 7).

### **1. Le Haut-Atlas :**

Il constitue la limite Nord de la plaine de Souss, il a une direction générale Ouest Est, est connu par ses hauts sommets qui atteignent 4167 m à Jbel Toubkal.

Ces altitudes diminuent du Nord vers le Sud en direction de la plaine de Souss (figure 6). Le Haut-Atlas a une structure très ancienne constituée de roches datées du Précambrien et du Tertiaire, où une muraille entaillée par un réseau hydrographique important.

### **2. L'Anti-Atlas :**

Il est orienté selon une direction SW-NE et son plus haut sommet est l'Adrar n'Aklime avec 2359 m. Sa structure ancienne contient des roches du Précambrien et du Primaire. L'érosion a façonné des vallées très profondes et fertiles grâce aux sources qui sont présentes en hautes altitudes, alors que vers l'aval, ces vallées sont abritées des influences océaniques humides et constituent des vallées sèches.

### **3. Le Massif de Siroua :**

C'est le pont gigantesque entre le Haut-Atlas et l'Anti-Atlas. Il s'élève à une altitude de 3300m. Le cadre montagneux délimite une cuvette triangulaire remplie par des matériaux détritiques issus des hautes altitudes pour donner la forme actuelle de la plaine de Souss.

## **II. LA PLAINE DE SOUSS**

Elle a une forme triangulaire orientée Est-ouest, limitée par le Haut-Atlas au Nord et l'Anti-Atlas au Sud. Elle est relativement plane à l'exception de quelques vestiges d'une cuesta Crétacée. Elle apparaît constituée d'une étendue presque plane qui se relève de l'Ouest à l'Est de 700m sur 150 Km, avec une pente moyenne de l'ordre de 5%. Vers les piémonts de l'Anti-Atlas, les cônes de déjections très entaillées offrent des pentes qui varient entre 4% au niveau d'Ouled Taima à 13% au niveau de Taroudant.

Vers le piémont du Haut-Atlas, les pentes sont encore plus raides (9% au niveau d'Ouled Taima, 12% au niveau de Taroudant et 15% au niveau de Tafinguouet).

La plaine a connu d'énormes accumulations continentales durant le Tertiaire et le Quaternaire (*BENCHERIFA, 1980*), tous les vallons et lits d'oueds qui descendent des versants avoisinant déposent leurs matériaux grossiers à l'entrée de la plaine, ce qui constitue la majorité des cônes de déjection au piémont des montagnes.

**Climat aride:  $I_0 = 6$**

**$P = 188.6 \text{ mm/an}$**

**$T = 19.6^\circ\text{C}$**

- Superficie: 17916 km<sup>2</sup>
- Périmètre: 761 km
- Indice globale de la pente : 10%
- Altitude: (2 à 3998 m)
- Altitude moyenne: 1072 m

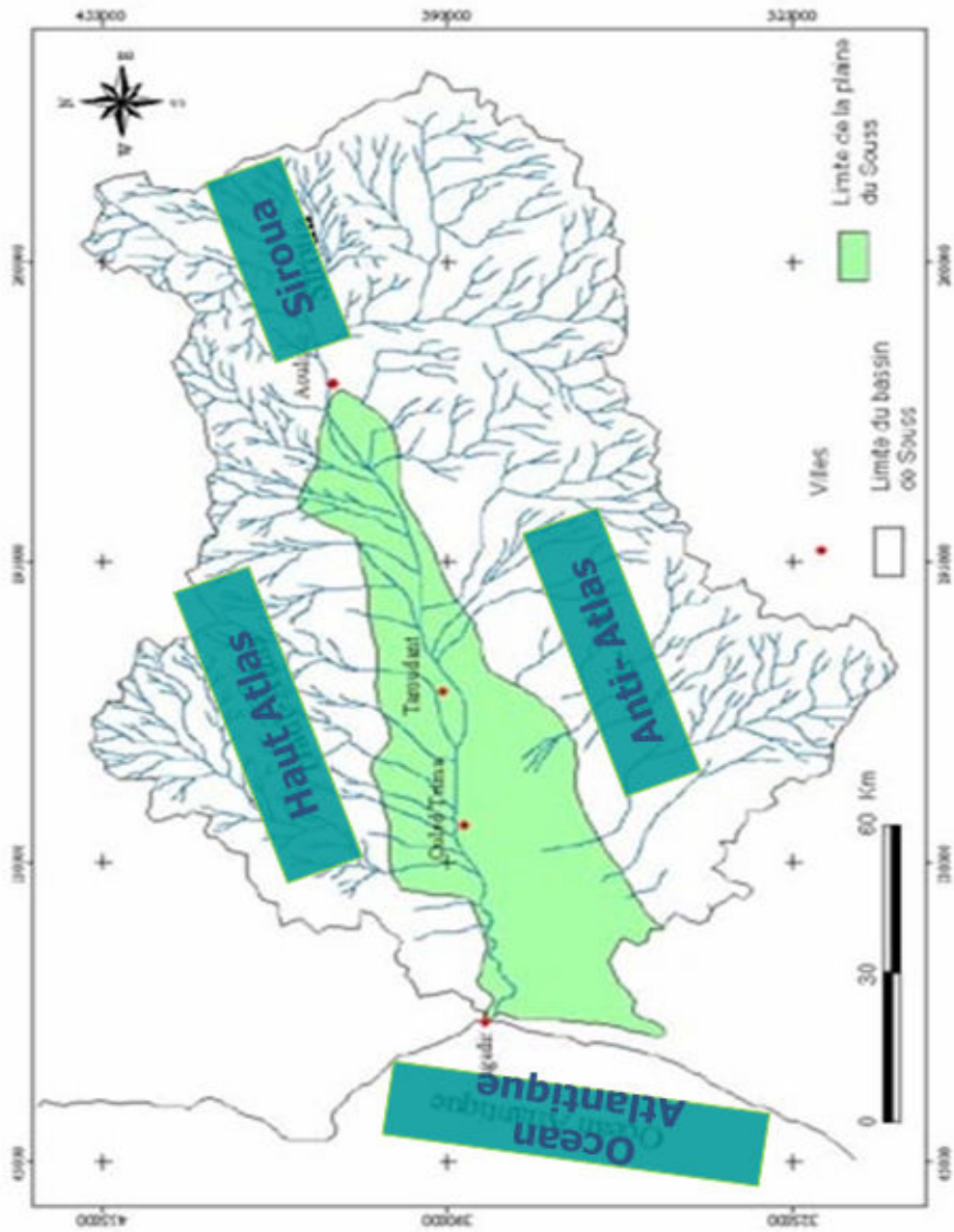


Fig.7 : Caractéristiques du bassin versant de Sous

## Chapitre IV:

# CADRE HYDROLOGIQUE



## I. BASSIN VERSANT DE SOUSS

L'Oued Souss draine un bassin versant d'environ 18000 Km<sup>2</sup>(figure 7). Ses affluents de la rive droite atteignent tous le lit de l'Oued, alors que ceux de la rive gauche ne l'atteignent que rarement. Ceci est dû à une pluviométrie plus élevée sur le Haut-Atlas que sur l'Anti-Atlas et la prédominance de terrains schisteux et marneux imperméables dans le Haut-Atlas et les terrains calcaires très perméables dans l'Anti-Atlas. Ces oppositions des deux systèmes hydrographiques font de l'Anti-Atlas le pourvoyeur en eaux souterraines et du Haut-Atlas celui en eaux de Crues.

D'après *DIJON, 1969 ; COMBE et EL HEBIL, 1977* l'inventaire des différents affluents de l'Oued Souss nécessite quatre subdivisions morphologiques :

- ✎ Le haut bassin versant du Souss totalement collecté pour les gorges d'Aoulouz.
- ✎ Les affluents Haut-Atlasiques, pourvoyeurs de la majorité des eaux superficielles du Souss.
- ✎ Les affluents Anti-atlasiques, d'une importance hydrologique secondaire puisque les Oueds Arrhère et tangarfa atteignent le Souss.
- ✎ Le lit de Souss allant d'Aoulouz à l'embouchure où les infiltrations et les résurgences sont importantes.

### 1. Le Haut Bassin Versant du Souss :

A l'Est d'Aoulouz, Oued Souss, appelé localement Assif Tarzioua reçoit les eaux des pluies affluentes:

- ✎ Assif Tinfout qui prend sa source à 3500 m d'altitude dans le massif du Toubkal. C'est le plus important des affluents du haut Souss. L'imperméabilité des roches cristallines, les fortes pentes (15%) et l'abondance des précipitations font du régime d'Oued Tinfout un régime torrentiel et permanent.
- ✎ Assif Nekor et Ouamazaourou viennent en deuxième rang en drainant le massif du Siroua imperméable mais d'une altitude plus faible.

Assif Immerguène, qui draine les plateaux calcaires de l'Anti-Atlas, a une contribution hydrologique plus modérée du fait des accidents karstiques et des infiltrations importantes.

Les gorges d'Aoulouz qui collectent les eaux du haut Souss sont larges, elles ont 300 m au débouché et ont un régime permanent. Les débits moyens à Aoulouz ont été estimés par *DIJON, 1969* à  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ , alors qu'ils sont à  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  pour *COMBE et HEBIL, 1977*. Mais l'irrégularité des pluies engendre des débits très irréguliers  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  en (1960-1961) et  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  en (1955-1956).

Les sous bassins versants des affluents Bni M'hamed et Issen, sont presque monolithologiques vu que les premiers drainent les formations schisteuses et les seconds traversent uniquement les terrains argilo-gréseux Permo-Triasiques.

À Aït Melloul, collectent la totalité des eaux des bassins, le débit moyen est estimé à  $10,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (*COMBE et ELHEBI, 1977*). Toutefois, après la construction du barrage Abd El Moumen, ces débits ont été largement modifiés à la baisse.

## **2. Les Affluents Anti-Atlassiques :**

Au débouché de la plaine, les oueds qui drainent le flanc nord de l'Anti-Atlas se perdent dans les alluvions limono-sableuses ; de plus, ce versant est faiblement arrosé et sa nature calcaire favorise des infiltrations importantes. De ce fait, seuls deux affluents peuvent contribuer aux apports de l'Oued Souss. Assif Trangarfa et, Oued Arhène mais leurs débits ne sont pas évalués, car seuls les fortes crues parviennent à l'Oued Souss.

## **3. Le Lit de Souss :**

A sa sortie des gorges d'Aoulouz, Oued Souss étale largement son lit qui se divise en plusieurs bras sur une largeur de 4 Km. Entre Aoulouz et Taroudant, les phénomènes d'évaporation et d'infiltration sont intenses. En effet, seules les fortes crues arrivent à Taroudant où l'oued commence à s'encaisser de 10 à 12 m et les résurgences sont importantes (figure 5).

L'oued Souss est orienté Est-Ouest, mais les fortes crues des affluents Haut-Atlassiques la repousse vers le Sud jusqu'à ce qu'il lutte contre les collines crétacées. Il en

ressort que la vallée de Souss n'est pas à l'abri des changements climatiques, elle reste vulnérable à ce phénomène en dépit d'un climat semi-aride à semi-désertique, les précipitations sont faibles (250 mm/an en moyenne) et irrégulières dans le temps et l'espace.

Les chiffres des précipitations annuelles peuvent varier du simple au quadruple et d'avantage, mais au cours de la dernière décennie, *EL WARTITI et al, 2003* ont remarqué une succession des années sèches et des situations pluviométriques déficitaires par rapport à la normale. À titre d'exemple, le taux de remplissage du barrage de Sidi Abd El Moumen dans le Souss entre 1999 et 2000 a été respectivement de 39,3% et 15,8%. L'évolution piézométrique des principales nappes relevant du bassin de Souss, montre une tendance générale à la baisse, ces baisses ont varié de 0,3 et 1,0 m en 2002.

## II. HYDRODYNAMISME LITTORAL

### 1. La Houle :

*OUCHCHAM, 1996* a fait ressortir les principaux paramètres définissant la houle (direction, amplitude et période). Il a conclu que la houle atlantique marocaine entre Agadir et Tarfaya est généralement de direction NNW-SSE, de période 8 secondes, d'une hauteur moyenne 1,5m et d'une vitesse de propagation qui varie de 3 à 13 m/s.

Les houles et les courants qui leur sont associés sont les principaux facteurs de l'érosion littorale. Chaque période de tempête apporte son cortège de dégradation : recules importants, brèches, routes, habitats, champs et forêts ensablés. Cependant, l'action directe des vagues sur les dunes reste exceptionnelle, en général, la mer n'agit que sur la plage.

La dune ne représente que la partie continentale d'un stock de sable qui comprend aussi l'estran et le fond marin. Ils sont étroitement liés du point de vue évolution.

Ce sont les houles qui sont responsables de ces variations saisonnières. Elles vont se répercuter sur le pied de la dune qui est une zone instable et qui peut être périodiquement sapée par suite du démaigrissement de la plage. Quand ce phénomène est compensé par les apports d'été, la dune reste stable.

Dans certains sites, on constate qu'une partie de la dune recule, alors que plus loin elle progresse, c'est le phénomène de la dérive littorale.

L'identification de ces processus est indispensable, seule une observation pluriannuelle permet de déterminer s'il existe une réelle érosion afin de mettre en œuvre les protections adaptées.

D'après *OCHCHAM, 1996* au large de la côte d'Agadir, les échanges la houle peuvent atteindre des volumes de  $50 \text{ cm}^3$  par mètre linéaire dans les secteurs abrités et dix fois plus en zone agitée. Lorsqu'en hiver, les sables sont arrachés et emportés plus loin, la mer compense ce manque en reprenant toujours du sable à la dune, créant ainsi une érosion continue avec un profil caractéristique en falaise qui recule chaque année.

## Chapitre V:

# CADRE PEDOLOGIQUE

## INTRODUCTION :

La pédogenèse est liée au climat, à la lithologie et au relief. En effet, les principaux sols de la plaine de Souss ont été décrits par *WATTEEUW, 1964* (figure 8).

Dans sa carte simplifiée, l'auteur a spécifié quatre grandes classes des sols :

- ✓ Les sols isohumiques (sierozems et sols bruns steppiques) ;
- ✓ Les sols calco-magnésimorphe (bruns calcaires et rendzines) ;
- ✓ Les sols peu évolués (colluviaux et sableux) ;
- ✓ Les sols alluviaux.

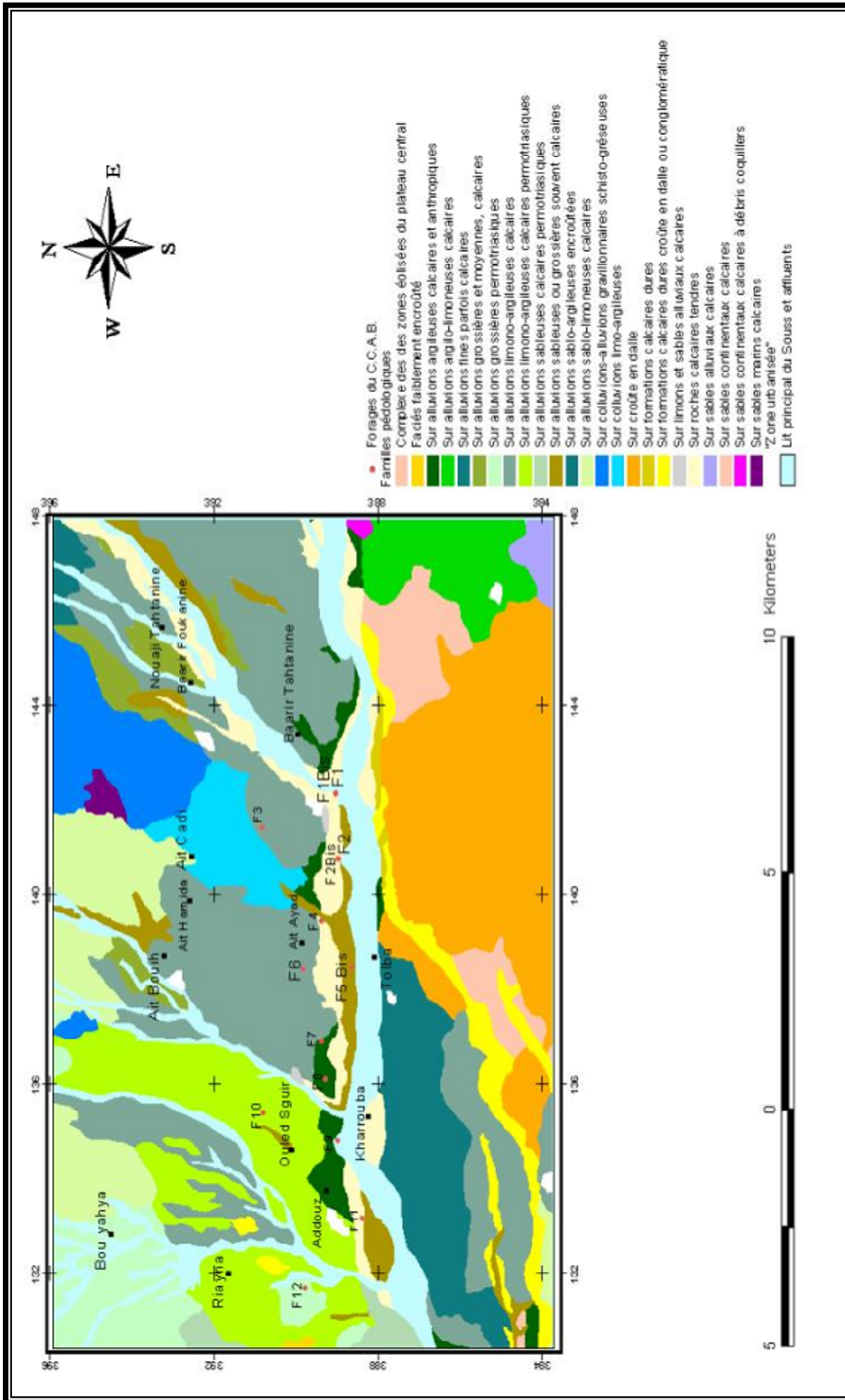
La carte d'occupation du sol montre que les sols peu ou pas évolués couvrent une importante superficie de la vallée du Souss, soit 26%. Le croisement entre la carte des sols et celle de couverture du sol de 1992-1997 dérivées de l'imagerie satellitaire montre que 17% des surfaces agricoles (cultures de bour) s'étendent sur les sols peu évolués :

- les rendziniformes réservés autrefois à la forêt d'arganiers sont soustraits actuellement à cette dernière pour être couverts de routes, aéroport et autres constructions. Le croisement entre la carte des sols et celle de la couverture confirme ce constat : 16% des surfaces construites se développent dans ces sols.
- les sols isohumiques présentent une grande valeur agricole et constituent d'excellentes terres pour le maraîchage, la céréaliculture et l'agrumiculture, soit 26% pour les sols bruns et 31% pour les sierozems.
- Les sols halomorphes sont très peu étendus et ne présentent aucun intérêt de point de vue agricole.

## I. LES SOLS ISOHUMIQUES :

### 1. Les Sierozemes :

Ces sols appartiennent au groupe des sols peu évolués subdésertiques. Ils couvrent la plus grande partie du centre de la plaine (figure 8). Ils sont généralement profonds, homogènes et sablo-limoneux.



**Fig.8 : Distribution spatiale des familles pédologiques au niveau de la zone Ahmar Boudhar**

Source : Carte numérisée d'après les cartes originales de H. Ghanem et al (1973)

Dans la vallée de l'Oued Issen, ces sols sont salés et supportent une végétation halophile. Ailleurs, la végétation est constituée d'un maigre maquis de Jujubier.

## **2. les sols bruns steppiques :**

Ils occupent la partie amont de la vallée, le piémont de l'Anti-Atlas et la basse plaine de Souss (région d'Ait Melloul). Ces sols sont uniformément bruns, sablo-argileux et calcaires, la végétation est constituée en majeure partie d'arganiers.

## **3. Les sols bruns calcaires :**

Ils se développent soit sur des limons encroûtés ou sur une croûte calcaire, soit sur une roche calcaire. On les rencontre au Sud-Ouest de Souss, le long du littoral et également au pied du Haut-Atlas. Ils se présentent sous forme d'un complexe de sols bruns souvent squelettiques et de sols peu évolués formés à partir des produits d'érosion de marnes du Crétacé.

# **II. LES SOLS PEU EVOLUES**

## **1. Les sols Colluviaux :**

Ils sont soit calcaires ou non, selon la nature des produits de l'érosion sur lesquels se sont développés.

## **2. Les sols sableux :**

Outre les dunes côtières, les terrains sableux couvrent une grande partie de la zone avale. Ils ne présentent pas de structure apparente et supportent souvent une dalle calcaire massive. L'érosion éolienne y est très intense, pouvant transformée localement le relief ou mettre à nu le substratum calcaire.

## **3. Les sols alluviaux :**

Le Souss et ses affluents ont déposé sur leurs rives d'importantes alluvions sablo-limoneuses. Ces dépôts sont profonds mais souvent entraînés lors des crues



## Chapitre VI:

# CADRE CLIMATIQUE

## I. LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES

Le climat de la zone étudiée s'inscrit dans le type méditerranéen aride à influence atlantique.

### 1. Précipitations :

L'importance des précipitations est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace.

*DIJON, 1969* montre que l'intensité des pluies est principalement fonction de l'altitude. Au-dessus de 1000 m comprenant les vallées sèches de l'Anti-Atlas et le bas versant du Haut-Atlas et du Siroua, les moyennes de pluies sont comprises entre 300 et 500 mm/an vers les sommets. Sur les versants du Haut-Atlas, la brutalité des pluies érode fortement les sols desséchés en laissant à nu les roches mères. La durée des pluies et leurs intensités sont très irrégulières au cours de la saison pluvieuse. Cette dernière s'étend d'octobre à avril avec un maximum qui se situe entre novembre et mars.

La plaine de Souss-Massa reçoit 250 mm de précipitation moyenne annuelle, répartie sur environ 30 jours, alors qu'il y a huit mois secs, ce qui présente une limite potentielle des possibilités de stabilisation des dunes, et caractérise une zone de sans pluie.

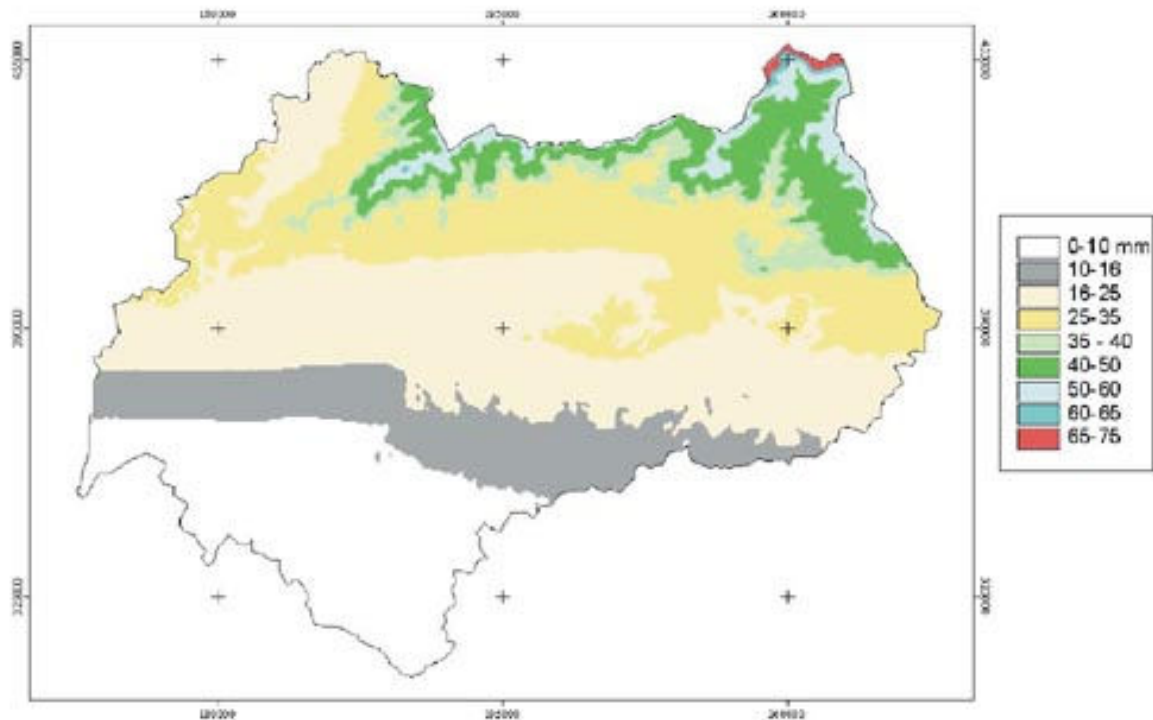


Fig.9 : Carte de répartition des précipitations moyennes pour le mois d'octobre (1960-1998)

Les cartes pluviométriques et de températures mensuelles pour la période de 38 ans (1960-1998) ont été réalisées grâce à la technique de la régression ascendante. Les équations générales des modèles retenues ainsi que les ajustements finalement adoptés pour le mois d'octobre par exemple sont présentés dans le tableau 5. Ces derniers ont été appliqués sur les plans d'information correspondant à la topographie et à la situation géographique pour une résolution de 500 m. La figure 9 illustre le résultat obtenu de la spatialisation des précipitations pour le mois d'octobre. L'examen de ces cartes nous a permis de dégager un ensemble de constats concernant la régionalisation du paramètre des précipitations et des températures.

- ✓ L'augmentation de la pluie du sud vers le nord, la pluviométrie dans l'Anti-Atlas étant beaucoup plus faible que dans le Haut-Atlas malgré son altitude ce qui témoigne de l'influence saharienne sur la répartition spatiale des pluies.
- ✓ Dans le Haut-Atlas, la pluviométrie est d'autant plus importante que l'effet de crête est marqué et, inversement, d'autant plus faible par un effet d'encaissement.

Cela signifie qu'une vallée encaissée orientée Nord-Sud, comme le cas de l'oued Issen, constitue un effet d'abri contre les masses d'air venues de l'Atlantique, elle présentera une pluviométrie plus faible.

- ✓ Dans la plaine, la pluviométrie est relativement homogène et ne dépend que de la latitude et de l'altitude.
- ✓ A l'échelle de notre étude, ces cartes confirment l'influence des masses nuageuses chargées en humidité venues de l'atlantique.

Il apparaît que la répartition spatiale des précipitations dans le bassin du Souss est essentiellement conditionnée par le relief et la latitude. Ce résultat suggère que le mécanisme responsable des précipitations est l'ascendance forcée par effet orographique des masses d'air chargées d'humidité soufflant par les brises atlantiques.

## 2. Températures :

Elles sont fonction de l'altitude, de la latitude et la position par rapport à l'océan.

Température moyenne	18,7 °C
Température maximale	24,2 °C
Température minimale	13,2 °C
Température maximale extrême	47 °C
Température minimale extrême	8,9 °C

Tableau I : Les températures moyennes annuelles pour la vallée du Souss (1941 et 1989)  
Source Service météorologique d'Agadir

On remarque que la température moyenne annuelle de la vallée du Souss est assez clémente pour permettre aux plantes de croître. Cette température est d'ailleurs assez constante, elle varie entre 18 et 20 °C (figure 10).

Les températures minimales extrêmes sont enregistrées en hiver. Cette période correspond à celle de l'année pendant laquelle la croissance active des végétaux n'est pas possible pour des raisons de froid.

Les plaines intérieures et les vallées sèches ont les écarts les plus élevés entre les températures maximales et les températures minimales, alors que ces amplitudes diminuent vers l'océan et vers les hautes altitudes, davantage vers le Haut-Atlas que vers l'Anti-Atlas, comme le montre le (tableau II).

Station	Situation	Moyenne des maxima	Moyenne des minima	Amplitude
Agadir	Plaine	25 °C	13,3 °C	10,7 °C
Argana	Vallée	30,7 °C	10,4 °C	10,3 °C
Taroudant	Plaine	23,3 °C	11,3 °C	17 °C
Ighrem	Anti-Atlas	22,4 °C	7,3 °C	14,5 °C
Tisi-N-Test	Haut-Atlas	18 °C	8,9 °C	9,1 °C

Tableau II : Moyenne annuelle des températures maximales et minimales de 1950 à 1985. Source : Météorologie Nationale

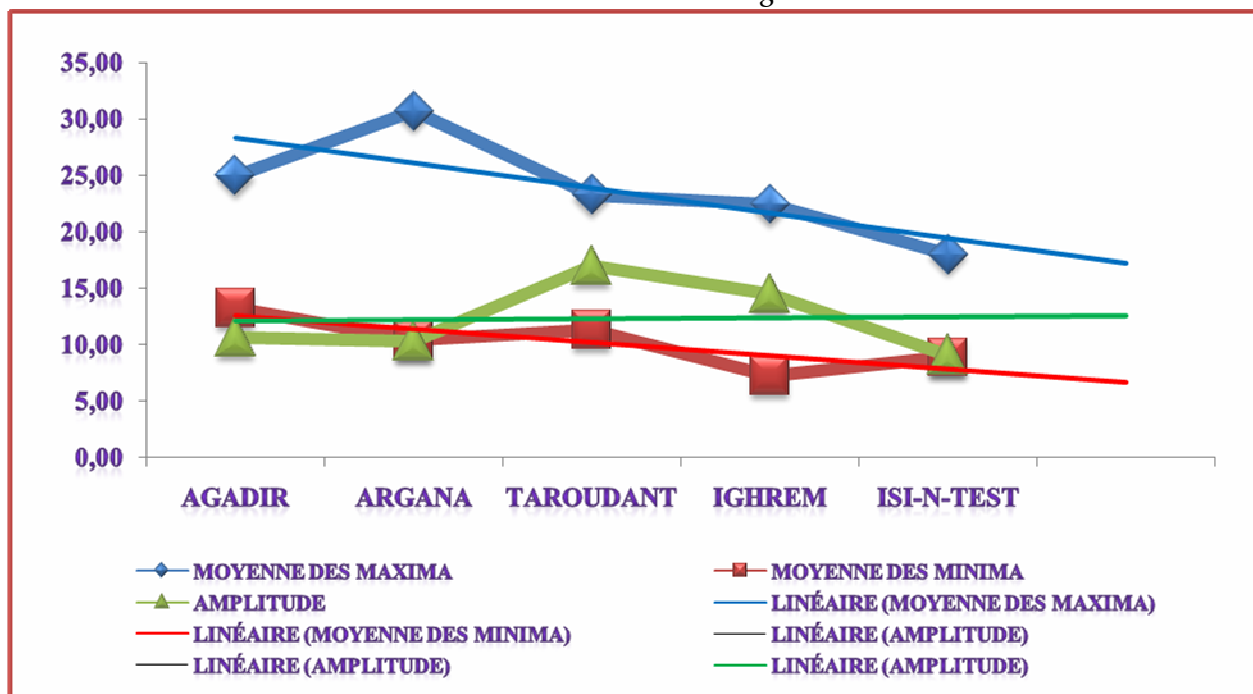


Fig.10 : Variation de la moyenne annuelle des températures maximales et minimales de 1950 à 1985 (Source : Météorologie Nationale).

En résumé la plaine du Souss présente un caractère aride avec une influence océanique le long de la zone côtière et devient de plus en plus continentale à tendance plus aride vers l'intérieur de la plaine et vers les vallées sèches.

- ✓ Le rôle déterminant du relief dans la structure spatiale de la température. La température dans le Haut-Atlas est beaucoup plus basse que dans l'Anti-Atlas.
- ✓ Dans la plaine, la température moyenne est conditionnée par la proximité de l'océan. Les zones côtières jouissent d'un climat océanique doux et plus frais que les zones intérieures. Ceci est très marqué surtout aux mois de mai à septembre.
- ✓ L'influence de la pente et de sa direction sur la répartition de la température. La température est d'autant plus importante que l'exposition Est est marquée et inversement d'autant plus amoindrie par une exposition Ouest.
- ✓ L'écart mensuel de température moyenne entre le mois d'août et de janvier est beaucoup plus fort dans le Haut-Atlas que dans l'Anti-Atlas. Il diminue en se rapprochant de l'océan atlantique. Ce dernier atténue les écarts de température et tempère les saisons.

### 3. Aridité du bassin de Souss :

Afin de mieux évaluer quantitativement le degré d'aridité qui règne dans la région, nous avons calculé successivement l'indice d'aridité de De Martonne pour toutes les surfaces de la plaine du Haut Atlas, celle de l'Anti-Atlas ainsi que pour la surface entière du bassin versant en utilisant des cartes de précipitations et de températures moyennes mensuelles. Le résultat est présenté dans le tableau III.

	P (mm)	T (°C)	I	Climat
Plaine	188.6	19.6	6	Aride
Haut-Atlas	377.5	17.4	14	Semi-aride
Anti-Atlas	185	17.2	7	Aride
Bassin	243	17.8	9	Aride à semi-aride

Tableau III : Indice de De Martonne pour les surfaces des sous-bassins et du bassin versant

Si on se base sur l'indice de De Martonne, le bassin versant du Souss est soumis à un climat aride avec tendance à semi-aridité. La plaine et l'Anti-Atlas se trouvent dans un climat aride avec une tendance à l'hyper-aridité et le Haut-Atlas est caractérisé par un climat semi-aride, ce qui en fait la région la plus arrosée du bassin.

L'examen des cartes d'indice d'aridité mensuelle a mis en évidence le phénomène saisonnier de l'aridité : ainsi notons-nous dans le bassin du Souss la présence de deux saisons dont la durée varie selon la persistance climatique :

- une saison sèche qui s'étale sur sept mois (avril à octobre). Dans la plaine, cette période est caractérisée par un climat hyper-aride à aride avec une absence presque totale de précipitations et une température moyenne de 22.5°C, le maximum étant de 31°C atteint au mois d'août. Au niveau du Haut-Atlas, elle se trouve dans un climat aride à semi-aride. En revanche dans l'Anti-Atlas, le degré d'aridité devient très sévère en comparaison avec la plaine et la saison sèche est caractérisée par un climat hyper-aride à aride.
- une saison fraîche et pluvieuse qui s'étale de novembre à mars avec un indice mensuel le plus faible se situe au mois de décembre. Elle est caractérisée dans la plaine par un climat semi-aride à semi-humide avec une température moyenne inférieure à 16°C et une précipitation moyenne de 30mm. Durant cette période, le climat est semi-humide à humide dans le Haut-Atlas et varie de l'hyper-aridité à semi-aridité en se dirigeant du sud-ouest vers le nord-est dans l'Anti-Atlas.

Dans le but de bien préciser et de confirmer la durée de ces deux saisons, nous avons utilisé le diagramme ombrothermique de *BAGNOULS et GAUSSEN, 1953*. Ce diagramme précise que, dans le bassin du Souss, la saison sèche s'étale sur 8 mois de mars à octobre (température moyenne de 17 °C et maximale de 27 °C atteinte au mois d'août). La saison humide n'est représentée que par quatre mois (figure 11).

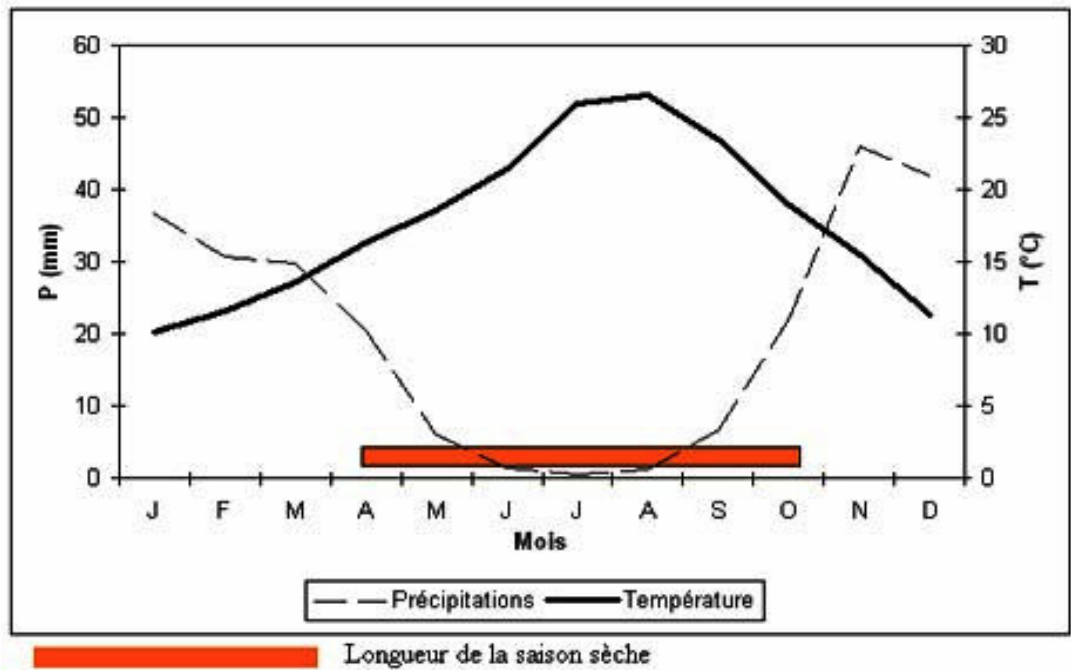


Fig.11 : Diagramme ombrothermique de *BABNOULS et GAUSSEN, 1953* pour le bassin du Souss.

L'aridité dans le bassin du Souss représente sans doute un risque majeur pour toutes les formes de mise en valeurs. Ainsi, les cartes d'aridité mensuelles et les données sur la longueur de la saison sèche pourraient servir comme documents de base à de nombreuses applications agricoles (mise en évidence du stress hydrique, choix des cultures), à la lutte contre les incendies de forêts, à la gestion des réservoirs des barrages ou à celle des déchets.

#### 4. Evaporation et Evapotranspiration :

L'évaporation atteint son maximum pendant la saison sèche de mai à septembre. Une étude comparative des 10 méthodes pour l'estimation de l'évapotranspiration dans le bassin du Souss a permis de déceler que la méthode de PENMAN (FAO) présente le plus grand degré d'adaptation aux conditions agroclimatiques de cette région pour l'estimation de l'ETP, suivie de la méthode du bac classe A et de la formule de BLANNEY-CRIDDLE (SCS) (*BLANNEY et CRIDDLE, 1950*). Malgré la performance de la méthode de PENMAN, il nous apparaît très difficile de spatialiser l'ETP en appliquant ce modèle. En effet, sa spatialisation nécessiterait avant tout, la



régionalisation des paramètres (humidité relative moyenne, vitesse du vent, durée d'isolation) pour lesquelles les données du terrain sont limitées en quantité (quatre stations météorologiques). Pour cette raison, nous avons choisi la méthode de BLANNEY-CRIDDLE (SCS) qui présente d'une part un meilleur classement après le modèle de PENMAN et d'autre part est basée sur le paramètre régionalisable de la température. Ce modèle a donc été appliqué pour régionaliser l'ETP mensuelle dans le bassin du Souss, quant au modèle de PENMAN et les méthodes directes des bacs de classe A et de Colorado ont été utilisées pour évaluer et juger la qualité de cette spatialisation.

Il ressort dans les résultats des cartes de ce paramètre que les valeurs journalières extrêmes moyennes de l'ETP se situent entre un peu moins de 1mm/jour en hiver jusqu'à 10 mm/jour en été alors que les valeurs moyennes dans le bassin varient entre 1.7 et 6mm/jour. Ces valeurs confirment bien l'aridité qui règne dans la région. Nous signalons que le régime d'évaporation est relativement plus stable d'une année à l'autre que le régime pluviométrique. Il s'ensuit donc que les besoins en eau des cultures sont assez prévisibles d'une année à l'autre.

Par la suite, nous avons évalué la qualité des modèles en calculant l'écart en pourcents entre les moyennes des valeurs déduites et mesurées (par le modèle de PENMAN et les méthodes de bacs (classe A ou Colorado) dans les stations de mesure), et les valeurs estimées par le modèle BLANNEY-CRIDDLE (SCS) pour chacun des mois de l'année. Il en ressort qu'à l'exception des mois de la saison du printemps, les autres mois présentent de faibles écarts. En générale, l'erreur moyenne est aussi faible, de l'ordre de 11% avec 57% des valeurs ayant une erreur inférieure à 10%, 87 % des valeurs une erreur inférieure à 20% et 97% des valeurs une erreur inférieure à 30 %. Le coefficient de corrélation entre les moyennes de l'ETP calculées à partir des méthodes les plus performants et celles modélisée par la méthode BLANNEY-CRIDDLE (SCS) est significatif avec un coefficient de l'ordre de 0,95.

Sur la base de ces critères d'évaluation, nous pouvons donc témoigner de la bonne qualité des cartes des ETP moyennes mensuelles.

### **5. Hygrométrie :**

Sur la côte, l'hygrométrie varie entre 70 à 78% selon les saisons. Elle est légèrement plus élevée en été qu'en hiver.

En effet, cette différence pourrait s'expliquer par la fréquence, plus forte en hiver, des jours de « Chergui ».

Le brouillard et l'arrosé sont deux éléments importants pour le maintien de la couverture végétale.

En effet, les arrosées peuvent apporter 10 à 20 mm aux précipitations annuelles.

### **6. Insolation :**

L'insolation annuelle moyenne calculée sur dix ans, à Agadir est de 3082 heures. Elle est plus élevée à l'intérieur de la plaine, étant donnée que le brouillard et la brume qui sont plus fréquents sur la côte. La durée d'insolation est plus faible en hiver qu'en été mais demeure importante en période hivernale.

