

B

Les poussières en suspension

5

La particule de poussière

Dans une perspective sédimentologique, le problème des poussières sahariennes actuelles peut s'aborder de deux façons, soit globalement comme un matériel très fin, soit en étudiant comme ici les constituants élémentaires, les particules de poussière.

Le critère fondamental de reconnaissance de la poussière éolienne est la taille infime de sa particule élémentaire. Mais, même à cette échelle, on se heurte à l'obstacle des différences considérables de dimensions qui varient couramment de 10^{-1} à $10^2 \mu\text{m}$ (*Pl. 12*). A ces tailles, les outils privilégiés d'observation et d'identification sont le MEB et l'EDS. Pour les particules grossières ($> 40 \mu\text{m}$), on a parfois procédé à la caractérisation morphométrique par Analyse d'image.

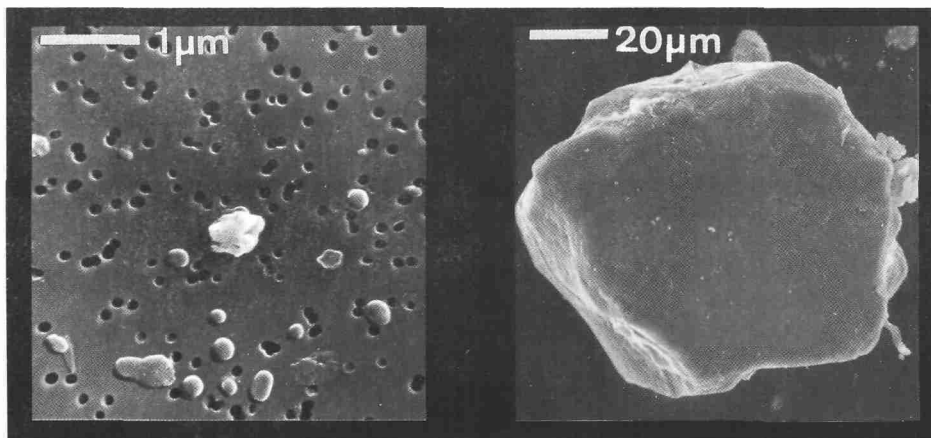


Planche 12. – Micro- et méga-quartz (poussières sahariennes prélevées à Fuerteventura, Canaries).

Les particules fines

Les problèmes de caractérisation

Les particules fines (de la taille argile/limon fin), présentes dans tous les types de poussières sahariennes, ont été étudiées sur les filtres de prélèvement.

Aux échelles micronique à submicronique, les informations chimiques de l'EDS sont souvent insuffisantes pour préciser la minéralogie des particules isolées : quand l'épaisseur de la particule est inférieure à la profondeur de pénétration du faisceau RX, la réponse chimique concerne plus le support (plot métallique ou fragment de filtre collé sur le plot) que la particule; si la largeur du faisceau, supérieure à la particule visée, déborde sur le support, la réponse chimique additionne les compositions de la particule et du support. On est parfois à la limite même des capacités d'analyse de l'EDS.

De plus, même fiables, ces indications chimiques ne permettent pas toujours de trancher sur la composition minéralogique : par exemple pour des particules formées de mélanges argileux complexes; ou pour des particules siliceuses microniques à submicroniques qui, suivant le cas, sont du quartz, de l'opale, de la calcédoine ou des phytolithes. Ainsi, l'identification d'une très petite particule se limite souvent à l'énoncé de ses composants chimiques : (Si) ou (Al, Si, K, Ca, Fe) etc.

La caractérisation micromorphologique de la particule fine est délicate et surtout difficilement généralisable. En effet, des particules de même composition chimique peuvent avoir des aspects très variés. A ces échelles, la forme est peu significative, quelconque sinon aléatoire (*Pl. 13*). Il faut atteindre une taille légèrement plus forte (15-30 μm) pour que la convergence de formes plus expressives et d'une composition chimique non équivoque permette une identification minéralogique satisfaisante.

Au centre de filtres chargés, la concentration et le recouvrement des particules interdisent de les identifier minéralogiquement une à une. L'analyse globale par carte de répartition ($K\alpha$) des éléments chimiques contourne cet inconvénient (*Pl. 14*).

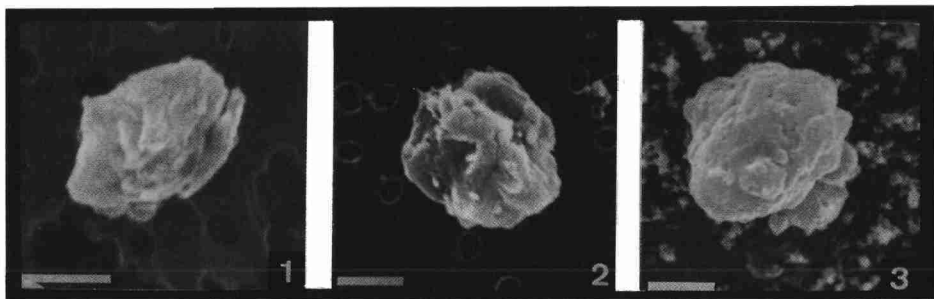


Planche 13. — Les formes quelconques de trois fines particules argileuses (Al, Si, Fe) de poussières sahariennes (Prélèvement: 1) Grand Erg Occidental, 2) Iles Canaries, 3) Paris).

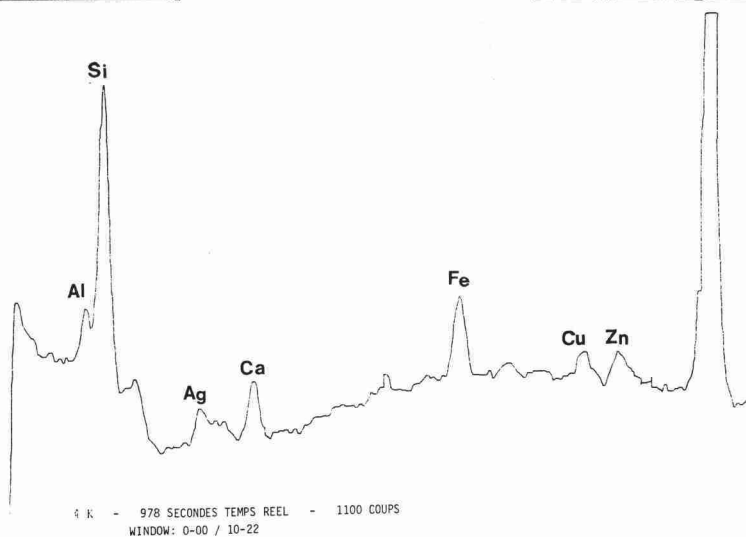
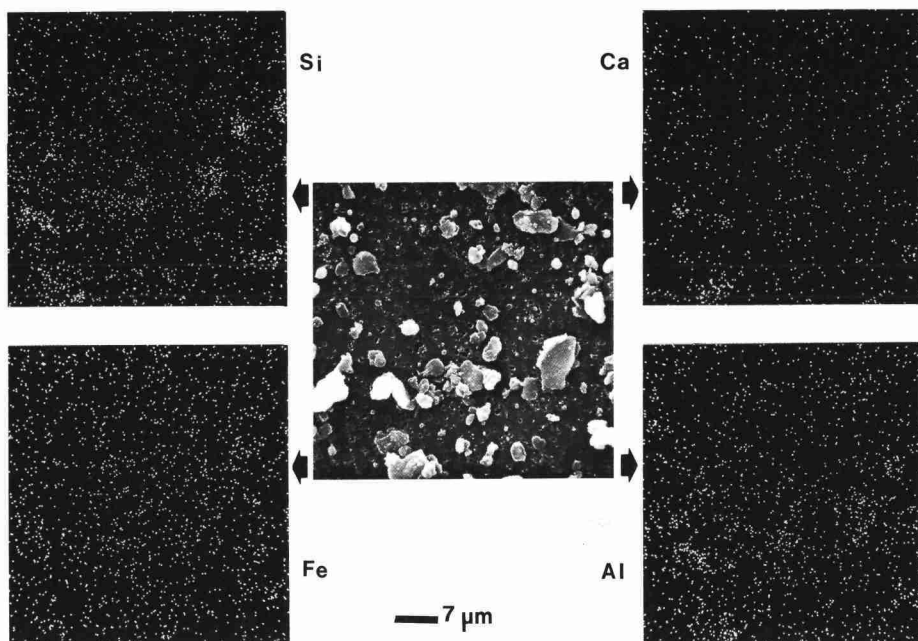


Planche 14. – Cartes de répartition (K α) des principaux éléments chimiques de poussières sur filtre (Grand Erg Occidental) et diffractogramme EDS.

Les caractères des particules fines

Les particules de formes quelconques sont de nature variée. Certaines sont de très petites particules de quartz, esquilleuses ou allongées, le plus souvent trapues et émoussées (Pl. 15-A). Ces dernières sont de surface écailleuse et, vu leur taille, il est difficile d'attribuer cet aspect à une action mécanique. Il faut plutôt envisager une dissolution chimique de la silice, peut-être liée aux gouttes d'eau enrobant les particules lors du rabattement par la pluie (décantation humide). S'y adjoignent d'irrégulières particules minérales : calcite, dolomite, illite/mica, feldspaths alcalins, plagioclases, olivine, pyroxène etc. (Pl. 16-C). Mais les plus nombreuses sont composées de mélanges complexes d'argiles (Si dominant, Al, K, Fe auxquels s'ajoutent parfois Mg, Ca, Ti...) avec une habituelle structure en feuillets (Pl. 15-B).

Les flocons et agrégats en chaînes sont des formes fréquentes parmi les particules fines. Leur texture duveteuse et aérée gêne leur caractérisation chimique et *a fortiori* minéralogique (Pl. 16-A). On y a distingué des mélanges carbonatés, des mélanges siliceux et carbonatés en proportions équivalentes et des mélanges aluminosilicatés, potassiques et ferreux.

