

# **PARTIE I**

## **LE CYCLE ACTUEL DES POUSSIÈRES SAHARIENNES**



## Introduction

Comme dans la plupart des déserts, il y a au Sahara deux manifestations importantes de la dynamique éolienne : les sables désertiques et les poussières. Mais, par opposition aux sables désertiques qui constituent des étendues dunaires considérables, géographiquement bien circonscrites, pérennes à l'échelle historique et que l'homme a appris à éviter ou à traverser, le phénomène des poussières éoliennes a un caractère moins bien défini dans l'espace, plus imprévisible dans le temps, moins bien compris et anciennement redouté. Au Sahara, les poussières ont longtemps inquiété les nomades qui voyaient dans leurs tourbillons la manifestation de génies maléfiques. De même, au-delà des mers, en Europe ou au Moyen-Orient, les pluies de sang ont eu depuis toujours la signification de très mauvais présages... Cette inquiétude a été l'expression populaire d'une longue méconnaissance du phénomène. Pendant longtemps, on n'a pas compris la nature des poussières, on ignorait leur provenance, leur mode de déplacement et les raisons de leur chute.

Fondamentalement, le «phénomène poussières» n'existe que par la convergence de deux facteurs : la présence d'un stock de particules très fines potentiellement mobilisables et celle d'un vent suffisamment fort pour les mobiliser. L'environnement désertique est particulièrement propice à cette convergence mais, d'une part, tous les substrats ne sont pas également aptes à libérer ces particules fines et, d'autre part, le vent n'y montre pas partout la même compétence. Le premier problème concernant les poussières sahariennes est donc de localiser leurs zones-sources, d'en apprécier la productivité et de s'interroger sur les processus de libération des particules. Une fois mobilisées, les poussières se déplacent en suspension plus ou moins loin vers les marges du Sahara et au-delà. Les trajectoires des lithométéores sont diverses mais s'inscrivent néanmoins dans la logique de situations météorologiques-types. Les caractères sédimentologiques du matériel varient ou non pendant ce transport, jusqu'à la chute des poussières.

Il existe donc un cycle actuel des poussières sahariennes dont l'étude s'avère indispensable à la compréhension du rôle que les poussières ont joué, par le passé, dans les sédimentations désertiques et péri-désertiques.



**A**

**La notion de zone-source**



# 1

## Les substrats des zones-sources : l'exemple du Grand Erg Occidental

Au Sahara, la mobilisation des poussières dépend des fréquence, vitesse et turbulence du vent. Cependant, son efficacité est également fonction de l'aptitude des substrats à y fournir des particules fines. Jusqu'à présent, les travaux sur les zones-sources ont été très rares au Sahara. Quelques recherches s'appuyant sur un échantillonnage réduit et géographiquement dispersé ont abordé la comparaison des substrats et des aérosols mais en se limitant à l'étude de la fraction très fine et sans distinguer la variété des substrats [1, 2]. Toutefois, Schütz et Jaenicke [3] ont souligné la faible production de poussières des massifs dunaires en Libye et, d'une manière générale, Yaalon et Ganor [4] ont considéré les piémonts alluviaux comme une source majeure de poussière.

L'étude approfondie des substrats désertiques était donc nécessaire pour y préciser les caractères favorables à la libération des poussières. Comme une étude de terrain ne pouvait porter sur tout le Sahara, il a fallu la restreindre à un secteur accessible, d'étendue raisonnable, mais offrant des sols et substrats représentatifs du domaine désertique, dans le Nord du Grand Erg Occidental [5].

### Les substrats du Grand Erg Occidental

#### Le cadre géographique

Cette zone-test, géomorphologiquement étudiée par Callot [6], couvre environ 50000 km<sup>2</sup> entre le piémont de l'Atlas saharien et la marge nord du Grand Erg Occidental (*Fig. 2*). Les substrats y sont propices à une intense déflation éolienne qui s'est exercée depuis l'Holocène récent. La végétation disparaît pratiquement vers le Sud où de petites dunes et nebkas au sable fin reposent souvent sur des dunes anciennes au matériel plus grossier. De plus, un voile

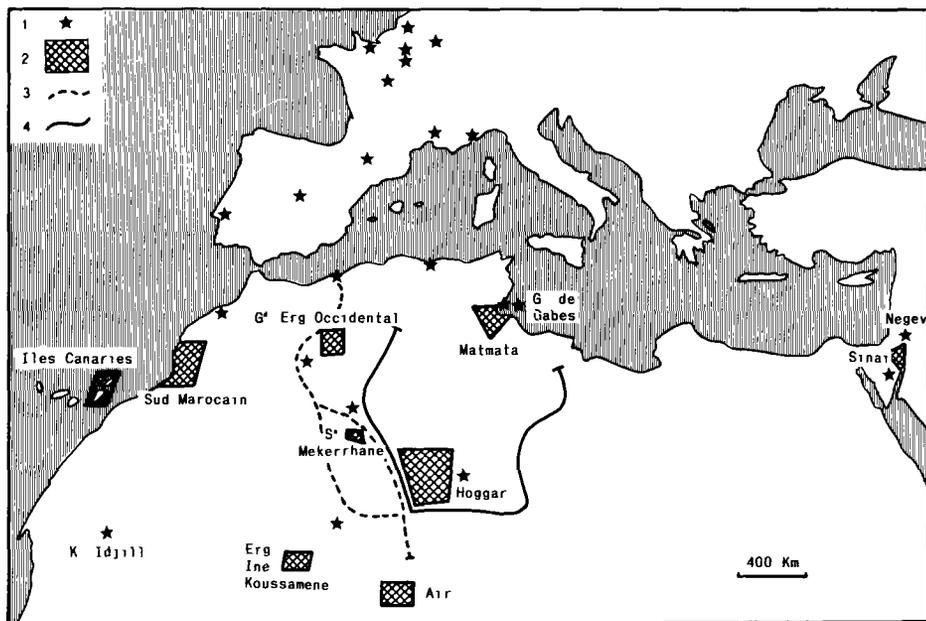


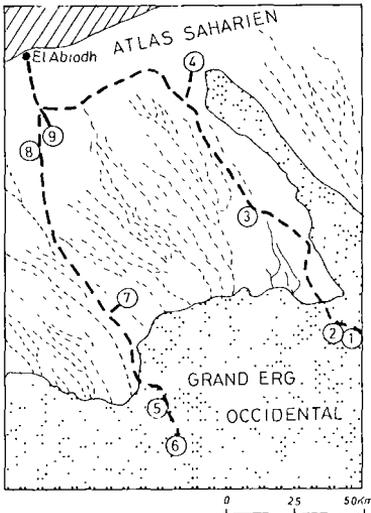
Figure 1. – Les régions étudiées et la localisation de l'échantillonnage. 1) Prélèvement sur site isolé; 2) région étudiée; 3) transect occidental; 4) transect oriental.

d'épaisseur centimétrique de sables roux s'étale à peu près partout sur les affleurements rocheux : cette «pellicule rousse» est le résidu déposé lors des tempêtes de sable et le premier matériel remobilisé lors des tempêtes suivantes. Des dépressions ou *dayet* sont creusées dans les grès, calcaires et argiles tertiaires (Continental terminal). Il s'agit soit de dolines sur les hamadas, soit de dépressions hydro-éoliennes d'âge quaternaire où des dépôts palustres et lacustres (argileux, carbonatés, gypseux et salés) se sont accumulés pendant la première moitié de l'Holocène.

Sur le terrain, le vent est apparu comme un agent d'érosion très sélectif érodant préférentiellement certaines roches ou formations superficielles ayant subi une préparation *in situ* préalable (météorisation, décohésion, pulvérisation ou agrégation etc.). L'examen des *états de surface des sols* a montré deux principaux types de mobilisation des particules fines par le vent :

— la *déflation directe* par abrasion du substrat cohérent (sols, roches du tertiaire, dépôts lacustres d'âge holocène, évaporites etc.).

— le *vannage* de la fraction fine des sables mobiles (petites dunes en migration du Nord vers le Grand Erg, formées de sables encore assez peu triés; et surtout fraction limono-argileuse de la «pellicule rousse»).



**Figure 2.** – Piémont atlasique et Grand Erg Occidental : localisation et échantillonnage. 1 et 2) Hassi Mejna; 3) Bour ech Chaamba; 4) Dayet el Anz; 5) Hassi Cheikh; 6) Dayet el Mellah; 7) M'Tilfa; 8) Khrabeg el Djemel; 9) Dayet oum Deb Deb.

### Les types de substrats mobilisables

Les formations susceptibles d'être érodées par le vent ont été classées en trois groupes selon leur comportement face à la déflation.

#### *Les «sols pulvérulents»*

Ces formations superficielles d'origine variée ont une structure sans cohésion, en agrégats de quelques microns à plus de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre, indépendante de la taille des particules et résultant de la préparation du matériel par des actions physiques (ultra-déssiccation à des pF de l'ordre de 6) ou chimiques (rôle des sels, du gypse etc.) encore peu étudiées. Ces matériels se comportent comme de la poudre. Non protégés par une pellicule de sable ou de graviers, ils sont aisément pris en charge par le vent et peuvent être mobilisés, même par temps calme, dans les *djnouns*, petits tourbillons d'origine thermique. Ils alimentent alors le fond d'aérosols atmosphériques.

#### *Les sables mobiles*

Ce sont parfois les sables superficiels des dunes fonctionnelles ou fixées, mais surtout ceux de la «pellicule rousse». Mobilisés par des vents assez forts, ces sables se déplacent par roulement, par saltation, voire par suspension courte dans les chasse-sables et tempêtes de sable. Parfois assez grossiers, ils protègent alors les substrats meubles de la déflation par temps calme. Le vannage de la fraction fine accompagnant la mobilisation des sables mobiles exige donc une dynamique éolienne plus efficace que celle soulevant les particules des sols pulvérulents.

### *Les sédiments cohérents*

Quand ils n'ont pas subi de modification aboutissant à leur *pulvérisation*, les sédiments sont plus lentement érodés par le vent (corrasion lors des tempêtes par les sables en mouvement). Participant donc moins continûment et en moindre proportion à la fourniture immédiate d'aérosols, ils constituent un stock potentiel important de matériel fin. Il s'agit des roches plus ou moins friables du soubassement tertiaire, des limons et argiles de décantation des grands oueds venant de l'Atlas et des dépôts lacustres ou palustres des fonds de dayet.

### **Les caractéristiques granulométriques des substrats**

Parmi les particules utilisables par le vent dans les substrats du Grand Erg Occidental, les unes sont *immédiatement mobilisables* et livrées à la déflation au premier coup de vent; les autres, intégrées aux terrains cohérents ou non agrégées en particules disponibles, forment un *stock potentiel* dont la contribution aux poussières est lente et discontinue. L'étude en laboratoire des *particules immédiatement disponibles* s'est faite sur échantillon brut tamisé à sec. En revanche, celle des *particules potentielles* a nécessité leur libération par lavage sous l'eau pour détruire les agents d'agrégation.

D'après les expériences de Bagnold [7], le diamètre le plus favorable à la mobilisation éolienne des particules est de 80  $\mu\text{m}$ ; de part et d'autre de cette valeur critique, les particules jusqu'à 40 ou 180  $\mu\text{m}$  nécessitent les mêmes forces de vent pour leur mise en mouvement. Dans l'étude granulométrique des échantillons, les valeurs-seuils de 40 et 100  $\mu\text{m}$  ont été finalement retenues car elles représentent bien la «fourchette granulométrique» des poussières grossières collectées au-dessus des zones-sources au Sahara.

### **Stock disponible et stock potentiel**

L'analyse de ces stocks est une première approche de l'aptitude des divers substrats à fournir des poussières. Mais les résultats ne concernent que la *productivité* (ou aptitude potentielle) des substrats en particules fines et non leur *productivité* effective. En effet, issus de traitements en laboratoire, ils ne prennent pas en compte certaines conditions naturelles du milieu désertique. D'une part, les remaniements permanents fractionnant les agrégats ou amenuisant les particules et, d'autre part, la protection des substrats par les micro-regs de déflation (sables grossiers et graviers) sont négligés.

D'après le *Tableau I*, les sols pulvérulents ont les stocks potentiels en particules < 40  $\mu\text{m}$  les plus élevés, à l'exception des dépôts gypseux dont le gypse cristallise souvent vers 100  $\mu\text{m}$ . Si les pellicules sableuses incorporent encore une forte fraction < 40  $\mu\text{m}$ , les dunes et nebkas ont perdu toute leur fraction fine. Dans la pellicule sableuse cependant, la variabilité est assez grande, fonction du type de substrat réalimentant la pellicule en fraction fine ou de l'apport en dépôt fin lors du dernier vent de sable. Les sédiments cohérents contiennent des stocks potentiels très importants, surtout les alluvions limono-argileuses et les dépôts lacustres argileux

Tableau 1. — Stock potentiel et stock disponible en particules &lt; 100 µm dans les substrats de l'Erg Occidental.

Moyennes des % (sur échantillon global)			
	Stock potentiel < 40 µm	Stock disponible	
		< 40 µm	40-100 µm
Sols pulvérulents	60	7,3	20
Pellicule sableuse	20	2,8	33
Dépôts éoliens :			
– dunes	3	0,4	6
– nebkhas	1	0	23
– limons sableux	61	4	16
Substrats :			
– tertiaire	47	2	22
– dépôts d'oued	55	2,5	25
– dépôts lacustres de sebkha :			
• sableux	25	1	19
• argileux	82	0	0
• carbonatés	97	14	38

et carbonatés. Le fort pourcentage de ces derniers est dû à la cristallisation micritique de la calcite (vers 4 µm).

Dans les sols pulvérulents, les particules (< 40 µm) immédiatement disponibles sont moins abondantes que dans le stock potentiel. La très faible fraction en particules disponibles < 40 µm des pellicules sableuses les rapproche des dunes et des nebkhas mais leur stock immédiatement mobilisable entre 40-100 µm est bien plus élevé. Les sédiments cohérents ont des stocks disponibles très inférieurs à leurs stocks potentiels, surtout dans les faciès argileux où le mécanisme d'aggrégation en particules grossières semble très efficace.

En additionnant les fractions < 40 et 40-100 µm du stock de particules immédiatement disponibles, on voit se dégager l'échelle de productibilité suivante au sein des substrats du Grand Erg Occidental :

- Productibilité nulle : argiles lacustres
- Productibilité faible : dunes
- Productibilité moyenne : sables lacustres, nebkhas, limons sableux, grès tertiaires
- Assez bonne productibilité : sols pulvérulents et alluvions d'oued
- Bonne productibilité : pellicule rousse
- Très bonne productibilité : carbonates lacustres.

Ainsi, les substrats les plus aptes à produire des particules immédiatement mobilisables sous forme de poussières sont les dépôts lacustres carbonatés riches en micrite. La place des pellicules sableuses est plus inattendue, liée à une forte fraction fine dont il reste à définir l'origine. Les sols pulvérulents et les alluvions paraissent être assez mobilisables du fait de l'aggrégation de leurs particules très fines en grains de 40-100 µm, les plus susceptibles à être mobilisés. En revanche, l'aptitude des matériaux sableux est moindre, seulement moyenne pour les grès tertiaires, dépôts lacustres sableux, dépôts limono-sableux et sables de nebkha. Ces derniers, plus mobiles, intègrent néanmoins plus aisément des particules fines que les sables dunaires à médiocre productibilité. Enfin, les argiles lacustres sont agrégées en particules grossières à taille peu compatible (> 100 µm) avec une mobilisation en poussière éolienne.

## Le comportement de la fraction sableuse (50-2000 $\mu\text{m}$ )

Les sables inclus dans les substrats ou mobilisés à leur surface ont un rôle essentiel dans la déflation. D'après Bagnold [7], les sables fins (50-100  $\mu\text{m}$ ) sont entraînés en suspension et les sables moyens (100-500  $\mu\text{m}$ ) en saltation. Ces derniers érodent les substrats (corrosion fournissant de nouvelles particules fines) et détruisent mécaniquement les agrégats. Mais ils peuvent s'accumuler en surface, protéger les particules fines sous-jacentes et donc freiner la libération de poussières. Les sables grossiers (500-2000  $\mu\text{m}$ ) se déplacent par roulement/reptation lors des vents forts. Si leur concentration augmente, la pellicule sableuse perd sa mobilité. Enfin, l'accumulation de particules  $> 2$  mm peut former un microreg protecteur de graviers s'opposant à la mobilisation de la fraction fine. Dans la région, cette éventualité n'apparaît que pour les alluvions des grands oueds (21 % du stock  $> 2$  mm). Mais même alors, les crues périodiques remettent en question l'efficacité protectrice de ces micro-regrs de déflation.

On a établi par types de substrat les indices granulométriques moyens des 47 échantillons prélevés dans le Grand Erg Occidental (Tableau II).

**Tableau II.** – Les indices granulométriques moyens de la fraction sableuse (50-2000  $\mu\text{m}$ ) des substrats du Grand Erg Occidental.

	Stock disponible				
	Md ( $\mu\text{m}$ )	Mz ( $\Phi$ )	SO <sub>2</sub> ( $\Phi$ )	Sk ( $\Phi$ )	Kg ( $\Phi$ )
Sols pulvérulents	202	2,27	1,27	- 0,18	0,87
Pellicule sableuse	123	2,88	1,10	- 0,34	1,03
Dépôts éoliens :					
– dunes	151	2,59	0,73	+ 0,08	1,3
– nebkhas	152	2,59	0,73	+ 0,08	1,3
– limons sableux	164	2,40	0,80	- 0,43	1,8
Substrats :					
– tertiaire	150	2,74	1,02	- 0,20	0,94
– dépôts d'oued	245	1,98	1,62	- 0,38	0,71
– dépôts lacustres de sebkhia :					
• sableux	156	2,64	1,08	- 0,19	1,05
• argileux	95	3,20	0,90	- 0,4	1
• carbonatés	98	3,25	0,80	- 0,3	1

La médiane (Md) mesurée sur échantillon brut est un premier critère du comportement de la fraction sableuse (50-2000  $\mu\text{m}$ ) face à la déflation. Quand elle est fine, l'effet de déflation n'est pas contrarié; mais grossière, il est ralenti voire annulé sur l'ensemble du matériel. La médiane est élevée pour les alluvions d'oued, moyenne pour les grès tertiaires, faible pour les dépôts lacustres des dépressions hydro-éoliennes. Dans les sédiments moins cohérents, elle est plus faible dans les pellicules sableuses que dans les dunes, d'où la sensibilité plus grande des premières au vent et leur déplacement lointain. La médiane des sols pulvérulents semble élevée; mais résultant de «pseudo-sables» vite désagrégés, cette apparente texture sableuse n'est pas un véritable obstacle à la déflation.

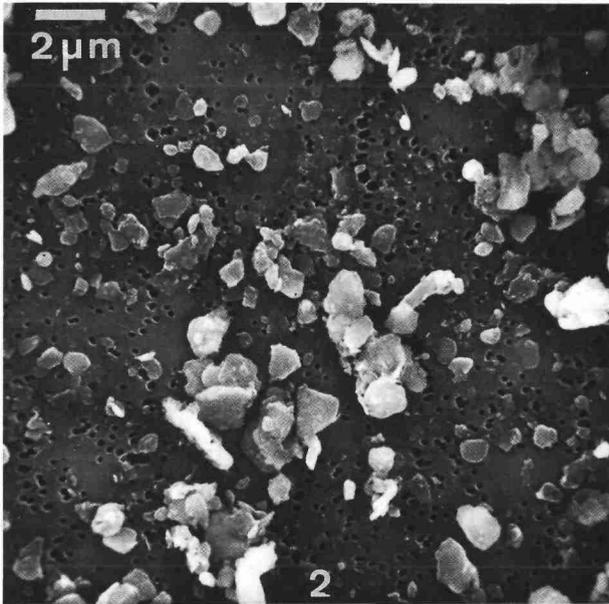
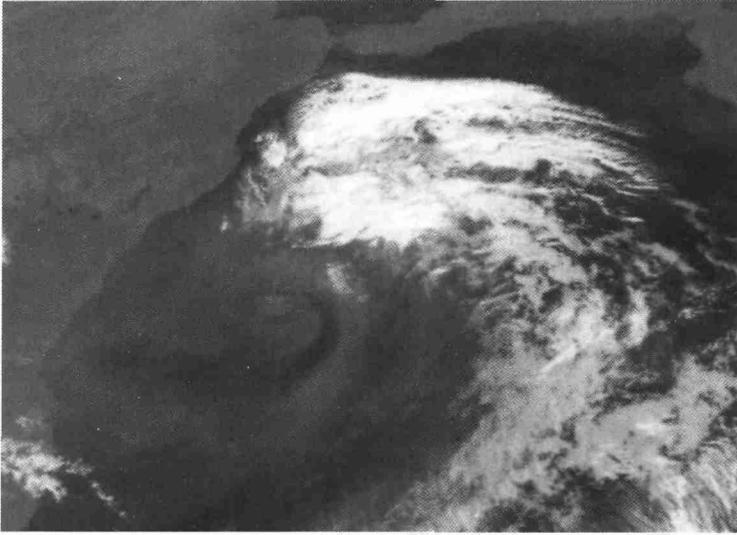
Le matériel sableux est d'autant plus facile à mobiliser qu'il est proche de  $80\ \mu\text{m}$  (3,5 en  $\Phi$ ). Bien classé, un sable de cette taille est le matériel le plus mobilisable. Ainsi, la mise en relation de la *moyenne* ( $Mz$ ) et de l'*écart-type* ( $SO_2$ ) des fractions sableuses des différents substrats (coefficient de la droite de régression  $-0,72$ ) a montré qu'elles sont les plus sensibles à la mobilisation dans les substrats cohérents (en particulier les argiles et carbonates lacustres) et dans la pellicule rousse.

L'étude des indices  $Sk$  (skewness) et  $Kg$  (kurtosis) précise le comportement de la fraction sableuse au sein des sédiments. L'*indice de dissymétrie* ( $Sk$ ) apprécie l'importance relative des sables fins et des sables grossiers dans le stock. Dans la plupart des échantillons,  $Sk$  est négatif et les sables fins plus homométriques peuvent être mieux entraînés en suspension, même par vent faible.  $Sk$  est très rarement positif, sauf pour des sables grossiers. Quand  $Sk$  est égal à 0, l'ensemble du stock sableux a été soumis à un seul processus de tri, comme pour les sables de dunes et de nebkas ( $Md$  est proche de  $150\ \mu\text{m}$ ) qui se déplacent en masse au-delà d'une certaine vitesse du vent. En corrélant  $Mz$  et  $Sk$ , on note plutôt une relation négative, surtout pour les sols pulvérulents (coefficient de corrélation :  $-0,66$ ). Ceci renforce l'idée d'une meilleure homogénéité des fractions sableuses les plus fines. L'*indice d'acuité* ( $Kg$ ) montre si le même agent a mis en place la partie médiane du stock et les extrêmes et s'il y a ou non des traînes granulométriques mal adaptées à ce mode de transport.  $Kg$  est  $< 1$  pour la moitié des échantillons analysés; la partie médiane de la fraction sableuse n'est donc pas mieux classée que les extrêmes. Ainsi elle ne présente pas d'adaptation particulière à un agent de transport : on y trouve effectivement la plupart des substrats n'ayant pas encore subi l'action éolienne et les sols pulvérulents dont la fraction sableuse résulte plus d'une structuration en agrégats que d'un transport éolien. Quand  $Kg$  est  $> 1$ , le classement est meilleur dans la partie centrale et s'oppose à des traînes de sables grossiers ( $Sk < 1$ ) ou fins ( $Sk > 1$ ). On y trouve l'essentiel des sables éoliens avec des  $Sk \approx 0$  pour les dunes et nebkas, et  $Sk < 1$  pour les pellicules sableuses. Mais il y a aussi les dépôts lacustres, argileux ou carbonatés, résultant d'une dynamique de décantation en milieu hydrique.

## L'étude des populations granulométriques

La recherche des populations granulométriques dans la fraction  $< 200\ \mu\text{m}$  (*stock potentiel*) au Coulter Multisizer a affiné l'étude de l'aptitude des substrats à fournir des poussières. Quatre types sédimentologiques principaux ont été retenus dans les 64 échantillons :

- sables :
  - sables dunaires fixés (dunes anciennes) ou mobiles (dunes récentes, nebkas)
  - dépôts sableux
- pellicule sableuse rousse
- sols pulvérulents sur sédiments lacustres :
  - carbonatés
  - gypseux
- sédiments fins :
  - limoneux
  - argileux



**Planche 1.** – Du microscope électronique à balayage à l'imagerie satellitaire : la fourchette des échelles d'approche du « phénomène poussières » (en bas, micrographie au MEB de poussières sahariennes déposées sur filtre; en haut, lithométéore sur le Sahara occidental, image du satellite Météosat II, canal infra-rouge, 12 mars 1982, 11h42 TU, OMS Lannion).

Sur l'histogramme de fréquence des populations granulométriques mises en évidence au Coulter, on dégage deux groupements majeurs entre 0-15  $\mu\text{m}$  et 100-110  $\mu\text{m}$  et trois groupements moindres en position intermédiaire entre 30-35  $\mu\text{m}$ , 45-55  $\mu\text{m}$  et 80-85  $\mu\text{m}$  (Fig. 3-A). Sur l'autre graphique, on distingue les populations dominantes et les populations secondaires (Fig. 3-B). Les populations dominantes s'y regroupent vers le pôle sableux à l'exception d'un pic vers 5  $\mu\text{m}$ , alors que les populations secondaires caractérisent le pôle le plus fin et les tailles intermédiaires.

Cette occurrence de populations sableuses dominantes illustre la contribution locale importante des sables de l'erg à de nombreux sédiments. Par ailleurs, le pôle dominant très fin correspond au faciès argile/limon fin de sédiments d'origine hydrique, principalement lacustres ou des formations superficielles en dérivant. En effet, on s'aperçoit que :

— la population dominante 100-110  $\mu\text{m}$  concerne principalement les sables dunaires, des dépôts de sables gypseux et, pour bonne part, la pellicule rousse. Elle correspond évidemment aux sables quartzeux issus de l'erg, déjà affinés à 95-100  $\mu\text{m}$  pour plusieurs échantillons de pellicule rousse.

— la population 80-85  $\mu\text{m}$  appartient à des dépôts sableux au matériel plus affiné et à la pellicule de surface de takyrs (sols argileux à structure polygonale) vraisemblablement contaminée par du sable itinérant.

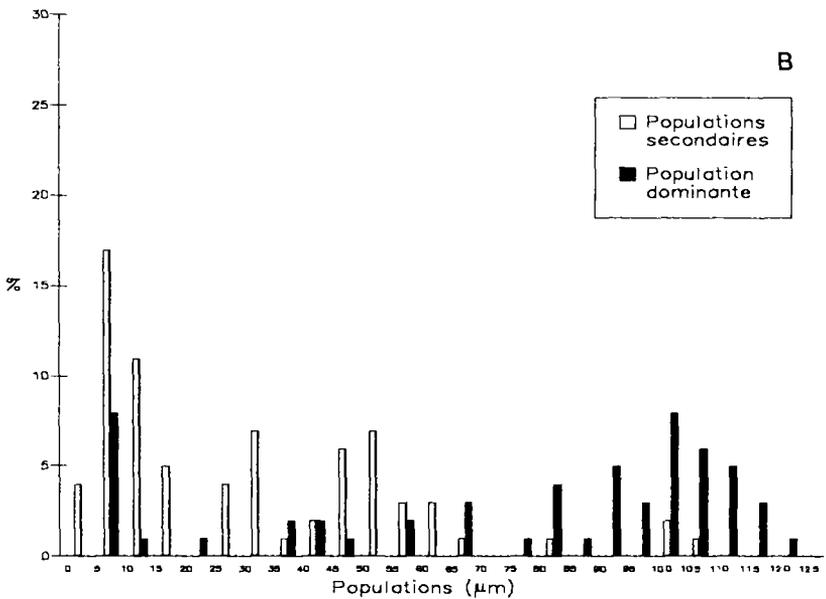
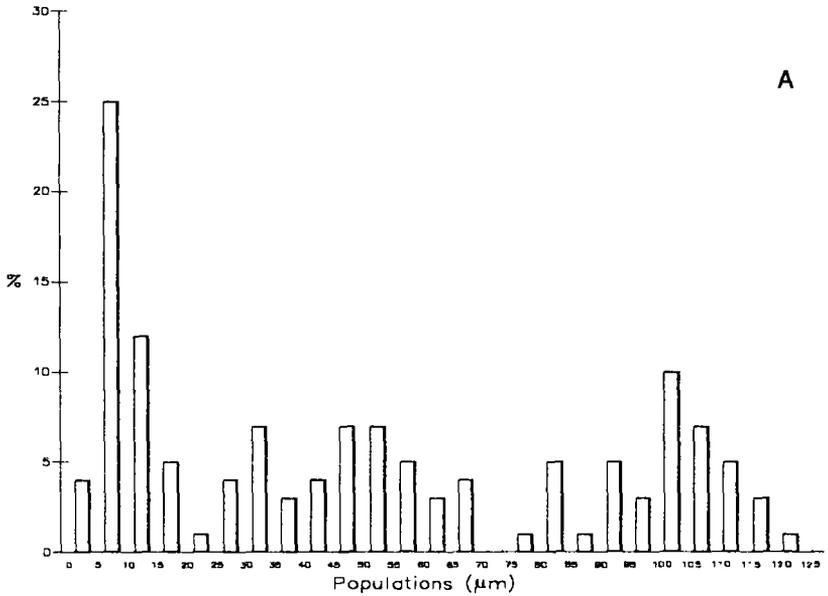
— la population 45-55  $\mu\text{m}$  existe dans divers sédiments, encore sableux (occurrence secondaire dans quelques pellicules rousses et dépôts sableux), ou fins (occurrence secondaire dans les sédiments limoneux et sols carbonatés).