### **7. Les Vents :**

Bien que la région d'Agadir soit située à une latitude inférieure à celle d'Essaouira, l'alizé du Nord-Est ne s'y fait presque pas sentir. Il est arrêté par le Cap-Ghir et ce sont les vents d'Est et d'Ouest qui soufflent dans l'axe de la plaine (*PETILIER, 1982*).

Les vents de l'Est, connus sous le nom de « Chergui » sont chauds. Ils apportent des températures excessives qui peuvent dépasser 45 °C. Ces vents chauds doivent leur origine à la présence sur la région méditerranéenne et d'autre part, à des extensions vers le Nord et la dépression saharienne.

L'analyse des directions des vents d'après les données enregistrées par la station météorologiques d'Agadir entre 1961 et 1983 (figure 12), nous permet de constater la dominance des vents de l'Ouest qui représentent 39 % du totale des directions. Ces vents ont tendance à ramener la fraîcheur sur la plaine. Ils peuvent faire diminuer les maxima de 3 à 4 °C et peuvent augmenter l'humidité de 30 à 40 %, ceci sur une bande large de 30

à 40 km à l'intérieur du continent. L'autre direction dominante est celle des vents d'Est « Chergui » avec 16% du total des directions.

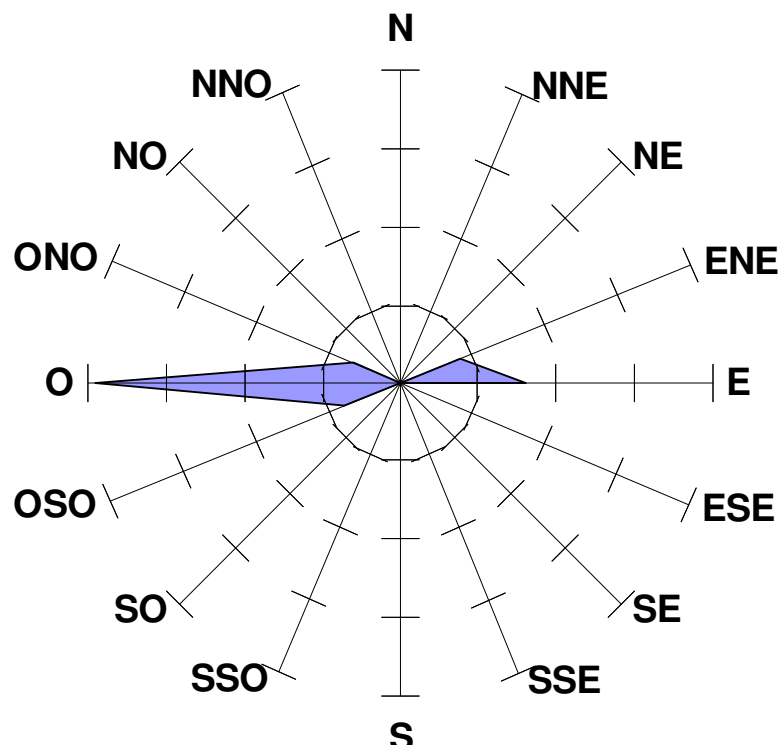


Fig.12 : Direction des vents dominants dans la plaine de Souss (d'après OCHACHAM, 1990)

Les autres directions restent proportionnellement faibles sauf pour l'Est-Nord-Est qui représentent 8,5%, l'Ouest-Sud-ouest avec 7,7% et l'Ouest-Nord-Ouest avec 6,5%

La vitesse moyenne de ces vents varie de 2,2 à 8,5 m/s selon la saison, la moyenne maximale se situant entre 11 et 18 m/s. La vitesse maximale absolue enregistrée à Agadir est de 38 m/s en Février 1970.

La plupart des vitesses maximales absolues se concentrent aux mois de mars et avril alors que les plus fortes sont enregistrées en juin et juillet avec des vitesses autour de 20 m/s.

Les vents saisonniers ou pérennes constituent l'agent climatique et mécanique de la formation des dunes de sable. *DUBIEF, 1952* considérait que les vents efficaces sont ceux dont la vitesse est supérieure à 3,3 m/sec et que la constance de la direction du vent et la durée jouent un rôle important dans le transport des sédiments. C'est-à-dire qu'un vent faible mais soufflant pour une longue durée aura le même effet qu'un vent violent et de courte durée (*BAGNOLD, 1954*).

L'analyse de la rose des vents décennale sur la côte d'Agadir établie par *OCHCHAM, 1996* à partir des données couvrant la période du 1<sup>er</sup> janvier 1979 au 31 décembre 1988, montre que les vents les plus violents sont du secteur Est (vents de vitesse supérieure à 54 Km/h) et que les vents les plus forts (vitesse des vents est comprise entre 21 et 54 Km/h) sont du secteur Ouest et Est pour la plus part du temps. Les vents moyens (vitesse des vents comprise entre 15 et 21 Km/h) et les vents faibles (vent dont la vitesse est inférieure à 15 Km/h) sont du secteur Ouest et Ouest-Sud-Ouest alors les vents calmes représentant 20% sont enregistrés généralement à 6 heures du matin.

## II. CLASSIFICATION CLIMATIQUE

D'après les données climatologiques, il ressort que le climat de la région selon la définition d'*EMBERGER et GAUSSEN, 1962* est de type méditerranéen mais teinté d'océanité.

*SAUVAGE, 1963*, définit ce climat comme un climat littoral de type méditerranéen aride et *PETELIER, 1982* s'est basé sur l'indice de *MARATONE, 1952* qui est de 7,7 pour Agadir, qui correspond à un climat aride avec tendance à l'hyperaridité isolée de formes diverses jusqu'au piémont de l'Anti-Atlas.

## CONCLUSION :

En résumé, la plaine de Souss présente un caractère aride avec une influence océanique le long de la zone côtière et devient de plus en plus continentale à tendance plus aride vers l'intérieur de la plaine, et vers les vallées sèches.

Ce climat résulte de l'interférence de trois facteurs différents : le cadre montagneux élevé (Haut Atlas et Anti Atlas), la proximité de l'océan et la latitude saharienne. Le régime climatique est caractérisé par une saison chaude et sèche prolongée (7 à 10 mois) et une saison humide, courte et à pluviosité brutale et concentrée dans le temps. Ce qui donne un régime hydrologique très contrasté, une faible densité de la couverture végétale, une érosion mécanique très importante et un transit rapide des sédiments vers l'océan provoqué par les violences des crues.

## 2<sup>ème</sup> Partie :

**ETUDE MORPHOSEDIMENTAIRE  
DU SYSTEME DUNAIRE DE SOUSS**

# Chapitre I:

## **MORPHOGENESE ET EROSION EOLIENNE**

## INTRODUCTION :

Avant de procéder à la détermination des sources et des trajectoires éoliennes d'apport de sable dans la plaine de Souss, il convient de donner quelques précisions sur les principes et les mécanismes de l'érosion éolienne, tels qu'ils ont été décrits et étudiés par différents auteurs. Cette synthèse générale permet une meilleure compréhension des processus de la dynamique éolienne : l'érosion, l'accumulation et le transport des particules de sables au Sud-Ouest marocain est aussi la description des différents types de modelés dunaires que l'on peut y rencontrer, notamment les formes et leur signification de point de vue de dynamique et de bilan sédimentaire.

La zone source de sable, les trajectoires d'apport et le bilan sédimentaire seront déterminés par l'examen de certaines formes dunaires telles que les édifices barkhaniques et les barkhanes données. Les aires de transport ou de transit sableux seront décelées par des mesures de la charge éolienne données par les capteurs de piégeage des sables.

### I. SYNTHÈSE DES TRAVAUX ANTERIEURS

L'érosion éolienne est un phénomène très actif dans les pays arides et semi-arides. Elle correspond aux processus de détachement, de transport et de dépôt des particules du substratum quel qu'il soit par l'action du vent qui joue un rôle majeur dans le tri et la redistribution latérale des particules de sables.

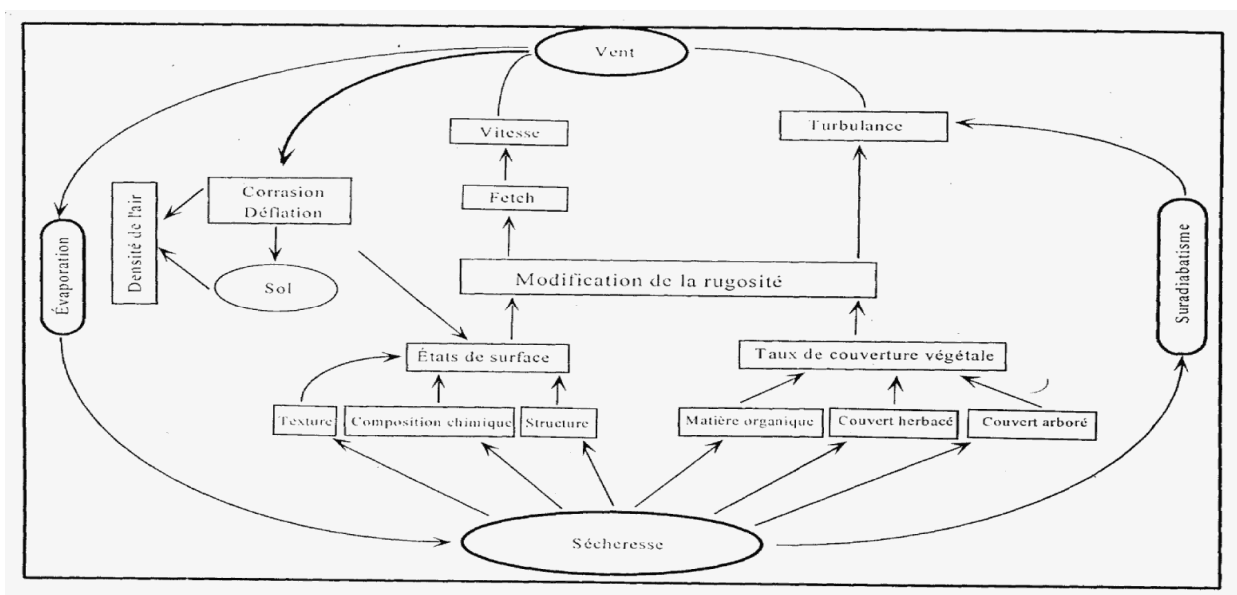
C'est un facteur de désertification et qui concoure à l'appauvrissement des sols (*LUNDHOLM.B, 1979*). Les conditions requises pour qu'il y ait érosion sont :

✎ L'existence de vents efficaces et réguliers, c'est-à-dire des vents soufflant pendant de longues périodes dans la même direction. Le vent étant une masse d'air en déplacement, de vitesse et de direction variables, son action dépend essentiellement de son intensité, c'est-à-dire de sa durée et de sa force (*PETROV, 1976*). Rappelons à ce propos, que l'étude des vents soufflants sur le Sud-ouest marocain a révélé l'existence de trois types de vents (*MAINGUET.M, 1978; MAINGUET.M et JAAFAR.B, 1993 ; AMAT.J, 1978 et BEN SALEM.M, 1977*) :

✎ Le Sahel ou vent soufflant du SW au NE.



- ✎ Le Chergui ou vent soufflant du NE au SO.
- ✎ Le vent soufflant du S ou SE vers le NO.
- ✎ La vitesse du vent constitue le facteur majeur de l'érosion éolienne, puisque la force du vent dépend principalement de celle-ci. Au niveau du sol cette vitesse est nulle et elle est d'autant plus forte que l'on s'éloigne de la surface du sol.
- ✎ La présence d'un sol meuble, à texture grossière. Les sols sableux sont les plus vulnérables. Ainsi les particules les plus facilement transportables par le vent sont les grains de quartz de diamètre 0.1 mm, celles dont le diamètre est supérieur à 5 mm sont difficilement transportables par le vent. Les particules de diamètre inférieur à 0.02 mm sont hautement résistantes à l'action directe du vent. Ces particules présentent en général, une forte cohésion et leur faible diamètre ne leur permet pas d'atteindre la zone de turbulence.
- ✎ Un relief avec de grandes étendues plates, favorisant l'action du vent en lui permettant d'atteindre des vitesses importantes.
- ✎ Un climat caractérisé par de faibles précipitations et par des successions d'années sèches qui provoquent le dessèchement des horizons superficiels et la disparition de la végétation. la sécheresse actuelle intervient à tous les niveaux d'explication du phénomène "érosion éolienne" G. Coudé Gausson (1994) (figure 13).



ig.13 : Vents- Sécheresse- Sol ” (D’après Coudé-Gausson. G, 1994)

L'érosion éolienne commence quand l'équilibre du système est rompu par le changement d'une ou de plusieurs composantes du milieu. Ce changement peut être dû aux précipitations, à la température, à la vitesse du vent, aux agrégats du sol, à la rugosité de la surface, au couvert végétal...etc. L'érosion éolienne abaisse la fertilité du sol et modifie graduellement sa texture. La perte de sable fin, limons, argile et particules organiques des sols entraîne une baisse de la capacité de rétention d'eau du sol. Ce qui augmente la vulnérabilité du sol à l'érosion éolienne.

## II. MECANISMES DE L'EROSION EOLIENNE

Les mécanismes de l'érosion éolienne, restent beaucoup moins connus que ceux de l'érosion hydrique qui sont presque tous modélisés. Du fait que l'érosion éolienne a été moins étudiée que l'érosion hydrique.

Le (tableau IV) nous dresse les différences entre ces deux fluides que sont l'eau et l'air.

### II.1. Mouvement des particules

Une divergence des points de vue des auteurs, concernant l'identification des différents mécanismes par lesquels le vent entraîne les particules du sol. *BRICARD, 1953 et WALTHER, 1951* ont observé que des effets électriques appréciables peuvent accompagner les tempêtes de sable. *WALTHER et GABRIEL, 1965* ont soutenu l'importance des charges électriques dans l'entraînement des grains de sable. La turbulence et la vitesse sont importantes dans l'initiation du processus de l'érosion éolienne. Cependant *BAGNOLD, 1943 et 1953* a suggéré que les effets électriques et les mouvements turbulents vers le haut, sont capables seulement d'entraîner les particules plus petites que le sable.

*CHEPIL, 1945 et WARREN, 1972* maintiennent que les mouvements des grains de sable sont attribuables seulement à la vitesse d'entraînement du vent. Selon *BAGNOLD, 1941*, la vitesse seuil du vent est atteinte, lorsque sous la pression directe du vent, les grains qui étaient immobiles commencent à rouler au dessus de la surface du

sol. Ces grains gagnent suffisamment de vitesse et commencent à bondir à quelques centimètres du point de leur départ.

*ZHU ZHENDA, 1983* précise que les bonds des particules sont dus à la collision avec celles en mouvement ou à la rencontre des grains de sable en saillie au dessus de la surface du sol. Le seuil de vitesse à partir duquel les grains sont mis en mouvement, dépend de plusieurs facteurs qui peuvent modifier sa valeur. Parmi ces facteurs on identifie :

- ☞ la pente du versant : quand le gradient de pente est positif, il provoque une augmentation de la vitesse d'entraînement, alors qu'un gradient négatif la diminuerait (*GAUSSEN.G. C, 1994*).
- ☞ l'humidité du sol : elle développe des forces de cohésion entre les particules (grâce à la présence d'un film d'eau) de taille supérieure à  $100 \mu\text{m}$  qui n'existent pour les particules de cette dimension.
- ☞ la taille des grains et le taux de recouvrement.
- ☞ la présence de sels et d'agrégats des sels, même en petites quantités, augmente de manière significative la vitesse d'entraînement des sables secs. Pour ce qui est des agrégats, il a été démontré une relation entre le pourcentage d'agrégats ( $< 800\mu\text{m}$ ) et le seuil d'entraînement (*NICKLING.W.G, 1986*) (figure 14).

Sur la base de recherches menées par *BAGNOLD, 1941*, il a été calculé que l'expression du seuil de vitesse d'un grain de sable de diamètre supérieur à  $0.1 \text{ mm}$ , est proportionnelle à la racine carrée de son diamètre. Selon *MAINGUET.M, 1978*, le seuil de vitesse est atteint lorsque la vitesse est de  $6 \text{ m/s}$ .

Une fois le mouvement des premières particules initié, le mouvement est maintenu par l'impact des particules en saltation. C'est ce qui a amené *BAGNOLD, 1941* à utiliser la notion de vitesse seuil d'impact. Ce seuil est inférieur à la vitesse seuil du vent et elle est inversement proportionnelle à la racine carrée du diamètre des particules.


L'EAU	LE VENT
Fluide visible	Fluide invisible
Elle obéit à la pesanteur	Il obéit à des différences de pression des masses d'air
Elle est spatialement limitée dans des interfluves	Il n'est pas spatialement limité
Elle porte des particules sur une tranche de quelques mètres (sauf turbidités)	Il porte des particules sur une tranche de quelques kilomètres
Elle circule dans des bassins versants bien délimités	Il remonte les pentes et n'a pas de bassin versant
Son utilisation est très diverses (alimentation, agriculture, énergie,...etc.)	Son utilisation est limitée

Tableau IV: Comparaison entre les caractéristiques du vent et de l'eau.

## II.2. Transport des particules :

Selon la force du vent, les dimensions, la densité des particules, et la rugosité du sol, il y a cinq types de mouvement.

### a/ L'arrachement

 **Déflation** : C'est l'érosion éolienne qui s'exerce sur une surface meuble. Il s'agit d'une sorte de lifting provoqué par remaniement de particules fines; argiles et limons; sous le seul effet de la turbulence du vent (*JELLOULI.D, 1988*).

Les sols soumis à la déflation voient leur structure s'altérer quant à l'infiltration (figure 13) la rétention des eaux et la perte en micro-organismes qui jouent un rôle essentiel dans la fixation de l'azote (*B. LUNDHLM, 1979*). Ils se trouvent réduit à une couche discontinue de sable plus ou moins grossier. La concentration résiduelle de particules grossières est le premier indicateur de l'action de la déflation. De nombreux témoins affirment avoir constaté

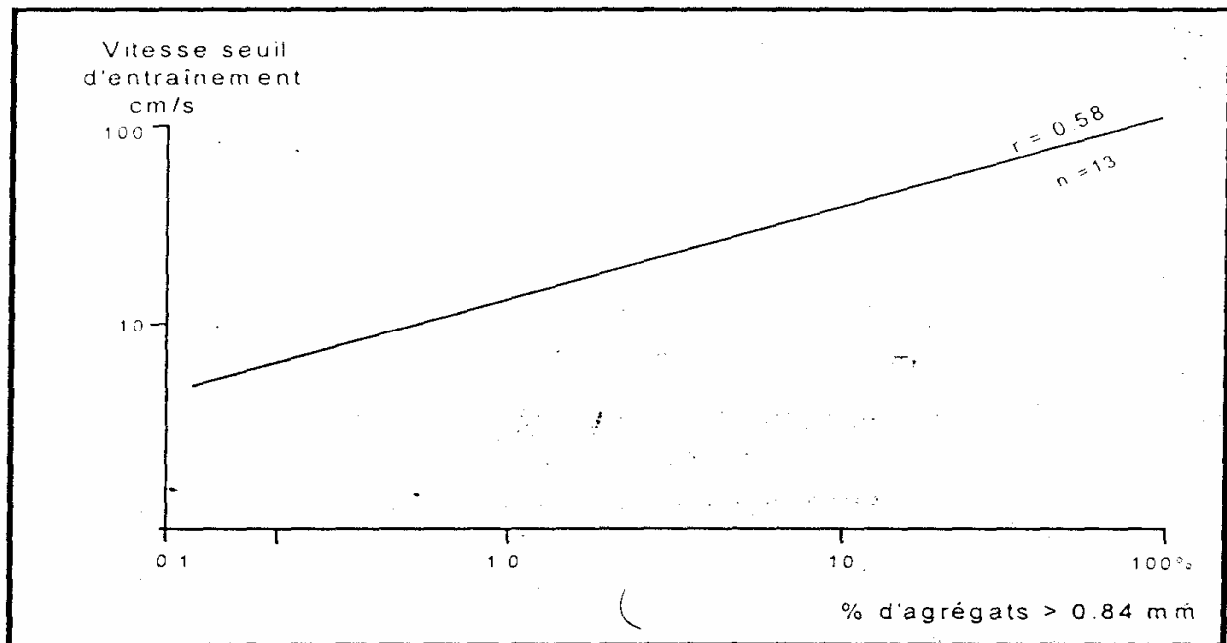


Fig.14 : Relation entre le pourcentage d'agrégat et la vitesse seuil d'entraînement (D' après *NTCKLLNG.W.G. & GILLIES.J.A, 1987*)

Une disparition de surfaces importantes de sols par ce mécanisme dans l'arganier et actuellement ces aires sont couvertes de sable. En effet, le vent peut exporter de grandes quantités de sol. L'exportation de 1 mm de sol équivaut à une perte de 10 à 15 tonnes/ha, taux bien alarmant si on tient compte de la lenteur de la vitesse de formation de sol dans les écosystèmes semi-arides ou même sub-humides.

L'analyse des états de surface des sols et des formations superficielles dans la plaine de Souss, a montré que l'érosion éolienne agit principalement par :

- La déflation directe des substrats meubles sols sableux ou sablo-limoneux, dépôts alluviaux, dépressions hydro-éoliennes;
- le vannage de la fraction fine des sables dunaires et fluviatiles.

Nous avons procédé à une quantification de la déflation qui peut s'exprimer par la quantité de matière arrachée d'un substrat sous l'action du vent par unité de surface et de temps. Nous avons utilisé pour cela des capteurs de piégeages des sables de type BSNE standard. La vitesse seuil  $V_t$  utilisée est 6.25 m/s selon les auteurs (*BAGNOLD. RA, 1951; FRYBERGER. SG et GLENNIE. KW, 1970; LANCASTER. N, 1982; HELGREEN. D et PROSPERO. JM, 1974*). Les observations de terrain permettent de

penser que la vitesse- seuil à prendre est de 4m/s traduit sous forme de graphiques les valeurs du potentiel de déflation.

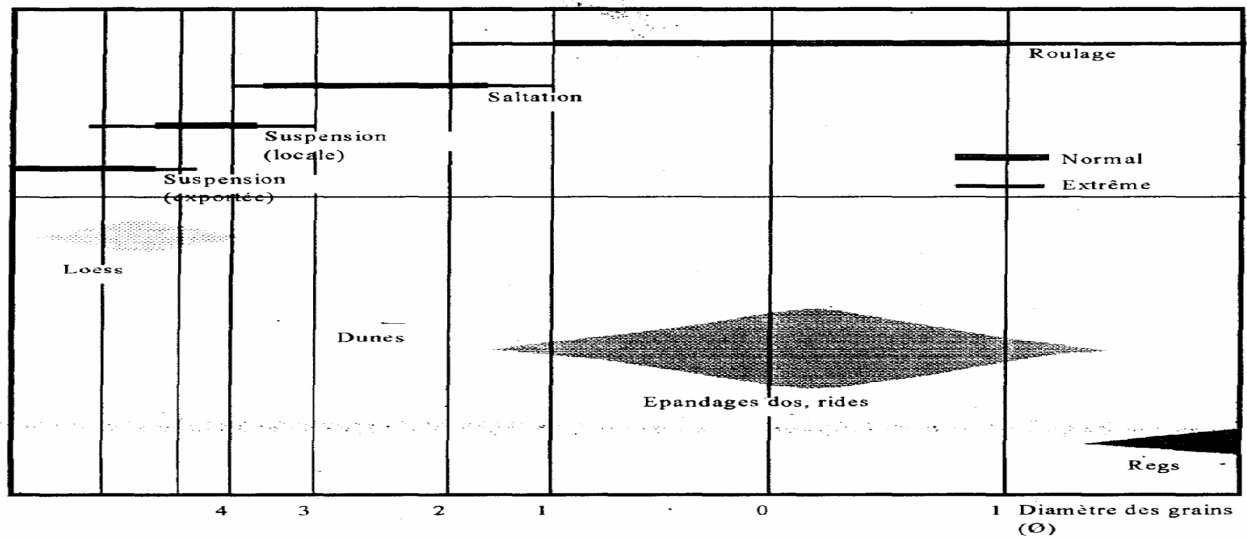


Fig. 15: Relations entre la granulométrie, le mode de transport et d'accumulation (Échelle de. **Krumbein. W. C**) (D'après **R.L. Folk, 1959**).

L'étude du pouvoir de déflation a montré l'efficacité des vents est réduite en raison de l'humidité plus élevée des sols et d'un taux de couverture végétale plus important. Nous notons qu'en dépit des variations que montre le potentiel de déflation, nous ne décelons toutefois aucun renforcement de l'efficacité des vents de 1981 à 1998. Le retour à des années à pluviométrie normale conduit, en général, à une large baisse du potentiel de déflation ce qui laisse supposer une reprise de la végétation et une recharge des nappes phréatiques durant ces années. La déflation est due à la résistance de ces derniers à la force d'arrachement du vent est fonction de sa teneur en eau. L'étude comparée de l'efficacité des vents dans le Sud-Oest marocain et de la fréquence des tempêtes de sable ou de poussière montre que ces deux paramètres sont liés.

✎ **Corrosion** : Il s'agit de l'érosion d'un matériau consolidé sous l'effet d'un vent chargé en sable. Il y a bombardement par les particules fines de divers surfaces (galets, blocs,...etc.). Qui sont alors érodées et polies avec très souvent, un détachement d'esquilles qui sont à leur tour, mise en mouvement (**CAMPY. M et MACAIRE. J.J, 1989**). Même les croûtes les plus résistantes peuvent se dégrader rapidement sous l'effet de ce mécanisme. Le transport des particules sableuses par le

vent produit sur les roches un effet abrasif qui se manifeste par le creusement de stries ou d'alvéoles correspondant aux parties les plus tendres de la roche, tandis que les couches dures restent en saillie. Cet effet abrasif est générateur de paysages de corrosion organisés en crêtes et couloirs périodiques. La corrosion est aussi extrêmement dangereuse pour les plantes.

Une fois arrachées ou délogées, les particules vont commencer à se mouvoir par traction ou roulage, saltation, reptation ou suspension (figure 15).

**b/ La traction ou roulage (Creeping pour les Anglo-saxons) :** Les particules, trop grandes pour être soulevées, peuvent cependant être mobilisées par roulage sur la surface. Ce mode de déplacement peut probablement mouvoir des éléments allant de 1000  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ . Le roulage et la traction peuvent être induits par les impacts de bombardements (*ALLAI. J.L, 1998*). Ils sont naturellement favorisés par l'existence d'un plan de roulage uni et agissent mieux lorsque les sables sont peu abondants à la surface d'une couche lisse et dure. Lorsqu'un matelas de sable recouvre le sol, les grains roulent mal et la saltation est seule possible, affectant d'ailleurs une fraction granulométrique plus petite. Le triage est moins bon que dans les conditions précédentes et les gros grains moins facilement évacués, forment un résidu de déflation à la surface.

Dans ce domaine les modélisations sont presque inexistantes, car ce mécanisme est difficile à observer (*WILLETTS. B. B et RICE. MA, 1985 et 1986*) donnent une vitesse de déplacement de 0.5 cm/s pour des grains de diamètre compris entre 355  $\mu\text{m}$  et 600  $\mu\text{m}$  sous un vent de vitesse égale à 48 cm/s.

**c/ La reptation :** Ce terme demeure encore un peu ambigu. Il a été employé par *J. BOVRCART, 1928*. Actuellement il s'applique à un déplacement de grains à la suite de leur bombardement par d'autres grains en mouvement. Les grains bombardés acquièrent leur énergie cinétique, après être rentrés en collision et effectuent des petits sauts. Ce mode de mouvement concerne les particules dont les diamètres varient autour de 500  $\mu\text{m}$ . Ce mécanisme de transport affecte une grande quantité de grains. Il concerne 7 à 25 % du poids du sol transporté (*CHEPIL. W.S, 1945*).

**d/ La saltation :** Les grains avancent par bonds successifs. Les particules sautent verticalement au cours de leur premier bond, elles montent jusqu'à des hauteurs variables mais qui restent inférieures à 2 m.

Ces grains retombent au sol en suivant une ligne droite, faisant un angle relativement aigu avec la surface du sol (10 à 20°). Au contact du sol, ils peuvent rebondir et continuer leur mouvement de saltation. Ils peuvent communiquer la majorité de leur énergie à d'autres grains, initiant ainsi leur mouvement, dans ce cas, ils pénètrent dans le sol ou commencent à rouler en surface avant de s'arrêter.

La saltation est le mode de transport dominant, 55 à 72 % du poids du sol transporté, l'est par saltation. Les grains qui se meuvent par cette façon ont généralement des diamètres compris entre 5 à 500  $\mu\text{m}$ .

*BAGNOLD, 1941* a démontré que la capacité de transport du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse.

Lors de la saltation, la nature du substrat intervient: un substrat cohérent favorise la saltation, un substrat meuble la freine. La vitesse des grains est accrue sur une surface de grains grossiers ou de texture hétérogène.

La hauteur du nuage de grains en saltation atteint 10 cm à 1 m et même 2 m sur une surface de galets, selon le degré de rugosité de la surface et à un maximum de densité entre 9 et 60 cm. La saltation est la plus dense jusqu'à 25 cm au-dessus du sol; c'est dans cette tranche que l'agressivité du vent vis à vis des végétaux est maximale. La partie basse des plantes est susceptible d'être la plus endommagée. Dans les dunes les graminées possèdent souvent à leur base de nombreuses feuilles séchées protectrices. L'importance de ces observations souligne le pouvoir abrasif et traumatisant des particules en saltation sur les végétaux bas.

**e/ La suspension :** La suspension à courte échéance entraîne les particules plus fines dans les tourbillons jusqu'à plusieurs mètres de haut. Cette suspension laisse retomber le nuage de grains au bout de quelques minutes et, de la sorte, ajoute ses effets à ceux de la saltation. La suspension durable affecte les poussières qui flottent dans l'air pendant



plusieurs heures au moins. La largeur maximum de ces particules oscille aux environs de 0.05 mm. Elle ne dépasse pas 0.08 mm. Elle correspond au flottement dans l'air des particules fines, dont le mouvement est également déclenché par l'impact des particules en saltation ou d'autres projectiles. En effet, un sol constitué seulement par des fines poussières est extrêmement résistant à l'effet direct du vent. Sous l'effet de chocs, ces particules sont projetées en l'air, une fois parvenues dans la couche turbulente, elles peuvent être soulevées à de très grandes hauteurs, par les courants ascendants, qui les emportent souvent à des kilomètres ou plus avant de les laisser tomber. Ce mode concerne 3 à 38 % du poids du sol transporté.

La suspension durable affecte les poussières qui flottent dans l'air pendant plusieurs heures au moins. La largeur maximum de ces particules oscille aux environs de 0.05 mm. Elle ne dépasse pas 0.08 mm. Ce transport sans chocs ne façonne pas les grains qui restent anguleux. Les minéraux fragiles ne sont pas éliminés, aussi trouve-t-on, dans de telles poussières éoliennes, bien d'autres éléments que le quartz, notamment des micas et certains minéraux lourds particuliers qui ne résistent pas au transport aquatique. La précipitation de ces poussières se fait surtout par augmentation de leur poids par humectation. Le mécanisme peut jouer suivant un rythme diurne. La baisse de température nocturne provoque une augmentation du degré hygrométrique de l'air et les poussières jouant le rôle de noyaux de condensation, s'alourdissent et se sédimentent. Ce mécanisme est renforcé par la présence de sel dans les poussières, matière très hygroscopique. Chacun de ces modes de transport correspond donc à la taille des particules arrachées au sol en fonction des vitesses du vent. La différence entre les diverses vitesses de mise en mouvement du matériel provient de la rugosité superficielle, qui est bien plus élevée sur un cône de déjections dont les cailloux forment des aspérités et sur une surface irrégulière de cuvette salée que sur une dune. Les frontières entre les différents types de transport ne sont pas strictes. L'ensemble du système peut être décalé vers des dimensions supérieures de grains en fonction de la vitesse du vent.

Ces différents modes d'action et de transport (saltation, suspension et reptation) permettent de comprendre les processus d'accumulation et de progression des dunes (figure 16).

Le déplacement en suspension des particules fines notamment le sable fin, le limon, l'argile et une partie de la matière organique, constitue une grande perte pour le sol. Cependant ce mode contribue d'une façon relativement minime, (moins de 5 % parfois même moins de 1 %) dans le déplacement des dunes (*ZHENDA SHU, 1987*). La saltation et la reptation continuent d'être les principaux modes capables de mettre les dunes en mouvement, avec une prédominance du premier sur le second.

### II.3. Mode de sédimentation ou dépôt

Il y a trois modes de dépôts éolien :

**a/ La sédimentation vraie :** Lorsque l'intensité du vent diminue, les particules tombent au sol à une vitesse insuffisante pour leur permettre de rebondir. Elle est le principal mode de dépôt des poussières.

**b/ L'accrétion :** Elle se produit quand la rugosité de la surface augmente, ou la vitesse du vent diminue à cause de facteurs externes, dans les deux cas, le surplus des particules se dépose sur une distance plus moins grande.

**c/ L'enrochement ou effet d'obstacle :** Il concerne uniquement les grains en reptation, et ne nécessite pas une diminution de la vitesse. La surface de roulement est perturbée par un obstacle (figure 17).

### II.4. Distribution spatiale du transport

Il y a une fréquence précise de phénomènes durant une tempête de sable. Au début, les particules les plus fines sont arrachées laissant une certaine rugosité à la surface, c'est la phase de floculation, dans un vent fort, l'intensité du flot de sable augmente jusqu'à un taux maximum que le vent peut porter. Cette augmentation est appelée "avalanche" par certains auteurs, En effet, lorsque les grains sont libérés, l'impact des particules en saltation exerce sur la surface une forte action abrasive. Cette abrasion détruit les croûtes stables, use les résidus végétaux et abîme les plantes vivantes.

Plus le terrain n'est étendu, plus les impacts des particules déplacées par le vent sont nombreux. En conséquence à mesure que le processus gagne du terrain dans le sens du vent, le nombre de particules mises en mouvement s'accroît, c'est ce qu'on a appelé "effet d'avalanche".

Quand l'équilibre est atteint, le sable enlevé compense le sable déposé ; et comme le vent d'une vitesse donnée peut enlever seulement les grains d'une certaine dimension, la zone de mise en mouvement du sable se déplace constamment vers l'aval, là où le matériau fin est encore disponible.

## II.5. Types de modelés éoliens

Les motifs de toute forme éolienne montrent une répétition de dimension, d'écartement et de forme. Nous ferons une synthèse des nombreuses descriptions et explications données par divers auteurs en ajoutant les particularités propres aux modelés du Sud-Oest marocain. La classification dynamique des dunes proposées par *AUFRERE*, 1931 dans son cycle morphologique situe les phénomènes les uns par rapport aux autres selon la direction du vent et distingue:

- ✎ Les vents en conjonction : correspondent à des vents dominants se répartissant dans une fourchette étroite. C'est le régime des « alizés », appelé par *FRYBERGER* unimodal.
- ✎ Les vents en opposition: régime qui correspond à deux directions dominantes ayant un angle de 180; par exemple : « Chergui » et « Saheli » au Maroc méridional, alizé et sirocco dans le Sud Algérien et Tunisien, mousson et alizé du Sahara et du Sahel,
- ✎ Les vents incidents: ce sont les régimes bidirectionnels, ou localement les régimes monodirectionnels subdivisés par les obstacles topographiques. (*FRYBERGER*, 1979) les appelle bimodaux aigus ou obtus;
- ✎ Les vents multidirectionnels: ce sont des régimes complexes qui comportent au moins trois directions dominantes.

D'autres travaux de *CAPOT-REY*, 1947; *MONOD*, 1958; *CHAVAILLON*, 1964; *COQUE*, 1962 et *MCKEE*, 1979 permettent aussi une classification complète des

dunes, basée sur les critères morphologiques comme la taille, la forme du corps et la localisation.

#### a/ Motifs sous un vent unidirectionnel

Dans le cas d'un vent unidirectionnel, les formes développées sont constituées par des formes allongées, équidistantes dans le sens du vent. Ces motifs sont rares dans les dunes, sauf à l'échelon des ripples.

<i>Bilan sédimentaire</i>	<i>Positif : apport &gt; départ accumulation dominante</i>	<i>Négatif : apport &lt; départ déflation dominante</i>
<i>Régime éolien</i>	Types de dunes	Types de dunes
<i>Un vent dominant</i>	-Edifice barkhanique -Barkhane -Chaîne barkhanique - Dune transverse	- Dune longitudinale - Edifice parabolique (genèse en milieu à couvert végétal clairsemé).
<i>Deux vents dominants</i>	-Dunes linéaires (sif)	--
<i>Trois ou plus de trois directions éoliennes</i>	-Dune en pyramide (ghourd)	--

Tableau. V : Bilan sédimentaire et types de dépôts (D'après MAINGUET.M, 1984).

#### Les ripples :

Ce sont des accumulations asymétriques et homogènes. Elles ressemblent aux ripples formées par les courants d'eau. Elles reposent sur une plate forme en général lisse constituée d'éléments plus fins. Elles ont beaucoup été étudiées par SHARP en Californie. Selon ce dernier, les ripples se forment par écoulement sur la surface induite par l'impact de la saltation. Les grains mis en suspension ou en reptation s'accumulent à la rencontre d'un obstacle jusqu'à une hauteur en équilibre avec la vitesse du vent. Cette hauteur et l'angle d'incidence contrôlent la longueur d'onde des ripples. L'angle d'incidence étant inversement proportionnel à la vitesse du vent: les ripples aux longueurs d'ondes importantes se rencontrent dans les endroits où les vents sont forts. La dimension des grains et la vitesse du vent contrôlent la longueur et la hauteur des

ripples. La taille des ripples varie dans de larges proportions. WILSON. I.G, 1972 distingue quatre ordres de ripples:

- ✎ Les ripples de 1<sup>er</sup> ordre (dunes) et 2<sup>ème</sup> ordre (grandes dunes ou draas) de grande dimension: hauteur de 0.1 à 450 m et longueur d'onde 3 à 5500 m.
- ✎ Les ripples de 3<sup>ème</sup> (rides aérodynamiques) et de 4<sup>ème</sup> ordre (ripples d'impact) de petite dimension: hauteur 0.05 à 5 cm et longueur d'onde 0.5 à 250 cm.

Le motif le plus simple est appelé Aklé, de la dimension d'une dune; longues rangées à crêtes.

La petite taille de ces ripples indique qu'elles sont façonnées par les derniers vents. D'ailleurs, les trajectoires qu'elles indiquent diffèrent très souvent totalement de celles données par les dunes porteuses. On peut donc dire, que les rides observées au Sud-Est marocain nous renseignent sur le dernier vent qui a soufflé sur la région considérée.

✎ **Les Berkhanes** : sont formées dans les mêmes conditions que les ripples, c'est-à-dire alignées perpendiculairement au vent dominant. Selon *MAINGUET.M, 1984* ces édifices apparaissent dans un régime monodirectionnel et traduisent un environnement à bilan sédimentaire positif (Bsp +). Elles se forment dans des secteurs où les vents sont de vitesse moyenne et où la couverture sableuse est réduite (*CAMPY .M et ACAIRE. J. J, 1989*).

- Motifs dus à plusieurs directions de vents.

La direction dominante du vent est la principale responsable de la composition des dunes; les vents mineurs sont supposés responsables de l'asymétrie de ces dunes; elles peuvent être symétriques ou obliques au vent, ou même présenter leur forte pente au vent, elles portent alors le nom de dunes opposées.

Les barkhanes peuvent développer des ailes asymétriques, fréquemment changer de direction du croissant ou même changer complètement de direction.

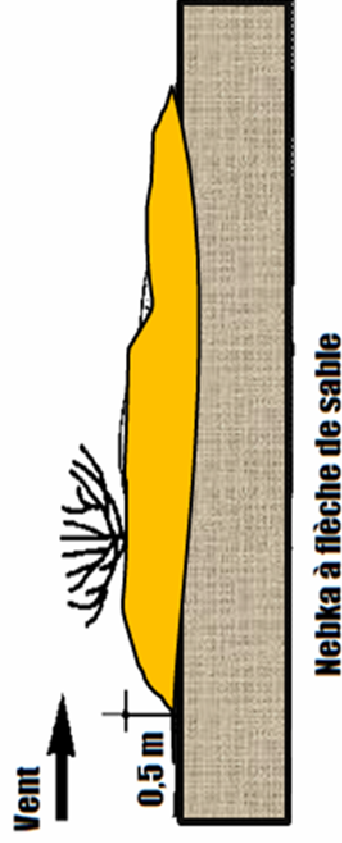
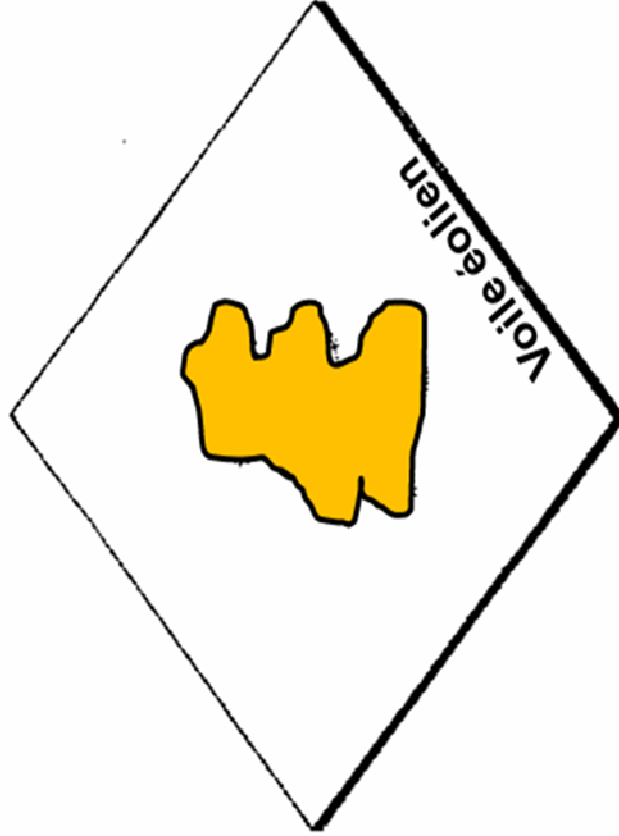
- Motifs influencés par la végétation.