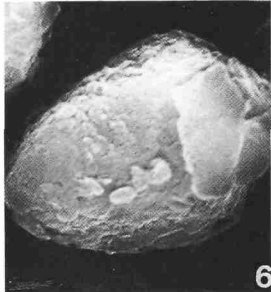
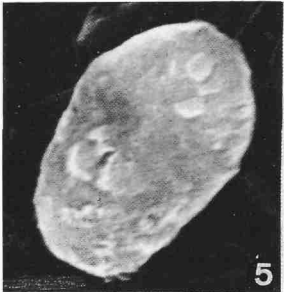
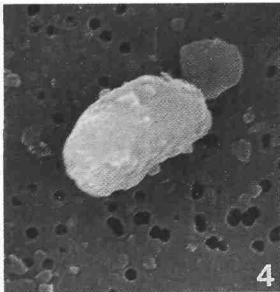
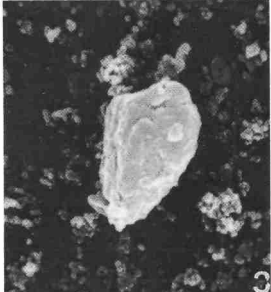
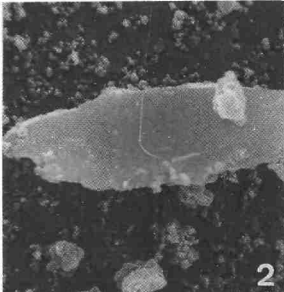
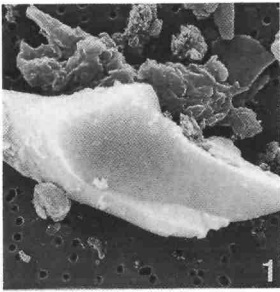
Les particules où apparaît l'organisation cristalline du minéral existent aussi parmi les particules fines. Leur forme, quand elles sont $> 10 \mu\text{m}$, peut évoquer la structure cristalline du minéral, indice ténu se limitant à quelques plans de clivage, à des dispositions en feuillets ou des faces cristallines, pourtant bien utiles à l'identification minérale (Pl. 17). On a ainsi observé des particules carbonatées, navettes altérées de micrite, rhomboèdres et aiguilles de calcite (Pl. 16-B). Il y a aussi des éléments géométriques d'albite, des baguettes de zéolite etc. Une attention particulière doit être portée aux poussières désertiques salées, issues des dépressions salines ou aussi cristallisées au-dessus de l'océan : cristaux souvent agrégés de NaCl, cristallisations d'embruns, chlorures variés, trona etc... Dans des atmosphères désertiques ou marins, les poussières gypseuses sont également communes (Pl. 18-A).

Des particules d'origines diverses sont fréquentes dans les poussières sahariennes. On y voit des particules d'origine biologique, fragments de fibres végétales, de spores, de diatomées et micro-organismes divers, etc. Comme il s'agit souvent de débris, les identifications sont rarement précises. Quand les poussières abordent des domaines urbanisés et industrialisés, elles s'enrichissent aussi d'une pollution anthropogénique par des particules métalliques, suies, cendres ou *fly-ashes* (Pl. 18-B). Il n'est pas rare d'observer des microsphérules météoritiques d'origine cosmique.

Les grosses particules : les grains de quartz

Les particules grossières sont recueillies de façon circonstancielle pendant la tempête désertique ou après leur chute par décantation sèche ou humide sur des surfaces très diverses.

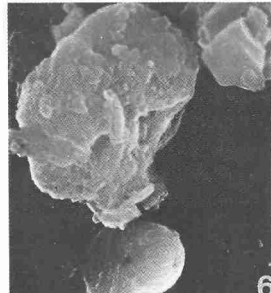
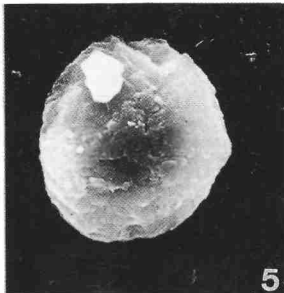
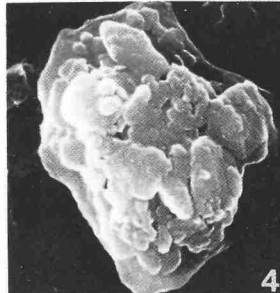
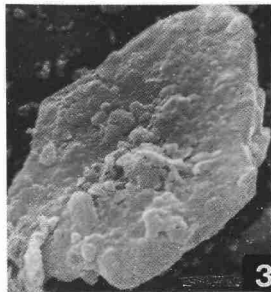
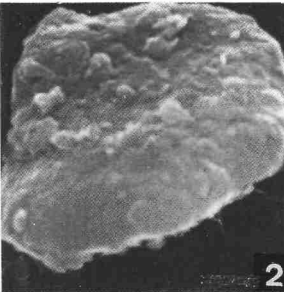
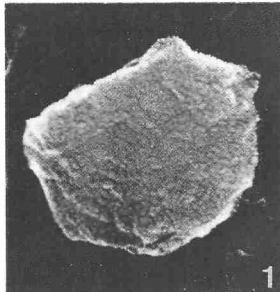
Planche 15. — Les particules fines dans les poussières sahariennes. - A) les grains de quartz : 1) Paris, $e = 3 \mu\text{m}$, 2) Paris, $e = 3 \mu\text{m}$, 3) Paris, $e = 2 \mu\text{m}$, 4) quartz ou phytolite, Paris, $e = 2 \mu\text{m}$, 5) Paris, $e = 1 \mu\text{m}$, 6) Fuerteventura, $e = 1 \mu\text{m}$, B) les grains argileux : 1) Erg Occidental, (Si) Al K Fe, $e = 1 \mu\text{m}$, 2) Erg Occidental, (Si) Mg Al K Ca Fe, $e = 1 \mu\text{m}$, 3) Paris, (Si) Mg Al K Ca Fe, $e = 2 \mu\text{m}$, 4) Paris, (Si) Al K Fe, $e = 2 \mu\text{m}$, 5) Paris, (Si) Al Fe, noter sa forme roulée, $e = 4 \mu\text{m}$, 6) Fuerteventura, (Si) Al K Ca Fe, au centre, $e = 2 \mu\text{m}$.

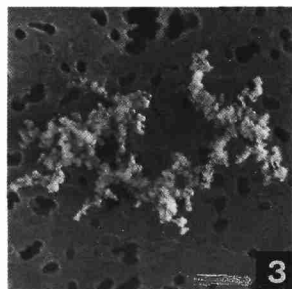
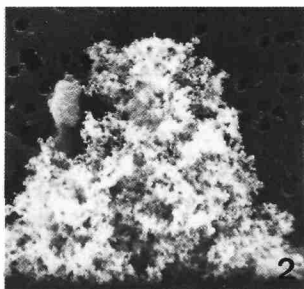
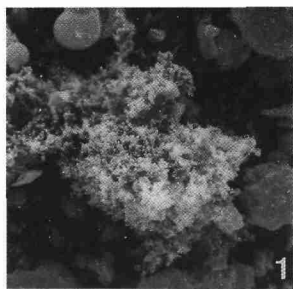


A ▲

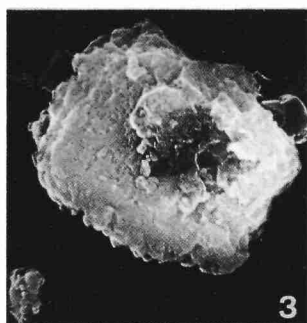
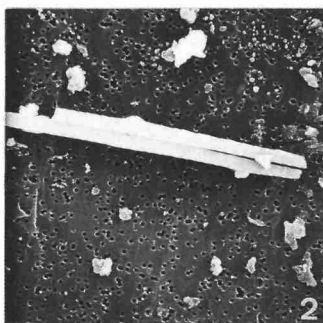
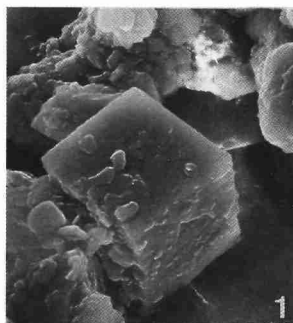
→ e

▼ B



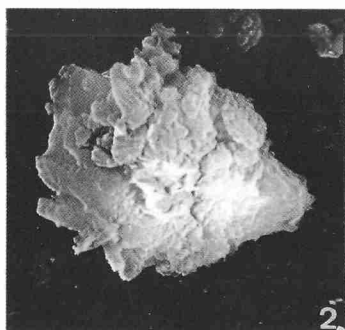
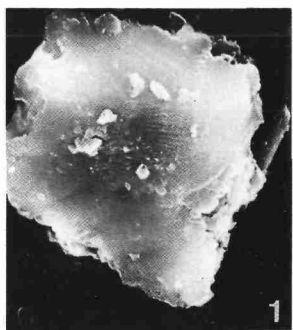


A

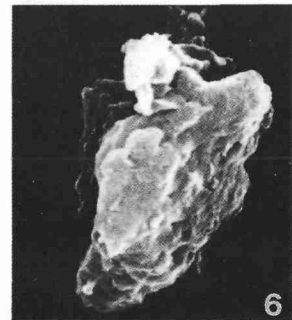
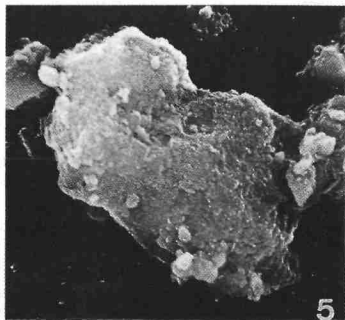
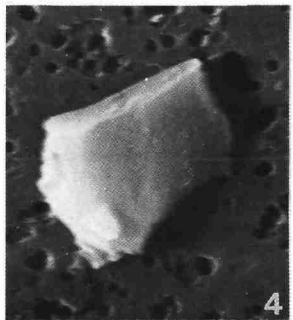


B

— e —



C



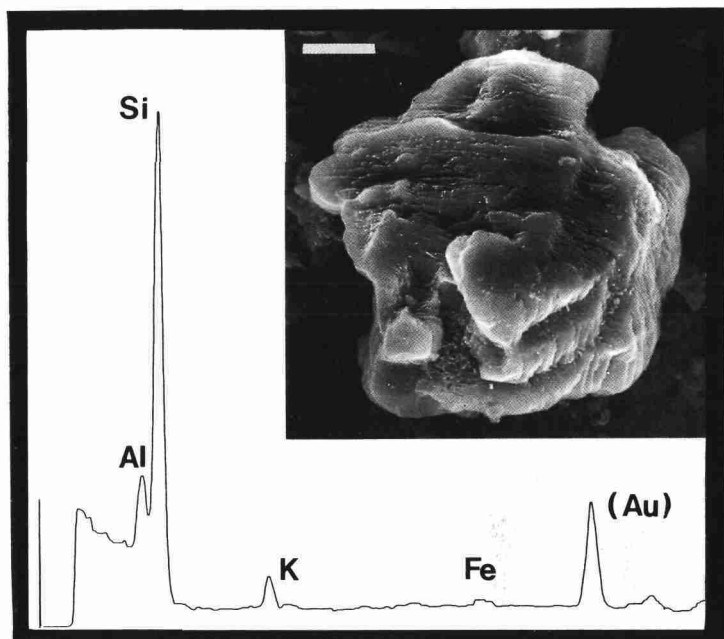
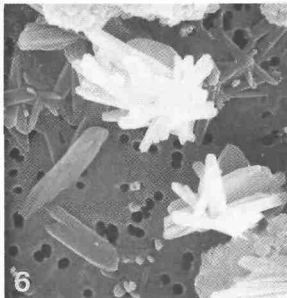
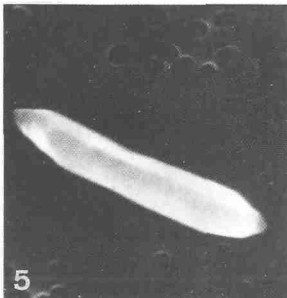
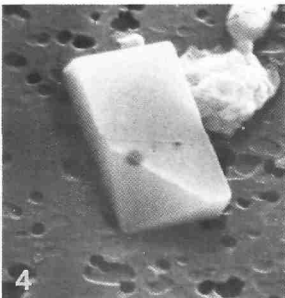
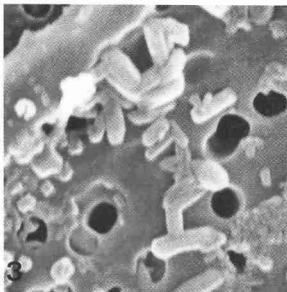
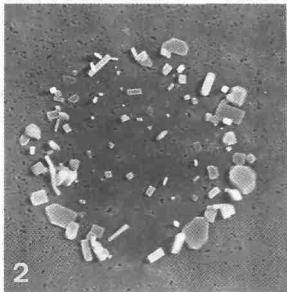
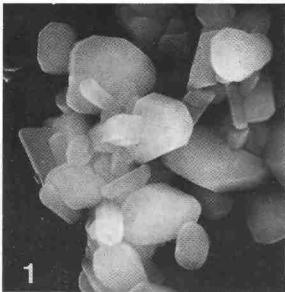