— la population 30-35  $\mu\text{m}$  apparaît secondairement dans les sédiments limoneux (fonds de dayet et takyrs) et dans les sols carbonatés et gypseux.

— l'importante population 0-15  $\mu\text{m}$  a une occurrence principale dans les sédiments argileux de décantation et de fond de dayet; comme population secondaire, elle existe dans un paléosol et une dune ancienne pour des raisons pédologiques, dans des alluvions de décantation d'oued, dans des formations carbonatées et gypseuses et dans quelques pellicules rousses chargées en fines.

En résumé, on peut classer ces résultats par types de substrat, étant entendu que tous les échantillons ne possèdent pas obligatoirement toutes les populations secondaires (Tableau III). On distingue 2 catégories au sein des sédiments limoneux car certains sont riches en sables d'origine dunaire (65-100  $\mu\text{m}$ ) et les limons fins ( $< 10 \mu\text{m}$ ), dominant dans les autres, sont alors secondaires.

Il existe donc un vaste stock potentiellement disponible à fournir des poussières dans ces sédiments du Grand Erg Occidental. Les populations dominantes des sols pulvérulents (carbonatés et gypseux) dispersées dans la fraction limoneuse sont toutes utilisables, comme la population secondaire de la pellicule rousse. *A fortiori*, les populations dominantes très fines des sédiments argileux, limoneux et les populations secondaires très fines des sols carbonatés et gypseux sont particulièrement disponibles. Dans ces sédiments, si les populations grossières et les populations très fines sont d'origine bien établie (apports dunaires ou hydriques proches), on peut s'interroger sur l'origine des populations 30-35 et 45-55  $\mu\text{m}$ . En effet, ces tailles sont compatibles avec un apport éolien en suspension et ces populations pourraient dériver de chutes de poussières. Pour la première fois apparaît une interrogation fréquente concernant la place des sédiments désertiques face au phénomène-poussière : *sont-ils issus des poussières ou en*



**Figure 3.** – Histogrammes de fréquence des populations granulométriques des sédiments du Grand Erg Occidental. A) Graphique global; B) Population dominante et populations secondaires.

sont-ils la source? En fait, ces possibilités sont compatibles et un substrat peut être à la fois zone-puits (d'après la terminologie des spécialistes de l'atmosphère) et zone-source.

Tableau III. – Les populations granulométriques ( $\mu\text{m}$ ) des divers substrats du Grand Erg Occidental.

Type de substrat	Population dominante ou unique	Population secondaire fréquente	Population secondaire éventuelle
Sables mobiles	110-115	–	–
Sables dunaires	110-140	45-60	5-10
Dépôts sableux	80-120	30-50	< 15
Pell. rousse	105-115	50-55	–
	85-95	–	5-10
«sols» carbon.	20-70	5	10-45
«sols» gypseux	35-80	5-15	25-45
Sédiments limoneux	65-100	< 10	20-50
	5-10	> 70	–
Sédiments argileux	5	–	–

## Les caractéristiques minéralogiques des substrats du Grand Erg Occidental

Outre sur la composition minéralogique de la fraction globale, les minéraux argileux ont été déterminés sur la fraction inférieure à  $40\ \mu\text{m}$ , après lavage et décarbonation (Tableau IV).

On reviendra plus loin sur le cas de la pellicule rousse qui mérite d'être considéré en soi. Les autres échantillons sableux (dunes et dépôts sableux) sont naturellement très riches en quartz.

- La composition globale moyenne des *sols pulvérulents* indique beaucoup de gypse et surtout de calcite, mais peu de quartz. Le sel est peu fréquent. Dans la fraction  $<40\ \mu\text{m}$ , les argiles dominantes sont l'illite puis la palygorskite.

- La composition minéralogique des *substrats cohérents* présente plus de diversité :

- les roches tertiaires (Continental terminal) des dayet el Anz et El Djemel au Nord et des dayets Menakel et Es Souid au Sud (Fig. 2) ont une composition globale sans gypse, assez pauvre en calcite et variable en quartz. La fraction  $<40\ \mu\text{m}$  contient un stock disponible notable dominé par l'illite et à moindre degré par la palygorskite.

- les argiles et limons de décantation des oueds atlasiques n'ont pas de gypse, assez peu de calcite et des taux modérés de quartz. La fréquence du sel s'explique par les diapirs salifères des bassins-versants. La fraction  $<40\ \mu\text{m}$  est importante avec même prépondérance de l'illite.

- Dans les dépôts lacustres et palustres des dépressions hydro-éoliennes, les *échantillons sableux* sont souvent sans calcite, pauvres en gypse et riches en quartz. Le sel est fréquent. La fraction  $<40\ \mu\text{m}$ , peu abondante, est surtout riche en illite et palygorskite. Dans les *échantillons argilo-limoneux*, la calcite est bien représentée alors que le quartz et le gypse ont des

Tableau IV. – Les caractéristiques minéralogiques des sédiments et formations superficielles du Grand Erg Occidental.

	Cal	Q	Gyp	Arg	NaCl	Ill	Sme	Int	Pal	KaO	Chl
Soils pulvérulents	36	11	22	30	–	30	18	11	22	6	5
Pellicule sableuse	6	58	7	25	+	37	19	11	22	8	4
Dépôts éoliens :											
– dunes, nebkhas	0	90	–	5	+	29	35	8	16	7	5
– limons sableux	0	60	–	40	–	41	19	10	15	10	5
Substrats :											
– tertiaire	10	40	–	50	–	40	14	11	23	7	5
– dépôts d'oued	9	34	–	55	–	46	12	12	15	9	6
– dépôts lacustres de sebkha :											
• sableux	3	51	7	35	+	34	13	7	37	7	2
• argileux	30	13	11	45	–	42	18	8	15	6	10
• carbonatés	73	2	–	20	+	42	10	10	23	8	7

taux plus faibles. La fraction <40 µm y est abondante avec les smectite, palygorskite et beaucoup d'illite. Les échantillons de calcaires lacustres ont des taux records de calcite, du NaCl très abondant, et l'illite domine suivie de la palygorskite dans la fraction <40 µm. Vu l'évidence de la déflation, ces dépressions hydro-éoliennes sont certainement des sources considérables de poussières carbonatées, salées et argileuses.

*Les sols et sédiments du Nord du Grand Erg Occidental montrent de bonnes aptitudes à la fourniture de poussières. Leurs proportions de matériel fin sont notables, parfois abondantes. La propension des sols pulvérulents, dépôts lacustres et alluvions d'oued à libérer des poussières paraît particulièrement favorable. Les poussières émises dans la région sont nécessairement fortement influencées par les caractères argileux, carbonatés, gypseux et salins de ces sols et dépôts. Parmi les matériaux meubles, les aptitudes des formations sableuses paraissent plus inégales, voire modérées pour les sables dunaires. Paradoxalement, le quartz et la silice sont dans les analyses minéralogiques et chimiques des constituants dominants. Cela conduit à approfondir la réflexion sur l'origine de la fraction quartzreuse, essentielle dans les poussières sahariennes, et à réfléchir plus généralement sur la place des sables sahariens au sein des substrats-sources. Par ailleurs, connaissant l'importance du stock potentiellement disponible dans les substrats cohérents du Grand Erg Occidental, on doit s'interroger sur les caractères et la dynamique de l'un des outils principaux de son extraction et de sa mobilisation, la «pellicule rousse».*

## Bibliographie

- [1] D'Almeida G.A., Schütz L. (1983). Number, mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the Sahara. *J. of Climate & Applied Meteor.*, 22 : 233-243.
- [2] Schütz L., Sebert M. (1987). Mineral aerosols and source identification. *J. Aerosol Sci.*, 18, 1 : 1-10.
- [3] Schütz L., Jaenicke R. (1974). Particle number and mass distribution above  $10^4$  cm radius in sand and aerosols of the Sahara desert. *J. Applied Meteorol.*, 13 : 863-870.
- [4] Yaalon D.H., Ganor E. (1973). The influence of dust on soils during the Quaternary. *Soil Sci.*, 116 : 146-155.
- [5] Rognon P., Coudé-Gaussen G., Bergametti G., Gomes L. (1989). Relationship between the characteristics of soils, the wind energy and dust near the ground in the Western Sandsea (N.W. Sahara). In *Paleoclimatology and Paleometeorology : Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*. NATO ASI, Tucson, USA, 282 : 167-184.
- [6] Callot Y. (1987). Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas saharien au Grand Erg occidental : dynamique éolienne et paléolacs holocènes. Thèse Sci., Univ. Paris VI, 473 p.
- [7] Bagnold R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 265 p.



# 2

## **Le rôle des sables désertiques dans la production de particules fines**

Si on connaît bien l'étendue des grands massifs dunaires au Sahara, le problème de leur contribution à la production des poussières est toujours discuté. En effet, les grands ergs sont d'anciens édifices dunaires où une longue évolution éolienne du matériel a pu vanner les particules fines. Mais cet épuisement en fines est-il définitif ou des processus discrets, modérés, de comminution des sables n'entretiennent-ils pas une constante fourniture de poussières ? Certes, sur le terrain, l'observation d'un amenuisement des grains de quartz est fort difficile vu la lenteur du processus. En revanche, la production et la libération de fines de nature non quartzreuse peuvent mieux s'apprécier dans certains massifs dunaires du Sahara ou de sa périphérie.

Par ailleurs, les sables désertiques peuvent contribuer à la libération de poussières grâce à l'érosion exercée sur les divers substrats par les voiles sableux en constant déplacement. L'étude du Nord du Grand Erg Occidental a laissé entrevoir la particularité sédimentologique de la «pellicule rousse» mise en mouvement au moindre chasse-sable. Il faut maintenant comprendre son rôle d'outil de libération de la fraction fine disponible dans les substrats et celui d'intermédiaire dans la mobilisation des particules, entre l'arrachement initial et la mise en suspension sous forme de poussière.

### **L'originalité de la pellicule rousse**

Au sein des sédiments du Grand Erg Occidental, la pellicule rousse permet de mieux d'appréhender la relation substrat/fourniture de poussières. Sur le terrain, elle tranche avec les substrats où elle transite et son faciès homogène et caractéristique se distingue nettement des autres formations sableuses locales.

## La localisation des prélèvements

Les sables de pellicule rousse ont été piégés dans diverses dépressions après de longs parcours sur les vastes plateaux des hamadas (Fig. 2).

Sur la *bordure nord de l'Erg Occidental*, plusieurs échantillons ont été prélevés sur le fond des dépressions hydro-éoliennes méridionales d'Hassi Mejna à l'Est, d'Hassi Cheikh et de Dayet el Melah à l'Ouest (Fig. 4). La pellicule rousse y repose indifféremment sur des formations gypseuses, placages pulvérulents gris à Hassi Cheikh (SA 37 et 36) ou sables gypseux (SA 19 et 18) à Hassi Mejna I (Fig. 5). Elle recouvre aussi des calcaires lacustres pulvérulents à Hassi Mejna II (SA 23 et 22) ou sur les bords de la grande Dayet el Melah (SA 41 et 42) où apparaissent des cardiums. Au centre de cette dépression, la pellicule (SA 43) est séparée des carbonates pulvérulents (SA 45) par un fin niveau jaune-vert évaporitique (SA 44). La pellicule rousse est parfois discordante sur d'autres sables, dépôts quartzeux blancs riches en fines et en gypse proches des puits d'Hassi Mejna II (SA 24 et 25) ou sables dunaires anciens au Nord d'Hassi Cheikh (SA 34 et 35). Les sables roux (SA 47) reposent sur le sel de Dayet el Melah dont émergent des monticules de sel couronnés de gypse avec, piégés au sommet, des limons grossiers (SA 46) issus de chutes de poussières.

Sur le *piémont atlasique* les sites de prélèvement sont comparables. A Dayet el Anz, la pellicule rousse gît sur les bords d'un takyr (SA 31 et 32). Le voile de sable roux (SA 64) masque le gypse pulvérulent (SA 65) de la grande Dayet Deb Deb et recouvre (SA 63) un

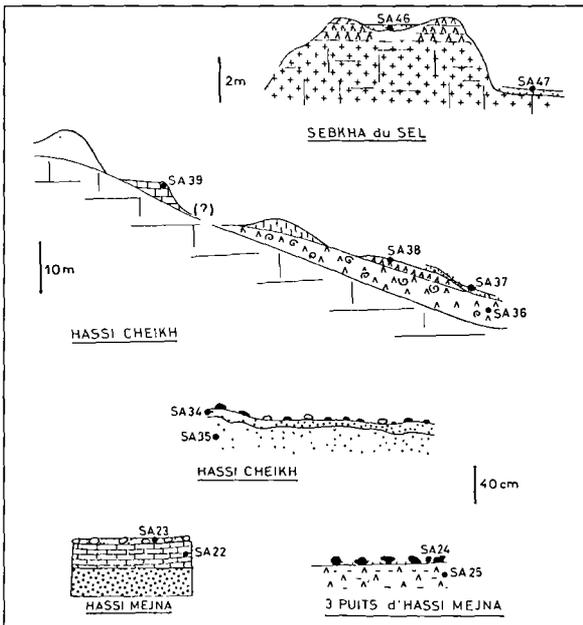


Figure 4. – Quelques exemples de pellicule rousse prélevée dans les dépressions méridionales.

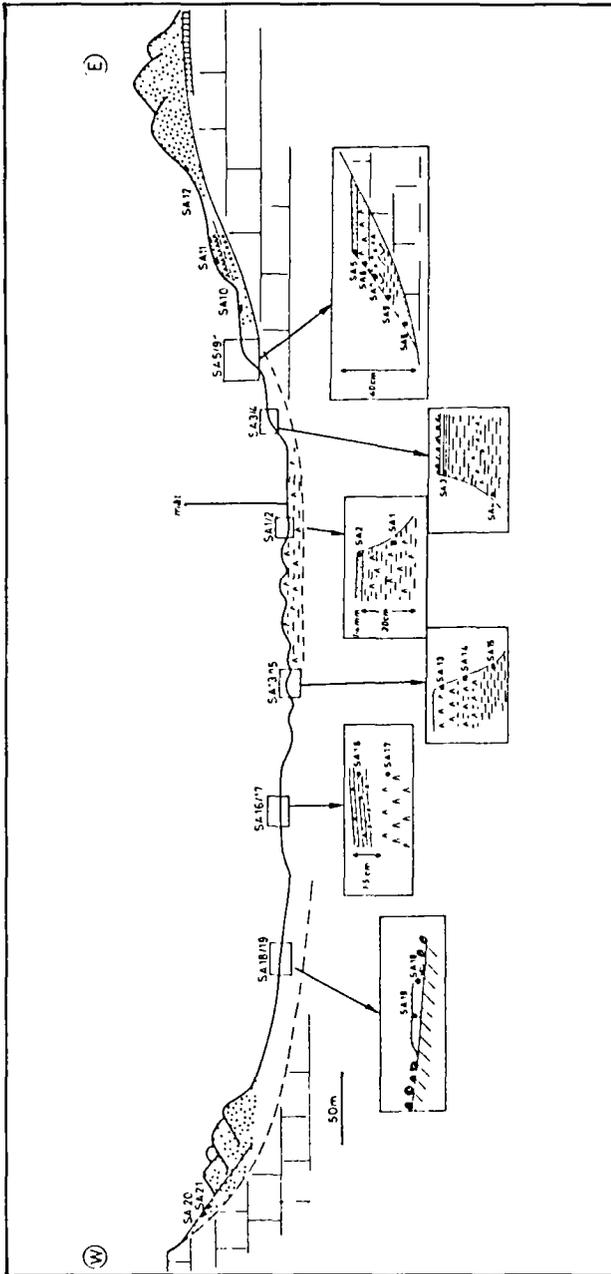


Figure 5. — Profil de la dépression d'Hassi Mejna I.

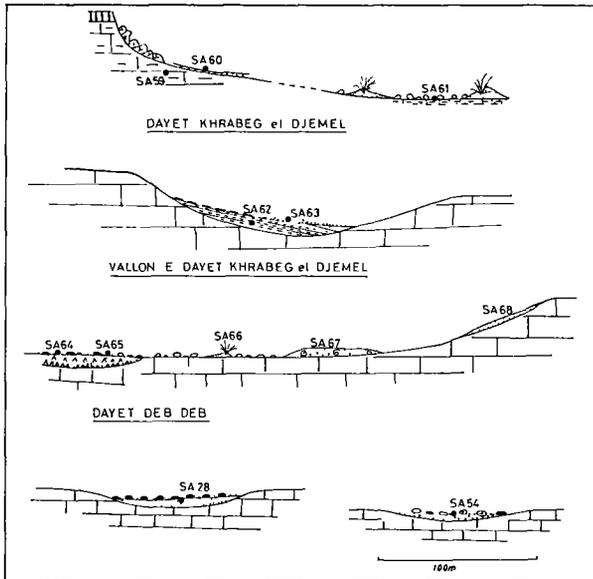


Figure 6. – Quelques exemples de pellicule rousse dans les dépressions septentrionales.

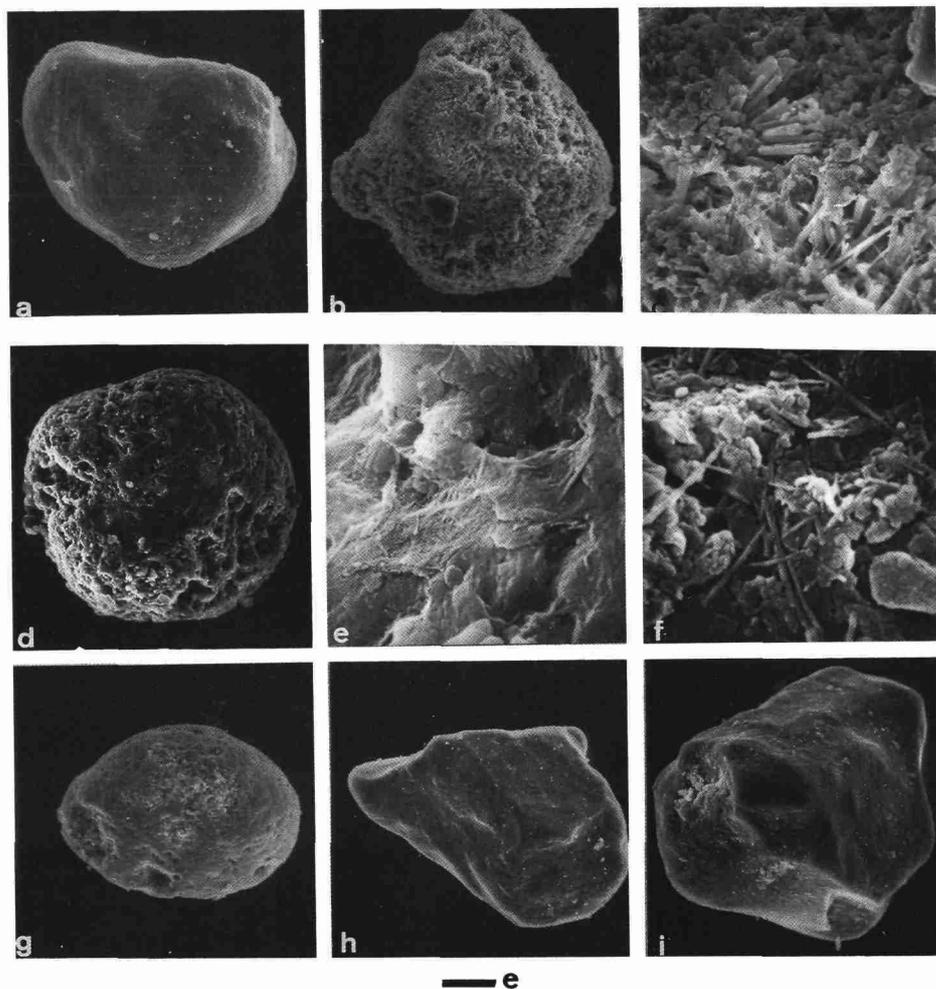
placage gris éolien (SA 62) de carbonates pulvérulents, dans un vallon de la hamada à l'Ouest de Dayet Khrabeg el Djemel (Fig. 6). Souvent le sable est piégé à même la roche, dans de petites dépressions, dolines de la hamada proche de Bour ech Chaamba surplombant l'Oued Seggueur (SA 28) ou sur la hamada à l'Ouest de l'Oued el Dour el Foukani (SA 54). Enfin, près de Khrabeg el Djemel, la pellicule (SA 60) tapisse les versants d'une cuvette fermée du Continental terminal grés-argileux (SA 59).

## Micromorphologie et granulométrie de la pellicule rousse

### *Le problème des quartz orangés désertiques*

Le principal critère d'identification du voile sableux est sa teinte rousse, nettement différente du beige à orangé clair des sables dunaires. L'explication de cette couleur rejoint le problème classique des quartz rouges/orangés désertiques (*iron-stained grains, reddened-quartz, Wüstenquarz* etc.) déjà étudiés dans les sables dunaires [1] et existant aussi dans d'autres dépôts éoliens [2].

Une étude au MEB/EDS a porté sur les grains de la pellicule SA 43 de Dayet el Melah et, pour comparaison, des niveaux proches SA 44 et SA 45 et sur des grains de dunes voisines. L'examen morphoscopique préalable a distingué des quartz translucides blancs, des quartz orangés, des grains blancs plus ou moins mats, des feldspaths, des grains argileux plus ou moins arrondis et des particules de gypse et de halite. Les feldspaths sont potassiques (Pl. 2-a) et



**Planche 2.** – Les grains de la pellicule rousse observés au MEB. - a) feldspath potassique roulé,  $e = 40 \mu\text{m}$ , b) grain de carbonate de Ca fibreux,  $e = 25 \mu\text{m}$ , c) détail du précédent,  $e = 6 \mu\text{m}$ , d) grain roulé d'argile,  $e = 45 \mu\text{m}$ , e) état de surface du précédent,  $e = 1,5 \mu\text{m}$ , f) idem,  $e = 1 \mu\text{m}$ , g) grain composé de Ca et d'argile (Si,Al,K,Fe),  $e = 55 \mu\text{m}$ , h) quartz translucide blanc,  $e = 30 \mu\text{m}$ , i) quartz translucide blanc,  $e = 50 \mu\text{m}$ .

les grains blancs mats sont des carbonates de Ca, fibres agrégées de calcite dans la pellicule sableuse (Pl. 2-b,c) mais navettes micritiques dans le niveau carbonaté. Les agrégats argileux de la pellicule rousse (SA 43) sont arrondis (Pl. 2-d,e,f,g), formés de composés variés à dominante calcique (Ca, Al, Si, K et Fe et de mélanges argileux avec Ca et NaCl et de Ca, Al, Si, K, Mn et Fe). Le niveau jaune-vert SA 44 est caractérisé par des cristaux de gypse et de particules de NaCl ainsi que d'abondants microfossiles (charas, ostracodes etc.) confirmant son appartenance à la sédimentation hydrique de la dépression. Les quartz translucides blancs subanguleux aux arêtes émoussées (Pl. 2-h,i) sont répartis dans les 3 niveaux. Mais les quartz orangés dominant dans la pellicule rousse disparaissent presque dans le niveau vert (5 %) et réapparaissent un peu dans le carbonate lacustre sous-jacent. Les quartz des niveaux SA 44 et 45 témoignent de la forte attaque chimique au sein du paléolac (figures de dissolution et de reprécipitation de silice).

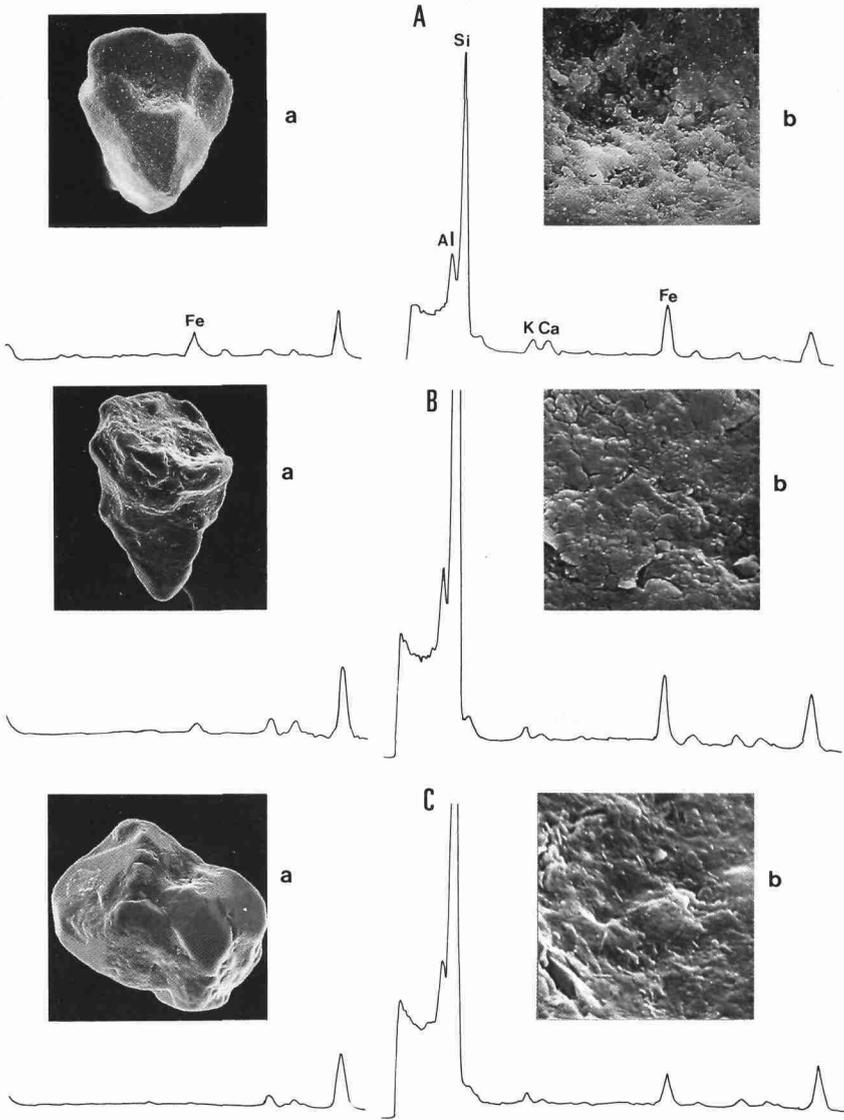
Une recherche particulière a porté sur la composition chimique de la surface des quartz translucides et des quartz orangés, ainsi que de quartz dunaires pour comparaison, afin d'y apprécier et localiser le fer, principal agent de la rubéfaction. Les translucides sont enrobés d'un fort revêtement de silice en coulées ou en gouttes d'origine pédogénétique sans fer (Pl. 3). Il y a un peu de fer dans la silice amorphisée superficielle des grains orangés de la pellicule rousse et des dunes. Il appartient aux silicates d'alumine potassiques et peu ferrifères qui expliquent la légère coloration d'ensemble de ces grains. Les diffractogrammes RX ont aussi porté sur les creux de la surface des grains. S'il n'y a pas de différence qualitative dans le cortège des constituants chimiques, par contre les variations des hauteurs de pic indiquent des intensités variées de diffraction se corrélant avec l'accentuation de la coloration. Les quartz de la pellicule rousse sont ainsi caractérisés par des «points rouges», visibles dès l'étude morphoscopique, liés au colmatage de traces de chocs ou de caries par un mélange où s'allient un composé silico-alumineux et du fer sous forme oxydée FeO (OH). Ces points rouges sont moins fréquents et intenses sur les grains dunaires. Comme Walker [1], on peut penser que l'hydroxyde de fer (jaune-pâle) protégé dans les creux superficiels se modifie en hématite (rouge) plus stable en ambiance désertique. La coloration accentuée des quartz de la pellicule rousse résulte aussi du contact permanent avec des particules argileuses lors du déplacement continu des grains car les multiples chocs compactent les argiles dans les moindres creux superficiels des grains.