Des formes distinctes d'accumulations dunaires se développent au contact de la végétation, la forme la plus commune est constituée par la nebka (figure 15). Sa forme

est très caractéristique. La pente du versant au vent, est plus forte que celle du versant sous le vent, contrairement où schéma des autres types de dunes telles que les barkhanes et les dunes transversales ou obliques. Vue en plan, sa forme est ovoïde avec la pointe la plus fine sous le vent.

*TRICART.J et CAILLEUX.A, 1969* la décrivent comme une forme naine due à l'arrêt du sable sous le vent d'un petit obstacle, buisson, touffe de graminées ou amas de pierrailles.

## Naissance et évolutions des édifices de transport



■ Dépôt sableux provoqué par un obstacle (végétal, rocheux...) sur la trajectoire des particules sableuses en mouvement.

■ Elle présente une pente douce sous le vent et une forte pente au vent. Vue en plan, leur forme est ovoïde avec la pointe la plus fine sous le vent.

■ La dimension d'une nebka est de quelques décimètres de hauteur et de 1 à 4 m de long.

■ Une nebka s'édifie rapidement se détruire aussi rapidement, certaines sont de formes fugitives caractéristiques du dernier vent de sable. Elle indique une mobilité du sable à l'échelle locale

**Voile éolienne:**  
saupoudrage diffus des particules sableuses à la surface du sol.

Fig.16 : Édifices sableux de la zone d'accumulation des sables.

- Motifs influencés par la topographie.

Les obstacles influent sur la forme et l'accumulation des dunes. Au sommet d'escarpements se développent des "dunes d'écho" avec des pentes raides au vent, dues à l'effet de vortex.

Une augmentation de la vitesse du vent, due à la topographie de larges escarpements, aboutit à une interruption de la migration des dunes. Les dunes se désintègrent à une courte distance de l'obstacle. Le sable est transporté au dessus de l'obstacle sur un ou plusieurs kilomètres, avant de se déposer en dunes (*DJELLOULI.D, 1985; COKE et WARREN, 1973*), caractérisent les dunes d'écho par leur pente raide du côté "au vent" alors que dans le cas des autres dunes, cette pente est modérément faible.

Globalement, on peut dire que les différents motifs décrits, qu'ils soient transverses ou longitudinaux, individuels ou associés, semblent parfois exister simultanément sous l'effet d'un même vent dominant, ce qui est le cas de plusieurs sites dunaires au Sud- Est marocain.



## Chapitre II:

# **SEDIMENTOLOGIE**

## INTRODUCTION :

Le système dunaire au Sud de l'embouchure de l'Oued Souss, se situe dans une zone frontalière complexe à triple interface « terre, océan et atmosphère », dont l'équilibre sédimentaire est contrôlé par l'interférence d'agents dynamiques : fluviale, marin et éolienne.

L'étude sédimentologique du matériel de surface, offre la possibilité de préciser l'origine, la nature, la composition des matériaux du système dunaire et vise à mettre en évidence la part de l'action éolienne en matière d'ensablement.

Pour cela, nous avons fait appel à des analyses sédimentologiques, basées sur :

- La teneur en fraction fine;
- La calcimétrie;
- La granulométrie;
- La morphoscopie des grains de quartz et des bioclastes.

## I. MATERIEL ET METHODES

Les études complètes ont été réalisées sur des sédiments prélevés sur les différents types dunaires.

Les sédiments sont d'abord examinés à la loupe binoculaire à l'état brut, puis observés à l'état fiab. La constitution globale du sédiment, la nature des bioclastes et leur degré d'usure.

Les échantillons sont soumis aussi à une série d'analyse pour étude.

### 1. Teneur en Fraction Fine :

#### 1.1. Teneur en matière organique :

Les échantillons sont débarrassés de leur matière organique par l'attaque à l'eau oxygénée ( $H_2O_2$ ) diluée à chaud. La teneur en matière organique est obtenue par différence entre les poids secs avant et après attaque et lavage.

#### 1.2. Teneur en sables, limons et argiles :

Les sédiments sont ensuite lavés à l'eau distillée puis séchés à l'étuve. Après pesage, les échantillons sont passés successivement dans des tamis de 2 mm et de 0,50 mm, pour avoir des proportions de sables, et la matière fine (limon et argile).

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de diagrammes.

### 2. Calcimétrie :

La calcimétrie permet de déterminer le pourcentage en carbonates du sédiment. La méthode utilisée est la gravimétrie. Elle consiste en :

- ✓ Tarer un erlanmeyère, contenant 7 ml d'acide chlorhydrique (HCl) dilué (5N), et son couvercle sur une balance de précision, un poids enregistré est noté  $P_0$ .

- ✓ On prend 1g du sédiment qu'on met sur le couvercle de l'érlemeyer contenant 7ml d'HCl (5N) et on pèse l'ensemble, le poids obtenu est noté P<sub>1</sub>.
- ✓ La différence des poids P<sub>1</sub> et P<sub>0</sub> donne le poids du sédiment.
- ✓ On introduit le sédiment dans l'érlemeyer contenant 7ml d'HCl (5N) et on laisse reposer pendant 30mn, puis on pèse et le poids obtenu est noté P<sub>2</sub>.

$$\% \text{ CO}_2 = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0}$$

La différence des poids P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> donne le poids de CO<sub>2</sub> (gaz carbonique).

L'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur les carbonates (Ca CO<sub>3</sub>) se fait selon la réaction suivante :



Détermination du facteur F :

$$F = \frac{\text{Poids (Ca CO}_3\text{)}}{\text{Poids (Ca}_2\text{)}}$$

Donc :

$$\% \text{ Ca CO}_3 : \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} \times F \times 100$$

\* Remarque :

Cette méthode diffère de celle de Calcimétrie de *BERNARD*, car elle fait intervenir le poids, mais les deux méthodes se basent sur la réaction chimique qui produit le départ de CO<sub>2</sub>. Ce qui permet de déterminer le pourcentage de CaCO<sub>3</sub> indirectement.

### 3. Granulométrie :

Après le repassage à l'étuve, on prend 100g des échantillons de sables seulement (diamètre compris entre 2 mm et 0,5 mm) pour leur faire subir un tamisage à sec pendant 10 minutes afin de déterminer les proportions des différentes tailles des grains. La série des tamis utilisée est conforme à la norme AFNOR.

Les distributions granulométriques ont été tracées selon une échelle arithmétique en ordonnées (les pourcentages%) et une échelle logarithmique en abscisse pour avoir

des unités équidistantes sur l'axe des abscisses, ces unités correspondent à l'échelle en Phi ( $\Phi$ ).

$$\Phi = -\text{Log}_2 d \quad \Rightarrow \quad \Phi = -\frac{\text{Log}(d)}{\text{Log}(2)}$$

Où  $d$  = dimension des mailles des tamis, exprimés en (mm). L'échelle des  $\Phi$  nous a été utile pour retrouver les paramètres proposés par *FLOK et WARD, 1957*.

### 3.1. L'expression graphique des distributions granulométriques :

Les résultats granulométriques sont représentés par des courbes cumulatives et des courbes des fréquences.

#### a/ Indices numériques :

✓ Paramètres centraux :

- *La Médiane* : évaluée à partir de la courbe cumulative en cherchant sur l'axe des abscisses, la valeur correspondante à 50% du pourcentage cumulé sur l'axe des ordonnées. Ce paramètre caractérise la grossièreté du sédiment.
- *Le Mode* : correspond au diamètre du grain, relatif au pourcentage le plus fréquent.

#### b/ Les paramètres de dispersion :

Ces paramètres proposés par *FLOK et WARD, 1957* sont les suivants :

- Dimension Moyenne ( $M_c$ ) ou Mean Size ( $M_z$ ) : représente la dimension granulométrique moyenne des sédiments.

$$M_c = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$

Où (16), (50) et (84) sont des pourcentages sur l'axe des ordonnées et  $\Phi_{16}$ ,  $\Phi_{50}$ , et  $\Phi_{84}$  sont leurs correspondants sur l'axe des abscisses

Elle est fonction de :

- ✎ L'intervalle de la taille du matériel disponible (granulométrie de la roche mère) ;
- ✎ L'énergie du milieu (vitesse de turbulence de l'agent de transport) ;

✎ Distance de transport (*PIERRAUX, 1961*).

Les valeurs de référence pour  $\sigma$  de la taille moyenne Mc.

mm	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	
		STF	SF	SM	SG	STG	
$\sigma$	4,32	3,32	2,32	1	0	-1	STF : Sable très fin SF : Sable fin

STG : Sable très grossier.

SM : Sable moyen

SG : Sable grossier

- L'Écart- type ou Standard Déviation ( $\sigma$ ) : indique le degré de perfectionnement du classement de sédiment, il dépend de l'intervalle, des tailles du matériel initial, du taux de sédimentation et des caractéristiques physiques du courant.

$$\sigma = \frac{\sigma_{84} - \sigma_{16}}{4} + \frac{\sigma_{95} - \sigma_5}{6,6}$$

FOLK, 1965 propose pour les valeurs de standard déviation, les caractéristiques suivantes du classement.

Classement	Valeur standard
Très bien classé	< 0,35
Bien classé	0,35 - 0,50
Moyennement bien classé	0,50 - 0,71
Moyennement classé	0,71 - 1,00
Mal classé	1,00 - 2,00
Très mal classé	2,00-4,00
Extrêmement mal classé	> 4,00
Dissymétrie de la courbe vers les	Forte asymétrie négative
	Asymétrie négative
Courbes symétriques	Symétrie
Asymétrie de la courbe vers les	Asymétrie positive
	Forte asymétrie positive

- SKEWENESS (SKI) ou indice d'asymétrie : mesure la non-conformité d'une distribution expérimentale par rapport à celle théorique de la place de GAUSS.

$$SKI = \frac{\sigma_{84} + \sigma_{16} - 2\sigma_{50}}{2(\sigma_{84} - \sigma_{16})} + \frac{\sigma_{95} + \sigma_5 - 2\sigma_{50}}{2(\sigma_{95} - \sigma_5)}$$

Les valeurs de références pour l'indice d'asymétrie de SKEWENES (SKI), sont comprises entre -1 et 1, celles de références proposées par FOLK sont:

Le SKEWENESS : mesure le degré de déviation de la courbe de fréquence par rapport à la courbe normale de GAUSSE.

Selon *FOLK, 1965* une asymétrie négative forte ou très forte signifie que le sédiment s'est déposé en milieu turbulent et qu'il privé des éléments fins.

Lorsque la courbe de fréquence est presque symétrique, le sédiment s'est déposé brutalement et sans remaniement ultérieur par excès de charge et/ou par une diminution de la compétence de l'agent de transport.

Le cas d'une asymétrie positive forte ou très forte signifie que le sédiment s'est déposé en milieu par décantation.

- SKEWENESS KURTOSIS (SK) ou le coefficient d'acuité : est une mesure du degré d'aplatissement de la courbe de fréquence et le rapport entre le classement aux extrémités de cette courbe et la partie centrale.

Il constitue aussi un test sensible de la normalité d'une distribution (*PERRIAUX, 1966*).

$$\text{SKI} = \frac{\sigma_{95} - \sigma_5}{2,44 (\sigma_{75} - \sigma_{25})}$$

Les valeurs et leurs significations de ce paramètre selon *FOLK et WARD, 1957* sont les suivants :

Classement	Valeur standard
Très platikurtosique (courbe très aplatie) caractérise un très mauvais classement	< 0,67
Platikurtosique (courbe aplatie)	0,67 à 0,90
Mésokurtosique (courbe normale caractérise un classement moyen)	0,90 à 1,11
Leptokurtosique (Pic accentué) caractérise un bon classement	1,11 à 1,50
Très leptokurtosique (Pic très accentué)	1,50 à 3,00
Extrêmement leptokurtosique	> 3,00

#### 4. Morphoscopie :

L'étude de l'état de surface des grains de quartz détritiques, traduit leurs conditions de genèse, de transport et de sédimentation.

Elle doit préciser l'intensité de ces mécanismes et celles des courants transporteurs.

La méthode consiste en à l'observation, à la loupe binoculaire, de l'état de surface des grains de quartz.

Les fractions granulométriques étudiées doivent être comprises entre 0,3 et 0,5 mm *LERIBAUT, 1977* car elles enregistrent mieux les actions chimiques et physiques du milieu.

Dans ce travail, nous nous sommes basés sur la méthode préconisée par *CAILLEUX et TRICART, 1959*, qui utilisent la loupe binoculaire et travaillent sur des grains de quartz ayant une taille comprise entre 0,2 et 0,5 mm (fraction B).

#### 4.1 . Forme des grains :

La forme des grains est franchement émoussée, le caractère est d'autant mieux marqué que la taille est plus grossière. Cependant, le contour est souvent sub-arrondi à arrondi qui rend les grains anguleux abondants. La forme ronde est peu fréquente et lorsqu'elle est présente n'affecte qu'un faible pourcentage.

#### 4.2. Aspect de surface :

✎ Grains Mats : Si la surface des grains est le plus souvent mate, cet aspect peut avoir plusieurs origines conjointes (*LEGIGAN, 1979*). La matité peut résulter de trace de choc, d'une corrosion physico-chimique, ou de précipitation de silice.

✎ Grains Luisants : Il n'y a pas de grains typiquement luisants. En effet, le terme de passage entre les grains luisants avec légère matité et les grains avec restes de luisance sont présents, et constitue un indice de remaniement des sables dans divers milieux. Aussi, la distinction lors du comptage est-elle assez subjective et variable pour une même valeur.

Pour simplifier, on a regroupé les grains de quartz en trois catégories principales suivant les travaux de *CAILLEUX, 1942-1959*.

✎ Les Non Usés (NU) : Le contour est anguleux, les faces peuvent être planes, forment entre elles un angle quelconque. L'usure apparaît très faible et négligeable. Les grains peuvent être brillants ou ternes.

✎ Les Emoussés Luisants (EL) : Le contour général est émoussé ou rond. La surface polie donne des images de réflexion et de réfraction très caractéristiques.

✎ Les Formes de transition : Elles sont représentées par :

- Les émoussés dont le contour n'atteint pas le dôme ronde de grains éoliens typiques. Ce sont des grains en voie d'éolisation.
- Les subanguleux luisant sont situés entre les anguleux non usés et les grains émoussés luisants.

Ce sont des grains qui ont subi un début de transport dans l'eau. Mais le transport a été insuffisant pour provoquer une usure importante.

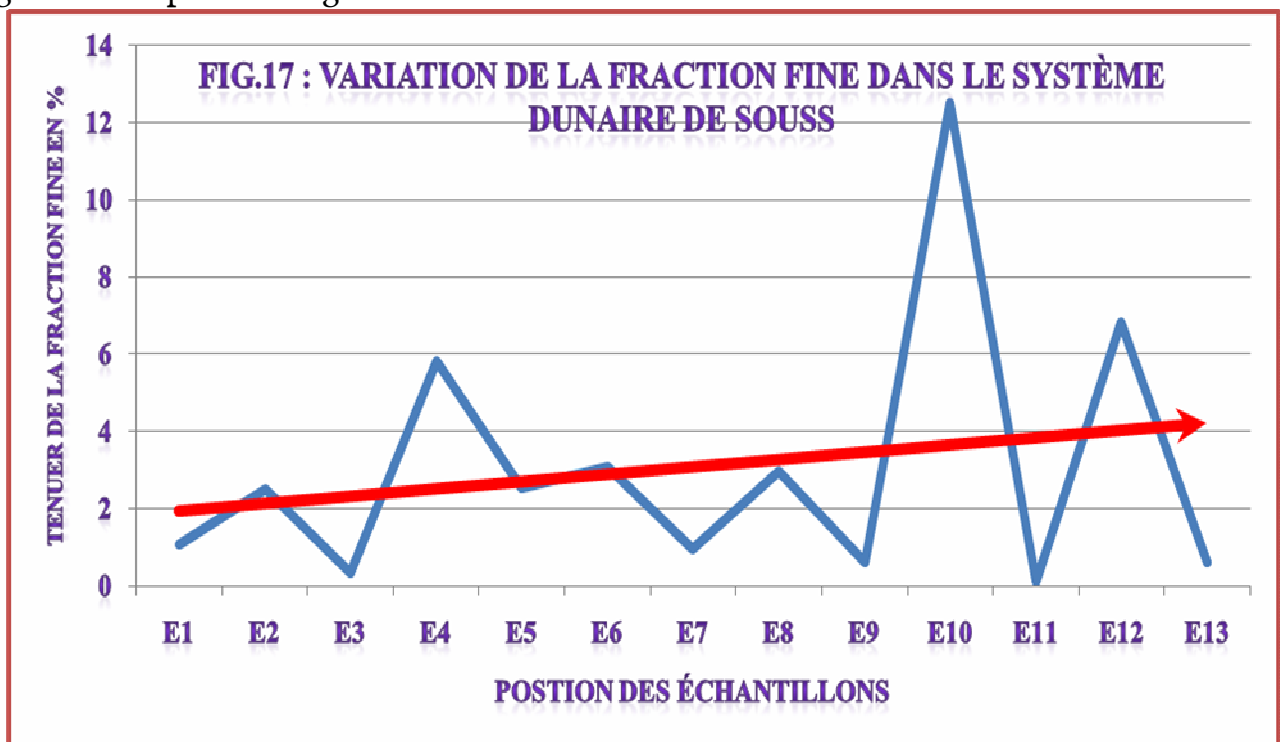
Les fractions comprises entre les tamis 0,63 et 0,40 mm, ont subi une attaque à l'acide chlorhydrique (HCl), pour éliminer les carbonates et les sels cristallisés, puis sont lavées à l'eau distillée pour être séchées à l'étuve. Après, on prend 33 grains (*CAILLEUX, 1959*), sur lesquels seront réalisées les observations. Les résultats obtenus

seront donnés sous forme de diagrammes traduisant les pourcentages relatifs de chacun des types principaux des grains de quartz. Suite à une simplification en groupant les grains de quartz en trois catégories : les Non Usés (N.U), les Emoussés Luisants (E.L) et les Ronds Mats (R.M).

## II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 1. Evolution de la fraction fine « loess » :

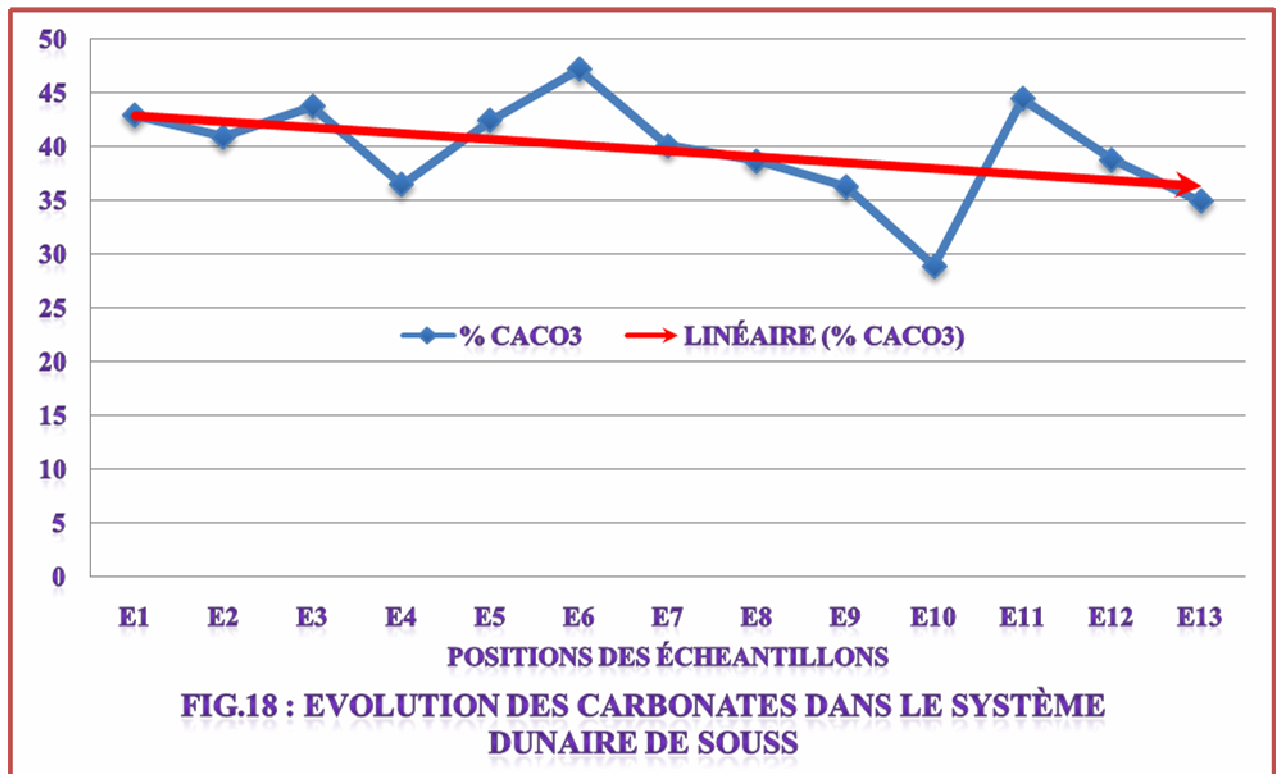
L'analyse de la composition du matériel sableux au sein du système dunaire au Sud de Souss, (figure 18), montre une faible teneur en fraction fine (limon, argile et matière organique). Elle croit généralement vers l'Est du système et passe de 1% à 12%. Cette tendance globale est interrompue par endroit et peut être liée à la présence ou l'absence de la couverture végétale susceptible de fournir la matière organique et par la suite augmenter le pourcentage de la fraction fine.



### 2. Calcimétrie :

L'analyse des résultats calcimétrique (figure 19), montre un pourcentage élevé en carbonates 47% ( $\text{CaCO}_3$ ). Cette teneur présente des fluctuations, mais la tendance globale est une décarbonatation vers l'Est du transect.





### Discussion :

Afin de trouver une interprétation logique à cette distribution calcimétrique, nous avons complété cette analyse par la morphoscopie des bioclastes et des données du terrain.

- L'observation des bioclastes à la loupe binoculaire montre des débris de coquilles appartenant à des tests de mollusques qui sont des gastéropodes d'origine marine (Patellidés) ou d'origine continentale (Hélix), capables de fournir des carbonates. L'état de surface de ces bioclastes, a subi un amenuisement mécanique qui marque l'efficacité du vannage par le vent et réduit les coquilles fragiles à l'état de poussière (Loess).
- Les données de terrains, montrent que les sédiments présentant une teneur élevée en carbonates, sont prélevés sur des dunes proches d'une croûte calcaire. L'affleurement de cette dernière est probablement lié à l'action érosive du vent, mettant à nu le sol et caractérisant ainsi une aire de déflation.

En conséquence, la variation de la distribution des carbonates est liée aux bioclastes appartenant à une faune d'origine double marine et d'eau douce, et à l'affleurement de la croûte calcaire qui constitue une source supplémentaire lors de l'action éolienne.

### 3. Granulométrie :

#### 3.1. Expression graphique :

##### a/ Courbes de fréquence :

La réalisation des courbes de fréquences se fait sur une échelle semi-logarithmique, ayant pour abscisse le diamètre de grain, et pour ordonnées le pourcentage en poids du refus des tamis correspondants. Ces courbes présentent en général, un seul pic (figures 20a et 21b) sauf pour les échantillons situés à l'extrémité Est du transect (figure 22a), qui montrent deux pic, donc deux populations qui s'individualisent et témoignent d'une hétérogénéité des sédiments, en particulier dans le secteur des barkhanes.

##### b/ Courbes cumulatives :

Le report des résultats des analyses granulométriques en coordonnées semi-logarithmiques donne pour chaque échantillon, des courbes de même allure, qui se superposent vers l'Est. En effet, les courbes de fréquence (figures 19 a ; et 20a) montrent des sédiments homogènes d'accumulation libre à l'Ouest alors que la figure 21a témoigne de l'hétérogénéité des sédiments à l'Est qui caractérisent les zones actives de la déflation qui sont les processus dangereux de la dynamique éolienne. Les courbes cumulatives présentent une forme en « S » étirée, bien dressée, avec un secteur rectiligne bien développé dans sa partie médiane de plus en plus vers l'Est (figures 19b, 20b et 21b), ce qui signifie que le sédiment est assez bien classé.

Fig. 19 a : COURBES DE FRÉQUENCES

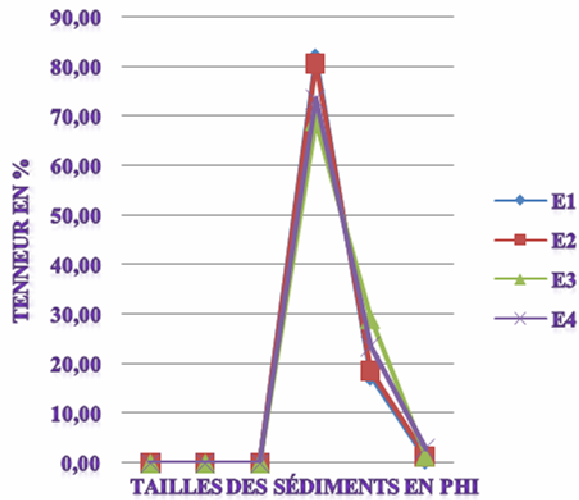


Fig.19b: COURBES CUMULATIVES

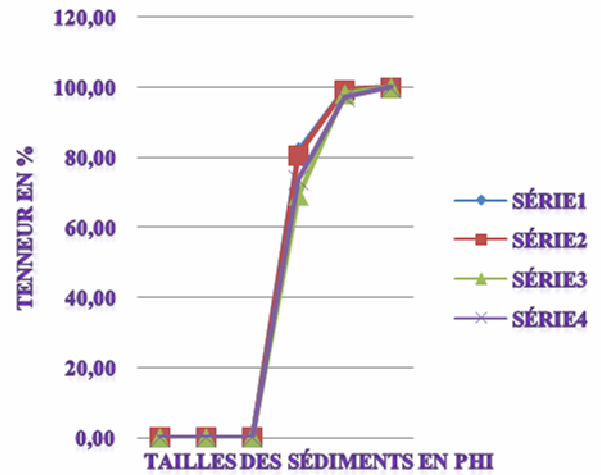


Fig.20a : COURBE DE FRÉQUENCE

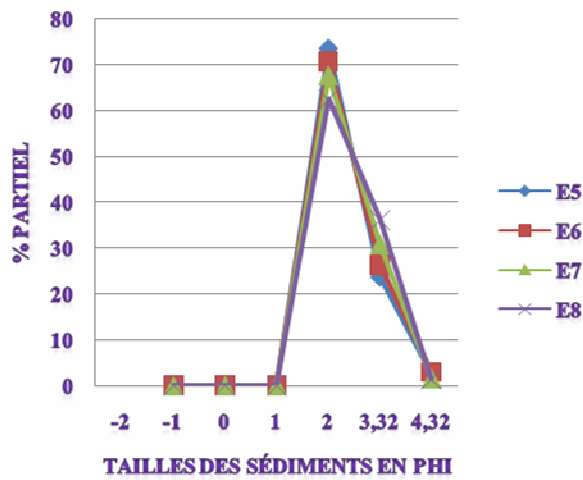


Fig.20b : COURBES CUMULATIVES

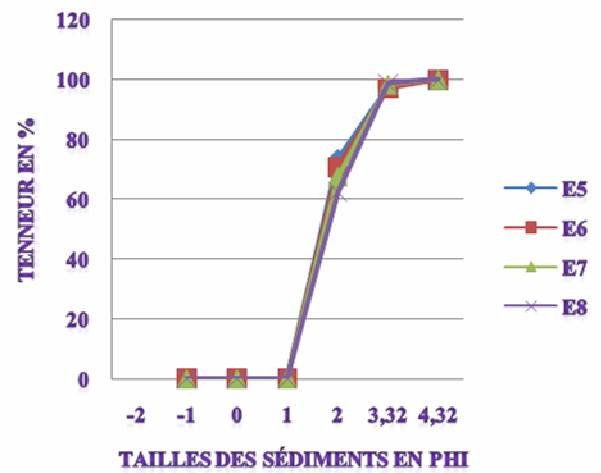


Fig.21a : COURBE DE FRÉQUENCE

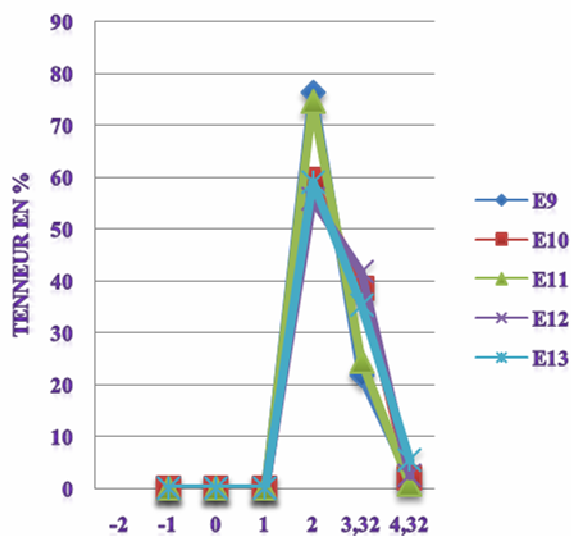
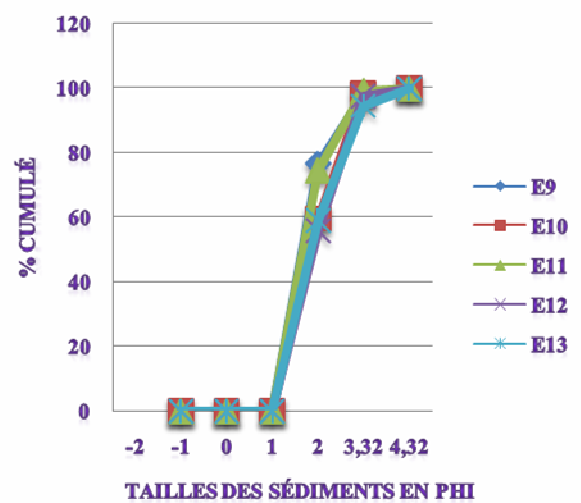


Fig. 21b : COURBES CUMULATIVES



### 3.2. Indices numériques :

#### a/ Paramètres centraux :

##### ✎ *Le Mode :*

L'étude statistique des courbes des différents échantillons analysés (tableau V), donne une valeur (0,20 mm) comme étant la plus fréquente et accessoirement, le mode peut- avoir une valeur de (0,15 mm). Ceci est dû généralement à la présence d'une population plus fine (loess), notamment dans la zone de déflation située à la périphérie du système dunaire de Souss

##### ✎ *La médiane :*

Les résultats obtenus (tableau V) sur la totalité des échantillons analysés donnent des valeurs comprises entre (0,22 et 0,28 mm), ce qui permet de classer le sédiment dans la catégorie des sables moyens.

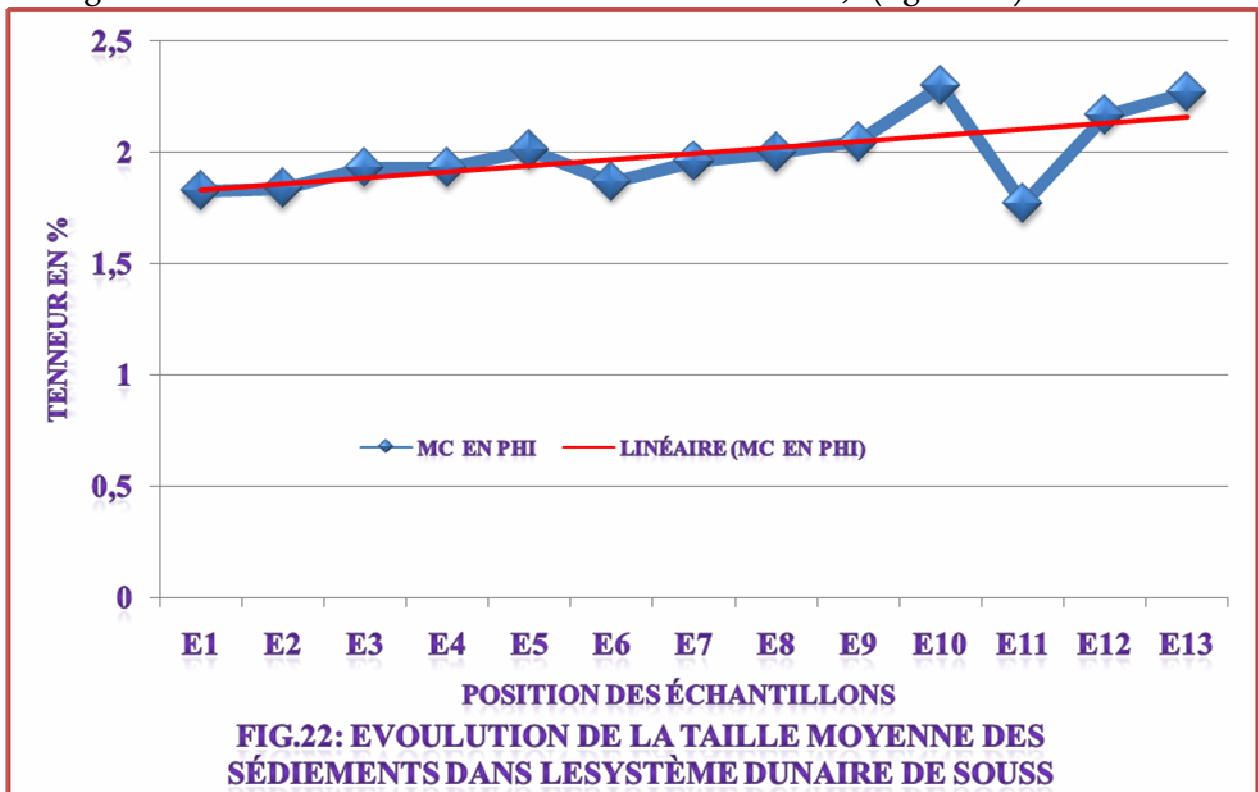
#### b/ Paramètres de dispersion :

La sédimentologie fait appel à divers paramètres intégrant plus ou moins l'extrémité de la courbe cumulative, pour caractériser la distribution de la granulométrie. Plusieurs auteurs ont proposé des paramètres et des indices, mais ceux qui restent les plus utilisés et les plus faibles, sont ceux préconisés par *FOLK et WARD, 1957* et qui sont repris par différents auteurs :

##### • *Dimension moyenne (Mc) ou Mean size (Mz) :*

Les résultats obtenus donnent des valeurs qui oscillent entre Mc (1,83 $\phi$  et 2,30  $\phi$ ), ce qui permet de classer le sédiment dans la catégorie des sables moyens. Ce résultat est comparable avec celui donné par la médiane.

On remarque que cette moyenne, en générale, a tendance à diminuer selon un gradient granodécroissant de l'Ouest vers l'Est du transect, (figure 22).



- Ecart-type ( $\sigma$ ) ou standard déviation (STDV) :

Les résultats dégagés (tableau V), montrent des valeurs qui sont comprises entre  $\sigma=0,47\sigma$  et  $0,7\sigma$ . Ce qui indique un bon à assez bon classement du sédiment, notamment vers l'Est du système

N° Echantillon	Médiane en mm	Mode en mm	Mc en mm	Mc en Phi	Ecart-type $\sigma$	SKI	SK
E1	0,28	0,20	0,28	1,83	0,50	-0,04	0,96
E2	0,28	0,20	0,28	1,84	0,52	0,00	0,96
E3	0,27	0,20	0,26	1,93	0,60	0,02	1,00
E4	0,27	0,20	0,26	1,93	0,60	0,02	1,00
E5	0,26	0,20	0,25	2,01	0,62	0,04	0,97
E6	0,29	0,20	0,27	1,87	0,58	0,07	0,94
E7	0,27	0,20	0,26	1,96	0,63	0,06	0,93
E8	0,26	0,20	0,25	2,00	0,63	0,05	0,86
E9	0,25	0,20	0,24	2,05	0,65	0,04	0,82
E10	0,14	0,20	0,20	2,30	0,67	-0,87	0,80
E11	0,30	0,15	0,29	1,77	0,47	0,02	0,93
E12	0,23	0,15	0,22	2,17	0,67	-0,04	0,80
E13	0,20	0,15	0,21	2,27	0,68	-0,16	0,80

Tableau VI : Valeurs des indices granulométriques au niveau du système dunaire de Souss.

- *SKEWNESS (SKI) ou indice d'asymétrie* :

Les résultats obtenus (Tableau .V), donnent des valeurs de SKI comprises entre  $-0,04$  et  $0,04\sigma$ . Ce qui montre une symétrie des courbes dans la partie occidentale du système dunaire et explique que le dépôt des sédiments se fait brutalement, et sans remaniement ultérieur par excès de charge et/ou par une diminution de la compétence du courant transporteur. Alors que dans la partie orientale, les courbes présentent une dissymétrie vers les éléments fins, avec une asymétrie négative, ce qui signifie que les sédiments se sont déposés en milieu turbulent qui les prive des éléments fins qui remplissent le vide laissé entre les éléments grossiers après dépôt final, c'est le processus de déflation, principal moteur de l'ensablement.

- ***SKEWNESS KURTOISIS (SK) ou Coefficient d'acuité :***

Les valeurs trouvées sont comprises entre ( $SK=0,80$  et  $SK= 1$ ) montre que les courbes sont platikurtosiques à mésokurtosiques d'où un sédiment assez bien classé.

### **3.3. Processus de Transport :**

Les travaux de *MOSS, 1962-1963 et VISCHER, 1969* permettent de définir les processus de différenciation granulométrique liés aux trajectoires des grains, introduites par *BAGNOLD, 1941-1943 et IMAN, 1952*: suspension, saltation (en sens large) et traction ou roulement.

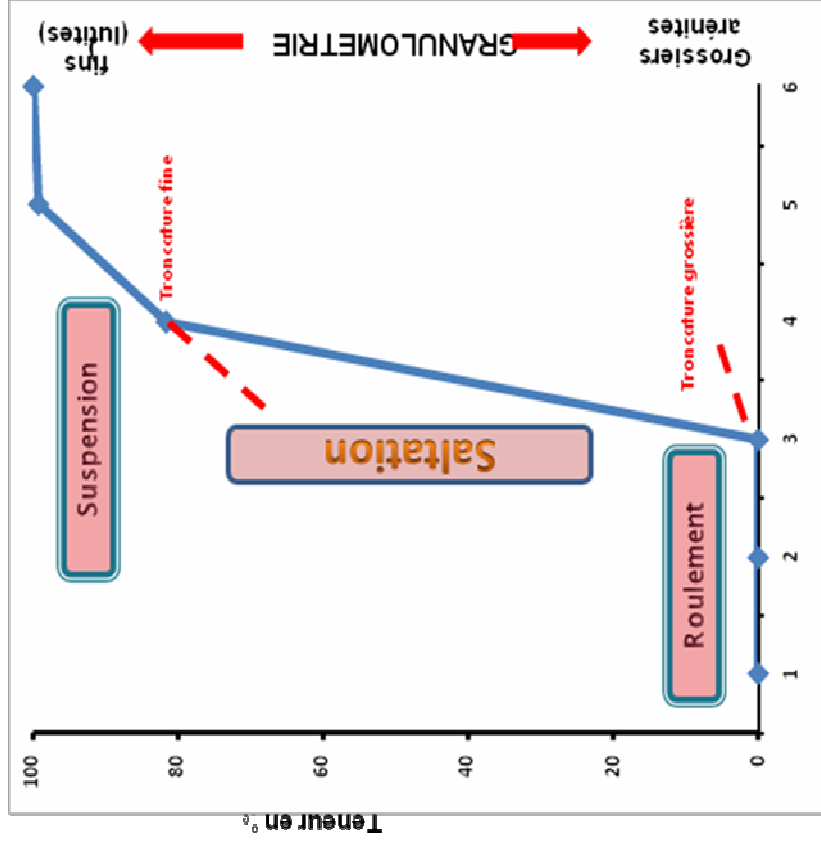
Les résultats obtenus sont assez homogènes. Les courbes granulométriques en coordonnées log- probabilité se décomposent en trois segments, ce qui signifie que trois populations de grain existent dans le matériel sableux analysé, reflétant un mode de transport particulier en fonction de la taille des grains de sables.

On remarque que c'est le mode de transport par saltation qui domine l'ensemble des cas, et affecte 98% des grains.

