

VEGETATION ET FIXATION DES SABLES
EN ZONE ARIDE

F. BENDALI *, A. EL HAMROUNI **, C. FLORET *, E. LE FLOC'H *, R. PONTANIER ***

SÉMINAIRE SUR LA LUTTE CONTRE LA DÉSSERTIFICATION

JERBA, 24-29 NOVEMBRE 1986

* C.E.P.E. LOUIS EMBERGER BP 5051 34033 MONTPELLIER, FRANCE

** I.R.A., MÉDENINE, TUNISIE

*** ORSTOM, 18 RUE CHARLES NICOLLE, TUNIS, TUNISIE

VEGETATION ET FIXATION DES SABLES EN ZONE ARIDE

(Table des matières)

<u>INTRODUCTION</u>	page 1
<u>1. RELATIONS SOL-VEGETATION DANS LES MILIEUX A SABLES MOBILES</u>	page 3
1.1. CARACTERISATION ET DYNAMIQUE DES SABLES MOBILES DANS LES FRANGES PREDESERTIQUES	page 3
1.1.1. Caractéristiques physico-hydriques et chimiques des sols de déflation et d'accumulation.....	page 4
1.1.2. Quelques données sur la dynamique et le modelé des sables éoliens - Influence de la végétation.....	page 15
1.2. ADAPTATION DES VEGETAUX AU SABLE MOBILE - MODALITES DE SA FIXATION PAR LA VEGETATION	page 24
<u>2. VEGETATION ET SABLE MOBILE EN JEFFARA TUNISIENNE</u>	page 27
2.1. APERCU GENERAL SUR LES STEPPES A <u>RHANTHERIUM SUAVEOLENS</u> EN TUNISIE	page 27
2.2. LA STEPPE A <u>RHANTHERIUM SUAVEOLENS</u> DE LA JEFFARA : DYNAMIQUE DE LA VEGETATION ET DES SABLES	page 27
2.2.1. Typologie des milieux de la steppe à <u>Rhantherium suaveolens</u> de la Jeffara	page 30
2.2.2. Schéma dynamique des milieux de la steppe à <u>Rhantherium suaveolens</u> dans la Jeffara	page 30
2.3. ADAPTATION AU SABLE MOBILE DES ESPECES PERENNES PRINCIPALES DE LA STEPPE A <u>RHANTHERIUM SUAVEOLENS</u> DE LA JEFFARA.....	page 38
2.3.1. Critères de morphologie aérienne	page 39
2.3.2. Critères de morphologie racinaire.....	page 43
2.3.3. Classification des espèces étudiées en fonction de leur aptitude à fixer et à recoloniser les sables mobiles	page 46

3.	<u>ASPECTS PRATIQUES DE LA FIXATION DES SABLES A L'AIDE DE LA VEGETATION</u>	page 50
3.1.	REGENERATION ET FIXATION PAR MISE EN DEFENS DANS LES ZONES SABLEUSES	page 50
3.1.1.	Les-expériences tunisiennes.....	page 51
3.1.2.	La régénération en zone sableuse dans d'autres régions arides	page 55
3.2.	ESPECES LOCALES UTILISEES POUR LA FIXATION DES SABLES	page 65
3.3.	QUELQUES PRINCIPES D'INTERVENTION POUR LA FIXATION DES SABLES EN ZONE ARIDE TUNISIENNE (ESSENTIELLEMENT EN JEFFARA)	page 71
3.3.1.	Principes de zonage pour une cartographie à grande échelle	page 71
3.3.2.	Exemple de zonage en Jeffara : tableau de diagnose.....	page 73
3.3.3.	Exemples de traitements à réaliser	page 76
	<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	page 81
	<u>Liste des tableaux et figures</u>	page 90

INTRODUCTION

Les techniques de fixation des sables utilisées actuellement sont souvent basées sur la création d'un obstacle pour ralentir le vent et provoquer le dépôt du sable ; des plantations arbustives sont ensuite réalisées lorsqu'une certaine stabilisation est obtenue. Ces techniques s'utilisent en particulier lorsque les infrastructures sont menacées (routes, villages). Il s'y ajoute l'utilisation des dérivés du pétrole ou autres substances épandues sur le sable pour le fixer. Une bonne revue de toutes les méthodes est donnée par HAGEDORN et al. (1977), et de nombreuses expériences réalisées dans différents pays sont relatées dans le rapport FAO/DANIDA (1974) cité en référence. Il faut noter le coût habituellement élevé de cette fixation. Par ailleurs, la fixation mécanique n'a qu'une durée de vie limitée et le sable n'est vraiment fixé durablement que si un couvert végétal a pu être installé.

Pour installer un couvert végétal, ou bien la simple mise en défens temporaire suffit (associée ou non à une fixation mécanique), ou bien il est nécessaire de réinstaller artificiellement ce couvert par plantations ou semis. Il y a donc tout intérêt à bien connaître la dynamique du sable et de la végétation naturelle de la zone à traiter, afin de diminuer autant que possible l'appel aux techniques coûteuses de plantation.

Par ailleurs, pour la plantation fixatrice des sables, il convient de chercher à utiliser les meilleures espèces au moindre coût (à la pépinière, à la plantation et à l'entretien). On fait souvent appel à des espèces exotiques qui ont fait leurs preuves ailleurs ou dans le pays et on doit en effet les utiliser lorsqu'elles sont les plus performantes. Il n'empêche qu'il faille aussi rechercher dans la flore locale celles qui peuvent être employées pour cette fixation. Les espèces locales sont en général mieux adaptées aux conditions écologiques de la région (sécheresse prolongée par exemple) et peuvent se reproduire naturellement dans leur lieu d'origine. Les espèces exotiques ont en effet souvent des difficultés à se reproduire. En revanche, les espèces locales poussent parfois moins vite que certaines espèces exotiques, leur multiplication en pépinière ou la récolte de leurs graines peut être difficile, etc.

Il faut donc choisir les espèces les mieux adaptées à chaque condition écologique. La tolérance au sel, par exemple, peut être un critère de sélection pour une zone donnée.

Ailleurs, où les possibilités d'irrigation sont nulles, il faudra s'orienter vers le semis direct à la période optimale. Dans les zones les plus sèches, on recherchera les espèces les plus résistantes à la sécheresse, même si leurs possibilités de croissance sont plus faibles que pour d'autres.

Les objectifs de cet article, qui a trait à la fixation des sables par la végétation en zone aride, sont les suivants :

- donner un aperçu des relations sol-végétation dans les milieux sableux, en particulier dans les milieux sableux mobiles ;
- préciser le rôle de la végétation naturelle dans la fixation des sables ;
- montrer, grâce à une étude de cas réalisée en Jeffara tunisienne, quelle peut être la dynamique de la végétation et des sables dans une région soumise à une forte pression humaine, et quelles sont les espèces qui sont impliquées dans cette fixation ;
- montrer comment des espèces résistent ou disparaissent face à la mobilité du sable et par quels mécanismes certaines d'entre-elles sont mieux adaptées que d'autres à la fixation ;
- passer en revue les principales espèces locales ou exotiques utilisées dans quelques pays des zones arides ;
- faire le point des expériences relatives à la régénération naturelle de la végétation en zone sableuse dans des mêmes pays afin de réfléchir sur le temps nécessaire à cette régénération ;
- donner un exemple de la façon dont peut être réalisé le zonage d'une région à traiter pour la fixation du sable (sur la base de la morphologie des édifices sableux, de la mobilité du sable et de la végétation) et suggérer les traitements possibles pour chaque zone.

1. LES RELATIONS SOL-VEGETATION DANS LES MILIEUX A SABLES MOBILES

Les milieux à sables mobiles des régions arides présentent, à deux niveaux, des relations ou interactions spécifiques entre la végétation et le substrat édaphique :

- (i) Les sables mobiles, en raison de leurs caractéristiques physico-hydriques, et de la grande diversité et instabilité de leurs formes, constituent un ensemble original dénommé "aérosols" (ESCADAFAL, 1986), offrant à la végétation des conditions particulières (en matière de régime hydrique, de niveau trophique, de stabilité des volumes exploités par les végétaux) très diverses et variables, qui nécessitent de celle-ci des adaptations particulières.
- (ii) La végétation, elle-même, dans ces milieux fragiles et mobiles joue un rôle déterminant dans le ralentissement des phénomènes de déflation et dans la fixation des sables et des dunes.

Ce sont ces deux aspects que nous proposons d'aborder dans ce § 1.

1.1. CARACTERISATION ET DYNAMIQUE DES SABLES MOBILES DANS LES FRANGES PREDESERTIQUES

Les vastes espaces dunaires et les paysages d'ergs des déserts ne seront pas abordés ici ; seules sont concernées les franges prédésertiques où les processus de désertisation, par éolisation des couches superficielles des sols, sont en train de se déclencher, ou sont même déjà bien avancés. Ces franges sont approximativement comprises entre les isohyètes 100-250 mm au nord du Sahara et 200-400 mm au sud du Sahara. Elles sont souvent le lieu d'activités humaines importantes, qui sont fortement compromises par la formation de nouveaux aérosols, toujours plus fragiles que ceux dont ils sont issus (FLORET et PONTANIER, 1982),

D'une façon générale, au nord du Sahara, cette désertisation en rapport avec l'érosion éolienne se manifeste (i) sur les zones de départ (déflation) par l'ablation ou la diminution de l'épaisseur du sol exploitable par la végétation, et la régression du couvert végétal et (ii) sur les zones d'accumulation par l'ensevelissement de la

végétation et/ou des cultures et l'apparition d'une morphologie particulière du terrain. En réalité, il s'agit là de deux situations extrêmes, il existe de nombreux cas où les processus de la déflation et de l'accumulation s'interpénètrent sur des surfaces de dimensions parfois très restreintes.

1.1.1. Caractéristiques physico-hydriques et chimiques des sols de déflation et d'accumulation

Dans tous les cas, les caractéristiques des matériaux constituant les nouvelles formes en zone d'accumulation sont différentes de celles des matériaux des zones dont ils sont issus par déflation.

En particulier les nouvelles formes d'accumulation (voiles, flèches, nappes, dunes, etc...) présentent :

- * une granulométrie plus grossière, avec une nette tendance à la disparition des fines (fraction 0 à 0,050 mm),
- * une densité apparente plus élevée, liée à la destructuration et à la non organisation des dépôts (structure à arrangement particulière),
- * une fragilité et une sensibilité à l'action des vents plus élevées,
- * une baisse des capacités unitaires de stockage de l'eau utile à la végétation,
- * une perméabilité excessive,
- * des régimes hydriques originaux et contrastés,
- * une baisse de la teneur en matière organique,
- * en relation avec la disparition des fines, une baisse générale des teneurs en CaCO₃ et autres sels solubles, et une baisse de la capacité d'échange.

Globalement, on assiste donc sur ces nouvelles formes à une chute brutale de la fertilité et à une modification profonde des régimes hydriques (BOWERS, 1982 ; FLORET et PONTANIER, 1982 ; KHATTALI, 1981 ; Academia Sinica, 1978 ; ESCADAFAL, 1981).

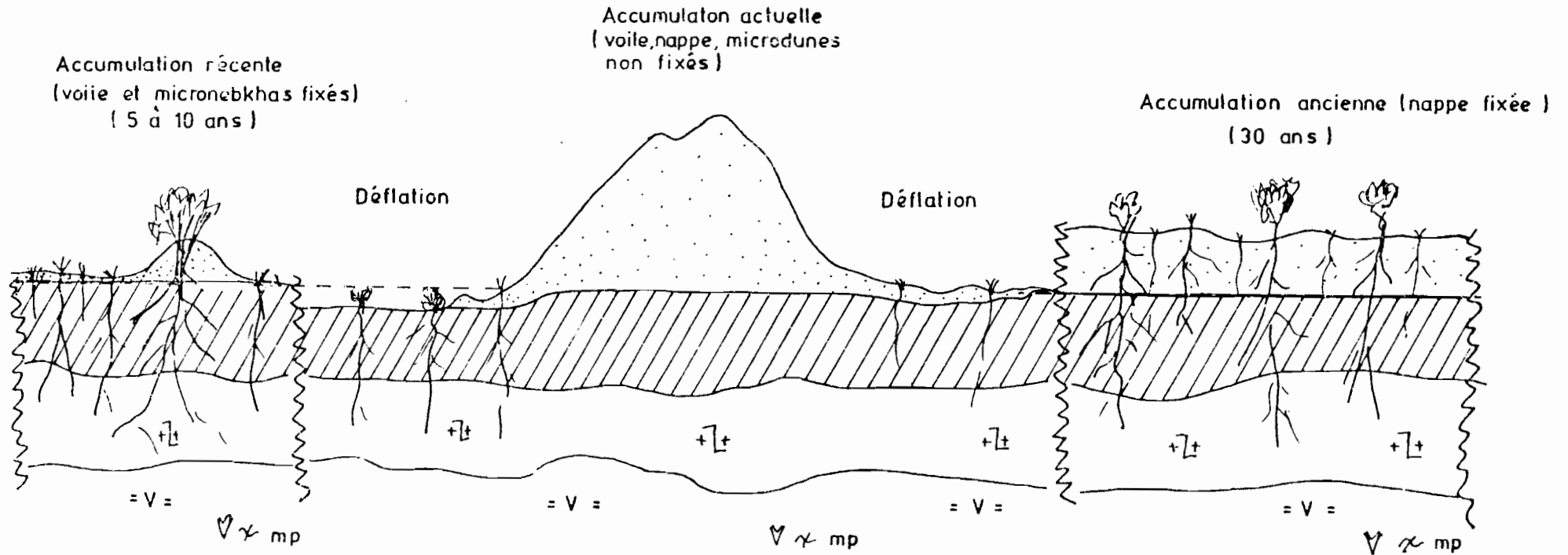
A titre d'illustration, nous analyserons sur une séquence d'une steppe à Rhantherium suaveolens (Tunisie du Sud) se développant sur un siérozem sableux profond, l'impact des phénomènes d'éolisation sur les propriétés et caractéristiques de l'épipédon des sols (horizon de surface) ainsi que les modifications du fonctionnement hydrique du sol. Cette analyse est faite sur quelques situations de micro-paysage coexistant sur le même secteur écologique. Pour simplifier, nous nous sommes limités à quatre situations contrastées (figure n° 1).

Il s'agit :

- (i) de la situation à accumulation récente (5 à 10 ans), en équilibre instable, où l'épipédon est représenté par des matériaux éolisés fixés par la végétation, prenant la forme de voile et de micronebkas recouvrant le siérozem ; le couvert végétal est supérieur à 25 %, la steppe est considérée en bon état ;
- (ii) de la situation à déflation et ablation, actuelle ou ancienne, "source" de sable, où l'épipédon est représenté par l'horizon A1 du siérozem tronqué ; le recouvrement de la végétation y est faible : 5 à 10 % ;
- (iii) de la situation à accumulation actuelle, où l'épipédon est représenté par des formes très mobiles de sable (voiles, nappes, microdunes...) ; le couvert végétal y est inférieur à 1 % et l'espace entre les formes d'accumulation est souvent représenté par la situation précédente ;
- (iv) de la situation à accumulation ancienne (30 ans environ), où la recolonisation par la végétation d'une nappe de 60 cm d'épaisseur a été réalisée ; le couvert végétal y est compris entre 15 et 25 %.

Le tableau n° 1 et la figure n° 1 donnent les différentes caractéristiques et propriétés de l'épipédon des quatre situations. La figure n° 2 est une illustration globalisant les caractéristiques physico-hydriques de l'ensemble du sol, ainsi qu'une appréciation comparée des régimes hydriques des sols en début de saison des pluies. Il s'agit de la simulation d'une pluie de 50 mm dont le coefficient d'efficacité dans la recharge des réserves en eau du sol (FLORET et PONTANIER, 1984) a été de 100 % ; la réserve d'eau disponible pour la végétation a été mesurée 15 jours après sa date d'occurrence.

Fig 1 SCHEMA MONTRANT LA DISPOSITION DES MATERIAUX ET LEUR EOLISATION
 DANS LA STEPPE SABLEUSE A RHANTHERIUM SUAVEOLENS .REGION DE ZOUGRATA (Tunisie)



LEGENDE




- | | | | |
|---|---|-------|---------------------------------|
|  | Matériau sableux d'accumulation | = V = | Encroûtement calcaire-gypseux |
|  | Matériau sableux à sablo-limoneux (A1 Sierozem) | ∇xmp | Miopliocène gypseux |
|  | Matériau sablo-argileux à nodules calcaires | --- | Ancienne surface avant ablation |

Tableau n° 1 : CARACTERISTIQUES COMPAREES DE QUELQUES MATERIAUX EOLISES - REGION ZOUGRATA (TUNISIE)
(d'après FLORET et PONTANIER, 1982)

EPIPEDON	GRANULOMETRIE (Classe en mm)					STRUCTURE FRAGILITE	DENSITE APPARENTE	HUMIDITE (Hv%) à		RESERVE UTILE de 10 cm POUR VEGETATION (mm)	DIMINUTION CAPACITE STOCKAGE EAU %	%	%	
	< 0,002	0,002 0,020	0,020 0,050	0,050 0,2	0,2 2			0,5 bars CC	0,16 bars PF					m.org.
Horizon A ₁ Siérozem (Zone déflation ou sous forme d'accu- mulation) (> 50 ans)	8,0	5,0	10,0	71,0	5,0	Polyédrique, moyenne, peu développée Fragile	1,41	14,5	5,5	9,0	0	0,65	15,6	
ACCUMULATION EOLIENNE	Récente Micro-nebkha et voile fixés par végétation (5 - 10 ans)	3,0	1,5	4,0	84,0	7,0	Très peu structuré Très fragile	1,58	7,6	2,5	5,1	43	0,30	12,6
	Actuelle micro-dune nappe, voile pas de végéta- tion	1,9	1,5	3,5	86,1	7,0	Non struc- turé boulant Formes très instables	1,65	3,9	1,8	2,1	77	0,10	11,0
	Ancienne Nappe fixée par végétation (30 ans)	4,0	5,0		80,0	8,0	Structure peu déve- loppée tendance polyédrique Fragile	1,53	10,9	4,1	6,8	24	0,42	13,6

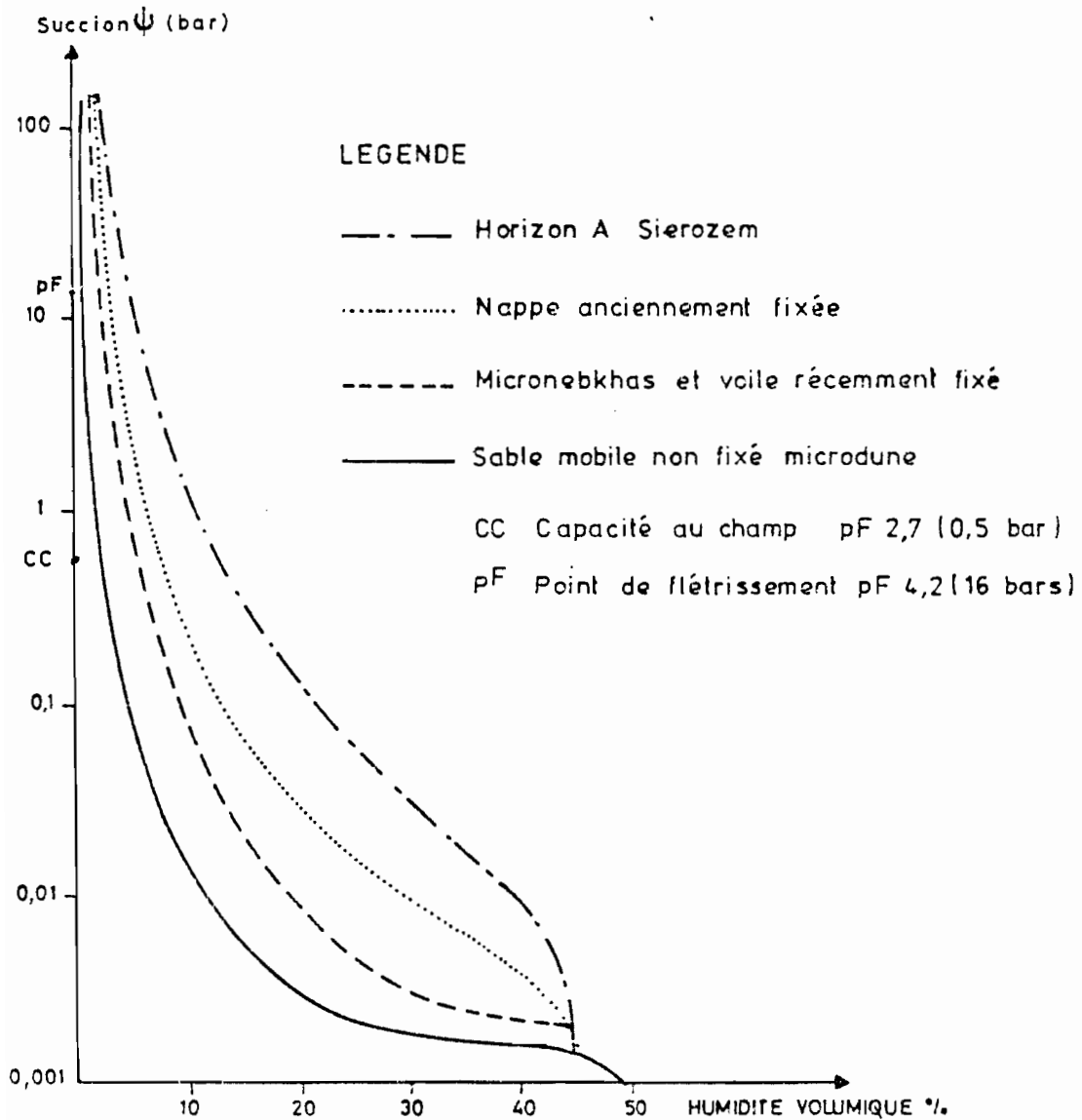


Fig. 2 Courbes caractéristiques d'humidité de quelques matériaux éolisés en fonction du potentiel matriciel (Région de Zougrata)
 (D'après FLORET et PONTANIER 1982, FLORET et al 1982)

Changement dans la nature des sols

De ceci, il ressort que, au niveau des épipédons soumis à l'éolisation, on observe, entre la forme "stable" de la séquence (A1 du Siërozem) qui fournit le matériel d'accumulation et la forme de dépôt éolien actuelle :

- . une diminution de la teneur en "fines" de 70 % ;
- . une diminution de la teneur en matière organique de 85 % ;
- . une diminution de la capacité de stockage de l'eau utile de la végétation de 77 %. Ainsi l'ablation de 10 cm sur l'épipédon du siërozem correspond à une perte de RU (Réserve Utile) de 9 mm, alors que le dépôt de 10 cm de matériel éolisé représente la reconstitution d'une RU de l'ordre de 2,5 à 3 mm.