### *L'analyse morphométrique*

On a procédé sur quatre échantillons (SA 41, SA 54, SA 24 et SA 64) à l'identification des formes des grains orangés par Analyse d'images puis au traitement numérique des données par Analyse factorielle des correspondances (cf. Annexe).

L'AFC a porté sur 252 individus, 6 paramètres morphométriques (surface, périmètre, rayon, irrégularité, circularité et élongation) divisés en 37 variables. Les 7 premiers axes portent 55 % de l'explication (22 % pour les 2 premiers). L'interprétation de l'AFC conduit à distinguer 3 familles de grains :

— une famille I aux grains de diamètre < 160  $\mu\text{m}$ , les plus circulaires (CIR 6), les moins allongés (ELO 1) et assez réguliers (IRR 4)



**Planche 3.** – Relation entre le degré de rubéfaction de grains de quartz (150-250  $\mu\text{m}$ ) et la teneur en Fe (MEB et EDS). A) quartz orangé de dune, B) quartz orangé de « pellicule rousse », C) quartz translucide blanc; (a) surface du grain (b) dépôt argileux dans un creux.

— une famille II aux grains de diamètre 160-220  $\mu\text{m}$ , de très forte élongation (ELO 6), à la plus faible circularité (CIR 1) et de régularité médiocre (IRR 3)

— une famille III de grains de diamètre  $> 220 \mu\text{m}$ , très circulaires (CIR 5), peu allongés (ELO 2) et très réguliers (IRR 5).

Dans les 4 échantillons, la famille I domine (entre 46-52 % des grains) suivie de la famille III (36-44 %) et de la famille II (7-14 %). L'homogénéité de la distribution des types de grains orangés dans les échantillons est donc remarquable. La famille III correspond clairement à un stock de gros grains bien arrondis de type rond-mat désertique, identiques aux grains dunaires et certainement allochtones. Les grains de la famille I, les plus abondants, ont également un faciès morphométrique évolué. Cette famille aux grains  $< 160 \mu\text{m}$  (les plus petits sont  $< 80-100 \mu\text{m}$ ) est certainement la population dominante déjà mise en évidence au Coulter dans la pellicule rousse. Il s'agit de son lot de grains orangés les plus évolués et à la plus longue histoire. Enfin, les grains de la moins nombreuse famille II répondent peu aux normes habituelles des sables désertiques : leur forme allongée, une certaine irrégularité suggèrent une histoire érosive courte et un déchaussement récent du substrat. De caractère local, ils ne s'apparenteront morphologiquement aux grains de la famille I qu'après une longue évolution.

### **La granulométrie**

L'étude granulométrique a confirmé une distinction déjà pressentie sur le terrain entre la pellicule rousse au Nord et au Sud de la région. Les médianes de la fraction sable (50-2000  $\mu\text{m}$ ) n'ont pas de différences considérables : au Nord, sur le piémont atlasique, la médiane de SA 54 est de 98  $\mu\text{m}$  et de 111  $\mu\text{m}$  pour SA 28. Au Sud, dans l'Erg, SA 23, 24, 37, 41 et 43 ont des médianes proches (94-98  $\mu\text{m}$ ), seuls SA 34 et 47 atteignent 142 et 155  $\mu\text{m}$  car contaminés par les sables dunaires. Mais les pellicules voilant les dépressions méridionales ont une population dominante 105-115  $\mu\text{m}$  et une population secondaire à 50-55  $\mu\text{m}$ , alors qu'au Nord elles ont une population dominante (parfois unique) 85-95  $\mu\text{m}$  et une population secondaire éventuelle 5-10  $\mu\text{m}$ . De plus, la fraction granulométrique  $< 40 \mu\text{m}$  est plus importante au Nord (moyenne de 28 %) qu'au Sud (moyenne 15 %).

### **L'étude minéralogique et chimique**

Le degré d'autochtonie ou d'allochtonie de la pellicule rousse peut être induit de sa comparaison minéralogique et chimique avec les roches et formations superficielles où elle transite. Menée dans les fractions fines et grossières, cette comparaison permet d'estimer les comportements de la pellicule comme *agent de corrosion aux dépens des substrats, agent de mobilisation et d'amenuisement au sol du matériel, enfin agent de libération de poussières.*

### **La minéralogie par diffraction des RX**

Les pellicules rousses ont une forte teneur en quartz et en halite, mais de très faibles pourcentages de calcite et de gypse. Un fait notable est l'apparition occasionnelle des feldspaths, pourtant peu fréquents dans les roches de l'Atlas d'où descendent les oueds. L'illite domine

dans la fraction fine des pellicules rouges, qu'elles soient longuement déplacées ou non. La palygorskite et la smectite y sont également importantes.

— Dans la *minéralogie de l'échantillon total < 2mm*, les taux de quartz sont plus importants dans les pellicules méridionales que dans celles du Nord (66 % en moyenne contre 55 %). Au contraire, la calcite bien que faible est plus fréquente dans les pellicules du Nord (8 % contre 4 % en moyenne). En comparant la composition de ces pellicules avec celle des substrats sous-jacents, on est frappé par leur indépendance, bien illustrée à Dayet el Mellah (Fig. 7). Ainsi, les substrats ont d'importants taux de calcite et de gypse et des taux de quartz souvent faibles. Les ressemblances sont circonstanciées, liées au caractère quartzueux de certains substrats (anciennes dunes, grès du Continental terminal ou limon argileux de takyr).

— Dans la *minéralogie de la fraction < 40 µm*, les différences sont mineures entre les pellicules du Sud et du Nord. Pour la palygorskite (20 % en moyenne), les premières sont parfois un peu plus riches du fait du contexte évaporitique. Les secondes sont un peu plus riches en illite (36 contre 33 %) et smectite (20 contre 16 %). Dans la comparaison avec les substrats, le cortège argileux des pellicules paraît plus indépendant au Sud qu'au Nord, ce qui est net pour les interstratifiés et secondairement pour la smectite et l'illite.

### La composition chimique

Dans la fraction 40-100 µm, les proportions des composants des pellicules et des substrats sont assez proches, confirmant leur indiscutable parenté. Mais, à nouveau, des nuances apparaissent entre les pellicules du Sud et du Nord. Ainsi, la silice est plus élevée dans les pellicules méridionales (moyenne de 89 %) que dans les pellicules septentrionales (83 %). Mais les taux

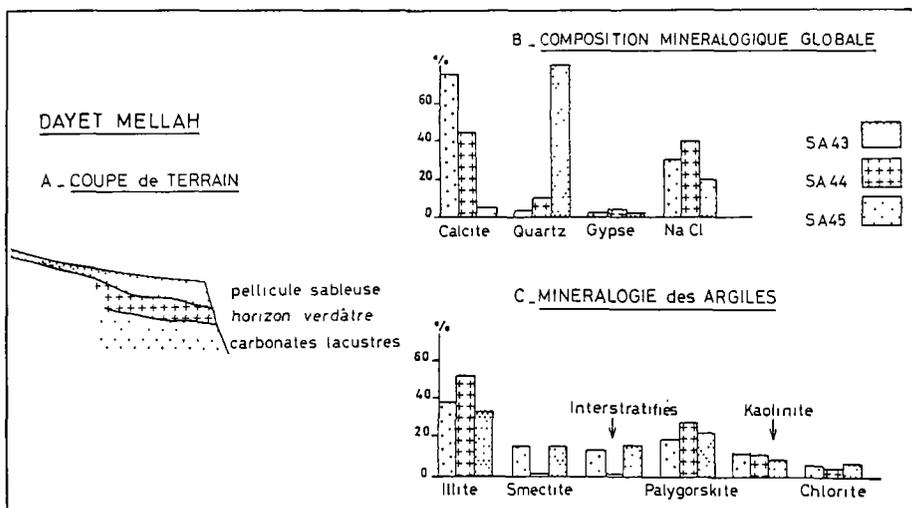


Figure 7. — La discordance minéralogique de la pellicule rouge sur les sols évaporitiques à Dayet el Mellah.

moyens d'Al (2,9 % contre 4,2), Fe (1,4 contre 1,8), K (1 contre 1,2), Mg (0,4 contre 0,6) et Ca (2 contre 3,5), et la perte au feu (2,7 contre 4,4) y sont plus bas. Les différences entre la composition chimique des substrats et celles des pellicules sont plus affirmées. Les valeurs de silice sont très inférieures dans les premiers, celles de calcium et de sodium supérieures etc., ce qui confirme l'allochtonie des pellicules. Cependant, les compositions chimiques des pellicules sont plus proches de celles des substrats quand il s'agit des substrats sableux, du takyr et du grès du Continental terminal.

Dans la fraction < 40  $\mu\text{m}$ , la composition chimique plus hétérogène des pellicules rousses ne dément pas l'opposition Sud-Nord. Au Sud, elles sont plus riches en CaO (19 % en moyenne contre 16), MgO (3,3 contre 2,8), Na<sub>2</sub>O (1,3 contre 0,7) et la perte au feu est supérieure (20 contre 17). En revanche, les pellicules du Nord ont des taux moyens plus élevés en silice (46 contre 43), en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,5 contre 6,9), en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4,1 contre 3,1), en K<sub>2</sub>O (2 contre 1,4) et en TiO<sub>2</sub> (0,86 contre 0,77). Si ces compositions chimiques tranchent avec celles des substrats, les contrastes sont plus nets au Sud qu'au Nord où se retrouvent des analogies avec le takyr et le grès du Continental terminal.

## Discussion

D'après leurs traits minéralogiques et chimiques, la pellicule rousse est partout indépendante des substrats sur lesquels elle transite : cela atteste globalement de l'allochtonie du voile sableux.

### *L'origine du matériel des pellicules rousses*

Les sables à population dominante la plus grossière (105-115  $\mu\text{m}$ ) caractérisent les pellicules des dépressions méridionales en relation avec leurs forts taux de quartz et de silice dus à la proximité de la source sableuse de l'erg. En revanche, on ne peut voir dans la population dominante plus fine (85-95  $\mu\text{m}$ ) des pellicules septentrionales le produit d'un amenuisement des sables à partir des pellicules méridionales ou du matériel de l'erg. En effet, les vents dominants soufflent du Nord-Ouest [3]. Leur légère composante estivale de Sud-Ouest ne peut, en aucun cas, expliquer une migration Sud-Nord du sable et l'amenuisement corrélatif des grains. Le sable des pellicules rousses septentrionales provient donc d'une autre source que le Grand Erg Occidental.

Parmi les grès siliceux, calcaires et argileux du Tertiaire, les alluvions apportées de l'Atlas par les oueds et leurs épandages endoréiques, quels sont les substrats susceptibles de fournir les pellicules septentrionales en sables quartzeux et argiles ?

D'après la minéralogie, les quartz sont plus abondants dans les grès tertiaires. Comme dans la fraction < 40  $\mu\text{m}$ , les proportions des argiles minéralogiques des roches et alluvions sont comparables à celles des pellicules, il est difficile de privilégier l'une ou l'autre de ces sources. La smectite est plus abondante dans la pellicule que dans les substrats. S'agit-il d'une concentration relative par rapport à la proportion des argiles des substrats ou d'un apport allochtone par des poussières ? En revanche, la palygorskite est moins abondante dans les pellicules que

dans les deux types de matériel : faut-il alors faire appel à un vannage éolien l'exportant en poussières ?

Dans la composition chimique de la fraction 40-100  $\mu\text{m}$ , les ressemblances sont frappantes entre les grès et les pellicules rouges ( $\text{SiO}_2$  ) 85 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  < 3 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  < 1,5.%,  $\text{MgO}$  < 0,5 %,  $\text{CaO}$  < 2 % et  $\text{K}_2\text{O}$  < 1 %), alors que de sérieuses différences font exclure les alluvions ( $\text{SiO}_2$  < 80 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  > 6%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  > 2,5 %,  $\text{MgO}$  > 1 %,  $\text{CaO}$  > 3,5 % et  $\text{K}_2\text{O}$  > 2 %) comme source possible. Cette conclusion est corroborée par la comparaison des compositions de la fraction < 40  $\mu\text{m}$ .

Il semble donc que les pellicules rouges septentrionales dérivent plus des roches du Tertiaire que des formations alluviales des grands oueds. La comparaison des populations dominantes mises en évidence au Coulter le confirme bien. Celles des alluvions culminent vers 80  $\mu\text{m}$  : c'est faible pour alimenter la population 85-95  $\mu\text{m}$  de la pellicule rousse septentrionale. Au contraire, la population dominante à 100  $\mu\text{m}$  du grès tertiaire a pu aisément y pourvoir. Cette origine pétrographique se comprend facilement par les dynamiques mêmes qui animent les voiles sableux balayant sur les hamadas des étendues beaucoup plus vastes que celles occupées par les dépôts d'oued. Vu leur granulométrie fine, ces derniers sont plus immédiatement mobilisés sous forme de poussières qu'intégrés aux pellicules rouges.

#### *L'évolution dynamique de la pellicule rousse du Nord vers le Sud*

La pellicule rousse transite du Nord au Sud en chasse-sable suivant le vent dominant et atteint le domaine des dépressions méridionales. La proximité de l'erg y explique la taille plus forte de la population dominante, l'abondance du quartz et les forts taux de silice entre 40-100  $\mu\text{m}$ . Relativement, il y a un appauvrissement de la plupart des argiles sauf la palygorskite, néoformée dans les dépressions hydro-éoliennes comme le confirme le gain local en Mg. Parallèlement, dans les fractions < 40 et 40-100  $\mu\text{m}$ , on observe une chute en Al, Fe, K et Ti relative au croît de Mg et Na, du fait du milieu évaporitique, et au croît de Ca issu des calcaires lacustres locaux.

La nature de la pellicule rousse se modifie donc sensiblement du Nord au Sud. Elle perd certes plusieurs constituants originels remplacés par le quartz fourni par les dunes ou par les apports des dépressions hydro-éoliennes. De plus, la fraction fine < 40  $\mu\text{m}$  s'est réduite (de 28 à 15 % en moyenne). Tout ceci suggère que, *dans son transit, la pellicule rousse s'est épuisée par vannage et a fourni des poussières*. En effet, le stock sableux initial s'est vraisemblablement modifié, indépendamment de la contribution dunaire du Sud. Ainsi, dans les pellicules méridionales, la population secondaire 50-55  $\mu\text{m}$  peut s'expliquer par la comminution des grains de la population principale (85-95  $\mu\text{m}$ ) des pellicules du Nord, sachant que sous 40  $\mu\text{m}$  le taux de silice a également diminué du Nord au Sud suggérant la contribution de fines particules de quartz (par comminution) aux poussières lors du déplacement vers le Sud.

On entrevoit finalement le rôle dynamique très complexe joué par la pellicule rousse dans la production des poussières. Poussée par le vent, elle prélève des particules aux substrats, soit par arrachement (déflation) quand le matériel est immédiatement mobilisable, soit par érosion grâce aux quartz qu'elle contient. Une fois mobilisé, ce matériel se déplace au sein de la pellicule et il évolue par fragmentation ou par usure lente quand les minéraux sont

résistants. Outre la fraction sableuse de la pellicule, il y a donc, prête à partir comme poussière, une fraction fine dont les proportions modestes montrent bien qu'elle est en permanence vannée et exportée en suspension par le vent.

## La production de poussières à partir des massifs dunaires

Dans les ergs, les sables se déplacent au sol par roulement/saltation. Il n'y a fourniture de poussière que par amenuisement ou fragmentation des grains jusqu'à un seuil de comminution permettant vannage et mise en suspension dans l'air. Aussi, l'un des problèmes essentiels de la dynamique éolienne des massifs dunaires concerne le tri du matériel sableux évoluant au sol de celui plus fin, capable de partir en suspension.

L'étude de 2 petits massifs dunaires, l'un dans le contexte périsaharien original du littoral du Sud-Ouest marocain et l'autre en milieu désertique au Nord du Mali, a permis d'aborder ces questions de la comminution et du tri. Les matériels, issus de sources sédimentaires bien connues, contiennent un *traceur* aisément identifiable, fragments de coquilles au Cap Sim et grains d'argile dans l'Erg Ine Koussamène. Enfin, la direction bien établie du vent, l'alizé, a permis un échantillonnage en fonction de la distance à la source.

## La comminution des sables biodétritiques : l'exemple du Cap Sim

### Les observations

Sur la côte atlantique du Maroc, les barkhanes d'un petit massif dunaire se déplacent sur 9 km, du NNE au SSW, au Sud d'Essaouira [4]. Ce massif apparaît comme le «modèle réduit» des grands ergs sahariens sous alizé maritime, tel celui allant du Cap Juby à la Baie du Lévrier.

On observe du Nord au Sud (Fig. 8) :

- un estran sableux peu épais sur la plate-forme d'abrasion marine
- un haut de plage couvert de nebkas littorales fixées par des touffes de *Traganum moquinii* Web.
- un manteau éolien plaqué contre la falaise morte ouljienne
- la plateforme supérieure (30-50 m d'altitude) où des couloirs séparent des dunes longitudinales (> 100 m), encroûtées et boisées, système holocène inférieur [5] envahi par des dunes vives, d'abord coalescentes puis scindées en barkhanes, se déplaçant le long des couloirs
- un redan transversal en falaise recoupe le tout, au Sud duquel le sable est dispersé par l'océan.

Ces dunes vives permettent de suivre la trajectoire et l'évolution d'un matériel à l'origine bien connue (sable coquillier) et sans apport allochtone durant son transport. Au Nord, un échantillonnage de l'estran vers l'intérieur (transect A), a caractérisé le matériel dans son passage de la dynamique littorale à la dynamique éolienne. Au Sud, le transect B a concerné le matériel des barkhanes à divers stades de déplacement. Les échantillons prélevés au sommet des dunes ont été soumis aux analyses morphoscopiques et granulométriques, avant et après

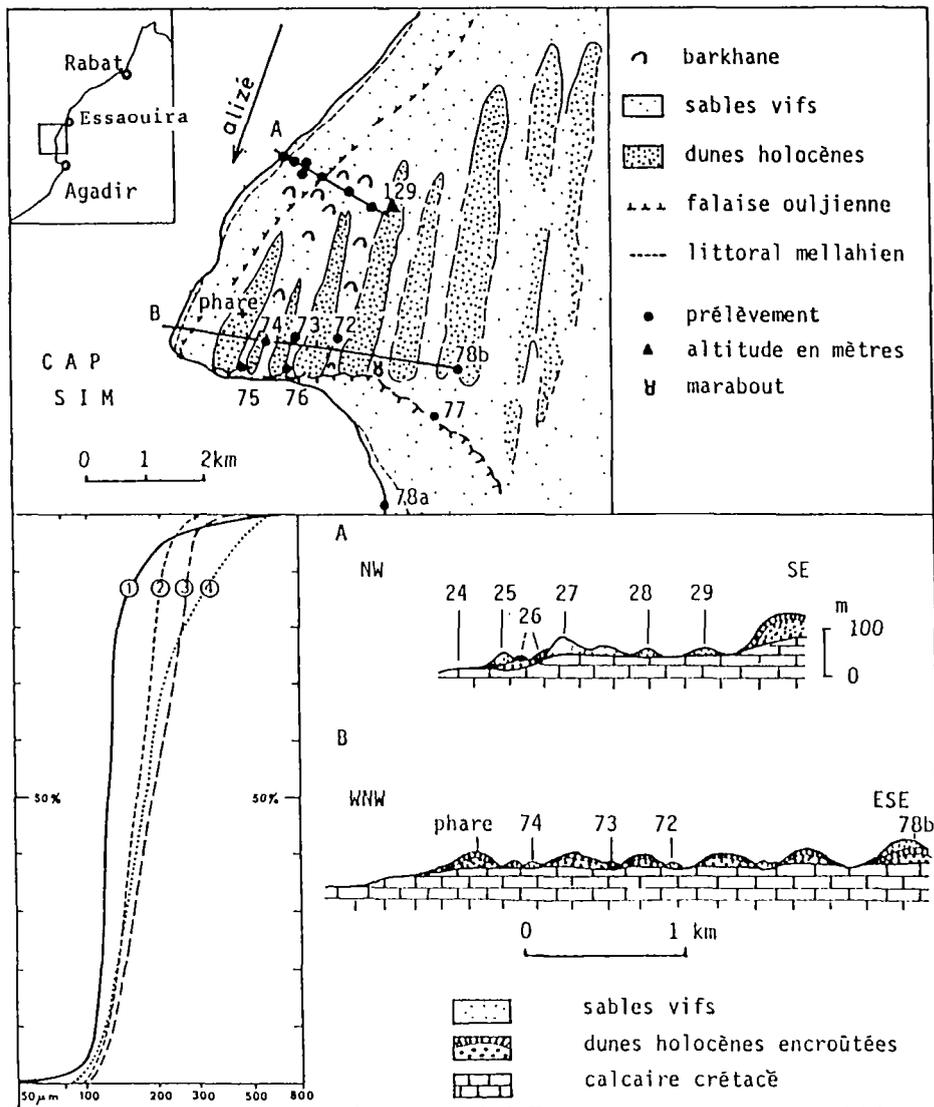


Figure 8. - Le massif dunaire du Cap Sim (Maroc).

décarbonatation. Des comptages (fractions 125-160 et 200-250  $\mu\text{m}$ ) ont distingué les fragments coquilliers effervescents à HCl des autres particules, quartz et minéraux colorés insolubles.

### Les principaux résultats

*Le rôle de la taille et de la forme des particules dans la mobilisation initiale du matériel coquillier par le vent*

D'après la composition minéralogique du matériel de l'estran (24) et des nebkas littorales (25), les fragments coquilliers sont plus abondants dans les fractions grossières que dans les fines (Tableau V). En revanche, les quartz et insolubles, moindres chez les grossiers, ont des taux notables aux autres tailles.

**Tableau V.** – Evolution de la constitution du matériel sableux suivant la taille des grains entre le littoral et les nebkas.

Echantillon	Coquilles		Quartz		Insolubles	
	n° 24	n° 25	n° 24	n° 25	n° 24	n° 25
	%		%		%	
125-160 $\mu\text{m}$	51	41	35	42	14	17
200-250 $\mu\text{m}$	73	52	20	31	7	17
315-400 $\mu\text{m}$	86	84	8	11	6	7

Dans toutes les fractions le stock coquillier chute entre le littoral et les nebkas, mais avec une hausse relative des quartz et résistants. Ce dernier stock s'est évidemment peu modifié : il y a donc eu perte au niveau du matériel coquillier. Par ailleurs, la part des gros éléments coquilliers a peu évolué entre les deux sites contrairement à celle des fragments plus petits. Ceci suggère un faible amenuisement des morceaux de coquilles puisque les gros se sont maintenus d'autant mieux que, vu leur taille, la végétation des nebkas les piégeait, tandis qu'un vannage s'exerçait aux dépens des fragments fins.

Un tri éolien a donc eu lieu dès les premiers mètres. La densité du calcaire coquillier, comparable à celle du quartz, ne peut expliquer ce tri car les quartz et insolubles fins auraient aussi été vannés. Seul le *paramètre de forme* fait comprendre cette mobilisation différentielle des particules fines. En effet, la forme plane des fragments coquilliers est *portante* et favorable à la saltation longue ou à la mise en suspension. Par conséquent, un tel matériel est donc mobilisé sous forme de poussière par un vent régulier et modéré de type alizé à des dimensions notables, bien supérieures à 100  $\mu\text{m}$ .

### La modification de la composition en fonction de la distance à la source

Les sables de barkhanes à 3, 4,5 et 5,5 km de l'estran voient leurs teneurs en fragments coquilliers décroître et inversement augmenter les concentrations en quartz et minéraux insolubles (Tableau VI). L'évolution amorcée se confirme donc. Les barkhanes du Nord ont encore beaucoup d'éléments coquilliers, mais les plus éloignées s'enrichissent en quartz et insolubles. Cependant les gros fragments coquilliers ne se maintiennent désormais pas mieux que les fins. La baisse de taille porte sur les 2 fractions suggérant une comminution identique des particules

Tableau VI. – Variation de la composition du sable dunaire en fonction de la distance à la source.

Echantillon n°	Coquilles %		Quartz %		Insolubles %	
	125/160	200/250	125/160	200/250	125/160	200/250
24	51	73	35	20	14	7
29	39	50	48	35	13	15
73	46	48	42	31	12	21
76	41	40	47	42	12	18

et le remplacement, dans la fraction la plus fine, des particules suffisamment amenuesées pour être parties en suspension par des fragments issus de la classe supérieure.

L'augmentation des quartz est corrélative. D'ailleurs, d'après l'analyse morphoscopique, si les quartz restent sub-anguleux les éléments de coquilles sont de plus en plus translucides et les tests de foraminifères de plus en plus fragmentés. Dans les échantillons très évolués (73 et surtout 76), un léger fléchissement des insolubles traduit leur moindre résistance que les quartz au processus de comminution.

#### *Le classement granulométrique en fonction de la distance à la source*

Les courbes et indices granulométriques sur matériel non décarbonaté indiquent des sédiments assez bien classés ( $SO_2$  : 0,600-0,700) à très bien classés (0,350). Au Nord, le matériel de l'estran est le plus fin (Fig. 8, courbe 1). Le sable moins bien classé des nebkhas littorales (courbe 4) est le plus grossier. Vers le Sud, la médiane granulométrique diminue suivant la distance à la source. Ainsi, une dune située à 5,5 km du départ a une granulométrie plus fine (courbe 2) qu'une autre à 4,5 km (courbe 3). Les indices de dissymétrie (Sk) sont négatifs, car les sédiments découlent de sables de plage. D'après ces valeurs de Sk (- 0,03 à - 0,33), la fraction fine des sables est homométrique facilitant la prise en charge en suspension, même par vent faible. D'ailleurs quand la taille des grains augmente, le classement diminue.

#### *Commentaire*

D'après l'exemple de ce massif dunaire, le tri éolien est surtout efficace dans la zone de départ sur les particules le plus aisément mobilisables, non seulement par leur taille, mais aussi par leur forme. D'autre part, une fragmentation et une usure mécanique affectent un stock en cours de mobilisation par roulement/saltation des grains. Cette comminution est inégale et concerne de manière préférentielle les matériaux les plus fragiles. Amenuesées jusqu'à la taille des sables fins, les particules coquillières disparaissent lors du transit, mises en suspension par le vent. Elles contribuent donc à une fourniture en poussières carbonatées. De plus, au Cap Sim, l'abrasion des grains a été très favorisée par le cheminement des barkhanes sur les surfaces rocheuses ou encroûtées des couloirs interdunaires. Ce cas est intéressant par l'application d'un raisonnement «isoquartz». En effet, relativement aux autres constituants du stock, beaucoup plus fragiles et plus immédiatement mobilisables sous forme de poussières, la fraction quartzreuse apparaît comme une constante, du moins dans le cadre d'un petit massif dunaire où les grains de quartz n'évoluent ni assez longtemps ni assez loin pour être modifiés.