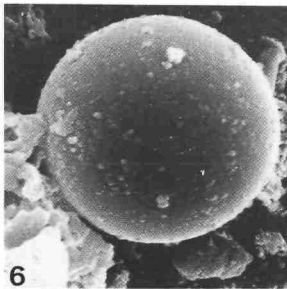
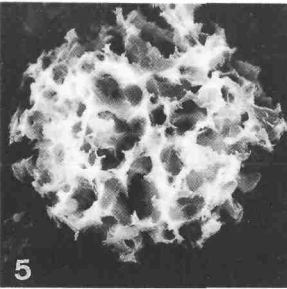
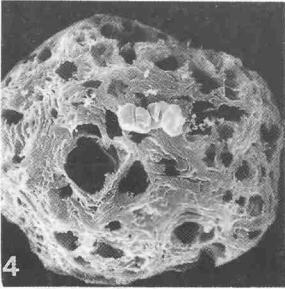
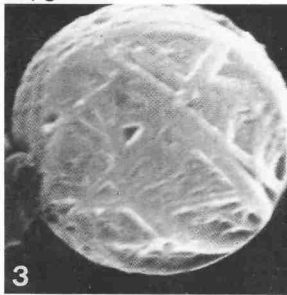
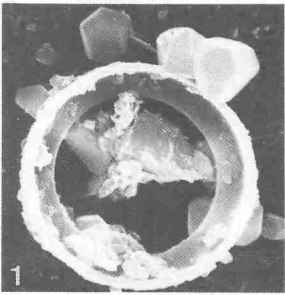
Planche 17. — Particule de feldspath potassique altéré. Noter la mise en valeur du clivage; le pic (Au) est lié à la métallisation du plot à l'or ($e = 10 \mu\text{m}$).

Par ailleurs, lors de prélèvements à la pompe et à l'impacteur, elles se déposent aussi sur l'entonnoir d'entrée où on peut les recueillir. Pouvant dépasser $150 \mu\text{m}$ de diamètre, elles se situent principalement entre 20 et $80 \mu\text{m}$. Ces dimensions autorisent leur manipulation, permettant une étude morphoscopique préalable puis un montage grain à grain sur un plot pour observation au MEB. Vu leur taille, l'identification minéralogique est plus aisée grâce aux données chimiques de l'EDS. Mais, l'intérêt de l'examen au MEB tient principalement dans l'étude des formes et états de surface des particules qui, confirmant parfois l'attribution minéralogique, renseignent avant tout sur l'histoire érosive du grain. Les indications les plus significatives sont apportées par les particules quartzeuses dont les traits micromorphologiques exemplaires ont des implications génétiques souvent applicables aux autres particules minérales.

Planche 16. — Les particules fines dans les poussières sahariennes. - A) les flocons et agrégats en chaîne : 1) flocon, Paris, (Si Al) Fe Ca, $e = 2 \mu\text{m}$, 2) flocon, Fuerteventura, (Al Si Ca) Fe Mg, $e = 2 \mu\text{m}$, 3) agrégats en chaîne, Fuerteventura, $e = 2 \mu\text{m}$. B) les particules de calcite : 1) rhomboèdre, Béni Abbès, $e = 3 \mu\text{m}$, 2) aiguille, Paris, $e = 6 \mu\text{m}$, 3) grain altéré, Fuerteventura, $e = 2 \mu\text{m}$. C) les minéraux divers : 1) dolomite, Fuerteventura, $e = 3 \mu\text{m}$, 2) pyroxène, Paris, $e = 3 \mu\text{m}$, 3) olivine, Fuerteventura, $e = 4 \mu\text{m}$, 4) feldspath potassique, Erg Occidental, $e = 2 \mu\text{m}$, 5) plagioclase, Fuerteventura, $e = 3 \mu\text{m}$, 6) mica, Fuerteventura, $e = 1 \mu\text{m}$.



A



B

Formes et microfaçonnements du grain de quartz

Si l'analyse *exoscopique* de quartz éolisés de taille sableuse (communément $> 400 \mu\text{m}$) a souvent été pratiquée [1,2,3,4,5,6], l'étude au MEB sur ces quartz a été plus rare aux fractions plus fines où se retrouvent pourtant des traits micromorphologiques bien connus. En effet, les formes et microfaçonnements des quartz des poussières sont hérités de leur phase de mobilisation au sol avant à leur mise en suspension.

Les formes des particules quartzеuses

Très diverses, elles se classent en deux grands types : formes *géomorphiques* au sens de Le Ribault [4] et celles résultant d'une évolution érosive.

Les quartz géomorphiques

Les particules géomorphiques ont une morphologie dérivée du quartz de la roche :

— dans un quartz *automorphe*, des caractères cristallins sont conservés ou reconnaissables : quartz bipyramidés (Pl. 19-A/a) ou faces cristallines au recoupement expliquant la rectitude des arêtes (Pl. 19-A/b,c,d); plus rarement quartz volcaniques de forme originelle arrondie (Pl. 19-A/e).

— dans un quartz *xénomorphe*, des formes plus quelconques induisent parfois de mauvaises interprétations : telle topographie attribuée à un impact mécanique peut très bien être une inégalité structurale du grain. A plus forte raison, les quartz déchaussés d'une roche altérée sont délicats à interpréter : de tels quartz *aréniques* (Pl. 19-A/f) empâtés d'argile ont pu aussi connaître une évolution pédologique ou altérologique postérieure à leur déchaussement.

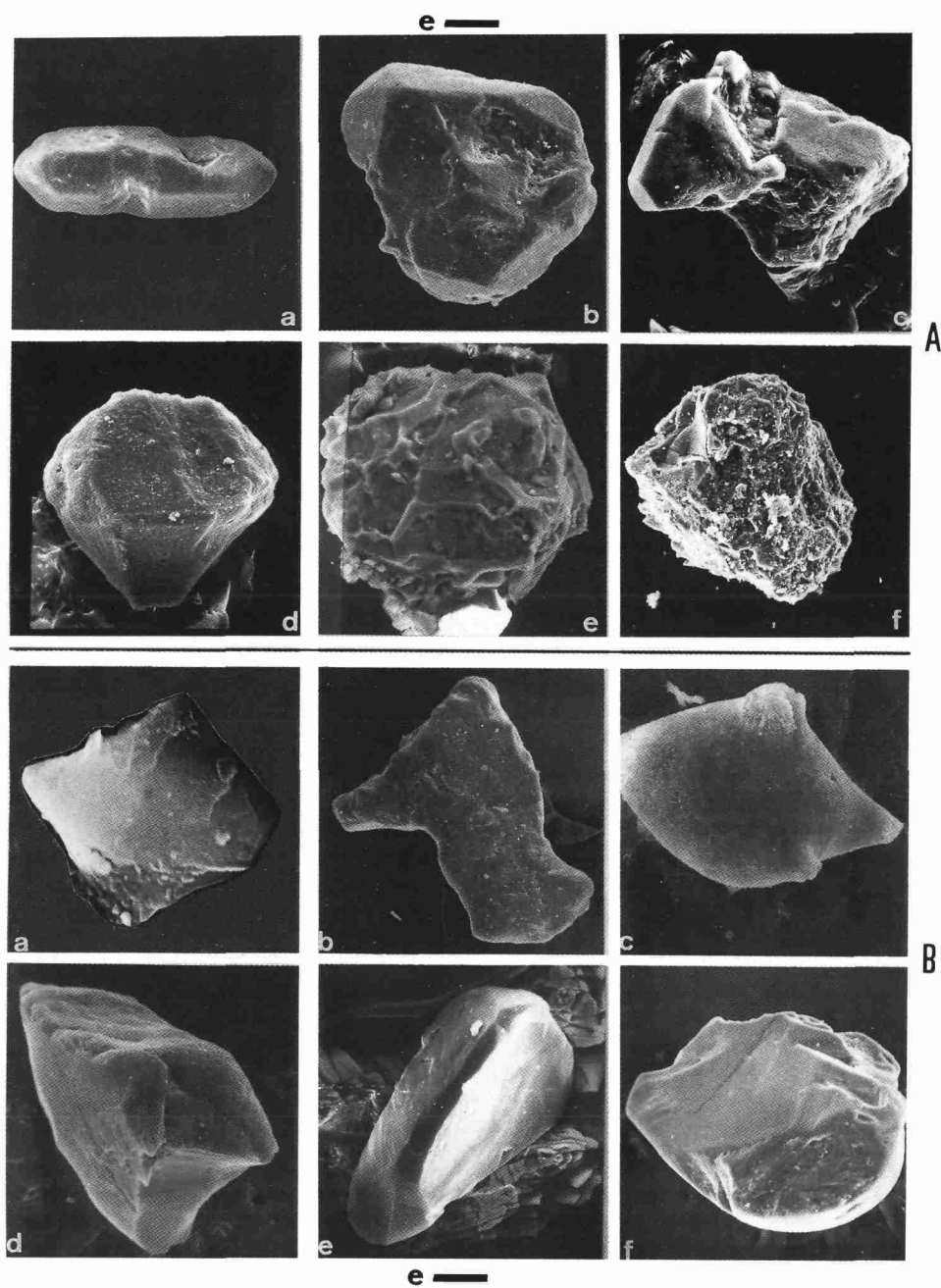
Les quartz fragmentés

Après leur libération, les quartz peuvent être fragmentés par les processus mécaniques éoliens :

— les *ventifacts* issus de la fragmentation d'un quartz (Pl. 19-B/a,b,c) sont des éclats, lamelles, paillettes, *distorts* (petits éclats courbes et allongés issus d'un violent choc latéral sur la particule-mère). De petites dimensions (taille des limons), ils dérivent des impacts subis par les grains en saltation ou de la *corrasion* de la roche par le sable.

— la *division par fragmentation* de gros grains crée aussi de petits grains anguleux (Pl. 19-B/d,e), voire des grains hémisphériques ou apparentés formés par la cassure d'un ancien rondmat désertique (Pl. 19-B/f). Les quartz de forme anguleuse sont fraîchement cassés et ont aussitôt été mis en suspension, sans une phase de roulement/saltation qui les aurait émoussés.