Par contre, on constate que les dépôts retrouvent une partie de leurs potentialités avec le temps, et cela à condition que la végétation puisse se réinstaller, à l'occasion de bonnes années sur le plan de la pluviosité et de l'abaissement de la pression humaine et animale sur l'environnement immédiat. Ainsi l'ancienne nappe fixée par la végétation, sans revenir aux conditions initiales, récupère pratiquement 75 % des potentialités édaphiques.

Ces dernières remarques vont dans le même sens que celles effectuées à l'occasion d'une synthèse sur les observations et mesures réalisées en Chine durant vingt années sur des dunes traitées (Academia Sinica, 1978).

Parmi ces remarques, les auteurs citent le cas de dunes, dans la région de Chingpien qui, au bout d'une vingtaine d'années de traitement (non pas seulement par fixation mais par mise en valeur avec irrigation, travail du sol, fertilisation), voient leurs caractéristiques chimiques et physiques radicalement changées, dans le sens d'une remontée biologique (Tableaux n° 2 et 3). On assiste, en particulier, à une augmentation spectaculaire de la teneur en "fines" particules.

Sans aller jusqu'à prendre ce cas extrême, nécessitant d'énormes moyens, les mêmes auteurs citent le cas de stabilisation plus classique avec arbres et arbustes qui conduisent à

Tableau n° 2 : CHANGEMENT DANS LA COMPOSITION GRANULOMETRIQUE DE SOLS SABLEUX DUNAIRES APRES LEUR NIVELIEMENT PAR UN COURANT D'EAU.
 (in Academia sinica, 1978)
 (Yangchiaopan Production Brigade, Chingpien County)

TYPE DE SOL	TAILLE DES PARTICULES		1 - 0.25	0.25 - 0.05	0.05 - 0.01	0.01 - 0.005	0.005 - 0.001	Moins que 0.001
	PROFONDEUR (cm)							
Sables mobiles	0 - 5		9.46	82.23	0.66	0.52	0.60	6.43
Dunes	5 - 25		2.70	88.77	2.91	0.61	0.61	4.40
Dix ans après traitement	0 - 12		4.13	17.14	47.59	9.83	5.49	15.82
	12 - 13		2.42	7.38	54.70	23.69	2.29	9.52
Vingt ans après traitement	0 - 15		1.98	7.72	54.90	7.71	7.71	20.08
	15 - 40		12.98	66.82	0.65	5.26	0.60	4.69

Tableau N° 3 : CHANGEMENTS DANS LA TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS DE SOLS SABLEUX DUNAIRES APRES LEUR NIVELLEMENT PAR UN COURANT D'EAU.

(in Academia sinica, 1978)
(Yangchiaopan, Chingpien County)

NOMBRE D'ANNEES APRES TRAITEMENT	PROFONDEUR (cm)	MATIERE ORGANIQUE (%)	ELEMENTS NUTRITIFS TOTAUX %			ELEMENTS NUTRITIFS DISPONIBLES (mg/100 g sol)		
			N	P	K	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	0 - 13	0.214	0.026	0.064	1.57		1.1	9
	13 - 24	0.086	0.063	0.042	1.07	3.79	1.1	7
	24 - 50	0.064	0.016	0.006	1.56	2.38	1.2	6
11	0 - 26	0.706	0.042	0.076	1.66	3.70	0.9	17
	26 - 49	0.278	0.037	0.030	1.18	3.44	0.7	8
17	14 - 30	0.788	0.087	0.082	1.94	5.29	0.8	20

des résultats moins spectaculaires, mais cependant très encourageants (Tableau n° 4).

Modifications des régimes hydriques

La figure n° 3 montre bien la diversité des situations hydriques pour un même secteur (en particulier de même pluviosité), mais présentant plusieurs formes d'accumulation éolienne. La modification des propriétés physico-hydriques des matériaux éolisés entraîne des comportements hydriques différents qui dépendent en outre :

- de l'épaisseur des dépôts,
- de la nature du substrat sur lequel ils reposent,
- de l'âge et de l'état de la réorganisation du sol en voie de recolonisation.

Cependant, ces différentes formes éoliennes gardent quelques traits communs ; elles présentent toutes une capacité de stockage faible, des coefficients d'infiltration très rapides (1), permettant d'absorber la quasi totalité des pluies sans pertes par ruissellement, mais aussi ne permettant pas de garder de l'eau près de la surface.

En outre, l'infiltration rapide dans ces sols, permet de limiter considérablement les pertes par évaporation, en raison d'un "self mulching" important. Par contre, les disponibilités en eau doivent être très vite utilisées dans les horizons supérieurs, car elles sont éphémères (BOWERS, 1982), en outre elles sont très faibles et ne peuvent suffire à des végétations de biomasses élevées à enracinement superficiel.

(1) Des essais de simulation de pluie sur ces matériaux éolisés montrent des intensités d'infiltration avoisinant 80 mm/heure.

Tableau n° 4 : CHANGEMENT DES CARACTERISTIQUES DU SOL EN SURFACE APRES
6 ANS DE FIXATION DES DUNES MOBILES.

(Wushenchao People's Commune)
(in Academia Sinica, 1978)

TYPES DE SOL	TAILLE DES PARTICULES < 0.05 mm	DENSITE APPARENTE (g/cm ³)	POROSITE (%)	AGGREGATS SECS > 1 mm (%)	MATIERE ORGANIQUE (%)	ELEMENTS NUTRITIFS (%)		
						N	P	K
Dunes mobiles	3.31	1.69	36.2	0.2	0.098	0.033	0.05	2.82
Dunes stabilisées avec <i>Salix cheilophila</i> et <i>Artemisia ordosica</i>	15.38	1.57	40.6	7.8	0.168	0.063	0.060	3.00

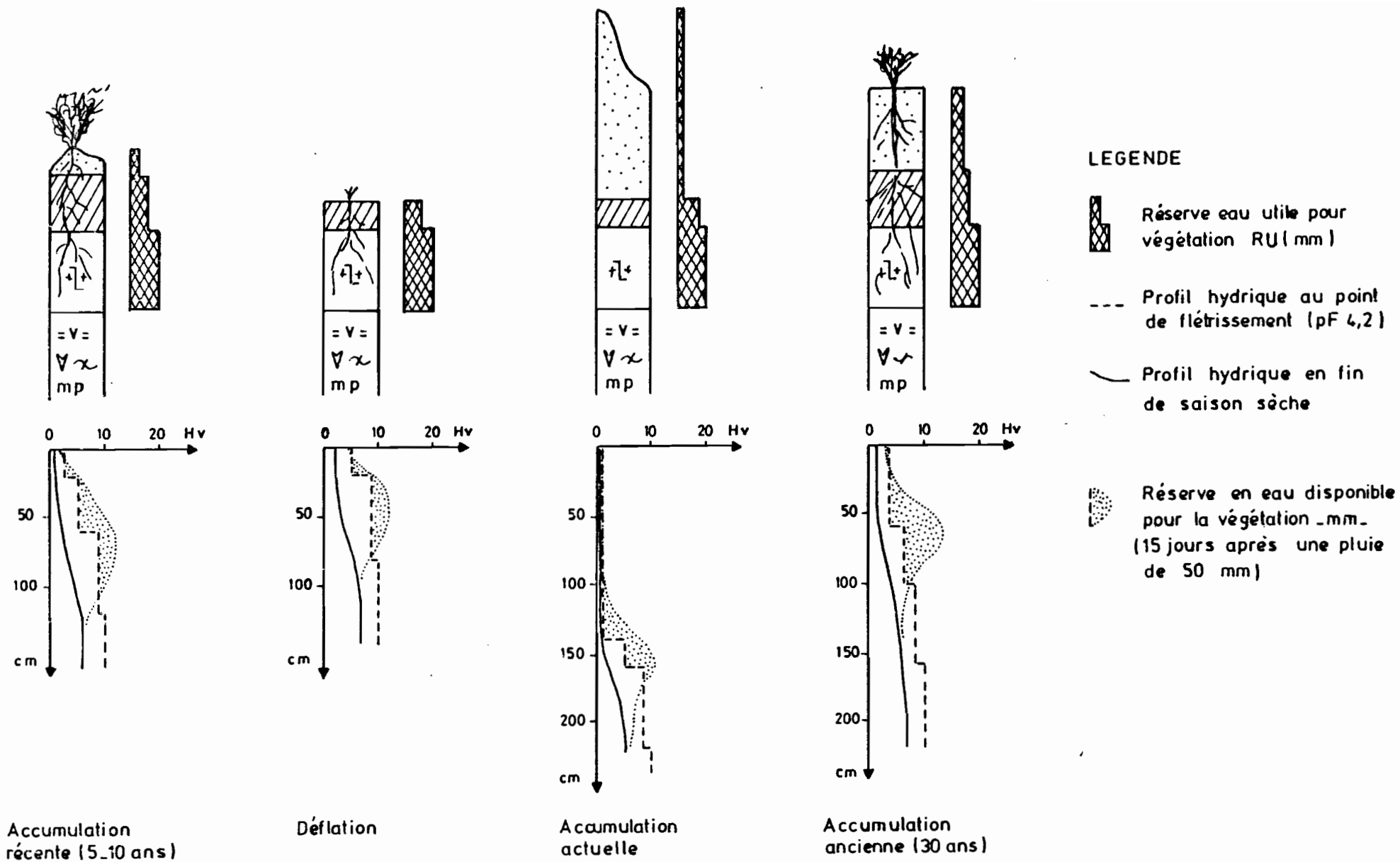


Fig. 3 COMPORTEMENT HYDRIQUE COMPARE DE QUELQUES MATERIAUX EOLISES
 REGION DE ZOUGRATA (Tunisie) (D'après FLORET et PONTANIER 1982)

Concernant la localisation en profondeur et l'importance des réserves disponibles à la végétation, on constate l'intérêt qu'il y a, avant toute action de développement, de connaître la nature physique de l'assise.

1.1.2. Quelques données sur la dynamique et le modelé des sables éoliens - Influence de la végétation

La dégradation du milieu en rapport avec l'érosion éolienne se manifeste par la diminution du couvert végétal et l'ablation des sols dans les zones de déflation, et par l'apparition d'une morphologie particulière du terrain due à l'accumulation des sables. Dans les franges prédésertiques, ces phénomènes présentent une ampleur moindre que dans les déserts, et leur manifestation non encore généralisée se présente sous forme de taches pouvant cependant dépasser l'ordre du km². L'ensemble des causes et processus conduisant à ces situations a déjà été décrit (CHEPIL et WOODRUFF, 1963 ; LE HOUEROU, 1969 ; UNESCO, 1983 ; FLORET et PONTANIER, 1982 ; KHATTALI, 1981 ; MAINGUET, 1978).

Suivant l'ampleur des phénomènes d'érosion, de transport et d'accumulation, et en fonction d'une fixation possible naturelle par la végétation, les différents auteurs (COQUE, 1962, 1977 ; MAINGUET, 1978 ; TRICART et CAILLEUX, 1969 ; LE HOUEROU, 1985 ; KHATTALI, 1981 ...) distinguent différentes formes d'édifices sableux : voiles, nappes, flèches isolées ou coalescentes, nebkas, micronebkhas, dunes, barkanes, rehboub. Ces auteurs ne s'accordent pas totalement sur la terminologie d'un même objet.

Dans le tableau n° 5, il est proposé une typologie propre à la Jeffara tunisienne. C'est cette typologie qui a été utilisée pour la caractérisation et l'étude de la dynamique des milieux de cette zone (§ 2.) et pour la proposition d'une zonation des espaces à traiter (§ 3.3.2.).

Ces différentes formes types se présentent généralement associées sur le terrain et leur association est souvent un indicateur de dégradation, d'équilibre plus ou moins stable, ou de remontée biologique (§ 2.2.).

Tableau 5 : TYPES DE FORMES EOLIENNES SABLEUSES EN TUNISIE.

HAUTEUR EN CM	FORMES FIXEES PAR LA VEGETATION	FORMES MOBILES
< 1	-	Voile éolien
1 - 10	-	Voile et nappe
10 - 50	Micronebkhas	Flèches (rheboub)
50-100	Mésonebkhas	Microdunes
> 100	Macronebkhas	Dunes et/ou barkhanes

Le vent, agent dynamique et constant des modelés éoliens

Avant d'aborder les données concernant les vitesses d'ensablement et d'ablation, il est nécessaire d'effectuer un rappel sur le rôle du vent, qui sera emprunté à KHATTALI (1981).

"L'action du vent s'exerce au stade de l'ablation, du transport et du dépôt. L'ablation s'exprime par la déflation (soulèvement individuel des particules) et par la corrasion (action mécanique exercée par des vents violents fortement chargés d'abrasifs : en général, il s'agit des sables quartzeux). Le transport des particules n'intervient qu'à partir d'une vitesse critique précise, fonction à la fois de leur calibre et de leur densité (COQUE, 1977). Ses modalités varient selon la force du vent et la taille des éléments. Les particules supérieures à 0,1 mm de diamètre sont transportées par saltation et/ou roulage ; ce dernier affecte seuls les grains de plus de 1 mm. Ceux qui sont compris entre 0,1 mm et 0,03 mm ne sont mobilisés qu'en suspension. Au-delà de 0,03 mm, l'entraînement individuel des particules devient impossible, par suite de la cohésion assurée par l'absorption éventuelle de l'humidité atmosphérique et surtout de l'existence d'une pellicule d'air stagnante protectrice au niveau du sol (COQUE, 1977). La saltation représente le mode de déplacement des sables le plus important puisqu'il assure environ les 3/4 du transport éolien (TRICART et CAILLEUX, 1969). Le dépôt se déclenche lorsque la vitesse du vent tombe au-dessous de la vitesse limite nécessaire au transport. Les modes de dépôt diffèrent selon les modes de déplacement. Il s'effectue, en général, par piégeage des éléments grossiers et simple saupoudrage des poussières (COQUE, 1977)".

On a beaucoup discuté sur ces vitesses limites (BAGNOLD, 1954 ; MAINGUET, 1978 ; COQUE, 1977). On admet aujourd'hui que tout vent dépassant 3 m/s peut être considéré actif pour les modelés éoliens. L'efficacité de ces vents est proportionnelle à leur vitesse. "Ainsi, il a été démontré que si la vitesse passait de 24 km/h à 34 km/h, le déplacement potentiel de la quantité de sable transporté augmentait de 10 fois, et de 100 fois si cette vitesse passait de 24 à 56 km/h. En outre, un vent soufflant d'une façon continue à une vitesse de 56 km/h déplacera autant de sable dans une journée qu'un vent continu de 28 km/h pendant trois semaines".

Vitesses d'ensablement, d'érosion

Concernant les vitesses d'ensablement, on peut citer FLORET et al (1978), mesurant des ensablements de 100 T/h en 5 mois avec des pointes de 48 t/ha en 26 jours en Tunisie présaharienne. En 1986, sur le site de Saadane (Tunisie), sur des dunes non fixées, on a observé, suite à des avalanchements, des ensablements de 20 cm d'épaisseur en quelques jours.

En matière de troncature, ou d'érosion éolienne, les chiffres sont aussi importants. LE HOUEROU (1969) cite sur les steppes sableuses à Rhantherium suaveolens de Ben Gardane, Sidi Toui, Tatahouine, des valeurs annuelles moyennes de troncature de sol, établies sur 10 ans de 150 à 225 t/h. FLORET et al. (1978) avancent toujours pour les mêmes formations des troncatures moyennes de 75 à 100 t réalisées en 4 mois (février à mai). KHATTALI (1981) note une perte en sol moyenne de 120 t/ha (entre décembre et juin) pour une parcelle emblavée en orge.

On peut dire qu'en moyenne l'érosion des steppes sur sable en Tunisie présaharienne se situe dans la fourchette 75 à 225 t/ha/an, correspondant à une troncature annuelle moyenne de 5 à 15 mm. Aux Etats-Unis pour les dunes de Kelso, SHARP (1966) donne des chiffres d'accumulation de 8 à 22 cm en 34 jours et des chiffres d'érosion (déflation) de 10 à 48 cm pendant la même période. Sur des barkanes de White Sands, Mc KEE et DOUGLAS (1971) ont mesuré des vitesses d'accumulation de 4 cm/heure durant les tempêtes de sable. Enfin, insistons sur le fait que les processus d'érosion ou d'accumulation ne se produisent que quelques jours dans l'année, et qu'il n'est pas rare d'avoir en 2 ou 3 jours près de 70 % de l'apport annuel, et que surtout ils ne sont pas uniformément répartis.

La mobilité des formes éoliennes

En zone prédésertique, il est fréquent de voir une voie de communication coupée, ou un champ envahi par des accumulations sableuses, qui ne s'y trouvaient pas quelques semaines voire quelques jours auparavant. Cette mobilité est un facteur à prendre en compte lors des aménagements.

Pour illustrer ces remarques, on empruntera encore à KHATTALI, les résultats de travaux menés sur un champ de dunes mobiles dans la partie méridionale de la Jeffara (station de Rouag), dans une zone où la steppe à Rhantherium suaveolens était dégradée par surpâturage, et où le secteur des dunes

mobiles (barkanes) ne représentait que 11 % de la surface. Le tableau n° 6 montre l'ampleur du déplacement, en 6 mois, de 3 barkanes : la plus petite s'est déplacée de 19 m, dont 7 m pour le seul mois de janvier. REMPEL (1936), pour les dunes de Salton Sea en Californie, cite des déplacements de 15-25 m par an. SHARP (1966), pour les dunes de Kelso (U.S.A.), indique que des dunes allant et venant parcourent environ 100 m/an avec des amplitudes moyennes de 12 m.

Rôle de la couverture végétale

La végétation d'une région est fortement marquée par les pratiques sociales (céréaliculture, surpâturage, éradication). Les équilibres qui en résultent s'avèrent de plus en plus précaires au fur et à mesure que la dégradation de la végétation est accentuée (réduction du couvert végétal total, de la densité des individus, ...). Une telle régression de la végétation s'avère à terme très néfaste, la végétation en place (et sa litière déposée au sol) permettant non seulement de réduire ou d'annuler la déflation éolienne mais également de favoriser les accumulations sableuses. La réduction de la teneur en sable de l'air provient en effet du phénomène de "décharge". Le vent, dont la vitesse a été réduite, n'est plus susceptible de porter les particules les plus grosses et la végétation en place fait obstacle à leur déplacement par saltation. Il s'ensuit alors le dépôt du sable principalement à la base des obstacles. La flèche de sable mobile (encore nommée "rhebha") se forme, sa hauteur et sa longueur (au vent et sous le vent) sont fonction du végétal qui constitue l'obstacle. Cette forme de dépôt n'est pas spécifique à la végétation et peut être occasionnée par tout autre obstacle même de dimensions très modestes. Les flèches de sable sont isolées dans le cas d'une végétation peu dense et peuvent être coalescentes si la végétation est plus couvrante. La fixation du sable entraîne progressivement l'aplanissement du modelé éolien en nappes de sable, les accumulations en contact étroit avec les végétaux qui les piègent sont encore éventuellement remaniées par le vent et acquièrent alors un modelé différent de celui de la flèche de sable et plus proche de la demi-sphère. Cette forme de monticule sableux fixé par la végétation est nommé "nebka" ou encore "rhebdo". La taille de la "nebka" est fonction de la taille du végétal qui en est l'origine. En Afrique du Nord, il est relativement courant d'observer des "nebkas" atteignant 5 à 6 m de hauteur et 20 m de diamètre, fixées par exemple par Nitraria retusa ou Ziziphus lotus (LONG, 1954).

Tableau n° 6 : BILAN DU DEPLACEMENT DE TROIS BARKHANES.
TUNISIE PRESAHARIENNE - ROUAG 1/10.80 au
30/04/81 (Khattali, 1981).

Barkhanes	Surface de base	Hauteur	Bilan du déplacement
1	80 m ²	1,5 m	15 m
2	110 m ²	2 m	13 m
3	60 m ²	1 m	19 m

Les apports massifs de sable peuvent être remaniés sur place et être accumulés sous forme de dunes, barkanes, etc ..., mobiles, de taille variable. Ces édifices sableux mobiles détruisent la végétation en place par ensevelissement. Quelques espèces cependant, et en particulier Aristida pungens, sont susceptibles, du fait de leurs caractéristiques biologiques (cf. § 2.3.), de croître sur de telles masses sableuses, d'y prospérer, de créer des nebkas et progressivement de fixer les dunes. Les sables étant ainsi fixés (totalement ou partiellement), le terrain peut alors être recolonisé par d'autres espèces végétales psammophiles moins bien adaptées qu'Aristida pungens à la mobilité du sable mais plus aptes à croître sur les sables fixés (ex . Rhantherium suaveolens) (cf. § 2.2.). Les adaptations plus ou moins grandes des végétaux au sable mobile évoquées ici sont traitées en § 1.2. et 2.3.

De très nombreuses expérimentations ont eu pour objet de mesurer l'incidence de la perméabilité relative et de la hauteur des brises-vent plantés sur la vitesse du vent et donc son agressivité. Moins fréquentes sont les expérimentations réalisées sur l'influence de la végétation naturelle dont la hauteur dans les steppes des zones arides n'atteint que rarement 0,80 m. Nous donnons ci-après quelques résultats de recherches effectuées d'une part en Mongolie intérieure et d'autre part en Tunisie (Région de Zougrata).

Le tableau n° 7 montre que la réduction de la charge en sable du vent est nettement plus rapide que celle de sa vitesse. Ainsi, par exemple, une réduction de 25,7 % de la vitesse du vent entraîne une réduction de 95,2 % de la teneur de l'air en sable.