## La formation et la comminution de grains argileux : l'exemple de l'Erg Ine Koussamène

L'Erg Ine Koussamène se situe dans un contexte différent, celui du Sahara méridional au Nord du Mali [6, 7]. Il offre des analogies avec les problèmes posés au Cap Sim : mise en évidence d'une fourniture rapide de poussières non quartzueuses, appréciation du départ en suspension d'un matériel fragile par référence à une fraction quartzueuse n'évoluant pas sensiblement. Le point de départ de l'étude a été l'observation de la couleur grise de ce petit erg et son passage progressif vers le jaune avec l'éloignement croissant de la source sédimentaire (Pl. 4).

### Les observations

Au N-NW du massif de Timètrine et au Sud du Tanezrouft, l'Erg Ine Koussamène s'étend à l'Ouest d'une plaine endoréique dont le fond est tapissé du dépôt argileux gris d'un paléolac holocène (Fig. 9). Un système de barkhanes contrôlées par l'alizé occupe les secteurs déprimés de part et d'autre d'un col. Une partie du matériel dunaire transite aussi sur un plateau méridional. Dans la zone de départ du matériel lacustre, source de l'erg, le reg graveleux a été soufflé lors de vents violents en rides de graviers de quartz blanc ou orangé de quelques centimètres de hauteur dans le sens de l'alizé. Entre elles, l'argile est fendillée en polygones de 3 ou 4 cm de diamètre dont les bords «relevants» se délitent en fines particules favorisant la mobilisation du matériel, en outre érodé par les graviers et sables en transit.

Sur un transect longitudinal (Fig. 10), les échantillons ont été prélevés tous les kilomètres, avec un échantillonnage du crétacé environnant pour identifier l'origine possible du matériel. On a pratiqué les analyses suivantes : granulométrie sur fraction sableuse avant et après décarbonatation; étude morphoscopique sur la fraction 100-200  $\mu\text{m}$  après contrôle des grains (250 par échantillon) par action acide et basique; diffraction des RX sur la fraction < 2  $\mu\text{m}$ ; enfin observation au MEB/EDS des éléments plus grossiers.

### Les résultats sédimentologiques

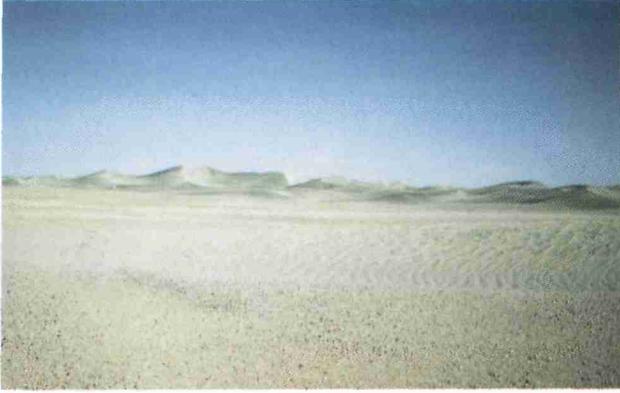
#### La composition minéralogique du matériel

Les quartz très rares (5 %) dans les dépôts lacustres sont plus abondants dans les marnes versicolores crétacées. Peu représentés, les feldspaths peuvent dériver du continental intercalaire ravinant le socle ou du socle lui-même affleurant à l'est de l'erg. La fraction < 2  $\mu\text{m}$  des échantillons crétacés est formée de palygorskite (50-55 %), illite (25-30 %) et chlorite (10-25 %); la palygorskite est parfois exclusive. La fraction argileuse des dunes de l'erg contient de la palygorskite (45-60 %), de l'illite (15-40 %), de la chlorite et des interstratifiés chlorite-smectite (15-20 %). La kaolinite est absente ou en traces. Les grains argileux issus du paléolac

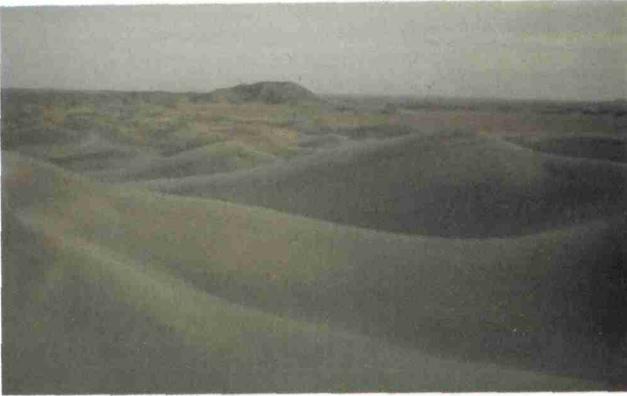
---

**Planche 4.** – Les paysages de l'Erg Ine Koussamène. - A) le paléolac argileux, B) les dunes grises argileuses, C) les dunes jaunes quartzueuses.

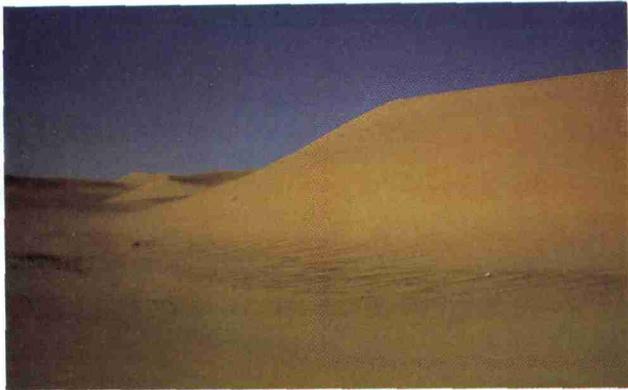
A



B



C



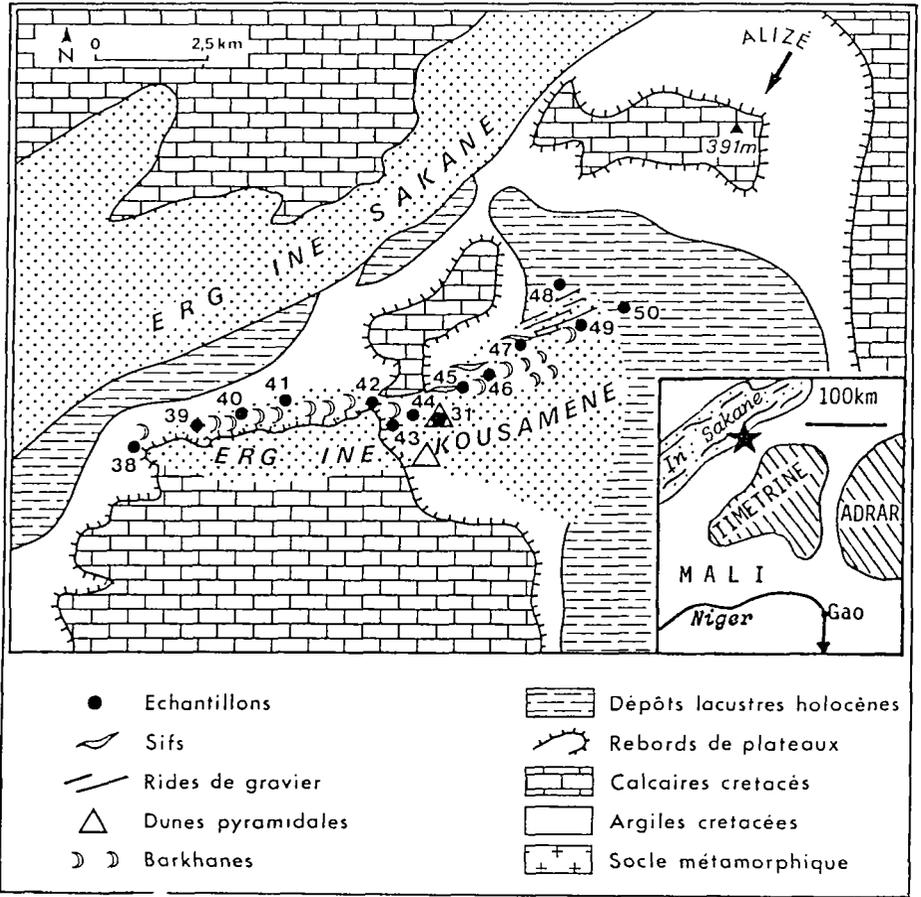


Figure 9. - L'Erg Ine Koussamène (Nord-Mali).

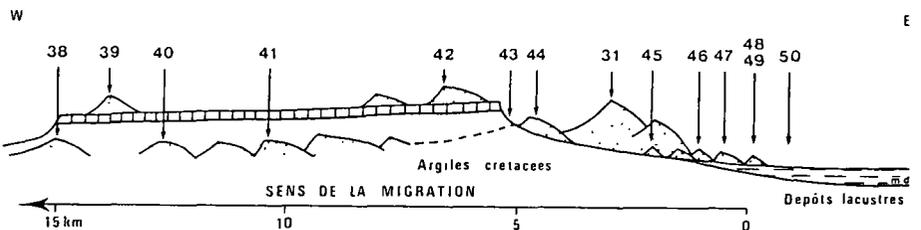


Figure 10. - L'Erg Ine Koussamène : transect ENE-WSW et localisation des échantillons.

sont essentiellement constitués de palygorskite emballant des rhomboèdres de dolomite (3-5  $\mu\text{m}$ ) et parfois un peu de calcite.

L'étude morphoscopique a permis d'évaluer les différents constituants minéraux (Fig. 11). Du centre du paléolac à l'extrémité de l'erg, il n'y a pas changement de nature des minéraux, mais de leurs proportions. La teinte du matériel passe du gris au jaune du fait de la chute en argiles et du croît relatif en quartz (sédiment argileux du paléolac : 5 Y 6/1; premières dunes : 2.5 Y 6/2; dunes du col : 10 YR 6/2; dernières dunes de l'erg : 10 YR 6/4).

#### L'étude granulométrique

Hormis dans les sédiments du paléolac et le matériel directement dérivé, il y a peu de fraction fine < 50  $\mu\text{m}$  et la limite supérieure n'excède pas 800  $\mu\text{m}$ . Le stock sableux bimodal avant le col devient unimodal après son franchissement, ce qui résulte sans doute d'une prise en charge rapide sous forme de poussière des fragments d'agrégats peu consolidés détruits dès le départ du paléolac. Les courbes cumulatives (Fig. 12-A) mal classées dans la zone de départ, se redressent plus loin pour adopter l'allure sigmoïdale du bon tri éolien bien illustré par l'évolution de  $\text{SO}_2$  de 2,47 à 1,1. La médiane (de 480 à 190  $\mu\text{m}$ ) indique un affinement de la fraction sableuse d'Est en Ouest.

D'après la comparaison des médianes avant et après traitement, la granulométrie du sédiment non traité est toujours la plus fine (sauf pour l'échantillon de départ où le traitement a dispersé des agrégats). La partie soluble se place donc dans la fraction fine du matériel sableux : abon-

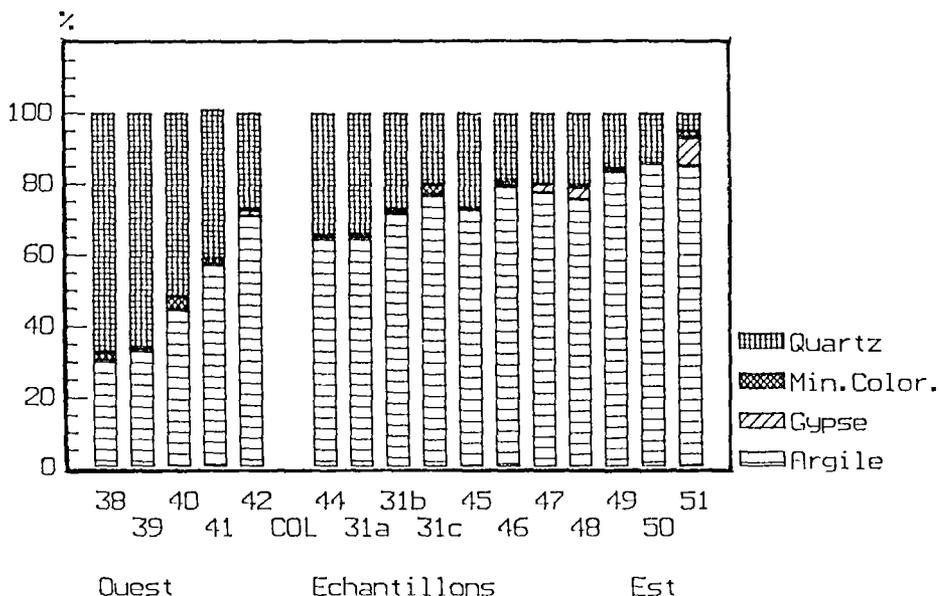


Figure 11. - Evolution de la minéralogie de l'Erg Ine Koussamène.

dants fragments coquilliers repérés sur le terrain; particules calcitiques et dolomitiques libérées par la fragmentation des granules argileux. Toutes ces éléments fins ont été éliminés par l'acide d'où une concentration relative des grains plus gros et insolubles décalant la courbe granulométrique vers la fraction grossière (Fig. 12-B).

### Commentaire

#### *La concentration progressive en grains de quartz*

Du paléolac au col, le quartz augmente de 5 à 35 % avec un très fort accroissement pendant le premier kilomètre, puis une augmentation modérée et régulière (Fig. 13). La très forte concentration initiale des quartz est relative à la diminution en nombre et en taille des autres constituants. Au-delà du col, cette concentration en quartz se confirme (de 25 à 67 %), avec une régularité remarquable (coefficient de corrélation  $r = 0,99$ ), liée à la disparition des autres éléments plus fragiles exportés sous forme de poussières éoliennes.

#### *L'appauvrissement corrélatif en matériel argileux*

D'après l'étude morphoscopique de l'échantillon de départ, les agrégats argileux initiaux sont très fragiles et s'écrasent aisément sous le stylet. Leur fragmentation a pu ainsi s'opérer dès le centre du paléolac avec une forte déflation argileuse initiale corrélatrice du croît immédiat des quartz. D'autres particules argileuses un peu moins fragiles évoluent ensuite dans l'erg jusqu'au seuil de comminution où elles sont mobilisables en suspension par le vent. Il en résulte cet appauvrissement du stock dunaire en matériel argileux si visible dans le passage des dunes du gris au jaune.

#### *Le façonnement de grains éolisés d'argile*

L'examen au MEB des particules argileuses confirme bien cette évolution, du paléolac à l'extrémité de l'erg (Pl. 5). Dans le premier site, les particules ont des formes quelconques, issues de la fragmentation d'agrégats grossiers (A) : beaucoup d'entre elles sont de la palygorskite à texture fibreuse lâche et aérée. Dès un certain parcours, les particules sont mieux façonnées (B) et les fibres sont agglomérées par roulement/saltation et chocs avec les quartz. Enfin, quand l'évolution est poussée, les particules sont devenues de véritables grains d'argile (C) aux dimensions comparables aux grains de quartz et transitant avec eux au sein du matériel dunaire. Ces grains éolisés de palygorskite de forme arrondie sont constitués d'un enchevêtrement serré de fibres et, à leur surface, une pellicule de fibres compactées et déformées assure leur relative immunité.

Après la forte libération initiale de poussière argileuse, le stock argileux de l'erg n'évolue plus qu'en fonction d'un amenuisement plus lent de grains étant exportés comme poussières quand un seuil de taille, fonction de la compétence du vent, est atteint. Si l'on admet à nouveau la validité d'un raisonnement « isoquartz » (connaissant la rapidité relative de l'évolution du reste du matériel), on peut évaluer la quantité d'agrégats argileux ainsi transformés aux 2/3 du stock originel de ces granules. A titre d'hypothèse, on peut ajouter qu'en prolongeant la tendance de la Figure 12, la totalité des grains d'argile disparaîtrait en poussière après un transport éolien de 21 km...

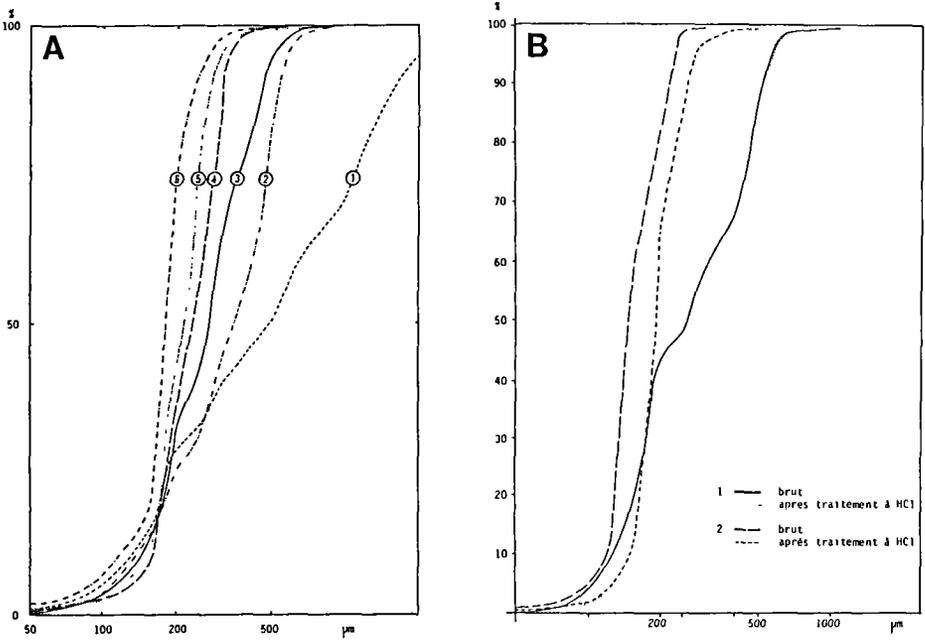


Figure 12. - Affinement du tri granulométrique du matériel sableux de l'Erg Ine Koussamène. A) Du paléolac à l'extrémité de l'erg (1 : éch. 48; 2 : éch. 47; 3 : éch. 44; 4 : éch. 31; 5 : éch. 41; 6 : éch. 38); B) courbes granulométriques cumulatives de la fraction sableuse avant et après traitement à HCl (1 : échantillon proche du centre du paléolac, 2 : échantillon à 1 km de l'extrémité de l'erg).

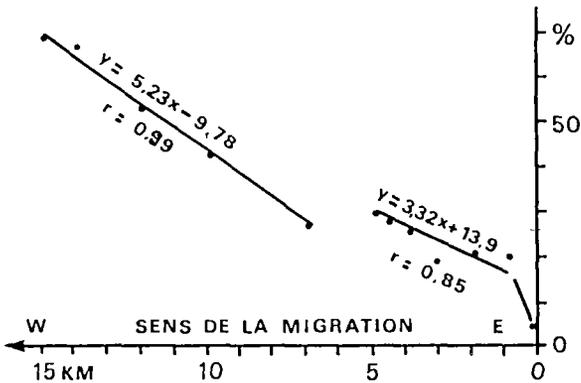
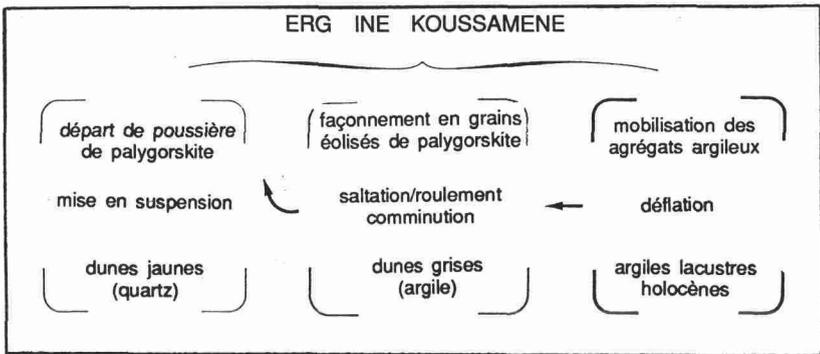
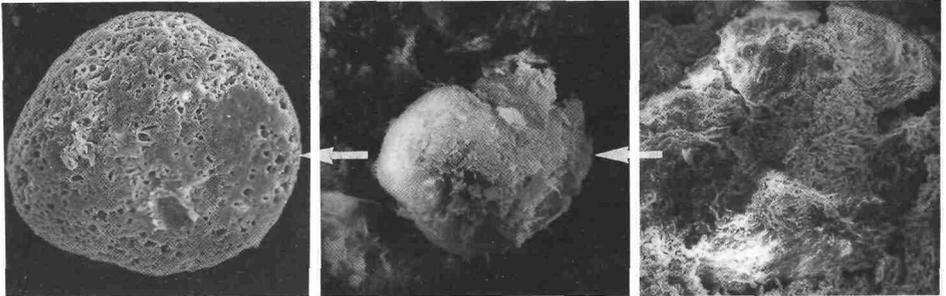


Figure 13. - Accroissement de la proportion des grains de quartz en fonction de la distance parcourue depuis le centre du paléolac.



**Planche 5.** – Evolution dynamique du matériel de l'Erg Ine Koussamène sous l'influence du vent en fonction de la distance à la source et façonnement corrélatif des grains éolisés de palygorskite.

D'après l'étude de la pellicule rousse au Nord du Grand Erg Occidental et des massifs dunaires du Cap Sim et de l'Erg Ine Koussamène, les sables désertiques mobiles concourent à fournir des poussières non quartzieuses au Sahara. Les processus de fragmentation et d'usure des minéraux fragiles conduisent à leur élimination des stocks sableux par vannage. Le seuil de comminution nécessaire à la prise en charge massive par un vent modéré (de type alizé) est apparu de l'ordre de  $40\ \mu\text{m}$  pour la pellicule rousse et de  $50\text{-}80\ \mu\text{m}$  dans les deux ergs dès le premier kilomètre du transport. Ces indications sont extrêmement importantes pour caractériser granulométriquement les «poussières locales», lors de leur prise en charge.

En revanche, d'importantes différences dynamiques apparaissent entre le système de la pellicule rousse et celui des deux massifs dunaires. Une fois la source sédimentaire abandonnée, le matériel sableux des petits massifs dunaires évolue au sol en «système fermé». Ainsi, les transformations s'y opèrent sans réalimentation du stock jusqu'à ce que l'amenuisement des grains soit suffisant pour, qu'échappant au «système fermé» de la dune, ils passent au domaine des poussières. Au contraire, la pellicule rousse évolue en «système ouvert» car son matériel

sableux, même s'il connaît le départ de poussières, est constamment renouvelé par érosion du substrat. Ce caractère en «système fermé» du matériel dunaire a permis d'apprécier indirectement, par accroissement relatif du quartz, la production de poussières carbonatées ou argileuses. Par contre, la quantification de la fraction fine partie en poussières dans la pellicule rousse n'a pas été possible, vu son «système ouvert».

Dans ces sables mobiles, l'étude de la fraction quartzreuse débouche sur d'intéressantes considérations sédimentologiques et dynamiques. Dans la pellicule rousse, la population dominante 85-95  $\mu\text{m}$  correspond vraisemblablement à la taille optimum des grains de quartz mobilisés par les chasse-sables.

Cette dimension coïncide bien avec ce «seuil critique» de meilleure mobilisation éolienne des grains de sable (80  $\mu\text{m}$ ), expérimentalement établi par Bagnold [8], qui reçoit ici une remarquable confirmation de terrain. En revanche, dans le matériel des deux ensembles de barkhanes, la taille des grains de quartz se situe vers 150-200  $\mu\text{m}$ , en bon accord avec la moindre mobilité de tels sables.

Il reste à s'interroger sur la contribution de ce stock quartzreux des sables désertiques mobiles aux poussières. Des proportions notables de quartz (et de silice) dans la fraction fine de la pellicule rousse impliquent son départ en suspension avec les autres particules fines. Mais, la fourniture rapide de poussières par les minéraux fragiles des deux massifs dunaires n'a pas permis d'apprécier ce départ vraisemblable de particules quartzreuses. Or, les grands ergs sahariens sont essentiellement formés de grains de quartz et les affleurements du socle en libèrent aussi. Il faut désormais aborder la question de la libération des quartz fins participant aux poussières sahariennes.

## Bibliographie

- [1] Walker T.R. (1979). Red color in dune sand. in McKee E.D. Ed., *A study of global sand seas*, Geological survey professional paper 1052, Washington, pp. 61-81.
- [2] Coudé-Gaussens G., Le Coustumer M.N., Rognon P. (1984). Paléosols d'âge Pléistocène supérieur dans les loess des Matmata (Sud-Tunisien). *Sci. Géol.*, 37, 4 : 359-386.
- [3] Callot Y. (1987). Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas saharien au Grand Erg occidental : dynamique éolienne et paléolacs holocènes. Thèse Sci., Univ. Paris VI, 473 p.
- [4] Coudé-Gaussens G., Rognon P., Weisrock A. (1982). – Evolution du matériel sableux au cours de son déplacement dans un système dunaire – les barkhanes du Cap Sim au Sud d'Essaouira (Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 295, 2 : 621-624.
- [5] Weisrock A. (1980). Géomorphologie et paléo-environnements de l'Atlas atlantique (Maroc). Thèse Lettres, Paris I, 931 p.
- [6] Coudé-Gaussens G., Riser J., Rognon P. (1983). Tri éolien et évolution du matériel dunaire par vannage et fragmentation : l'Erg Ine Koussamène (Nord-Mali). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 296, 2 : 291-296.
- [7] Coudé-Gaussens G., Riser J., Rognon P. (1984). L'Erg Gris d'Ine Koussamène : un exemple d'erg à dunes d'argile. in Petit-Maire N. et Riser J., Eds., *Sahara ou Sahel ?* Publ. CNRS et Ministère des Relations Extérieures, pp. 97-119.
- [8] Bagnold R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London, 265 p.



# 3

## Recherches expérimentales sur la fourniture de poussières quartzеuses

Expliquer le constant renouvellement du stock de particules mobilisées en poussière est l'un des problèmes les plus préoccupants dans les déserts où longtemps la production de particules limono-argileuses fut réputée inexistante. Depuis plusieurs années, des travaux expérimentaux sont aussi venus affiner la connaissance de processus de libération des fines à partir des substrats désertiques. Les plus nombreux ont concerné la thermoclastie et la haloclastie, associées parfois au rôle de l'altération des roches. Le débat est toujours vif sur l'action des sels.

L'existence dans les poussières de quartz de tailles variées, entre autres submicroniques, pose des problèmes plus considérables encore et longtemps débattus quant à leur mode de libération depuis les sols et substrats et quant à la taille de leurs particules. La mise en évidence du déchaussement et de la fragmentation des quartz est nécessairement difficile en environnement saharien. L'acquisition de l'éroussé et l'amenuisement des grains par le vent reposent la question de la lenteur des processus naturels. On sait la durée limitée des observations possibles en milieu désertique et il a donc paru indispensable d'aborder certains de ces points par l'expérimentation en laboratoire.

### La question de l'origine des quartz de la taille des silts

#### Les premières hypothèses

Chez les anglo-saxons, le terme de *silt* est employé pour la classe granulométrique 4-64  $\mu\text{m}$  ou 2-62  $\mu\text{m}$ , débordant donc la fraction *limon* et s'étendant sur les *sables fins*. Cette notion

de silt, commode pour bien des sédiments éoliens fins et poussières désertiques grossières, est souvent utilisée ici.

Dans les premières hypothèses, les *quartz silteux* reconnus dans divers dépôts éoliens, fluviatiles ou glaciaires relevaient de dynamiques de choc ou d'écrasement affectant des cristaux sains (mise au point *in* Kuenen [1]). Puis des auteurs ont soutenu une origine exclusivement glaciaire [2, 3, 4], estimant, d'après leurs observations au MEB, que seul le broyage glaciaire pouvait expliquer la fragmentation des quartz sains. Puis il est apparu que des quartz étaient microfissurés du fait du refroidissement postintrusif de la roche [5], ou d'un premier stade d'altération [6].

Des *microcracks* périphériques ont aussi été signalés à la surface des grains de sable marins ou désertiques [7, 8].

## La taille des particules libérées par l'expérimentation

Des expérimentations ayant pour but de caractériser les particules libérées par les différents processus ont porté sur l'action éolienne et celle du gel.