Planche 18. — Les particules fines dans les poussières sahariennes. - A) les sels : 1) NaCl, Fuerteventura, $e = 4 \mu\text{m}$, 2) embrun cristallisé sur filtre, Fuerteventura, $e = 10 \mu\text{m}$, 3) chlorures divers, Fuerteventura, $e = 0,7 \mu\text{m}$, 4) trona, Erg Occidental, le point noir sur le cristal correspond à l'empreinte du faisceau RX, $e = 2 \mu\text{m}$, 5) aiguille de gypse, Fuerteventura, $e = 1 \mu\text{m}$, 6) baguettes de gypse, Fuerteventura, $e = 2 \mu\text{m}$, B) divers : 1) diatomée, Fuerteventura, noter le sel cristallisé sur la particule, $e = 4 \mu\text{m}$, 2) fibre végétale, Fuerteventura, $e = 4 \mu\text{m}$, 3) poussière anthropogénique, Fuerteventura, (Al), $e = 0,6 \mu\text{m}$, 4) particule de suie, Paris, $e = 4 \mu\text{m}$, 5) fly-ash, Paris, $e = 10 \mu\text{m}$, 6) fly-ash, Paris, $e = 2 \mu\text{m}$.



Les quartz érodés

Les quartz sont érodés sur le sol tant que n'est pas atteint le seuil de comminution permettant leur mise en suspension. D'après nos études expérimentales sur les quartz industriels, les arêtes sont d'abord attaquées. Le grain subémoussé a conservé sa forme anguleuse avec des arêtes arasées (Pl. 20-a,b). Un émoussé plus poussé donne des grains *façonnés* encore irréguliers mais aux contours arrondis. Enfin, les grains peuvent devenir plus ou moins sphériques (Pl. 20-c). Toutefois, au-dessous de 150 μm les quartz des poussières sont dans leur majorité des particules subanguleuses.

Les microfaçonnements et états de surface

Les microfaçonnements de l'éolisation de haute énergie

— *des traces de chocs* : dépressions subcirculaires de «grande taille» (1/10 à 1/5 de la surface visible du grain) dues aux violents impacts de front (Pl. 20-d); *cupules de choc* à bords francs (Pl. 20-e), creux irréguliers liés à l'empreinte d'écailles détachées; *traces en croissant* dissymétriques (*coups d'ongle*) issues d'impacts obliques (Pl. 20-f); enfin, petites *traces de choc en V*.

— *des cassures conchoïdales* : planes, courbes ou en escalier.

— *des crêtes sinueuses* : topographies de crêtes subparallèles, un peu sinueuses et dissymétriques (Pl. 20-g), *upturned plates* des anglo-saxons qui les interprètent comme l'exploitation d'un clivage [7]. Classiquement, les quartz sont considérés sans clivage, mais ce point de vue a été discuté [8] : il faut reconnaître que le parallélisme grossier des crêtes et d'autres observations au MEB (microfissuration, cassures conchoïdales, microtopographie chaotique ou *blocky surface* etc.) suggèrent l'incidence d'une contrainte microstructurale au sein des quartz.

La surimposition de générations successives de tels microfaçonnements implique obligatoirement une histoire érosive complexe, longue et polyphasée du grain.

Les états de surface des grains de quartz

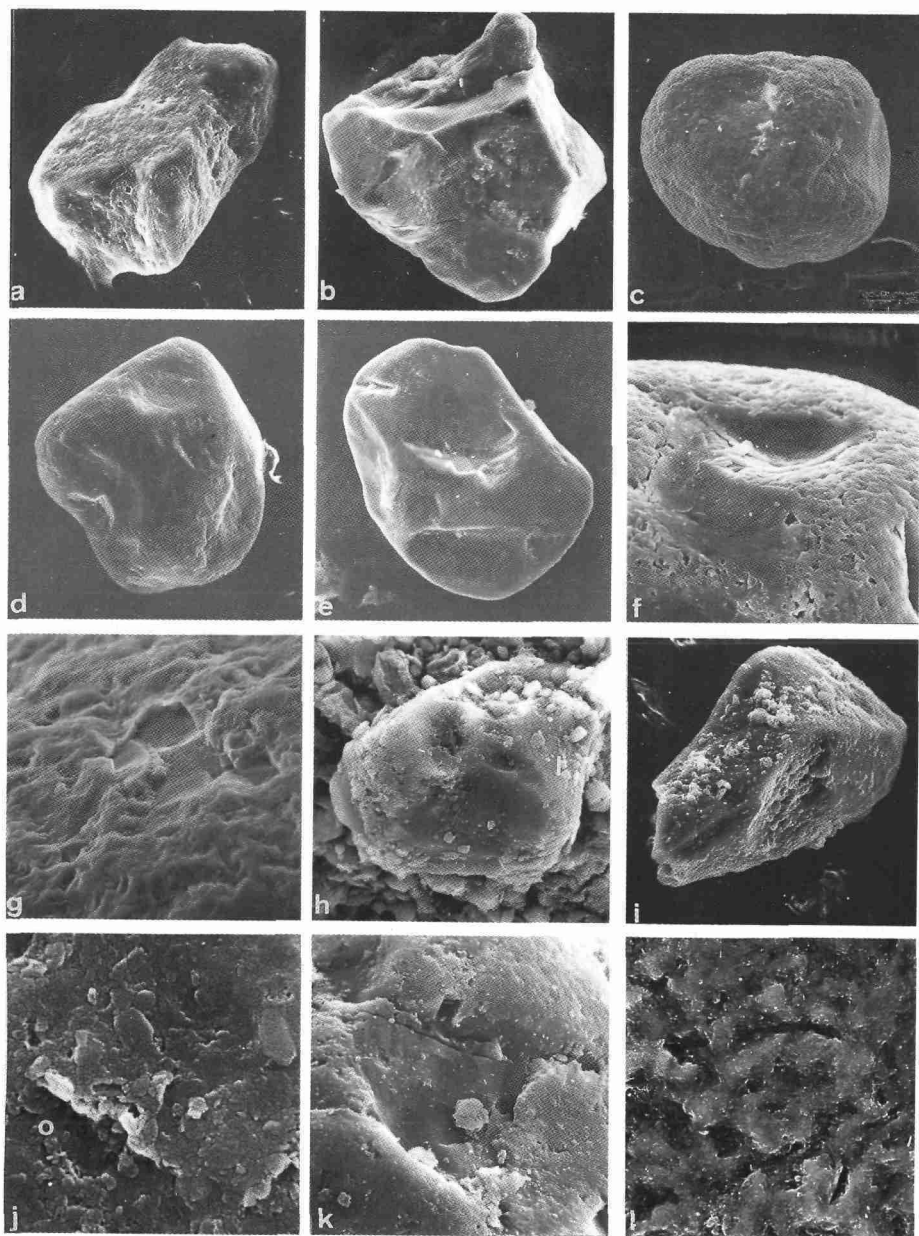
Les quartz des poussières sont rarement «propres». Même les surfaces nettes sont parsemées de petites particules microniques et surtout submicroniques, de composition variée, les *particules adhérentes* (Pl. 20-h,i). De plus, les quartz sont empâtés de revêtements plus ou moins continus.

— *La pellicule siliceuse* :

• *la pellicule écaillée de silice*. A la surface du grain (Pl. 20-j), d'infimes écailles submicroniques à microniques sont formées de la silice résultant de l'amorphisation superficielle du quartz par l'éolisation de haute énergie [4]. Leur microdesquamation est l'une des sources des très fines poussières siliceuses (Pl. 20-k).

• *le gel siliceux*. La couche superficielle du grain, fragile et amorphisée, et la pellicule écaillée peuvent être mises en solution par la rosée désertique riche en CO_2 (Pl. 20-l), le *frosting*

Planche 19. — Les quartz géomorphiques (A) et fragmentés (B) dans les poussières sahariennes. - Les quartz géomorphiques: a) quartz bipyramidé, $e = 50 \mu\text{m}$, b) quartz à faces cristallines, $e = 40 \mu\text{m}$, c) quartz polycristallin à faces, $e = 20 \mu\text{m}$, d) quartz à faces cristallines, $e = 16 \mu\text{m}$, e) quartz volcanique, $e = 20 \mu\text{m}$, f) quartz arénique, $e = 40 \mu\text{m}$. Les quartz fragmentés dans les poussières sahariennes: a) éclat, $e = 5 \mu\text{m}$, b) lamelle, $e = 25 \mu\text{m}$, c) éclat, $e = 10 \mu\text{m}$, d) quartz anguleux, $e = 25 \mu\text{m}$, e) quartz cassé, $e = 25 \mu\text{m}$, f) ancien quartz rond-mat fracturé, $e = 50 \mu\text{m}$.



(glaçage) des anglo-saxons, terme équivoque car la cryoclastie n'a rien à voir ici... Cette silice nappe le grain d'un film, de larmes et coulées empâtant les microfaçonnements (Pl. 21-A).

— *La pellicule et dépôts argileux* : Le quartz est parfois voilé de particules d'argiles, prises en charge au sol et compactées par roulement/saltation. D'après l'EDS, c'est un mélange aluminosilicaté ferreux, parfois potassique, où Mg et Ti peuvent apparaître. Ces argiles contaminent souvent la pellicule amorphisée, la transformant en un épais revêtement (*coating*). Leur coloration par un Fe abondant explique la rubéfaction des quartz désertiques et, dans les caries et creux superficiels, des dépôts argileux de même nature forment des *points rouges*, ce qui a été décrit sur les grains de la «pellicule rousse» au Nord de l'Erg Occidental et dans les grains de loess des Matmata (Pl. 22).

— *Les formes d'agression chimique* : Le processus chimique dissolution/précipitation mobilise et redistribue la silice superficielle amorphisée. Son départ peut se traduire par des figures de dissolution. De plus, le séjour éventuel du grain dans un milieu hydrique, pédologique etc. agresseur a pu provoquer une attaque chimique quelquefois telle que le quartz est profondément taradé. Les plus courantes formes d'agression chimique sont des «V» ou *triangles de dissolution* (Pl. 21-B) guidés par la structure cristalline.

L'étude morphométrique des quartz par AFC

La comparaison de divers échantillons de poussières

Des particules de poussières désertiques prélevées à Sde Boquer dans le Negev (117 particules), dans le Tanezrouft (132) et au Nord du Grand Erg Occidental par impacteur (27) ont été soumises à l'Analyse d'images pour caractériser leur morphométrie. Après saisie sous Multiplan, les paramètres de formes et de tailles ont été traités par Analyse factorielle des correspondances.

Les 7 premiers axes fournissent 53 % de l'information et 21 % pour les 2 premiers. Cinq groupes de particules ont été mis en évidence par l'AFC :

— *groupe 1* : particules $\leq 80 \mu\text{m}$ (RAY1, PER1, SUR1), les plus régulières (IRR6), sur l'axe I+

— *groupe 2* : particules de $80\text{-}100 \mu\text{m}$ (RAY2, PER2, SUR2) parfois moyennement circulaires et régulières (CIR3, IRR3) sur l'axe III-

— *groupe 3* : particules de $100\text{-}120 \mu\text{m}$ (SUR3), les moins régulières et les moins circulaires et les plus allongées (IRR1, CIR1, ELO6) sur l'axe V-

— *groupe 4* : particules de $120\text{-}140 \mu\text{m}$ (RAY4, PER4, SUR4) de bonne régularité (IRR5), accessoirement les plus circulaires (CIR6) sur les axes II+ et VI+

— *groupe 5* : particules $> 160 \mu\text{m}$ (RAY6, PER6, SUR6), accessoirement assez peu allongées (ELO3) et assez régulières (IRR4) sur les axes I- et VII-.