Une expérience réalisée en Tunisie et dont les résultats sont exprimés sur la figure n° 4, permet d'étudier les effets d'une végétation (steppe à Rhantherium suaveolens en bon état ; hauteur moyenne 50-60 cm ; recouvrement moyen de la végétation 30 %) comme obstacle à la déflation et moyen favorisant l'accumulation. Il est évident que la zone mise en défens (E1) s'est ensablée régulièrement ; la phase d'accélération du début de l'année 1974 coïncidant avec une extension récente de la céréaliculture dans la zone. Au total, ce type de végétation a piégé, en trois ans, l'équivalent de 220 t de sable par hectare. Dans le cas de la figure (E2), à chaque coupe succède une phase de déflation accrue. Après la coupe de mai 1973, la végétation laissée au repos a produit une pousse de regain permettant au fur et à mesure de son développement un nouveau piégeage du sable et donc, dès juillet 1974, le sol initial était reconstitué.

Tableau n° 7 : EFFET DU RECOUVREMENT DE LA VEGETATION SUR LES DUNES DE SABLES MOBILES : EN RELATION AVEC LA VITESSE DU VENT EN SURFACE ET LA TENEUR EN SABLE DE L'AIR (à Wushenchao, Wieshen Banner - Mongolie intérieure, in "Desert transformation in China", Academia Sinica - traduit en 1978).

(Observations effectuées entre 0 et 20 cm à la surface du sol).

TYPE DE SURFACE DU SOL	RECOUVREMENT DE VEGETATION %	VALEUR RELATIVE DE LA VITESSE DU VENT %	REDUCTION DE LA VITESSE DU VENT %	VALEUR RELATIVE DE LA TENEUR EN SABLE DE L'AIR %	REDUCTION DE LA TENEUR EN SABLE
Dunes de sables mobiles non traitées	< 5	100	-	100	-
Dunes plantées de <i>Artemisia ordosica</i> et de <i>Salix cheilophila</i>	28 - 50	74,3	25,7	4,8	95,2
Surface interdunaire plantée de <i>Salix Cheilophila</i> et avec haies de buissons naturels	75	37,2	62,8	2,3	97,3

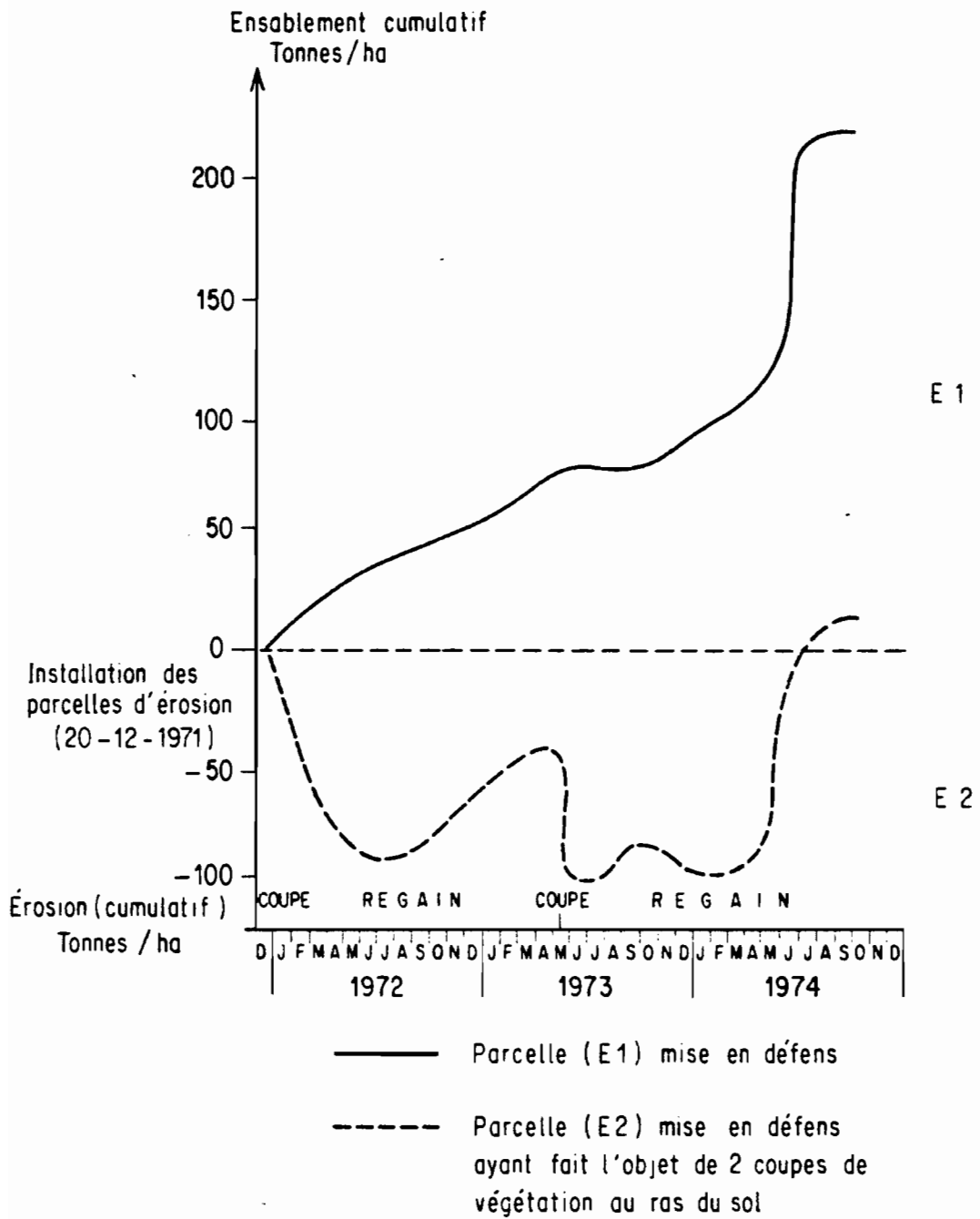


Fig. n°4 : Mesure de l'érosion et de l'accumulation du sable éolien (d'après FLORET et al., 1978).

1.2. ADAPTATIONS DES VEGETAUX AU SABLE MOBILE - MODALITES DE SA FIXATION PAR LA VEGETATION

Les tactiques adoptées par les végétaux pour coloniser les éléments mobiles d'un modèle éolien ont surtout été étudiées sur les dunes littorales d'une manière globale, notamment par KUHNHOLTZ-LORDAT (1923), puis sur les mêmes dunes du Golfe du Lion par BOTERENBROD et al. (1956) ; cette dernière étude étant plus focalisée sur la morphologie végétale. WILLIS et al. (1959) ont fait des travaux similaires en Grande-Bretagne.

Ces études ont nettement dégagé le rôle primordial de certaines espèces comme Ammophila arenaria, dans l'édification des dunes littorales de ces pays, graminée ressemblant fort à Aristida pungens des dunes continentales nord-africaines et pouvant a priori fonctionner de la même manière. Les problèmes d'aménagement et de conservation du littoral ont entraîné une prolifération d'études sur l'autoécologie d'Ammophila arenaria (entre autres : GREIG-SMITH, 1961 ; HOPE-SIMPSON et JEFFERIES, 1966 ; HUISKES, 1977).

En ce qui concerne les adaptations des végétaux à la mobilité du sable dans les régions arides, la littérature est beaucoup plus pauvre : BOWERS (1982), aux U.S.A., a indiqué quelques adaptations des espèces au milieu dunaire, notamment la faculté d'élongation des tiges et des racines. DITTMER (1959) a précisé ces adaptations quant aux racines.

Les végétaux se trouvant dans les situations où le sable est mobile doivent s'adapter à un certain nombre de contraintes pour survivre. La plante doit, en zone de sable mobile :

- pouvoir germer dans des conditions d'humidité du sol très défavorables (faible quantité et/ou fugacité) et à des profondeurs parfois très variables dans le temps. Par la suite, les plantules doivent à leur tour pouvoir émerger et croître suffisamment vite pour devenir rapidement autonomes ;
- avoir, au moment de l'installation, une vitesse d'élongation racinaire très rapide, pour pallier le drainage excessif dans les sables éoliens ;

- rester émergée au-dessus du sable qui tend à l'ensevelir par des apports fréquents de sédiments dépourvus de toute humidité ; un ensevelissement de l'ordre du décimètre est localement possible en quelques jours, voire quelques heures ;
- résister au bombardement des grains de sable qui peuvent provoquer des lésions, en particulier chez les jeunes plantes ;
- résister au déchaussement, suite à la mobilité des formes, qui souvent met à nu les organes souterrains ;
- avoir un système racinaire "flexible" permettant de tirer partie de toutes les répartitions de la disponibilité en eau dans le sol ;
- pouvoir utiliser très rapidement des réserves en eau disponibles très faibles et très éphémères et résister aux stress hydriques durant de très longues périodes ;
- pouvoir limiter ses exigences en éléments nutritifs en raison du faible niveau trophique du substrat.

En ce qui concerne uniquement les mécanismes de fixation du sable par la végétation, sans tenir compte des problèmes d'installation, il apparaît que :

- (i) La fonction de "piégeage" du sable par la végétation est assurée à partir d'un freinage du vent ; les plantes efficaces pour cette fonction devraient donc multiplier les organes en prise au vent au moyen de tiges, feuilles et même stolons et racines lorsque ces organes sont découverts.
- (ii) L'édification d'un modèle éolien individualisé (de type nebkā) fait intervenir le piégeage du sable, mais aussi la faculté pour la plante de rester "émergée" hors du sable qui tend à la recouvrir. Ainsi la longueur, l'orthotropie des tiges et la position des bourgeons de renouvellement des structures joueraient un rôle important, sinon essentiel, dans la possibilité qu'ont certaines espèces de réagir à l'ensablement.
- (iii) La stabilisation du sable est une conséquence des deux premières fonctions évoquées ci-dessus : le sable ainsi piégé ne peut être repris par le vent. Dans le cas où un vent non chargé de sable est susceptible de provoquer la déflation, la plante doit pouvoir rester érigée. Dans ce

cas, la formation de racines adventives dans le sable accumulé devrait pouvoir servir à ancrer les tiges et leur permettre de garder leur fonction de freinage du vent, ce qui assurerait la protection du sable accumulé.

- (iv) La fixation définitive s'accompagne de la compaction du sable stabilisé et ceci principalement par la pluie. Une certaine évolution biochimique s'ensuit à la longue, aidée en cela par la litière ; des micro-cristallisations peuvent provenir du fait d'exsudats racinaires. Enfin, une pellicule de battance peut apparaître à la surface du sable, pellicule dont la formation fait intervenir notamment des algues. Cette fonction de fixation peut être remplie par des végétaux qui ne sont pas spécialement adaptés à résister au sable mobile mais qui peuvent profiter de la stabilisation causée par les espèces adaptées. Il s'agit là d'un phénomène de succession d'espèces .

Le § 2. illustre ces différentes fonctions de la végétation des zones sableuses, à partir d'exemples pris dans le Sud tunisien.

2. VEGETATION ET SABLE MOBILE EN JEFFARA TUNISIENNE

Les steppes des zones sableuses de la Jeffara tunisienne ont fait l'objet d'études particulières qui sont présentées ici à titre d'illustration. En effet, ces steppes sont intensivement défrichées depuis quelques années et les troupeaux surpâturent les zones non cultivées. Il s'ensuit la mise en mouvement de grandes quantités de sable. Après un bref rappel sur les caractéristiques des steppes sableuses tunisiennes (§ 2.1.), nous donnerons un aperçu des types de milieux rencontrés en Jeffara sableuse (morphologie éolienne et végétation) et de leur dynamique (§ 2.2.). Les caractères relatifs à l'adaptation au sable des principales espèces présentes seront présentés (§ 2.3.).

2.1. APERCU GENERAL SUR LES STEPPES A RHANTHERIUM SUAVEOLENS EN TUNISIE

Les steppes à Rhantherium suaveolens dominant couvraient de très grandes surfaces en Tunisie. On les rencontrait depuis les marges sahariennes jusqu'à la hauteur de Sousse. On trouvera sur le tableau n° 8 la diagnose simplifiée des deux associations, des sous-associations (fonction du substrat) et des variantes climatiques, telles qu'elles ont été définies par LE HOUEROU (1959).

C'est l'association à Rhantherium suaveolens et à Artemisia campestris (aride inférieur typique) qui est la plus représentée en Jeffara. L'objet de notre étude concerne cette association et l'association à Rhantherium suaveolens et à Asphodelus refractus (variante "sèche") (voir la carte de situation, figure n° 5).

2.2. LA STEPPE A RHANTHERIUM SUAVEOLENS DE LA JEFFARA : DYNAMIQUE DE LA VEGETATION ET DES SABLES

La Jeffara est incluse pour sa plus grande part (sauf au sud-est) dans l'étage bioclimatique méditerranéen aride inférieur (défini par LE HOUEROU, 1959). La pluviosité annuelle va de 100 à 200 mm avec une absence de pluie estivale. Les sols sont très variés (MTIMET et ESCADAFAL, 1983).

Tableau n° 8 : "Ecogramme" de la steppe à *Rhantherium suaveolens* (d'après LE HOUEROU, 1959).

variantes Con- climati- ditions ques édaphiques	"Aride supérieur"	"Aride inférieur humide"	"Aride inférieur typique"	"Aride inférieur sec"	"Saharien"
Horizon sa- bleux plus ou moins profond sans apport d'eau par ruissellement	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Artemisia campestris</i> <i>Dianthus crinitus</i>	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Artemisia campestris</i> <i>Eragrostis papposa</i>	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Artemisia campestris</i>	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Asphodelus refractus</i>	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Asphodelus refractus</i> <i>Savignya parviflora</i>
	<i>Plantago albicans</i> <i>Helianthemum sessi- liflorum</i> <i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Argyrolobium uniflorum</i> <i>Linaria aegyptiaca</i> <u><i>Retama retam</i></u> <u><i>Aristida pungens</i></u>	<i>Thymelaea hirsuta</i> <i>Lotus cytisioides</i> <i>Plantago albicans</i> <i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Helianthemum sessili- florum</i> <i>Argyrolobium uniflorum</i> <i>Linaria aegyptiaca</i> <i>Retama retam</i> <u><i>Aristida pungens</i></u> <u><i>Nolletia chrysocomoïdes</i></u> <u><i>Bassia muricata</i></u> <i>Salsola vermiculata</i>	<i>Salsola vermiculata</i> var. <i>brevifolia</i> <i>Helianthemum sessili- florum</i> <i>Plantago albicans</i> <i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Linaria aegyptiaca</i> <i>Argyrolobium uniflorum</i> <i>Thymelaea microphylla</i> <u><i>Aristida pungens</i></u> <u><i>Nolletia chrysocomoïdes</i></u> <u><i>Malcolmia aegyptiaca</i></u>	<i>Salsola vermiculata</i> var. <i>brevifolia</i> <i>Plantago albicans</i> <i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Argyrolobium uniflorum</i> <i>Helianthemum sessili- florum</i> <i>Linaria aegyptiaca</i> <u><i>Aristida pungens</i></u> <u><i>Malcolmia aegyptiaca</i></u> <u><i>Nolletia chrysocomoïdes</i></u>	<i>Salsola vermiculata</i> var. <i>brevifolia</i> <i>Arthrophytum schmit- tianum</i> <i>Plantago albicans</i> <i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Helianthemum sessili- florum</i> <i>Argyrolobium uniflorum</i> <i>Linaria aegyptiaca</i> <u><i>Aristida pungens</i></u> <u><i>Nolletia chrysocomoïdes</i></u> <u><i>Malcolmia aegyptiaca</i></u>
Horizon in- duré proche de la sur- face du sol	id. ci-dessus plus <u><i>Atractylis</i> <i>serratuloïdes</i></u> et <i>Gymnocarpos</i> <i>decander</i>	id. ci-dessus plus <u><i>Atractylis</i> <i>serratuloïdes</i></u> et <i>Gymnocarpos</i> <i>decander</i>	id. ci-dessus plus <u><i>Atractylis</i> <i>serratuloïdes</i></u> et <i>Gymnocarpos</i> <i>decander</i>	id. ci-dessus plus <u><i>Atractylis</i> <i>serratuloïdes</i></u> et <i>Gymnocarpos</i> <i>decander</i>	id. ci-dessus plus <u><i>Atractylis</i> <i>serratuloïdes</i></u> et <i>Gymnocarpos</i> <i>decander</i>
	Horizon sa- bleux profond et/ou apport d'eau par ruissellement	id. première ligne plus <i>Ziziphus lotus</i>	id. première ligne plus <i>Ziziphus lotus</i>	id. première ligne plus <i>Ziziphus lotus</i> <i>Retama retam</i>	id. première ligne plus <i>Artemisia campestris</i> <i>Ziziphus lotus</i> <i>Retama retam</i>

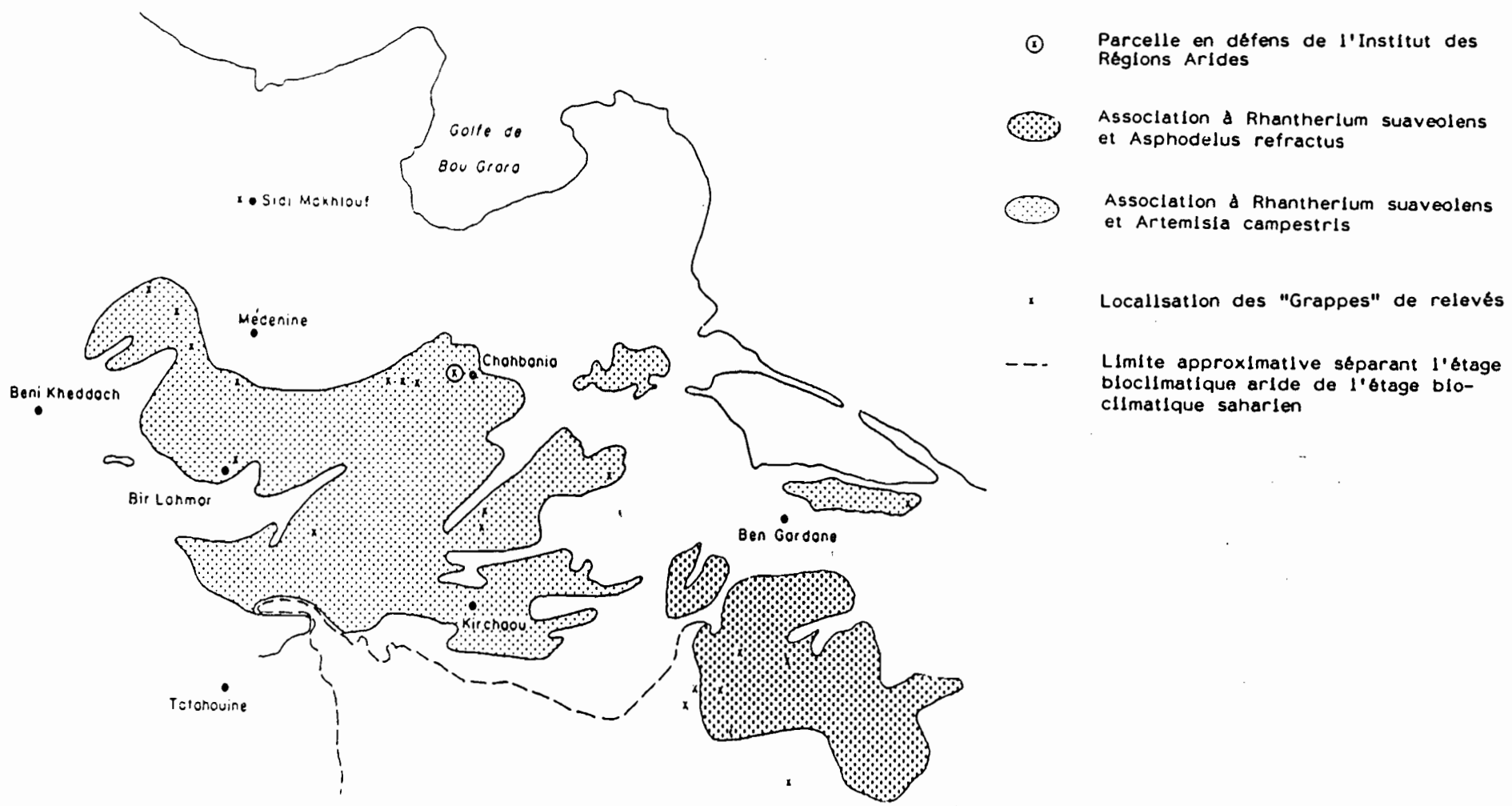


FIGURE N° 5

Carte de situation de la Zone d'étude
 Localisation des associations végétales sur sol sableux de la Jeffara
 (extrait de H.N. LE HOUEROU, 1959)

Ceux qui correspondent à la steppe des zones sableuses à Rhantherium suaveolens et Artemisia campestris, que nous avons étudiés, sont des sols peu évolués, marqués par des apports éoliens allant du simple voile jusqu'à des dépôts fixés dont l'épaisseur peut dépasser 80 cm. Ces sables recouvrent le plus souvent une croûte calcaire plus ou moins démantelée, vestige d'un ancien glacis. Lorsque cette croûte est absente, sous le sable de couverture se trouvent des limons à nodules calcaires. Lorsque l'origine des sables est mixte (éolienne et hydrique), au voisinage des oueds, l'horizon sableux comporte des éléments plus grossiers. Sous l'influence du labour et du surpâturage, l'horizon sableux n'est plus fixé par la végétation. Le sable en mouvement se retrouve sous la forme d'édifices sableux de formes caractéristiques. C'est la dynamique de ces formes liée à la dynamique de la végétation qui fait l'objet de ce paragraphe.

2.2.1. Typologie des milieux de la steppe à Rhantherium suaveolens de la Jeffara

Le tableau n° 9 donne les huit types de morphologie éolienne que nous avons retenus, compte-tenu de l'échelle de l'étude, avec les espèces végétales dominantes qui leur correspondent, ainsi que des indications quant à la mobilité du sable et le recouvrement de l'ensemble des espèces pérennes.