Knight [9], Anderson [10], Marsland et Woodruff [11] avaient fait des investigations sur l'*action éolienne*. Kuenen [12, 1] obtient les premiers résultats importants : l'abrasion croît avec la taille des particules, la vitesse du vent, l'érouissage des grains et les états de surface; les quartz écrasés ne produisent que des fragments anguleux de 50  $\mu\text{m}$  et une fraction  $< 2 \mu\text{m}$ ; l'action éolienne expérimentale ne libère pas de particules 20-50  $\mu\text{m}$  (sauf pour une expérience sur schistes).

Pourtant, plus tard Whalley *et al.* [13] obtiennent par expérimentation des silts fins et grossiers et d'après Whalley *et al.* [14], les particules très fines augmentent avec la durée de l'expérience, les silts diminuent et les grains s'arrondissent.

Le rôle du gel dans la formation de silts est envisagé depuis longtemps, dans les sols ou sur des roches variées. De nombreuses expérimentations sur roches naturelles ou quartz industriels ont été pratiquées par les chercheurs français (mise au point *in* Lautridou et Ozouf [15], Lautridou [16, 17]) et anglo-saxons (mise au point *in* McGreevy [18] et Pye [19]). Dans les essais de gel au Centre de Géomorphologie du CNRS-Caen sur roches variées (surtout calcaires et schisteuses), la taille d'amenuisement est descendue à 0,3  $\mu\text{m}$ . Pour Moss *et al.* [20], les granites altérés fourniraient des silts grossiers et très peu de silts fins. Pour les roches granitiques, l'étude expérimentale du gel fut précocément appliquée aux pierres à bâtir aux Etats-Unis. En France, Tricart [21] fit les travaux pionniers. Puis des granites divers ont fait l'objet d'essais sur roche saine conduisant à la faible libération de débris fins. D'autres travaux sur roches altérées ont mis en évidence les quartz et autres minéraux dans la fraction silteuse [22, 23].

Leur examen au MEB y a montré des formes et microfaçonnements analogues à ceux considérés jusqu'à présent comme strictement significatifs de l'action glaciaire [24] : compte-tenu de l'extension actuelle et passée des domaines périglaciaires (*i.e.* soumis au gel), on peut donc postuler sur la *primauté de la cryoclastie au sein des processus froids aptes à libérer les particules très fines*.

## La libération des quartz très fins par le gel expérimental

### La problématique

On perçoit bien l'intérêt d'une étude sur la libération de quartz par gel expérimental de granites sains et altérés pour comprendre les processus des domaines froids. Mais il paraît plus surprenant de voir aborder, par une telle démarche, les effets du gel sur la production de fines au Sahara car c'est un désert «chaud» où l'on n'imagine guère, *a priori*, une incidence géomorphologique du froid.

L'efficacité de la cryoclastie dans les domaines à gel modéré résulte de la fréquence des cycles gel-dégel. Or, le gel est plus fréquent qu'on ne le pense au Sahara. D'après Dubief [25], la température peut descendre normalement sous 0°C pendant l'année, surtout en hiver, sur une partie du Sahara septentrional et central et exceptionnellement sur une aire plus vaste (Fig. 14). L'occurrence du gel est nécessairement plus forte dans les montagnes, en particulier au Hoggar. Ainsi des manifestations cryoclastiques s'exercent sans doute plus ou moins épisodiquement dans le désert aux dépens des affleurements rocheux, surtout préparés par d'autres processus *in situ* ou altérations anciennes. La cryoclastie n'est pas négligeable sur les hauts plateaux et montagnes où elle contribue à une forme originale de production désertique de particules fines. Au Pléistocène l'extension du domaine concerné par le gel, sa fréquence et son intensité ont été plus importantes : des manifestations glaciaires et nivales ont concerné alors le Hoggar [26] et la part de la cryoclastie dans la fourniture de poussière, certes difficile à apprécier, a dû s'en trouver sensiblement accrue.

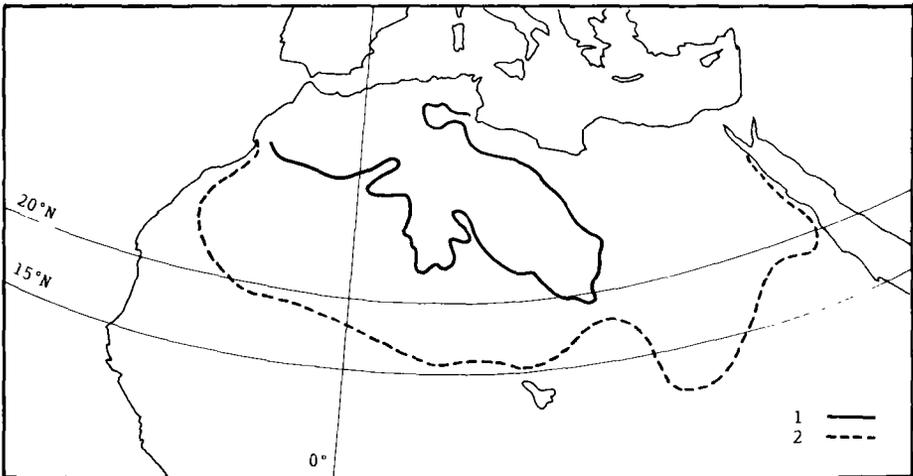


Figure 14. – Limites méridionales des régions où la température du sol peut descendre normalement (1) ou exceptionnellement (2) au-dessous de 0°, au cours de l'année (d'après Dubief, 1959).

En définitive, dans le cadre bien établi de la cryoclastie expérimentale, il paraît intéressant d'appliquer et d'étendre à l'étude du gel sur la production désertique des particules fines, les résultats de travaux sur des granites sains et altérés, roches très communes au socle saharien.

### Les conditions de l'expérimentation

Ces essais expérimentaux ont porté sur des granitoïdes prélevés dans les montagnes du Nord du Portugal (Minho) où les effets des processus pléistocènes modérés, périglaciaires et glaciaires, ont été contrôlés sur le terrain sur roches saines ou altérées [22, 23, 27].

Des échantillons (E 87 à E 93) de granite calco-alcalin à faciès porphyroïde moyen à grossier et un échantillon (E 86) d'épisyénite à faciès homogène ont été soumis à une première expérience. La seconde expérience a concerné des échantillons d'épisyénite (E 1, E 1bis), de granite calco-alcalin (E 2 à E 5) et d'arène en place (E 6). Les analyses préalables sur les échantillons et le protocole de gel modéré à  $-8^{\circ}\text{C}$  sont décrits en Annexe. La première expérience a concerné 814 alternances gel/dégel et la seconde a été arrêtée après 300 car les résultats étaient très proches. Un suivi photographique a visualisé l'évolution des essais.

### Les résultats des deux expériences

La sensibilité au gel se traduit par le poids en % des débris libérés par rapport au poids initial de l'échantillon. Dans la 1<sup>re</sup> expérience (Tableau VII), des états provisoires sont établis pour 304, 409 et 702 cycles et le bilan à 814 cycles. Le bilan de la 2<sup>e</sup> expérience a eu lieu à 300 cycles.

Les échantillons 86, 87<sup>2</sup>, 91 et 93 ont donné peu de débris. Ceux de petite taille (cristaux isolés de biotite ou feldspaths) sont  $< 0,5\%$ . Il en est de même à la fin de la 2<sup>e</sup> expérience pour les échantillons 2, 4, 5 et 1<sup>1</sup> (entre 0,04 et 0,51 %). Ces résultats sont comparables à ceux de granites sains. Les échantillons 88<sup>2</sup>, 89 et 92<sup>1-2</sup> et l'échantillon 1<sup>2</sup> ont fourni plus de 4 % de débris (Pl. 6). L'évolution s'est produite après 150 cycles avec de gros agrégats po-

Tableau VII. — Le poids des débris après 304, 409 et 814 cycles gel-dégel.

n° échantillon	% Poids des débris après 304 cycles	% 409 cycles	% 702 cycles	% 814 cycles
86	0,08	0,08	0,20	0,22
87 <sup>1</sup>	0,10	0,26	0,26	0,26
87 <sup>2</sup>	0,22	0,42	0,42	0,42
88 <sup>1</sup>	0,24	0,36	0,36	0,42
88 <sup>2</sup>	3,95	4,78	5,60	5,67
89	3,09	3,43	4,00	4,13
91	0,05	0,13	0,13	0,13
92 <sup>1</sup>	3,41	6,78	8,40	9,25
92 <sup>2</sup>	3,31	8,33	9,85	10,80
93	0,12	0,27	0,30	0,30

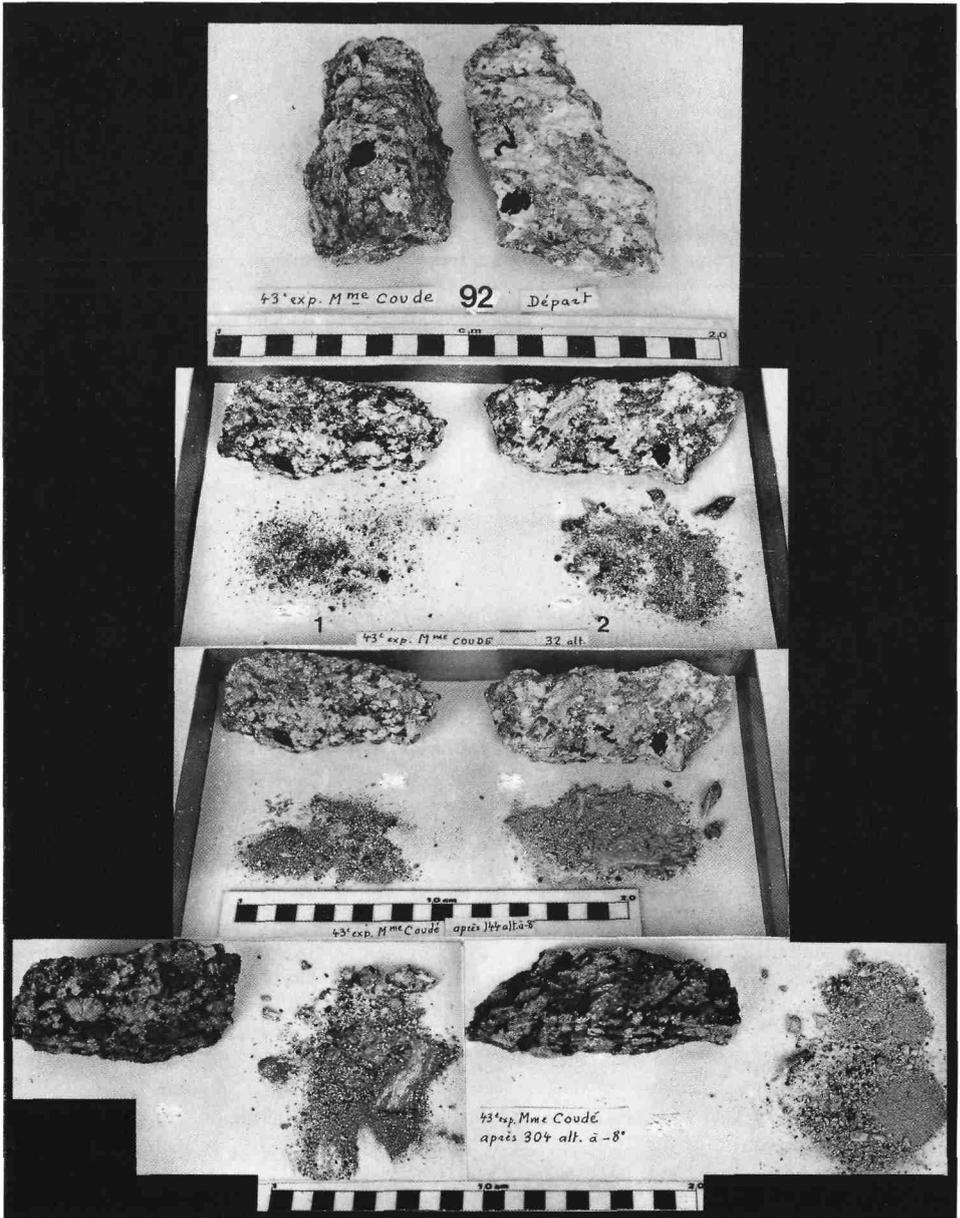


Planche 6. - L'évolution des échantillons 92<sup>1</sup> et 92<sup>2</sup> à 32, 144 et 304 alternances gel-dégel (-8°C).

lyminéraux (0,5 à 3 cm) se détachant surtout à partir de la portion immergée des blocs. L'échantillon 90 (trop fragile pour subir une mesure de porosité) et les échantillons 4<sup>2</sup> (granite très altéré) et 6 (arène en place) se sont progressivement désagrégés dès le début des essais, libérant des agrégats polyminéraux et des mégacristaux de feldspaths alcalins (Pl. 7).

Le rythme de désagrégation est très intéressant. Les échantillons les plus gélifs ont fourni des débris dès avant 100-150 cycles par effondrement des blocs; la production a continué rapidement entre 300 et 400 cycles puis s'est ralentie nettement. Les granites très peu gélifs ont lentement fourni quelques sables par dissociation superficielle des quartz et micas ou exploitation de feldspaths altérés. Les granites moyennement gélifs ont fourni, outre sables et granules, des agrégats polyminéraux de 1 à 3 cm par élargissement de fissures par le gel.

La comparaison de la porosité avant et après expérience donne une bonne idée de l'*origine de la gélivité* des granites. Les échantillons ayant fourni le plus de débris avaient une porosité > 3 %. Il y a une opposition entre les faciès non gélifs (ou très peu gélifs), peu fissurés, peu altérés, peu poreux et les faciès plus altérés où les pores et microfissures ont été exploitées par le gel. Les fissures évoluent peu après 400 cycles et la porosité acquise est ensuite relativement stable. Le phénomène de *crise de gélifraction*, apparaissant dès un nombre restreint de cycles gel/dégel (moins de 300), se reproduit pour toutes les expériences sur roches fissurées et s'explique par *effet de fatigue* du bloc [28].

## Les débris libérés par la gélifraction expérimentale

### *Les caractères granulométriques*

Sur la courbe cumulative de E 90 (Fig. 15), très apparentée à celles d'arènes litées, remaniées par des processus périglaciaires naturels, la médiane se situe vers 7 mm et 84 % du stock est > 2 mm. L'amenuisement est nul entre 304-702 cycles. De même, entre 304-702 cycles, les débris des autres échantillons de la 1<sup>re</sup> expérience évoluent peu, avec pourtant un amenuisement des gros débris pour le 88<sup>2</sup> et le 89 (libération de granules, sables grossiers et quelques sables fins). Dans la seconde expérience, E 6 fournit 7,2 % de particules <50 µm dont 20 % <2 µm; E4<sup>2</sup> n'a libéré que 1,1 % de débris <50 µm dont 12 % <2 µm (Fig. 16). Les autres échantillons de l'essai ont donné très peu de débris.

La fraction <50 µm ne représente que 0,6 % du total pour E 90 (Fig. 15) : 96 % y appartient aux limons dont 66 % de limons grossiers. Ces proportions n'évoluent pas entre 300-700 cycles. L'évolution de E 6 est comparable. Très généralement, la fraction de limons fins et d'argiles granulométriques est plus importante dans le cas de granites altérés.

### *L'existence de particules fines produites par le gel*

La production de particules fines de quartz est une question importante pour comprendre l'origine des poussières sahariennes où leur existence à des tailles infimes, microniques voire submicroniques, n'a été établie que très récemment [29,30]. Or d'après ces essais de gel expérimental, *la gélifraction se définit bien comme un processus de libération de particules de quartz, non seulement de fraction limon fin mais aussi de taille argileuse, à partir de roches*

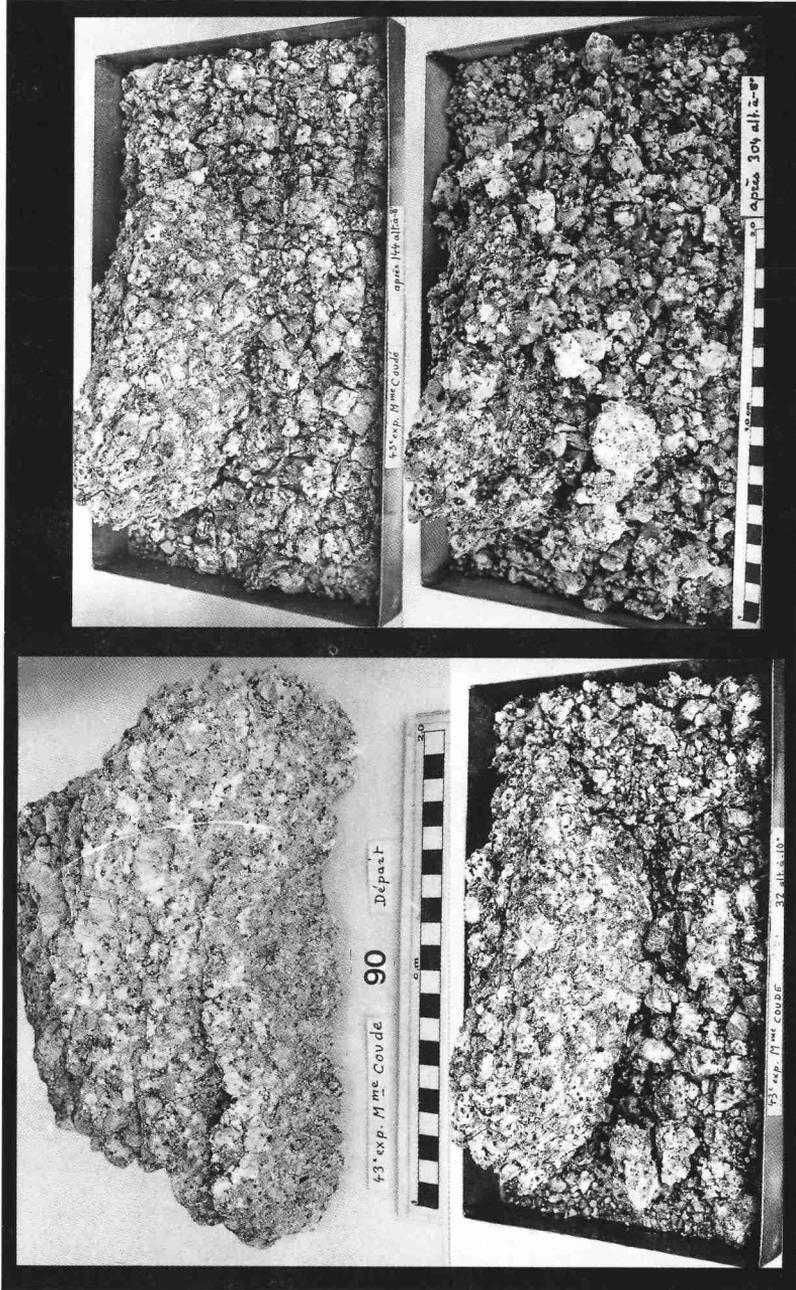


Planche 7. - L'évolution de l'échantillon 90 à 32, 144 et 304 alternances gel-dégel (-8°C).

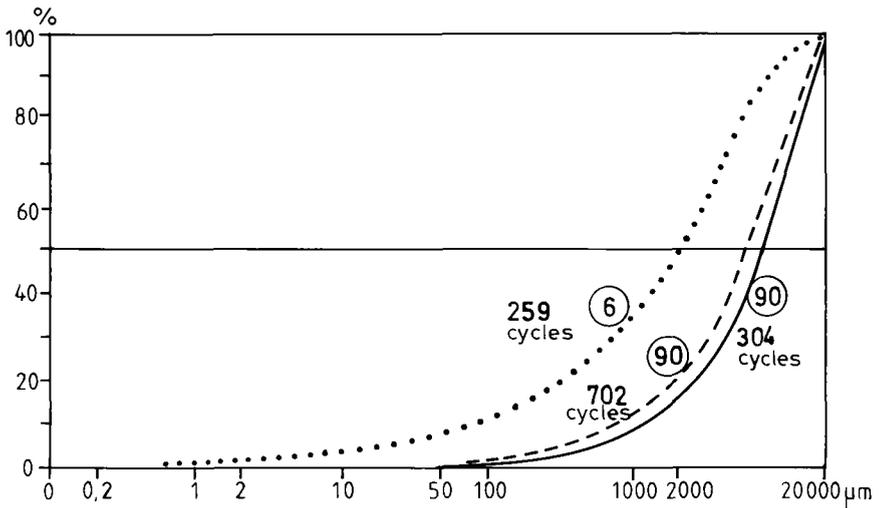


Figure 15. – Courbes granulométriques cumulatives des débris libérés par la gélification expérimentale pour les échantillons 6 et 90.

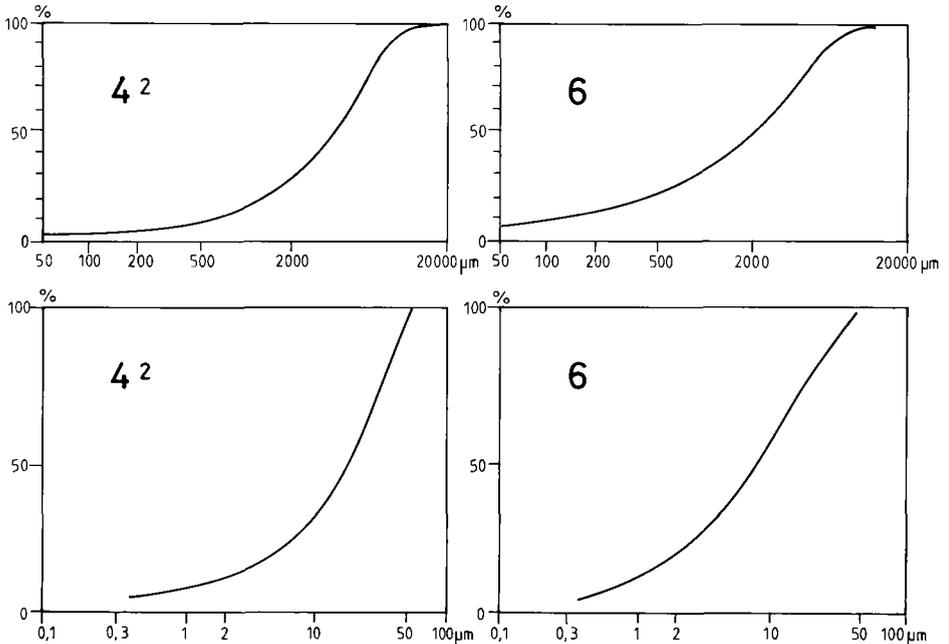
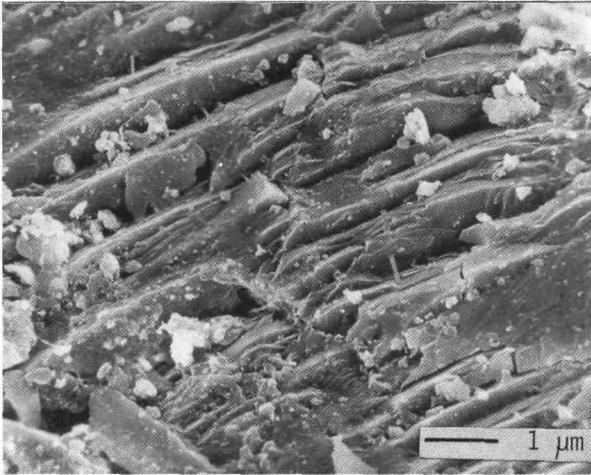


Figure 16. – Courbes granulométriques cumulatives des fractions 50-20 000  $\mu\text{m}$  et 0,1-100  $\mu\text{m}$  des débris libérés par la gélification expérimentale pour les échantillons 4<sup>2</sup> et 6 (deuxième expérience).

granitiques plus ou moins altérées. Les recherches granulométriques sur les débris produits expérimentalement ont effectivement mis en évidence des particules  $<1 \mu\text{m}$  (Fig. 15).

Mais le plus probant des arguments est la présence, visible au MEB, sur les grains issus de la gélifraction artificielle, de *particules adhérentes* de quartz de taille micronique à sub-micronique (Pl. 8), totalement analogues à celles décrites sur les grains naturels désertiques. L'analyse au MEB/EDS de plusieurs centaines de grains issus de la gélifraction des échantillons 86, 90, 91, 4<sup>2</sup> et 6 a défini 3 modes granulométriques pour ces particules adhérentes : 10-15  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\mu\text{m}$  et 0,2-1  $\mu\text{m}$ .



**Planche 8.** — Les particules adhérentes de Si sur une cassure conchoïdale d'un quartz soumis à la gélifraction expérimentale.

## L'expérimentation en soufflerie

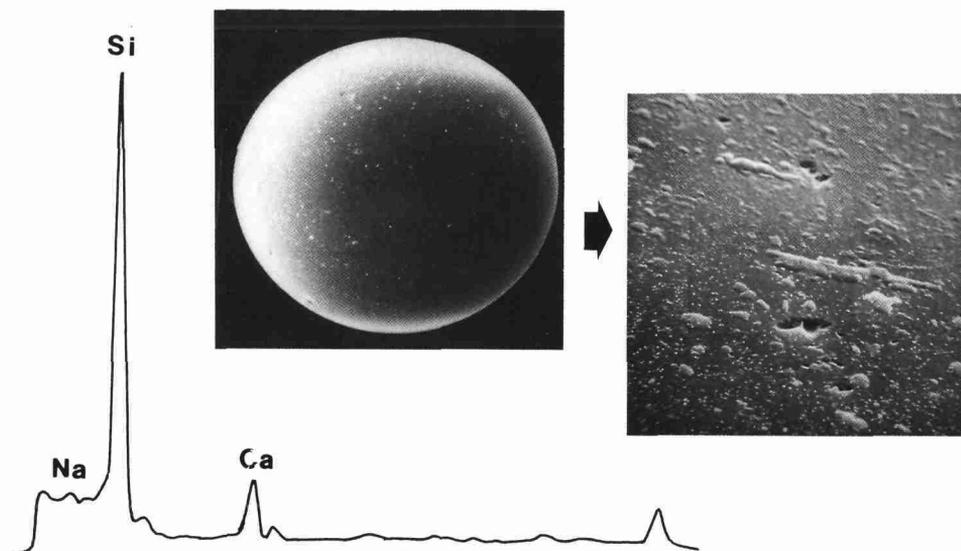
L'objet de cette expérimentation a été *la question de la fourniture de poussières quartzéuses par les sables désertiques*. On en pressent l'importance au Sahara, d'une part à propos des voiles sableux dont on a entrevu l'efficacité dynamique dans l'étude de la *pellicule rousse* et d'autre part vu l'extension des ergs dans ce désert.

Des essais en soufflerie (*wind-tunnel*) ont déjà concerné l'évolution du matériel sableux et la corrosion des roches cohérentes par le vent. Ils ont abordé dans un premier temps, l'éolisation des sables et le façonnement des *ventifacts* et *dreikanter*s puis le polissage et l'attrition des sables. Mais ces travaux tournés vers l'aspect destructeur, érosif, des processus, ont négligé la caractérisation des produits libérés et, de ce fait, la question pourtant primordiale de la

fourniture de particules fines mobilisables sous forme de poussières. Par ailleurs l'érodibilité éolienne des sols (mise au point *in Logie* [31, 32]) et la fourniture corrélative de fraction fine ont fait l'objet de travaux expérimentaux [33, 34, 35]. Enfin des protocoles expérimentaux n'utilisant pas le wind-tunnel ont aussi étudié l'attrition des quartz et la production d'éléments silteux [36, 14].

## La procédure expérimentale

Pour étudier la libération de particules fines, il a paru intéressant de déclencher dans un wind-tunnel une *dynamique de comminution* sur un matériel apparenté aux grains de quartz, les *microbilles de verre* (50-800  $\mu\text{m}$  de diamètre). On n'a pas employé les quartz naturels pour éviter l'interférence de caractères micromorphologiques hérités (dérivés des dynamiques en milieu naturel) et de caractères acquis en expérimentation. De plus, les microbilles (de forme simple et régulière) peuvent s'utiliser avec profit car le comportement du verre face aux contraintes physiques ne diffère pas sensiblement de celui du quartz [37]. D'autre part, des *quartz industriels* (sans caractère micromorphologique hérité) ont été employés à titre de référence pour apprécier les effets du protocole sur un matériel de même nature que les sables désertiques. Avant et après expérience, la granulométrie du matériel a été mesurée au Coulter Counter et des observations au MEB ont examiné les formes et microfaçonnements des particules expérimentales et autorisé leur comparaison avec les grains désertiques (*Pl. 9*).