Planche 20. — Les formes et états de surface des quartz dans les poussières sahariennes. a) quartz subanguleux, $e = 40 \mu\text{m}$, b) quartz subanguleux, $e = 35 \mu\text{m}$, c) rond-mat, $e = 40 \mu\text{m}$, d) dépression de choc éolien, $e = 40 \mu\text{m}$, e) cupule de choc, $e = 35 \mu\text{m}$, f) coup d'ongle éolien, polissage hydrique ultérieur, $e = 7 \mu\text{m}$, g) crêtes sinuées et impact à bord franc, $e = 2 \mu\text{m}$, h) quartz « sale », particules adhérentes, début d'intégration des particules à la pellicule de surface, $e = 10 \mu\text{m}$, i) quartz « sale », particules adhérentes, $e = 10 \mu\text{m}$, j) pellicule écaillée de silice, $e = 2 \mu\text{m}$, k) pellicule de silice amorphisée sur les bords d'une empreinte de choc, $e = 2 \mu\text{m}$, l) gel siliceux, « frosting », $e = 7 \mu\text{m}$.

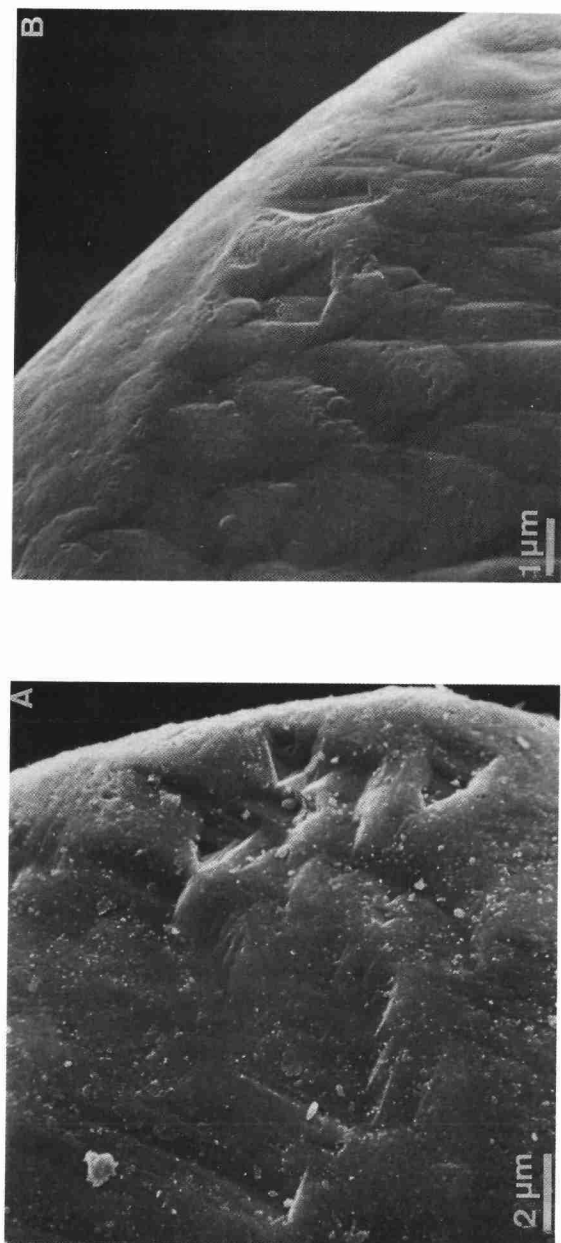


Planche 21. – Les états de surface d'origine chimique. A) précipitation de silice en lames, B) triangles de dissolution.

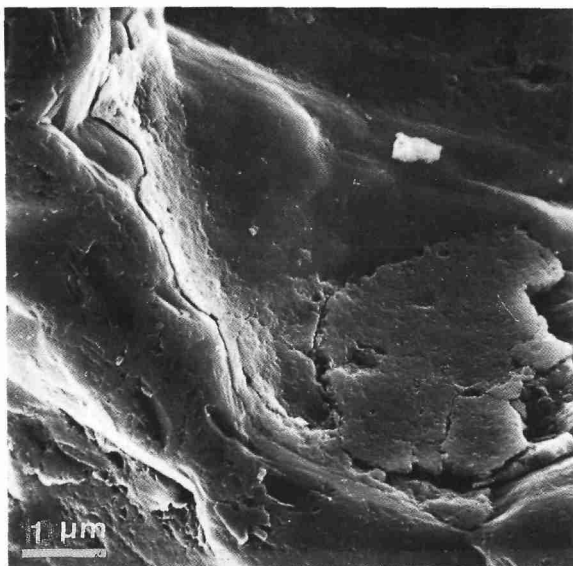


Planche 22. — Un dépôt argileux piégé dans une dépression d'un quartz.

D'après ces résultats de l'AFC et compte-tenu des expériences précédentes en *wind-tunnel*, se dégagent quelques hypothèses génétiques sur ces divers groupes de grains. Le groupe 4 correspond à des sables fins/moyens *très bien roulés*. Le groupe 1 est formé de grains très fins *bien façonnés* ayant atteint par comminution le seuil optimum de mobilisation (*valeur critique* de Bagnold [9]) et de mise en suspension par le vent. Le groupe 3 montre des formes allongées, irrégulières, très peu circulaires, à des tailles suggérant des *esquilles et fragments anguleux de quartz* résultant de la destruction de gros grains par saltation. Le groupe 5 indique des particules grossières et peu façonnées, sans doute des *quartz aréniques* récemment déchaussés. Enfin, le groupe 2, le plus difficile à interpréter vu ses traits peu explicites, peut contenir d'anciens éléments du groupe 3 que l'abrasion aurait *réduits et façonnés*, sans atteindre l'émoussé des petits grains du groupe 1.

Un autre enseignement touche à la répartition des particules dans les groupes : 3/4 des poussières de l'Erg Occidental sont $< 120 \mu\text{m}$; 2/3 des poussières du Tanezrouft sont entre 80 et $140 \mu\text{m}$ avec très peu de particules du groupe 1. Au contraire, les poussières du Negev sont plus dispersées avec 2 maximums pour les groupes 1(20 %) et 5 (31 %). Dans le détail, les poussières du Nord du Grand Erg Occidental doivent leur relative finesse aux conditions mêmes de leur prélèvement, par *temps calme*. En revanche, celles du Tanezrouft ont été re-

cueillies pendant une *tempête désertique* d'où la mobilisation de particules plus grossières (28 % de sables façonnés du groupe 3 et 15 % de grosses particules du groupe 5). La dispersion morphométrique des grains de Sde Boquer peut s'expliquer par les conditions de *décantation humide* qui ont indifféremment rabattu des particules de tailles variées.

La comparaison des quartz blancs translucides et des quartz orangés

On a soumis à analyse d'images puis analyse factorielle des correspondances (*Tableau XIII*) des quartz blancs translucides et des quartz orangés provenant des poussières de Sde Boquer (45 blancs, 72 orangés), du Tanezrouft (71 blancs, 61 orangés) et, à titre de comparaison, des grains de la pellicule rousse (SA 41) du Grand Erg Occidental (70 blancs, 65 orangés) et des grains de sable (ATU 05) du Grand Erg Oriental (43 blancs, 44 orangés) contigus des premiers loess des Matmata.

Tableau XIII. – Moyenne et écart-type des paramètres morphométriques de grains de quartz obtenus par analyse d'images.

A) Quartz blancs translucides de poussières et de sédiments de comparaison.

B) Quartz orangés de poussières et de sédiments de comparaison.

A) Quartz blancs		Pouss. Sde Boquer	Pouss. Tanezrouft	Pell. Rousse Gd Erg W	Sables Gd Erg E
SUR	$\bar{X}_{\mu m^2}$	38 800	21 800	25 900	26 900
	σ	15 200	7 100	11 800	9 400
PER	$\bar{X}_{\mu m}$	664	560	597	610
	σ	229	105	137	176
IRR	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	0,970	0,976	0,973	0,957
		0,016	0,021	0,030	0,040
RAY	$\bar{X}_{\mu m}$	49	72	70	75
	σ	38	15	23	17
CIR	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	0,823	0,830	0,830	0,793
		0,060	0,060	0,080	0,110
ELO	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	1,27	1,30	1,31	1,25
		0,18	0,20	0,19	0,21
B) Quartz orangés		Pouss. Sde Boquer	Pouss. Tanezrouft	Pell. Rousse Gd Erg W	Sables Matmata
SUR	$\bar{X}_{\mu m^2}$	16 800	23 000	26 600	24 000
	σ	9 500	7 800	9 700	7 900
PER	$\bar{X}_{\mu m}$	470	580	625	622
	σ	146	105	123	158
IRR	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	0,984	0,979	0,976	0,939
		0,020	0,010	0,020	0,050
RAY	$\bar{X}_{\mu m^2}$	59	73	71	71
	σ	18	17	23	14
CIR	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	0,844	0,836	0,836	0,740
		0,090	0,060	0,050	0,140
ELO	$\frac{\bar{X}}{\sigma}$	1,32	1,26	1,29	1,30
		0,27	0,20	0,17	0,21

Pour Sde Boqer, les quartz blancs ont une surface plus de 2 fois supérieure à celle des quartz orangés, avec un fort écart-type montrant leur hétérogénéité. Globalement, les premiers sont aussi moins réguliers et moins circulaires que les seconds, suggérant qu'il y a dans l'échantillon 2 stocks de genèse différente : les quartz blancs semblent des quartz aréniques, peu éolisés à la différence des quartz orangés. Le contraste est moindre dans l'échantillon du Tanezrouft où les quartz blancs sont pourtant un peu plus petits, moins circulaires, plus allongés et irréguliers que les quartz orangés : les quartz orangés ont sans doute une longue histoire désertique et les quartz blancs, d'extraction plus récente, ont moins voyagé...

Les informations tirées des grains de la pellicule rousse et de la poussière du Tanezrouft sont un peu comparables. Dans la première, les quartz orangés sont un peu plus petits, circulaires, réguliers et un peu moins allongés que les quartz blancs, en accord avec l'idée d'une histoire plus longue. En revanche, les sables des marges du Grand Erg Oriental ont des traits morphométriques différents : les quartz orangés plus petits et plus réguliers que les blancs sont moins circulaires et plus allongés. On peut y voir l'incidence d'une fragmentation par saltation liée à une moindre résistance des quartz orangés, affaiblis sans doute par leurs caries et altérations. Ces particularités morphométriques annoncent les traits des quartz des loess des Matmata, eux-aussi, irréguliers.

Enfin, on peut insister sur la différence entre les poussières de Sde Boqer, mélange de 2 stocks, et celles du Tanezrouft au contraire bien homogénéisées. Par ailleurs, vu l'éloignement des sites, la parenté morphométrique de la poussière du Tanezrouft et de la pellicule rousse est remarquable : on entrevoit ainsi quelle doit être l'homogénéité granulométrique et morphométrique (surtout dans les quartz orangés) des voiles sableux sur tout le Sahara car ce sont eux qui, soulevés par la tempête désertique, ont alimenté la fraction grossière de la poussière au Tanezrouft.