Le tableau n° 10 précise la composition floristique de la végétation de chacun des types morphologiques. Cette liste floristique n'est pas exhaustive mais inclut les espèces les plus caractéristiques.

La figure n° 6 illustre quelques uns des types de morphologie éolienne avec les principales espèces pérennes qui les caractérisent.

2.2.2. Schéma dynamique des milieux de la steppe à Rhantherium suaveolens dans la Jeffara

Le schéma de la figure n° 7 a été élaboré, d'une part, à l'aide des observations de terrain concernant la répartition spatiale des types de milieu, en fonction de la direction du vent dominant et de la topographie ; d'autre part, d'après les connaissances que nous avons sur le degré d'adaptation des espèces pérennes à la mobilité du sable et sur leur degré de présence dans les types (tableau n° 10).

Tableau n° 9 : Typologie des milieux de la steppe à *Rhantherium suaveolens*

TYPE	MORPHOLOGIE EOLIENNE Mobilité du sable	ESPECES DOMINANTES ET RECOUVREMENT (%) DE L'ENSEMBLE DES ESPECES PERENNES
0	<u>Absence d'édifices sableux</u>	<i>Rhantherium suaveolens</i> (5 à 10 %)
I	<u>Micronebkas et voile éolien</u> (hauteur de nebkas \leq 50 cm) sable fixé	steppe à <i>Rhantherium suaveolens</i> en équilibre (> 10 %)
II	<u>Micronebkas et flèches et/ou nappes de sable</u> (hauteur des formes \leq 50 cm) sable assez mobile	steppe à <i>Rhantherium suaveolens</i> dégradée (5 à 10 %)
III	<u>Mésonebkas et microdunes</u> (50 cm < hauteur des formes \leq 1 m) sable mobile (ripple-marks)	<i>Rhantherium suaveolens</i> encore dominant <i>Aristida pungens</i> abondant (< 5 %)
IV	<u>Macronebkas, dunes et microdunes</u> (hauteur des formes > 1 m) sable très mobile(ripple-marks)	<i>Aristida pungens</i> sur macronebkas <i>Rhantherium suaveolens</i> très faible
V	<u>Mésonebkas, flèches et/ou nappes de sable</u> (50 cm < hauteur des formes < 1 m) sable en voie de fixation	<i>Rhantherium suaveolens</i> <u>et</u> <i>Aristida pungens</i> (> 5 % et même parfois > 10 %)
VI	<u>Mésonebkas et voile éolien</u> (50 cm \leq hauteur des nebkas < 1 m) sable fixé	<i>Rhantherium suaveolens</i> <i>Aristida pungens</i> <i>Artemisia campestris</i> (> 5 % et même parfois > 10 %)
VII	<u>Macronebkas et nappes et/ou flèches</u> (hauteur des formes > 1 m) sable en voie de fixation	<i>Aristida pungens</i> <i>Artemisia campestris</i> (> 5 %)
VIII	<u>Macronebkas et voile éolien</u> (hauteur des nebkas > 1 m) sable fixé	<i>Aristida pungens</i> (très variable 2 à > 10 %)

Tableau n° 10 : Composition floristique des types de milieu de la steppe à *Rhantherium suaveolens* (Pour la définition des types, voir tableau n° 9).

ESPECES	TYPES	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
<u>Aristida</u>	<u>plumosa</u> _____	++	+					+		
<u>Astragalus</u>	<u>armatus</u> _____	++	+	+						+
<u>Brachypodium</u>	<u>distachyum</u> _____	++	+	+						
<u>Gymnocarpos</u>	<u>decander</u> _____	++	+	+	+					
<u>Helianthemum</u>	<u>kahiricum</u> _____	++	+	+						
<u>Herniaria</u>	<u>fontanessi</u> _____	++	+					+		
<u>Atractylis</u>	<u>serratuloides</u> _____	++	++	+				+		
<u>Filago</u>	<u>germanica</u> _____	++	+++	+						
<u>Helianthemum</u>	<u>sessiliflorum</u> _____	++	+++					+		
<u>Linaria</u>	<u>aegyptiaca</u> _____	++	++							+
<u>Plantago</u>	<u>albicans</u> _____	+++	+++	+				+		
<u>Medicago</u>	<u>truncatula</u> _____	+	++	+				+		
<u>Filago</u>	<u>spathulata</u> _____	+	++					+		+
<u>Ajuga</u>	<u>iva</u> _____	+	++					+		
<u>Argyrolobium</u>	<u>uniflorum</u> _____	+	++				+	+		+
<u>Atractylis</u>	<u>flava</u> _____		++					+		+
<u>Bupleurum</u>	<u>semicompositum</u> _____	+	++							
<u>Echiochilon</u>	<u>fruticosum</u> _____	+	++							
<u>Malva</u>	<u>aegyptiaca</u> _____		++							+
<u>Matthiola</u>	<u>longipetala</u> kr.	+	++					+		
<u>Picris</u>	<u>coronopifolia</u> _____		++					+		
<u>Plantago</u>	<u>ovata</u> _____	+	+++							
<u>Salsola</u>	<u>vermiculata</u> br.	+	++	+	+		+	+		
<u>Daucus</u>	<u>syrcticus</u> _____		++					+		+
<u>Asphodelus</u>	<u>tenuifolius</u> _____		+	+			++			+
<u>Cleome</u>	<u>ambliocarpa</u> _____			+			++		+	+
<u>Asphodelus</u>	<u>refractus</u> _____		+	+			+			++
<u>Artemisia</u>	<u>campestris</u> _____	+	+					++	+	+
<u>Aristida</u>	<u>pungens</u> _____						+	++	+	+++
<u>Bassia</u>	<u>muricata</u> _____								+	+++
<u>Ifloga</u>	<u>spicata</u> _____		+					+		++
<u>Koeleria</u>	<u>pubescens</u> _____	+	+					+		++
<u>Launaea</u>	<u>glomerata</u> _____						+		+	+++
<u>Launaea</u>	<u>resedifolia</u> _____	+	+				+	+		++
<u>Lotus</u>	<u>pusillus</u> _____		+					+		+++
<u>Malcolmia</u>	<u>aegyptiaca</u> _____								+	++
<u>Nolletia</u>	<u>chrysocomoides</u> _____		+				+		+	+++
<u>Onopordon</u>	<u>arenarium</u> _____								+	++
<u>Paronychia</u>	<u>arabica annua</u> _____		+				+			++
<u>Schismus</u>	<u>barbatus</u> _____						+		+	+++
<u>Rhantherium</u>	<u>suaveolens</u> _____	++	+++	++	++		+	+		+

Les espèces pérennes sont soulignées.

- +++ Espèce très fréquemment dans le type
- ++ Espèce fréquemment dans le type
- + Espèce présente dans le type

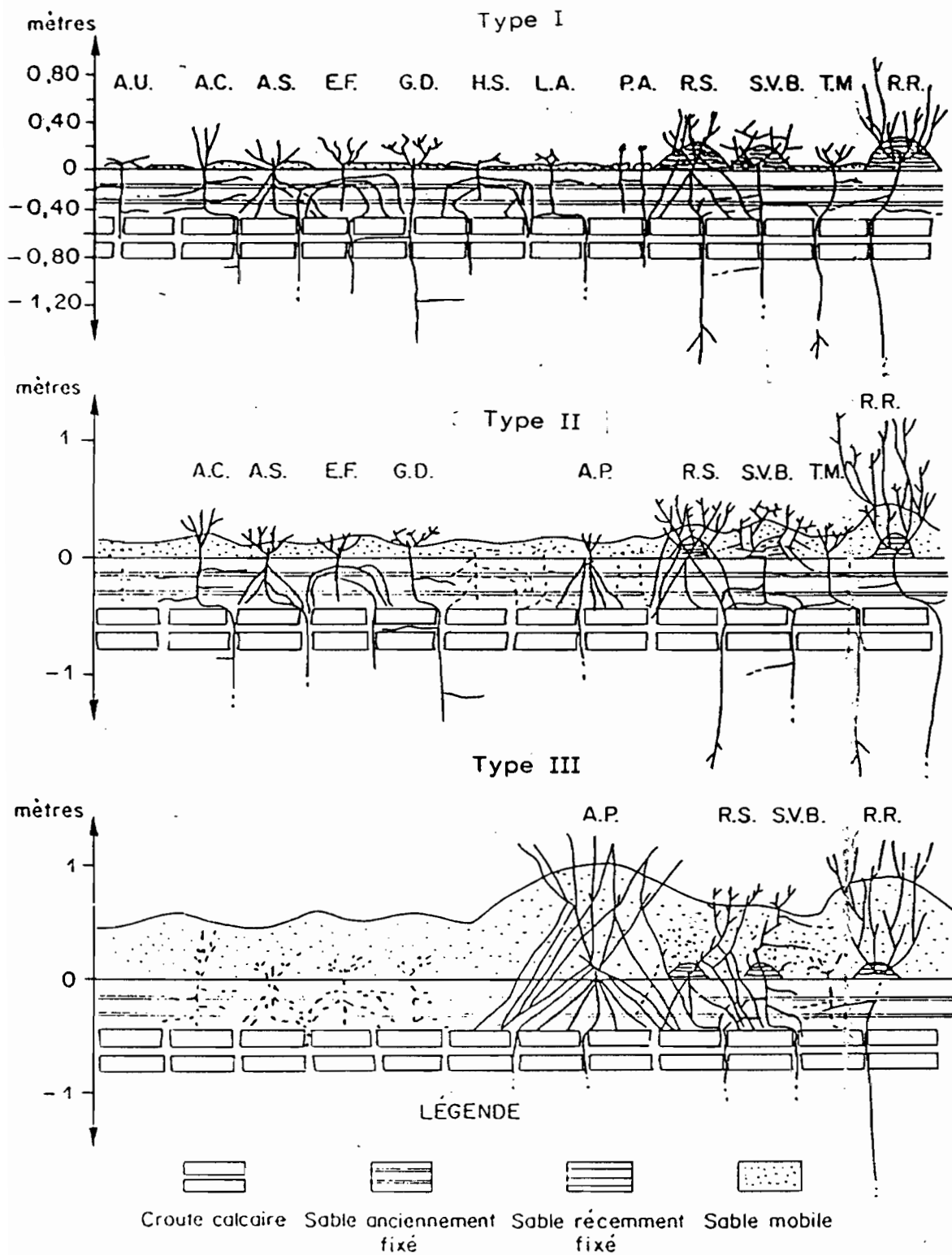


Figure 6 : Quelques types de morphologie éolienne des zones sableuses de la Jeffara et les espèces pérennes qui les caractérisent.

Pour la légende des types, voir tableau 9.
 Les sigles des espèces sont les initiales des noms de genres, d'espèces et sous espèces des pérennes du tableau 10 (RR = Retama retam)

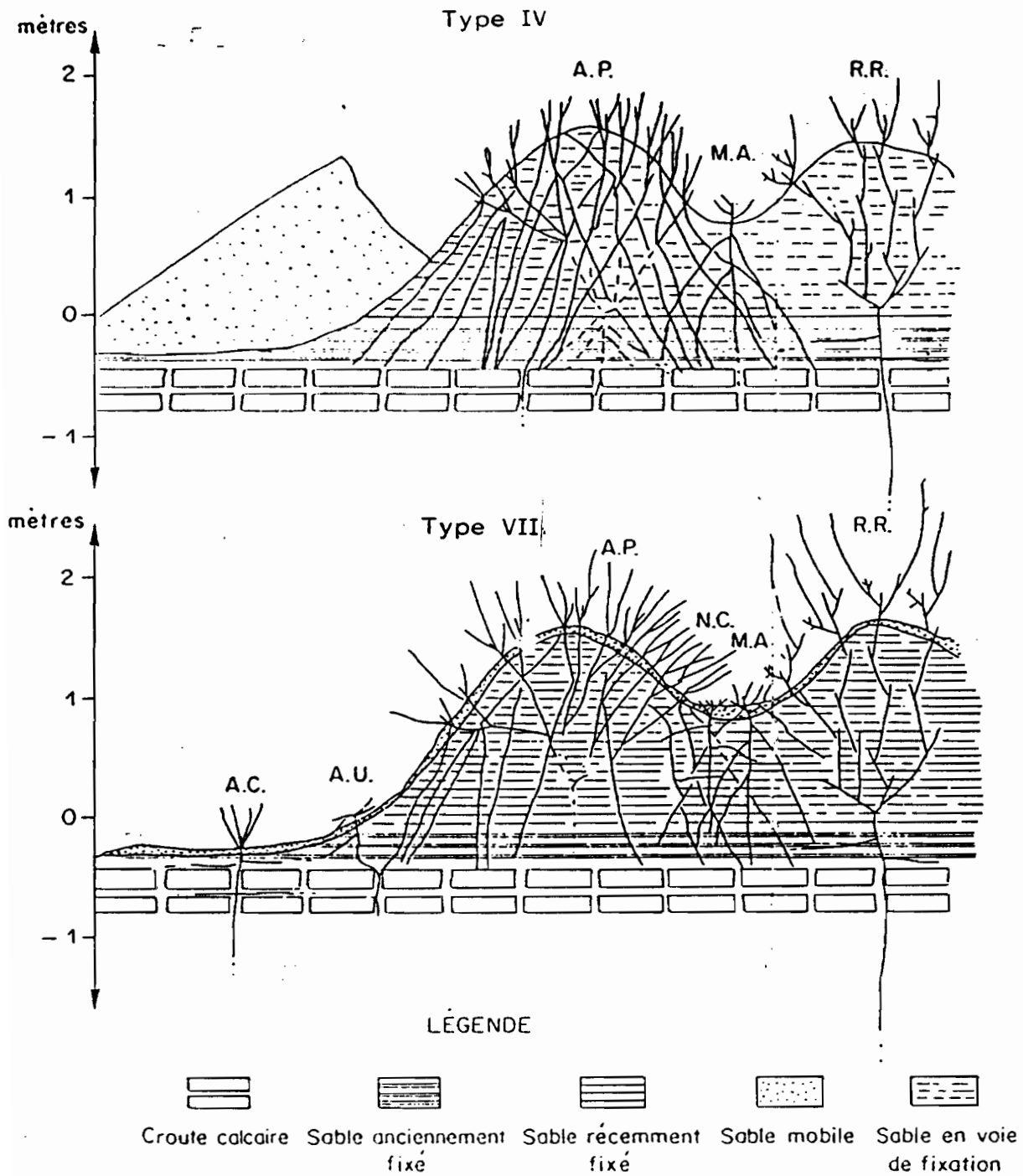
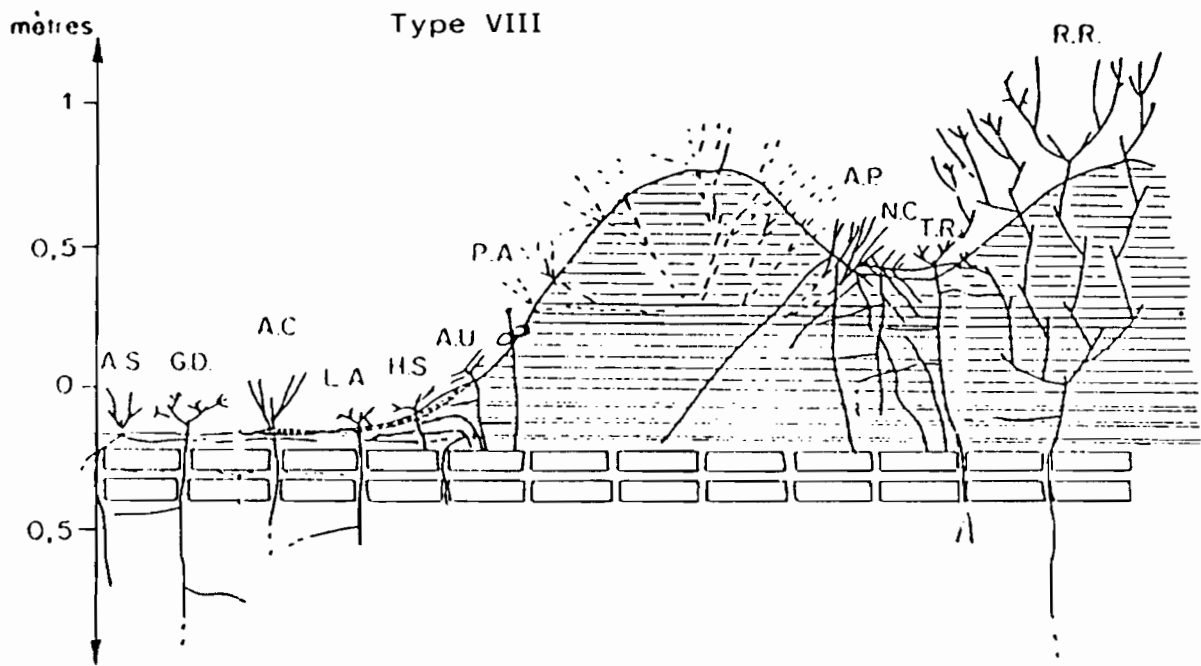


Figure 6 (suite) :



LÉGENDE



Figure 6. (suite)

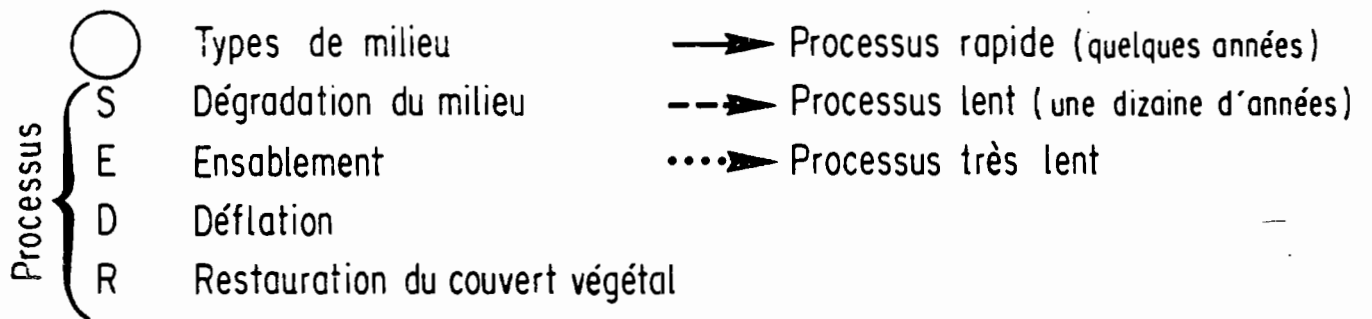
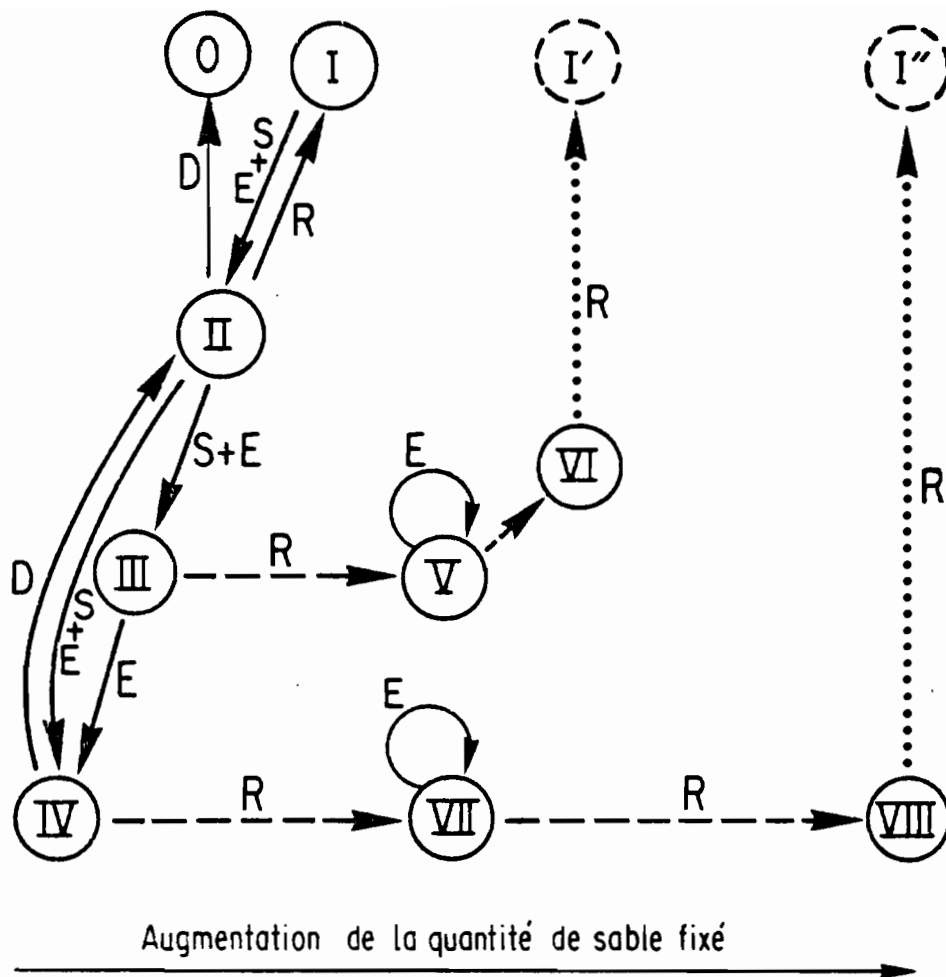


Fig. n°7 : Schéma dynamique des milieux de la steppe à *Rhantherium suaveolens* en Jeffara tunisienne.

Ce schéma indique les possibilités de passage d'un type à l'autre pour une même station, sous l'influence des processus tels que : dégradation du couvert végétal, ensablement, déflation ou augmentation du couvert végétal.

Le schéma montre que les temps de passage d'un type à l'autre ne sont pas identiques : les vitesses d'ensablement et de déflation sont rapides en l'absence de flore fixatrice du sable mobile (trajets I à II, II à IV et IV à II). La vitesse de restauration du couvert végétal est rapide aussi si les dunes ne sont pas apparues (trajet II à I). Par contre, la vitesse de restauration du couvert végétal est plus lente si elle s'accompagne de la fixation des dunes (trajets III à V, IV à VII) et comme cette restauration est due à une flore adaptée au sable mobile, le remplacement de toute cette flore par la flore de la steppe à Rhantherium suaveolens en bon état est encore plus lent (trajets VI à I', VIII à II').