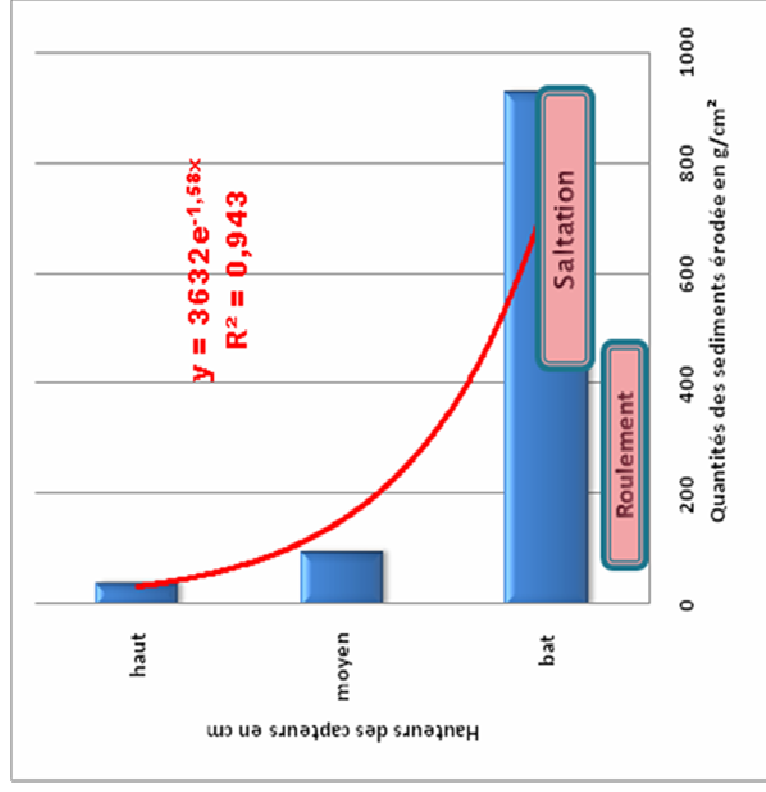
Le roulement ou plutôt la translation, sous l'effet de bombardement des grains en saltation (figure 23) et la suspension sont faiblement exprimés et lorsqu'ils existent, ils n'affectent qu'un nombre réduit des grains.

# Processus de la dynamique éolienne

Fig. 23



Test de Vischer



l'échantillonneur BSNE Standard (Frayer ,1986)

### 3.4. Processus de Dépôt :

Les travaux de *FREIDMEN, 1961* ont permis d'établir une relation entre la distribution granulométrique et les conditions de dépôt sableux.

Les représentations graphiques conjuguant les divers indices granulométriques du matériel sableux du système dunaire de Souss donnent des résultats assez homogènes. Elles renforcent l'omniprésence du caractère fluvatile et l'influence marine. Aussi, mettent-elles en évidence une affinité entre le matériel sableux fluvatile et dunaire (figure 24).

Ces diagrammes ont permis de mettre en évidence l'action des trois dynamiques : marine, fluvatile et éolienne, qui contrôlent l'environnement sédimentaire du système dunaire de Souss, avec une nette dominance fluvatile et une influence marine alors qu'il s'agit d'un dépôt essentiellement dunaire, d'où la proximité de l'embouchure de l'oued Souss constitue la source d'approvisionnement du système en sédiments sableux.



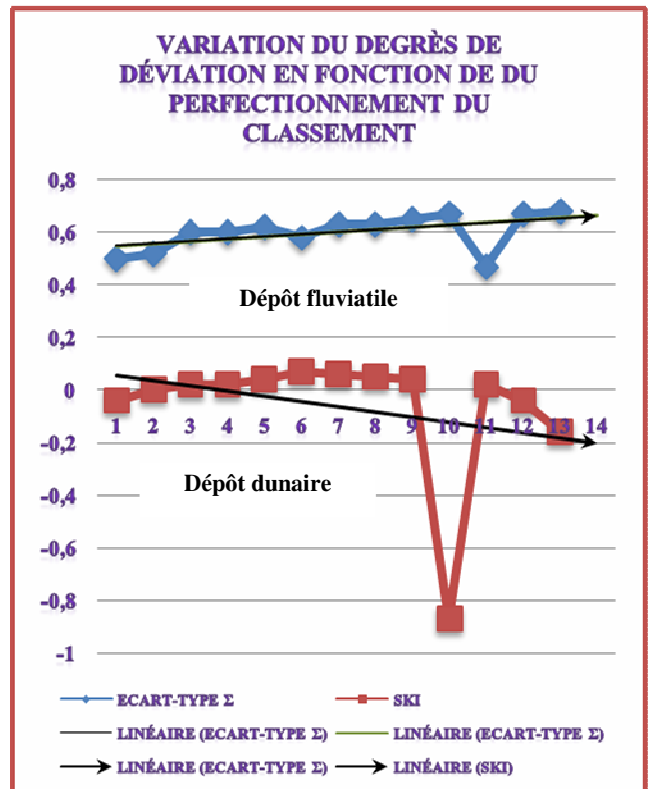
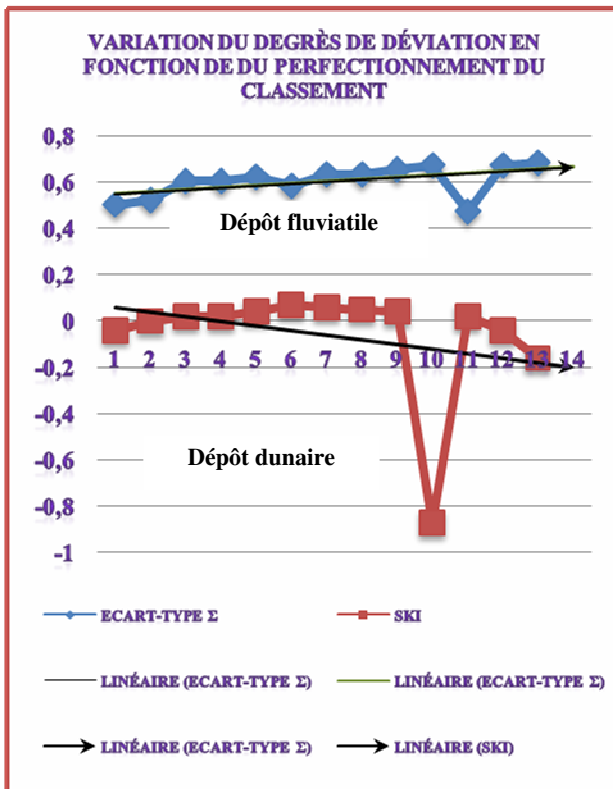
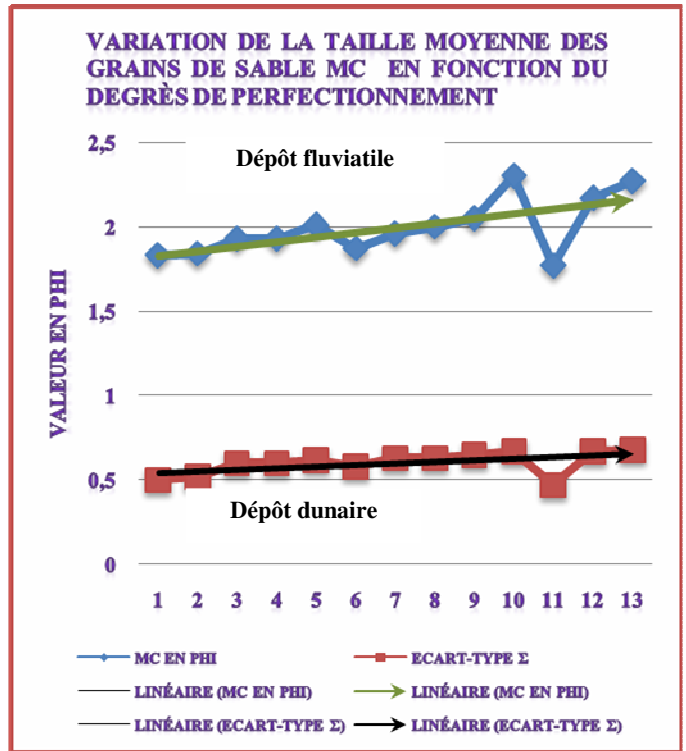
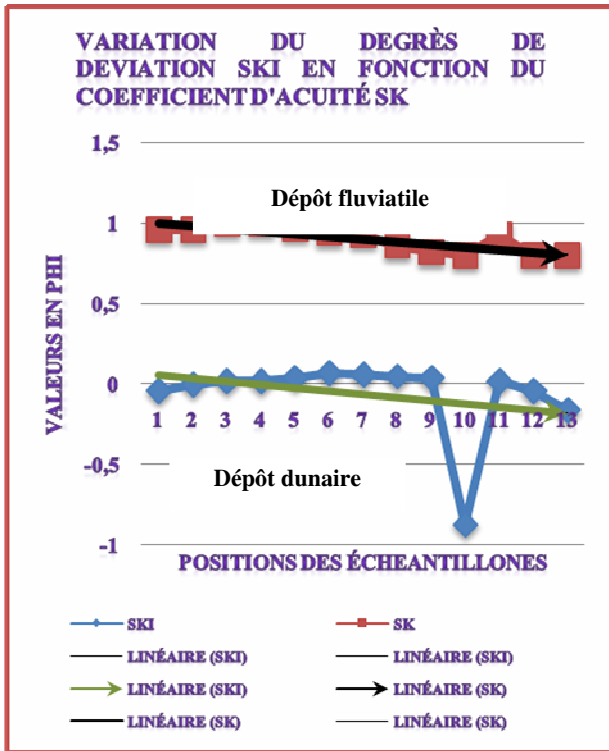


Fig. 24 : Diagramme de Friedman : Conjugaison des indices granulométriques.

## Discussion :

Le système dunaire au Sud de l'embouchure de l'Oued Souss se situe dans un environnement sédimentaire complexe, où il existe une interaction entre trois dynamiques : fluviatile, marine et éolienne. L'enchaînement des événements sera précisé par la morphoscopie, afin de trouver les phases les plus marquées sur les grains de quartz.

### 4. Morphoscopie :

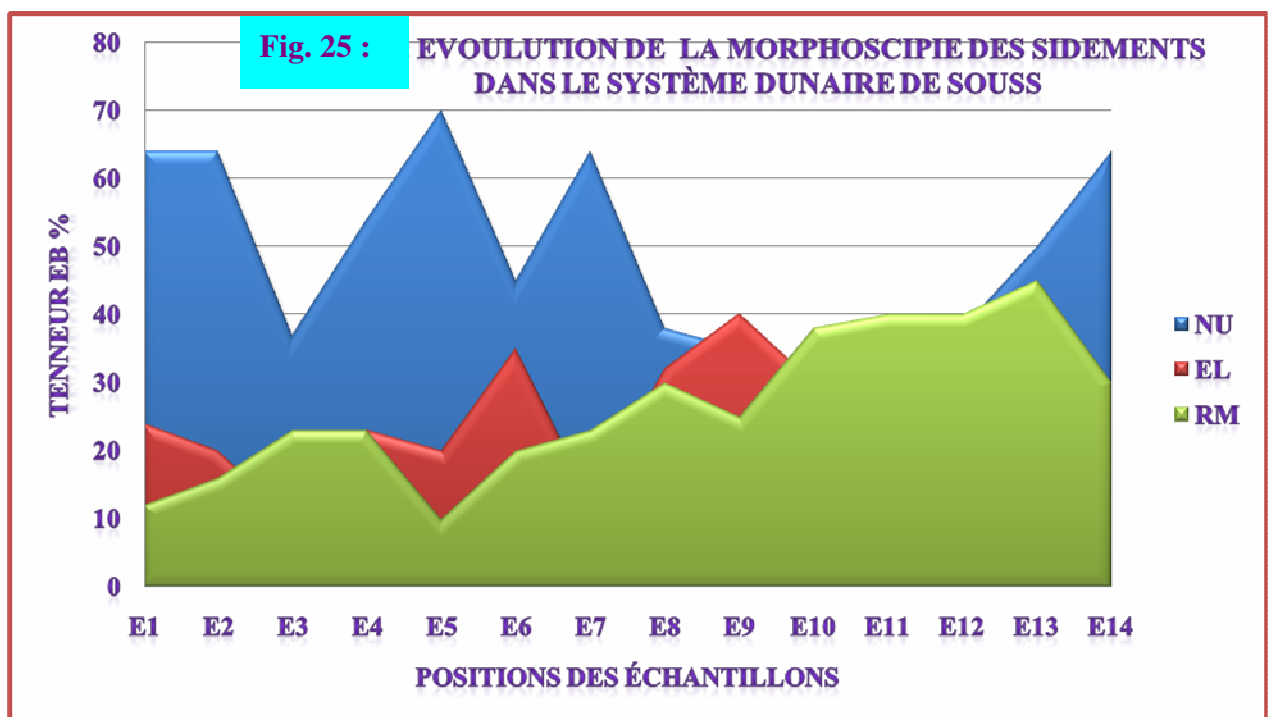
Les résultats morphoscopiques des grains de quartz (figure 26) montrent que le matériel sableux du système dunaire de Souss, renferme les trois types de grains : Les Non Usés (NU), les Emoussés Luisants (EL) et les Ronds Mats (RM) en pourcentage variable tout au long du transect.

Le pourcentage des (RM) croît de 10 à 40%, et celui des (EL) évolue inversement et diminue en passant de 24% à 6%. Alors que celui des (NU) reste très élevé >50%, bien qu'il enregistre une légère diminution vers l'Est.

La tendance générale de l'évolution morphoscopique au sein du transect (figure 26) montre une augmentation de la teneur des (RM) et une diminution de celles des (NU) et des (EL) vers sa partie orientale.

Du point de vue dynamique, la forte teneur des (NU) s'explique par la dominance de l'action fluviatile qui alimente le système lors des périodes de crues. Le pourcentage des (EL) qui est compris entre (20 et 30 %) qui selon VATAN, 1967 montre que l'usure par la mer et extrêmement probable.

Enfin, l'évolution des (RM) met en évidence la part de l'action éolienne et montre que le degré d'éolisation des grains est lié à la courte distance de transport, qui sépare la source d'ensablement du champ de la dynamique éolienne.



## Conclusion :

Le matériel sableux au niveau du système dunaire de Souss est un sable moyen  $M_c = 1,88\phi$  bien à assez bien classe. Il renferme les trois types de grains de quartz : les (NU), les (EL) et les (RM) en pourcentages variables. Et présente une teneur élevée en carbonate 47%  $CaCO_3$  et un faible pourcentage en matière organique, limon et argile, de point de vue dynamique, que le transport éolien se fait essentiellement par saltation et affecte 98% des grains de sable, alors que le dépôt est dunaire. Le processus de la déflation a été bien enregistré au niveau de la fraction fine et l'usure des bioclastes qui ont montré un tri par degré d'amenuisement et un tri par vannage des tests réduit à l'état de poussière « loess » vers la périphérie du système.

En conséquence, la sédimentologie a permis de vérifier que le matériel sableux du système dunaire du Souss est véhiculé par les crues de l'Oued Souss jusqu'à l'embouchure, capté par la dynamique marine qui sous l'action, de la houle et les courants qui lui sont associés l'entraîne vers le Sud par une dérive littorale N-S, avant d'être repris et remanié par la dynamique éolienne qui l'évacue vers l'Est à l'intérieur du continent sous formes d'édifices dunaires donnant la forme actuelle du système.

La formation, la géodynamique de ces édifices, notamment les barkhanes, ainsi que l'évolution morphologique du système fera l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre III:

# **CARTOGRAPHIE EVOLUTIVE**

## INTRODUCTION :

Il est actuellement admis que la dynamique éolienne exige pour son approche, un emboîtement d'échelles de travail pouvant partir d'une échelle synoptique pour monter à des échelles plus grandes. Il s'est en effet avéré que les trajectoires éoliennes démarrent souvent bien loin des frontières des zones étudiées et il est alors nécessaire de les suivre. Un édifice éolien ne peut, en effet, être saisi, dans son double contenu topographique et dynamique que s'il est examiné, successivement à diverses échelles. Une approche locale ou monographique reste à elle seule insuffisante et ne permet pas une bonne analyse de la dynamique éolienne. Il faut s'intéresser aux régions situées en amont-vent et aval-vent, aussi loin qu'il est nécessaire et qu'il est possible de le faire.

### I. NOTION DU SYSTEME GLOBAL D'ACTION EOLIENNE (S. G. A. E)

Dans une étude visant la compréhension de la dynamique éolienne et la lutte contre ses effets, on ne peut se suffire d'étudier que le secteur où des manifestations de cette dynamique, est visible comme les aires de dépôts. Il faut essayer de placer la zone d'étude le long des trajectoires d'apport du matériel sableux. La seule étude du dépôt ne permet pas de déterminer les sources de sable, la direction et le sens de son cheminement, son mode de transport (en masse ou grain par grain), paramètres indispensables à toute étude portant sur des phénomènes géodynamiques tels ceux de l'ensablement et de la désertification.

L'absence même d'un bassin versant pour la dynamique éolienne conduit à la création d'un nouveau concept en 1992 par *MAINGUET. M.* Il s'agit de celui de Système Global d'Action Eolienne (S. G. A. E). Ce concept remédie bien à la notion de bassin versant inexistante pour le vent. Selon *MAINGUET. M, 1992* ce nouveau concept englobe plusieurs aires :

- Une aire source ou aire de déflation où le vent prend en charge des particules selon sa compétence. Le transport peut se faire d'un coup ou par relais. Les sources de sable peuvent être diverses (marines, fluviales, glaciaire,...etc.)

- Une aire de transport. Le long de laquelle se font des transferts de matériel ou non. Plusieurs études ont montré que le vent transporteur de sable s'organise comme l'eau, en chenaux d'écoulements hiérarchisés ce qui justifie largement le fait que certains auteurs parlent de rivières de sable (*CLOS-ARCEDUC. A, 1965 et OULEHRI.T, 1992*). Dans ces aires, la rugosité peut s'accroître et atteindre un seuil tel que l'aire devient localement une aire de dépôt. L'inverse est également vrai.
- Une aire d'accumulation qui termine le (S. G. A. E) mais qui existe aussi à chaque fois que le vent est freinée par un obstacle. Ainsi, face à une contre pente suffisante pour annuler sa composante verticale, le vent dépose son sable sur la pente si celle ci est faible. Si la pente est forte, le dépôt a lieu sous forme de dune d'écho à une certaine distance de l'obstacle. Cette dune d'écho augmente de volume et devient une dune remontante qui s'appuie sur le versant, franchit son sommet et en s'allongeant sur la face sous le vent, forme une dune tombante qui en grandissant se transforme en dune linéaire. Les deux types d'accumulation sur de vastes superficies sont les champs de dunes et les nappages sableux. Ces derniers, constituent la forme initiale de toutes dunes. Ils se produisent partout où la vitesse du vent transporteur de sable diminue soit en raison du relief, soit en raison d'obstacles, soit encore en raison de l'augmentation de la rugosité de la surface du sol. Dès que les nappages sont formés, ils ont naturellement tendance à croître en raison du simple fait que les particules en saltation rebondissent moins bien sur une surface couverte de sable que sur une surface plus dure (sol ou reg). Certains nappages, paraissent ne pas être des formes originelles de dépôt mais un stade où les dépôts initiaux ont déjà subi un aplanissement lors de fluctuations climatiques (durée importante d'action)

Il faut dire que le danger est perçu par les hommes uniquement dans les zones d'accumulation, lorsque le sable envahit les aires de leurs activités. Or le danger est tout aussi important dans les aires de déflation et aires de transport. Il n'y a pas de frontières entre toutes ces aires et une aire d'accumulation peut devenir à son tour une aire source. Il est utile de prendre conscience que ces trois types d'aires sont liés les unes aux autres

et qu'il faut s'intéresser au système dans sa totalité et diagnostiquer dans quelle unité se trouve le secteur à protéger. Le S. G. A. E possède un amont et un aval dont la connaissance est indispensable en matière de lutte contre l'érosion éolienne.

A cette notion de (S. G. A.E), *MINGUET, 1983-1984* associe celle de bilan sédimentaire excédentaire, équilibré ou déficitaire. Les aires de dépôts sont à bilan excédentaire. Les aires de transport ont un bilan équilibré et les aires de départ un bilan déficitaire. Selon cet auteur, à chaque stade budgétaire correspond un état de surface spécifique des nappes sableuses. Le budget positif d'un état de surface formé de dunes d'accumulation se marque par des chaînes transverses (Dunes dont l'allongement est transverses par rapport à la direction du vent dominant), des aklés (Accumulation dunaire constituée de langues rangées de sable disposées) barkhaniques et des ghourds (Grande dunes pyramidales à arêtes sinueuses qui sont due à des changements fréquents de la direction du vent) en semis.

Quand ce budget est négatif, les dunes sont des dunes d'érosion à couloirs interdunaires bien marqués. Les formes caractéristiques de cette état sont les chaînes ghourdiques (Alignement de pyramides coalescentes par leurs bras) et les chaînes longitudinales.

### **1. Le choix et la présentation du site :**

Trois principaux éléments ayant conduit au choix du site. D'une part, la position de zone au sud de l'embouchure de l'Oued Souss se trouve menacée par l'ensablement et la présence des vents « dominants » de directions différentes. D'autre part cette zone a été le siège d'un grand dispositif de lutte contre l'ensablement et son évaluation suscite un grand intérêt. Par ailleurs, le site va constituer le support des expérimentations concernant :

- ✓ La cartographie évolutive de l'ensablement ;
- ✓ L'étude sédimentologique ;
- ✓ L'étude du déplacement sableux.

## **1.1. La localisation :**

Le site expérimental se situe au sud de l'embouchure de l'Oued Souss, et s'étend sur une superficie d'environ 2700 hectares. Il constitue la limite Nord d'une vaste formation dunaire, constituée essentiellement de dunes : transversales, paraboliques et barkhanes.

## **1.2. La topographie :**

L'analyse de la carte topographique en 1/50.000<sup>ème</sup>, (figure, 27) montre que l'aspect général du relief est dominé par une série de dunes vives allongées et orientée NNE-SSW parallèles à la ligne du rivage dont la hauteur moyenne de 30m, et atteint par endroit 70m. Les pentes sont relativement faibles du Nord vers le Sud avec une moyenne de 2,5%.

En conséquence, une topographie quasi-plane constitue un facteur favorisant le déplacement dunaire notamment celui des barkhanes qui sont la forme d'ensablement la plus dangereuse.

### **1.2.1. La pédologie :**

Les sols du site appartiennent aux catégories des sols peu évolués et des calcomagnésimorphes (sols bruns calcaires).

### **1.2.2. Les dunes vives :**

Elles se sont formées à partir des apports éoliens et marins. Leur évolution est liée au climat aride actuel et à l'érosion éolienne qui les rajeunit par de nouveaux apports ou décapage du sol (*ERRABIH, 1987*).

### **1.2.3. Les sols bruns calcaires sableux :**

Ce sont des sols autochtones du site. On les rencontre dans les espaces interdunaires et les espaces non couverts par le sable. Ils constituent les sols, supports des dunes, leur texture est généralement légère à l'élément sableux dominant, mais la teneur en argile n'est pas négligeable (*ERRABIH, 1987*). Ces sols sont presque aussi pauvres en matière organique que les sols peu évolués (*WATTEUW, 1964*).



## 2. Matériel et Méthodes :

### 2.1. Investigation de la photo-aérienne :

La photographie aérienne utilisée est de type panchromatique de trois missions différentes 1969, 1986 et 1990. Elle est à l'échelle du 1/15.000<sup>ème</sup>, 1/20.000<sup>ème</sup> et 1/40.000<sup>ème</sup>.

Le site a été situé sur la carte topographique au 1/10.000<sup>ème</sup>. La connaissance des infrastructures socio-économiques (routes, pistes, boisement, champs des cultures, parcours, agglomérations urbaines,...) ressort sur les photographie et le plan topographique

#### \* Assemblée des missions de la couverture aériennes :

Missions	Bande N°	Photo N°	Nombre/Bande	Orientation
1969	AP <sub>3</sub>	5381 à 5397	17	Sud-Nord
	AP <sub>4</sub>	5414 à 5420	7	Nord-Sud
	AP <sub>5</sub>	5481 à 5496	16	Sud-Nord
	AP <sub>6</sub>	5525 à 5539	15	Nord-Sud
	AP <sub>7</sub>	5583 à 5597	15	Sud-Nord
1986	191	2 à 5	4	Sud-Nord
	192	2 à 5	4	SO-NE
	193	2 à 6	5	SO-NE
1990	31	1 à 3	3	Ouest-Est
	32	1 à 3*	2	Ouest-Est

Photo aérienne couvrant le site a été agrandie de l'échelle 1/40.000<sup>ème</sup> à 1/10.000<sup>ème</sup> (*Service de la topographie de Rabat*).

#### 2.1.1. Préparation de la photo aérienne :

L'échelle varie sur la même photo si le terrain comporte des différences d'altitude importantes. Dans la zone d'étude les variations sont peu significatives sur l'aire couverte par la photo aérienne, et par conséquent, l'échelle peut être considérée comme sensiblement uniforme. Toutefois, une comparaison de plusieurs longueurs entre différents points du plan topographique au 1/10.000<sup>ème</sup> et leurs mesures sur la photo aérienne, permet de calculer des échelles moyennes en faisant le rapport de la longueur de la photo sur celle de la carte. Les échelles trouvées sont proches de celles indiquées sur

ces trois missions: 1969, 1986, 1990 qui sont respectivement 1/15.000<sup>ème</sup>, 1/20.000<sup>ème</sup> et 1/40.000<sup>ème</sup>. Les recouvrements tant longitudinaux que latéraux ont été déterminés pour chaque couple de photos, sous stéréoscope. La délimitation des surfaces de confiance a constitué à délimiter la partie centrale de la photo. Cette portion de l'image présente le maximum de différences d'échelle, qui s'accroît généralement vers les bords par un déplacement des objets.

Lorsqu'il y a un manque de photo aériennes pour le recouvrement latéral on dispose d'un recouvrement longitudinal élevé (65%). La délimitation de la surface de confiance est élargie, ce qui conduit à délimiter cette surface sur le tiers central de la photo.

### **2.1.2. Photo-interprétation préliminaire :**

Les connaissances acquises préalablement sur le terrain et la vision stéréoscopique des limites ont été délimitées à partir de la photo aérienne de la zone. Leur différenciation s'est faite à la base de la variation de la tonalité, qui est fonction du type de végétation, sa densité et la nature de l'occupation du sol.

### **2.1.3. Stratification :**

Sur la base de critère de stratification défini ci-dessus, treize unités ont été mises en évidence :

#### **✓ Dunes Vives :**

- ✎ Les dunes transversales : Ce sont des dunes vives qui se développent sur la zone occidentale du système dunaire, selon une bande parallèle à la ligne de rivage, orientées NNE-SSW.
- ✎ Les dunes paraboliques : Ce sont des dunes vives, qui présentent leur face convexe vers le Nord-Est, et leur corps central montre un déplacement vers le sud. Elles affleurent sur la colline. Ces dunes paraboliques constituent une forme de transition entre les dunes transversales et les barkhanes. Ce sont des indicateurs par excellence, d'un environnement d'érosion éolienne (déflation).

- ✎ Les dunes Barkhaniques : Ces dunes constituent l'extrémité orientale des dunes vives. Les ailes de ces barkhanes sont pointées vers l'Est. Elles évoluent du Nord vers le Sud en dunes isolées à des dunes en colonies formant des aklés et des cordons barkhaniques.

Ces formes reflètent un environnement de dépôt plus qu'un environnement de transport, ceci est expliqué par le rôle important de la topographie locale et la végétation qui obligent ces barkhanes à s'agglomérer et à constituer ainsi ces formes de stocks sableux.

✓ **Dunes stabilisées mécaniquement et/ou biologiquement:**

Sur l'autre versant de colline où le relief est presque plat et étendu, on note une extension très importante des barkhanes qui peuvent atteindre la route nationale d'Ait Melloul, bien que ces dunes soient actuellement fixées mécaniquement et/ou biologiquement.

1-les dunes stabilisées uniquement par la fixation mécanique,

2-Les dunes stabilisées par fixation biologique :

-Fixation biologique à base d'Acacia,

-Fixation biologique à base d'Eucalyptus,

-Fixation biologique ancienne à base d'Eucalyptus,

3-Les espaces interdunaires,

4-Les zones marécageuses,

5-L'estuaire de l'oued Souss,

6-La steppe (terrain naturel),

7-Les champs de cultures irriguées traditionnellement,

8-Les champs de cultures en bour,

9-Les voies de communications,

10-Les carrières,

11-La Réserve Royal de Chasse,

12-Les pistes.

## **2.2. Cartographie :**

### **2.2.1. Transfert de la stratification :**

Une carte d'occupation du sol traduit une grande partie de l'information contenue dans les photographies aériennes, et permet une vision globale du site à une date précise. Aussi, les unités identifiées sur les photos font l'objet d'un report sur un fond topographique.

#### **a/ Fond topographique :**

Il est établi au 1/10.000<sup>ème</sup> sur calque. Le fond topographique a relevé une remarque importante concernant l'échelle qui est plus grande que celle de la couverture aérienne 1/15.000<sup>ème</sup>, 1/10.000<sup>ème</sup> et 1/40.000<sup>ème</sup>. Ce choix a été motivé pour bien visualiser le site, alors qu'une échelle plus petite entraînera une certaine perte d'informations, notamment pour les plus petites unités (figure 27).

#### **b/ Transfert :**

En raison des contraintes posées par le transfert mécanique des informations, on a opté pour la méthode du transfert manuel. Cette méthode se base sur le traçage de deux grilles de carré avec des échelles correspondant, respectivement au plan d'occupation et aux photo-aériennes. Une fois les limites des unités sont identifiées sur les grilles des photo-aériennes, elles seront reportées sur la grille du plan d'occupation.

## Profils topographiques

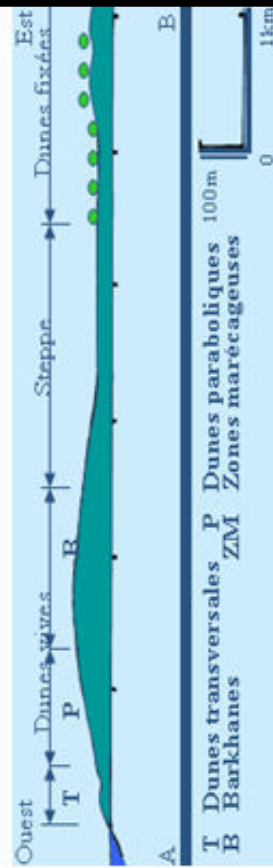
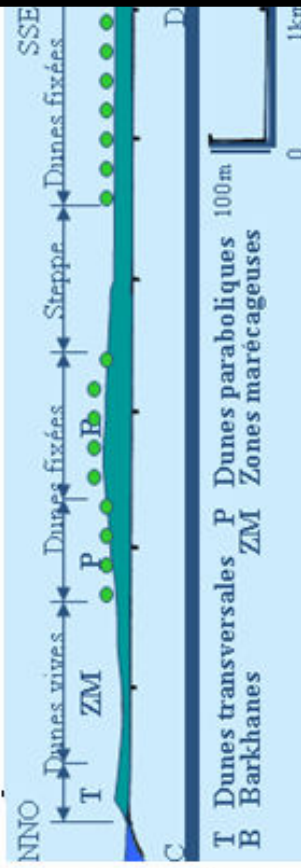
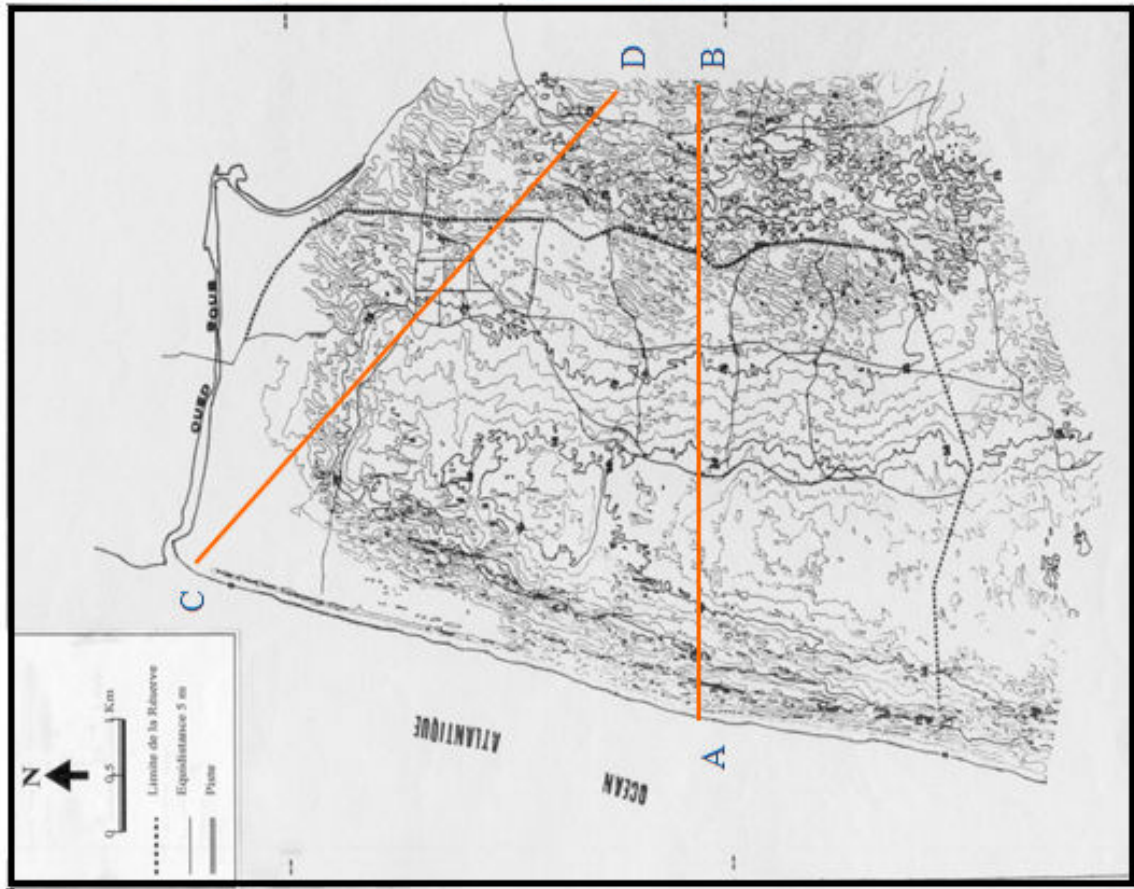


Fig. 26 : Profils topographiques pour la réalisation des cartes d'occupations des

### 2.2.2. Dessin de la carte :

À partir des reports des limites des unités, résulte une carte qui contient les détails liés au fond topographique : pistes, routes, champs de cultures...etc.

### 3. Résultats et discussions :

La comparaison des cartes d'occupation du sol correspondant aux années 1969, 1986 et 1990, permet un suivi de l'évolution morphologique du système dunaire étalée sur 21 ans.

Les trois cartes obtenues (figures 28, 29 et 30) montrent que le système dunaire de Souss est formé de trois bandes de dunes transversales, paraboliques et barkhanes sous forme de courants sableux orientées NNE-SSW parallèles à la ligne de rivage.

La carte (figure ,31) montre que le front du système dunaire de Sous migre vers l'est selon une vitesse annuelle de 10m/an menaçant la forêt d'Adimine ; les champs de culture, les espaces pastoraux.