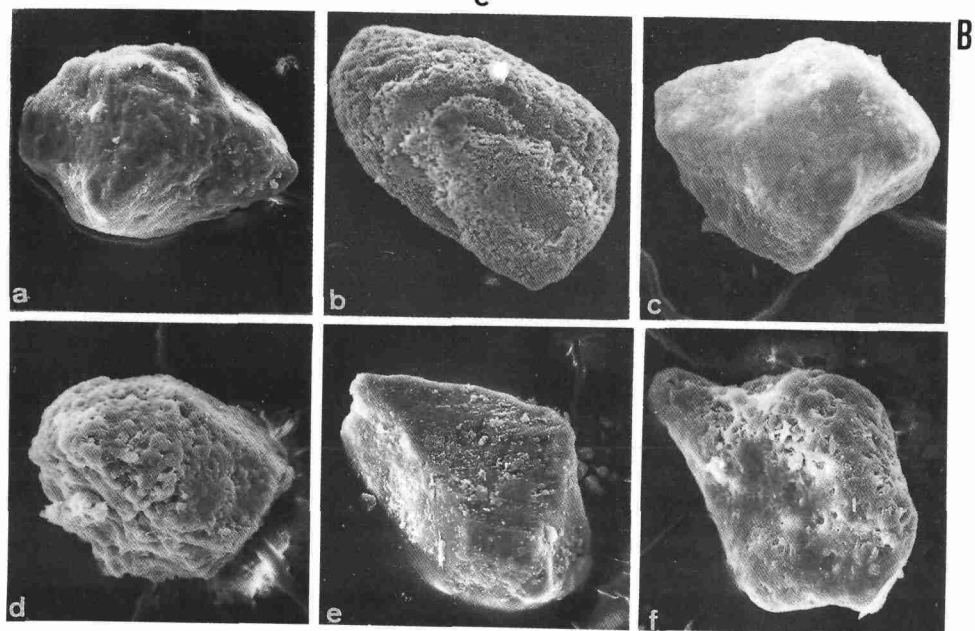
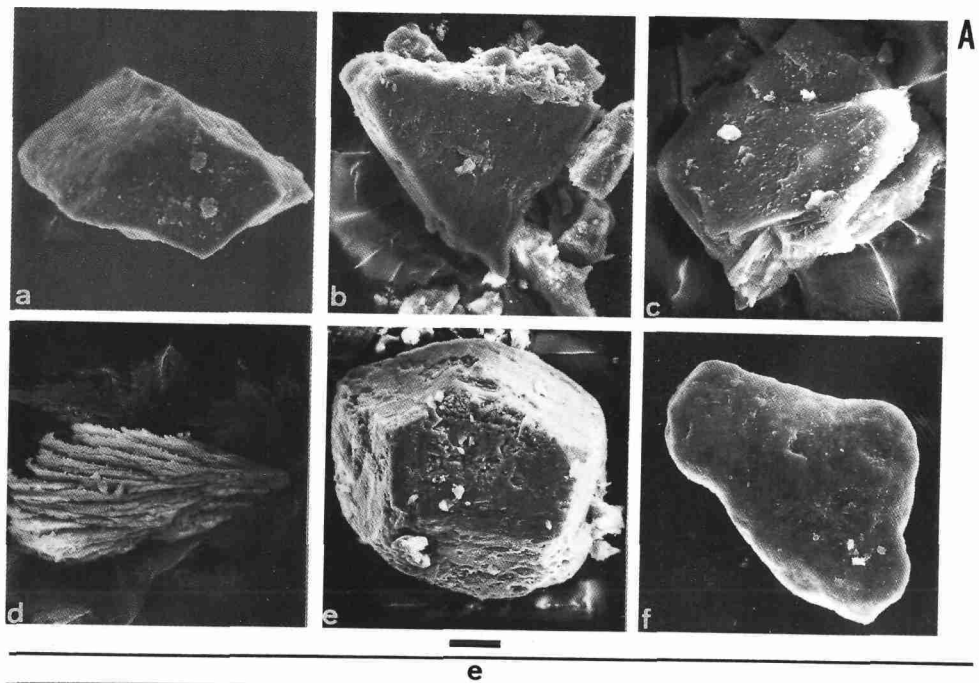
Les autres grosses particules

Les particules minérales résistantes

Les dynamiques éoliennes de haute énergie ont imprimé sur des grains divers un modèle plus ou moins évolué, mais toujours significatif d'une action érosive. Sur les minéraux du socle ou du volcanisme, les microfaçonnements sont comparables à ceux des quartz. Les données microstructurales (faces cristallines, clivages, microfissuration etc.) sont mises en valeur (Pl. 23-A).

Les grains de feldspaths (Pl. 23-B), d'amphibole, d'apatite sont façonnés avec des traces de choc. Les grains de carbonates (Pl. 24), de phosphates de calcium, d'oxydes de fer, moins résistants du fait d'une structure agrégative, ont atteint lors de la mobilisation initiale au sol un degré poussé d'émoussé.

Des formes particulières liées à certaines espèces minérales s'avèrent favorables au transport en suspension. Ainsi des disques de micas, aux bords rebroussés et écrasés par les chocs éoliens, ont une forme très *portante* expliquant leur occurrence à de grandes tailles (200-300 μm) au



sein de poussières parfois lointaines, en dépit de leur densité élevée (Pl. 25-A). Le gypse en paillettes a le même comportement mais ses particules grossières ont été en général arrondies par roulement/saltation (Pl. 25-B).

Les grains argileux

Les grains d'argiles non fibreuses

D'après l'examen morphoscopique de poussières de provenance variée, les granules argileux sont diversement colorés : blancs, blancs à points noirs, gris, roses, orangés, mordorés et rarement noirs. Ces changements de couleur ne se traduisant pas à l'EDS par de notables différences minéralogiques doivent s'expliquer par des variations dans l'état du fer contenu. Les formes sont analogues à celles des autres minéraux. Les particules plus fragiles, au matériel peu consolidé et friable sous le stylet, ont des formes quelconques. En revanche, des grains arrondis plus cohérents sont visibles en morphoscopie.

L'examen au MEB confirme ces observations et oppose des particules à structure lâche et de formes quelconques, à des grains aux émousés remarquables mais souvent un peu allongés (Pl. 26). Les premières sont constituées d'un agrégat de petites particules argileuses élémentaires, alors que la surface homogène des autres révèle, à fort grossissement, un tassement superficiel des particules argileuses souvent déformées et sans porosité interstitielle. Les informations chimiques de l'EDS impliquent des compositions où Si domine, parfois accompagné en combinaisons variées par Mg, Al, K, Ca, Fe et Ti. Cependant les plus fréquentes sont Al, Si, Fe et Al, Si, K, Fe.

Les grains de palygorskite

La palygorskite, minéral commun dans les poussières sahariennes, y apparaît sous trois états :

— comme *poussière fine*, particules fibreuses isolées ou peu nombreuses de dimensions submicroniques à microniques

— comme *revêtement* de grains «porteurs», en épaisse pellicule argileuse sur des micas, quartz, carbonates de Ca ou feldspaths, avec des fibres bien identifiables

— comme *grains éolisés* comparables aux autres grains argileux décrits ci-dessus, état remarquable par la constance de ses caractères physionomiques et micromorphologiques, non seulement dans les poussières actuelles, mais aussi dans nombre de sédiments désertiques ou péri-désertiques plus ou moins enrichis par les poussières [10]. L'étude de l'Erg Ine Koussamène a déjà informé sur le façonnement au sol de tels grains, jusqu'à leur mise en suspension sous forme de poussières.

Planche 23. – Les minéraux résistants dans les poussières sahariennes. (A) Les minéraux du socle et du volcanisme: a) pyroxène, $e = 40\ \mu\text{m}$ b) olivine, $e = 40\ \mu\text{m}$, c) chlorite, $e = 15\ \mu\text{m}$, d) paillette d'or, $e = 10\ \mu\text{m}$, e) particule de fer, $e = 20\ \mu\text{m}$, f) pyrite, $e = 30\ \mu\text{m}$. - (B) Les feldspaths potassiques : a) et b) $e = 40\ \mu\text{m}$, c) et d) $e = 25\ \mu\text{m}$, e) et f) $e = 20\ \mu\text{m}$.

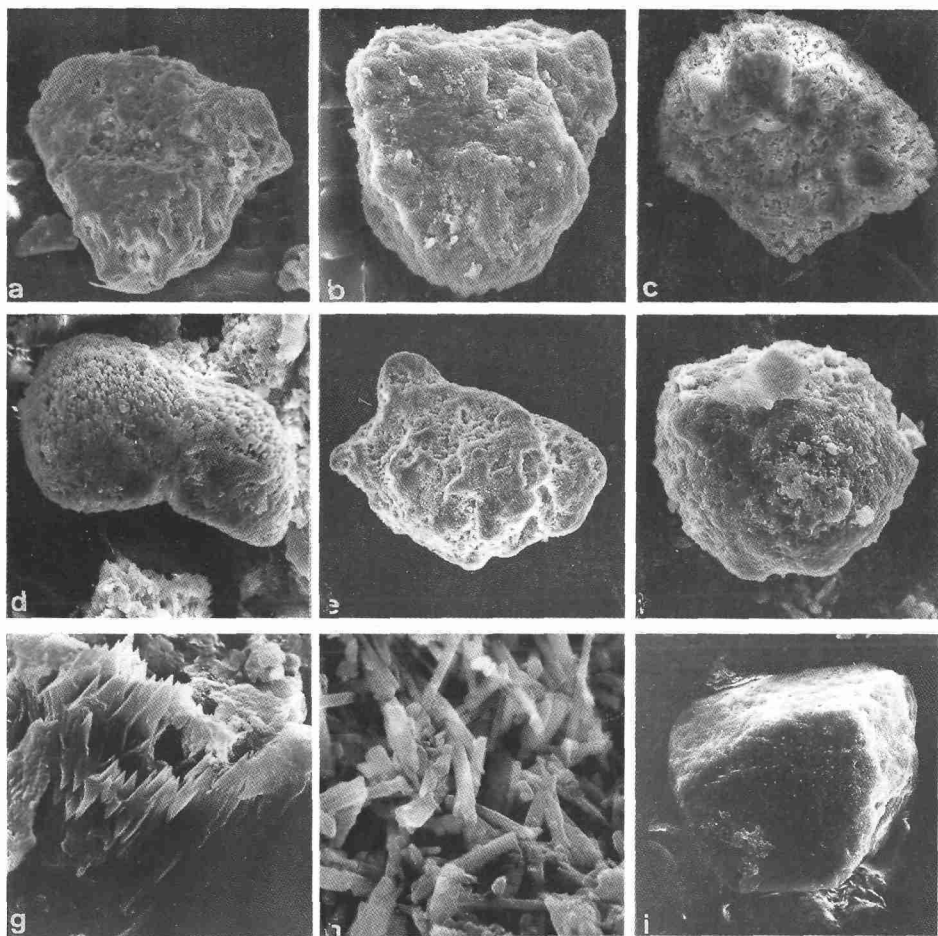
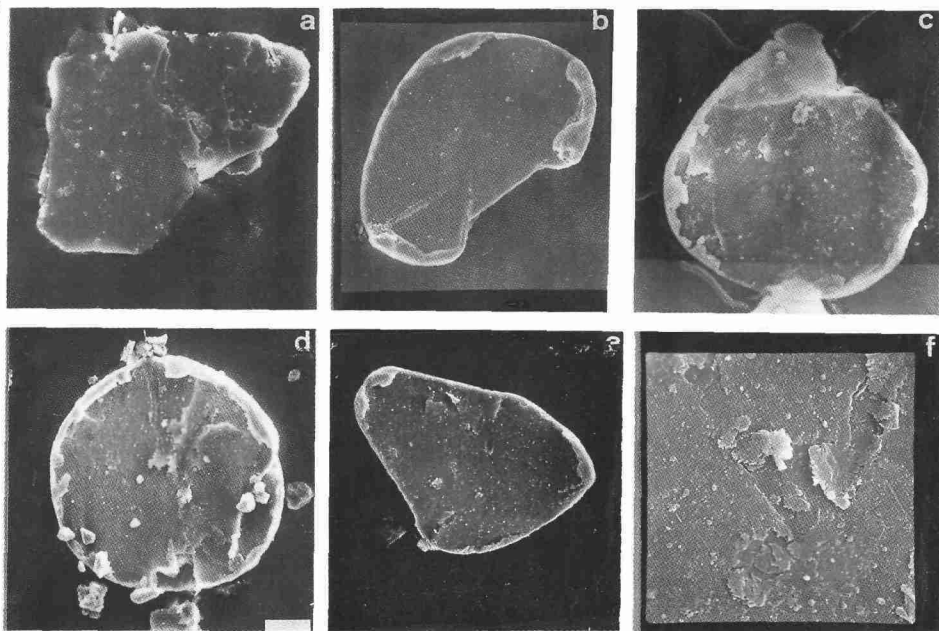