Les principales possibilités de passage ("trajets") sont les suivantes :

* Trajet I à II à III à IV :

Rhantherium suaveolens et d'autres espèces de la steppe ne résistent pas au passage des dunes. Mais ces espèces fixent de grandes quantités de sable par dépôt laminaire ou en flèche (I à II). Ainsi la dégradation de la steppe entraîne inévitablement des mouvements de sable (trajet II à III ou II à IV).

* Trajet II à 0 :

Dans les zones de déflation, les espèces caractéristiques des croûtes affleurantes ou des sols très "battants" augmentent leur contribution à la flore.

* Trajet IV à II :

Les dunes mobiles disparaissent par déflation.

* Trajet II à I :

Le couvert végétal se régénère si la pression diminue.

* Trajets IV à VII et III à V :

Les dunes mobiles disparaissent en raison du piégeage du sable par Aristida pungens .

* Trajet V à VI :

Fixation progressive du sable ; régénération du couvert végétal grâce aux espèces favorisées par l'apport de sable (Aristida pungens), ainsi que par les espèces de la steppe à Rhantherium suaveolens .

* Trajet VII à VIII :

Les macronebkas sont en voie de fixation par Aristida pungens et le couvert végétal augmente, mais les espèces de la steppe à Rhantherium suaveolens se réimplantent très lentement.

* Trajet VI à I' et VIII & I' :

Le modelé éolien est fixé. Les espèces de la steppe à Rhantherium suaveolens pourront à la longue reprendre leur place. Aristida pungens tend à disparaître.

2.3. ADAPTATION AU SABLE MOBILE DES ESPECES PERENNES PRINCIPALES DE LA STEPPE A RHANTHERIUM SUAVEOLENS DE LA JEFFARA

Nous avons étudié la morphologie aérienne et racinaire que les végétaux doivent présenter pour assurer (cf. § 1.2.) :

- leur résistance à l'ensablement ;
- leur résistance au déchaussement ;
- leur rôle dans la stabilisation du sable ;
- leur rôle dans l'édification du modelé éolien ;
- la fixation définitive du modelé éolien.

Ces études ont été effectuées à partir d'individus suivis pendant 2 ans et concernant 15 espèces pérennes :

- Argyrolobium uniflorum (légumineuse),
- Aristida pungens (graminée),
- Artemisia campestris (composée),
- Atractylis serratuloides (composée),
- Echiochilon fruticosum (boraginacée),
- Gymnocarpos decander (caryophyllacée),
- Helianthemum sessiflorum (cistacée),
- Linaria aegyptiaca (scrophulariacée),
- Malcolmia aegyptiaca (crucifère),
- Nolletia chrysocomoides (composée),
- Plantago albicans (plantaginacée),
- Retama raetam (légumineuse),
- Rhantherium suaveolens (composée),
- Salsola vermiculata brevifolia (chenopodiacee),
- Thymelaea microphylla (thymelaeacee).




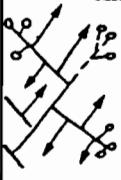
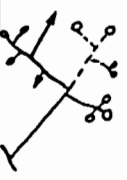

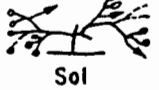
Seuls les caractères liés à la morphologie de la plante adulte, à son mode de croissance, à sa reproduction végétative ont été pris en considération pour dégager les critères d'une classification. L'adaptation d'une espèce au sable dépend évidemment aussi de bien d'autres critères en relation, en particulier, avec sa reproduction par graines : prolificité, mode de dissémination, de germination, d'installation, durée passée au stade plantule, etc ... ; cette partie de l'étude n'est pas considérée ici. Pour plus de détails sur ces mécanismes de fixation, on se reportera à BENDALI (1983) et BENDALI (sous presse).

2.3.1. Critères de morphologie aérienne

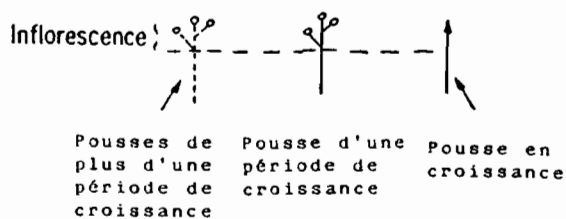
Les critères de morphologie aérienne à prendre surtout en considération pour "l'adaptabilité" d'une espèce au sable sont les suivants :

- l'orthotropie ;
- la position des bourgeons de renouvellement ;
- la longueur que peuvent atteindre les tiges au cours d'une période de croissance.

Les deux premiers critères sont propres à l'espèce et ont servi à présenter les espèces étudiées dans le tableau n° 11. Le troisième dépend aussi des conditions extérieures comme la disponibilité en eau ou le pâturage.

critère 1 / critère 2	basale	à tendance basale (basitone)	dispersée	apicale ou subap. (acrotone ou mésotone)
forte	 <p><i>Plantago albicans</i> <i>Artemisia campestris</i></p> <p>Sol</p>	 <p><i>Atractylis serratuloides</i> <i>Rhus typhina</i> <i>Aristida purgens</i> (<i>Retama retam</i>)</p> <p>Sol</p>		
faible puis forte				 <p><i>Echiochilon fruticosum</i> <i>Gynocarpus decander</i> <i>Nolletia chrysocomoides</i> (<i>Thymelaea microphylla</i>)</p>
faible			 <p><i>Linaria aegyptiaca</i> <i>Salsola vermiculata</i></p>	 <p><i>Malcolmia aegyptiaca</i></p>
non orthotrope (plagiotope)			 <p><i>Argyrobolium uniflorum</i></p> <p>Sol</p>	 <p><i>Helianthemum sessiliflorum</i></p> <p>Sol</p>

LÉGENDE



Entre parenthèses : Cas difficile à classer

Tableau 11 : classification des espèces étudiées selon :

- la position des bourgeons de renouvellement (critère 1)
- l'Orthotropie des pousses (critère 2).

L'orthotropie :

C'est la tendance d'une tige à pousser en sens inverse de la pesanteur. Le critère est important à considérer car les espèces à tiges rampantes, ce qui est un cas limite, ont toutes les chances de se voir ensevelir par le sable, tandis que les espèces à tiges orthotropes restent "émergées" plus facilement. Argyrolobium uniflorum et Helianthemum sessiliflorum seraient ainsi des espèces vulnérables à l'ensablement.

La position des bourgeons de renouvellement :

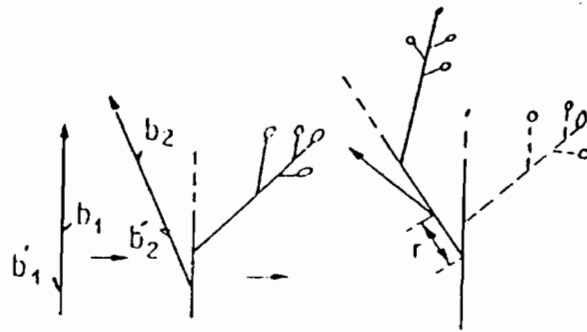
Le "bourgeon de renouvellement" est un bourgeon qui donnera, au bout d'une ou plusieurs périodes de croissance, une structure identique à celle dont il est issu. Par exemple (figure n° 8), un bourgeon b1 végétatif peut évoluer au cours d'une période de croissance vers un axe florifère sans bourgeon de renouvellement ; le bourgeon b1 n'est pas un "bourgeon de renouvellement". Par contre, le bourgeon b'1 qui donnera un axe porteur d'un bourgeon de renouvellement b'2 sera un "bourgeon de renouvellement". La distance entre b'1 et b'2 est appelée "relais de croissance".

Les espèces à renouvellement basal (donc à relais de croissance tendant vers zéro) sont ici Artemisia campestris et Plantago albicans. Bien qu'ayant une forte orthotropie, ces espèces sont défavorisées en cas d'ensablement. Les espèces dont le renouvellement est à tendance basale sont appelées basitones. Chez ces espèces, les bourgeons de renouvellement peuvent se former assez loin sur la tige porteuse, mais ceux qui donneront les structures les plus fortes seront les bourgeons situés le plus bas. Les espèces de cette catégorie sont toutes ici à forte orthotropie ; Rhantherium suaveolens, Aristida pungens et Atractylis serratuloides en font notamment partie. La basitonie a tendance à concentrer les tiges, ce qui augmente la "densité" et la cohésion du végétal face au vent.

Les espèces, dont le renouvellement se fait sans tendance précise, sont appelées ici mésotones ; c'est le cas, par exemple, de Salsola vermiculata. Ces espèces présentent un appareil aérien intriqué favorable à la protection contre le surpâturage.

Les espèces à renouvellement apical et subapical sont appelées ici acrotones ; c'est le cas, par exemple, de Gymnocarpos decander.

Figure 8 : Définition du "relais de croissance" - Exemple de schéma de développement aérien chez une plante.



Légende : croissance végétative



Inflorescence



r = relais de croissance
 b1, b2 = Bourgeons florifères
 b'1, b'2 = Bourgeons végétatifs

Ces espèces, inversement aux basitones, ont tendance à avoir une structure lâche, sensible au pâturage, puisque celui-ci opère en attaquant d'abord l'extérieur des plantes.

Certaines espèces telles Thymelaea microphylla peuvent passer d'un renouvellement basitone à un renouvellement acrotone et inversement. Il semble que cette alternance de fonctionnement soit due à l'alternance des bonnes et mauvaises années pluviométriques.

La taille des tiges après une période de croissance :

Dans le cas de plantes à renouvellement autre que basal et avec une certaine orthotropie, la résistance à l'ensablement peut s'expliquer par la taille des tiges et la longueur des entre-noeuds. Les bourgeons de renouvellement seront portés d'autant plus loin (et plus haut en cas de forte orthotropie) que la tige est grande, allongeant ainsi le relais de croissance.

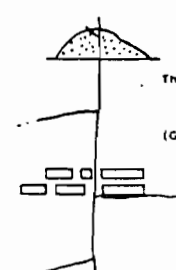

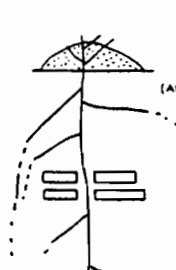
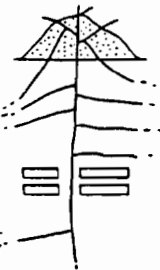
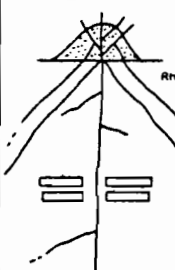

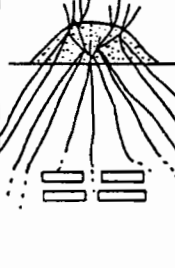
Le tableau n° 12 donne une classification des espèces en fonction du "relais de croissance" maximal, observé dans les conditions les plus favorables (bonne humidité et absence de pâturage). D'après ce tableau, la basitonie d'Aristida pungens et de Rhantherium suaveolens n'empêche nullement ces espèces d'avoir des "relais de croissance" forts en cas de conditions favorables : pour ces espèces, il s'agit d'un ensablement constituant, d'une part, le réservoir d'eau dans le sol et, d'autre part, une inhibition des bourgeons basiliaires ensablés, ce qui entraîne un report de vigueur sur les bourgeons situés à la lumière.

2.3.2. Critères de morphologie racinaire

Le principal critère retenu, d'après les hypothèses sur la réaction des espèces en cas d'ensablement, est l'existence de racines adventives (racines issues d'organes aériens). On a aussi noté la position et la ramification de l'ensemble du système racinaire. Les espèces sont représentées dans une classification selon ces deux critères dans le tableau n° 13.

Tableau n° 12 : Classification des espèces selon l'importance du relais de croissance maximum observé.

Relais de croissance maximal observé	Espèces
< 15 cm	<i>Plantago albicans</i>
15 à 20 cm	<i>Artemisia campestris</i> , <i>Linaria aegyptiaca</i> , <i>Thymelaea microphylla</i>
20 à 30 cm	<i>Argyrolobium uniflorum</i> , <i>Echiochilon fruticosum</i> , <i>Atractylis serratuloïdes</i>
30 à 40 cm	<i>Helianthemum sessiliflorum</i> , <i>Gymnocarpos decander</i>
40 à 50 cm	<i>Rhantherium suaveolens</i> , <i>Nolletia chrysocomoïdes</i> , <i>Salsola vermiculata</i> , <i>Malcolmia aegyptiaca</i>
> 50 cm	<i>Aristida pungens</i> , <i>Retama raetam</i>

racines adventives: →	Jamais ou très rarement	Occasionnellement	Toujours
Position et répartition des ramifications: ↓			
Localisées indifféremment près de la surface, en position moyenne ou en profondeur	<p><i>Thymelaea microphylla</i></p> <p>(<i>Gymnocarpus decander</i>)</p>	<i>Linaria aegyptiaca</i>	
Localisées en position de moyenne profondeur ou bien en deux endroits: près de la surface et en profondeur			
Localisées près de la surface du sol (superficielles)	<p><i>Helianthemum sessiliflorum</i></p> <p><i>Argyrolobium uniflorum</i></p> <p><i>Plantago albicans</i></p> <p><i>Echiochilon fruticosum</i></p>		
		<i>Malcolmia aegyptiaca</i>	<i>Aristida pungens</i>
		<i>Nolletia chrysoconoides</i>	

LÉGENDE :



Sable mobile

Croûte calcaire

NB : Les espèces entre parenthèses sont les cas difficiles à classer par manque d'observations.

TABLEAU 13

CLASSIFICATION DES ESPECES SELON LES CRITERES DE MORPHOLOGIE RACINAIRE

(Sur sol éolien à texture sablo-illoneuse, enterrant un paléosol à croûte calcaire

L'existence de racines adventives

En plus de la fonction d'ancrage évoquée en introduction, les racines adventives permettent à la plante d'exploiter la réserve hydrique supplémentaire constituée dans le sable éolien d'apport. La plante peut ainsi avoir un surcroît de production lui permettant d'augmenter le "relais de croissance". C'est le cas d'Aristida pungens, mais aussi celui de Rhantherium suaveolens, Malcolmia aegyptiaca, Nolletia chrysocomoides.

La répartition des ramifications en fonction de la profondeur

Il a été montré, au chapitre 1, l'importance, dans le bilan hydrique des sols, d'une certaine épaisseur de sable mobile en surface. Ce sable entraîne une meilleure pénétration de l'eau par diminution du ruissellement et forme un mulch qui limite l'évaporation. Ce voile éolien permet ainsi une humectation plus profonde et plus longtemps durable.

Thymelaea microphylla est l'exemple des espèces présentant un système racinaire plutôt adapté aux conditions édaphiques suscitées. Par contre, Helianthemum sessiliflorum et Echiochilon fruticosum, dont les ramifications racinaires se concentrent près de la surface du sol, devraient être plus adaptées à l'absence de voile éolien ou bien à l'exploitation des faibles pluies. Nolletia chrysocomoides, connue comme étant liée à des sables non fixées, serait plutôt dans ce dernier cas.

2.3.3. Classification des espèces étudiées en fonction de leur aptitude à fixer et à recoloniser les sables mobiles

2.3.3.1. Espèces présentant une résistance à l'ensablement (compte-tenu de leur résistance au pâturage)

2.3.3.1.1. Espèces édificatrices du modelé éolien

a) Espèces édificatrices de mēsonebkas et macronebkas (plus de 1 m de dénivelé) :

Ces espèces ont en outre une bonne résistance à l'ensablement, une capacité à émettre des tiges de plus de 1 m en une période de croissance.

- Aristida pungens : à sa résistance à l'ensablement, se joint la faculté de maintenir une forte quantité de matériel végétal à la surface du sable. Ceci peut s'expliquer par l'existence du système de racines adventives exploitant la réserve hydrique de la nebka par marcottage. Sa fonction édifiatrice n'est donc pas atténuée par un trop fort ensablement, ce qui la rend plus rapide qu'aucune autre plante à édifier des nebkas de grande taille dans la Jeffara (figure n° 9).
- Retama retam : n'ayant pas la possibilité de marcotter comme Aristida pungens, cette espèce, bien qu'édifiatrice de très grosses nebkas, nécessiterait pour cela un ensablement plus lent.

b) Espèces édifiatrices de micronebkas
(hauteur inférieure à 50 cm) :

Ces espèces, bien que présentant une certaine résistance à l'ensablement, sont limitées dans la longueur de leurs pousses.

- Rhantherium suaveolens : de renouvellement basitone, cette espèce peut allonger un "relais de croissance" en cas d'ensablement. La maintenance d'une bonne partie de sa densité est facilitée par des racines adventives.
- Salsola vermiculata var. brevifolia : de renouvellement mésotone, le pâturage ne semble pas trop affecter la densité de ses structures.

2.3.3.1.2. Espèces contribuant à la stabilisation
du modèle éolien

Bien qu'à fort "relais de croissance", ces espèces n'édifient pas de modèle éolien particulier. Leur renouvellement acrotone est peut être responsable d'une structure moins résistante au vent : Malcolmia aegyptiaca et Nolletia chryso-comoides. Cette dernière s'implantant après Malcolmia aegyptiaca.

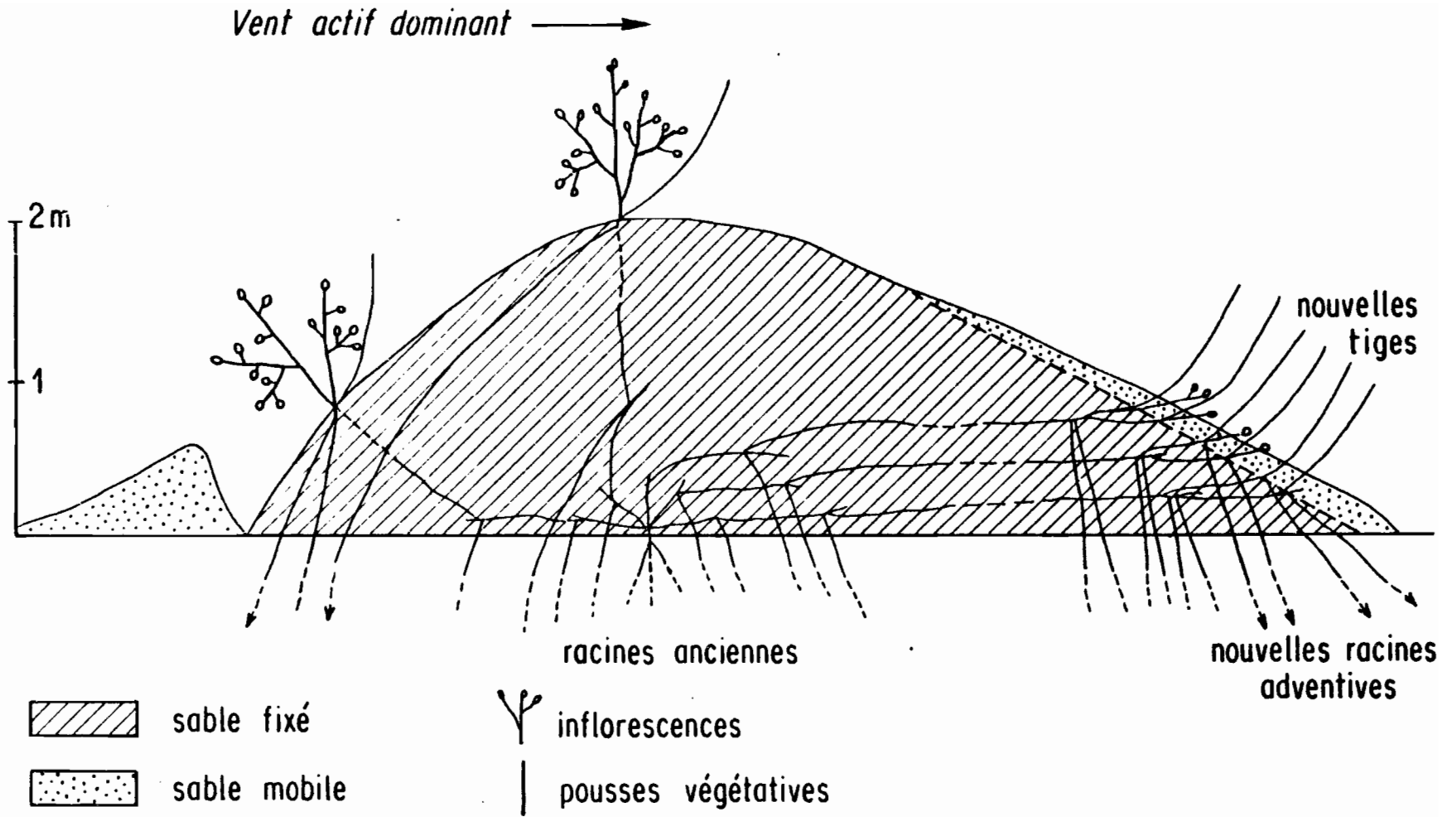


Fig. n°9 : Schéma d'une nebka à *Aristida pungens* montrant l'émission de nouvelles tiges aériennes et racines adventives à partir de rameaux récemment ensablés.

2.3.3.2. Espèces ne résistant pas à l'ensablement
(compte-tenu de leur sensibilité au pâturage) :

Ces espèces contribuent à la fixation du sable si elles peuvent se réimplanter.

2.3.3.2.1. Espèces non résistantes à l'ensablement
par leur morphologie

a) Espèces à renouvellement basal :

- Plantago albicans
- Artemisia campestris .

b) Espèces à pousses plagiotropes :

- Argyrolobium uniflorum
- Helianthemum sessiliflorum .

c) Espèces dont les pousses sont de faible taille :

- Thymelaea microphylla
- Linaria aegyptiaca
- Atractylis serratuloides .

2.3.3.2.2. Espèces ne résistant pas à l'ensablement surtout
en raison de leur sensibilité au pâturage

- Gymnocarpos decander
- Echiochilon fruticosum .