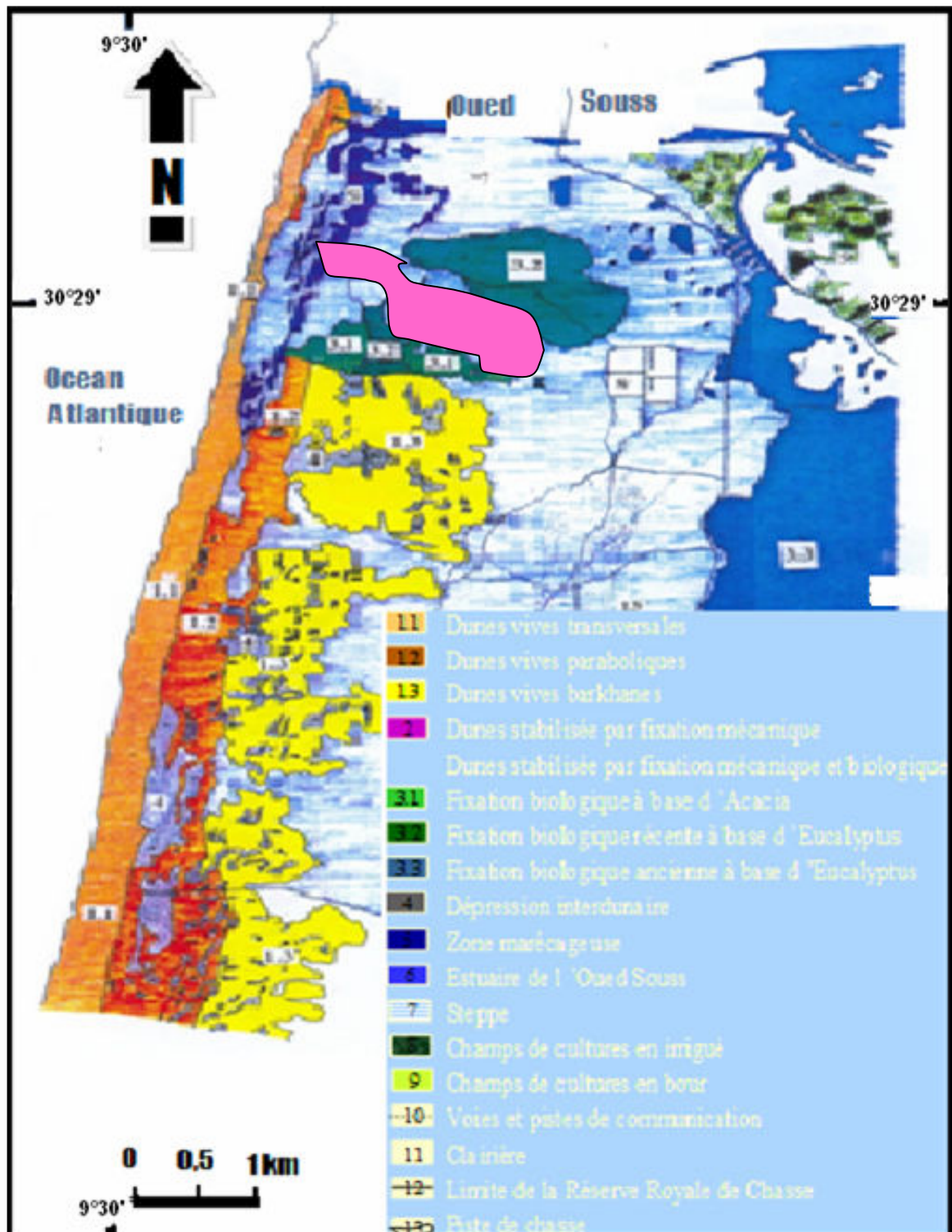


Fig.27 : Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss de l'année 1969

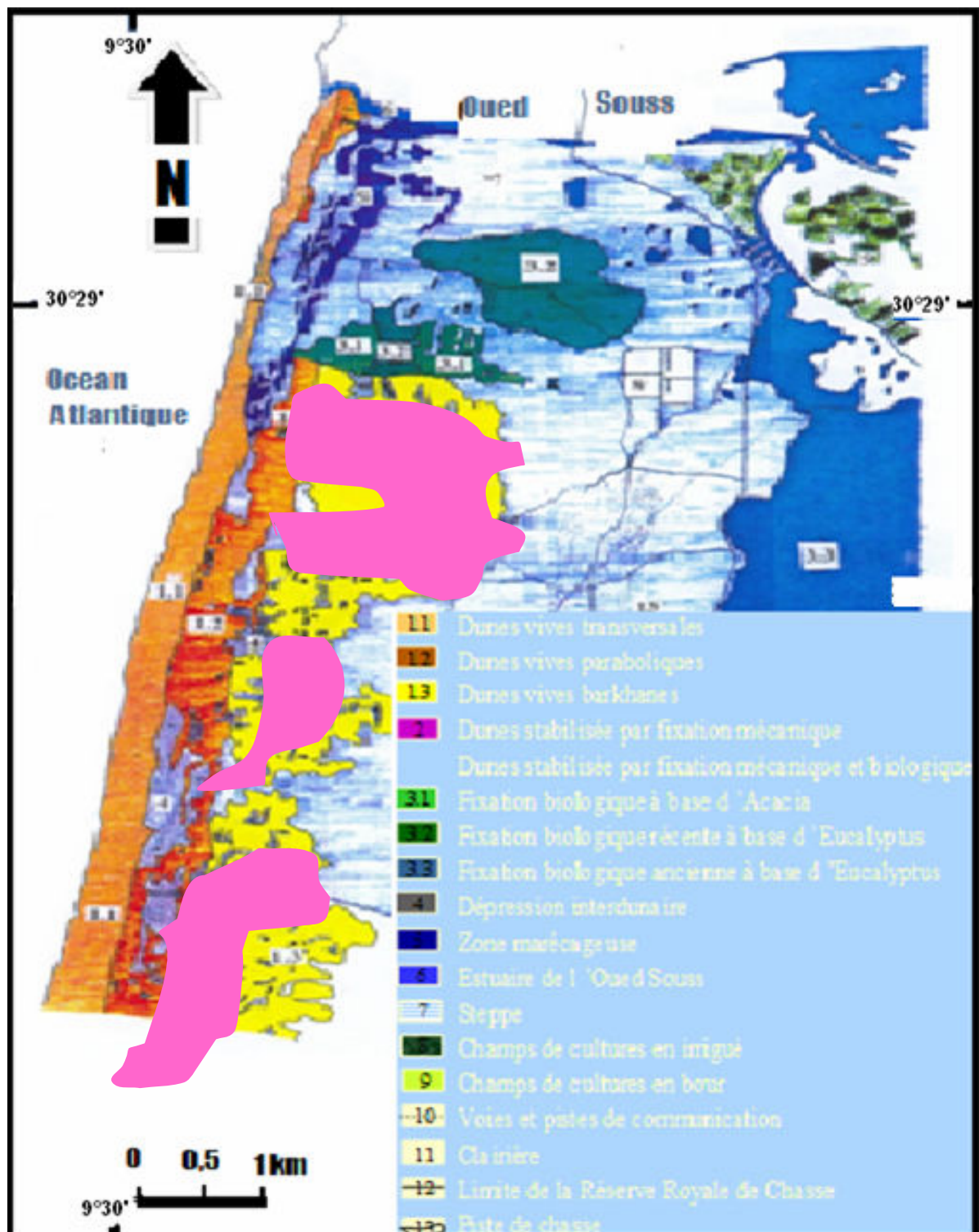


Fig.28 : Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss de l'année 1986



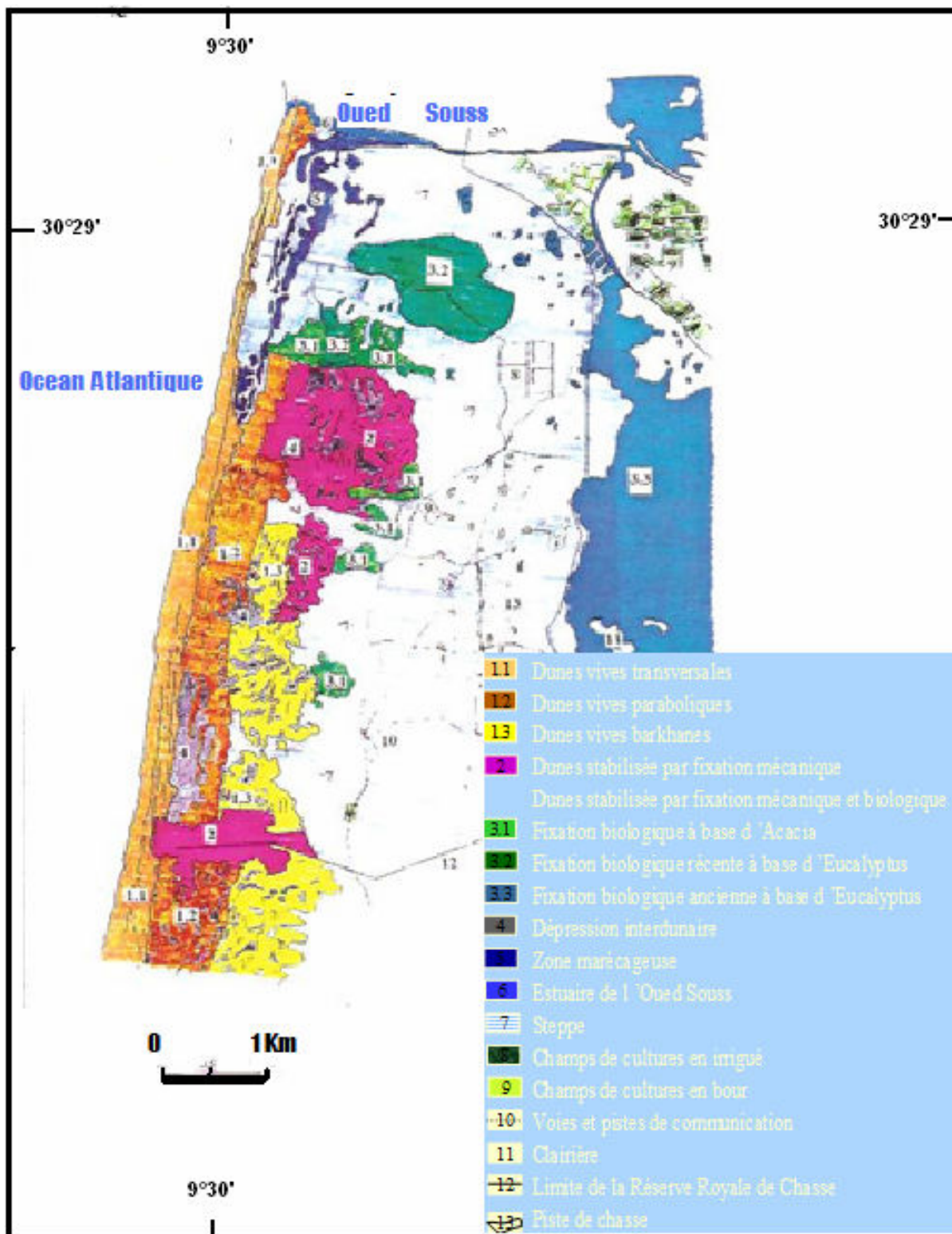


Fig. 29 : Carte d'occupation des sols du système dunaire de Souss de l'année 1990

## Avancées du front dunaire

Avancée du front dunaire 1969

Avancée du front dunaire 1986

Avancée du front dunaire de 1990

Direction résultante de migration du système dunaire

## Vitesse de migration des dunes

- Transversales : 1 à 2 m/an
- Paraboliques : 2 à 4 m/an
- Barkhanes : 5 à 10 m/an

**Déplacement Annuel du Système dunaire = 10 m/An**

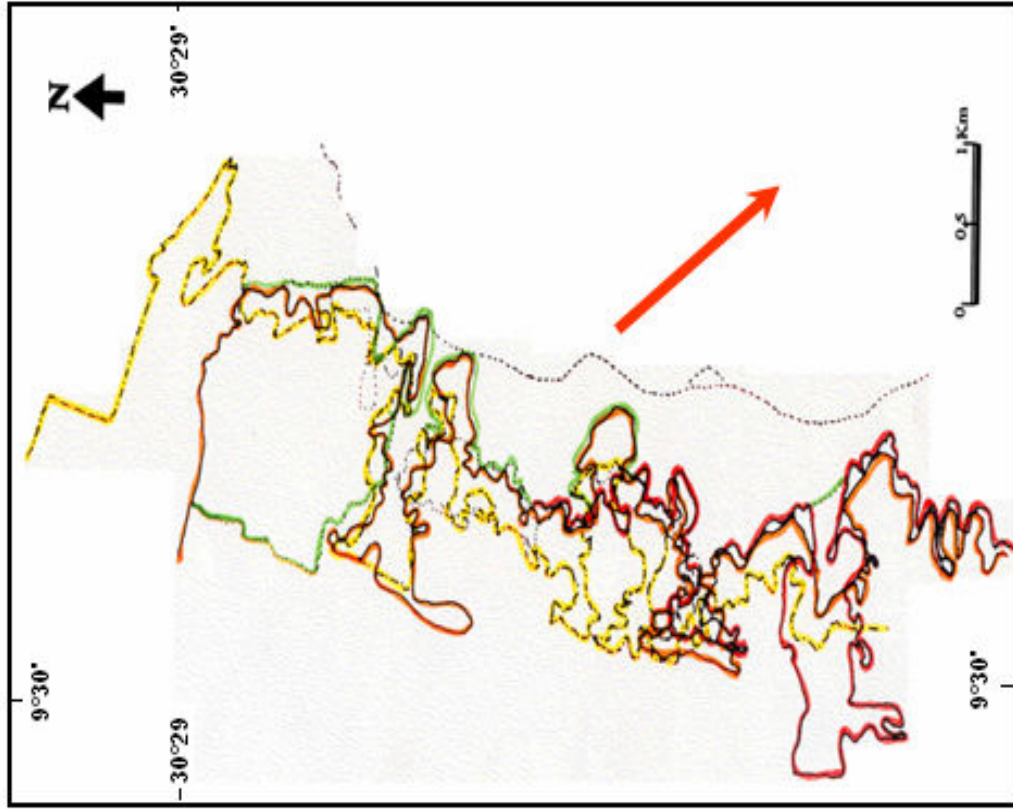


Fig. 30 : Carte de l'avancée du front du système dunaire de Souss entre 1969 et 1992.

## II. NOTION DU « FLEUVE DE SABLE »

### 1. Définition :

Nous écartons le terme d' "erg" tel qu'il a été défini par *MAINGUET et CALLOT, 1978* : « Un erg est une concentration étendue d'édifices sableux, de formes homogènes, jointives ou non, ou juxtaposées, selon des degrés variables d'organisation et sur un substrat sableux couvert ou non d'un pavage de déflation » et nous adoptons celui de « Fleuve de Sable » proposé par *CLOS-ARCEDUC, 1965*: « Ce sont des étendues de sables, qui supposent une source, un cours avec ses berges et un chenal ».

### 2. Orientation :

Le « fleuve de sable » au Sud de l'embouchure de l'oued Souss, est orienté NNE-SSW, parallèle à la côte sur les premiers kilomètres de son parcours .Quand le littoral devient Nord-Sud, le « fleuve de sable » épouse cette orientation, avant de reprendre sa direction initiale dans les derniers kilomètres.

### 3. Forme générale :

La forme générale allongée, connaît de légères variations de largeur. En effet, à la hauteur de la vallée de Souss : Les crues successives de l'Oued Souss, repoussent la bordure orientale du « fleuve de sable » sur la rive gauche de la vallée. L'envahissement par le sable est lié à la fréquence des crues. Plus vers le Sud, l'éloignement par rapport à la côte s'accompagne d'une baisse de largeur et le « fleuve de sable » devient plus filiforme.

#### 3.1. Dynamique du « Fleuve de Sable » :

Les principaux types dunaires qui composent le « fleuve de sable » sont : les transversales, les paraboliques et les barkhanes. Ces derniers sont les plus étudiés à cause de leur mobilité et leur vitesse de migration. C'est la forme la plus dangereuse en matière d'ensablement.

Une synthèse de nombreuses descriptions préconisées par divers auteurs, sera donnée en tenant compte des particularités de la région du Souss.

Les termes « amont » et « aval » situeront les phénomènes les uns par rapport aux autres, selon la direction du vent.

### 3.2. Géodynamique des Barkhanes :

La barkhane est la forme la plus marquante du système dunaire de Souss. Comprendre les conditions de sa genèse, constitue une des meilleures garanties pour le contrôle de cet édifice: un régime éolien monodirectionnel, une source de sable entre 0.125 mm et 0.350 mm, une topographie plane, un substrat cohérent ou composé de particules de taille supérieure à la compétence éolienne, sans couvert végétal ou très peu dense (figure 32).

**3.3. Morphologie et formation des barkhanes :** Les édifices barkhaniques sous leurs formes caractéristiques, peuvent être classés en cinq types unitaires dont la signification en liaison avec le processus de dynamique éolienne est différente.

Ces types sont : le dôme, le bouclier, le bouclier barkhanique, le dièdre barkhanique et la barkhane.

-Le dôme: C'est la première manifestation organisée d'un édifice sableux transverse au vent. Il a une forme circulaire et aplatie sans dissymétrie morphologique nette. Au fur et à mesure du dépôt de sable, le sommet émerge de la sous-couche laminaire dans la couche turbulente : le dôme devient bouclier.

-Le bouclier : Cette forme embryonnaire de barkhane est formée dans les zones sans obstacle topographique. Les raisons de sa formation invoquées par *HERNANDEZ-PACHECO. P, 1946* supposent l'existence de "points morts" dans la masse d'air qui se déplace, qui deviennent un point de dépôt privilégié pour les grains de sables. En grandissant, cette accumulation courberait progressivement les filets d'air vers le haut et les côtés du monticule (*M. MAINGUET, 1983*).

L'accumulation des dépôts augmente la hauteur du bouclier jusqu'à ce qu'il se crée des remous sur la partie sous le vent et une concavité commence à se dessiner. C'est le début du bouclier barkhanique.

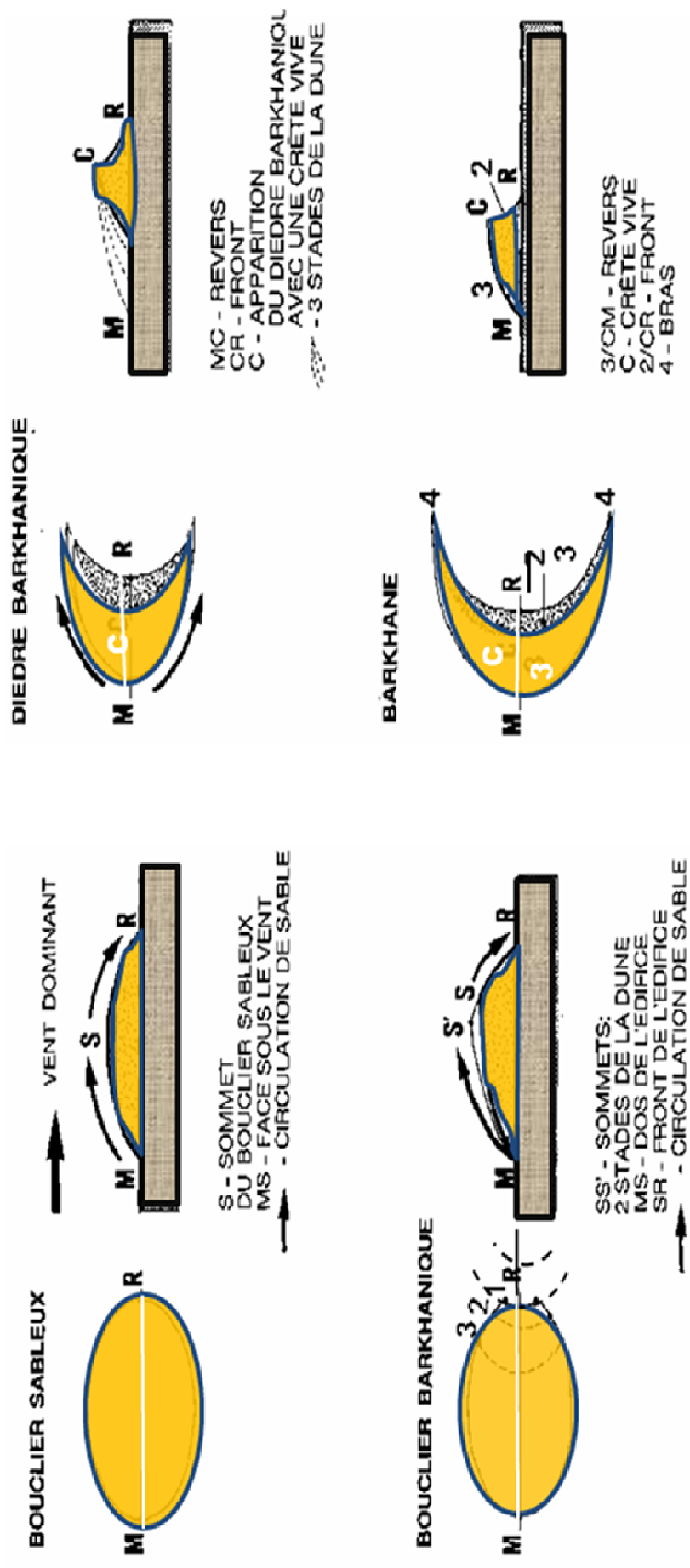
-Le bouclier barkhanique : La concavité formée sur le devant de la dune se développe par l'avancée latérale des sables formant deux cornes ou ailes. Il s'agit encore à ce stade d'une forme d'accumulation statique.

-Le dièdre barkhanique : L'éboulisation commence sur le front, et une arête apparaît entre ce dernier et le dos de la dune. Les tourbillons qui se forment sous le vent de la dune donnent naissance à des cornes qui s'allongent vers l'avant par apport de sable latéral. Ce stade de dièdre barkhanique se caractérise par l'existence d'un sommet et d'une ligne de crête distincte. Le dièdre barkhanique n'est plus immobile, il évolue non seulement par apport et départ de sable mais aussi par éboulement au niveau du front de l'édifice.

- La barkhane: L'arête qui sépare le front et le dos passe par le sommet de la dune. C'est la barkhane. Autour d'une barkhane, la circulation éolienne est très complexe: le vent se divise en deux branches latérales, auxquelles s'ajoute une circulation médiane; dans ces trois courants naissent des turbulences et des circulations de retour compliquées. Les bras de la barkhane migrent plus rapidement que le corps central et sont pointés dans le sens du vent. L'ouverture des bras est variable. Elle est de 150° en moyenne. La stratification oblique planaire domine et, en raison de la forme arquée de l'accumulation, la direction de l'inclinaison des lamines dans les bras est transverse au vent. Ce stade constitue le danger le plus grave au sud-est marocain (les barkhanes ne sont arrêtées ni par les palmiers ni par les habitations).

Les barkhanes peuvent être isolées ou disposées en "vols de canards" ou en ligne à ailes coalescentes, donnant les chaînes barkhaniques appelées aussi dunes transverses par *MCKEE, 1979*.

Fig. 31 : Processus d'accumulation et de progression des barkhanes



Formes statiques

Formes dynamiques

### 3.4. Les associations barkhaniques :

Ces associations dunaires sont liées à l'importance de l'approvisionnement sableux.

Situées dans la partie orientale du système dunaire de Souss, les barkhanes se réunissent pour donner des formes complexes comme le « vol de canard ». Ce dernier résulte de l'union des barkhanes les unes aux autres par allongement de leurs ailes droites, formant un « elb » (pluriel « alab »). La plus part des « alb » formés s'orientent en direction moyenne 20°N et se situent sur le bord ouest du « vol de canard ». Une barkhane en amont allonge son aile droite vers l'aile gauche de la barkhane en aval. La multiplication de ces contacts forme un « slik » (pluriel « slouk »). Les « Slouk » formés s'orientent en direction 45°N et sont séparés par des couloirs interdunaires.

### 3.5. Le Cordon barkhanoïde :

C'est un ensemble de barkhanes qui mettent en communs leurs ailes qui s'alignent presque perpendiculairement à la direction du déplacement. Plusieurs cordons peuvent se relier. Quand l'apport des sables est maximum, le système dunaire se transforme en « aklé ».

### Conclusion :

La classification des édifices sableux, leurs orientations, leurs associations et leurs géodynamiques ainsi que leurs positions au sein du « fleuve du sable », permet de classer les surfaces ensablées du système dunaire de Souss selon le déplacement et le stock sableux qui évoluent respectivement de l'Oued vers l'Est et du NNE vers le SSO

Source : Embouchure de l'oued Souss

		<i>Evolution Transport</i>		
		Ouest		Est
		Rive Droite	Chenal	Rive gauche
<i>Evolution du Stock Sableux</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Surface à dunes transversales isolées.</li> <li>➤ Surface à dunes transversales coalescentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Surface à dunes paraboliques isolées</li> <li>➤ Surface à dunes paraboliques coalescentes</li> <li>➤ Changement de direction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Surface à barkhanes isolés</li> <li>➤ Surface à barkhanes (alb) associées 20°N</li> <li>➤ Surface à cordons barkhanoïdes 45°N « Aklé »</li> </ul>
	<i>Sud</i>			

Tableau VII: Evolution du Stock et déplacement sableux au sein du « Fleuve de sable » de Souss.

L'analyse du tableau VII fait ressortir les deux principaux paramètres qui interviennent dans la genèse et l'avancée des sables au niveau du système dunaire de Souss :

- ✓ La variabilité directionnelle de vents efficaces et les quantités de sables apportées.
- ✓ De point de vue dynamique les transports les moins importants se font sur la rive gauche du « fleuve de sable » où il n'y a pas de réapprovisionnement. Les plus grandes quantités se déplacent sur la rive droite. la limite se déplace vers l'Est suite à l'augmentation des apports du littoral.

L'influence de ces approvisionnements sur la granulométrie et la dynamique éolienne a été mise en évidence par la sédimentologie.



## 3<sup>ème</sup> Partie :

# **MODELISATION DES PROCESSUS DE LA DYNAMIQUE EOLIENNE**

# Chapitre I:

## **DEPLACEMENT POTENTIEL DES SABLES**

## INTRODUCTION:

Le déplacement sableux est le processus le plus dangereux de la dynamique éolienne. Son étude et sa compréhension revêtent un intérêt majeur dans l'évaluation du dispositif lutte mis en place contre le phénomène de l'ensablement.

La modélisation du déplacement potentiel des sables (D.P.S) a pour objectif de montrer qu'à partir d'une vitesse seuil, dictée par les lois physiques de la mécanique des fluides, on peut donner une orientation théorique proche de l'orientation réelle et de lever la contradiction apparente entre « le régime des vents » et le « régime des déplacement sableux ».

## I. METHODOLOGIE :

Proposé par *BAGNOLD, 1951*, amélioré par *FYBERGER, 1979* et simplifié par *OULHRI, 1992*, le déplacement potentiel des sables (D.P.S) se calculent à partir des données anémométriques brutes. La fonction qui permet de convertir la force du vent en mouvement de sable est celle donnée et simplifié par *BAGNOLD, 1951*.

Les « Roses des déplacements potentiels » issues de ce calcul seront comparées aux effets des vents sur le terrain.

Cette méthode propose des détails, autant que les données disponibles le permettent, est déduite des résultats théoriques trouvés et sera comparé à des estimations obtenues par la méthode expérimentale.

Enfin, les variations de la direction et de l'intensité du déplacement potentiel sableux (D.P.S) peuvent être situées dans le cycle climatique général de cette partie de l'hémisphère Nord.

### 1. Calcul du D.P.S :

Le calcul théorique s'appuie sur l'équation de *LETTAN, 1975* simplifiée par *FRYBERGER, 1979*.

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} * (\mathbf{v} * - \mathbf{v}_t) = \frac{C^* \sigma}{k} \quad (1)$$

Où :

- q : quantité de sable transporté ;
- g : Constante de gravité ;
- c : Constante empirique fondée sur la taille des grains ;
- d : Densité de l'air ;
- v\* : Vitesse du vent ;
- v<sub>t</sub> : Vitesse seuil (vitesse minimale d'arrachement du sable) ;

Avec : c'' = c' (d/ d\*)<sup>n</sup>.

Où :

- c' : Constante universelle pour le sable (=6,7);
- d : Diamètre des grains de sables transportés;
- d\* : 0,25 mm (diamètre standards);
- n : Constante empirique.

On constate que la quantité de sable transportée est une fonction des paramètres difficiles à déterminer avec exactitude hors du contexte expérimental qui a permis l'élaboration de ces formules (le diamètre des grains sable). Certains paramètres sont peu connus ou variables comme la rugosité des sols où les taux de recouvrement de la végétation, qui intervient sur la turbulence.

FRYBERGER (1979) propose une formule simplifiée, n'estimant plus la quantité de sable transportée, mais le potentiel d'arrachement des sables (q) :

$$q = v^{*2}(v^* - v_t) \quad (2)$$

- Avec : v\* : Vitesse du vent à 1 mètre de hauteur (en nœuds);  
v<sub>t</sub> : Vitesse seuil à 1 mètre de hauteur (en nœuds).

Ceci permet la comparaison dans le temps et dans l'espace des effets du vent de manière quantitative, en direction et en intensité.

On peut calculer avec cette formule un coefficient de transport potentiel de sable pour chaque vitesse et chaque direction portée sur les relevés météorologiques.

Pour une direction donnée, il faut multiplier la fréquence d'observation et chaque vitesse supérieure à la vitesse d'arrachement par le potentiel d'arrachement par la formule (2).

Pour rendre ce coefficient plus pratique et compatible avec la vitesse exprimée en m/s (*FRYBERGER, 1979*) divisée par 100 et il convient de la diviser par 12,5 (*CALLOT, 1987*).

Coefficient de transport des sables :

$$Q = \frac{q \cdot f}{12,5} \times 100 \quad (3)$$

## 2. Choix de la vitesse seuil d'arrachement :

Selon les auteurs ayant déjà étudié les déplacements potentiels éoliens, la vitesse d'arrachement ( $v_t$ ) varie entre 4m/s (vitesse du vent à 1m de hauteur).

D'autres auteurs admettent 4m/s comme vitesse seuil pour la mobilisation des grains de sable, mais considèrent 6m/s comme étant la vitesse à partir de laquelle le vent prend en charge le sable pour modifier la morphologie des dunes (*CAPO.REY, 1963; CLOS.ARDUE, 1969 et GLENINE, 1970*).

Il faut signaler que pour les formules déterminant  $v_t$ , la turbulence théorique et mécanique sont difficiles à intégrer dans les calculs. Elles ont été négligées bien qu'elles jouent un rôle important dans l'entraînement des particules.

## 3. La direction résultante (en °N) et son potentiel de migration (MR)

Elle exprime la direction de migration des 16 directions. C'est la somme vectorielle des capacités de transport des 16 directions.

Cette direction résultante et son potentiel de migration résultant, sont d'un grand intérêt puisqu'ils fournissent des informations précises sur la direction de migration des sables. Ils permettent aussi, leurs comparaisons avec les observations de terrain, photographie aérienne ...etc.

#### 4. La variable directionnelle (MR/CT) :

C'est le rapport des deux coefficients précédents (MR/CT). Elle exprime le caractère plus ou moins orienté des déplacements sableux.

Quand le rapport tend vers 1, la variabilité est faible et le vent a tendance à souffler dans la même direction engendrant des déplacements sur de longues distances.

Quant il tend vers 0, le vent a tendance à souffler dans toutes les directions et à remuer les sables sans qu'il résulte un déplacement important.

#### 5. Quantification des déplacements sableux :

Les coefficients de transport des sables par le vent s'expriment donc en « unité vectorielle ». Or, il faut passer d'un calcul théorique à une estimation en volume ou en masse du matériel transporté à travers une section donnée et pendant un temps donné. L'équivalent en m<sup>3</sup>/m/an d'un (CT) en « unité vectorielle » varie selon l'équation de quantification et des valeurs de paramètres utilisés (Coefficient de rugosité etc...). Mais cet équivalent est toujours proportionnel à la CT.

##### 5.1. Quantification en volume :

Un abaque en accord avec l'équation (1) de LETTAN permet de passer du (DPS) en unités vectorielles à une estimation Q convertie en masse.

##### 5.1.2. Calcul de la masse volumique de la dune et de sa porosité

###### Protocole :

Une masse (m) de sable occupe un volume dans un bêcher et à l'aide d'une éprouvette, on sature le sable en eau en rajoutant un volume (V), en rajoutant cette eau jusqu'à ce qu'elle affleure à la surface du sédiment.

###### Calcul :

Masse volumique de la dune :  $\rho = \frac{m}{V}$

Porosité : % porosité =  $\rho = \frac{m}{V} \times 100$

Densité du sable :  $d = \frac{\text{Masse d'1 cm}^3 \text{ de sable}}{\text{Masse d'1 cm}^3 \text{ d'eau (1g)}}$

$$d = \frac{\frac{m}{v - v}}{1}$$

$$d = \frac{m}{v - v}$$

Donc les (DPS) en volume (Q') peuvent être convertis en (DPS) en masse (Q'') en kg/m).

$Q'' = 1670 Q'$
-----------------

## 6. Rose des déplacements potentiels des sables :

Les roses de mobilisation des sables sont obtenues en calculant les coefficients de transport pour les 16 directions de la rose des vents.

Pour chaque direction, on fait la somme des coefficients de transport des sables calculés pour toutes les vitesses supérieures au seuil d'arrachement, la valeur obtenue est le module de la représentation vectorielle de la capacité de transport des sables dans la direction considérée.

Pour rendre comparables ces coefficients qui ont été calculés à partir des nombres différents d'observations, les fréquences d'observations doivent être rapportées en pourcentage.

La « rose des déplacements potentiels » est complétée par la résultante des transports potentiels des 16 directions.

## 7. La Capacité de Transport :

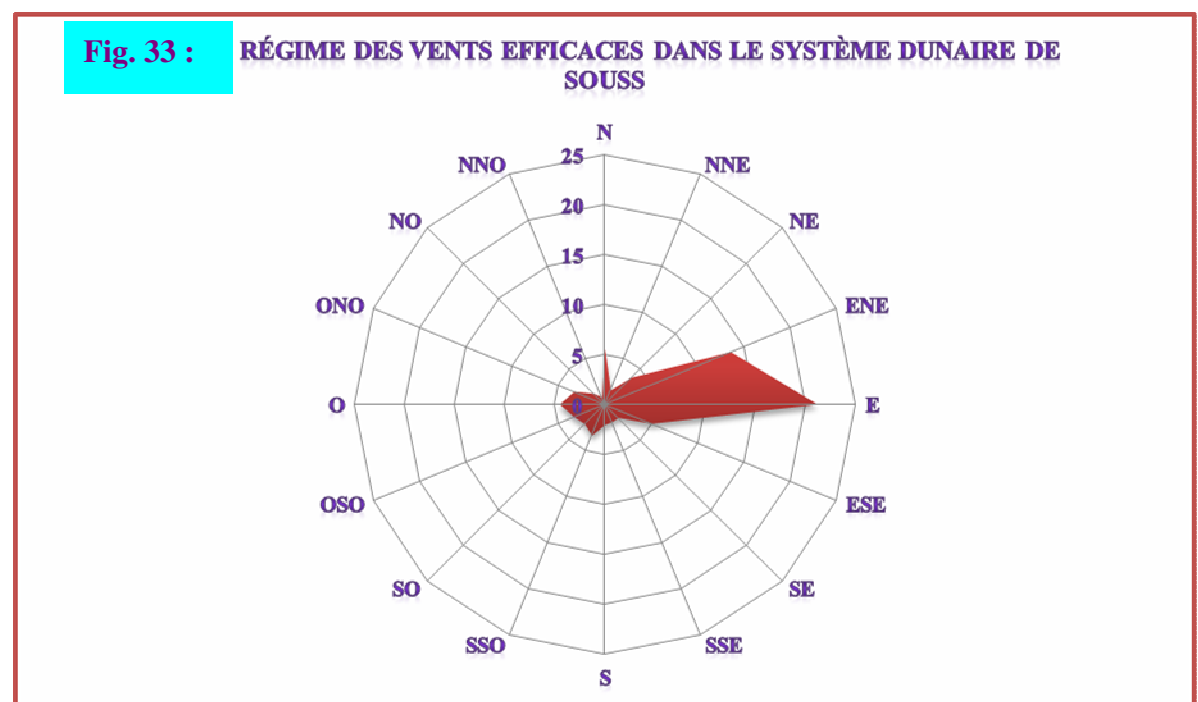
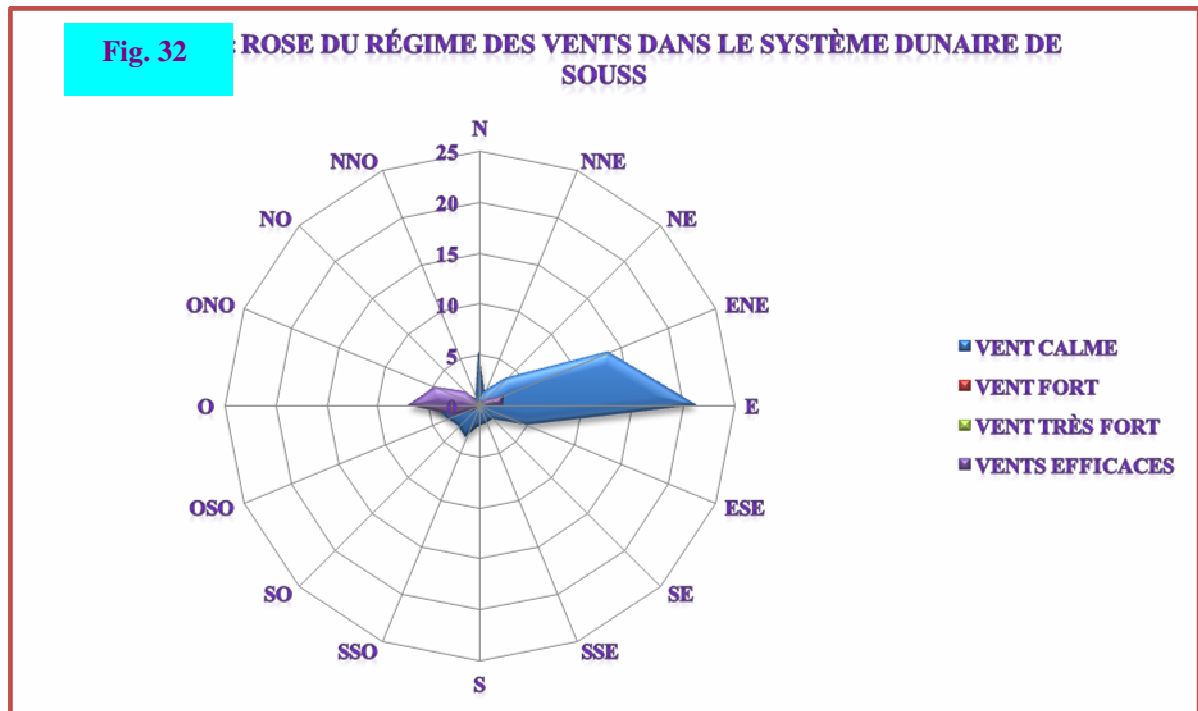
Elle exprime la taille du déplacement potentiel des sables. C'est la somme des modules de déplacement des 16 directions.

## II. RESULTATS ET DISCUSSIONS :

### 1. Rose du régime des vents :

L'analyse de la rose des vents (figures 33 et 34) montre que les vents dominants proviennent de toutes les directions, alors que les vents efficaces sont

issus essentiellement du secteur Ouest et secondairement du secteur Est, ce qui reflète un régime des vents bidirectionnel.

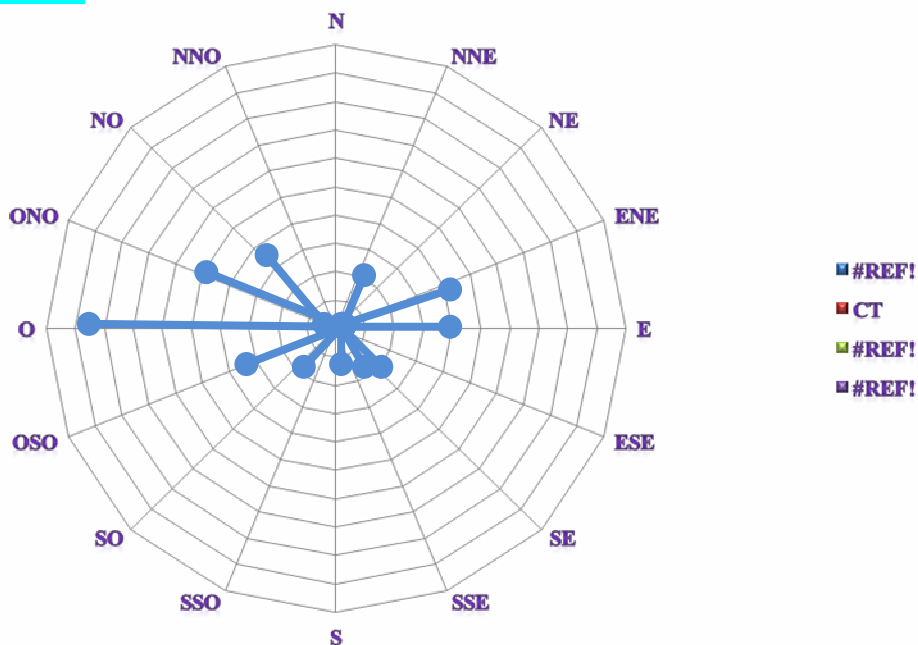


## 2. Rose annuelle du déplacement sableux :

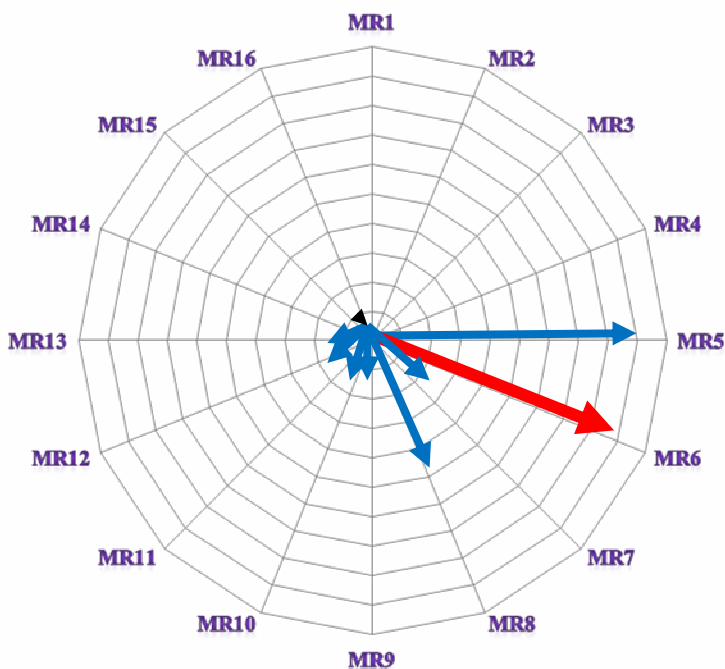
La rose annuelle des déplacements sableux (figure 35) issue des coefficients, est de type "unimodal". L'ensemble du transport se fait selon une direction de 112°N (ONO-ESE).



**Fig. 34** : ROSE DES DEPLACEMENTS POTENTIELS DES SABLES



**Fig. 35** : ROSE DES DES DIRECTIONS DES MIGRATIONS DES SABLES DANS LE SYSTÈME DUNAIRE DE SOUSS



### **3. Variabilité directionnelle (Rapport MR/CT) :**

Ce rapport (MR/CT) est de 0,45. Cette valeur caractérise les régions où le déplacement des sables se fait essentiellement sous forme de dunes paraboliques et secondairement sous forme des barkhanes et de dunes transversales.

### **4. Détermination de la direction résultante de migration des sables :**

La résultante de migration des sables ( $MR_{Ta}$ ) (figure36) a une direction  $112^{\circ}N$  (WNW-ESE).

### **5. Quantification en volume $Q'$ :**

Le volume de sable transporté par la force éolienne de l'année 1995 est estimé à  $8,867 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$ .

### **6. Quantification en masse $Q''$ :**

La masse de sables transportés par la force éolienne pendant l'année 1995 est estimée à  $14807,47 \text{ Kg}/\text{m}/\text{an}$ .

### **Conclusion :**

La modélisation du (D.P.S) au niveau du système dunaire au Sud de l'embouchure de l'Oued Souss a permis de différencier le régime éolien qui est un régime bimodal, où les vents dominants proviennent essentiellement des secteurs Ouest et secondairement du secteur Est, du régime de transport sableux qui est unidirectionnel. En effet, seuls les vents du secteur Ouest et ONO qui sont efficaces et capables de générer un déplacement sableux.

La variabilité directionnelle (MR/CT) est faible, le coefficient calculé est 0,45, cette valeur tend vers 0, elle caractérise les régions où le déplacement des sables se fait essentiellement sous forme de dune parabolique et secondairement sous forme des barkhanes et de dunes transversales.

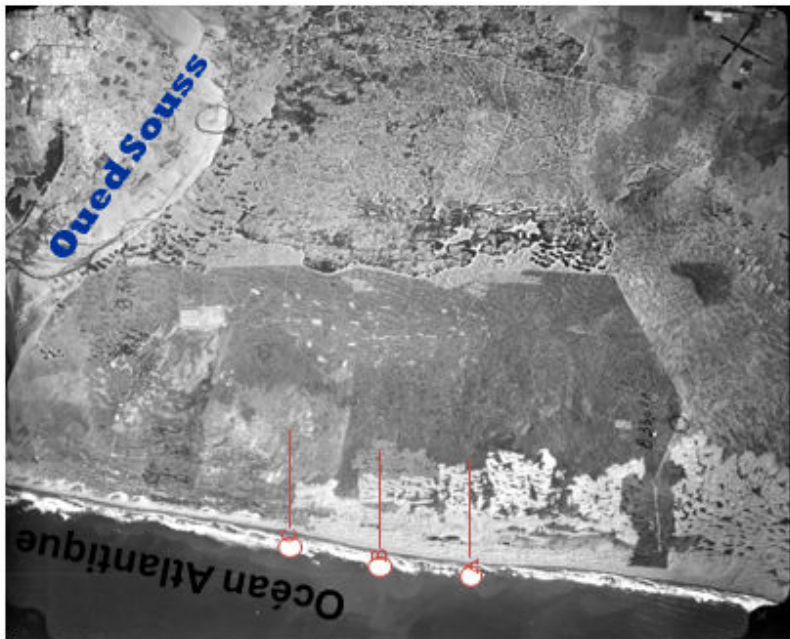
La détermination de la direction des migrations des sables donne une valeur MR (112°N), c'est à dire ONO-ESE. Comparable à celle de la photo aérienne.

L'estimation du volume des sables transportés par la force éolienne montre que la dynamique éolienne au niveau du système dunaire de Souss, est relativement interne durant l'année 1995.