**Planche 9.** – L'état initial du matériel soumis à l'expérimentation en soufflerie : microbille de verre, son état de surface au MEB et sa composition chimique à l'EDS.

Dans le wind tunnel de l'Université Catholique de Leuven, Belgique (Fig. 17), 4 sites de prélèvement V, D, H et G permettent de discriminer les produits expérimentaux en fonction de la distance parcourue depuis l'injection du matériel (cf. Annexe). Pour identification, chaque échantillon a été affublé du numéro de l'expérience et de la lettre correspondant au site de prélèvement. On a fait varier les paramètres de manière indépendante ou concomitante (Tableau VIII) : vitesse du vent, durée de l'expérience, taille du matériel voire sa nature (microbilles de verre ou quartz industriels).

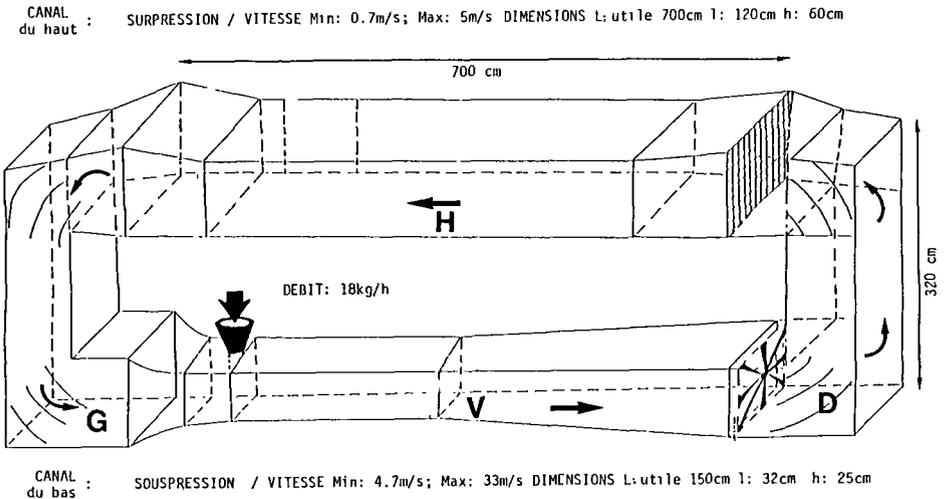


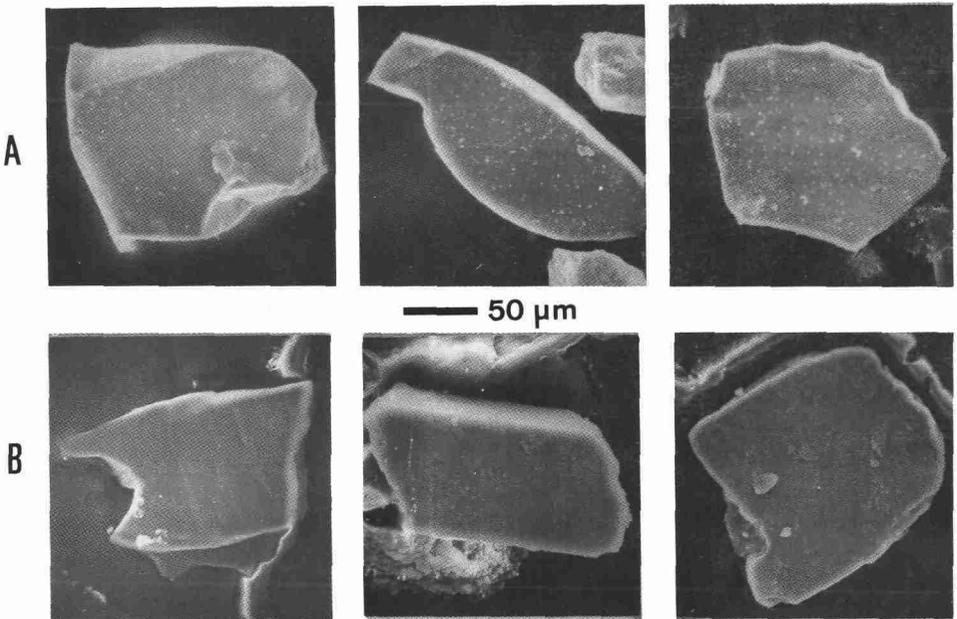
Figure 17. – Schéma du wind-tunnel de l'Université de Leuven (les sites de prélèvement après expérimentation D, H et G sont de plus en plus éloignés de l'entrée du matériel).

Tableau VIII. – Les protocoles des expériences en wind-tunnel.

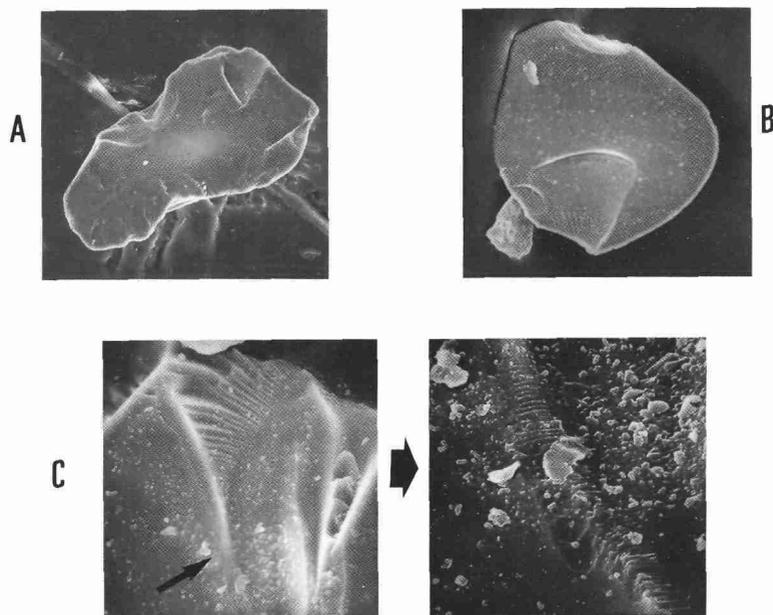
n°	Durée min.	Vitesse du vent m/s	Taille du matériel µm (microbilles)
1	20	variable	150-300
2	17	14	150-300
3	12	variable	500-300
4	5	variable	500-800
5	12	10	500-800
6	16	33	500-800
7	12	14	500-800
8	20	7	quartz industriels

### Les résultats bruts

D'après la *micromorphologie* des particules expérimentales examinées au MEB, il y a *convergence de formes* entre les produits de l'éolisation expérimentale et de l'éolisation naturelle. Les premiers sont des fragments de billes de verre aux formes souvent anguleuses et géométriques semblables à celles des petites particules désertiques (Pl. 10). Les microfaçonnements imprimés sur les débris de verre sont identiques à ceux dérivés de l'éolisation de haute énergie des quartz désertiques : cupules de choc, coups d'angle, cassures conchoïdales. Les arêtes sont quelquefois émoussées avec des traces en marches d'escalier ou des arrachements (Pl. 11). On note enfin des particules adhérentes sans doute à l'origine de l'évolution de la fraction limoneuse fine.



**Planche 10.** — La convergence des formes entre les fragments de microbilles de verre issus de l'expérimentation (A) et les poussières quartzéuses désertiques (B).



**Planche 11.** – Les microfaçonnements de haute énergie observés sur les fragments de verre issus de l'expérimentation. - A) cupules et traces de choc sur quartz désertique, B) fragment de verre présentant les mêmes traces de choc, C) cassures conchoïdales et particules adhérentes sur fragment de verre.

L'évolution granulométrique des particules est suivie au Coulter Counter. Lors de la 2<sup>e</sup> expérience (petites billes de verre), il y a chute d'une population de limons à 20  $\mu\text{m}$  identifiée avant l'essai. En fait, l'examen détaillé de la fraction fine montre qu'il y a eu amenuisement de cette population limoneuse avec déplacement de son mode vers 14 puis 6  $\mu\text{m}$ . En fin d'expérience, ces limons très fins se concentrent dans le plus lointain piège par rapport à la source de vent. La 8<sup>e</sup> expérience sur quartz industriels confirme ces résultats avec développement final d'une importante population de limons très fins (4  $\mu\text{m}$ ).

### Caractérisation morphométrique des particules expérimentales par analyse d'image et interprétation par AFC

Les particules issues des expériences 1H, 2H, 3G, 5V, 7G et 8G ont été traitées par Analyse d'images (50-70 particules par échantillon). Après seuillage spécifique (*Tableau IX*), les données ont été traitées par AFC (*cf. Annexe*).

### AFC des expériences 5V et 7G

*But* : étudier l'incidence de la vitesse sur l'évolution du matériel.

*Protocoles comparés* : même matériel (billes de 500-800  $\mu\text{m}$ ); même durée d'expérience (12 mn); 2 vitesses différentes (10 et 14 m/s).

Les 7 premiers axes fournissent 92,5 % de l'explication et les 2 premiers, 47,2 %. L'analyse privilégie, sur les 2 premiers axes (*Fig. 18*), les *paramètres de taille* alors que les *paramètres de forme* n'apparaissent que sur les axes III et IV. Sur l'axe I, il y a relation entre vitesse et amenuisement du matériel. Ainsi sur l'axe I- dominant des particules de 7G. Elles forment 40 % des particules de cet essai par vent fort prises en compte par l'AFC. Elles ont les caractères SUR1, PER1, RAY1, et par conséquent une petite taille résultant de la comminution des billes originelles. Sur l'axe I+, au contraire, 40 % des particules de 5V (expérience par vent faible) étant retenues par l'AFC ont les caractères SUR4, PER3 et RAY3. Cette forte taille implique une quasi-absence d'amenuisement. D'après l'axe II+, un lot de particules moyennes (SUR2, PER2, RAY2) provient en parts équilibrées de l'une et l'autre expérience, ce qui suggère un début de comminution. Pour les formes, les particules issues de la plus forte vitesse sont, pour une faible part (12 %), allongées, irrégulières et peu circulaires, impliquant une certaine fragmentation.

### AFC des expériences 3G, 5V et 7G

*But* : étudier l'incidence de la vitesse sur l'évolution du matériel.

*Protocoles comparés* : même matériel (billes de 500-800  $\mu\text{m}$ ), même durée (12 mn), 3 vitesses différentes (vitesse variant en cours d'expérimentation et vitesses constantes à 10 et 14 m/s).

Les 7 premiers axes fournissent 90,4 % de l'information et 46,2 % pour les 2 premiers. Alors que l'axe III représente les *paramètres de forme*, l'analyse privilégie sur ses 2 premiers axes les *paramètres de taille* :

— les *plus petits grains* (SUR1, PER1, RAY1 sur l'axe I-) correspondent au stock ayant connu la plus grande vitesse (60 % des cas retenus de 7G); seuls 10 % des cas de 3G (vitesse variable) et 5 % des cas de 5V (vitesse 10 m/s) y interviennent

— les *plus gros grains* (SUR4, PER3, RAY3 sur l'axe I+) correspondent à 26 % des cas de 3G et 20 % des cas de 5V, soit aux stocks soumis à une vitesse variable ou une faible vitesse

— les *grains moyens* (SUR2, PER2, RAY2 sur l'axe II+) sont formés de 22 % des cas retenus de 3G, de 15 % des cas de 5V et 12 % des cas de 7G.

Par ailleurs le matériel soumis à la plus forte vitesse donne des particules irrégulières, très allongées et peu circulaires. Une part notable des 5V (10 %) suggère qu'une faible vitesse correspond à une forte régularité des grains.

*Bilan pour la taille des particules* : la plus forte vitesse a fourni les grains les plus petits (60 %) et à moindre titre des grains moyens (11 %). Il y donc une *relation directe entre diminution de la taille et vitesse du vent*. Les grains soumis à vitesse constante faible montrent une forte minorité de grosses particules (20 %) suggérant qu'une *vitesse faible provoque une faible comminution*. Cette impression est renforcée par 26 % des cas retenus de 3G indiquant aussi qu'une vitesse variable et faible ne produit pas un fort amenuisement.

Tableau IX. – Les paramètres morphométriques de l'analyse d'images des produits de l'expérimentation en soufflerie et les seuils retenus pour les AFC.

SUR	1	< 39 999 $\mu\text{m}^2$	IRR	1	< 0,964	
	2	40 000-54 999		2	> 0,965	
	3	55 000-69 999		CIR	1	< 0,749
	4	> 70 000			2	0,750-0,835
		3	> 0,836			
PER	1	< 799 $\mu\text{m}$	ELO	1	< 1,20	
	2	800-999		2	1,21-1,49	
	3	> 1 000		3	> 1,50	
RAY	1	< 100 $\mu\text{m}$				
	2	101-124				
	3	> 125				

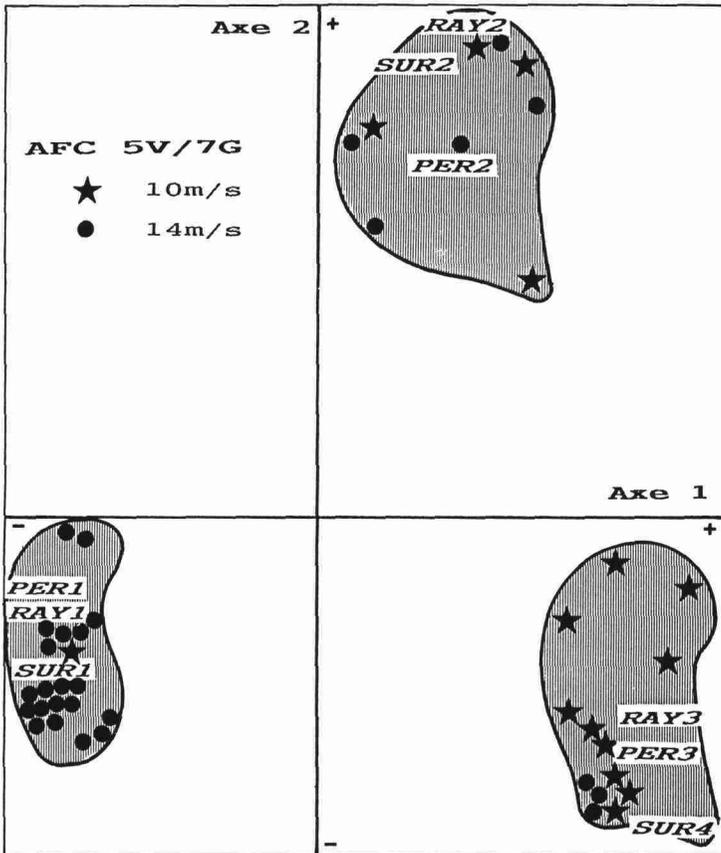


Figure 18. – Sortie graphique du croisement des axes I et II dans l'AFC des expériences 5V et 7G.

*Bilan pour la forme des particules* : d'après la réduction de la taille, le croît d'irrégularité et l'allongement des formes, *une forte vitesse engendre la fragmentation*. Amenuisant moins, respectant la régularité et la forme initiale des grains, *une faible vitesse engendre une abrasion*. La vitesse variable et faible amène un amenuisement faible ou moyen; mais elle entraîne un allongement et une irrégularité des particules donc une fragmentation, mais moins poussée que par forte vitesse.

### **AFC de l'expérience 2H et des billes originelles**

*But* : comparer les formes des particules avant et après expérimentation.

*Comparaison* : billes originelles (150-300  $\mu\text{m}$ ); billes de verre (150-300  $\mu\text{m}$ ) soumises à l'essai 2H (durée : 17 mn; vitesse : 14 m/s).

Les 7 premiers axes fournissent 91,6 % de l'information et les 2 premiers axes 53,1 %.

D'après l'analyse granulométrique, il y a au sein du stock originel (billes de 150-300  $\mu\text{m}$ ) 70 % de petites billes (vers le pôle 150  $\mu\text{m}$ ) et 30 % de moyennes (vers 200-250  $\mu\text{m}$ ). Les particules de forte dimension issues de l'expérimentation (SUR4, PER3, RAY3 sur l'axe I+) ayant perdu leur sphéricité originelle (CIR1, IRR1, ELO3) résultent donc de la fragmentation des plus grosses billes. Si 28 % des cas retenus de 2H dérivent ainsi d'une fragmentation (axe I+), 16 % sont de petites particules très rondes et régulières (axe I-) et 14 % sont des particules de taille moyenne. D'où l'alternative suivante :

— les petites particules circulaires et les particules moyennes issues de l'expérimentation peuvent appartenir aux fractions fine et moyenne du stock originel qui n'auraient pas évolué; l'essai n'aurait fait que fragmenter les grosses billes originelles, ce qui suggérerait l'*existence d'un seuil de taille sous lequel la fragmentation ne pourrait s'opérer*

— ces petites et moyennes particules seraient le résultat d'un *amenuisement par abrasion de billes originelles dont la sphéricité se serait conservée*. Il est impossible de trancher pour l'instant entre ces éventualités.

### **AFC des expériences 1H et 2H**

*But* : apprécier l'évolution du matériel avec des vents de force différente.

*Protocoles comparés* : matériel identique (150-300  $\mu\text{m}$ ), durées comparables et vitesses variées (vitesse variable faible et vitesse forte : 14 m/s).

Les 7 premiers axes portent 89,9 % de l'information et les 2 premiers : 47,2 %. Dans cette AFC interfèrent les paramètres de forme et taille.

Les petites particules issues de l'expérimentation sont régulières (axe I-) pour 20 % des cas retenus de 1H et 16 % de ceux de 2H. Il pourrait donc s'agir de petites billes originelles non altérées puisque moins nombreuses par vent fort. En revanche, les grosses particules irrégulières et allongées forment 34 % des particules de l'essai par vent fort et seulement 8,5 % de celui à vent variable : ce sont donc de grosses billes fragmentées, puisque la fragmentation est plus efficace par vent fort comme on l'a vu plus haut. Par ailleurs, sur l'axe II-, s'il y a des proportions notables de particules moyennes issues des deux expériences (17 % des cas retenus de 1H et 14 % de 2H), rien n'indique s'il s'agit de billes originelles (de taille moyenne) préservées ou d'un début de fractionnement de grosses billes. Néanmoins d'après l'axe III+,

13 % des cas retenus de 1H sont issus d'une fragmentation (CIR1 et accessoirement ELO3 et IRR1) et s'opposent en III- à de grosses particules très régulières, soit de grosses billes originelles préservées (14 % des cas retenus de 1H et 12 % de 2H).

*Bilan* : dans ces 2 expériences, il subsiste un nombre appréciable de billes originelles non altérées (néanmoins les pourcentages suivants montrent bien que le respect des particules originelles est moindre par vent fort que par vent plus faible variable).

Axe	Taille et forme	Vent variable	Vent fort
I-	Petites circulaires	20 %	16 %
II-	moyennes de forme inconnue (?)	17 %	14 %
III-	grosses régulières	14 %	12 %

Des particules grossières et irrégulières résultent du fractionnement de grosses billes originelles : sur l'axe I+, 8,5 % des cas retenus de 1H, et 34 % de 2H. La fragmentation est donc plus importante par vent fort. Par rapport à d'autres analyses (par exemple 2H+ billes originelles), cette AFC suggère que les petites particules régulières sont de petites billes originelles non altérées, rendant donc caduque la seconde hypothèse formulée plus haut en fin de bilan de l'AFC précédente. Mais cela conduit à d'autres interrogations...

Quelle est la raison du respect des caractères originels d'une fraction du stock ? La durée de l'essai a-t-elle été insuffisante pour tout fragmenter ? Ou y aurait-il un transport en suspension immédiat des plus fins grains originels qui interdirait *de facto* leur fragmentation ?

### AFC des expériences 2H et 7G

*But* : apprécier l'incidence de la différence des tailles des billes originelles sur les produits expérimentalement obtenus.

*Protocoles comparés* : billes de tailles différentes (150-300 µm et 500-800 µm), vitesses de vent identiques (14 m/s) et durées proches (17 et 12 mn).

Les 7 premiers axes portent 90 % de l'information et les 2 premiers 45,9 %.

Axe	Petites billes (2 H)	Grosses billes (7G)
I-	14 % (originelles ?)	30 % (abrasion ?)
I+	35,5 %	7 %
II-	20 %	11,5 %

Il y a, semble-t-il, contradiction entre les tailles différentes du matériel initial et les proportions respectives de petites particules circulaires issues de l'expérimentation (14 % de cas retenus de 2H et 30 % de 7G). De même, les particules grossières irrégulières et allongées sont curieusement plus importantes à partir du matériel originellement fin (36 % de cas retenus de 2H) que du matériel grossier (7 % de cas retenus de 7G). On peut émettre l'hypothèse suivante pour surmonter ces contradictions : *les plus petites billes sont mobilisées par saltation d'où leur fragmentation, alors que les plus grosses le sont par roulement d'où leur abrasion.*

### AFC des expériences 1H, 2H et 8G

*But* : comparer les formes issues de l'expérimentation à partir de formes initiales différentes (billes circulaires et quartz anguleux).

*Protocoles comparés* : matériel différent (billes de verre et quartz industriels), durées comparables (17 et 20 mn) et vitesses différentes (vitesse variable, vitesses constantes à 7 et 14 m/s)

Les 7 premiers axes fournissent 89,9 % de l'explication et les 2 premiers 48 %.

Axe	Taille et forme	Billes (1H)	Billes (2H)	Quartz (8G)
I-	Petites régulières	21,5 %	13,7 %	41,3 %
I+	Grosses irrégulières	7 %	27,5 %	11 %
II-	Moyennes sans forme	20 %	15,7 %	11 %

Les petites particules régulières n'ont pas la même signification suivant qu'elles proviennent de billes ou de quartz. Issues de billes, elles sont alors plus nombreuses dans le stock soumis au vent modéré et variable (21,5 % des cas retenus de 1H). Pour le stock soumis au vent fort, la proportion est plus faible (13,7 % de 2H) liée à la préservation moindre de petites billes originelles non altérées. Au contraire, les 41,3 % de petites particules régulières retenues à partir des quartz industriels diffèrent évidemment morphologiquement des quartz originels anguleux qui ont donc subi un amenuisement par abrasion les émoussant et réduisant. Dans le même ordre d'idée, si les grosses particules irrégulières issues des plus grosses billes de verre sont d'autant plus nombreuses que le vent est fort, du fait de la fragmentation (27,5 % des cas retenus de 2H contre 7 % de 1H), il n'y a que 11 % des cas retenus dans le matériel quartzéux à présenter ces caractères (quelques quartz n'étant pas remaniés et ayant conservé leurs taille et angulosité originelles). Contrairement au matériel vitreux qui semble évoluer par fragmentation, le matériel quartzéux évolue donc par abrasion.

Deux données peuvent expliquer ce comportement différent :

- la vitesse du vent de l'essai 8G était 2 fois moindre que celle de la plus rapide expérience sur billes : ainsi *le roulement favoriserait l'abrasion et la saltation plutôt la fragmentation*
- dans leur essai, les quartz industriels se sont déplacés sur un lit de quartz mouillés par aspersion ce qui a pu augmenter la rugosité du substrat et son caractère abrasif.

## Discussion

Malgré le caractère exploratoire et incomplet de cette expérimentation en soufflerie, le traitement par AFC met en évidence des points importants sur l'évolution d'un matériel sableux sous l'effet du vent et sur la production corrélatrice de particules fines susceptibles d'approvisionner les poussières.

### L'évolution du matériel sableux

Les propositions des AFC se regroupent en fonction de deux paramètres fondamentaux, vitesse du vent et taille des grains, qu'on peut interpréter en termes de *processus mécaniques*.

Il y a tout d'abord une relation entre *force du vent* et *diminution du grain*. Il est même apparu que la plus forte vitesse a fourni les grains les plus petits. Les paramètres de forme éclairent sur les modalités de cette diminution de la taille. En effet, la forte vitesse du vent irrégularise et allonge les particules. Connaissant la forme sphérique initiale, on peut donc affirmer qu'un *processus de fragmentation* est survenu avec cette forte vitesse. Au contraire, une faible vitesse réduit faiblement le grain et respecte ses régularité et circularité initiales : elle correspond à un *processus d'abrasion*.

D'après la forme souvent irrégulière de leurs produits, les petites billes ont été plus fragmentées, ce qui suggère leur mobilisation par saltation induisant une fragmentation brutale et rapide. Au contraire, d'après la forme régulière de leurs produits, les grosses billes ont été mieux respectées et simplement amenuesées, ce qui suggère leur mobilisation par roulement/reptation induisant une abrasion progressive. Cette idée que *le roulement des grains de sable favoriserait l'abrasion et que la saltation favoriserait la fragmentation* est corroborée par les propositions de plusieurs des AFC. On note que, d'après la forme et la taille de leurs produits, les quartz industriels anguleux ont subi un amenuesement par abrasion qui les a émoussés. Enfin, il semble qu'il existe un seuil de taille sous lequel la fragmentation ne puisse s'opérer.

### **La transposition aux sables quartzéux désertiques**

Comment s'appliquent ces propositions et interprétations dynamiques au domaine des sables quartzéux désertiques ? On peut penser d'abord que les sables fins sont principalement animés par la saltation. Leur processus de comminution est donc la fragmentation par choc des grains entre eux, d'où une forme irrégulière des fragments et des microfaçonnements superficiels caractéristiques des dynamiques éoliennes de haute énergie. Les voiles sableux du type *pellicule rousse*, les *nebkas* et les dunes les plus mobiles sont sans doute caractérisés par un tel matériel. En revanche, les sables plus grossiers sont mobilisés par roulement/reptation et par vent fort. Leur processus de comminution est l'abrasion qui provoque ou entretient l'émoussé et la sphéricité des grains. Selon toute vraisemblance les sables dunaires peu mobiles, en particulier ceux des ergs, évoluent ainsi.

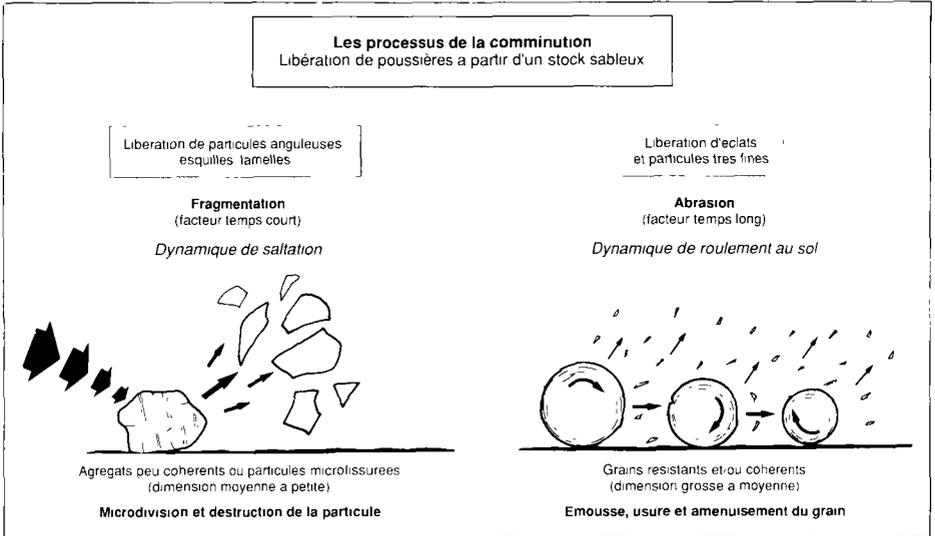
On peut donc opposer 2 types de comminution des sables quartzéux désertiques (*Fig. 19*) :

— l'une, rapide et brutale, de fragmentation de petits grains produisant des fragments anguleux mobilisables sous forme de poussières grossières, typiques, on l'a vu précédemment, des *poussières locales*

— l'autre, lente, d'abrasion de grains plus gros qui livre le produit impalpable des poussières quarzéuses fines, typiques, on le sait aussi, des poussières plus lointaines.