3. ASPECTS PRATIQUES DE LA FIXATION DES SABLES A L'AIDE DE LA VEGETATION

Il est utile de passer en revue quelques expériences réalisées dans les différents pays concernant la fixation des sables. Cette fixation peut être obtenue par simple régénération de la végétation naturelle en supprimant provisoirement (ou en diminuant) la pression de l'homme et des animaux dans ces zones sableuses fragiles. Il faut savoir à partir de quel état initial du couvert végétal cette régénération est possible et avoir une idée du temps de mise en défens à appliquer (§ 3.1.). Par ailleurs, de nombreux pays ont utilisé les espèces locales pour la fixation des sables ainsi que des espèces exotiques. Nous avons essayé de trouver les noms de ces espèces dans la littérature (§ 3.2.).

Enfin, les travaux réalisés en Jeffara tunisienne et leurs résultats, présentés au § 2., permettent de proposer une "clé" de zonation des surfaces en proie à l'érosion éolienne, chaque zone étant susceptible de recevoir un traitement approprié (§ 3.3.).

3.1. REGENERATION ET FIXATION PAR MISE EN DEFENS DANS LES ZONES SABLEUSES

La régénération naturelle de la végétation des milieux sableux peut être envisagée dans les situations où existait une bonne couverture végétale qui a été réduite, parfois gravement, par l'action de l'homme mais où existent encore des reliques suffisantes de cette végétation antérieure. Des mises en défens, souvent de longue durée, ont été réalisées et suivies dans les zones arides d'Australie (TRUMBLE and WOODROFFE; 1954 ; NOBLE, 1977) ou des Etats-Unis d'Amérique (BUFFINGTON and HERBEL, 1965 ; SMITH and SCHMUTS, 1975).

Rares sont, par contre, les zones protégées qui, en Afrique du Nord et au Proche-Orient, ont fait l'objet d'observations chiffrées et continues, sur des temps suffisamment longs pour permettre de tirer des conclusions sur la durée optimale de la mise en défens. Il faut, d'ailleurs, noter que les succès les plus spectaculaires de régénération par mise en défens n'ont que très rarement été suivis de mises

en application, soit en vue de la stabilisation des dunes, soit en vue de l'amélioration des parcours.

En règle générale, il est possible de concevoir que la mise en défens conduit à une augmentation de la richesse floristique et à un accroissement de la biomasse aérienne totale sur pied. Un tel accroissement de la biomasse aérienne est consécutif à l'accroissement de biomasse de la majorité des espèces présentes par augmentation du volume de chaque touffe et de la densité des touffes. Les résultats des mesures montrent, qu'en fait, les situations sont plus complexes et l'on conçoit aisément que les facteurs locaux agissent pour modifier le temps de mise en défens nécessaire à la régénération d'un écosystème.

Parmi les facteurs les plus couramment évoqués comme influant sur la durée optimale de protection, il y a :

- l'intensité de la dégradation
- la nature et l'état de la couverture végétale
- la nature du sol
- les conditions de la pluviosité durant la période de mise en défens.

Un certain nombre d'expériences récentes peuvent être évoquées concernant l'intérêt de la mise en défens pour les zones sableuses. Nous exposerons d'abord les expériences tunisiennes, puis nous examinerons dans quelles mesures ces acquis scientifiques sont confortés, explicités ou nuancés par les expérimentations menées ailleurs, en Afrique, au Proche et Moyen Orient ainsi qu'en Asie.

3.1.1. Les expériences tunisiennes

Quelques tentatives de régénération naturelle par mise en défens ont été réalisées en 1950 et 1970 dans la zone aride mais n'ont pas donné lieu à des suivis expérimentaux réguliers (ex : Mises en défens de Sidi Toui et de Nefta).

A partir de 1970, l'on a mis en place et appliqués à des situations préexistantes de mise en défens, des protocoles permettant le suivi détaillé des processus de recolonisation

par la végétation naturelle. En ce qui concerne les steppes sur sol sableux, ces études ont été menées dans le sous-étage bioclimatique aride inférieur, préjugant que les systèmes écologiques de cette zone étaient susceptibles, en particulier, de gains de production (accroissement de la biomasse aérienne sur pied) suffisants pour que l'application d'une telle technique soit économiquement rentable. Certaines de ces mises en défens sont des périmètres de protection de jeunes reboisements ou les bandes de protection mises en place par la Direction des Forêts, le long des axes routiers menacés par l'envahissement des sables (ex : Ben Gardane).

Ben Gardane

Cette mise en défens, de 3 ans, où les sables étaient piégés, présentait, lors des observations, un contraste saisissant avec les zones avoisinantes non protégées. Les données du tableau n° 14 (Nations Unies, 1977) ont été obtenues lors de mesures effectuées après des pluies de printemps abondantes et permettent de suggérer que, dans la bande protégée (contrairement à ce qui se passait à l'extérieur), le stock de graines dans le sol était considérable et que la germination n'était nullement gênée par la déflation. L'interprétation des résultats relatifs à la biomasse des espèces annuelles reste cependant délicate, ses fortes fluctuations étant liées à la pluviosité de l'année, ainsi qu'au mode de répartition des pluies dans le temps.

Par ailleurs, une mise en défens de longue durée aboutit, même sur sol sableux, à la constitution d'une pellicule de battance à la surface du sable éolien fixé. Cette pellicule de battance crée de nouvelles conditions entravant la germination des annuelles.

Chahbania

Dans cette zone, la mise en défens a concerné diverses situations d'une steppe à Rhantherium suaveolens et Artemisia campestris plus ou moins affectée par la déflation ou l'ensablement (dune vive, flèche de sable, voile sableux éolien). Les résultats des études qui y ont été réalisées, au terme de deux années de mise en défens (NOVIKOFF, 1975b), peuvent être brièvement exposés comme suit :

Tableau n° 14 : Effet de la mise en défens sur la biomasse aérienne et la production primaire consommable par les animaux dans une zone sableuse (kg de MS/ha).

(Nations-Unies, 1977)

Steppe à <i>Rhantherium suaveolens</i>	Biomasse végétale aérienne	Pousse des plantes pérennes consommables	Plantes annuelles consommables	Total consommable
mise en défens depuis 3 ans environ	966	173	207	380
pâturé	809	169	20	189

- sur les nebkas (accumulations sableuses piégées par un végétal), la protection a permis l'accroissement de 42 % de la production des annuelles pâturées et la multiplication par 4,5 de la production des espèces pérennes ;
- dans la steppe en bon état, la mise en défens n'influence que peu, ou pas, la production des espèces annuelles mais permet, par contre, de multiplier par 5,3 % la production des pérennes.

Il ressort, par ailleurs, que la production annuelle de l'espèce pérenne dominante (Rhantherium suaveolens) reste plus élevée dans les situations pâturées que dans les exclusures. La production des autres espèces ligneuses basses s'accroît par contre plus rapidement dans la mise en défens, quel que soit l'état initial du système écologique (dune vive, nebkas, steppe en bon état...). Il est donc possible d'en conclure que Rhantherium suaveolens est favorisée par un certain niveau de pâturage et qu'une mise en défens très longue serait éventuellement susceptible d'entraîner son remplacement par d'autres espèces ligneuses basses.

Dans une autre étude réalisée dans le même site, NOVIKOFF (1975a) a démontré que le pâturage entraînait une forte régression de la production de graines.

Basses Plaines Méridionales et Jeffara (Sites de Zougrata et Jbel Dissa)

Dans ces sites, une expérimentation a été menée entre 1972 et 1979 avec pour objectif, en particulier, d'étudier les effets de la mise en défens sur la dynamique des divers états d'une steppe à Rhantherium suaveolens et Artemisia campestris sur sable. Les résultats développés par FLORET (1981) sont les suivants :

- dans la steppe très dégradée, suite au surpâturage, et présentant en particulier la disparition de l'horizon sableux superficiel, la protection entraîne un accroissement constant du couvert de l'ensemble des espèces pérennes déjà présentes, l'augmentation de l'épaisseur du voile sableux et de la hauteur des micronebkas ;

- dans le faciès à Plantago albicans, témoignant d'une mise en culture antérieure suivie d'un abandon, la mise en protection entraîne les mêmes effets qu'au cas précédent, mais avec un enrichissement de la flore. Les espèces éliminées lors de la culture réapparaissent à la faveur de la mise en défens ;
- dans la steppe en bon état (situation comparable à celle déjà évoquée à Chahbania), il apparaît que le couvert végétal total des espèces pérennes s'est accru jusqu'en 1977 pour décroître ensuite en raison, en particulier, d'un cycle d'années sèches. Dans le détail, le couvert des espèces évolue différemment dans le temps ainsi qu'il apparaît au tableau n° 15.

Il est très intéressant de constater que certaines espèces dont Stipa lagascae continuent d'accroître très fortement leur participation au couvert végétal. Ceci corrobore l'opinion souvent émise (LE HOUEROU, 1959, 1969 ; TELAHIQUE et al., sous presse) de formations végétales évoluant vers des climax constitués par des steppes dominées par les graminées pérennes.

Cependant, Rhantherium suaveolens qui, dans cette situation, participe pour 86 % au couvert végétal total impose, durant longtemps, sa physionomie à l'ensemble. Dans une telle situation, il paraît sinon nécessaire du moins utile d'effectuer une mise en défens d'une durée allant jusqu'à quatre années, période au-delà de laquelle elle entraîne une stagnation puis une dépréciation de la valeur de la steppe.

Cette étape, à partir de laquelle le couvert végétal décroît, n'a pas été atteinte même après les sept années de mise en défens dans les deux situations précédemment examinées (steppe très dégradée par le surpâturage, faciès post-cultural de la steppe).

3.1.2. La régénération en zone sableuse dans d'autres régions arides

Les expériences citées dans la littérature ne sont pas très nombreuses :

Mauritanie :

Une expérimentation établie à Atar sur des parcelles mises en défens en 1953 a fait l'objet de mesures de 1962 à

Tableau n° 15 : Effet de la mise en défens sur le recouvrement des espèces pérennes de la steppe à *Rhantherium suaveolens* en bon état à Zougrata (Tunisie) - Mise en défens de 7 années - Bioclimat aride inférieur.

<i>Teucrium polium</i>	: très faible couvert restant stable.
<i>Pituranthos tortuosus</i> <i>Stipa lagascae</i>	} accroissement régulier du couvert pour la durée de l'expérience
<i>Plantago albicans</i>	: accroissement durant 5 ans suivi d'une régression.
<i>Arthrophytum schmittianum</i>	: accroissement durant 4 ans suivi d'une stagnation.
<i>Helianthemum lippii</i> var. <i>sessiliflorum</i>	: accroissement durant 4 ans suivi d'une stagnation.
<i>Argyrolobium uniflorum</i>	: accroissement durant 4 ans suivi d'une régression.
<i>Rhantherium suaveolens</i>	: accroissement durant 4 ans suivi d'une régression.
Couvert total/pérennes	: accroissement durant 4 ans suivi d'une régression.

1965. Malgré cette protection, les espèces spontanément installées : Panicum turgidum , Aerva persica , Aristida pungens se sont extrêmement raréfiées du fait d'un contexte climatique d'une extrême sévérité : 34,7 et 14,4 mm de pluies respectivement en 1961 et 1964 (ADAM, 1967).

Mali :

A Niono (CISSE, 1982), une expérience, commencée en 1977 sur terrain limono-sableux totalement dénudé, suite à une surexploitation, démontre, au bout de 3 années de protection, un début de recolonisation par Schoenefeldia gracilis , Zornia glochidiata , Cenchrus biflorus et Tribulus terrestris . De l'avis de cet auteur, il est nécessaire, pour obtenir des résultats importants dans une telle situation, que la mise en défens soit effective durant au moins 10 ans. Il ne considère donc pas, dans ce contexte, la simple mise en défens comme une méthode efficace de régénération de la végétation spontanée et préfère l'associer à la technique plus coûteuse mais aussi plus rapide d'épandage de bois mort. Cette technique, en accélérant le piégeage du sable, accélère également la dynamique.

Près de Gossi au Gourma malien, BOUDET (1979) a étudié la recolonisation de divers milieux dont le couvert végétal s'était raréfié sous l'effet, en particulier, des aléas climatiques. Il en conclut que, si la reconstitution du couvert végétal sur terrain sableux n'est pas aussi spectaculaire que sur les colluvions, elle n'en est pas pour autant négligeable. Il constate une diversification et un enrichissement progressif de la flore avec le temps, les espèces pionnières telles que Cenchrus biflorus cédant progressivement la place à Aristida mutabilis , Tragus berterorianus et même à Schoenefeldia gracilis .

Egypte :

Dans la région méditerranéenne du nord-ouest de l'Egypte (bioclimat méditerranéen aride inférieur), des mises en défens ont été installées en 1974 dans deux sites. Une première mise en défens est située sur la dune côtière (site de Gharbaniat) et la seconde dans une steppe non littorale sur sable (El Omayed).

Les travaux de AYYAD et al, (1978) ont tout d'abord démontré que, en fonction de la mobilité et de la profondeur du sable, les divers systèmes écologiques présentent des richesses floristiques fort différentes. Ces auteurs ont ainsi pu établir la figure n° 10 où sont rapportées les courbes aire-espèce de divers "micro-habitats". Il apparaît évident que les zones à richesse floristique initiale élevée seront favorablement marquées par la mise en défens.

Dans la zone côtière, trois années de protection avaient occasionné une augmentation de 38 % de la densité des espèces, ce qui n'avait entraîné que peu de modifications du recouvrement total de la végétation (AYYAD, 1978). Dans la station plus éloignée de la côte (El Omayed), l'expérimentation a pu être poursuivie plus longtemps avec des études réalisées en 1977 (AYYAD, 1978) et en 1979 (EL KADY, 1980). Dans cette seconde situation, la dynamique se révélait relativement forte avec, au bout de 3 ans, un accroissement de plus de 200 % de la densité et de 114 % du couvert. Dans ce même site, des parcelles, mises en défens durant 3 années (1974-1977) puis soumises à un pâturage contrôlé durant 2 années (au niveau équivalent à 50 % de la charge habituelle de cette région), montrent l'intérêt qu'il y a à maintenir une pression animale raisonnable, la densité des individus et le couvert végétal croissant plus dans ce cas que dans la mise en défens.

Toutes les espèces n'ont cependant pas la même dynamique et, au-delà des résultats globaux évoqués ci-dessus, il existe des différences notables entre les espèces comme le soulignent les données du tableau n° 16.

Les travaux de IMAM et SHUKRY (1976) ; IMAM, SHUKRY et RUSHDY (1977, 1978) ; IMAM et RUSHDY (1979) et IMAM (1979), relatifs à la germination et à l'émergence des plantules d'espèces de la steppe, méritent d'être signalés. De telles recherches, à poursuivre, permettront en effet de saisir les causes de la faible dynamique de la végétation dans les zones de dunes vives où semences et plantules sont vite enfouies en profondeur ou déchaussées.

Irak :

Les résultats discutés ici sont ceux obtenus en 1960 dans le site de Khedr el Mai (pluviosité moyenne annuelle d'environ 140 mm), dans une steppe sur sables assez grossiers

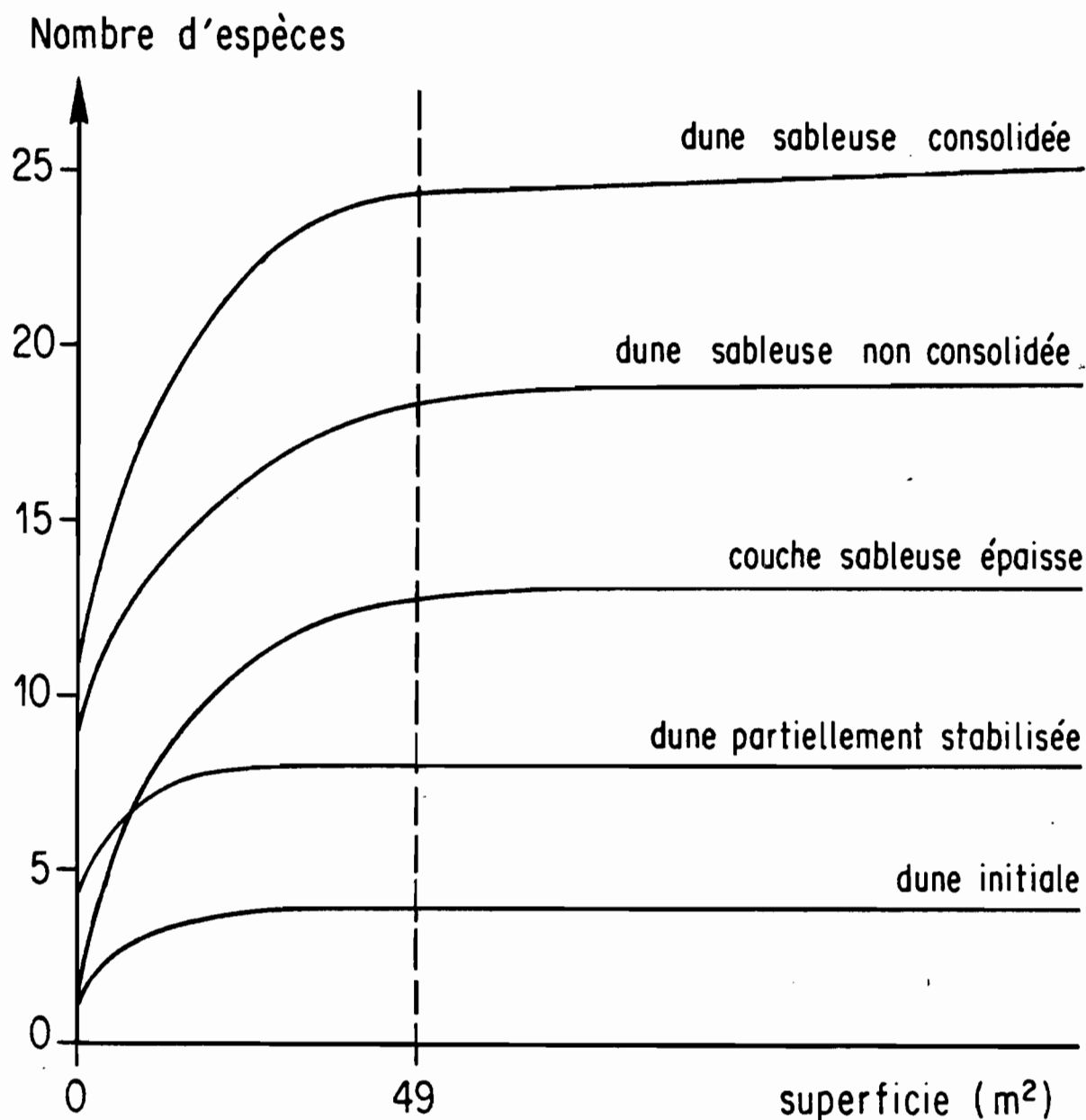


Fig n°10 : Courbes aire-espèce des divers micro-habitats de sables dunaires (définis par des catégories physiographiques) (AYYAD et al 1978).

Tableau n° 16 : Espèces végétales marquantes de la dynamique des formations végétales sur sable : effet de la mise en défens dans deux stations de la région méditerranéenne du Nord-Ouest de l'Egypte.

<u>Espèces en progression</u>	
1) <u>dans la dune côtière</u>	2) <u>dans la steppe sur sable de l'intérieur</u>
<i>Aegialophila pumila</i>	<i>Anabasis articulata</i>
<i>Crucianella maritima</i>	<i>Artemisia monosperma</i>
<i>Echinops spinosissimus</i>	<i>Asphodelus microcarpus</i>
<i>Echium sericeum</i>	<i>Echiochilon fruticosum</i>
<i>Elymus farctus (=Agropyrum)</i>	<i>Gymnocarpos decander</i>
<i>Helianthemum lippii</i>	<i>Helianthemum lippii</i>
<i>Launaea resedifolia</i>	<i>Noaea mucronata</i>
<i>Lotus polyphyllus</i>	<i>Plantago albicans</i>
<i>Lygos raetam (=Retama r.)</i>	<i>Thymelaea hirsuta</i>
<i>Ononis vaginalis</i>	
<i>Plantago albicans</i>	
<u>Espèces en régression</u>	
1) <u>dans la dune côtière</u>	2) <u>dans la steppe sur sable de l'intérieur</u>
<i>Ammophila arenaria</i>	<i>Atractylis carduus</i>
<i>Echinops spinosus</i>	<i>Iris sisyrinchium</i>
<i>Euphorbia paralias</i>	<i>Silene sp.</i>
<i>Pancreatium maritimum</i>	
<i>Pituranthos tortuosus</i>	
<i>Silene succulenta</i>	

et pour une mise en défens d'une durée de 3 ans (THALEN, 1979) :

- Le couvert de Stipagrostis plumosa (Aristida plumosa) augmente énormément par accroissement des touffes alors que sa densité reste stable ;
- Haloxylon persicum et Helianthemum lippi progressent en densité ;
- Halogeton alopecuroides , Heliotropium bacciferum Haplophyllum sp. et Anabasis setifera apparaissent ;
- Fagonia bruguieri disparaît.

THALEN conclut également qu'un pâturage modéré est nécessaire pour maintenir la productivité de certaines espèces ligneuses basses comme, en particulier, Haloxylon salicornicum qui, espèce dominante (en Irak), se trouve, comme le Rhantherium suaveolens (en Tunisie), être très probablement le résultat d'une longue et forte utilisation pastorale.

Inde (Rajastan) :

Les nombreuses mises en défens étudiées par GANER et SATYANARAYAN (1967), GUPTA et SAXENA (1971), SHANKAR et SAXENA (1978) se sont là encore révélées très efficaces pour l'amélioration de la composition floristique et du couvert végétal avec un accroissement remarquable de la participation des graminées pérennes, des buissons et des arbres de forte productivité.

Le tableau n° 17 est extrait des travaux de SANKAR in MANN et DHIR (1981). Ce tableau a été établi pour des formations végétales sur sables et comporte, en particulier, une estimation du temps de mise en défens nécessaire pour une régénération du couvert des graminées pérennes, des buissons et des arbres.

Chine :

Les expérimentations réalisées, en particulier, en Mongolie Intérieure dans une communauté végétale à Artemisia

Tableau n° 17 : Caractéristiques de la dynamique des formations sableuses dans quelques sites mis en défens au Rajasthan (d'après SANKAR, 1981).