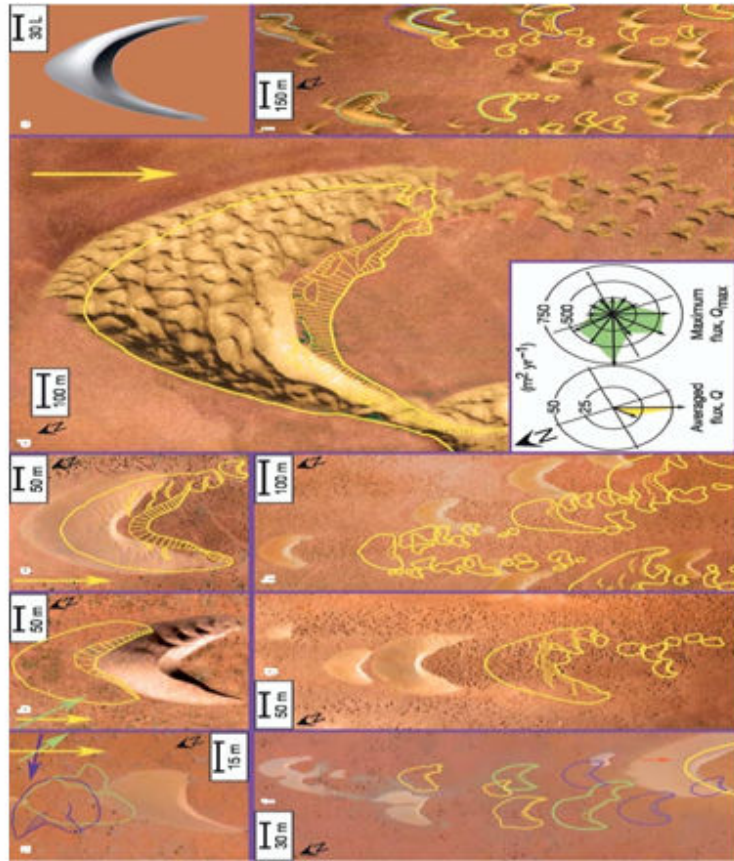
L'étude comparative des déplacements potentiels des sables dans les systèmes dunaires de Souss et de Draa (figure 36) montre que les sables migrent sous formes de courants sableux parallèles à la ligne de rivage. En effet, dans le système de Souss la migration est ONO- l'ESE, alors que dans le Draa elle Nord - Sud. Cette différence est liée à la morphologie du littoral qui influence la direction générale du déplacement sableux plutôt que par la direction des vents efficaces. Ce qui met en évidence l'influence des autres facteurs locaux sur la dynamique éolienne.

Fig.36 : Etude comparative du DPS dans les plaines de Sous et Draa

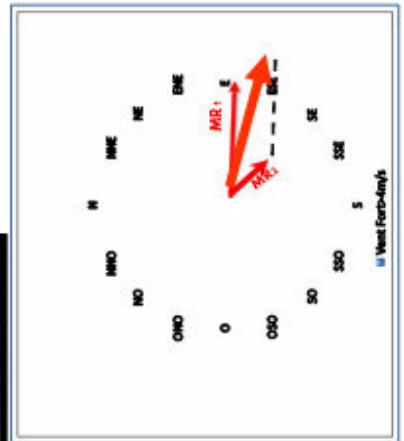
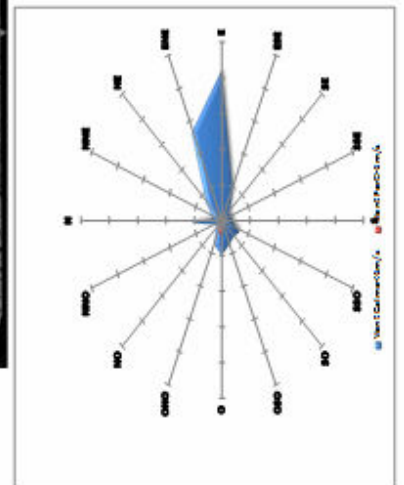
**Système dunnaire de Sous**



**Système dunnaire de Draa**



H. Elbelhiti, P. Claudin et Andreotti 2005



## Chapitre II:

### **MODELE EXPERIMENTALE : QUANTIFICATION DE L'EROSION EOLIENNE PAR LES CAPTEURS (BSNE)**

## INTRODUCTION

L'érosion éolienne peut être estimée par l'utilisation de l'équation universelle de l'érosion éolienne :

$$E=IRKTCADB \text{ (t /ha/an)}$$

Où :

I=indice d'érodabilité fonction de la texture de la structure (facilité de désagrégation du sol)

R : couverture superficielle (végétation, résidus de récolte)

K=indice de rugosité du terrain

T=Texture

C=Indice climat, fonction du vent de la température

A : dimension du champ dans la direction parallèle au vent

D : orientation r/r à la direction des vents, dominants

B : protection artificielle brise-vent, chaumes

Aussi, l'estimation de l'érosion éolienne peut-elle se faire directement par mesure qualitative à l'aide d'échantillonneur BSNE standard.

## I. MATERIEL ET METHODE :

### 1. Installation du protocole expérimental :

Le site expérimental est installé sur la zone littorale, suivant trois transects parallèles A, B, C, orientés Ouest-Est, et obliques par rapport à la ligne de rivage, espacés de 1,5 km, chaque transect s'étend sur une distance de 1,5km à partir du cordon littoral, et traverse trois familles de dunes : transversales, paraboliques et barkhanes.

La surface des dunes est occupée différemment par des dunes vives, dunes fixées naturellement, dunes fixées mécaniquement, dunes fixées mécaniquement et biologiquement.

**Fig.37 : Situation des transect A, B, C dans le système dunnaire de Souss.**



## a/ Dispositif de mesure :

### -Les dunes :

La dune constitue l'unité élémentaire du site de l'échantillonnage, dans laquelle on place trois groupes de captures (mâts) : un au pied du versant au vent (mât, a), un mât au sommet (mât, s) et un autre au pied sous vent (mât, d).

Chaque groupe de capteurs (figure.35) est constitué d'un mât de trois capteurs placés à 15, à 50 et à 100 cm du sol, appelés respectivement capteurs bas (b) ; capteurs moyen (m) et capteur haut (h) .Dans chaque transect, on a pris : deux dunes transversales (T), deux dunes paraboliques (P) et deux dunes barkhanes (B).

### -Les transects :

Pour le transect C, on a pris deux dunes transversales avec fixation mécanique, deux dunes paraboliques avec fixation mécanique et biologique faible et deux barkhanes avec fixation mécanique et biologique dense.

Pour les transect A et B, on a pris dans chacun : deux dunes vives transversales, deux dunes paraboliques et deux dunes vives barkhanes.

Dans chaque transect, on a installé deux mâts intermédiaires (i), dans l'espace interdunaire, un du côté mer et un à la fin du transect.

## 2. Mesures et observations :

Les mesures de la vitesse et de la direction des vents à partir d'une station météorologique compacte installée dans la région.

Mesures de la charge du vent : les capteurs des sables appartiennent au modèle (B.S.N.E) développé par *FRYEAR, 1986*. Ces capteurs sont destinés à échantillonner les particules de sables suspendues dans l'air à différents niveaux du sol. Les particules passent à travers l'ouverture du capteur, qui a une section de 10 cm<sup>2</sup>. Après la rentrée du vent chargé, sa vitesse est réduite, les particules s'y déposent et y restent, (photo n°2).

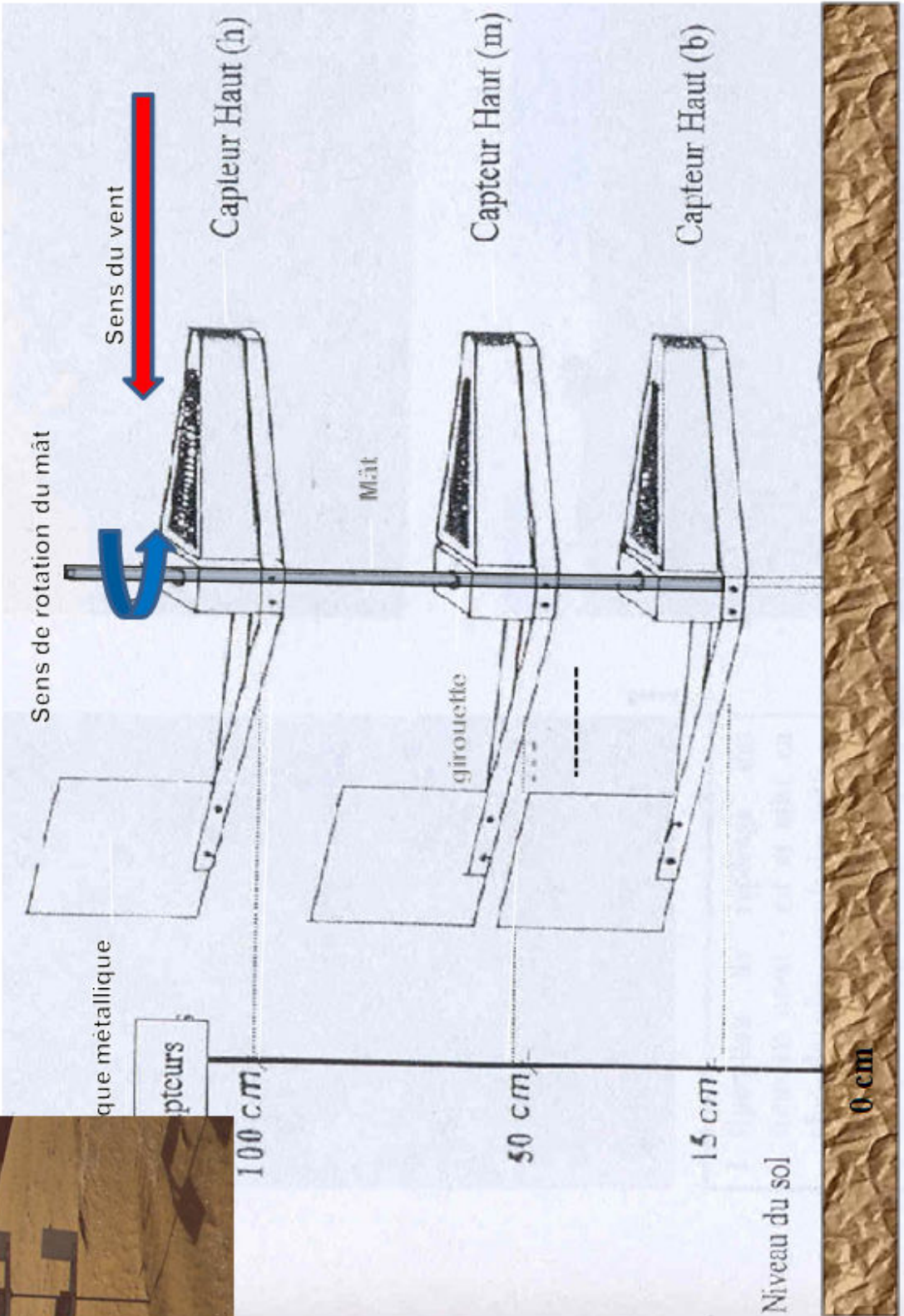


Une distance de 1,5km à partir du cordon littoral, et travers les trois types de dunes : transversales, paraboliques et barkhanes .

La surface des dunes est occupée différemment par des dunes vives, des dunes fixées mécaniquement et par des dunes fixées mécaniquement et biologiquement.



**Fig. 38 : Schéma de l'échantillonneur BSNE standard Frayer ,1986**



Les mesures de la charge éolienne selon le dispositif déjà décrit, permettent de déterminer la variation de la quantité du matériel sableux collecté en fonction de la hauteur par rapport au sol, de la vitesse du vent, du type et de l'état de surface des dunes.

Ce dispositif permet aussi la détermination de la vitesse de migration différents types de dunes, l'évolution de leurs formes et la localisation des aires de transport, de déflation et de dépôt de sable.

Cela permet aussi de suivre l'évolution en hauteur des différents types de dunes et leur déplacement en longueur. Les valeurs issues des mesures prises sur le terrain sont soit positives en cas d'augmentation en hauteur ou de déplacement vers l'Est, soit négatives en cas de diminution de la hauteur ou de déplacement dans le sens Ouest.

### 3. Modèle d'estimation du flux de l'érosion éolienne:

Sous l'effet du vent de différentes vitesses, il a été prouvé que le contenu sablonneux du courant d'air exprimé en kilogramme par mètre carré ( $\text{Kg}/\text{m}^2$ ) est lié à la hauteur au-dessus du niveau du sol exprimé en mètre (m) par une relation logarithmique (*ZHUZHENDA, 1987*), de puissance (*FRYREAR, 1987*) ou de type hyperbole (*PETROV, 1976*).

L'application des tests d'ajustements aux données obtenues par l'expérimentation a permis de retenir le modèle de puissance de *FRYREAR, 1987* :

$$y = ax^b$$

**y** : quantité de sable captée en ( $\text{kg}/10\text{cm}^2$ );

**x** : hauteur du capteur considéré en (m);

**a et b** : paramètre du modèle (les coefficients de régression).

La simulation du modèle entre les positions en hauteur de 0,15 et 1 m des capteurs, donne la quantité globale de sable qui transite par mètre carré linéaire vertical  $Q_1$  en  $\text{kg}/\text{ml}$  de capteur et par mètre carré de section verticale  $Q_2$  en  $\text{kg}/\text{m}^2$  de capteur.

La méthode de la droite de moindre carré (*FAROULT et SIMON, 1986*), permet de linéariser la fonction de type puissance  $y = ax^b$  qui semble la plus représentative pour le cas du système dunaire de Souss, et obtenir ainsi une fonction linéaire de forme  $y = ax + b$  mais sous forme :

$$\boxed{\text{Log } y = \log a + b \log x} \quad (2)$$

Le calcul des quantités a été effectué par l'intégration de la fonction représentative entre les bornes 0,15 et 1(m) (*MOUTAOUKKEL, 1987 ; SIDI MAHMOUD, 1988 et ABOUCHARIF, 1990*).

$$\boxed{\int_{0,15}^1 f(x) dx = \int ax^b \frac{dx}{b+1} = [1-(0,15)^{b+1}] \quad (3)}$$

Les valeurs obtenues reportées sur la colonne des quantités moyennes de sable qui a transité par mètre linéaire vertical de capteur des tableaux 2,3 et 4. Ces quantités trouvées n'ont pas donné une représentation fidèle des quantités collectées. Or la formule d'intégration donne seulement l'aire mais pas la quantité de sable déplacée. Ainsi nous avons essayé l'intégral double entre 0 et 0,02 m qui tient compte de l'épaisseur du capteur mais de la même façon les quantités ne sont pas conformes aux résultats de l'expérimentation

Le calcul de la quantité de sable captée sur 1 m linéaire de hauteur de capteur est égale à la somme des plaçons les uns sur les autres, c'est-à-dire selon des intervalles de 0,05m à partir de 0,15m jusqu'à 1m, ce qui donne un total de 17 capteurs.

$$\boxed{Q = \sum_{i=0}^{16} Q_i = \sum_{i=0}^{16} ax_i^b = a \sum_{i=0}^{16} x_i^b} \quad (4)$$

Où  $x_i = 0,15 + i(0,05)$

$$\boxed{Q = a \sum_{i=0}^{16} [0,15 + i(0,05)]^b} \quad (5)$$

Ainsi, la quantité captée de sable par une surface de 1m<sup>2</sup> de capteur vertical, est obtenue par la multiplication de la quantité de 1 m vertical par 50 puisque le capteur à 0,02 m de largeur ce qui donnera 1ml de largeur.

Dans (les annexes 1 et 2), en reprenant les résultats des travaux d'*ABOUCHRIF, 1990 et SIDI MAHMOUD, 1988* et pour vérifier le calcul de leurs quantités de sable déplacées pour tester la validité des modèles (3) et celui recourir au modèle (5) que nous proposons.

On a constaté une différence de représentativité de deux modèles. Le modèle (5) que nous proposons donne des résultats satisfaisants par rapport au modèle (3).

Il faut rappeler que les deux modèles se calculent par les constantes de régressions a et b.

En effet, le modèle (3) ne prend pas en considération la hauteur de la section de l'ouverture de capteur qui est de 0,02m de largeur et de 0,05m de hauteur. Il convient de multiplier le modèle (3) par le nombre de capteurs qui est de 17 pour obtenir :

$$Q = \int_{0,15}^{1,00} y dx \frac{1-0,15}{0,05} \frac{1,00}{0,15} \int ax^{b+1} dx = [1-(0,15)^{b+1}] \quad (6)$$

Malgré ça, on reste loin du modèle (5). A titre de comparaison et comme autres alternatives de calcul sans l'utilisation des coefficients de régression a et b, nous avons proposé l'interprétation de *LAGRANGE et WOOD, 1992*.

Pour la formule de l'intégral :

$$\int_{0,15}^{1,0} y dx = \frac{1-0,15}{0,05} \int_{0,15}^{1,0} \left[ \frac{(x_1-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} Y_{1+} + \frac{(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_3-x_2)} y_{2+} + \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)} y_3 dx \right] \quad (7)$$

$$Q = \frac{17 y_1}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \left[ \frac{1-0,15^3}{3} + \frac{(x_3+x_2)(x-15^2-1)}{2} + x_2x_3(1-0,15) \right] +$$

$$\frac{17 y_2}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \left[ \frac{1-0,15^3}{3} + \frac{(x_3+x_1)(x-15^2-1)}{2} + x_1x_3(1-0,15) \right] +$$

$$\frac{17 y_3}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \left[ \frac{1-0,15^3}{3} + \frac{(x_3+x_1)(x-15^2-1)}{2} + x_2x_1(1-0,15) \right]$$

Pour la formule de la somme :

$$\sum_{i=0}^{16} y_i = \sum_{i=0}^{16} \left[ \frac{(x_i-x_2)(x_i-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} y_1 + \frac{(x_i-x_1)(x_i-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)} y_2 + \frac{(x_i-x_1)(x_i-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)} y_3 \right] \quad (9)$$

Avec  $x_i = 0,15 + i(0,05)$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{y_1}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)} \left[ 6,1625 - 9,35 (x_3 + x_2) + 17 x_2 x_3 \right] + \\ Q &= \frac{y_2}{(x_2-x_1)(x_1-x_3)} \left[ 6,1625 - 9,35 (x_3 + x_1) + 17 x_1 x_3 \right] + \\ Q &= \frac{y_3}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)} \left[ 6,1625 - 9,35 (x_1 + x_2) + 17 x_2 x_1 \right] \quad (10) \end{aligned}$$

On a appliqué les modèles, nous avons constaté que malgré l'amélioration des résultats par le modèle (6), les modèles (5), (8) et (10) restent les mieux représentatifs. D'autre part, lors de l'application séquentielle du modèle (10), des valeurs négatives ont été obtenues. On pense qu'il doit être du au nombre de points de mesure sur le mât limité à 3. En attendant la vérification de la fiabilité de ce modèle nous travaillons avec le modèle (5) lors de l'interprétation du flux de déplacement sableux.

### 3.2- Variation de la charge du vent le long et entre les transects :

Nous avons procédé à une analyse de variance à quatre critères de variation : transect ; type de dune ; mât ; capteurs, suivi d'un test de *Newman et Keuls* avec un niveau d'erreur de 5%. La composition de la variance va permettre, de détailler l'analyse et mettre en évidence l'interaction entre les différents facteurs.

Les transects ont été comparés sur la base de la variation de la charge du vent en fonction de sa vitesse ou sa direction dans le site.

Cette charge dépend également de l'état de surface du sol et celle des dunes qui sont soit fixées soit mobiles. Par la suite, nous avons pu examiner l'effet de la fixation des dunes par les deux méthodes mécaniques et biologiques, grâce à la décomposition de l'analyse de variation déjà citée.

Le logiciel utilisé est STATITCF.

L'étude de la variation spatiale de la charge du vent a été effectuée au niveau de 54 sites (mâts) repartis sur trois transects A, B et C avec 18 mâts chacun. Ces sites ont fait l'objet de 20 relevés d'échantillonnage qui ont été étudiés par une analyse de la variance à quatre critères de classification.

Source de variation	SCE	DDL	C.M	F
Variation totale	13302124	161	82621,89	-
Var. transect (f1)	1513690	2	756845	18,89
Var. type de dune (f2)	391364	5	78272,8	1,950
Var. mâât (f3)	978804	2	489402	12,21
Var. capteur (f4)	1203512	2	601756	15,02
Var.Inter (f1)x(f2)	1119550	10	111955	2,790
Var.Inter (f1)x(f3)	534651	4	133662,75	3,340
Var.Inter (f1)x(f4)	726910	4	181727,5	4,540
Var.Inter (f2)x(f3)	1017655	10	101765,5	2,540
Var.Inter (f2)x(f4)	482662	10	48266,2	1,200
Var.Inter (f3)x(f4)	289906	4	72476,5	1,810
Var.Inter (f1)x(f2)x(f3)	1240016	20	62000,8	1,550
Var.Inter (f1)x(f3)x(f4)	1038838	20	51941,9	1,300
Var.Inter (f1)x(f3)x(f4)	331842,5	8	41480,31	1,040
Var.Inter (f2)x(f3)x(f4)	830085	20	41504,25	1,040
Var. Résiduelle	1602638,5	40	40065,96	-

Tableau VIII : Résultats de L'Analyse de la Variance

## II. RESULTAT ET INTERPRETATION

### 1. Profil vertical de la charge éolienne :

Les graphes donnent pour chaque mâât considéré, les estimations a et b pour la méthode des moindres carrés, le coefficient de détermination relatif au modèle et une estimation du degré de représentativité du modèle.

## 2. Variation de la charge en fonction de la hauteur du capteur :

La figure 39 montre que 63,35% du sable est capté au niveau des capteurs bas; 22,70% dans les capteurs moyens et 13,95% dans les capteurs hauts. Ce qui montre que la quantité de la charge érodée par le vent diminue avec la hauteur.

L'analyse du facteur niveau du capteur permet de montrer l'existence des différences hautement significatives entre les trois niveaux de capteurs, moyen et bas.

Le test de *Newman et Keuls* permet de détecter l'existence de deux groupes homogènes. Le premier contient le niveau bas du mât et le deuxième regroupe les niveaux moyen et haut. Ceci permet de conclure qu'il y'a une répartition verticale de la charge du vent qui met en évidence l'importance du mode de transport par saltation.

L'étude de la charge moyenne des capteurs haut, moyen et bas dans les trois transects, montre une nette variation de la charge des vents par niveau de capteur.

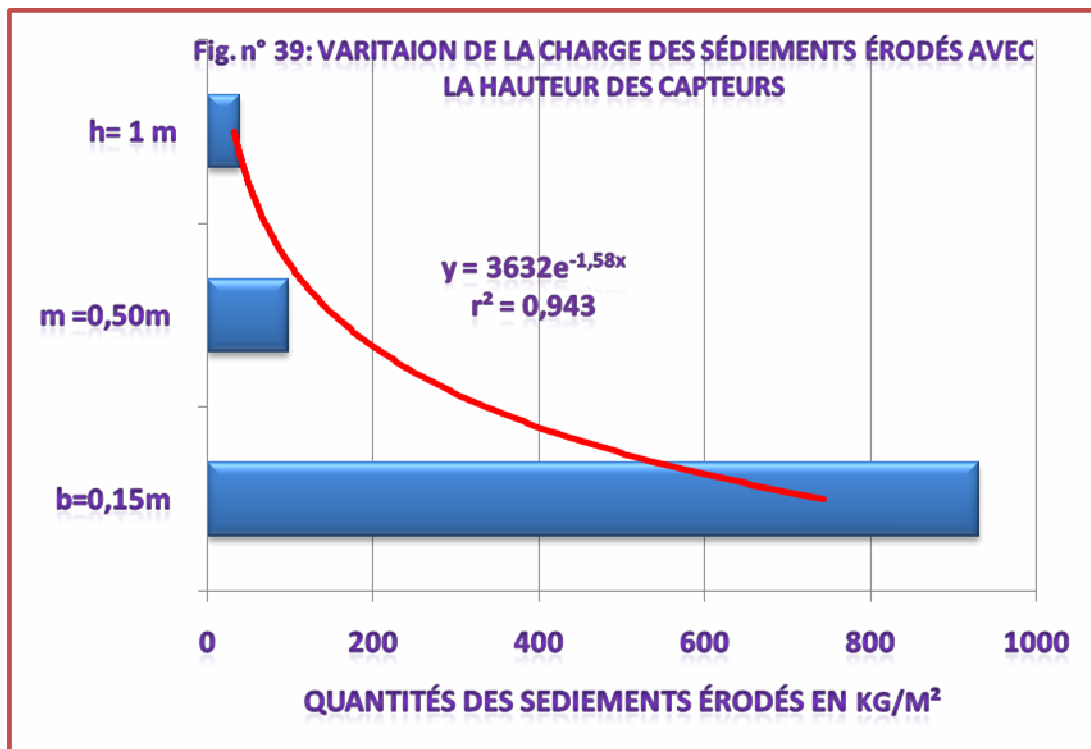
L'interaction entre le facteur niveau et le facteur transect est hautement significative. En effet, le test de *Newman et Keuls* de cette interaction met en évidence l'existence de trois groupes homogènes :

- ❖ Le premier groupe contient les niveaux bas du transect A ;
- ❖ Le deuxième groupe contient les niveaux bas du transect B ;
- ❖ Le troisième groupe contient les niveaux moyen et haut des trois transects en plus du bas niveau du transect C.

Ceci met en évidence d'une part, l'effet de l'occupation du sol et d'autre part le sens du transport éolien des sables.

En effet, le transect C, se trouve près de la source c'est à dire proche de l'embouchure de l'oued Souss, alors que les transects A et B se situent plus au sud et donc plus loin de la source. Aussi le transect C se trouve-t-il sur un sol occupé par des branchages de lutte mécanique qui intercepte les grains de sable et les empêche de reprendre leur mouvement par saltation.





### 3. Variation de la charge le long de transect :

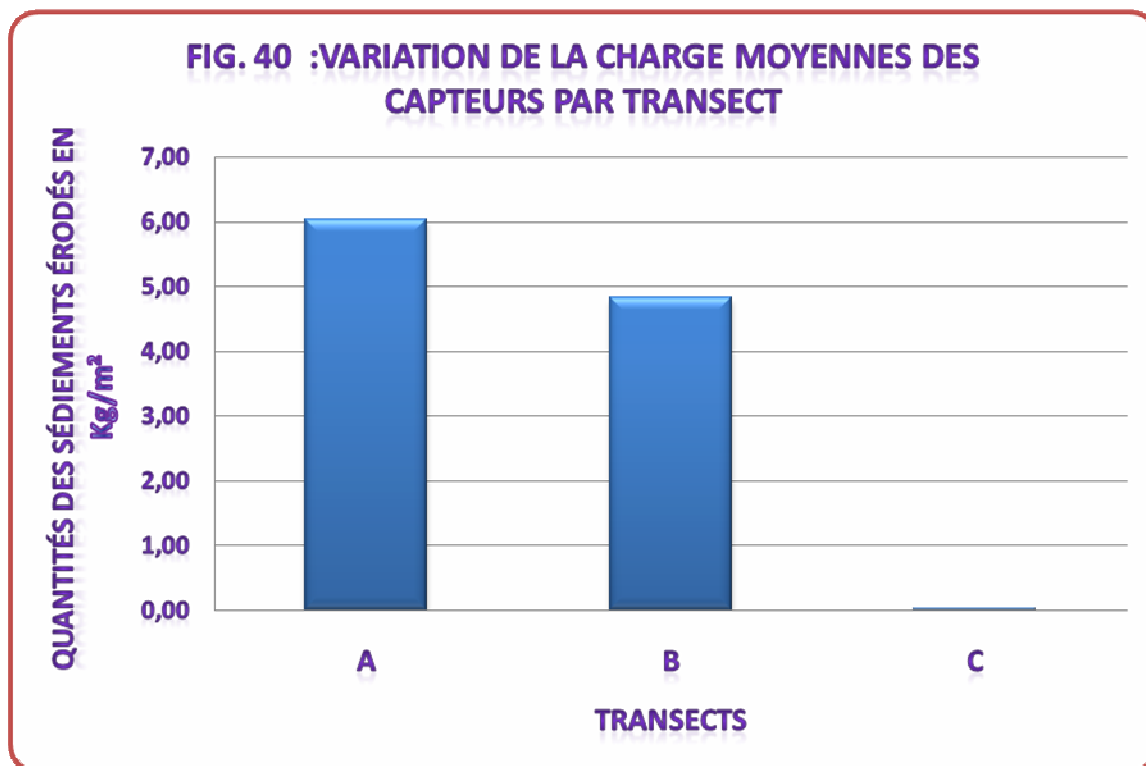
Le facteur transect a une influence très grande, cela signifie que les trois transects présentent des charges moyennes différentes ; cette différence est mise en évidence la (figure 40) qui donne une représentation des charges moyennes par transect. Ce graphique montre qu'il y'a une différence claire entre le transect C et les autres transects A et B.

Le test de *Newman et Keuls* a permis de conclure que les transects A et B constitue un groupe homogène, c'est à dire que les charges moyennes globales des deux transects sont rapprochées et qu'elles sont très différentes de celles du transect C.

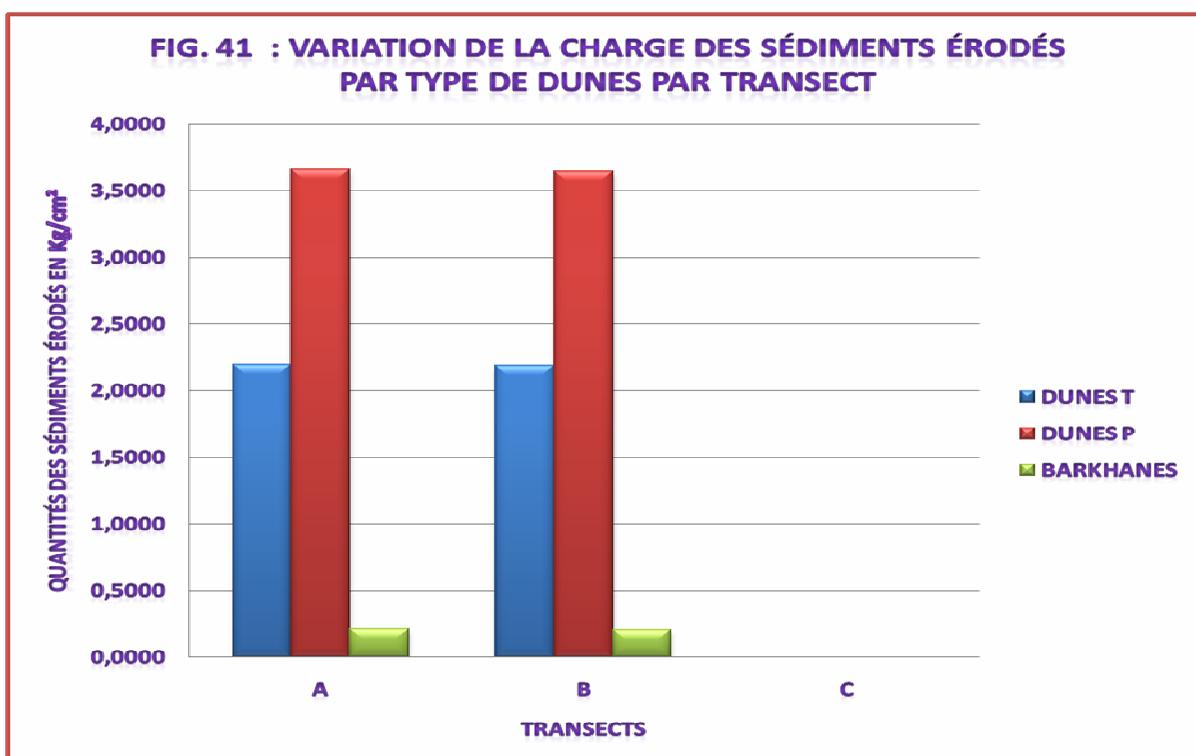
La comparaison de la charge du vent au niveau des trois transects, élimine le transect C puisqu'il présente des charges moyenne est de l'ordre de 1,06g alors que celles des autres transects sont de 6 kg pour A et 480 g pour B (figure 37). Ceci peut être expliqué de point de vue dynamique que les transects A et B se trouve dans une aire de transport alors que celui et que C dans une aire d'accumulation et de dépôt éolien.

Par conséquent, on peut mettre en évidence le rôle important que joue le branchage et la végétation dans l'interception des grains de sables transportés par le vent.

Le long des transects A et B, il est à noter des différences entre les charges et les mâts, ce qui confirme l'interaction entre le facteur transect et le facteur mât.



En effet, les figures 40 et 41 montrent que les charges élevées au niveau des mâts se trouvent sur les dunes paraboliques, ceci est dû à la proximité de la zone de l'érosion éolienne qui alimente le système dunaire.



Au niveau de la deuxième dune transversale, on observe une chute de la charge moyenne du vent, surtout au niveau du mât arrière. Cette chute est due à la présence d'une dépression manifestée par la diminution de la hauteur de la dune par rapport à la précédente.

Au niveau des dunes paraboliques, la charge du vent a augmenté, car ces dunes sont exposées aux apports du sable à cause de leur hauteur.

Cette partie du terrain connaît une forte énergie éolienne donnant naissance à ces types dunaires qui sont des indicateurs d'une l'aire de l'érosion éolienne par excellence, ce qui rend la charge du vent très importante au niveau des mâts disposés à ce niveau.

Une chute de la charge du vent, a été constatée dans le reste des deux transects A et B. Ceci est dû probablement à l'éloignement des barkhanes de la zone source du sable et l'existence de nombreuses barrières, matérialisées par la hauteur considérable des dunes transversales et paraboliques, qui influencent la charge du vent.

En conclusion, la hauteur des dunes et l'éloignement de la source du sable constituent les deux principaux facteurs qui agissent sur la dynamique éolienne et par conséquent sur la variation de la charge du vent en sable captée au niveau de chaque mât.

#### **4. Variation de la charge avec le type de dunes :**

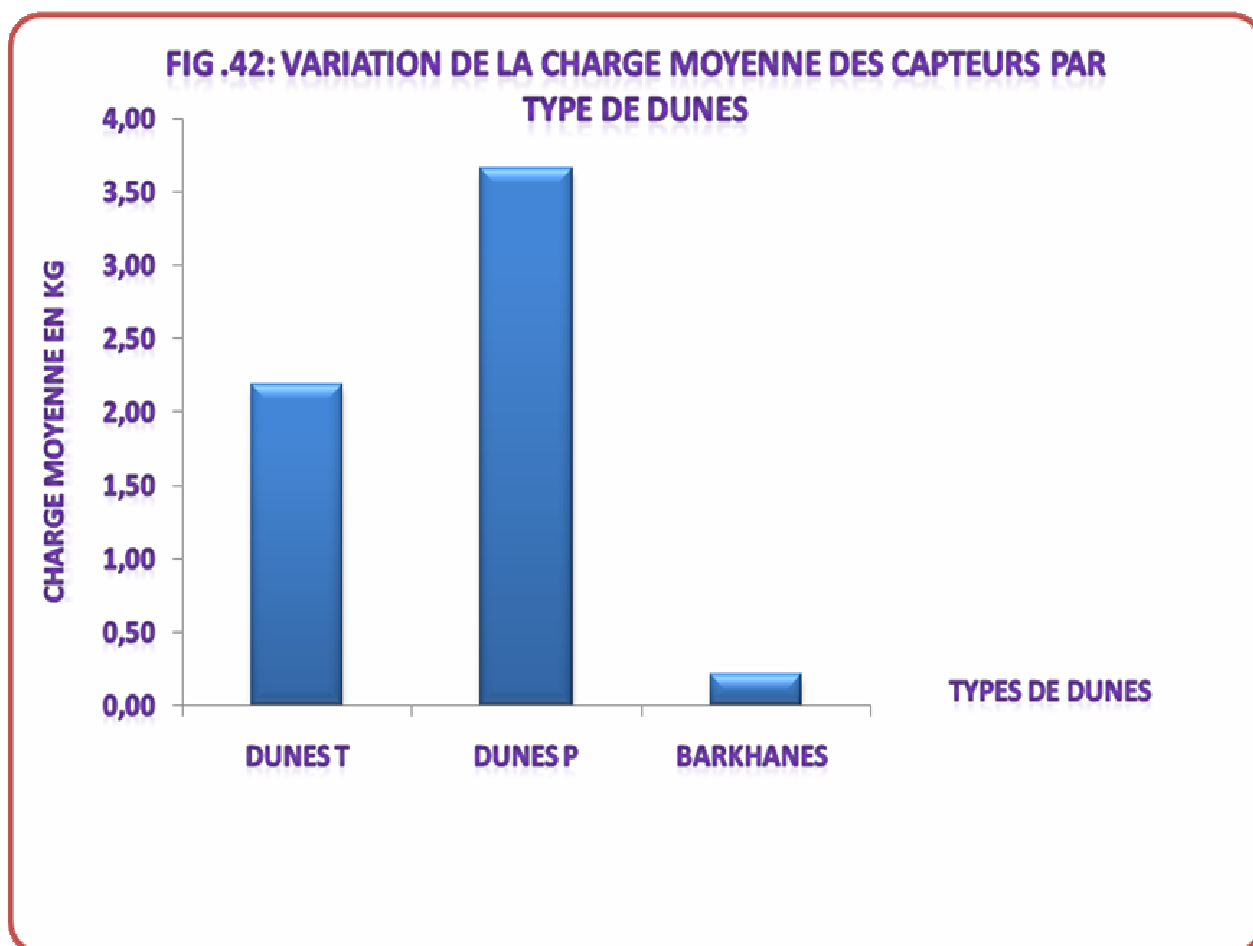
L'analyse de variance statistique illustrée par les figures 42 et 43 montrent qu'il y a peu de différence entre les trois types de dunes formant le système dunaire de Souss qui sont, les transversales, les paraboliques et les barkhanes. Alors que, leur interaction avec le facteur transect est significative, ce qui montre une différence de charge du vent au niveau des trois transects, Le test de Newman et Keuls de l'interaction entre ces deux facteurs montre l'existence de quatre groupes homogènes :

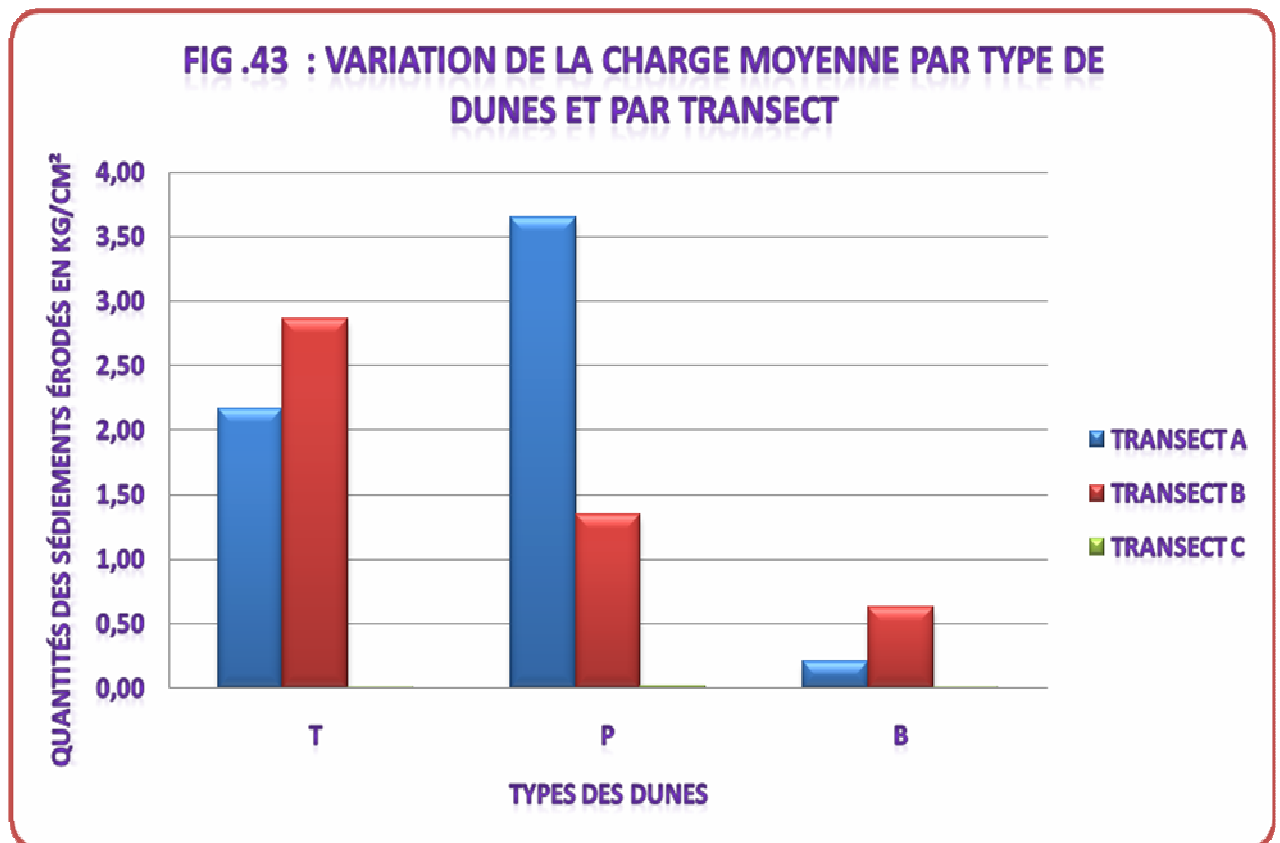
- ❑ Le premier comprend la première dune parabolique du transect A ;
- ❑ Le deuxième contient la première dune transversale du transect A ;
- ❑ Le troisième regroupe le reste des dunes des deux transects A et B ;
- ❑ Le quatrième groupe correspond au transect C.