Planche 24. – Les particules carbonatées dans les poussières sahariennes. - Les carbonates de Ca : a) $e = 30\ \mu\text{m}$, b) $e = 20\ \mu\text{m}$, c) $e = 20\ \mu\text{m}$, d) $e = 25\ \mu\text{m}$, e) $e = 45\ \mu\text{m}$, f) $e = 20\ \mu\text{m}$, g) détail de d, noter l'agression chimique de la calcite, $e = 8\ \mu\text{m}$ h) détail de e, calcite fibreuse, $e = 2\ \mu\text{m}$. Un carbonate de Ca et Mg : i) une dolomie, $e = 45\ \mu\text{m}$.

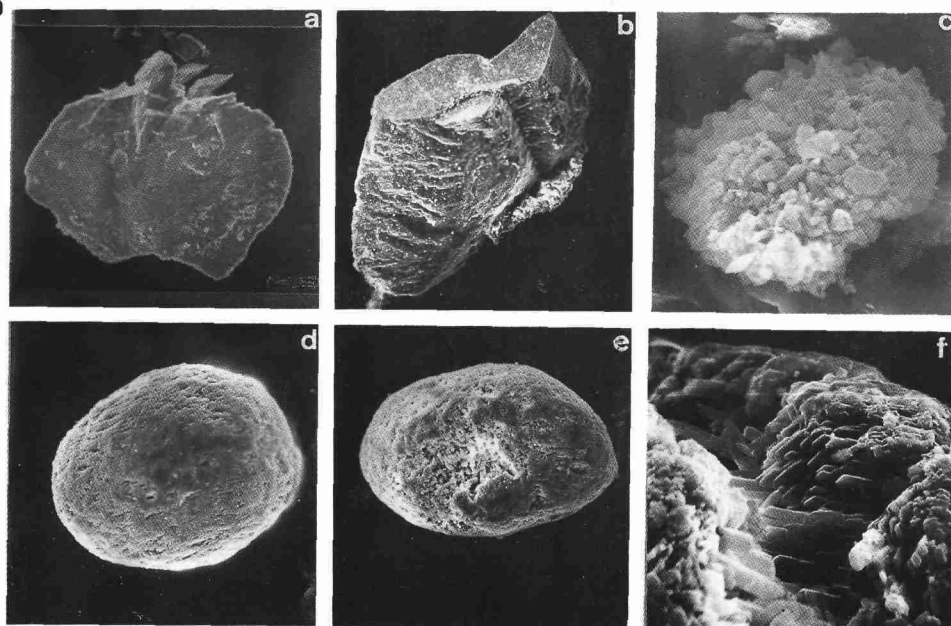
Planche 25. – Les micas et les gypses dans les poussières sahariennes. - (A) Les micas : a), b), c), d) et e) $e = 25\ \mu\text{m}$, f) détail de e, l'artéfact (glissement de l'aiguille lors du montage de la particule sur le plot) montre la fragilité superficielle du minéral, $e = 7\ \mu\text{m}$. (B) Les gypses : a) paillette, noter la forme « portante », $e = 45\ \mu\text{m}$, b) grain subanguleux, $e = 40\ \mu\text{m}$, c) agrégat arrondi, $e = 7\ \mu\text{m}$, d) grain roulé, $e = 40\ \mu\text{m}$, e) grain roulé, $e = 40\ \mu\text{m}$, f) détail du précédent, structure interne en baguettes et abrasion superficielle, $e = 7\ \mu\text{m}$.

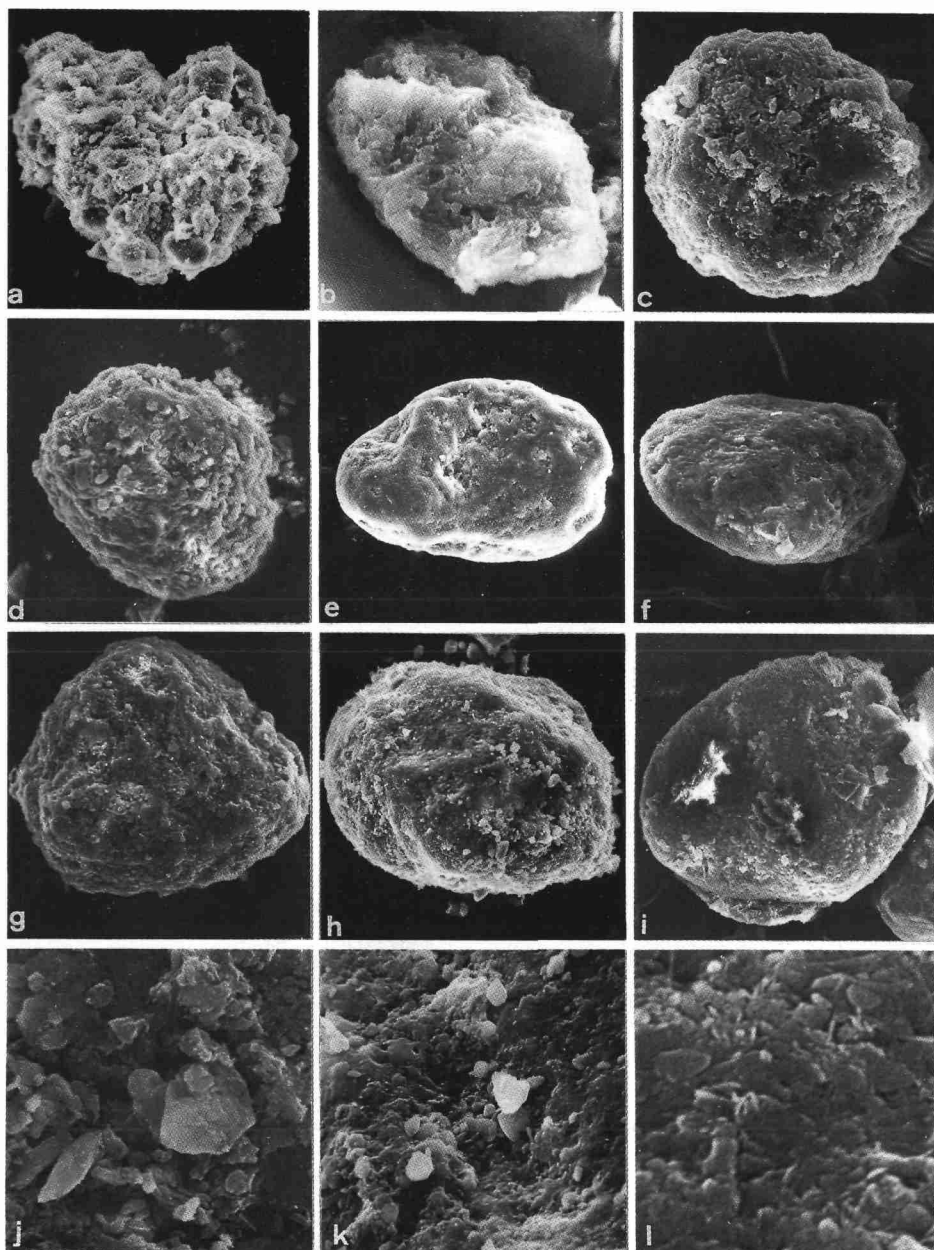
A



e —

B





La morphologie des grains éolisés

Une étude micromorphologique a concerné plus de 150 grains de palygorskite issus de poussières éoliennes et de sédiments péri-désertiques étudiés pour comparaison (*Pl. 27*). D'après leur indice d'éroussé mesuré sur clichés MEB, ces grains ont un façonnement éolien typique où l'éroussé (2 r/L) est croissant en fonction de la taille : par exemple des grains prélevés aux Canaries (86 μm de diamètre moyen) ont un éroussé de 0,124 et des grains prélevés au Tanezrouft (180 μm) ont un indice de 0,308.

Les différences de structure à l'intérieur et à la surface des grains

À l'examen morphoscopique, les grains de palygorskite, de couleur claire, ont un aspect souvent poudreux ou duveteux, mais lissé et brillant à la loupe pour les grains les plus arrondis. Ils sont totalement composés de fibres comme l'ont montré au MEB ceux qui furent cassés lors du montage sur le plot (*Pl. 28*). Entre les constitutions interne et externe des grains, des différences mises en évidence par AFC se manifestent dans les tailles, formes et agencement des fibres [11]. Sur les micrographies, on a étudié :

- la *taille des fibres* : fibres longues (2-4 μm), 10 % des mesures; fibres moyennes (1-2 μm), 30 % des mesures; fibres courtes (< 0,5 μm), 60 % des mesures. Leur largeur varie de 0,05 à 0,20 μm

- les *caractères morphologiques* des fibres : formes de la pointe (fuseau, 30 %; bout arrondi, 40 %; bout carré, 18 %; bout en bourgeon, 12 %); formes de la fibre (latte, 17 %; baguette à section carrée, 48 %; forme cylindrique ou hexagonale, 35 %); allures de la fibre (droite, 80 %; flexueuse, 20 %)

- les *relations géométriques des fibres* : fibres individualisées (55 %) ou accolées (45 %); agencement en faisceaux (10 %), en réseaux parallèles (15 %), en assemblages anarchiques non orientés (75 %)

- les *dispositions par rapport à la surface du grain* : fibres à plat ou parallèles à la surface (75 %); fibres perpendiculaires ou obliques par rapport à la surface (25 %).