P (mm)	Géomorphologie	Espèces pérennes dominantes		Production moyenne (kg ha ⁻¹)		Durée de mise en défens recommandée (ans)
		Graminées	Ligneuses	non protégé	protégé	
150	Ondulations sableuses sur pédiments enfouis	<i>Lasiurus indicus</i>	<i>Haloxylon</i>	782	4518	7
200	- id -	<i>Cenchrus sp.</i>	<i>Prosopis, Ziziphus</i>	390	3740	8
250	- id -	<i>Lasiurus, Cenchrus Cymbopogon</i>	- id -	219	3008	7
250	Sommet de dune	<i>Aristida, Cenchrus</i>	<i>Calligonum</i>	280	230	?
250	- id -	- id -	- id -	490	610	8
250	Bas de dune	<i>Panicum antidotale</i>	- id -	205	2288	?

ordosica et Hedysarum mongolicum , ont conduit aux résultats rapportés au tableau n° 18, après une mise en défens de 8 ans.

En conclusion, cet ensemble d'expériences démontre que, même dans les zones à très faibles précipitations, une végétation peut être rétablie sur des milieux sableux, alors que dans ces mêmes conditions sur les limons, les argiles et, par exemple, les croûtes gypseuses dénudées, la végétation n'a souvent pas ou que très peu de dynamique.

Selon LE HOUEROU (1971) et RODIN et al. (1970), une protection de 2 à 3 années est le plus souvent suffisante, dans les zones sableuses de l'Afrique de l'Ouest, pour provoquer un accroissement spectaculaire de la production (surtout des graminées xéromorphes), allant de pair avec une stabilisation des sables. L'expérience tunisienne démontre que, si pour la steppe en bon état sur sable une mise en défens durant 4 ans peut être favorable au niveau de l'accroissement du couvert végétal et donc de la protection du sol, son intérêt diminue très nettement à plus long terme. La mise en défens n'a cependant que peu d'effets quand elle concerne des dunes vives. Dans une telle situation, il paraît nécessaire de faire d'abord appel aux moyens mécaniques et aux plantations forestières afin d'assurer un certain niveau de fixation des dunes avant de procéder, avec quelques espoirs de succès, à une régénération de la végétation naturelle.

Il est également clair que la nature du substrat et l'état de dégradation ont, comme le bioclimat, une incidence certaine sur la vitesse de régénération de la steppe, mais également sur sa composition floristique.

Compte-tenu des expérimentations déjà réalisées dans les diverses zones arides, on peut proposer, à titre indicatif, une grille de durée optimale de mise en défens fonction d'une part, de l'état initial du couvert végétal et de la pluviosité moyenne annuelle d'autre part (tableau n° 19). L'intérêt de cette notion de couvert végétal est, dans ce contexte, discutable puisque c'est surtout la densité des espèces qui importe. En effet, pour un même niveau de couvert végétal, des situations présentant des densités différentes pour les diverses espèces, manifesteront également des réactions plus ou moins rapides à la mise en défens.

Tableau n° 18 : Effet de la mise en défens sur la végétation de parcours sur sable
(à Wushenchao - Wushen Banner ; Mongolie Intérieure - in : Desert
transformation in China, Academia Sinica, 1978).

Type de communauté végétale	Traitement	Couvert de végétation (%)	Hauteur des buissons (cm)	Hauteur des herbacées (cm)	Poids de matière sèche (g/100 m ²)	Nombre d'années de mise en défens
<i>Artemisia ordosica</i> et <i>Hedysarum mongolicum</i> (annuelle)	clôturé et protégé	60	66	4	6.979	8
	dégradé	25	44	3	2.031	

Tableau n° 19 : Durée relative de mise en défens susceptible, en fonction de l'état initial du couvert végétal et de la pluviosité, de permettre la reconstitution d'un couvert végétal suffisant pour lutter contre l'érosion éolienne.

	< 100 mm/an	100-200 mm/an	200-300 mm/an
Couvert initial minimal permettant une amélioration par mise en défens	> 10 bonne densité	> 5 bonne densité	> 5 bonne densité
Durée moyenne de la mise en défens recommandable	> 5 ans	3-4 ans	2 ans

3.2. ESPECES LOCALES UTILISEES POUR LA FIXATION DES SABLES

Au nord de l'Afrique, parmi la liste des espèces utilisées avec succès (d'après HAGEDORN et al., 1977), rares sont les espèces locales (soulignées dans le tableau n° 20).

Pour les pays du Magreb, LE HOUEROU et PONTANIER (1986) retiennent la liste suivante, qui donne aussi des seuils d'utilisation des espèces en ce qui concerne le climat (P = pluviosité moyenne annuelle ; m = moyennes des minimas du mois le plus froid) :

Dunes continentales :

- P supérieur à 250 mm ; m supérieur à 2°C :

Acacia cyanophylla , Opuntia ficus-indica , Tamarix aphylla ,
Atriplex canescens linearis , Acacia ligulata , A. salicina .

- P supérieur à 200 mm ; m inférieur à 2°C :

Parkinsonia aculeata , Tamarix aphylla , Atriplex canescens linearis .

- P supérieur à 80 et inférieur à 200 mm ; m voisin de 2°C :

Calligonum arich , C. azel , C. comosum , Haloxylon persicum ,
Atriplex canescens linearis , Acacia ligulata .

Voile éoliens ou micro-dunes sur croûtes calcaires ou gypseuses

- P supérieur à 100 mm :

Acacia ligulata , A. salicina , Parkinsonia aculeata ,
Atriplex canescens linearis , Calligonum comosum .

Seuls Calligonum et Tamarix appartiennent à la flore locale.

En Méditerranée orientale, KAPLAN et al. (1970) retiennent une espèce spontanée comme étant particulièrement effi-

Tableau n° 20 : Plantes utilisées pour la fixation des dunes
des zones arides du nord de l'Afrique.

(HAGEDORN et al., 1977)

ARBRES	LIGNEUX BAS	GRAMINEES
<u>Tamarix aphylla</u> (T. articulata) <u>T. gallica</u> <u>T. africana</u> Acacia salicina A. Stenophylla A. sowdeni A. horrida A. raddiana A. farnesiana Eucalyptus sp. (Australie) <u>Calligonum azel</u> <u>Calligonum arich</u> Calligonum arborescens Haloxylon persicum Ricinus communis Saccharum spontaneum Casuarina equisetifolia	<u>Retama raetam</u> <u>Atriplex halimus</u> <u>Leptadenia pyrotechnica</u> <u>Ochradenus baccatus</u> Salvadora persica <u>Genista saharae</u> etc.	Panicum antidotale <u>Panicum turgidum</u> Aristida pennata Aristida karelini <u>Aristida pungens</u> <u>Pennisetum dichotomum</u> Saccharum spontaneum

cace en boûturage direct, même à des pluviosités inférieures à 100 mm, il s'agit de Tamarix articulata (= Tamarix aphylla).

En Iran, LE HOUEROU (1975) note le succès sur de grandes surfaces d'Haloxylon persicum, même dans des zones recevant de 80 à 100 mm de pluviométrie moyenne annuelle (région de Kashan). Dans une zone à 170 mm (Kerman), des plantations de la même espèce sont aussi un succès, mais, surtout, une partie de la fixation a été obtenue à partir du semis direct d'Haloxylon (coût 5 fois inférieur à celui de la plantation).

Dans une autre région d'Iran recevant 170 mm (Albaji), les espèces utilisées pour la fixation et qui ont donné de bons résultats sont :

- Graminées :

<u>Panicum antidotale</u>	(éclats de souche ; très bons résultats)
<u>Pennisetum orientale</u>	se resème de lui-même
<u>Stipagrostis pennata</u>	" "

- Ligneux bas :

<u>Atriplex lentiformis</u>	"	"
<u>Calligonum comosum</u>	"	"
<u>Haloxylon persicum</u>	"	"
<u>Tamarix sp.</u>	"	"

- Arbres :

Tamarix stricta (très bons résultats).

En URSS, BABAEV (1980) donne la liste des espèces locales intéressantes pour la fixation des sables (tableau n° 21) et on trouvera dans PETROV (1970) les caractéristiques de celles qui sont les plus utilisées dans les déserts d'Asie Moyenne et du Kazakhstan.

La flore chinoise est riche et les espèces utilisées en Chine pour la fixation des sables des zones arides de l'Asie Centrale proviennent, pour la plupart, du pays. PETROV (1970) sépare les espèces arborescentes (utilisées aussi pour le bois) qui poussent vite et nécessitent souvent un plan d'eau

Tableau n° 21 : Liste des espèces locales recommandées
pour la fixation des sables (BABAËV, 1980).

<i>Aristida karelini</i>	<i>C. aphyllum</i>
<i>A. pennata</i>	<i>C. turkestanicum</i>
<i>Astragalus unifoliolatus</i>	<i>C. eriopodum</i>
<i>Astragalus pancijugus</i>	<i>C. setosum</i>
<i>Alhagi persarum</i>	<i>Agriophyllum minus</i>
<i>Convolvulus divaricatus</i>	<i>A. arenarium</i>
<i>Heliotropium sp.</i>	<i>A. latifolium</i>
<i>Horaniniwia ulicina</i>	<i>Carex physodes</i>
<i>Tamarix androsovi</i>	<i>C. pachystylis</i>
<i>T. bungei</i>	<i>Ammodendron karelini</i>
<i>T. ramosissima</i>	<i>A. conollyi</i>
<i>T. laxa</i>	<i>A. arenaria</i>
<i>T. elongata</i>	<i>Haloxylon persicum</i>
<i>T. florida</i>	<i>H. aphyllum</i>
<i>T. schowitsiana</i>	<i>Halocnemum strobilaceum</i>
<i>Calligonum elatum</i>	<i>Salsola paletzkiana</i>
<i>C. caput medusae</i>	<i>S. richteri</i>
<i>C. arborescens</i>	<i>Ephedra strobilacea.</i>
<i>C. rotula</i>	

dans le sol, des espèces plus petites utilisées aussi pour l'alimentation des animaux (voir aussi ZHAO XING-LIANG, 1984 in LE HOUEROU, 1985).

Parmi les espèces locales les plus utilisées, en l'absence de plan d'eau :

Caragana horshinskii
Caragana microphylla
Hedysarum scoparium
Hedysarum mongolicum
Atraphaxis frutescens
Ammopiptanthus mongolicum
Artemisia ordosica
Psammochloa villosa
Aristida pennata
Aristida karelini
Calligonum mongolicum
Calligonum caput-medusae
Calligonum arborescens .

Avec plan d'eau proche de la surface :

Populus simonii
Eleagnus moorcroftii
Tamarix ramosissima
Tamarix chinensis
Haloxylon aphyllum
Nitraria sibirica
Nitraria schoberi
Haloxylon persicum .

On utilise aussi les semis d'espèces annuelles locales telles que :

Agriophyllum gobicum
Corispermum hyssopifolium
Salsola collina
Salsola pellucida .

En Inde, VAISHNAN (1974) donne la liste des espèces colonisatrices naturelles des dunes (tableau n° 22), ainsi que

LIGNEUX BAS	GRAMINEES
<i>Calotropis procera</i> <i>Crotalaria burhia</i> <i>Aerva tomentosa</i> <i>Rhynchosia minima</i> <i>Leptadenia spartium</i> <i>Indigofera argentia</i> <i>Zizyphus rotundifolia</i> <i>Ipomea biloba</i> <i>Calligonum polygonoides</i>	<i>Panicum turgidum</i> <i>Eleusine flagellifera</i> <i>Spinifex spp.</i> <i>Eragrostis spp.</i> <i>Saccharum spp.</i>

Tableau n° 22 : Quelques espèces spontanées colonisatrices des dunes en Inde. (VAISHNAN, 1974).

ESPECES LOCALES	ESPECES EXOTIQUES
<i>Prosopis spicigera</i> <i>Delonix alata</i> <i>Tamarix articulata</i> <i>Tecoma undulata</i> <i>Salvadora oleoides</i> <i>Capparis asphylla</i> <i>Acacia jacquemontii</i> <i>Balanites roxburghii</i> <i>Cassia auriculata</i> <i>Anacardium occidentale</i> <i>Acacia senegal</i> <i>Alce sp.</i>	<i>Prosopis juliflora</i> <i>Casuarina equisetifolia</i> <i>Acacia auriculiformis</i> <i>Acacia tortolis</i>

Tableau n° 23 : Liste d'espèces locales ou exotiques se développant bien sur les dunes en Inde. (VAISHAN, 1974).

une liste d'espèces locales ou exotiques qui poussent bien sur ces dunes (tableau n° 23).

Après les nombreuses recherches qui ont eu lieu sur la fixation des dunes en Rajasthan (Inde), KAUL (1970) donne la liste des espèces indigènes (soulignées) ou exotiques qui donnent le plus de succès (tableau n° 24).

3.3. QUELQUES PRINCIPES D'INTERVENTION POUR LA FIXATION DES SABLES EN ZONE ARIDE TUNISIENNE (ESSENTIELLEMENT EN JEFFARA)

3.3.1. Principes de zonage pour une cartographie à grande échelle

Ce travail de zonage se révélera en toutes circonstances très utile, ne serait-ce que dans l'évaluation raisonnée des moyens à mettre en oeuvre pour une lutte efficace contre les sables.

De nombreux critères peuvent être retenus, au niveau de la "clé" du zonage, parmi lesquels les principaux nous paraissent être relatifs :

- au sable lui-même :

- . la morphologie des édifices sableux présents (formes et dimensions) ;
- . l'origine (locale ou extérieure) et la nature du sable (salé ou non ; texture, ...) ;
- . la mobilité du sable.

- au climat environnant :

- . direction préférentielle du vent ;
- . force et fréquence du vent.

ESPECES LOCALES	ESPECES EXOTIQUES
<i>Acacia senegal</i> <i>Albizia lebbek</i> <i>Calligonum polygonoides</i> <i>Cassia auriculata</i> <i>Ricinus communis</i> <i>Ziziphus nummularia</i> <i>Lasiurus indicus</i> <i>Panicum antidotale</i> <i>Panicum turgidum</i> <i>Erianthus munja</i>	 <i>Prosopis juliflora</i> <i>Eucalyptus oleosa</i> <i>Acacia tortilis</i> <i>Acacia victoriae</i> <i>Parkinsonia aculeata</i>

Tableau n° 24 : Espèces locales ou exotiques les plus utilisées pour la fixation des dunes en Inde. (KAUL, 1970).

- au substrat présent sous les sables :

- . type de substrat sur lequel se déplace le sable (croûte, limon, sable compacté, ..., présence éventuelle de nappe et sa proximité, ...).

- à la végétation :

- . nature, état du couvert et dynamique de la végétation pérenne (espèces végétales dominantes permettant de resituer la zone dans la séquence dynamique et permettant aussi d'évaluer les chances d'une régénération par simple protection) ;
- . réaction de la végétation pérenne face au risque d'accumulation et de déflation (résistance au déchaussement, à l'ensablement, ...) ;
- . abondance et recouvrement des espèces annuelles.

La combinaison de certains de ces critères permet d'élaborer la clé de cartographie pour une région donnée. La cartographie pourra être réalisée à l'aide de photographies aériennes récentes et à grande échelle (minimum 1/25.000). L'ensemble des critères d'identification des zones n'étant pas directement appréciables sur photographie aérienne (ex : espèces dominantes), il sera de toute façon nécessaire de compléter le premier zonage obtenu par un travail de terrain.

3.3.2. Exemple de zonage en Jeffara : tableau de diagnose

Les diverses situations examinées au tableau n° 25 (plus ou moins largement répandues) résultent de la combinaison des types de substrats, sous-jacents aux accumulations sableuses, avec les formes et types de modèles éoliens. Les types de substrats retenus ont été classés selon leur niveau relatif de contraintes.

Tableau n° 25 : Diagnose des zones d'intervention contre le sable mobile en Jeffara tunisienne.

TYPE DE SUBSTRAT	SANS CONTRAINTE (A)					SUBSTRATS A CONTRAINTES MOYENNES																				FORTES CONTRAINTES				
						CROUTE GYPSEUSE PROCHE SURFACE (B)					CROUTE CALCAIRE DEMANTELEE (C)					BAS-FONDS INONDABLES NON SALES (D)					FONDS MOYENS SALES A NAPPE (E)					MILIEUX TRES SALES SEBKHA, BORD DE MER (F)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	2	3	4	5	
FORME DE MODELE EOLIEN																														
ESPECES PERENNES																														
<i>Aeluropus litoralis</i>																														
<i>Aristida pungens</i>			•	•				•	•				•	•				•	•											
<i>Artemisia campestris</i>			•	•				•	•				•	•				•	•											
<i>Arthrocnemum glaucum</i>			•	•				•	•				•	•				•	•											
<i>Astragalus armatus</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Atractylis serratuloides</i>						•	•				•	•																		
<i>Atriplex halimus</i>																														
<i>Cynodon dactylon</i>																•	•	•	•											
<i>Echiochilon fruticosum</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Erodium glaucophyllum</i>						•	•				•	•																		
<i>Frankenia thymifolia</i>																					•	•								
<i>Gymnocarpos decander</i>											•	•																		
<i>Halocnemum strobilaceum</i>																					•	•								
<i>Helianthemum lipii</i>																														
<i>var. intricatum</i>																														
<i>Helianthemum lipii</i>																														
<i>var. sessiliflorum</i>	•	•									•	•																		
<i>Imperata cylindrica</i>																					•	•								
<i>Limoniastrum guyonianum</i>																					•	•	•	•		•	•	•	•	
<i>Lycium arabicum</i>																														
<i>Lygeum spartum</i>	•	•	•	•		•	•	•	•																					
<i>Nitaria retusa</i>																														
<i>Nolletia chrysocomoides</i>			•	•				•	•				•	•				•	•											
<i>Ononis natrix</i>	•	•				•	•																							
<i>Plantago albicans</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Retama retam</i>	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	•											
<i>Rhantherium suaveolens</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Salsola vermiculata</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Stipa lagascae</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Suaeda ssp. suaeda</i>																														
<i>Tamarix ssp.</i>																														
<i>Thymelea hirsuta</i>	•	•				•	•				•	•																		
<i>Ziziphus lotus</i>																														
<i>Zygophyllum album</i>																														
ESPECES ANNUELLES SSP	•	•				•	•				•	•				•	•													
<i>Cutandia dichotoma</i>																														
<i>Malcolmia aegyptiaca</i>			•	•				•	•				•	•				•	•											

LEGENDE : FORME ET TYPE DE MODELE EOLIEN :

1. Zone de déflation, zone de départ, formes d'accumulation rares, couvert végétal homogène compris entre 5 et 15 %.
2. Zone à macronebkas, voile, nappe et/ou flèche ; couvert végétal homogène compris entre 5 et 30 %.
3. Zone à microdunes et micronebkas. Couvert végétal par taches compris entre 1 et 5 %.
4. Zone à macronebkas, nappe, voile et dune. Couvert végétal par taches entre 5 et 20 %.
5. Zone à dunes et microdunes ; formes fixées et couvert végétal inférieurs à 1 %.

CLASSES DE PRESENCE DES ESPECES :

- présence forte
- 0 présence moyenne
- présence faible
- absence (pas de sigle).

- . Les substrats sans contrainte édaphique sont constitués de sols de texture fine à grossière, calcaire ou gypseuse (A).
- . Les encroûtements et les croûtes gypseuses (B) ou calcaires démantelées (C) sont considérés comme moyennement contraignants. Il en est de même pour les bas-fonds moyennement salés, présentant une nappe (E). Généralement considérés comme étant très favorables, les bas-fonds temporairement inondables (D) sont ici classés parmi les substrats à contrainte moyenne, même si cette contrainte se réduit à un risque de submersion certaines années.
- . Les milieux de très fortes salures (F) ainsi que les substrats impénétrables aux racines (G) sont considérés comme présentant de fortes contraintes.

Cinq types et formes de modelés sableux ont été retenus, regroupant les 8 catégories analysées au chapitre 2. (§ 2.2.). Ces regroupements, opérés afin de simplifier l'opération de zonage sur le terrain, permettent cependant de conserver les termes de transition entre une zone de déflation et les accumulations sableuses fixées (nebkas) ou non (dunes) de taille variable (micro, macro).

- . Zone de déflation de départ où les accumulations sont rares (1). La végétation dont le recouvrement est compris entre 5 et 15 % est régulièrement répartie. Dans cette situation, la flore diffère selon la présence ou l'absence antérieurement d'un modelé éolien d'accumulation et selon la taille de ce modelé.
- . Zone à micronebkas avec voile, nappe ou flèche (2) présentant un couvert végétal compris entre 5 et 30 %, la végétation étant homogènement répartie.
- . Zone à microdunes et micronebkas (3). Dans ce type de situation, le couvert végétal est compris entre 1 et 5 %, la végétation fixant les micro-nebkas étant répartie par taches.
- . Zone à macronebkas avec nappe, voile et dunes (4) où le couvert végétal est relativement élevé (5 à 20 %) mais la végétation est répartie par taches.

. Zone à microdunes et dunes non fixées (5) à couvert végétal insignifiant (inférieur à 1 %).

Les apports sableux ne sont pas toujours essentiellement locaux et certains types de substrats doivent obligatoirement bénéficier des apports à partir de sources extérieures. C'est, en particulier, le cas des substrats impénétrables aux racines (G), même s'ils ont pu être, dans des passés parfois très récents, eux-mêmes source de sable. C'est également, mais à un moindre titre, le cas des substrats très fortement salés (F) et des bas-fonds inondables (D). Ceci explique l'absence au tableau n° 25 d'une colonne "Zone de déflation" pour ce type de substrat "impénétrable aux racines". A signaler également qu'une accumulation peut lever, au moins partiellement, la contrainte d'un milieu.

Chaque situation ou milieu (7 substrats sous-jacents croisés par 5 formes et types de modèles éoliens) est renseignée quant à l'identité des espèces végétales dominantes (sur les modèles éoliens) et susceptibles, par leur développement, de participer à la fixation des sables. Des symboles simples permettent de rendre compte de l'abondance relative d'une même espèce dans chacun des milieux où elle est présente :

. = l'espèce est présente mais rare ;

o = l'espèce est moyennement abondante ;

0 = l'espèce est abondante ou très abondante.