Ceci traduit de point de vue dynamique que le courant transporteur résulte d'une augmentation de la force éolienne de C vers B et A.

En effet, cette interprétation est confirmée sur le terrain par la fixation mécanique et biologique pratiquée au niveau du transect C, qui agit positivement pour diminuer la charge en sable transportée par le vent.

En faisant l'analyse de transect par décomposition du classement des dunes, le quatrième groupe homogène (figure 42), lorsqu'on change l'échelle des charges moyennes des valeurs ordonnées sur la qui était pratiquement plat, il est devenu révélateur de certains phénomènes interne du transect C. On constate que la deuxième dune parabolique connaît la plus grande activité éolienne.





### 5. Variation de la charge en fonction de la position des Mâts :

L'analyse statistique du facteur mât a une variance hautement significative, cela signifie que les trois positions du mât (avant, sommet et arrière) présentent des charges moyennes différentes (figure 44 et 45).

Le test de *Newman et Keuls* permet de conclure que le mât « sommet » et « arrière » constituent un groupe homogène, c'est-à-dire que leurs charges moyennes sont identiques. Elles sont supérieures à celles du mât « avant ». Cela confirme l'avancée de plusieurs constatations faites sur le terrain. En effet, on trouve souvent les mâts avant couchés, envahis par le sable à différentes hauteurs.

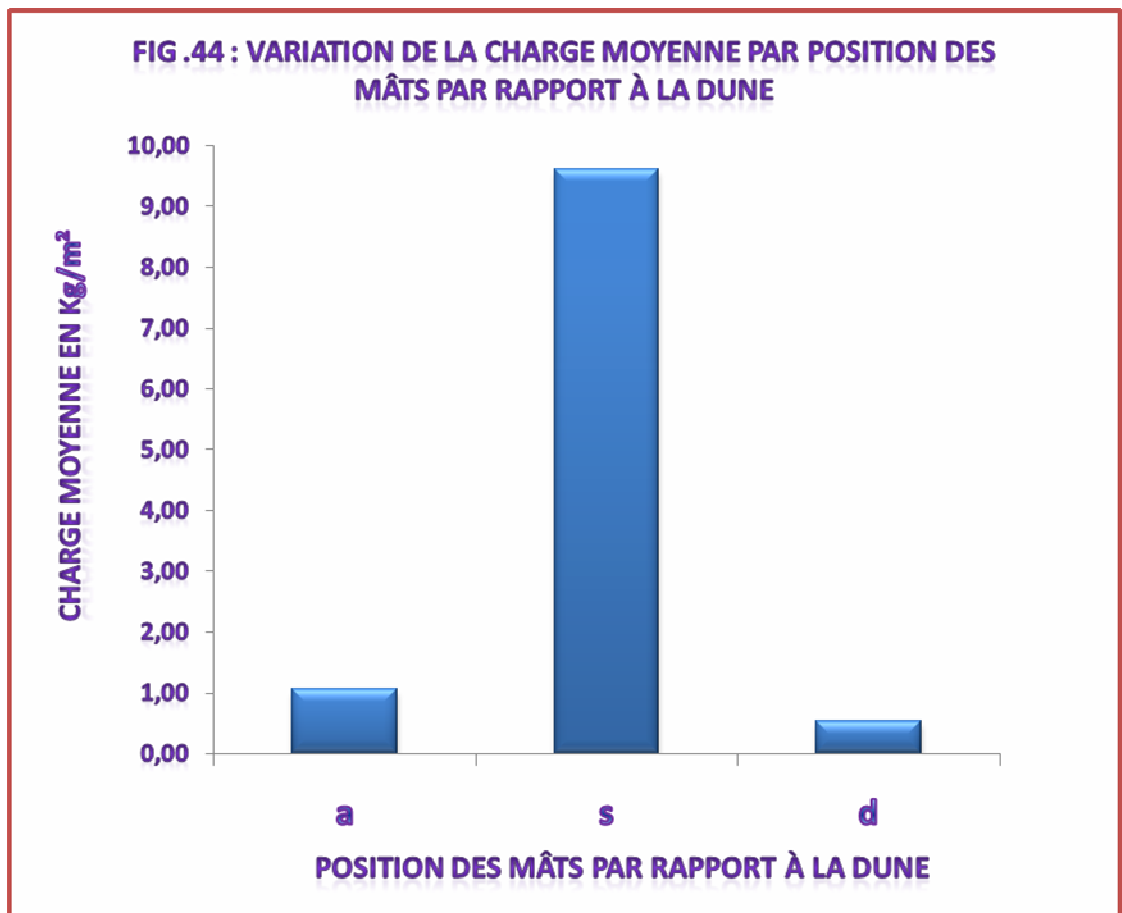
La différence de la charge des mâts, selon leur position le long des trois transects, confirme l'interaction entre ces deux facteurs. En effet, le test de *Newman et Keuls* de l'interaction entre transect et mât montre l'existence de quatre groupes homogènes.

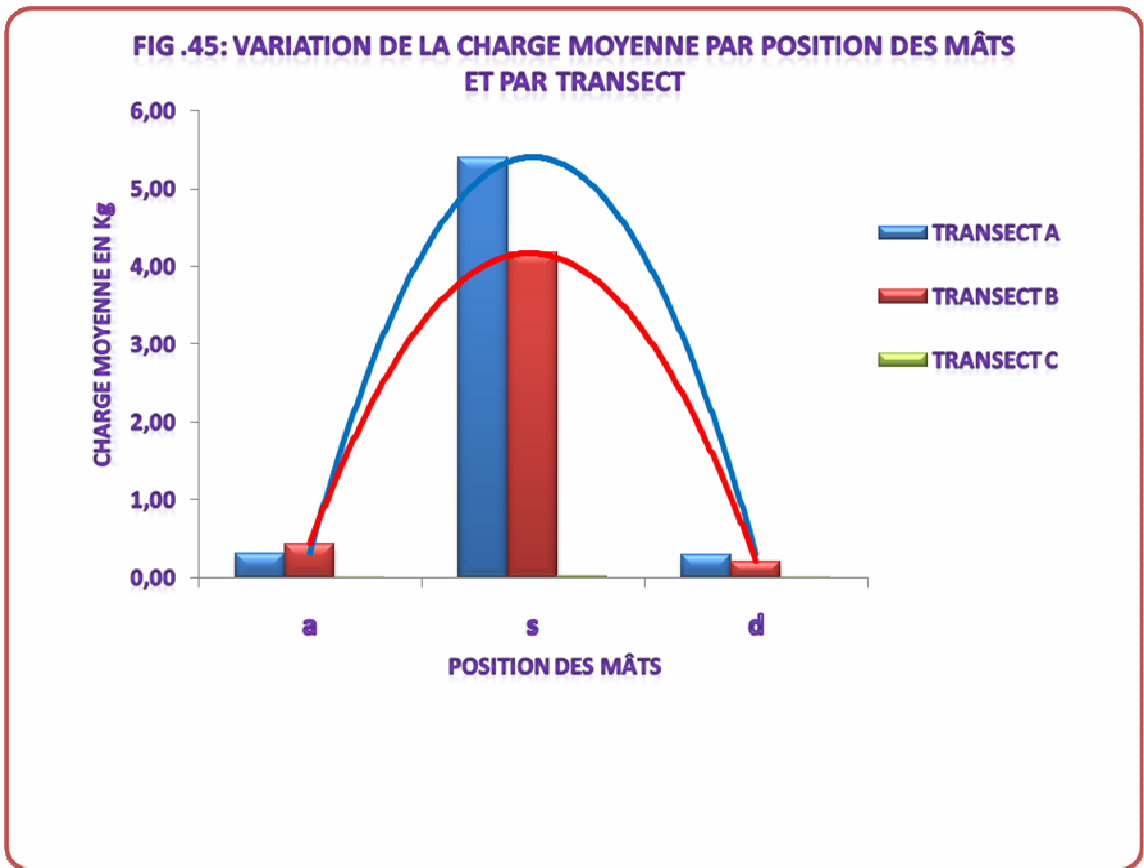
- Le premier groupe englobe le mât "Sommet" du transect A.

- Le deuxième groupe contient les mâts "Sommet" du transect B et les mâts "arrière" du transect A.
- Le troisième groupe renferme les mâts "arrière" du transect B.
- Le quatrième groupe contient tous les mâts "avant" des transect A, B ainsi que tous les mâts du transect C.

On constate que les charges les plus importantes se situent au niveau des mâts "Sommet" par rapport aux autres positions.

Cela montre que le mouvement de sable au niveau des cotes est faible. En effet, la vitesse du vent connaît une grande accélération au niveau du sommet s des dunes qui rend la crête de la dune très mobile. Ainsi, le facteur hauteur de la dune reste déterminant puisque les mâts "sommet" situés sur les dunes les plus hautes ont une charge moyenne supérieure aux sommets des autres dunes.





## 6. Variation saisonnière de la charge éolienne:

Lors des sorties sur les terrains pour la collecte des échantillons de sable des capteurs, nous avons constaté que l'avancée des dunes devient de plus en plus sensible à partir du mois de mai. Ceci est confirmé par plusieurs constatations et notées sur le terrain telles que :

- ✓ Le dehaussement des mâts "avant" et "sommet" qui devient de plus en plus fréquent;
- ✓ Le déplacement des crêtes des dunes;
- ✓ L'invasion des mâts "arrière" par le sable;
- ✓ L'avancée des dunes vers l'intérieur ce qui nous a obligé à déplacer le mât arrière de quelques mètres.

Ces observations nous ont amené à pousser l'analyse dans ce sens pour confirmer ces constatations ou les rejeter. Pour cela nous avons divisé l'année d'échantillonnage en deux saisons de novembre 94 à avril 95 et de mai 95 à novembre 1995.

La comparaison de ces graphiques permet de faire quelques remarques importantes :

- ✓ Le mât "avant" pour la période précédant le mois de mai sont plus chargés en comparaison avec la période suivant ce mois;
- ✓ Les mâts "arrière" pour la période d'après le mois de mai montrent que des charges, plus importante en sables en comparaison avec la période avant mois mai 95;
- ✓ Les mâts "sommet" connaissent des fluctuations de charges selon la position de la dune.

Nous pouvons dire que le système dunaire de Souss fonctionne selon deux saisons : La première avant le mois de mai ou le mouvement de sable est intradunaire et la deuxième après le mois de mai ou les sables sont migrent vers le continent sans que le mouvement interdunaire ne soit totalement inactif.

## **6. Estimation du Transit Eolien:**

### **6.1. Cumul de la charge des capteurs :**

Cette méthode ne peut donner que des résultats de référence parce qu'il s'agit de totaliser les quantités de sables piégées dans les capteurs au courant de l'année, indépendamment de la direction et la vitesse du vent.

L'interprétation des résultats représentés dans ces tableaux peut nous révéler l'interaction entre les différents facteurs : transects, dunes et mâts.

### **6.2. Variation du transit éolien en fonction du transect :**

La figure 46 montre une nette différence entre le transect C et les transects A et B, quand la comparaison se fait avec une échelle similaire, lorsqu'on change l'échelle pour le transect C on voit quand même que le phénomène est assez actif.

-Dans le transect A, le transect varie de 7872 à 15 kg/m<sup>2</sup>.

-Dans le transect B, le transit varie de 7009 à 51 kg/m<sup>2</sup>.

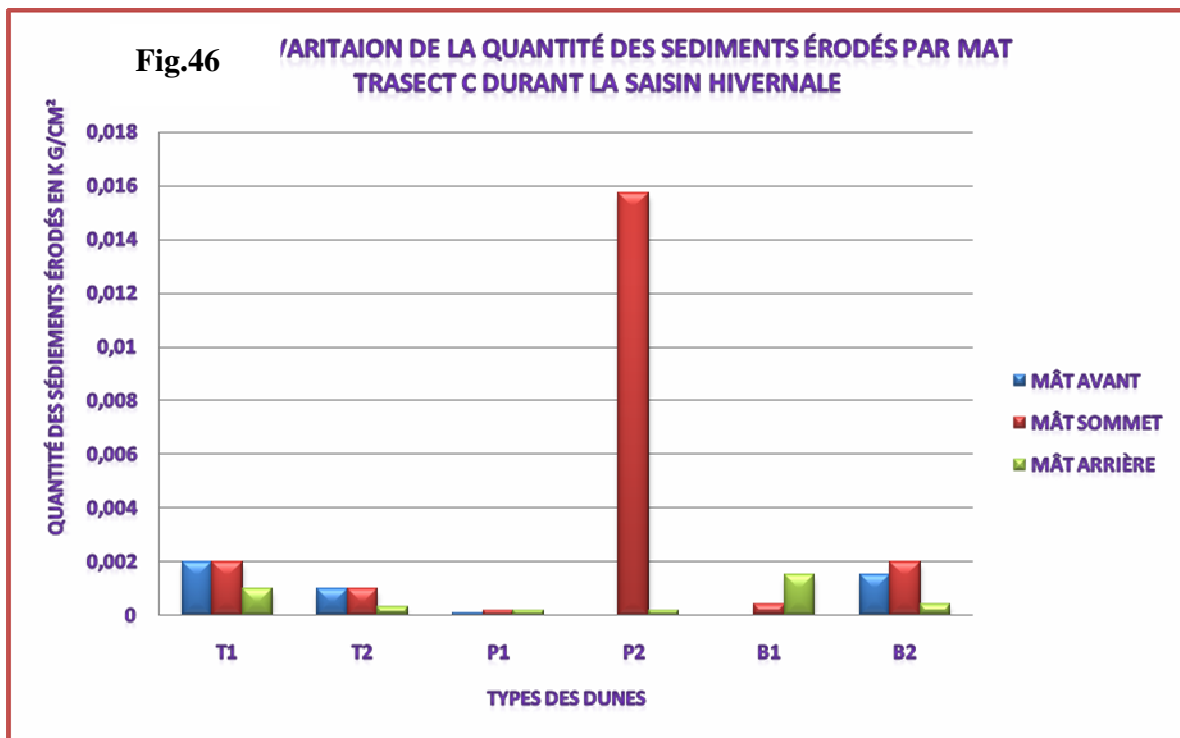
-Dans le transect C, le transit varie de 55 à 0,5 kg/m<sup>2</sup>.

Le faible transit dans le transect C résulte de l'effet de la fixation mécanique et biologique.



### 6.3. Variation du transit éolien en fonction de la position des mâts :

On constate que l'essentiel du transit se fait autour des mâts du sommet, surtout au niveau des premiers mâts du côté du littoral sur les dunes transversales et paraboliques. Ceci peut être dû à leur rehaussement et le sens de leur migration dirigé vers le Sud-Ouest légèrement oblique par rapport à la ligne de rivage. Cette position facilite l'ascension des premiers reliefs. Une fois sur le plateau, les mâts arrières commencent à montrer un transit important, ceci explique la petite hauteur des barkhanes leur vitesse de déplacement assez rapide.



### 6.4. Variation du transit éolien en fonction du type de dunes :

Concernant les transects A et B montrent qu'il y a un transit important dans la dune transversale suivie par les deux dunes paraboliques puis par les barkhanes. De la même manière dans le transect C (figure 46) on constate la confirmation de l'efficacité de la fixation mécanique et biologique car cela agit positivement pour diminuer

considérablement la charge en sable transporté par le vent. On remarque quand on change l'échelle de lecture pour le transect C (tableau IX), qu'il y a un transect relatif dans ces deux dunes transversales car elles sont à proximité de la plage qui constitue la zone source d'approvisionnement en sable; dans la deuxième dune parabolique à cause de sa grande taille et de son sommet trop exposé et son entretenu par les dune barkhanique qui a tendance à se débarrasser de son manteau de fixation et devient à la merci du vent.

<i>Type de dunes</i>	<i>Transect A t/m<sup>2</sup></i>	<i>Transect B t/m<sup>2</sup></i>	<i>Transect C t/m<sup>2</sup></i>
<i>T1</i>	11,11	8,48	0,05
<i>T2</i>	3,74	5,71	0,05
<i>P1</i>	7,10	1,41	0,01
<i>P2</i>	7,93	7,94	0,06
<i>B1</i>	1,49	3,91	0,01
<i>B2</i>	2,00	5,82	0,02
<i>Total</i>	32,87	33,28	0,19

Tableau IX : Efficacité de la fixation mécanique et biologique

<i>Type de dune</i>	<i>Transect A %</i>	<i>Transect C %</i>	<i>efficacité moyenne par type de dune/C</i>
<i>T1</i>	99,52	99,36	99,20
<i>T2</i>	99,73	99,17	
<i>P1</i>	99,92	99,59	99,50
<i>P2</i>	99,21	99,26	
<i>B1</i>	99,60	99,85	99,61
<i>B2</i>	99,27	99,75	
<b>Total</b>	99,43	99,44	

Tableau X : Efficacité de fixation dans le transect C par rapport aux transect A et B

La comparaison des résultats représentés par les types de dunes (Tableau .IX), montre qu'il y a une diminution nette du transit éolien d'un rapport important et variable selon le type de dune et de transect., fait ressortir que les petites quantités

captées dans les dunes du transect C qui ne dépassent pas 0,006 t/m<sup>2</sup> alors qu'elles dépassent les 11 t/m<sup>2</sup> dans le transect A et 8 t/m<sup>2</sup> dans le transect B.

Les proportions d'efficacité de fixation dans le transect C par rapport aux autres transects (Tableau X) donne presque 100% d'efficacité de fixation dans le transect C. Ainsi on voit qu'il y a une diminution moyenne de transit éolien de 99,2 % dans les dunes transversales fixées, de 99,5% dans les dunes paraboliques fixées et de 99,61% dans les transects A et B.

### **6.5. Variation saisonnière du transit éolien :**

Dans la première période, l'activité du transit éolien se concentre essentiellement au tour des mâts du sommet. On remarque aussi l'absence totale d'activité dans les barkhanes. Par contre, dans la deuxième période de l'année, en plus de l'activité, même si elle est moins importante que la première période, reste tout de même prépondérante suivie par une grande activité du transit autour des mâts arrière et surtout de ceux des barkhanes. On constate donc que la première période constitue une activité interne des dunes et surtout celles trop exposés au moindre coup de vent et la deuxième période constitue une activité de migration des interdunaire.

Selon l'ordre des dunes par l'efficacité du transite éolien pendant les deux périodes, les dunes T1, P1 et P2 du transect A; les dunes T1, T2 du transect B qui présentent une grande activité du transit éolien. Dans la deuxième période presque toutes les dunes entrent en activité sauf celles du transect C. La dune T1 du transect A et la dune B2 du transect B sont les plus actives suivies par les dunes T1 et P2 du transect.

## Chapitre III:

### **METHODE GRAPHIQUE : ABAQUE DE THOMAS**

## I.METHODOLOGIE

L'Abaque de *THOMAS, 1975* permet d'évaluer approximativement le stock sableux transporté, à partir de mesures des vitesses et directions des vents ainsi que la connaissance précise de la granulométrie des sédiments. Le débit solide éolien est exprimé en t/m/h (figure 47).

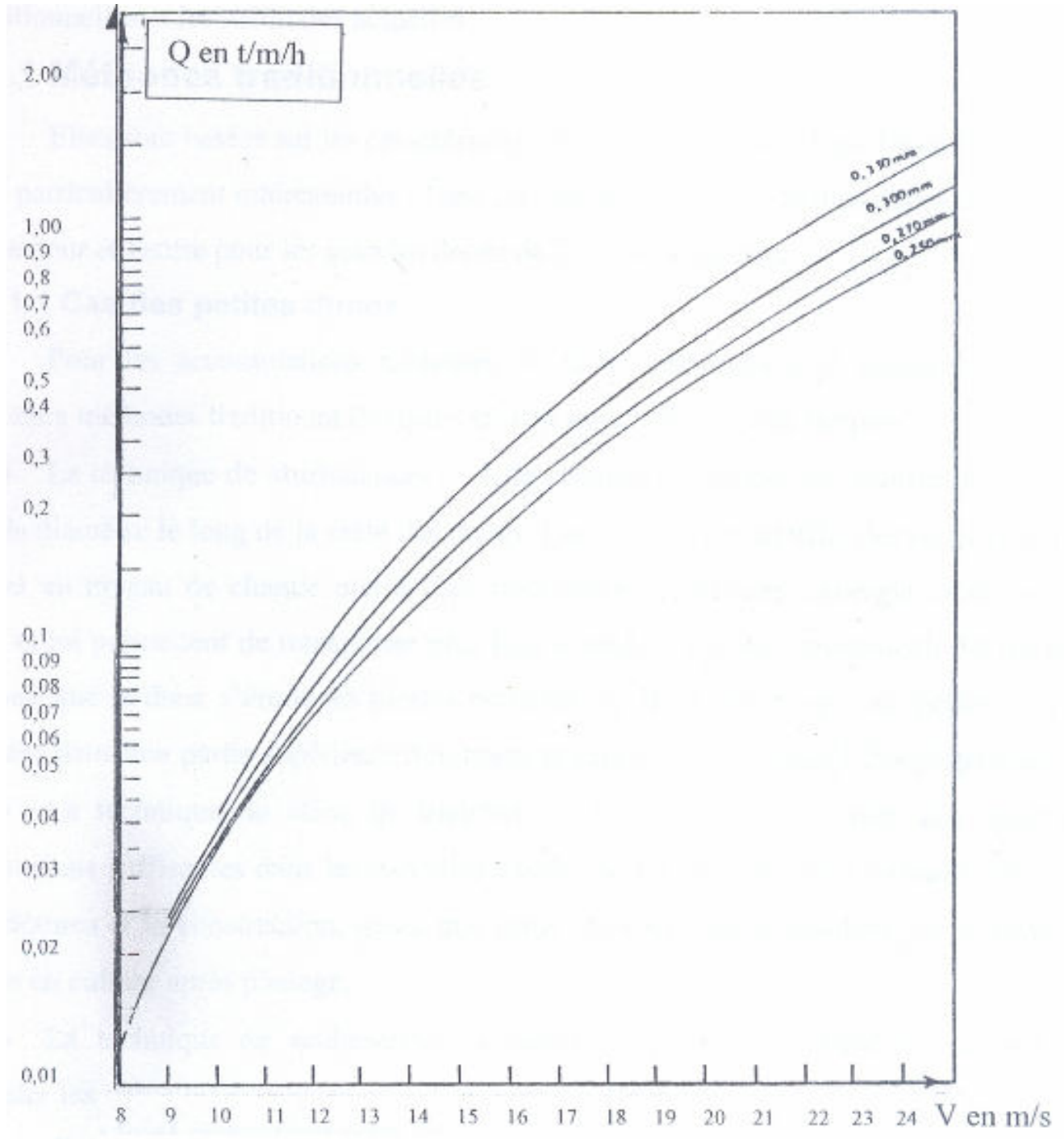


Fig. 47 : Abaque de Thomas pour l'estimation du débit solide éolien « Tomas 1975 »

On constate que c'est durant la saison hivernale ou on assiste à une forte tendance de migration de sable vers l'Est et le Sud-Est.

Les données sur les directions et les vitesses des vents au cours de la période du 13 novembre 1994 au 10 avril 1995, sont les mêmes que ceux utilisées au paragraphe précédente.

Sur l'abaque de *Thomas*, on a reporté, pour chaque mesure de vitesse de vent supérieur à 9m/s sur l'axe des abscisses, une correspondance sur l'axe des ordonnées en tonnes par mètre et par heure (t/m/h) à travers l'une des courbes correspondantes à la granulométrie moyenne du site étudié. La durée en minutes peut être obtenue en multipliant le nombre d'observations de la vitesse et la direction donnée par 24 qui est l'intervalle des relevés de la station météorologique.

La valeur obtenue sur l'abaque multipliée par la durée convertie en heure, nous donne la masse de sable qui transite par mètre par section.

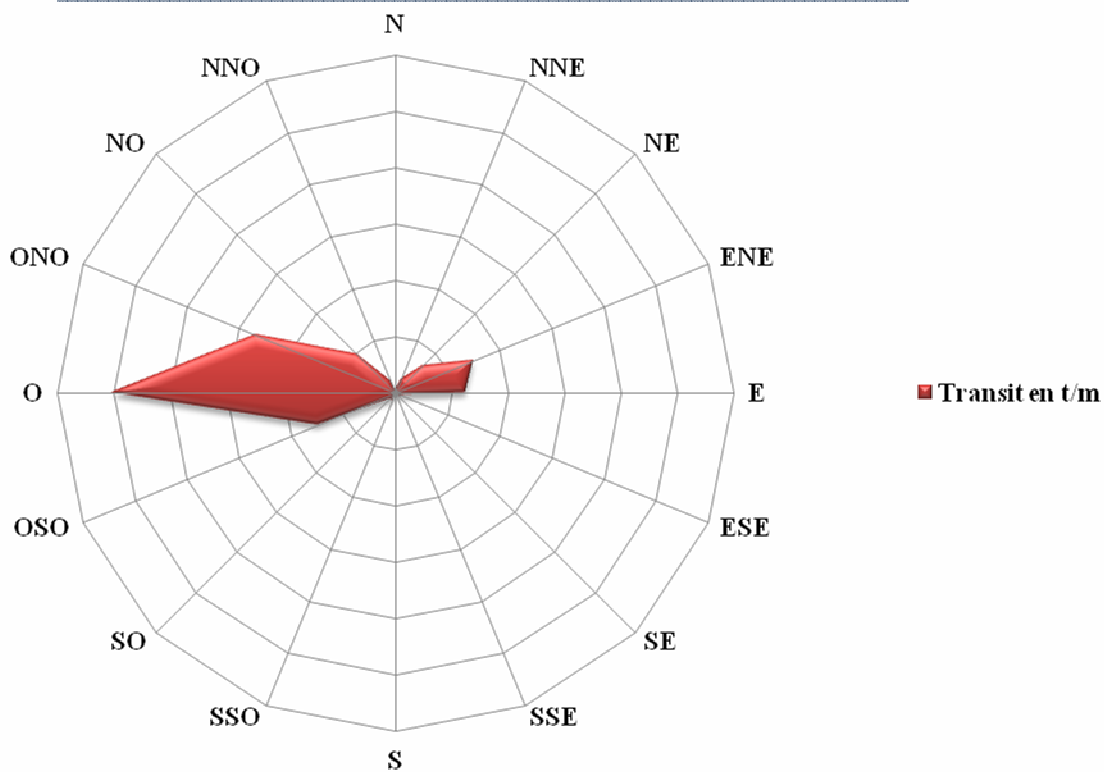
## II. RESULTAT ET DISCUSSION:

Comme la granulométrie moyenne du matériel sableux au niveau du système dunaire de Souss est  $M_c = 0,28\text{mm}$ , nous avons pris la courbe correspondante sur l'abaque.

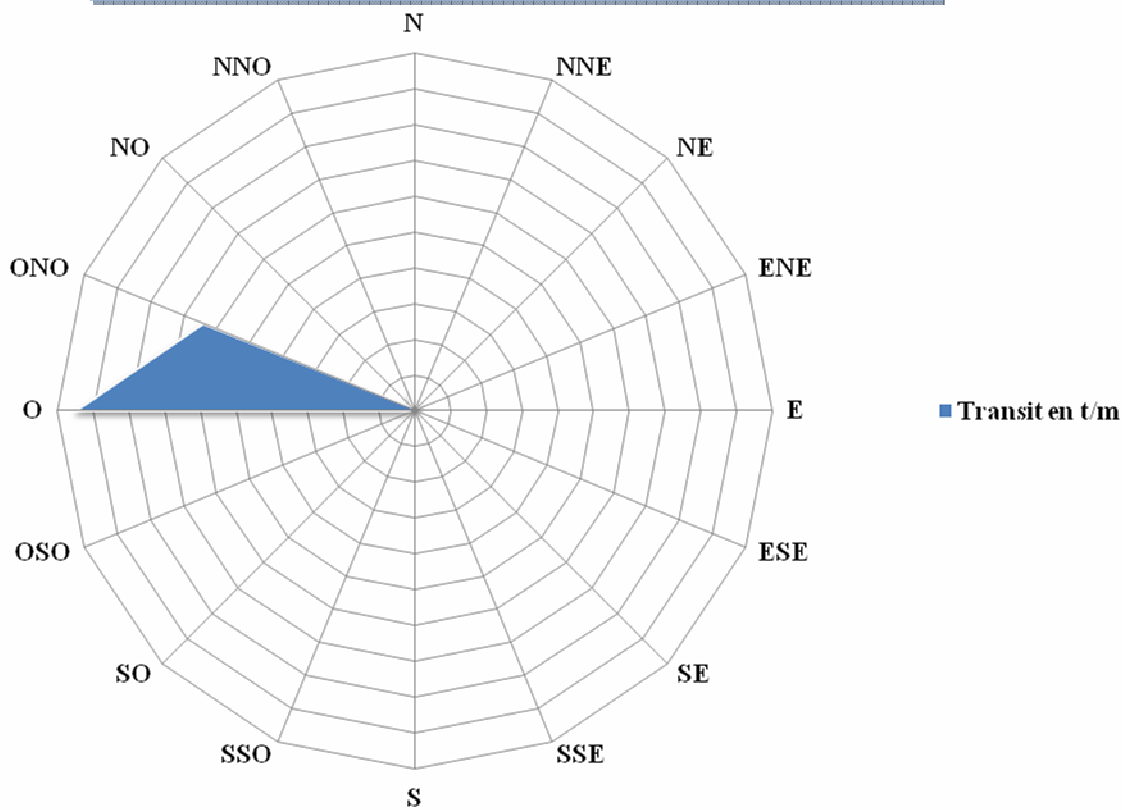
Le volume total mobilisé pendant la saison hivernale par le vent est estimé à 76,9 t/m/h en 5 mois dont (25) sont du secteur Ouest, (13) du secteur ONO, (7,4) du secteur ENE et du secteur OSO, (6,1) du secteur Est et moins de (5) par le reste des secteur (figure 48).

Le bilan saisonnier résultant après soustraction des volumes des différentes directions opposées (figure 49), montre que (18,9) t/m sont transportés du ONO vers l'ESE et (2,5) t/m sont transportés du NE vers le SO.

**Fig.48 : Bilan du transit éolien en t/m durant 1994-1995**



**Fig.49 : Bilan du transit éolien résultant en t/m durant**



Pour la méthode expérimentale des capteurs de sable, on a pris les valeurs du mât du sommet et la dune la plus active durant la période hivernale pour la méthode modélisatrice du déplacement potentiel des sables (D.P.S), en considérant les valeurs proportionnelles pour la même période étudiée alors que pour la méthode graphique, on se base sur les valeurs des déplacements dominants.

Les valeurs obtenues sont reportées sur la longueur de la plage qui est de 6,4 km en supposant que les caractéristiques (vitesse et direction) de vents sont constantes :

Méthodes Estimations	Capteurs de sable	D.P.S	Abaque de Thomas
T/m/s mois	5,302	6,169	18,910
Littoral de Souss	33 932,8	39 481,6	121 024

Tableau XI : Comparaison des méthodes d'estimation du flux de l'érosion éolienne

L'évaluation basée sur la comparaison des trois méthodes d'estimation des flux sableux au niveau du système dunaire de Souss (tableau XI) montre que la méthode modélisatrice (D.P.S) s'approche des valeurs expérimentales données par les capteurs de sables, et s'écarte des celles de l'abaque de *THOMAS*.



## Chapitre IV:

**RELATION ENTRE LA CONFIGURATION  
DES AÇORES ET LES DEPLACEMENT  
SAISONNIER DES SABLES DU SYSTEME  
DUNAIRE DE Souss.**

## **I. APERÇU GENERAL SUR L'ANTICYCLONE DES AÇORES**

### **1. Définition :**

Le cyclone est une très forte dépression qui prend naissance au dessus des eaux chaudes des océans de (Z.I.T) la Zone Inter Tropicale, et qui s'accompagne des vents très violents et des pluies torrentielles.

### **2. Mécanisme des formations :**

Le cyclone se forme à partir des ondes tropicales qui circulent de l'Est en Ouest, sur l'atlantique, de juin à novembre.

En début d'hiver, ces ondes ont tendance à s'affaiblir, mais lorsque la Zone Inter Tropicale de Convergence (Z.I.T.C) remonte en août à septembre, elles peuvent se renforcer. La trajectoire moyenne est une parabole avec d'abord une circulation d'Est en Ouest, puis un point de redressement et en fin une circulation vers le Nord-Est.

Cette trajectoire est la conséquence de la circulation générale de l'atmosphère.

La vitesse moyenne à laquelle se déplace est d'environ 20 à 25Km/h. La vitesse augmente au fur et à mesure qu'il s'éloigne des eaux tropicales et se dirige vers le Nord. De plus, quand il est capturé par la circulation d'Ouest, les trajectoires s'infléchissent et les vitesses augmentent jusqu'à 90 km/h.

Les oragons de l'atlantique Nord se déplacent habituellement d'Est en Ouest dans le courant induit par l'anti-cyclone des Açores.

### **3. Caractéristiques :**

Le cyclone se caractérise par des vents très violents qui soufflent de façon circulaire au tour d'un centre de basse pression appelé « Oeil »

### **4. Trajectoire :**

Le cyclone se déplace selon une trajectoire qui ressemble à la courbe d'une parabole. Dans l'hémisphère Nord, il se déplace tout d'abord en direction Nord-Ouest, puis vers les latitudes élevées, il devient Nord-Est.

## 5. Classification :

L'échelle de *BEAUFORT* est utilisée par la marine et la météorologie pour indiquer la vitesse des vents. Elle fut inventée en 1805 par l'hydrographe Irlandais *FRANCIS BEAUFORT*. Ses caractéristiques originales ont été modifiées en 1964, et l'échelle utilisée aujourd'hui en mer est représentée dans le tableau suivant :

	Numéro	Vitesse (Km/h)	Descriptif
Brise	0	1	Calme
	1	1-5	Très léger brise
	2	6-11	Léger brise
	3	12-19	Petite brise
	4	20-28	Iolie brise
	5	29-38	Bonne brise
Vent	6	39-49	Vent frais
	7	40-61	Grand frais
	8	62-74	Coup de vent
	9	75-88	Fort coup de vent
Tempête	10	89-102	Tempête
	11	103-117	Violente tempête
Ouragan	12	> 118	Ouragan

## 6. Cartographie des positions saisonnières des Açores :

La direction et la vitesse des vents (Alizées), qui engendrent la migration des dunes au sein du système de Souss, peuvent dépendre des facteurs locaux, régionaux ou synoptiques. Ces derniers représentés par la cellule anticyclonique subtropicale des Açores.

La migration de l'isobare 1015 hPa, est l'origine directe entre les déplacements sableux et les positions saisonnières de l'anticyclone. Deux positions ont été distinguées : La première s'étale sur la période de novembre à février, ou l'isobare 1015 hPa migre vers

les basses latitudes, La seconde couvrant les périodes de mars à avril, où l'isobare 1015 hPa remonte vers les moyennes latitudes.

Ce rythme alternatif, illustre l'importance du sens de l'équilibrage des pressions atmosphériques, entre l'océan et l'intérieur du continent, a deux périodes différentes de la saison hivernale.

Le long du littoral, durant la première période, le continent s'échauffe plus vite que l'océan, et une zone de basse pression y est créée ce qui provoque un courant d'air frais soufflant de la mer, vers la terre, d'où les vents de l'Ouest qui dominant (figure 46), c'est la période de brise de mer.

Pendant, la seconde période, la brise de terre s'établit du continent vers l'océan, ce dernier en se refroidissant plus vite que le premier avec la montée de l'isobare (1015) hPa, d'où les vents du secteur Est qui dominant.

Ces brises renforcent le vent général quant ils sont de même sens, et inversement, elles disparaissent lorsque le vent général est fort et opposé.

## 7. Capacité de transport « Gradient de Pression » :

Le vent se déplace presque parallèle aux isobares, et fait un angle avec ces directions. Cet angle est d'autant plus faible que la vitesse du vent est élevée. Il tourne dans le sens horaire autour de la cellule de haute pression dans l'hémisphère Nord. Le vent est d'autant plus fort que la distance entre les isobares est faible. Cette pente entre deux isobares s'appelle le Gradient de Pression (GP).

$$\text{GP} = \frac{P_A - P_B}{d}$$

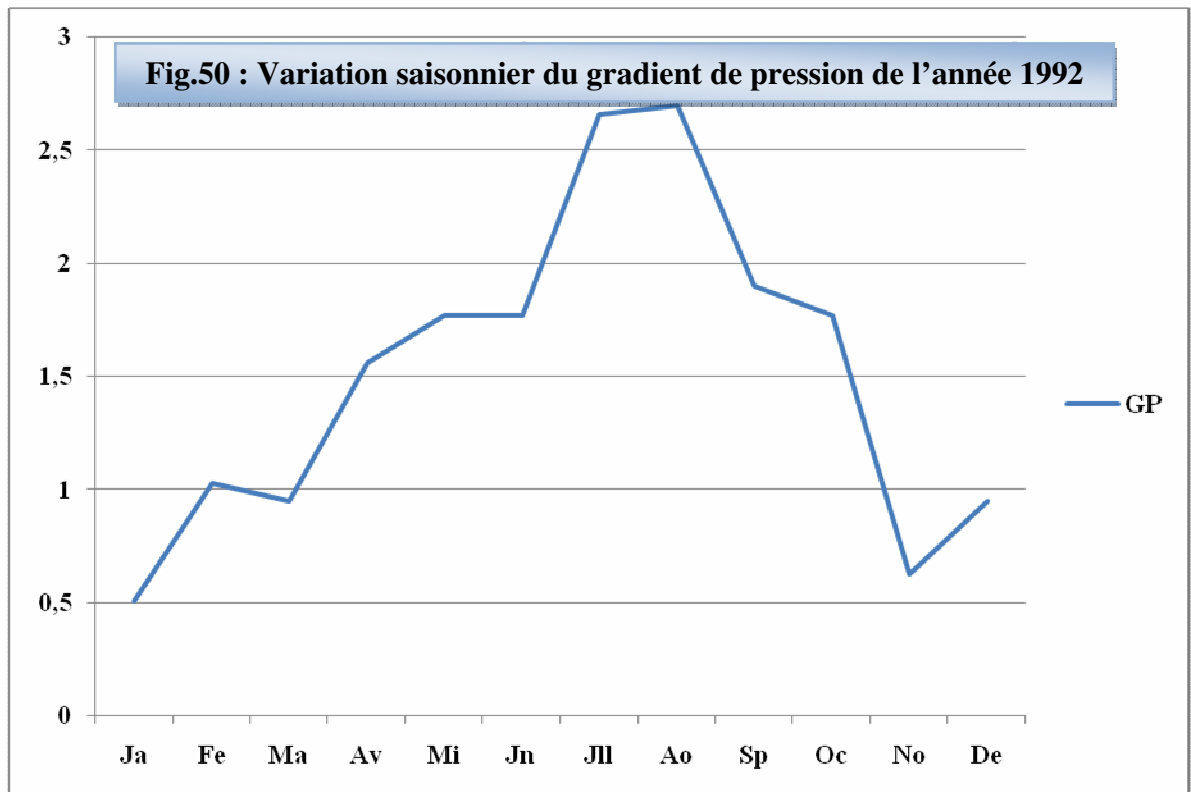
Avec :  $P_A$  : Pression en A (ramenée à l'altitude 0) mbar

$P_B$  : Pression en B (ramenée à l'altitude 0) mbar

$d$  : Distance entre deux points exprimée en degré d'arc de cercle  
( $1^\circ = 111 \text{ km}$ ).

### 7.1. Estimation du Gradient de Pression :

Effectué par *OULHRI, 1992*, le calcul des valeurs du gradient de pression (figure.50) à partir des cartes de pressions moyennes à la surface du sol (consultées à la Météorologie National de Paris).



Les vents qui engendrent des déplacements sableux sont essentiellement dus à l'anticyclone des Açores. En effet, les différentes positions des Açores et leur configuration peuvent expliquer le cycle de déplacement sableux. Les facteurs locaux (brise de terre et brise de mer) sont écartés sauf en hiver où la brise de terre vient renforcer le faible gradient de pression et semble participer aux déplacements sableux.

Afin de mettre en relief le lien entre la position et la configuration des Açores, une quantification de la charge et du transport sableux éolien s'impose. D'où l'appel à différentes méthodes d'estimation du flux sableux et leur évaluation pour en tirer les conclusions adéquates.

## 4<sup>ème</sup> Partie :

Evaluation des méthodes de lutte contre  
l'ensablement dans le système dunaire de  
Souss

# Chapitre I:

## DESCRIPTION DES METHODES

## INTRODUCTION :

La migration dunaire, constitue une source potentielle d'ensablement et un véritable danger pour les infrastructures socio-économiques. Afin d'évaluer son impact, d'en tirer les conclusions nécessaires, et pouvoir proposer les solutions adéquates : nous allons présenter les principales méthodes de lutte contre l'ensablement en montrant leurs portées et leurs limites :

- 1- Les méthodes traditionnelles.
- 2- Les méthodes modernes.

### I. LES METHODES TRADITIONNELLES

*HOUMYMID, 1981* distingue deux techniques intéressantes, basées sur les caractéristiques de l'écoulement éolien. La première utilisée pour les petites dunes de 1 à 2m de hauteur et l'autre pour celle de 2 à 6m de hauteur.