Ce lent amenuesement des gros grains les conduit nécessairement vers des tailles plus petites, à leur tour susceptibles de permettre leur mobilisation par saltation. Ces grains sont alors fragmentés ce qui explique le *caractère peu fréquent de petits grains de quartz bien roulés dans les poussières*. Seuls échapperont ceux qui, ayant franchi le seuil de comminution suggéré par les AFC, seront directement prélevés sous forme de poussières par vannage.

*Par ces expérimentations de cryoclastie et en soufflerie, il a donc été possible de mettre en évidence divers processus de production de quartz très fins, fonctionnels dans le désert et susceptibles d'y contribuer à la fourniture des poussières quartzéuses. Certes, il n'est pas question de prétendre ici que ces processus, du moins la cryoclastie, sont prépondérants dans*



**Figure 19.** – Les types de comminution des sables désertiques.

la libération de quartz fins. Mais il est soutenable de penser qu'ils s'insèrent dans un véritable système de production des poussières désertiques. En effet, il existe un «système d'érosion in situ désertique» exprimant le rôle convergent de processus différents et complémentaires qui concourent à la libération des grains à partir des substrats. A côté de la gélifraction de la roche et de la comminution des grains de sable, il y a aussi, on y a déjà fait référence, la haloclastie, la thermoclastie auxquelles s'ajoutent toutes les actions microbiologiques qui altèrent superficiellement la roche.

Ainsi dans le socle saharien ou ses vastes couvertures gréseuses où le quartz abonde, tous ces processus élémentaires d'agression attaquent superficiellement la roche en un cortex d'altération où s'exerce la désagrégation granulaire. Mais ils agissent aussi sur d'autres substrats riches en quartz, formations superficielles variées mises en place par les agents hydriques ou éoliens, mais aussi altérites anciennes, héritées de périodes autres qu'arides, de type tropical par exemple au Sahara méridional. On conçoit qu'il y ait ainsi des sources considérables pour la libération des quartz très fins et leur participation aux poussières sahariennes.

## Bibliographie

- [1] Kuenen P.H. (1969). Origin of quartz silt. *J. Sed. Petrol.*, 39 : 1631-1633.
- [2] Smalley I.J. (1966). The properties of glacial loess and the formation of loess deposits. *J. Sed. Petrol.*, 36 : 669-676.

- [3] Smalley I.J., Vita-Finzi C. (1968). The formation of fine particles in sandy deserts and the nature of «desert» loess. *J. Sed. Petrol.*, 38 : 766-774.
- [4] Smalley I.J., Krinsley D.H. (1978). Loess deposits associated with deserts. *Catena*, 5 : 53-66.
- [5] Smalley I.J. (1974). Fragmentation of granitic quartz in water : discussion. *Sedimentology*, 21 : 633-635.
- [6] Moss A.J., Walker P.H., Hutka J. (1973). Fragmentation of granitic quartz in water. *Sedimentology*, 20 : 489-511.
- [7] Lucchi F., Della Casa G. (1968). Surface textures of desert quartz grains. A new attempt to explain the origin of desert frosting. *Giornale di Geologia*, 36, 2 : 751-776.
- [8] Riezebos P.A., Van der Waals L. (1974). Silt-sized quartz particles : a proposed source. *Sed. Geol.*, 12 : 279-285.
- [9] Knight S.H. (1924). Eolian abrasion of quartz grains. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 35 : 107-108.
- [10] Anderson G.E. (1926). Experiments on the rate of wear of sand grains. *J. Geol.*, 34 : 144-258.
- [11] Marsland P.S., Woodruff J.G. (1937). A study of the effects of wind transportation on grains of several minerals. *J. Sed. Petrol.*, 7 : 18-30.
- [12] Kuenen P.H. (1960). Experimental abrasion. IV. Eolian action. *J. Geol.*, 68 : 427-449.
- [13] Whalley W.B., Marshall J.R., Smith B.J. (1982). Origin of desert loess from some experimental observations. *Nature*, 300 : 433-435.
- [14] Whalley W.B., Smith B.J., McAlister J.J., Edwards A. (1987). Aeolian abrasion of quartz particles and the production of silt-size fragments, preliminary results and some possible implications for loess and silcrete formation. in Frostick L., Reid I. Eds., *Desert sediments Ancient and Modern. Geol. Soc. Sp. Pub.*, 35 : 129-138.
- [15] Lautridou J.P., Ozouf J.C. (1982). Experimental frost shattering. 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS. *Progress in Physical Geogr.*, 6, 2 : 217-232.
- [16] Lautridou J.P. (1985). Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse Lettres Univ. Caen, 908 p.
- [17] Lautridou J.P. (1988). Recent advances in cryogenic weathering. in Clark M.J. Ed., *Advances in Periglacial Geomorphology*, Wiley and Sons Ltd., pp.33-47.
- [18] McGreevy J.P. (1981). Some perspectives on frost shattering. *Progress Phys. Geogr.*, 5, 1 : 56-75.
- [19] Pye K. (1987). Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, London, 352 p.
- [20] Moss A.J., Green P., Hutka J. (1981). Static breakage of granitic detritus by ice and water in comparison with breakage with flowing water. *Sedimentology*, 28 : 261-272.
- [21] Tricart J. (1956). Etude expérimentale du problème de la gélivation. *Biul. peryglac.*, 4 : 285-318.
- [22] Coudé-Gaussen G. (1979). Les Serras da Peneda et do Gerês (Minho-Portugal) Formes et formations d'origine froide en milieu granitique. Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, Paris, 607p. 111 Fig. , 19 Pl. photo., 6 Pl. H.T., 2 cartes couleurs H.T.
- [23] Coudé-Gaussen (1981). Les Serras da Peneda et do Gerês – Minho, Portugal – Etude géomorphologique. Memorias do Centro de Estudos Geograficos, Lisboa, 5, 279 p., 72 Fig. , 42 photo., 2 cartes couleurs H.T.
- [24] Coudé-Gaussen G., Lautridou J.P. (1987). SEM characterization of microfeatures on frost shattered quartz grains. in Pecsli M., French H.M. Eds., *Loess and Periglacial Phenomena*. Akadémia Kiado, Budapest, pp. 253-261.
- [25] Dubief J. (1959). Le climat du Sahara. I.R.S., Alger, 2 t. 313 p. + 275p.
- [26] Rognon P. (1967). Le Massif de l'Atakor et ses bordures (Sahara central). Etude géomorphologique. CRZA-CNRS, série Géologie, 9, 559p.
- [27] Coudé-Gaussen G. (1978). Confirmation de l'existence d'une glaciation würmienne dans les montagnes du Nord-Ouest du Portugal. *C.R. som. Soc. Géol. France*, 1 : 34-37.
- [28] Lautridou J.P. (1976). Dix ans de recherches au Centre de Géomorphologie. Les expériences de cryoclastic. *Bull. Centre Géomorph. CNRS-Caen*, 21 : 21-28.
- [29] Coudé-Gaussen G. (1986). Observations au MEB de poussières sahariennes prélevées aux Canaries. Symposium INQUA «Changements globaux en Afrique», Dakar 1986, 83-86.

- [30] Coudé-Gaussen G., Rognon P., Bergametti G., Gomes L., Strauss B., Gros J.M., Le Coustumer M.N. (1987). Saharan dust on the Fuerteventura Island (Canary Islands) : chemical and mineralogical characteristics, air-mass trajectories and probable sources. *J. Geophys. Research*, 92, D8 : 9753-9771.
- [31] Logie M. (1981). Wind tunnel experiments on dune sands. *Earth Surface Process and Landforms*, 6 : 365-374.
- [32] Logie M. (1982). Influence of roughness elements and soil moisture on the resistance of sand to wind erosion. *Catena*, Suppt. 1 : 161-173.
- [33] Gillette D.A., Blifford I.H., Fryrear D.W. (1974). The influence of Wind Velocity on the Size Distributions of Aerosols Generated by the Wind Erosion of Soils. *J. Geophys. Res.*, 79; 27 : 4068-4075.
- [34] Gillette D. (1978). A wind-tunnel simulation of the erosion of soil : effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production. *Atmospheric Environment*, 12 : 1735-1743.
- [35] Gillette D.A. (1978). Tests with a portable wind-tunnel for determining wind erosion threshold velocities. *Atmospheric Environment*, 12 : 2309-2313.
- [36] Whalley W.B., Marshall J.R., Smith B.J. (1982). Origin of desert loess from some experimental observations. *Nature*, 300 : 433-435.
- [37] Norton M.G., Atkinson B.K. (1981). Stress-dependent morphological features on fracture surfaces of quartz and glass. *Tectonophysics*, 77 : 283-295.

# 4

## Les substrats-sources : essai de généralisation à l'échelle du Sahara septentrional et central

La notion de poussières éoliennes doit tenir compte de la dualité d'un phénomène associant certes l'agent de transport, le vent, mais aussi le matériel transporté en suspension. Or l'étude des poussières désertiques n'a souvent été envisagée que dans l'une ou l'autre de ses composantes, soit par une approche météorologique sur l'état et les dynamiques de l'atmosphère, soit en caractérisant le matériel des poussières dans la gamme des autres sédiments éoliens. Il est en fait nécessaire d'étudier le phénomène suivant les deux perspectives. En particulier, dans une recherche sur les régions-sources, il faut considérer non seulement les données météorologiques locales et régionales propices au développement de vents de sable et de poussières, mais aussi apprécier la plus ou moins bonne aptitude des substrats à fournir une fraction fine mobilisable en suspension. C'est le croisement des informations sur les vents et substrats qui permet le mieux de caractériser et de hiérarchiser les régions-sources de poussières au Sahara.

L'étude de zones-tests sur le terrain ou celle, en laboratoire, de processus difficiles à cerner en milieu désertique, a déjà permis de préciser l'aptitude des substrats sahariens à fournir des poussières. On peut retenir leurs conclusions pour esquisser une classification des substrats suivant leurs potentialités et, conformément à ce qui vient d'être dit, en la combinant avec les données disponibles sur les vents désertiques, en induire la *localisation et l'extension des régions-sources à l'échelle du Sahara central et septentrional*. Certes, l'extrapolation de certaines conclusions antérieures à des domaines considérables et inégalement connus mérite bien des nuances et doit se faire avec prudence, mais il a paru intéressant d'en proposer un tableau provisoire.

Cette généralisation de l'étude des régions-sources s'est appuyée sur la *méthode cartographique assistée par ordinateur*. La classification des substrats a permis d'appliquer les techniques de la cartographie automatique.

### Localisation des substrats potentiellement aptes à fournir des poussières

#### Milieus naturels et substrats

Vu le poids du facteur lithologique, il y a dans le domaine désertique une coïncidence presque parfaite entre les milieux naturels et les substrats. D'ailleurs, dans beaucoup de documents cartographiques à petite échelle sur le Sahara, on passe indifféremment de notions

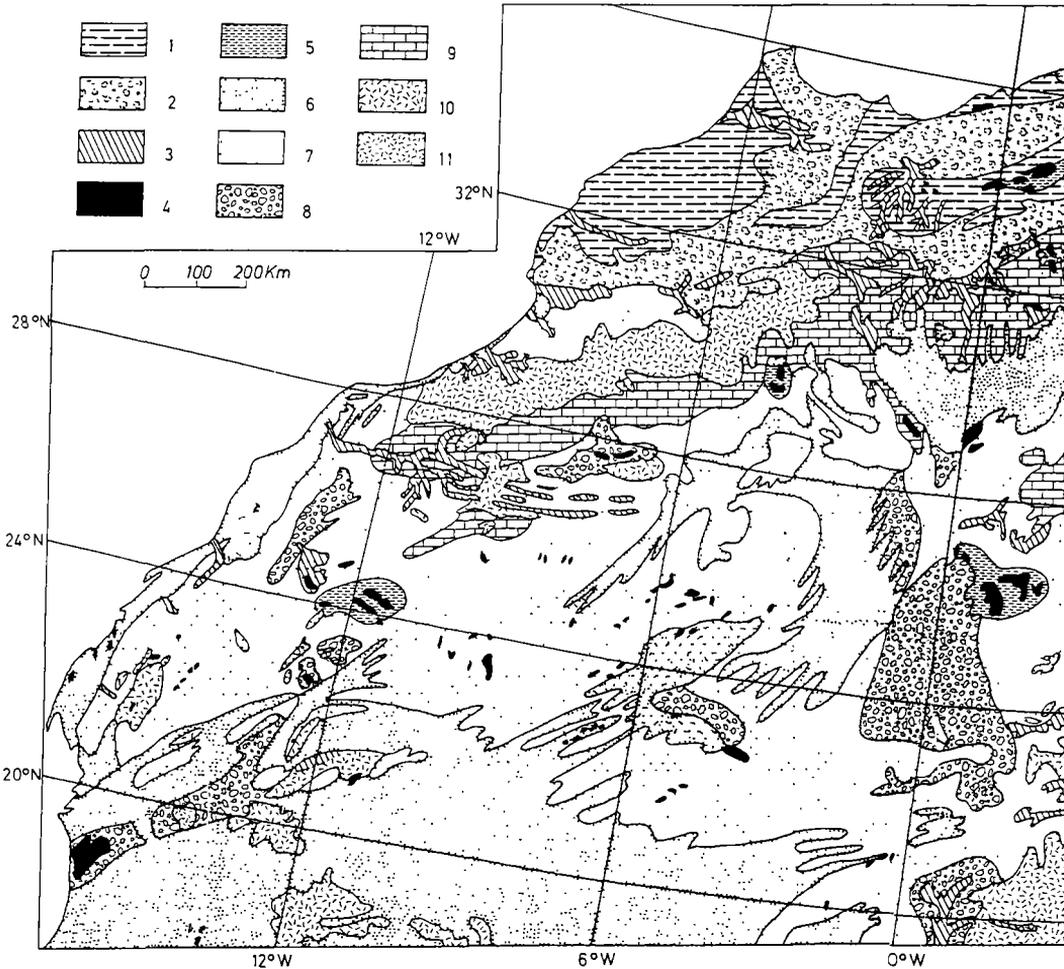
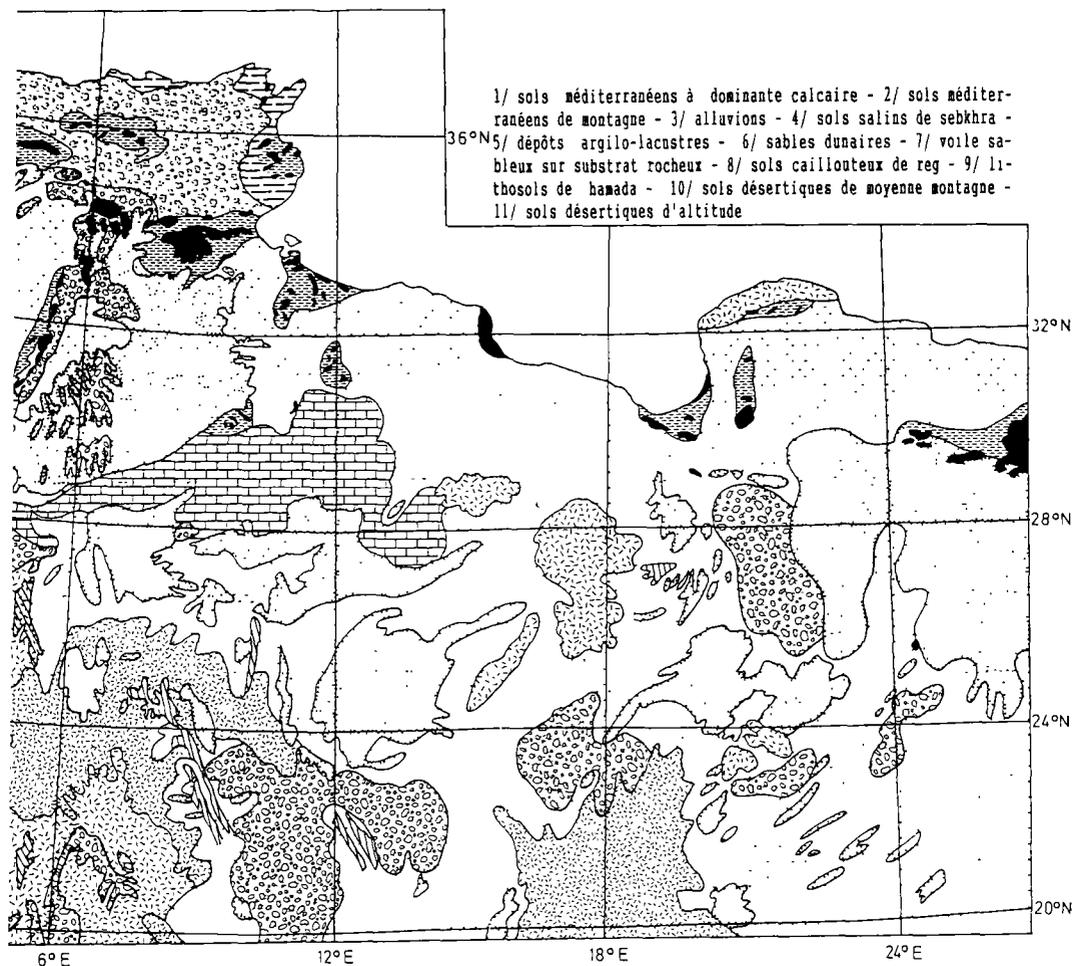


Figure 20. – Types de sols et substrats du Maghreb, du Sahara septentrional et central.

géographiques à des notions lithologiques voire pédologiques. Dans les domaines semi-aride et méditerranéen au Nord du désert, des qualifications biogéographiques et orographiques complètent toutefois la dominante lithologique.

Il a d'abord fallu établir, parce qu'elle n'existait pas, une carte illustrant précisément la diversité des substrats du Sahara central et septentrional (Fig. 20). Le dessin de certains contours s'est révélé délicat, en particulier pour les ergs où des incertitudes subsistent et surtout pour les voiles sableux dont la finesse et la mobilité gênent la délimitation sur les substrats recouverts (socle ancien, hamadas sédimentaires etc.).



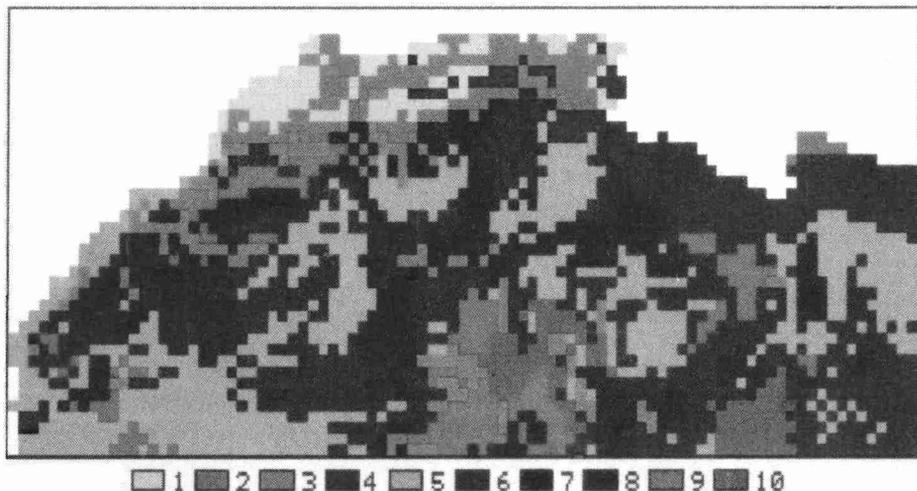
Pour passer de cette carte de conception classique au document CAO (cartographie assistée par ordinateur), on a numérisé l'information en adoptant une grille de maille de 7 mm de côté (soit un carré d'environ 50 km de côté suivant l'échelle et la projection adoptées). La carte initiale a donc été couverte par 39 lignes de 94 carreaux, soit 3666 pixels. Après codage en système hexadécimal, les données numériques ont été entrées sous Multiplan et le fichier a été traité au Centre de Calcul de l'Université de Caen. Le document CAO en fausses couleurs (logiciel de traitement d'images CREIMA) a été obtenu après classification supervisée (10 classes compatibles avec la typologie des sols et substrats) avec sortie graphique sur imprimante laser couleur. Le choix des couleurs s'est fait pour évoquer, par le jeu des *teintes chaudes, froides, sèches, humides* et leurs combinaisons, les caractères dominants des grands milieux naturels du Maghreb, du Sahara central et septentrional (Fig. 21).

## Les zones potentielles de fourniture de poussières

### La classification des sols et substrats

On a classé les sols et substrats sahariens en fonction de leur susceptibilité à produire des particules fines.

— *Classe 10* : les formations superficielles argileuses et salines des dépressions hydro-éoliennes (sebkhas et grands chotts) paraissent les plus aptes à fournir des particules fines,



**Figure 21.** – Les milieux naturels du Maghreb et du Sahara septentrional et central. 1) plaines et plateaux méditerranéens; 2) montagnes méditerranéennes; 3) vallées majeures; 4) chotts et sebkhas; 5) ergs; 6) plaines à voiles sableux; 7) regs; 8) hamadas; 9) plateaux et moyennes montagnes désertiques; 10) hautes montagnes désertiques.

conformément aux observations de terrain au Nord du Grand Erg Occidental, dans le Sud-Tunisien et le Sud-Marocain. On y a englobé les *dépôts lacustres meubles* et les «*sols pulvérulents*» dérivés.

— *Classe 9* : dans ces *dépôts et épandages d'oued*, on pense aux alluvions fines aisément vannées par le vent comme aux takyrs et maaders, en accord avec nos recherches en Sahara septentrional (Nord du Grand Erg Occidental) et central (Hoggar).

— *Classe 8* : ce rang favorable des *massifs dunaires* s'explique par la mise en évidence sur le terrain d'une fourniture de poussières carbonatées ou argileuses et par l'étude expérimentale ayant conclu à une libération continue de poussières quartzueuses dont la lenteur est largement compensée par la superficie considérable des grands ergs au Sahara.

— *Classe 7* : il s'agit des plaines à *voiles sableux*. Le rendement en fraction fine entrevu pour la *pellicule rousse* au Nord du Grand Erg Occidental pouvait suggérer un meilleur classement. Mais les conditions d'abrasion et de fragmentation, excellentes sur des substrats moyennement cohérents à meubles, sont sans doute moins bonnes sur les immenses étendues de roches résistantes parcourues ailleurs par les voiles sableux.

— *Classe 6* : les *plaines et plateaux d'Afrique du Nord* ont des aptitudes inégales suivant la variété des substrats, des rythmes saisonniers de la végétation et des cultures. L'été est évidemment très favorable avec un couvert végétal appauvri et d'autre part la composante anthropique devient un élément majeur dans ces régions.

— *Classe 5* : on peut discuter beaucoup de la productibilité des *regs*. Ces plaines caillouteuses résultent souvent d'un vannage jusqu'à épuisement de la fraction fine, d'où une aptitude quasi nulle si leur fonction de piégeage de poussières n'y renouvelait un stock toujours remobilisable.

— *Classe 4* : si le gel, dont on a expérimentalement apprécié l'efficacité, s'exerce le mieux dans les *hautes montagnes désertiques*, en revanche, la plupart des autres processus de préparation du matériel y ont une efficacité vraisemblablement amoindrie.

— *Classe 3* : le froid est moins actif dans les *plateaux et moyennes montagnes désertiques*.

— *Classe 2* : les surfaces rocheuses de *hamadas* offrent le plus médiocre potentiel de fourniture de fines au sein-même du désert. Leurs dalles calcaires et gréseuses résistent d'autant mieux à l'abrasion qu'elles n'engendrent pas de voiles sableux.

— *Classe 1* : dans ce classement, les moyennes et hautes *montagnes d'Afrique du Nord* paraissent les moins aptes. Gel et dynamiques de versants y sont actifs mais leurs produits, concentrés par le ruissellement vers les oueds, passent alors dans la classe des alluvions. De plus, le couvert végétal plus dense avec l'altitude est une protection efficace.

### *La carte des zones potentielles de fourniture de poussières*

Pour établir ce document (Fig. 22), on a procédé à un nouveau codage issu du classement ci-dessus (828 pixels codés 0 pour la mer et 2838 codés en système hexadécimal pour les substrats).

Une démarche infographique comparable à celle de la *carte des milieux naturels* a été appliquée. Sur le document CAO localisant les zones susceptibles de fournir des poussières par *ordre croissant de potentialité*, le 0 est resté en blanc et les autres données ont été restituées par ordinateur et cartographie automatique en 10 nuances de gris à noir. Grâce à cette carte,

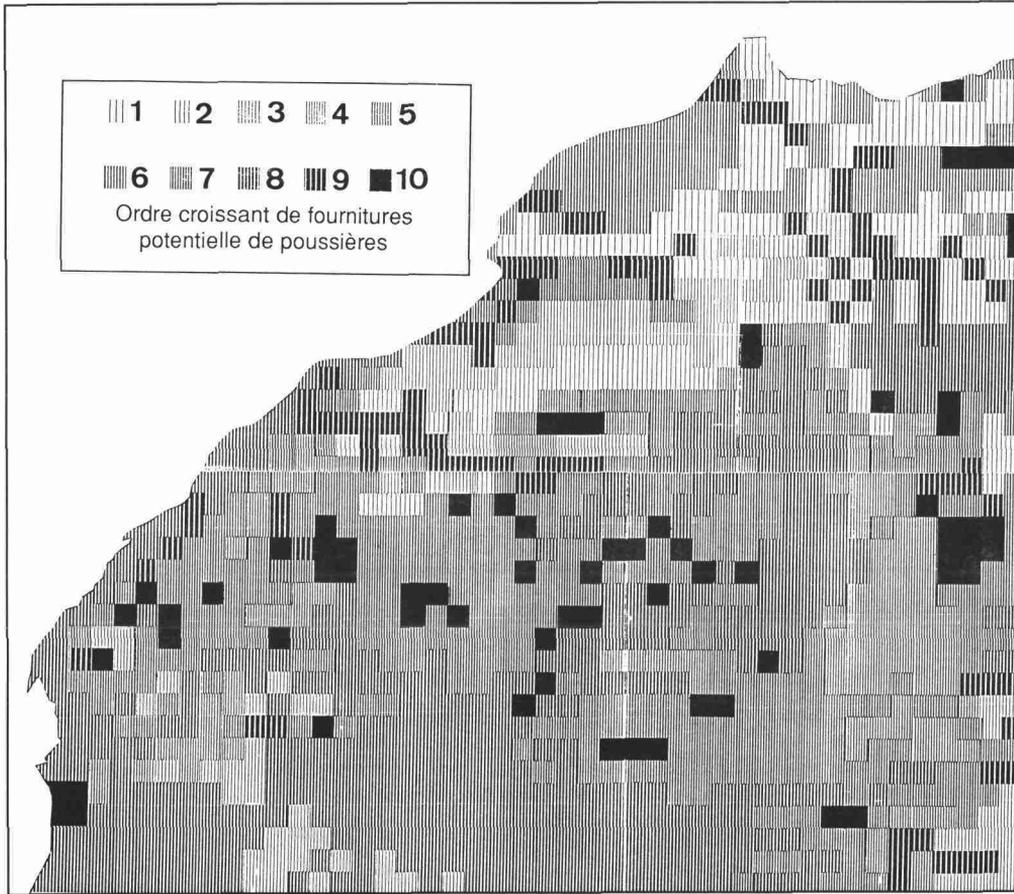
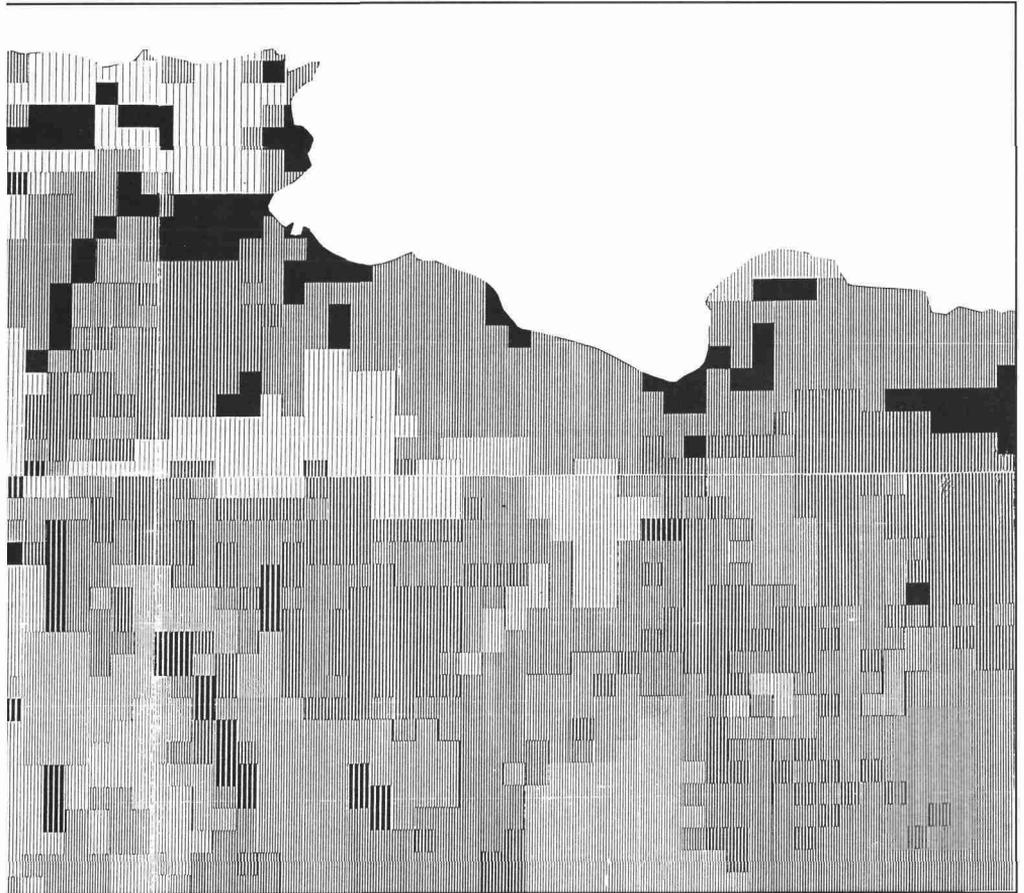


Figure 22. – Classification des zones potentielles de fourniture de poussières.

on a mesuré la surface occupée par chacun des substrats au Maghreb, au Sahara septentrional et central (Tableau X).