Bien entendu, considérer Rhantherium suaveolens et Salsola vermiculata comme très abondantes ne signifie nullement que les densités ou les recouvrements de ces deux espèces soient équivalents. Si la végétation est régulièrement distribuée dans les types de modèles éoliens 1 et 2, elle est par contre pour les autres formes répartie par taches, les modèles fixés par la végétation alternant avec les modèles mobiles et dénudés.

3.3.3. Exemples de traitements à réaliser

C'est au total 34 situations qui ont été repérées (7 types de substrats sous-jacents et 5 types et formes de

modelés éoliens) et il n'est pas possible de donner ici, pour chacune d'entre-elles, les traitements appropriés pour aboutir à la fixation des sables. Nous indiquerons cependant les grands traits des espèces forestières et les actions envisageables, selon les types de milieux, qui seront précisés pour les divers types et formes de modelés éoliens présents sur la croûte calcaire démantelée (situation la plus fréquente en Jeffara tunisienne).

3.3.3.1 Espèces forestières spontanées ou exotiques les mieux adaptées

. Sables sur sol profond :

Acacia tortilis
Acacia cyanophylla
Acacia salicina
Atriplex canescens subsp. linearis et var. gigas
Calligonum sp.
Ephedra alata sp. alenda
Eucalyptus camaldulensis
Haloxylon persicum
Leptadenia pyrotechnica
Myoporum insulare
Retama raetam
Ricinus communis .

. Sables sur croûte gypseuse :

Dans cette situation, la plantation d'arbres ne présente que très peu de chances de succès et il est préférable de faire appel aux moyens mécaniques de fixation et de planter des buissons psammophiles quand l'épaisseur de sable est suffisante.

. Sables sur croûte calcaire démantelée :

Le décroûtage possible permet l'introduction d'Acacia cyanophylla (aux pluviosités supérieures à 200 mm). Il est également possible, dans cette situation, d'introduire :

Eucalyptus microtheca
Parkinsonia aculeata
Prosopis juliflora .

. Sables sur bas-fonds non salé à nappe :

Acacia cyanophylla
Acacia horrida
Haloxylon aphyllum
Prosopis juliflora .

. Sables sur bas-fonds salé à nappe :

Atriplex halimus
Atriplex mollis
Atriplex nummularia
Casuarina equisetifolia
Casuarina heterophylla
Nitraria retusa
Prosopis juliflora
Tamarix aphylla

3.3.3.2. Examen de quelques situations concrètes en Jeffara tunisienne

* Zone C2

- Diagnose :

Les micronebkas et/ou flèches de sable de hauteur inférieure à 0,5 m sont déjà en partie colonisées par de la végétation spontanée dont le couvert se situe entre 5 et 10 %. Rhantherium suaveolens , l'espèce dominante est accompagnée de nombreuses autres espèces pérennes : Artemisia campestris , Plantago albicans , Helianthemum lippii var. sessiliflorum , etc. Les espèces annuelles restent relativement fréquentes : Asphodelus refractus , A. tenuifolius , Ifloga spicata ...

- Traitement :

Dans une telle situation, les actions de semis et de plantations semblent inutiles, une mise en défens durant 2 à 3 ans (3 à 4 ans pour les situations les plus sèches) paraissant suffisante pour fixer les sables.

* Zone C3

- Diagnose :

Les édifices sableux ont une hauteur restant inférieure à 1 m. Les mésonebkas sont fixées par Aristida pungens dont le recouvrement reste le plus souvent compris entre 2 et 5 %. Rhantherium suaveolens et Aristida pungens sont les espèces dominantes et sont accompagnées de Malcolmia aegyptiaca et Cutandia dichotoma à l'exclusion de toute autre espèce annuelle.

- Traitement :

Une mise en défens de durée de 4 à 6 ans est susceptible d'assurer une stabilisation de tels modelés éoliens. La fixation des sables peut être aidée et accélérée par le resemis d'espèces locales herbacées, telles que : Malcolmia aegyptiaca et Aristida pungens (que l'on peu aussi bouturer) ou l'installation d'espèces ligneuses, telles que : Calligonum comosum , Retama raetam , Acacia sp. , Atriplex canescens .

* Zone C4

- Diagnose :

Dans ce cas, les édifices sableux sont fixés par Aristida pungens restant malgré tout à un niveau de couvert végétal faible (2-5 %). Il n'y a plus alors de sable mobile. Les zones interdunaires sont marquées par Artemisia campestris . La végétation d'annuelles est faible : Asphodelus sp. , Ifloga spicata .

- Traitement :

Une diminution de la charge animale peut permettre, dans ce cas, la multiplication des bonnes espèces pastorales. Des plantations forestières ne sont nullement nécessaires.

* Zone C5

- Diagnose :

Cette situation est surtout marquée par la dominance de dunes libres et/ou barkanes atteignant 2 m de hauteur. Aristida pungens reste présent mais avec un couvert très faible (inférieur à 1 %) et participe avec Retama raetam à l'édification de nebkas éventuellement très imposantes quand elles sont fixées par cette dernière espèce. Si Malcolmia aegyptiaca reste présent, les annuelles sont cependant fort rares.

- Traitement :

La mise en défens et même le resemis, employés seuls, ne permettraient pas d'assurer la fixation des sables. Le recours aux méthodes classiques de fixation (palissage, carroyage,...) paraît ici nécessaire. Le resemis ou le bouturage d'espèces locales peut cependant permettre de réduire considérablement les coûts de protection (frais de pépinière et d'arrosage des arbres à planter). Il est ainsi possible de semer des rangs d'Aristida pungens, de Malcolmia aegyptiaca, à proximité des rangs de palissage (2 à 5 m) dans les zones où les sables montrent les signes d'un début de fixation. Il faut cependant tenir compte du fait que de tels resemis (ex : Calligonum sp., Atriplex canescens) ne présentent de bonnes chances de succès qu'en année pluviométriquement favorable. Le bouturage d'Aristida pungens à l'automne ou mieux, la plantation de jeunes touffes, est également possible. Le repiquage doit être effectué au plus tôt après le prélèvement des boutures ou des jeunes touffes, dans une zone peu sujette à la dégradation. Un certain nombre d'espèces ligneuses peuvent être préconisées : Calligonum azel, C. arich, Ephedra alata sp. alenda, Retama raetam.

BIBLIOGRAPHIE

- ACADEMIA SINICA, 1978 - Desert transformation in China - Summing up of masses experiences in sand control. Scientia Sinica , 21 (2) : 251-278.
- ADAM, J.G., 1957 - L'acheb des sols sablonneux aux environs de Dakar. Bull. IFAN , 19, A (4) : 1135-1145 et 8 fig.
- ADAM, J.G., 1967 - Evolution de la végétation dans les sous-parcelles protégées de l'UNESCO-IFAN à Atar (Mauritanie). Bull. IFAN , 29, A (1) : 92-106.
- AYYAD, M.A., 1978 - A preliminary assessment of the effect of protection on the vegetation of the Mediterranean desert ecosystems. Taekholmia , 9 : 85-101.
- AYYAD, M.A., SCHOLTEN, L., and HUHKELOVEN, M., 1978 - Effect of protection on vegetation composition. S.A.M.D.E.N.E. Progress report n° 4, vol. 1 (3) : 1-28 and 3 fig.
- BABAEV, A.G. (ed), 1980 - Shifting sands in the deserts of USSR : stabilization and afforestation. Center for International Projects, USSR Commission for UNEP, Moscow, 318 p.
- BAGNOLD, R.A., 1954 - The physics of blown sand and desert dunes. LONDON-METHUEN XXIV, 226, 84 p.
- BHIMAYA, C.P., KAUL, R.H. and GANGULI, 1961 - Sand dune rehabilitation in Western Rajasthan. Proc. Fifth World Forestry Congress, 358-63.
- BOUDET, G., 1979 - Quelques observations sur les fluctuations du couvert végétal sahélien au Gourma malien et leurs conséquences pour une stratégie de gestion sylvo-pastorale. Bois et Forêts des Tropiques , 184 : 31-44.

- BOTERENBROD, A.J., VAN DONSELAAR-TEN-BOKKEL HUININK, W.A.E., VAN DONESLAAR, J., 1956 - Quelques données sur l'écologie de la végétation des dunes et sur la fonction de l'enracinement dans l'édification des dunes de la côte méditerranéenne de la France. Comm. S.I.G.M.A. , 131 : 523-547.
- BOWERS, J.C. - The plant ecology of inland dunes in Western North America. Journal of Arid Environments , 5 : 199-220.
- BUFFINGTON, L.C., and HERBEL, C.H., 1965 - Vegetational change on a semi-desert grassland range from 1858 to 1963. Ecol. Monogr. , 35 : 135-164.
- BENDALI, F. (En cours de publication) - Etude des principales espèces pérennes psammophytes de la Jeffara tunisienne en vue de leur utilisation dans la fixation des sables. Bulletin Technique de l'Institut des Régions Arides - Médénine.
- BENDALI, F., 1983 - Etude autoécologique sur Aristida pungens (Desf.) dans la zone aride tunisienne. Séminaire de Djerba sur l'érosion éolienne.
- CISSE, I.B., 1982 - La régénération des terrains dégradés. In : La productivité des pâturages sahéliens, Editeurs DE VRIES et DJITEYE, Pudoc Wageningen, chap. 8 : 440-449.
- COQUE, R., 1962 - La Tunisie présaharienne - Etude géomorphologique. Thèse, Paris - A. Colin, 476 p.
- COQUE, R., 1977 - Géomorphologie - A. Colin, Paris, 430 p.
- DEPIERRE, D. et GUILLET, H., 1971 - Désertification de la zone sahélienne au Tchad (Bilan de dix années de mise en défens). Bois et Forêts des Tropiques , 139 : 3-25.
- DITTNER, H.J., 1959 - A study of the root systems of certain sand dune plants in New Mexico. Ecology , 40 (2) : 265-273.

- EL HAMROUNI, A. et SARSON, N., 1975 - Exploitation des parcours forestiers en Tunisie Centrale. In : 1ère Réunion du FAO - Groupe des Herbages Méditerranéens. Firenze (Italie) 16-18 avril 1974 : 175-184.
- EL HAMROUNI, A., 1982 - Forêts, parcours et équilibre écologique dans les pays du projet de la ceinture verte pour le Nord de l'Afrique. Séminaire sur les techniques de reboisement - Alger 18-21 janvier 1982, 10 pages ronéo. Texte original en arabe.
- EL HAMROUNI, A., 1982 - Parcours, oasis et ensablement. Séminaire sur la protection des oasis. Projet de la ceinture verte pour le Nord de l'Afrique. Nouakchott 22-30 octobre 1982, 6 pages ronéo. Texte original en arabe.
- EL HAMROUNI, A., 1985 - Les systèmes pastoraux maghrébins face à la désertification. Consultation FAO sur le rôle de la forêt dans la lutte contre la désertification. Saltillo (Mexique) 24-28 juin 1985, 25 pages ronéo.
- EL HAMROUNI, A., 1986 - Atriplex species and other shrubs in range improvement in North Africa. Reclamation and Revegetation Research, 5 (1986) : 151-158. Elsevier Publishers BV, Amsterdam.
- EL KADY, H.F., 1980 - Effect of grazing pressures and certain ecological parameters on some fodder plants of the Mediterranean coast of Egypt. Thesis Ms. Sc. Tanta University, 97 p.
- ESCADAFAL, R., 1979 - Contribution à l'étude des ressources en sols de la plaine des Ababsas (Médénine). Etude n° 542, DRES - Division des Sols - ORSTOM-TUNIS, 49 p., annexes (19), 2 cartes.
- ESCADAFAL, R., 1981 - L'étude de la surface du sol dans les régions arides (Sud tunisien). Recherches méthodologiques. ES 187 - DRES - Division des Sols - Tunis, 64 p.

- ESCADAFAL, R., 1986 - Proposition-Programme AEROSOLS DESERTIQUES - ATP-CNRS, 11 p. ronéo - ORSTOM, Atelier télédétection, BONDY.
- FAO/DANIDA, 1974 - Report on the FAO/DANIDA Interregional Training Center on heathland and sand-dune afforestation. FAO/DEN/TF, 123, Rome, 239 p.
- FLORET, C., 1981 - The effects of protection on steppic vegetation of the Méditerranéen arid zone. A dynamic study on five types of vegetation in Southern Tunisia. Symposium "Dynamique de la végétation dans les formations méditerranéennes ligneuses", Montpellier 15-20 septembre 1980. Vegetatio, 46 : 117-129.
- FLORET, C., LE FLOC'H, E., PONTANIER, R., 1983 - Phytomasse et production végétale en Tunisie présaharienne. Acta Oecologica, Oecol. Plant. , 4 (18) n° 2 : 133-152.
- FLORET, C., LE FLOC'H, E., PONTANIER, R., ROMANE, F., 1978 - Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agro-pastoral des régions arides. Application à la région de Zougrata. Inst. Reg. Arides, Médenine - Dir. Ress. Eau et Sol - Tunis Doc. Tech. n° 2, 74 p., 1 carte .
- FLORET, C., PONTANIER, R., 1982 - L'aridité en Tunisie présaharienne. Travaux et documents de l'ORSTOM n° 150, Paris, 544 p.
- FLORET, C., PONTANIER, R., 1984 - Aridité climatique, aridité édaphique. Bull. Soc. Bot. Fr. , 131, Actual. Bot., (2/3/4) : 265-275.
- FLORET, C., PONTANIER, R., RAMBAL, S. 1982 - Measurement and modelling of primary production and water use in a South Tunisian steppe. Journal of Arid Environments , 5 : 77-90.
- GREIG-SMITH, P., 1961 - Data on pattern within plant communities. II : Ammophila arenaria (L) Link. Journal of Ecology , 49 (3) : 703-708.

- GANER, Y.D, and SATYANARAYAN, Y., 1967 - Phytosociological studies of Monsoonal vegetation. Indian For. , 93 : 12-27.
- GUPTA, R.K. and SAXENA; S.K., 1971 - Ecological studies on the protected and overgrazed rangelands in the arid zone of Western Rajasthan. J. Indian Bot. Soc. , 50 (4) : 289-300.
- HAGEDORN, H., GIEBNER, K., WEISE, U., BUSCHE, D., GRUNERT, G., 1977 - Dune stabilization. A survey of litterature on dune formation and dune stabilization. Geographisches Institut Universitat Würzburg, Eschborn, 194 p.
- HOPE-SIMPSON, J.F., JEFFERIES, R.I., 1966 - Observations relating to vigour and debility in marram grass (Ammophila arenaria). Journal of Ecology , 54 : 271-274.
- HUISKES, A.H.L., 1977 - The natural establishment of Ammophila arenaria from seed. Oikos , 29 : 133-136.
- IMAM, M., 1979 - Seed and seedling studies. Proceedings of the International Workshop of SAMDENE Project. Alexandria, January 1979 : 110-113.
- IMAM, M., RUSHDY, E., 1979 - Seed germination and seedling emergence. SAMDENE Progress Report n° 5, vol 1 : Plant studies (2) : 1-10 and 3 fig.
- IMAM, M., SHUKRY, S., 1976 - Seed studies. SAMDENE Progress Report n° 2, part 1 (4) : 1-10.
- IMAM, M., SHUKRY, S., RUSHDY, E., 1977 - Seed studies. SAMDENE Progress Report n° 3, part 1 (5) : 1-22.
- IMAM, M., SHUKRY, S., and RUSHDY, E., 1978 - Seed studies - Part 1 - Natural sowing and effect of soil depth and moisture content on seed germination and emergence of seedling, 6-1 à 4. Part 2 - Phenology and growth of

Gharbaniat species, 6-5 à 6-2. SAMDENE Progress Report n° 4, vol 1, 6-1 à 6-2 and fig.

IMAM, M., SHUKRY, S., RUSHDY, E., 1978 - Seed studies (1) - Natural sowing and effect of soil depth and moisture content on seed germination and emergence of seedling. SAMDENE Progress Report n° 4, vol 1 Plant Studies (6) : 1-4.

KAPLAN, J., KARSCHOV, R., KOLAR, M., 1970 - Israel. In : Afforestation in arid zones. R.N. KAUL (ed), 136-154. Dr. W. Junk, The Hague.

KAUL, R.N. (ed), 1970 - Afforestation in arid zones. Dr. W. Junk, The Hague, 435 p.

KHATTALI, H., 1981 - Recherches stationnelles sur la désertification dans la Djeffara (Tunisie). Dynamique de l'érosion éolienne. Thèse 3ème cycle, Université Paris I, 218 p.

KUNHOLTZ-LORDAT, G., 1923 - Les dunes du Golfe du Lion. P.U.F. Paris.

LE HOUEROU, H.N., 1959 - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie Méridionale. Inst. Rech. Sah., Alger. Mémoire h.s., 510 p.

LE HOUEROU, H.N., 1975 - Report on a consultation mission to the Range Organization of Iran. FAO, AGPC:MISC/33, 13 p.

LE HOUEROU, H.N., 1985a - Aspects météorologiques de la croissance et du développement végétal dans les déserts et les zones menacées de désertisation. Organisation Météorologique Mondiale, 69 p. miméo.

LE HOUEROU, H.N., 1985b - Aperçu écologique des déserts chinois. Communication présentée à la Société de Biogéographie, Paris, le 20 juin 1985, 32 p.

- LE HOUEROU, H.N., 1986 - The desert and arid zones of Northern Africa. In : Hot deserts and Arid Shrublands, B., M. EVENARI et al. (ed), Elsevier, Amsterdam, 101-147.
- LE HOUEROU, H.N., McKELL, C.M., (sous presse) - Criteria for plant selection in revegetating arid, semi-arid and marginal lands. Revegetation Handbook, Nat. Acad. of Sciences. Academic Press, Wash.D.C.
- LE HOUEROU, H.N., PONTANIER, R., 1986 - Evaluation des plantations sylvo-pastorales dans la zone aride de Tunisie. Séminaire sur la désertification, Djerba, 24-29/11/86, 70 p.
- LONG, G.. 1954 - Contribution à l'étude de la végétation de la Tunisie centrale. Ann. Serv. Bot. Agron. , Tunisie, 27, 388 p. et 1 carte couleur 1/200.000 h.t.
- MAINGUET, M., 1978 - Dunes et autres édifices sableux éoliens. Actions éoliennes (déflation, transport corrasion). Recherche bibliographique. Cab. Géographique physique - Reims, 344 p.
- MANN, H.S., and DHIR, R.P., 1984 - Critical research problems in arid zones : insights from twenty-five years' work in the Jodhpur Institute of India. In : "Ecology in Practice" : Part 1. DICASTRI, BAKER, HADLEY Editors. Tycooly Internat. Publish. Lim. Dublin. - UNESCO Paris, Chap. 14 : 243-261.
- McKEE, E.D., DOUGLAS, J.R., 1971 - Growth and movements of dunes at White Sands National Monument (New Mexico). US Geological Survey Professional Paper, 750 (D) : 108-114.
- MTIMET, A., ESCADAFAL, R., 1983 - Carte des ressources en sol de la Tunisie (1/200.000). Feuille de Médenine. Dir. Ress. Eaux et Sols, Tunisie, ES 197.
- NOBLE, I.R., 1977 - Long term biomass dynamics in an arid chenopod shrub community at Koonamore South Australia. Austr. J. Bot. , 25 : 639-653.

- NOVIKOFF, G., 1975(a) - Above-ground vegetation standing crop and production 1974. US/IBP. Desert Biome. Tunisian Presaharian Project Progress Report n° 3 : 1974 progress : 15-24.
- NOVIKOFF, G., 1975(b) - Influence of grazing on vegetation production. US/IBP Desert Biome. Progress Report n° 4 : 1975 progress : 62-65.
- PETROV, M., 1970 - The USSR, the Central Asia. In : Afforestation in arid zones. R.N. KAUL (ed), 210-267. Dr. W. Junk, The Hague.
- REMPEL, P.J., 1936 - Crescentic dunes of the Salton Sea. Ecology 17 : 358-374.
- RODIN, L.E., VINOGRADOV, B., MIROCHNITCHENKO, Y., PELT, M., KALENOV, H., BOTSCHANTZEV, V., 1970 - Etude géobotanique des pâturages du secteur ouest du département de Médéa (Algérie). 2 cartes coul. 1/200.000. Nauka Leningrad, 124 p.
- SAXENA, S.K., 1977 - Vegetation and its succession in the Indian desert. In : Desertification and its control - Indian Council for Agricultural Research, New Delhi : 176-92.
- SHANKAR, V., and SAXENA, S.K., 1978 - Temporal changes in the vegetation of exclosures in various desertic habitats. In : "Proceedings and Selected Papers of International Symposium on Arid Zone Research and Development", Jodhpur : 175-182.
- SHARP, R.P., 1966 - Kelso dunes, Mohave desert, California. Geological Society of America Bulletin , 77 : 1045-1074.
- SMITH, D.A. and SCHMUTZ, E.M., 1975 - Vegetatives changes on protected versus grazed desert grassland ranges in Arizona. Range Management , 26 (6) : 453-458.

- THALEN, D.C.P., 1979 - Ecology and utilization of desert shrub rangelands in Iraq. W. Junk Publishers, The Hague, 448 p.
- TOUTAIN, B., 1977 - Essais de régénération mécanique de quelques parcours sahéliens dégradés. Rev. Elev. Méd. Vét. Pays Trop. , 30 (2) : 191-198.
- TRICART, J., CAILLEUX, A., 1969 - Traité de géomorphologie : Le modelé des régions sèches. SEDES , Paris, 472 p.
- TRUMBLE, H.C. and WOODROFFE, K., 1954 - Influence of climatic factors in the reaction of desert shrubs to grazing by sheep. In : "The biology of desert". Inst. Biol., London Symp. 3 : 129-147.
- UNESCO, 1983 - Etude de cas sur la désertification. Recherches sur les ressources naturelles XVIII - UNESCO Paris, 291 p.
- VAISHNAV, M.N., 1974 - Country statement : India. In : Heathland and sand dune afforestation. FAO/DANIDA Inter-Regional Training Center. FAO/DEN/TF, 123 : 175-178.
- WILLIS, A.J., FOLKES, B.F., HOPE-SIMPSON, J.F., YEMM, E.W., 1959 - Braunton burrows : the dune system and its vegetation, Part III. Journal of Ecology , 47 (1) : 1-24.