#### 1. Cas des accumulations sableuses

##### 1.2. La technique de « turbulence »

Elle consiste à déposer des pierres de 20 à 30 cm de diamètre le long de la crête des dunes. Lorsque le vent souffle, des turbulences se créent au niveau de chaque pierre. Ces turbulences accentuent l'énergie cinétique du vent et lui permettent de transporter plus loin les sables remis en mouvement. Au fur et à mesure que la dune s'érode les pierres descendent. Il en résulte que les petites dunes « accumulation sableuses » érodées dans leur partie supérieure diminuent progressivement jusqu'à leur disparition.

##### 1.3-La technique de « trou de transport »

Elle consiste à creuser des trous de dimensions suffisantes dans les parcelles ensablées. La terre alluviale extraite sert pour les clôtures et la construction, quant aux trous, ils sont ensuite comblés par le sable et remis en culture après planage.



#### 1.4. La technique de « submersion »

Elle consiste à profiter des eaux de crues pour inonder les parcelles ensablées puis d'évacuer sur l'oued les eaux chargées de sables au moyen d'un fossé conçu pour cette fin.

#### Constatation :

Les techniques précitées sont simples et efficaces. De plus, elles sont acceptées par la population puisqu'elles utilisent un matériel local, gratuit, disponible et ne nécessitent pas un encadrement technique. Mais elles ne sont valables que pour les faibles accumulations sableuses.

#### 2. Cas des migrations dunaires

L'accélération artificielle de la vitesse du vent est accrue par l'adjonction de la végétation exposée horizontalement sur des pierres. Lorsque le vent souffle, il est obligé de passer entre la crête de la dune et la végétation. L'énergie cinétique ainsi que son pouvoir érosif augmente brusquement. Les pierres et la végétation descendent simultanément au fur et à mesure que la crête de la dune s'érode.

*MOUTAOUKKEL, 1987* a mis en évidence les limites de ces techniques traditionnelles en montrant que ces méthodes ne peuvent pas faire face à l'avancée des fronts dunaires.

### II. LES METHODES MODERNES :

#### 1. Stratégie d'intervention

Pour une lutte efficace contre le phénomène de l'ensablement, la stratégie adoptée repose essentiellement sur les éléments suivants :

- ✓ Prospection et reconnaissance généralisée du terrain ;
- ✓ Inventaire général des sites menacés et ensablés ;
- ✓ Classification des lieux d'interventions par ordre de priorité en se basant sur l'efficacité des interventions ;

- ✓ Exécution technique par approche participative associant la population pour jouir d'une large coopération.

## 2. Les techniques de fixation des dunes :

Le principe est valable aussi pour la lutte contre les dunes continentales que littorale. D'une manière générale, trois méthodes de fixation sont les utilisées :

- ✓ La lutte mécanique;
- ✓ La lutte biologique ;
- ✓ La lutte chimique.

La lutte mécanique doit précéder les deux autres pour permettre la formation d'un front dunaire plus ou moins équilibré, les deux autres permettent une stabilité définitive. La lutte chimique est le dernier recours vu son coût prohibitif.

### 2.1. La lutte mécanique

Elle se base sur l'emplacement des obstacles, tels les palissades, dans la trajectoire éolienne. On assiste à une accumulation du sable autour de l'obstacle par le biais de la réduction de la vitesse du vent.

Deux types de palissades sont à distinguer :

- ✓ Celles qui détournent le vent et son changement autour de l'objectif.
- ✓ Celles qui provoquent le dépôt du sable avant qu'il n'envahisse l'objectif.

Pour cette lutte, les matériaux inertes, qui sont soit de type local : palmes, branchages..., soit de type industriel : plaques ondulées (en fibrociment, grillage...). Ces matériaux sont édifiés et rangés en réseaux.

HOUMYMID (1993) distingue deux cas :

- ✓ Réseaux en palissades linéaires dans le cas d'un vent dominant unidirectionnel.
- ✓ Réseaux en palissades sous forme de quadrat dans le cas d'un vent dominant bi ou multidirectionnel.

## **a/ La technique de palissades :**

Selon *HOUMYMID, 1993*, les palissades sont des obstacles linéaires exposés aux vents dominants pour en réduire la vitesse et provoquer à son niveau le dépôt et l'accumulation du sable transporté. Elles ont pour rôle d'amorcer la formation de dune artificielle, et qu'il s'agisse d'arrêt ou de défilement.

Pour une meilleure efficacité, les palissades doivent obéir à certaines normes. Elles doivent avoir une certaine perméabilité pour atténuer la vitesse du vent, tout en entraînant le dépôt de sable à leur niveau sans soulever de tourbillons.

*GANGABAINA, 1984* estime que la surface totale des vides doit être inférieure à 50% par rapport à la surface totale des palissades, à fin que les brèches aient une longueur suffisante pour permettre le passage libre des grains de sable. Ce dispositif devrait éviter la destruction de la structure de palissades par abrasion. La hauteur ne doit pas dépasser 1 à 1,20 m pour ne pas rendre l'ouvrage trop fragile.

### **✓ Les palissades d'arrêt :**

Elles servent à l'accumulation des sables en les stoppant. Leur position doit être toujours perpendiculaire à la direction des vents dominants pour déterminer la forme de la crête de la future dune artificielle. Les lignes de crêtes doivent être maintenues parfaitement horizontales.

### **✓ Les palissades de défilement :**

Appelées aussi palissades de déviation, elles ont un rôle de déviation du vent chargé des sables. Elles sont façonnées de manière à former un angle de 40 à 60° par rapport à la direction des vents dominants.

Il est nécessaire d'utiliser un matériel robuste, du fait qu'elles sont soumises à de fortes pressions. Ces palissades ont une longévité peu accrue, à cause du rehaussement de l'obstacle. La hauteur idéale de cette palissade est de 1 m et ne doit pas dépasser 1,50 m.

Dans les deux cas, le choix des matériaux est dicté par son coût et son efficacité.

#### **b/ La technique quadrillage :**

Elle est conçue pour la fixation des fronts dunaires et se justifie dans le cas des vents multidirectionnels. Le système de protection consiste en l'installation d'un réseau de palissades disposées en échiquier et porte le nom de quadrillage losangique. Les dimensions des quadrats varient en fonction de la dynamique éolienne, de hauteur de la dune et la nature des matériaux utilisées.

#### **c/ La technique de clayonnage :**

Elle consiste à placer sur le front dunaire, deux lignes de palissades espacées de 20 à 30 m, perpendiculaires à la résultante des directions moyennes des vents efficaces. Ceci est valable dans le cas des dunes homogènes à fronts continus. Dans le cas des fronts discontinus, une seule rangée suffit dans l'espace intermédiaire. Dans les deux cas, la hauteur de la palissade ne doit pas dépasser 1m.

#### **d/ La technique du reprofilage :**

Elle a pour but d'éliminer tout obstacle qui pourrait réduire la vitesse du vent et amener des dépôts de sable. Le reprofilage est utilisé dans le cas des bas côtés des routes, de canaux d'irrigation ou pour dégager n'importe quelle infrastructure socio-économique (*ABOUCHRIF,1990*).

Cette technique consiste à aplanir et écrêter les monticules de sable pour obtenir un profil dunaire régulier car la concavité et la convexité de la dune favorisent les tourbillons qui peuvent créer des excavations sur le front et former des petites dunes en aval. Le profil peut se faire manuellement ou au moyen d'un engin si la topographie du terrain le permet. Cette technique est coûteuse et nécessite un temps de travail énorme.

#### **e/ La technique de couverture par matériel végétal :**

En milieu littoral, la couverture se réalise par l'utilisation des sous produits forestiers (branchages).

La stabilité est obtenue, en déposant sur la dune des branchages assez touffus (généralement des branches de ratam de 3 à 4 ou de tamarix) imbriqués de telle sorte que

le vent ne les dénoue pas. Ces branchages forment une nappe plus ou moins continue sur la surface dunaire.

### **Conclusion :**

De toutes les techniques de la lutte mécanique précitées, le quadrillage s'est révélé le plus efficace comme intervention avant la fixation biologique des dunes.

Lorsque les opérations de la fixation mécanique arrivent à stabiliser le mouvement des sables, elles créent de nouvelles conditions stationnaires pouvant aider et favoriser l'installation d'une couverture végétale d'auto-fixation.

### **2.2. La lutte biologique :**

Avant tous travaux de fixation, il faut savoir que toute méthode qui vise à stabiliser les dunes a pour objectif de créer de nouvelles conditions pour que les plantes puissent se développer.

Les dunes possèdent une végétation naturelle spécifique et physiologiquement adaptée aux conditions locales, mais celle-ci disparaît à cause de la pression humaine et du changement des conditions climatiques.

Les plantes qui pourront remplacer cette végétation devraient être sélectionnées pour répondre aux exigences difficiles du milieu : vent efficace, mobilité du substrat et faible pouvoir nutritionnel, salinité et embruns salins, récurrente sécheresse...etc

Les espèces introduites devraient coloniser les dunes, améliorer le sol et par conséquent les stabiliser à long terme. On peut distinguer les groupements suivantes : les psammophytes, les halophytes, les xérophytes, les anémophytes et les calcicoles.

La composition floristique à donner est une fonction de :

- ✓ La proximité de la mer, la direction, l'intensité et la fréquence des vents.
- ✓ La situation topographique : la dune littorale, hauteurs de dunes, versants, exposés ou protégés, fonds de dunes.
- ✓ La nature du substratum, la nature et la comparaison des sables.
- ✓ La profondeur et la qualité de la nappe.

- ✓ La disponibilité des matériaux de fixation et la combinaison des méthodes de lutte.

La lutte biologique doit se baser sur le choix des espèces qui répondent aux conditions du milieu, sol, climat et topographie.

La végétation artificielle puisera l'eau essentiellement à partir de la nappe et des embruns marins, de ce fait, les plantes doivent avoir une certaine résistance à la salinité et au stress hydriques. Elles doivent également résister à l'ensablement et aux fortes températures. Elles doivent avoir une croissance rapide aussi bien en hauteur qu'en profondeur, le système racinaire doit être à la fois pivotant et traçant. Les espèces locales donnent toujours les meilleurs résultats.

Les techniques de multiplication et de plantation des espèces végétales jouent parfois un rôle déterminant dans la réussite de la fixation des dunes. La fixation biologique des dunes est une action qui intervient pour renforcer l'effet de la lutte mécanique. Cette dernière n'est pour la plus part des cas qu'un premier soin d'urgence à renforcer par un traitement plus efficace et durable basé sur des matériaux vivants, adaptés aux conditions écologiques du milieu à traiter.

*HAGEDON, 1977* distingue trois processus lors de la stabilisation végétale des dunes qui sont :

- ✓ La régénération naturelle du couvert végétal,
- ✓ Le développement semi naturel de la végétation,
- ✓ Le développement artificiel du couvert végétal.

#### **a/ La régénération naturelle du couvert végétal :**

Elle peut être réalisée par la mise en défens. Il s'agit d'une opération qui vise à reconstituer la végétation locale. Elle ne peut se concevoir dans le cas des milieux relativement stables sur le plan de la dynamique éolienne et des milieux favorables sur le plan écologique.

Cette technique intéresse plusieurs zones : les zones sources, les zones de transport et les zones d'accumulation. Lorsqu'on gère bien cette technique, elle peut à elle seule constituer l'essentiel de la protection. Elle doit être suivie dans une seconde phase par le développement de la vie animale qui a une importance majeure dans l'activité biologique dans le sol.

#### **b/ La reconstitution naturelle de la végétation:**

Elle consiste à supporter et à accélérer le développement naturel de la végétation par certaines façons culturales, telles que : l'aménagement de terrasses désignées à diminuer l'inclinaison du terrain afin d'en améliorer l'infiltration, l'addition des semences végétales, l'application de fertilisants et l'irrigation auxiliaire.

#### **c/ Le développement artificiel du couvert végétal :**

Après le choix définitif des espèces à installer selon les conditions du site, on a recours soit au semis direct qui permet l'installation d'une couverture végétale avec le minimum de dépenses, soit au reboisement par bouturage direct ou par plante élevée en pépinière.

### **2.3. La lutte physico-chimique :**

Divers produits et émulsions fixateurs de sable ont fait l'objet d'essai au niveau des pays de la région notamment en Libye, en Egypte et en Algérie. Parmi ces produits figurent le bitume, le pétrole brut, l'huile, les émulsions plastiques...etc., leur application se fait généralement par pulvérisation. Ces produits chimiques imprègnent le sable traité formant ainsi une pellicule de protection, semi-perméable à la pluie et suffisamment résistante aux vents (*HOUMYDID, 1993*). Cette technique est très coûteuse.

## Chapitre II:

# EVALUATION DES METHODES



# I. EVALUATION DES PROGRAMMES DE LUTTE CONTRE L'ENSABLEMENT DANS LA PLAINE DE SOUSS -MASSA.

## 1. Le cordon littoral.

La première opération date de 1929, les services des Eaux et Forêts ont entrepris l'opération de fixation par l'installation d'une palissade en branchage d'une hauteur de 1,2m sur l'estran, laquelle a été rehaussée à chaque accumulation des sables l'envahissaient. Ce qui a été à l'origine de la création d'un cordon dunaire artificiel le long de la plage sur une distance de 14 km et d'une vingtaine de mètres de hauteur. Actuellement, plusieurs points d'effondrement provoqués par la houle ou par la destruction de la face abrité du cordon sont constatés le long du cordon littoral.

## 2. Les brises vents.

La deuxième opération effectuée en 1957, caractérisée par la plantation de brise-vent en alignement multiple pour lutter contre l'érosion éolienne et les vents chauds de l'Est « Chergui » qui affecte les terres agricoles de la plaine de Chtouka. Ces alignements formés de 4 bandes d'*Eucalyptus gomphocephala* de 6 mètres d'espacement 6mètres et orientées NW-SE.

Sur la plaine de Souss notamment, le littoral, ces alignements sont parallèles à la ligne de rivage, orientés NNE-SSW pour lutter contre l'érosion des vents de l'West « Sahel » ou « Gharbi ». Les arbres de l'Eucalyptus n'ont pas donné de résultats satisfaisants à cause de leur inadaptation aux conditions climatiques locales.

Un autre programme a été lancé pendant 1975-1976 par l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole dans la le Périmètre de Souss-Massa à travers l'implantaion d'un réseau de brise-vent pour protéger le pirimètre irrigué de Massa.

Ce programme prévoyait :

- Un quadrillage de chaque ilot d'irrigation de 220m sur 384m.
- Haie le long de la route (de chaque ilot).
- Haie le long du canal principal.

- L'espèce retenue pour ces plantations était *Cupressus sempervirens*. Cet arbre a donné des résultats satisfaisants dans le Souss par rapport à Massa. Car dans le Souss le Cyprès dispose de meilleures conditions pédologiques que dans le Massa. En plus, le cyprès nécessite un arrosage périodique pendant plusieurs années à la charge des exploitants. Ce coût financier d'entretien subit par les exploitants, la nature des sols défavorables et les vents chauds de l'Est ont été à la cause de l'élimination de la majeure partie de ces arbres.

### 3. La fixation des du système dunaire.

La méthode de fixation utilisée consistait à combiner la lutte mécanique et la lutte biologique :

- ✎ **La fixation mécanique** des sables est réalisée par l'étalage de branchage de rétama ou de tamaris, sur la surface des dunes. Cette stabilisation consiste à renforcer légèrement les branchages dans les sables de façon à orienter la partie ramifiée en aval et la tige dans le sens des vents dominants. Cette méthode a donné des bons résultats grâce à l'abondance du matériel localement.
- ✎ **La fixation biologique** débute dès la formation d'un tapis végétal herbacé. Cette opération a commencé par l'implantation de l'eucalyptus de 2000 plants par hectare puis on réduit la densité à 800. Une deuxième phase consiste à mélanger l'eucalyptus et l'acacia avec une densité de 800 à 2000 plants par hectare ces deux interventions ont permis de retenir l'acacia à des densités réduites pour laisser la place à la fixation mécanique pour contenir l'érosion éolienne.

### Discussion

Devant la reprise accrue du phénomène de l'ensablement, ces mêmes méthodes de fixations entreprises font l'objet actuellement des critiques avancées à l'encontre de l'eucalyptus et l'acacia jugés porter préjudices à l'environnement par la provocation de la nappe.



Photo n° 1: Fixation du cordon littoral par une palissade en branchage



Photo n° 2: Fixation des dunes par brise de vent par *Eucalyptus*



Photo n° 3: Envaselement des terres agricoles



Photo n°4 : Envaselement du canal d'irrigation de Massa.

**Fig.51 : Limites des techniques de fixation des dunes dans le système dunaires de Sous-Massa**

## Chapitre II:

### PROPOSITION DES METHODES

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La plaine de Souss présente un climat à caractère aride qui résulte du cadre montagneux élevé (Haut Atlas et Anti Atlas), de la proximité de l'Océan et de la latitude saharienne. Cette dualité se traduit par un régime éolien bidirectionnel dominé par les vents froids de l'ouest « Sahéli » et les vents chauds de l'Est « Chrgui »

La sédimentologie a montré que l'environnement sédimentaire du système dunaire de Souss est contrôlé par trois dynamiques (fluviale, marine et éolienne) et d'autre part que le matériel sableux du système dunaire de Souss est issu des apports détritiques fournis par les crues de l'Oued Souss, véhiculé jusqu'à son embouchure, capté par la dynamique marine qui sous l'action, de la houle et les courants qui lui sont associés l'entraîne vers le Sud par une dérive littorale N-S, avant d'être repris et remanié par la dynamique éolienne qui l'évacue vers l'est à l'intérieur de continent sous formes d'édifices dunaires donnant la forme actuelle du système.

Les processus de la dynamique éolienne mis en évidence par les tests de *VICHER* et de *FREIDMEN* qui ont montré respectivement que le transport éolien se fait essentiellement par saltation et l'érosion éolienne s'exerce par la déflation qui est à l'origine du tri par degré d'amenuisement et par vannage des tests réduit à l'état de poussière « loess » vers la périphérie du système

L'élaboration des trois cartes évolutives d'occupation du sol au 1/10.000<sup>ème</sup> du site expérimental situé au niveau du système dunaire de Souss, des années 1969, 1986 et 1990 a montré les limites différentes opérations de fixation des dunes. En effet, les barkhanes continuent de progresser avec une vitesse annuelle de 5 à 10 m/an, les paraboliques est de 2 à 4 m/an et les dunes transversales est de 2 m/an. L'ensemble de ces édifices sableux se déplace sous forme de courants sableux orientés ONO-ESE.

La forte urbanisation au Nord de l'embouchure de l'oued Souss a rompu l'équilibre sédimentaire du système. Ce qui a accentué le phénomène de l'ensablement

vers le sud. D'où la nécessité de mise en place d'un dispositif de lutte qui doit être intégré dans une vision globale d'aménagement littoral Souss-Massa .

La modélisation du déplacement potentiel sableux (*FRYBERGER, 1979*) a permis de distinguer le «régime des vents» de celui «du déplacement sableux », c'est-à-dire différencier les vents dominants des vents efficaces qui sont capables de générer des déplacements sableux. Ainsi, le régime des vents au niveau du système dunaire de Souss est "bidirectionnel" où les vents dominants proviennent essentiellement des deux secteurs Ouest et secondairement de l'Est. Alors que le régime des déplacements sableux est "uni modale" où les vents efficaces sont issus du secteur Ouest.

La variabilité directionnelle (CT/MR est de 0,45) témoigne d'une migration qui se fait essentiellement sous forme des dunes transversales et paraboliques et secondairement de barkhans, selon une direction du potentiel de migration MR (112°N) ONO-ESE.

L'étude expérimentale de la charge éolienne par les capteurs de piégeage des sables de type B.N.S.F (Big Spring Number Eight), développé par *FRYREAR, 1986* a confirmé les résultats sus obtenu, en montrant que:

- La fixation mécanique au nord du système et biologique pratiquée au niveau du transect C, a baissé les moyennes annuelles des charges de sables (1,06g) alors que celles des autres transects B et A situés plus au sud du système sont respectivement de l'ordre de (173,78 g) et (227,65g).
- La répartition verticale de la charge éolienne qui mis en relief la dominance du mode de transport par saltation (63,15%) des sables captés à 15 et 50 cm du sol .
- Les principaux facteurs qui interviennent dans la répartition de la charge demeurent la hauteur de la dune et leur distance à la source de l'ensablement qui correspond à l'embouchure de l'oued de Souss.

- La stratégie d'intervention de lutte contre l'avancée des sables dans la plaine de Sous , nécessite des interventions de fixation ciblant les zones d'activité des premiers dunes paraboliques et transversales du transect A, suivies des dunes du transect B et en dernier lieu les barkhanes du transect C . Celles-ci même si les quantités captées sont faibles, constituent par leur vitesse annuelle de migration (10m/s) et leur proximité de l'infrastructure de base, un danger pour les champs de cultures, les canaux d'irrigation, les routes... etc., alors qu'elle n'est que 4m/s pour les paraboliques et 2m/s pour les transversales qui se situent en amont et proche de la source d'approvisionnement du système dunaire.



# RECOMMENDATIONS

## RECOMMANDIONS :

Les méthodes d'étude du déplacement sableux qui sont couramment utilisées ne permettent pas de distinguer la dynamique éolienne, puisqu'il s'agit des mesures ponctuelles et très délicates à spatialiser, c'est pourquoi nous appelons à des méthodes directes et plus interactives telle que celle qui repose sur les capteurs de piégeage des sables de type B.S.N.E standard.

Ainsi, un tel dispositif nécessite de disposer d'un minimum de plus de trois capteurs pour améliorer le calcul du véritable flux horizontal des sables en intégrant la hauteur des capteurs. D'autre part seule le flux vertical par la méthode du gradient qui demande de mesurer en plus du profil du vent et de la température, la concentration d'aérosol en suspension de la couche de saltation.

Concernant les opérations de lutte contre le phénomène de l'ensablement, toute intervention doit:

- Reposer sur une meilleure connaissance des processus de la dynamique éolienne. Cibler les zones vulnérables notamment les aires de déflation et de transport éolien.
- Coïncider avec la période pluvieuse et la saison des vents inefficaces. Fixer les dunes par le branchage au niveau des sommets en commençant par les dunes les plus rapides.
- Essayer de contrôler le cordon littoral de l'Ouest vers l'Est et du Nord vers le Sud.
- Renforcer la fixation mécanique par une fixation biologique avec une densité raisonnable pour assurer la consolidation de la surface du sol en utilisant momentanément les espèces ayant démontré leur capacité d'adaptation à des milieux similaires tout en cherchant à les améliorer par une sélection appropriée à la base des espèces autochtones.

- Accompagner ces opérations de fixation par des actions d'entretien systématique. Effectuer des reprofilages des zones vulnérables ainsi que les crêtes des dunes lors de la première intervention.
- Mettre en défens les trois formations du système dunaire de Souss pour atténuer l'impact de l'action de l'homme pour donner plus de chance à la régénération de la végétation naturelle et adaptée.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Abouchrif H., 1999. Evaluation de la charge des vents et de l'efficacité de trois types de palissades d'arrêt dans la région d'Ejorf. Errachidia. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle I.A.V. Hassan II, Rabat. 96p.
- Aboulkhair Y.M.S., 1981. Sand engroachment by wind in Al-Hasa of Saudi Arabia. Indiana University Ph. D. L'University Microfilms international. 196p.
- Adele, B., 1998. Genèse du système dunaire des Chtoukas del'Est, Maroc. Thèse, Univ. Nancy2, 226 pp.
- Allen J.R.L. 1972. Intensity of deposition from avalanches and loose packing of avalanche deposits. *Sedimentology* 18, p. 105-111.
- Ambroggi, R., 1963. Etude géologique du versant méridional du Haut-Atlas occidental et de la Plaine du Souss. Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc n°157, Rabat, 321 p.
- Ambroggi R., 1983. Etude géologique du versant du Haut-Atlas Occidental et de la plaine de Souss. Notes et mém, serv, Ged. Maroc, Rabat. P. 157-320.
- Atbib M., 1989. La végétation du littoral du Maroc Septentrional. Direction des Eaux et Forêts. Rabat. 163 p.
- Bagnold R.A., 1941. *The Physics of bown sands and desert dunes*. London, Methuen and Co. Ltd. 265 p.
- Bagnold R.A., 1951. Forme des dunes de sable et régime des vents. Coll. Int. Du aC.N.R.S., n° 35. Paris, Ed C.N.R.S. p. 23-32.
- Bagnold R.A., 1973. *The physics of wind blown sand and desert dunes*. J. Wiley and sons, New York, 265 p.
- Barrada, M.,1996. Evolution morphologique du littoral desChtoukas-Ouest (Maroc) depuis l'Ouljien. Thèse, Univ.Nancy2, 231 pp.
- Battistini, R.,1964. Etude géomorphologique de l'Extrême Sud de Madagascar. Edit. Cujas, Paris, 635 pp.
- Beadnell H.J.L., 1910. The sand of dune of de Libyan desert. *Geographical Journal*, n° 35, p. 379-395.
- Bencherifa, S., 1980. Chtouka et Massa, une région du Souss en cours de transformation. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, université Mohamed V. Ed Imp Fédala. Mohamadia, Maroc, 226 p.
- Bhiry N., 1989. Origine et diagenèse des sédiments quaternaires dans la vallée moyenne de Souss. Maroc. Sci, Ged, Mem, 84p.
- Bucher D. Dragan et Hagedon H.1984. Les sables éoliens, modèles et dynamiques, la menace éolienne et son contrôle. *Schriftenreihe der. GTZ*, n° 162, 7708.
- Cailleux A et Tricart. J., 1959. Initiation à l'étude des sables et des galets. C.D.U. Paris, 3 volumes.
- Cairson A., 1964. Observations et expériences faite en avril et mai 1956 sur les barkhanes du Soushel et Abiod, région de Port-Etienne. *Bull de l'I.F.A.N., Dakar. Sénégal*. 26 A. n° 3. p. 989-1022.
- Callot Y.,1987. Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas saharien au Grand Erg occidental : Dynamique éolienne et palélacs holocènes. Thèse de doctorat d'Etat. Paris 6, n° 87-21. 412 p. P.U.F, 564 p
- Campy M. et Macaire, J., 1989. Géologie des formations superficielles géométriques – faciès – utilisation. *Les formations éoliennes*. P. 260-292.
- Capot-Rey , 1963. Contribution à l'étude et à la présentation des Barkhanes. *Travaux de l'institut de recherches sahariennes*, n° 22. p. 37-60.
- Cassimi A., 1985. Erosion au Maroc. *Revue Lamatif*, n° 25.p. 20-22.
- Chahboun A., 1988. Les systèmes de formation des sédiments autour des embouchures des oueds Tensift, Ksob et Souss du Haut Atlas Atlantique. Thèse, C.N.R.S, Paléoclimats et paléoenvironnements en milieu aride, Univ.P. et M.Curie, Paris. 174 p.
- Charbert G., 1963. Histoire géologique. T.I Notes et mém, serv, Ged. Maroc n° 162, 352 p.
- Charif, A., 1993. Le système dunaire vif en rive gauche de l'oued Souss, Maroc. Mémoire de DEA, Université Nancy2, 51 pp.

- Charif, A., 2001. Les cônes plio-quaternaires du piémont nordde l'Anti-Atlas occidental (Maroc) et leur évolution récente. Thèse, Univ. Nancy2, 350 pp.
- Chepil W.S., 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Sorl Sci.* 60: 305-320.
- Chepil W.S., 1958. Soil conditions that influence wind erosion. U.S. Departement. Agr. Tech. Bul. P. 1184-5.
- Choubert G., 1956. Essai de classification du quaternaire continental du Maroc. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 243, n° 5, p. 504-506.
- Clos-Arceud A., 1969. Essai d'explication des formes dunaires sahariennes. Etude de photo-interprétation, n° 4, I.G.N. 66 p.
- Combe M. El Hebil A., 1977. La vallée du Souss. Notes et mém, serv, Ged. Maroc, Rabat n° 231.
- Coudé-Gaussen, Rognon G. et Weisrock, A., 1982. Evolution du matériel sableux au cours de son déplacement dans un système dunaire. les barkhanes du Cap Sim, Maroc. *C.R. Académie des Sciences, Paris*, 295, 621-624.
- Coudé-Gaussen, G et Rognon, P., 1993. Sédimentation éolienne et changements climatiques au Maroc atlantique entre les oueds Tensift et Massa depuis 20 000 ans. *C.R. Académie des Sciences, Paris*, t. 316, 1469-1475.
- DE Martonne E. 1952. Sur la formule de l'indice d'aridité. *C.R. Acad. Sc. T.* 200, p. 166-168.
- Dijon R., 1969. Etude hydrologique et inventaire des ressources en eau de la vallée de Souss. Notes et mém, serv, Ged. Maroc, Rabat, n° 214, 257 p.
- Dubeif Y., 1952. Le vent et le déplacement des sables au Sahara .Alger. *Trav. Inst. Rech. Sah.*, t.8, p.123-164.
- Duval J., 1986. Aménagement et gestion des dunes du nord de la France. Ministère de l'environnement. France. 60 p.
- El Mouden., 1992. Modalité de l'altération météorique et conséquence sur la qualité des apports fluviaux en zone subaride, le bassin versant de l'oued Souss Maroc. Thèse de D.E.S 3<sup>ème</sup> cycle. Univ Mohamed V. Rabat. 120 p.
- El Yousfi S.M., 1988. la dégradation forestière dans le Sud Marocain. Exemple de l'arganeraie d'Admine dans la plaine du Souss entre 1969 et 1986. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. Foresterie, I.A.V Hassan II. Rabat. 177 p
- Emberger L., 1936. Une classification biogéographique des climats. *Recueil. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sci. Montpellier*, n° 7, p. 3-43.
- Emberger L. et Gausson G. 1962. Carte bioclimatique dans la région méditerranéenne au 1/5000000. Paris, UNESCO.
- Errabih S., 1987. Guide floristique des principales espèces du parc national du Massa. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle I.A.V. Hassan II. Rabat. 106 p.
- Faroult S. et Simon. D., 1986. Fortran structuré et méthodes numériques. Bo-Pre. Dunod, informatique. P. 205-248
- Ficher A.G. 1969. Stratigraphie record of transgressing sea in light of sedimentation on Atlantic coast of New Jersey. *Am. Assoc. Petrol.* P.1713-1721.
- Finkel H-J. 1959. The barkhanes of southern Peru. *Journal of Geology.* N° 7: 614-647.
- Folk R.L., 1971. Longitudinal dunes of the north western edge of the Simpson desert, northern territory, Auatralia, 1. Geomorphology and grain size relation ships. *Sedimentology.* 16: 5-54.
- Folk. R.L., 1965. A review of grain size parameters. *Sedimentology*, n° 6, p. 73-93.
- Folk. R.L. and Ward. W.C. 1957. Brazors river bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. of. Sed. Petr.* V. 27: 3-26.
- Freidman G.W., 1961. Distinction between dune, beach and river sands from their seas. *Geological survey professional paper*, V 31: 514-529.
- Fryberger .S.G, Al Sari A.M., Clishman T.J.m Rievis A.R. and Al Hinai KG. 1984. wind sedimentation in the Jfurah sand seas. Saudi Arabia. *Sedimentology.* N° 31: 413-431.
- Fryberger S.G., 1979. Dunes froms and wind regime. In: A study of global sand and seas. *Geological survey professional paper*, 1052: 137-169.

- Fryrear D.W., 1986. A field dust sampler (B.N.S.E samplers). Journal of soil and water conservation. March-April 1986. Volume A1, N°2.
- Fryrear D.W., 1987. Bloom trapping, methods, sand deflation, and deposit quantification. Projet rab 86-034. Actes du deuxième atelier Ouarzazate (Maroc) : 143-168.
- Gangbaina S.L., 1984. La lutte contre l'ensablement et la désertification dans la vallée de Draâ. Bilan de lutte. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle Agronomique option Eaux et Forêts. I.A.V Hassan II. Rabat.
- Ghanem H. 1956., Monographie pédologique de la plaine de Souss. Ronéo, Direction Recherche Agronomique, Rabat. Maroc. 5 volumes.
- Glennic K.W., 1970. Desert sedimentary environment. Elsevier, Amsterdam, n° 14 :222 p.
- Glennie, K.W., 1970. Desert sedimentary environments. Developments in Sedimentology, 14, Elsevier edit., 222 pp.
- Hagedon., 1977. Dune stabilisation. A survey of literature on dune formation and dune stabilisation. Geographics Universitat Wurzburg. p. 119-141; p. 178-183.
- Hastenrath S.L., 1987. The barkhan sand dune of south Peru revised. Z. Gemorph. N.F. n° 31: 167-178.
- Houmymid M., 1981. Problèmes éoliens dans les vallées de Draâ, Ziz et Gheris, Manifestations et luttes. Rapport Eaux et Forêts. Rabat. Maroc.
- Houmymid M., 1993. Guide des techniques de lutte contre l'ensablement. Projet RAB/98/084. FAO : 91p.
- Inman D.L., 1952. Measures of describing the size distribution of sediments. J. Sedim. Petrol. Vol. 22: 125-145.
- Inman D.L., Ewing G.C. et Corliss J.B. 1966. Coastal sand dunes of Guerrero Negro Baja Calif. Mexico. Bull. Geol. Soc. Am. 77 (8): 787-802.
- JELLOULI D., 1989. Désertification menaces et défis. Offices Régional de mise en valeur Agricole de Souss-Massa. Maroc. 32 p.
- Khardi A., 1992. Evaluation de l'efficacité de la mise en défense pour la lutte contre l'ensablement. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. I.A.V Hassan II. Rabat.
- Khatteli H., 1983. Projet IPAL, actes du séminaire sur les problèmes de l'érosion éolienne dans les zones prédésertiques. Djerba. Tunisie.
- Lancaster N., 1982. Dunes ou Skelton Coast, Namibia (South West Africa), Geomorphology and grain size relationships, earth surface processus and land forms vol.7: 575-587.
- Larras J., 1957. Plages et côtes de sables. Edit. Evrolles. Paris.
- Legigan P. Leribault L. et Montron S. 1979. Fluval quartz grains exoscopy. Time span for acquisition of the grains surface. Comptes rendus de l'academie des sciences série II, vol 309, n° 6 : 575-581.
- Lerbault L., 1977. L'exoscopie des quartz, techniques et méthodes sédimentologiques., éd Masson. Paris : 150 p.
- Long J.T. and Sharp R.P., 1964. Barchan dune movement in Imperial Valley. California. Bull. Gol. Sco. Am. 75: 149-156.
- Mainguet M., 1984. La connaissance de la dynamique éolienne d'envahissement des palmeraies des oueds Draâ, Ziz et Rhris. Ouarzazate.
- Mainguet M., 1993. Cours universitaire sur l'érosion, l'ensablement et leur contrôle. Stabilisation des dunes de sables et reboisement. Projet RAB/89/034. FAO.
- Mainguet M. et Jaofar B. 1993. Analyse du système global d'action éolienne et des mouvements du sable. Rapport GTZ., Zagora : 22 p.
- Mallyani., 1988. cartographie et évaluation de la dégradation des types de peuplements entre 1963 et 1987 dans la forêt de Médiar (Région de Tanger). Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. I.A.V Hassan II, département Forestier. Rabat : 105 p.
- Mc Kee E.D., 1966. Structures of dunes at white sands national monument, New Mexico (and comparison with structures of dunes from ather selected areas). Sedimentology. 7: 1-69.
- Métro. J., 1952 techniques de fixations et de mise en valeur des dunes du littoral atlantique marocain. Université Mohamed V, Rabat.

- Migniot C.L., 1966. Recherche de la capacité de transport d'une rivière par des études sédimentologiques des dépôts. Comptes rendus séances Ass. Sédim. Français, groupe A, Paris, p. 12-16.
- Moss A.J., 1962. The physical nature of common sandy and pebbly deposits. American journal of science, 260, 337-73.
- Moutaoukkel A., 1987. Etude du processus de l'ensablement et de la dynamique éolienne dans la palmeraie de Fezouata (Zagora, Maroc). Mémoire 3<sup>ème</sup> cycle I.A.V Hassan II Rabat. Maroc.
- Noris R.M., 1966. Barchan dunes of Imperial Valley. California. Journal of Geology 74: 292-306.
- Oliva, P., 1972. Aspects et problèmes géomorphologiques de l'Anti-Atlas occidental. Revue de Géographie du Maroc, 21 : 43-78.
- Olivia P., 1972. Aspects et problèmes géomorphologiques de l'Anti-Atlas occidental, R.G.M, n° 21 : 48-77.
- Ouchcham B., 1996. Transit littoral et évolution morpho sédimentaire de la côte atlantique Sud Marocaine entre le Cap Juby. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Université Mohamed V. Fac Sci Rabat.
- Oulehri T., 1992. Etude géodynamique des migrations de sables éoliens dans la région de Laâyoune (Nord du Sahara Marocain). Thèse de doctorat. Université de Pierre et Marie Curie. (Paris VI) : 223 p.
- Perriaux J., 1961. Contribution à la géologie des Vosges gréseuses. Mém. Ser. Carte géotechnique, Strasbourg, n° 18 : 236 p.
- Petelier J.P., 1982. végétation du bassin versant de l'oued Souss, Institut Montpellier : 210 p.
- Petrov M.P., 1976. Deserts of the world. New York. J. Wiley and Sons, 447 p.
- Ribi.M., 1987. Projet d'aménagement et du développement du Parc National de Souss-Massa, relevés floristiques. Eaux et forêts d'Agadir. Maroc.
- Rohdenburg H., 1977. Neue 14C Daten aus Marokko und Spanien und ihre Aussagen für die Relief und Bodenentwicklung im Holozän und Jungpleistozän. Catena,4 : 215-228.
- Sarnthein M. and Walger E., 1974. Der aolishe sandshom ans der w-sahara zur atlantikkuste. Geologische Rundschau, 63: 1065-1087.
- Sauvage. 1963. Etages bioclimatiques du Maroc. Atlas du Maroc, sect II. Planche n° 66, carte, notice explicative : 44 p.
- Schoenenberger A., 1994. Utilisation de végétation naturelle dans la vallée de Draâ. Zagora. Rapport GTZ : 28p.
- Shoussi., 1985. Géochimie et minéralogie des sédiments fins. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, sci de la terre, université Mohamed V. Rabat.
- Siddoway F.H., 1963. Effect of cropping and tillage methods on dry aggregate soil structure. Soil sci. soc. Am. Proc. 27: 452-454.
- Sidi Mahmoud Ould Sidi., 1988. Evaluation de l'efficacité de quelques méthodes de lutte contre l'ensablement (cas de trois types de palissades d'arrêt à Zagora. Maroc). Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle I.A.V Hassan II. Rabat.
- Smith J.D., 1970. Stability of a sand wave subject to a shear flow of a low frouide number. Journal of Geophysical Research 75: 5928-40.
- Stalling J.H., 1951. Mechanics if wind erosion. Soil conservation. Service S.O.S-TP- 103-Washington.
- Tannouch-Bennani, S., 1994. Etude morpho-sédimentaire de lacoupe de Sidi Ali ben Ali, rive gauche de l'oued Souss, Maroc.Mémoire de DEA, Université Nancy2 : 68 pp.
- Tannouch-Bennani, S., 2002. Paléo-playas plio-quaternairesdu Souss central (Maroc), et leurs recouvrements récents.Thèse, Univ. Nancy2: 360 pp.
- Thomas D.S.G. 1992. Desert dunes activity: Concepts and significance. Journal of arid environments, 22: 31-38.
- Thomas. Y.F., 1975. Actions éoliennes en milieu littoral. La pointe de la courbe. Mém. Laboratoire de géomorphologie. Ecole pratique des hautes études, Dinard, n° 29 : 146 pp.
- Tinley, K.L. 1985. Coastal dunes of South Africa. CSIR, Pretoria : 300 pp.



- Tsoar H., 1974. Desert dunes morphology and dynamics, El-Arish, northern Sinai. *Zeitschrift für Geomorphologie*, supplement and 20 : 41-61.
- Vatan A. 1967. *Manuel de sédimentologie*. Edit technip, Paris : 397 p.
- Watteew R., 1964. Les sols de la plaine, du Souss et leur réparation schématique au 1/500.000. Tire à part, Al Awamia, Rabat, Maroc, n°10 : 151-185.
- Weisrock A., 1982. Signification paleoclimatique des dunes littorales d'Essaouira Cap Sim (Maroc). *Rev. Geomorphol. Dynam.*, XDCM.3 : 91-108.
- Weisrock, A, Delibrias, G., Rognon, P. et Coudé-Gaussen, G.1985. Variations climatiques et morphogenèse au Marocatlantique (30-33°N) à la limite Pléistocène-Holocène. *Bull.Soc. Géologique de France*, 8 : 565-569.
- Weisrock, A, Occhietti, S., Hoang, C.T., Lauriat-Rage, A., Brébion, Ph., Pichet, P. 1999. Les séquences littorales pléistocènes de l'Atlas atlantique entre le Cap Rhir et Agadir, Maroc. *Quaternaire*, 10 : 227-244.
- Weisrock, A., 1980. *Géomorphologie et paléo-environnement de l'Atlas atlantique, Maroc*, Thèse, Paris, 931 p, et *Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc*, n°332, Rabat, 1993 : 487p.
- Wood A., 1999. *Introduction to numerical Analysis*. Addison Wesley: 65-68.
- Zakirov R.S., 1982. Prevention of sands drifts on railways, roads and irrigation systems. Moscow, USSR. Carter of international projects.
- Zhu Ahenda., 1987. Sand dunes studies and its stabilization in China. *Projet Rab 86-034. Ouarzazate. Maroc*: 1-13.