Cette carte classe donc par ordre croissant de productibilité les zones susceptibles de fournir des poussières en fonction des potentialités de leurs substrats :

— les zones potentiellement les plus favorables couvrent environ 11 % de la surface étudiée. Elles correspondent aux grandes dépressions des chotts et sebkhas du Sud-Tunisien, des hauts plateaux algériens, des confins algéro-tunisiens, du Nord de la Libye, de Mauritanie et des sebkhas Mekerrhane et Azzel Matti. De même les épandages d'oued, terrasses fluviales et dépôts limoneux se situent au centre et autour du Hoggar, sur le piémont atlasique algérien, en Maroc Atlantique, Sud-Marocain, Mauritanie littorale et dans l'ancien Sahara espagnol.



**Tableau X.** – Les surfaces occupées par les types de substrats au Maghreb et au Sahara septentrional et central.

Types de zones potentielles	Surfaces occupées km <sup>2</sup>	
1. Moyennes montagnes méditerranéennes	5 %	325 000
2. Hamadas	6 %	415 000
3. Plateaux et moyennes montagnes désertiques	8 %	557 500
4. Hautes montagnes désertiques	4 %	292 500
5. Regs	9 %	637 500
6. Plaines et plateaux méditerranéens	4 %	255 000
7. Zones couvertes d'un voile sableux	29 %	2 080 000
8. Ergs	25 %	1 770 000
9. Dépôts et épandages d'oueds	5 %	347 500
10. Chotts et sebkhas	6 %	415 000

— la majorité des surfaces (54 %) paraît susceptible de fournir une proportion notable de poussières, des ergs, (Grand Erg Occidental, Grand Erg Oriental, Erg Chech, Ouarane, M'Réyé, Edeyen Murzuk et ergs du Désert libyque) aux voiles sableux, surtout de l'Ouest du Sahara.

— les surfaces potentiellement aptes à produire des quantités moyennes à médiocres de poussières couvrent 17 % de la surface étudiée : plaines et plateaux méditerranéens cultivés, regs (Nord- et Est-Tanezrouft, Taoudeni, Ouest-mauritanien, piémont de l'Atlas saharien, centre- et Est-Hoggar, Serir-Tibesti, Kalancho-Serir), et hautes montagnes désertiques (Hoggar et Tibesti).

— les zones susceptibles de fournir le moins de poussières occupent environ 19 % de la surface étudiée. Elles correspondent aux montagnes boisées des Atlas marocains et algéro-tunisiens, aux hamadas (El Homra, Tinrhert, El Golea, Tademaït, piémont atlasique algéro-marocain, Sud des Eglab), aux plateaux et moyennes montagnes désertiques (Hoggar, Anti-Atlas marocain, Ouest-mauritanien, Plateau de Barka, djebels Sawda et Harudj Aswad).

## Localisation et classification des grandes zones de production

### Les vents de sable, manifestation concrète des poussières sahariennes

#### *La problématique*

Parmi les faits météorologiques relatifs au *phénomène poussière* dans le désert, le soulèvement du vent de sable est indiscutablement la manifestation la plus immédiate et la plus tangible.

Si une confusion permanente entre les notions de *vent de sable* et de *vent de poussière* s'est installée dans le vocabulaire courant, ayant d'ailleurs glissé vers la terminologie scientifique, l'ambiguïté n'est qu'apparente : elle traduit la réalité concrète du phénomène telle qu'elle est vécue par les habitants du Sahara et de ses marges et telle qu'elle a été rapportée par les voyageurs [1].

Quand il y a vent de sable, il y a évidemment mobilisation de poussières car, dans la zone de départ, le tri entre les particules ne s'est pas encore effectué. En conséquence, pour rendre compte des soulèvements de poussières dans le désert, les observations sur les vents de sable sont capitales et il apparaît que l'examen de leur localisation et de leur fréquence est le seul moyen actuellement disponible au Sahara d'étayer la *facette météorologique* de l'étude des zones de production de poussières.

En ce domaine, on bénéficie des travaux de Dubief [2], les seuls publiés jusqu'à présent sur les vents de sable au Sahara.

Il s'agit de mesures mensuelles du nombre de jours de vents de sable, effectuées dans différentes stations dans la fourchette 1925-1950, sur des durées parfois inégales. On s'est appuyé sur ces données sachant, comme l'a écrit J. Dubief lui-même, que ces statistiques «...prêtent, bien entendu, à de sérieuses critiques...» mais en soulignant fortement le privilège d'avoir pu les utiliser car il n'en existe toujours pas d'autres...

### *La localisation des domaines à vents de sable*

#### *Les régions à vents de sable fréquents*

— *un domaine sud-occidental*, près du littoral mauritanien, regroupant les stations de Nouakchott (26,3 vents de sable en moyenne par an), Akjoujt (74,5), Atar (43,4) et Nouadhibou (87,8) pour la période 1940-46. Les mois les plus venteux vont de Mars à Septembre pour Nouadhibou, de Février à Juillet pour Nouakchott et sont plus répartis dans l'année pour Akjoujt et Atar.

— *un domaine nord-occidental*, aux confins algéro-marocains, concernant les stations d'Akka (34,3 vents de sable/an pour la période 37-43/46-47), Tagounite (82,8 pour 35-47), Zagora (39 pour 33-43), Rissani (32,7 pour la période 35-36/40-42/45-47), Erfoud (37 pour la période 33-34/37-43), Taouz (92,2 pour 40-45), Bou Denib (37 pour 40-47), Beni Abbès (25,9 pour 25-50), Tarhit (27,8 pour 43-49), Beni Ounif (23,1 pour 35-50), Bécharr (32,6 pour 25-50) et El Abiodh Sidi Cheikh (42,6 pour 34-50). La saison la plus venteuse s'étend dans l'ensemble de Février-Mars à Septembre avec un maximum en Mai-Juin.

— *un domaine central* s'étendant d'In Salah aux confins nigéro-maliens. Il comprend les stations d'In Salah (54,9 vents de sable/an pour la période 25-50), Aoulef (25,3 pour 32-50), Zaouia el Kahla (23,3 pour la période 25-46/48-50), Illizi (24,9 pour la période 25-46/48-50), Ghat (27,5 pour la période 35-41/49-50), Reggane (29,7 pour la période 36-39/49-50), Tadjemout (23,2 pour 25-50), Ouallene (24,2 pour 32-50), Aguelhoc (40,1 pour 40-46), In Guezzam (29,5 pour 49-50) et Tin Zaouatene (105,7 pour 38-50). Globalement, la saison venteuse s'étend de Février à Août avec des maximums variés en Mai, Juin et Mars.

— *des stations plus éparses* avec des taux notables : en Algérie, il s'agit de Aïn Oussera (37,1 vents de sable/an pour les années 25-50), El Arfiâne (30,1 pour 29-50), Touggourt (26,9 pour 25-50) et Ouargla (37,2 pour 25-50); en Tunisie, on note Kebili (34,6 pour 37-39) et, en Libye, Bu Jem (90 pour 39-41).

#### *Les régions à vents de sable très peu fréquents*

— *un domaine allant de l'ancien Sahara espagnol au Sud-Marocain*, avec les stations de Vila Cisneros (3,8 vents de sable/an pour 41-47), Bir Mogrein (10,2 pour 43-50), Smara (5 pour 43-47), Tindouf (10,3 pour 40-50), Cabo Juby (2,9 pour 41-47) et Sidi Ifni (3,4 pour 41-47). Pour ce domaine, les vents de sable sont de saison fraîche d'Octobre à Mars.

— *un domaine maghrébin* groupant les stations de Figui (8,8 pour 35-47), Aïn Sefra (9,7 pour la période 25-41/47/49-50), Mecheria (10,8 pour 25-50), Zemzach (11 pour 25-49), El Bayadh (3,2 pour 25-50), Tadmit (7,2 pour 38-50), El Ousseukh (9,9 pour 25-50), Djelfa (0,6 pour 25-50), Sidi Aïssa (1 pour 25-50), Barika (3,6 pour 25-42/48-50), El Kantara (9,9 pour 32-50), M'Sila (1,6 pour 25-50), Bou Saada (8,7 pour 25-50), Tolga (3,5 pour 43-50), Ouled Djellal (7,4 pour 25-50), Redeyef (9,8 pour 37-39), Metlaoui (4,7 pour 37-39) et Moulares (6 pour 38-39). La période la plus favorable aux vents de sable s'étend de Mars à Août avec un maximum en Juin.

— *un domaine tuniso-libyen allant de Gabès à Fort Saint*. Il comprend, pour les années 1937-39, les stations de Gabès (3,2), Djerba (5,8), Zarsis (1,8), Medenine (7,2), Ghoumrassen (3,6), Ben Gardane (7,6), Tatahouine (0,6), Dehibat (1), Bordj Bourguiba (1,4), et Sinawen (6,4 pour 24-36) et Fort Saint (7 pour 19-39). La période venteuse couvre une bonne partie de l'année, de Janvier à Septembre, mais sans net maximum.

*Les domaines à nombre moyen de vents de sable*

— *un domaine nord-ouest saharien* cerné par 2 cellules à forts vents de sable. Il regroupe les stations de Chegga (13,9 vents de sable/an pour 49-50), Adrar (14,1 pour 25-50) et Tabelbala (13 pour la période 39-41, 49-50).

— *un domaine libyen* avec les stations de Sardalas (11,7), Awbari (13,3 pour la période 39-40/44-47), Tajarhi (15,5 pour 38-41), Murzuk (14,3 pour la période 33-37/45-50), Sabhah (11,6 pour la période 39-40/45-50), Sciuref (18 pour 1939), Daraj (12,1 pour 27-40), Nalut (12,4 pour 35-40) et Maradah (12 pour 34-39).

**La répartition saisonnière des vents de sable**

Toutes régions confondues, il y a une nette prédominance des vents de sable en Mai et la période la plus venteuse s'étend de Mars à Août (*Tableau XI*). Il y a en quelque sorte une *pré-saison estivale des vents de sable* accompagnant la remontée apparente du soleil sur l'hémisphère nord qui se traduit sur le Sahara central et septentrional par un regain de sécheresse et chaleur. Dans les stations où les vents de sable sont plus nombreux, la période venteuse est à la fois un peu plus tardive et surtout plus longue (Avril-Juillet). Dans les stations moyennement venteuses, la période va de Mars à Mai. Enfin pour les stations à faible nombre de jours de vents de sable, aucun maximum majeur ne se dégage, seuls les mois de Mai et Août culminent. Malgré tout, dès Janvier, les vents de sable peuvent apparaître.

**Tableau XI.** – Occurrence des mois où les jours de vent de sable sont les plus nombreux.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
< 10	4	3	5	5	8	6	—	8	1	1	—	—
11-21	1	2	8	6	11	1	2	1	—	—	1	—
> 22	—	2	3	6	14	5	6	3	1	1	—	—
Total	5	7	16	18	33	12	8	12	2	1	1	—

**Les régions-sources de poussières**

La régionalisation des *domaines sahariens producteurs de poussières* s'est imposée grâce à la méthode cartographique. Elle résulte, en effet, du croisement des informations sur la localisation des substrats susceptibles de fournir des fines et sur la fréquence des vents de sable.

**La carte de classification des zones-sources de poussières entre 1925 et 1950**

Sur le fond carroyé de la *carte des zones potentielles de fourniture de poussières* (Fig. 23), on a superposé la carte isoligne du nombre de jours de vents de sable par an entre 1925 et 1950 de Dubief (1953). Chaque pixel a été affecté d'un coefficient multiplicateur, fonction de sa situation par rapport aux plages de la carte isoligne de J. Dubief. Les coefficients multiplicateurs ont tenu compte de la progression adoptée par J. Dubief dans la mise en place des isolignes (<5 jours : coeff.1; 5-10j : 2; 10-20j : 4; 20-40j : 8; 40-60j : 12; 60-80j : 16; >80j : 18).

On a multiplié par le coefficient afférent la valeur de 1 à 10 attribuée à chaque pixel au sein de la classification croissante d'aptitude potentielle des substrats établie précédemment. Il en a résulté un premier codage des mailles (0-160). Ces données ont été saisies sous Multiplan en vue de leur traitement infographique. Mais comme l'étalement des valeurs du codage (0-160) n'était pas compatible avec la lisibilité d'une carte CAO en trames, on a effectué un seuillage statistique sur les données. Il n'a retenu que 8 classes pour le traitement CAO définitif (1-5; 6-9; 10-18; 19-32; 33-48; 49-72; 73-96; 97-160). Chacune des 8 classes a été affectée d'un niveau de gris à noir. Le blanc a été réservé à la mer, mais aussi aux pixels sans information (absence d'information liée au fait que le document isoligne de J. Dubief ne couvrait pas la totalité du fond de carte initial).

### Commentaire de la carte

Cette composition cartographique (Fig. 23) issue du croisement des données sur la potentialité des substrats et sur la fréquence des vents de sable apparaît comme *la première synthèse, originale et parfois fort déroutante quant à son interprétation, de la distribution des régions sources de poussières au Sahara septentrional et central*. Elle a permis la mesure des surfaces respectivement occupées par ces zones-sources (Tableau XII).

**Tableau XII.** – Classification en ordre croissant des zones-sources productrices de poussières avec les pourcentages et les valeurs absolues des surfaces occupées.

1	3 %	soit environ	190 000 km <sup>2</sup>
2	8 %	–	462 500
3	12 %	–	670 000
4	26 %	–	1 425 000
5	11 %	–	620 000
6	23 %	–	1 242 500
7	12 %	–	665 000
8	3 %	–	180 000

### Les régions les plus productrices de poussières

Les zones sombres (plages noires ou gris foncé des niveaux 8 et 7) occupant 15 % de la surface étudiée retiennent immédiatement l'attention. Ces régions, surtout méridionales, fournissent le plus de poussières : le triangle ayant pour base occidentale la Baie du Lévrier et la sebkha Ndrhamcha et pour sommet l'Ouarane; puis la diagonale NW-SE large de 250km allant de l'Ouarane au Sud de l'Adrar des Iforas. A ces domaines s'adjoignent un fort noyau productif centré sur la Sebkha Mekerrhane et l'Ouest du Tidikelt, puis des sites épars entre Béni-Abbès et El Abiodh Sidi Cheikh, entre les chotts Melrhir et Djerid, et au Sud, près du Grand Erg Oriental, le secteur El Goléa-Ouargla. S'y ajoute une mince frange orientée NNW-SSE, parallèle au littoral de la Grande Syrte, pour laquelle le facteur explicatif est nécessairement d'ordre météorologique puisque ces sols n'entrent pas dans la catégorie des plus aptes à fournir des fines. Au contraire, pour les autres régions, il y a convergence du facteur météorologique et du potentiel favorable des sols, pour expliquer la forte production de poussières. Il faut noter que la grande bande méridionale transverse se prolongeant par le triangle de la Baie du Lévrier, correspond bien à la zone de départ préférentielle des expulsions de lithométéores

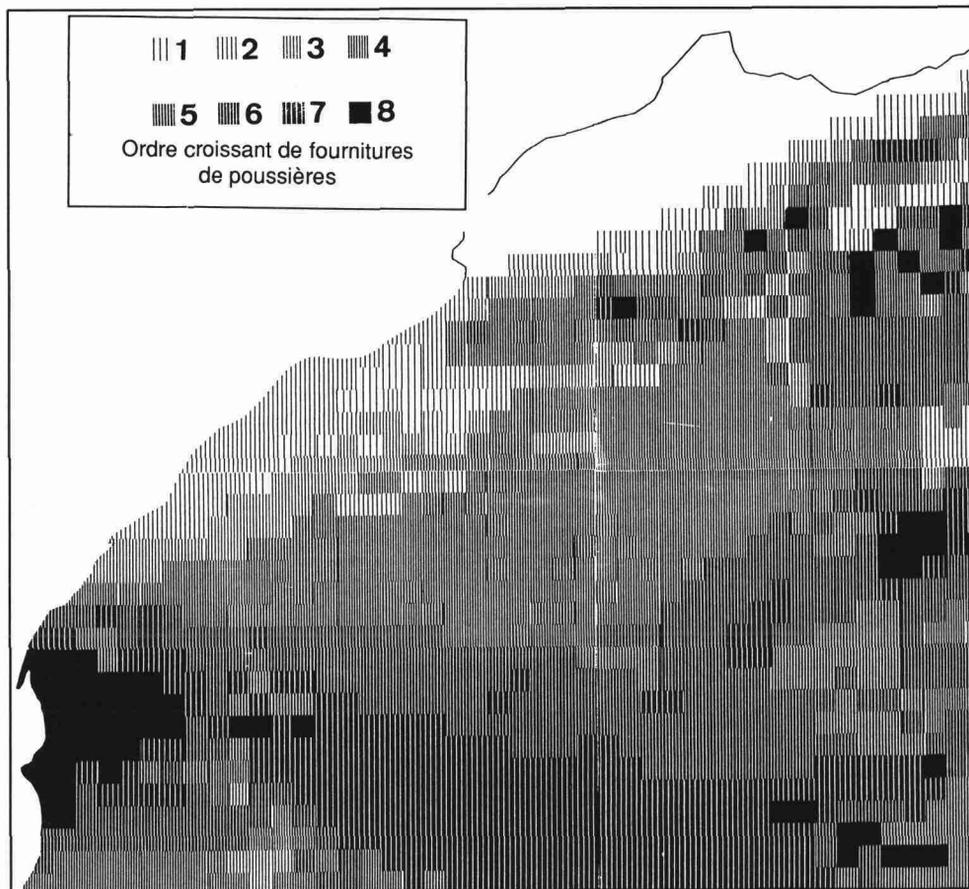
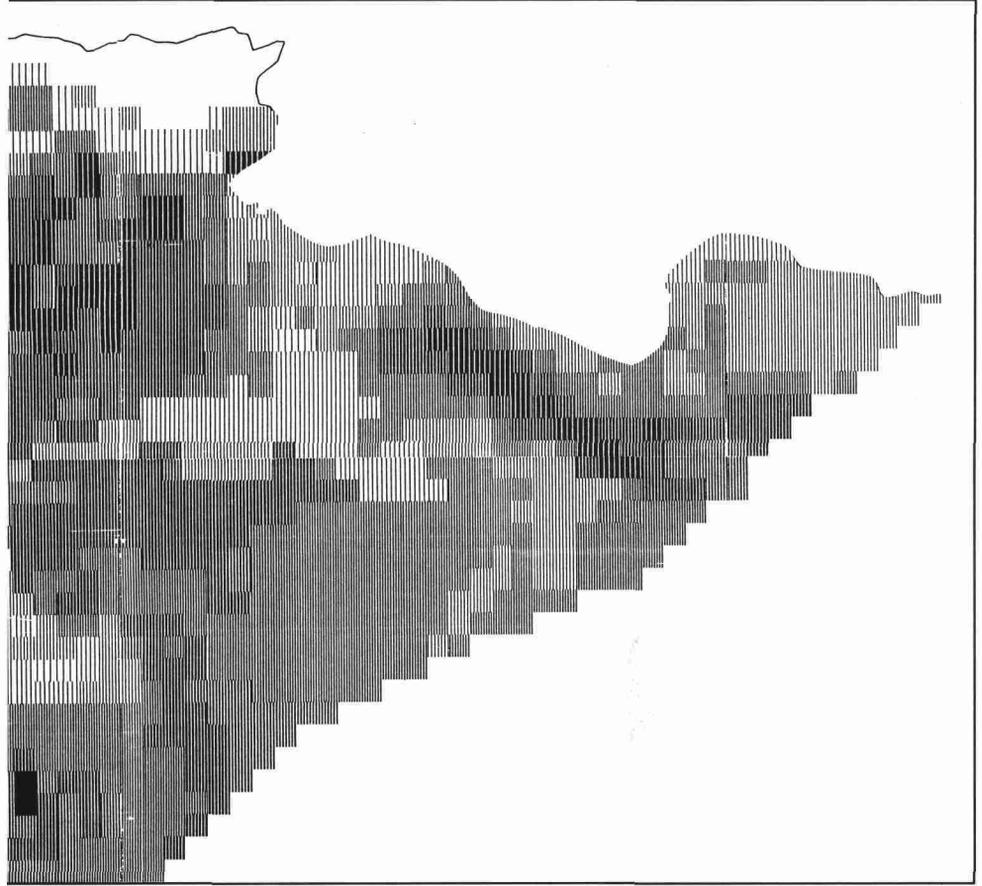


Figure 23. – Classification des zones-sources de poussières entre 1925 et 1950.

vers l'Atlantique. On peut la mettre en relation avec l'étude statistique des expulsions sahariennes sur l'Atlantique oriental faite pour 1979, à partir des images Météosat et Goes-E [3], qui montre leur écrasante prépondérance entre le Cap Blanc et St Louis du Sénégal, précisément au large du domaine le plus productif en poussières du désert.

#### *Les régions les moins productrices de poussières*

Les domaines ayant fourni le moins de poussières entre 1925 et 1950 (niveaux 1, 2 et 3 de la carte) couvrent 23 % de la surface étudiée. Ils se localisent surtout dans la partie septentrionale du document, essentiellement dans les plateaux et massifs montagneux : ancien Sahara espagnol, Massif d'Ifni, Haut Atlas, Atlas tellien et saharien, plateau du Tadémaït. S'y



ajoutent les sites les plus élevés (Hoggar) et plus à l'Est les hamadas de Tinrhert, El Homra et les djebels Sawda et Harudj Aswad.

#### *Les régions de production intermédiaire*

Les plus représentées (60 % de la surface), elles ont dû libérer des quantités moyennes de poussières (niveaux 4, 5 et 6 de la carte). Elles forment une vaste bande Est-Ouest dans le Sahara central seulement interrompue par les massifs montagneux.

*Cette tentative de généralisation, à l'échelle d'une grande partie du Sahara, de l'appréciation de la production de poussières peut déboucher sur une comparaison des deux documents*

qui ont étayé la démarche, carte des substrats potentiels (Fig. 22) et carte des régions effectivement productrices (Fig. 23).

La première évidence tient au caractère moins contrasté de la seconde carte par rapport à la première : il apparaît que la composante «vent de sable» a homogénéisé la production des poussières et gommé nombre de disparités potentielles des substrats. Dans le détail, d'après l'exemple du centre du Sahara occidental, il semble que la potentialité de beaucoup de dépressions hydro-éoliennes et paléolacs soit estompée dans les faits. De même, l'incidence des chotts des hautes plaines algériennes, des grands chotts des confins sahariens algéro-tunisiens et du chapelet de sebkhas frangeant la Grande Syrte paraît en définitive assez limitée. L'ancien Sahara espagnol et la frange littorale du Nord de la Mauritanie, au potentiel apparemment assez propice, sont également de faibles producteurs.

Dans d'autres cas, il y a une bonne adéquation entre l'aptitude potentielle de certains domaines et leur production effective. Ainsi, le potentiel très favorable des sebkhas Mekerrhane et Azzel Matti est très bien exploité. De même, les domaines à faible potentialité de la Hamada du Draa, du Tadémaït, des montagnes du Hoggar et surtout des plateaux du Fezzan et djebels Sawda et Harudj Aswad sont aussi peu fournisseurs de poussières. Les grands ergs et les plaines à voile sableux dont l'aptitude est moyenne à assez bonne montrent aussi une production réelle moyenne à assez bonne.

Enfin, il existe des secteurs où le potentiel favorable ou assez favorable des substrats se traduit par une production très élevée, véritablement exacerbée, de poussières. Tel est le cas de la grande bande Ouest-Est qui va du triangle de la Baie du Lévrier aux paléolacs du Nord du Mali. Les causes de cette «surproduction» sont certainement d'ordre météorologique en relation avec le cortège des dépressions tropicales qui «...se meuvent d'Est en Ouest au voisinage du FIT...» [4].

Il reste à souligner que le document final caractérisant la «géographie» de la production des poussières sahariennes est tributaire, par les données sur les vents de sable, d'une situation déjà ancienne. On peut se demander, en effet, quel serait le dessin d'une carte qui aurait été dressée dans les années 1968-85, pendant la période de la grande sécheresse du Sahel où la zone désertique s'est considérablement étendue. D'une part, le potentiel des sols et substrats des franges du Sahara méridional s'est alors modifié en fonction de la raréfaction du couvert végétal. D'autre part, le phénomène des vents de sable s'y est accru. Certes nos documents cartographiques concernent principalement le Sahara septentrional et central et sa bordure nord où les incidences de la «crise sahélienne» ont été moindres. Il n'empêche que la comparaison de la situation 1925-50 avec une carte récente aurait été fructueuse mais la difficulté qu'il y a à consulter actuellement certaines données météorologiques a interdit de la mener.

La référence à la sécheresse du Sahel et aux modifications qu'elle a induites dans la fréquence des vents de sable pose le problème, aigu aux marges mêmes du désert, de l'équilibre très fragile d'un milieu dont la moindre perturbation peut déclencher le **système poussières**. En effet, une modeste modification bio-climatique suffit à transformer le comportement des substrats et à passer, en ce qui concerne la fourniture des poussières, du domaine du potentiel au domaine du productif. Ceci peut aussi éclairer utilement les recherches sur la dynamique et le dépôt des poussières par le passé sur les marges du désert.

## Bibliographie

- [1] Capot-Rey R. (1953). Le Sahara français. PUF, Paris, 564p.
- [2] Dubief J. (1953). Les vents de sable au Sahara français. XXXV<sup>e</sup> Coll. Intern. du CNRS, Alger 1951, pp. 45-70.
- [3] Oliva P., Coudé-Gaussen G., Rognon P., Dorize L., Tabeaud M., Delannoy H. (1983). Etude de la dynamique des lithométéores sahariens par télédétection spatiale. *Méditerranée*, III : 21-52.
- [4] Dubief J. (1974). Les poussières atmosphériques sahariennes. Quelques caractéristiques. Leurs origines. Comm. Réunion «Caractéristiques physico-chimiques et transport des poussières d'origine africaine», Campistrous 9-12 Sept. 1974, Note IOPG 26, 3p. dactylographiées.