Une AFC a porté sur ces 7 variables (forme de la pointe, section de la fibre, allure de la fibre, texture, type de groupement, disposition par rapport à la surface et taille des fibres) et sur leurs 21 modalités décrites ci-dessus. Les axes 1 à 7 portent 80 % de l'information et les 2 premiers, 35 %.

Interprétation

D'après cette AFC, si les caractères *lattes/bout carré/accolées/orientées/fibres droites* intéressent les fibres de la surface des grains, l'association *fibres courtes/individualisées/non orientées/flexueuses/forme cylindrique* est celle des fibres internes. Par conséquent, les fibres de l'intérieur des grains ne sont ni perturbées ni altérées et leur agencement exprime bien la

Planche 26. — Les grains d'argiles non fibreuses dans les poussières sahariennes. - a) particule peu évoluée (Al,Si,K,Fe), $e = 35 \mu\text{m}$, b) particule peu évoluée (Al,Si,Fe), $e = 10 \mu\text{m}$, c) grain façonné (Al,Si,Ca,Fe), $e = 10 \mu\text{m}$, d) grain façonné (Al,Si,K,Fe), $e = 40 \mu\text{m}$, e) grain roulé (Al,Si,K,Ca,Ti), $e = 40 \mu\text{m}$, f) grain roulé (Al,Si,K,Fe), $e = 40 \mu\text{m}$, g) grain façonné (Mg,Al,Si,K,Ca,Fe), $e = 40 \mu\text{m}$, h) détail de la surface du précédent, noter le maintien d'une forte porosité en relation avec un compactage modéré, $e = 3 \mu\text{m}$, i) grain plus roulé (Mg,Al,Si,K,Ca,Fe), $e = 40 \mu\text{m}$, j) détail de la surface du précédent, noter la compaction plus importante des particules élémentaires, $e = 4 \mu\text{m}$, k) grain bien roulé (Al,Si,K,Fe), $e = 45 \mu\text{m}$, l) détail de la surface du précédent, noter la très forte compaction et la déformation des particules, $e = 3 \mu\text{m}$.

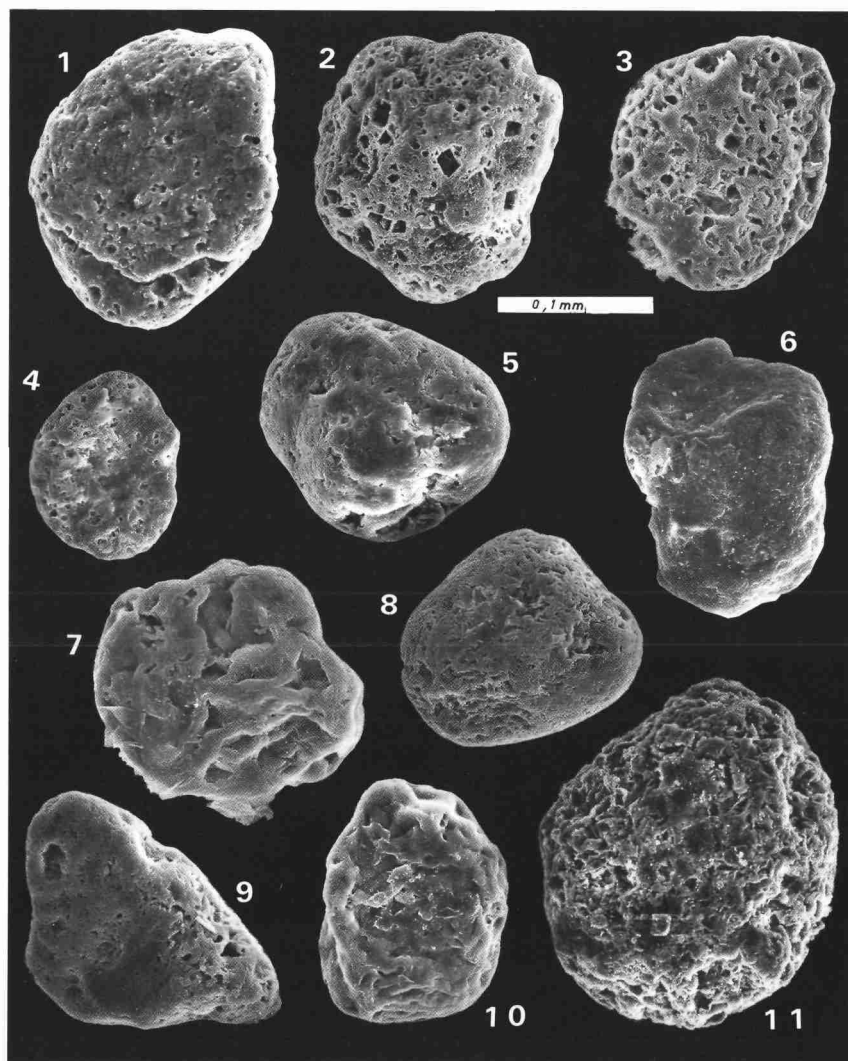


Planche 27. — Les grains éolisés de palygorskite dans les poussières sahariennes et quelques sédiments péri-désertiques présentés à titre de comparaison. - 1) grain avec alvéoles, poussières du Tanezrouft, 2) grain avec empreintes de rhomboèdres, terrasses de l'Oued Ksob (Maroc), 3) grain avec alvéoles, loess des Matmata (Tunisie), 4) grain avec alvéoles, carotte KST10, Golfe de Gabès, 5) grain lissé, loess des Matmata (Tunisie), 6) grain lissé, loess Har Harif (Israël), 7) grain encore duveteux, loess des Matmata, 8) grain à surface lissée, loess des Matmata, 9) grain avec alvéoles, loess des Matmata, 10) grain à surface lissée, loess des Matmata, 11) grain avec alvéoles, loess des Matmata.

texture duveteuse, aérée des fibres enchevêtrées et non orientées de l'argile originelle. Au contraire, en surface, les formes en lattes expriment l'écrasement des fibres; les bouts carrés, leur cassure ou leur arasement; enfin les assemblages accolés et orientés traduisent l'effet des compactions et tassements superficiels. Ces traits résultent des chocs au sol lors de la phase initiale d'éolisation de la particule de palygorskite.

Vu au MEB, l'émoussé du grain s'accompagne bien de l'apparition d'un cortex superficiel de fibres arasées, aplaties, déformées, écrasées puis compactées. Ce *feutrage de surface* explique la relative résistance des grains de palygorskite (souvent notée dans les sédiments), car l'argile a perdu sa fragile texture originelle. On observe aussi des grains polyminéaux avec, dans la matrice fibreuse, des rhomboèdres de calcite et dolomite dont le départ causé par les chocs éoliens a laissé un aspect grélé caractéristique à la surface du grain. Ces empreintes de déchaussement sont un critère de l'éolisation de la palygorskite comparable, dans sa signification génétique, aux microfaçonnements éoliens des quartz.

Dans cette étude des particules et grains des poussières sahariennes est apparue une grande diversité de formes et états de surface originels ou hérités, de processus de mobilisation et façonnement et de traits minéralogiques (Tableau XIV). Les caractères morphométriques et micromorphologiques sont des critères d'identification accréditant l'origine saharienne de poussières actuelles ayant migré loin de leur source désertique. Dans une perspective géologique, ils sont aussi l'indice d'un apport passé de poussières sahariennes dans des sols, dépôts et sédiments plus ou moins proches du désert où on les identifierait.

Leur connaissance débouche sur la mise en évidence de traceurs d'une part de l'origine saharienne de poussières ou de sédiments, et d'autre part de la mise en place éolienne, totale ou partielle, de ces derniers. Pour ces traceurs, il faut particulièrement insister sur les formes et microfaçonnements spécifiquement éoliens. En effet, si les indices chimiques et minéralogiques sont des arguments importants de l'allochtonie d'un matériel déposé, voire de sa provenance, ils ne permettent pas d'exclure le jeu de processus autres que la dynamique éolienne dans la mise en place des sédiments. Ainsi, il est possible que le ruissellement ou les dynamiques marines soient à l'origine de telles sédimentations et non pas uniquement le transport par le vent. Il faut donc bien préciser ce qui relève réellement de l'apport de poussières au sein du cortège plus général des contributions allochtones. Dans les minéraux habituels du socle saharien, les feldspaths, micas et surtout quartz sont des traceurs intéressants dans les poussières, surtout quand leurs formes et microfaçonnements prouvent l'éolisation et si leurs enrobages argileux ont les combinaisons chimiques complexes Al, Si, Fe, K, Ca etc... L'occurrence de quartz orangés est particulièrement significative. Dans les autres particules grossières, les grains roulés de carbonates de Ca sont un critère utile mais, parmi les plus remarquables traceurs des poussières sahariennes, il faut souligner les grains éolisés de palygorskite.

Les évidences micromorphologiques sont moindres sur les particules fines. Les particules de quartz, de dolomite, de kaolinite ont une fonction reconnue de marqueur, même si leur caractère ubiquiste n'est pas exclu. En fait, la signature la plus certaine de l'origine saharienne de poussières fines et lointaines est l'occurrence en large cortège de particules présentant tout ou partie des caractères minéralogiques et micromorphologiques décrits ci-dessus.

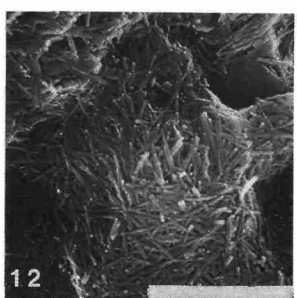
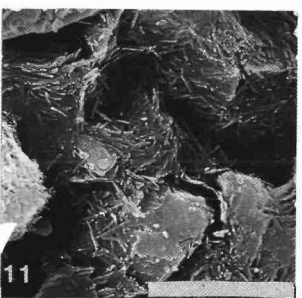
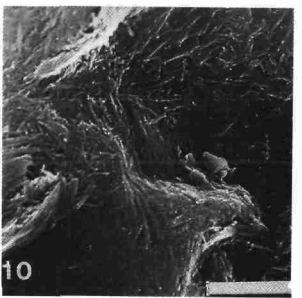
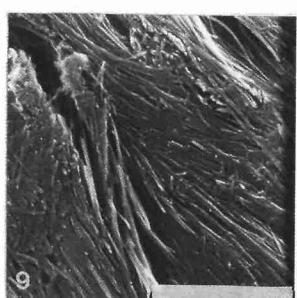
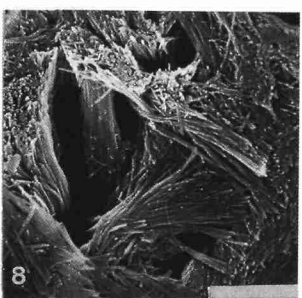
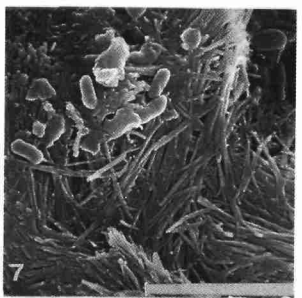
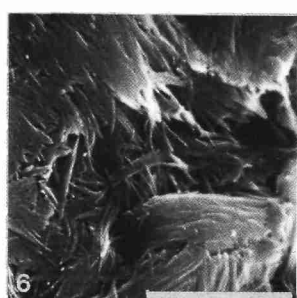
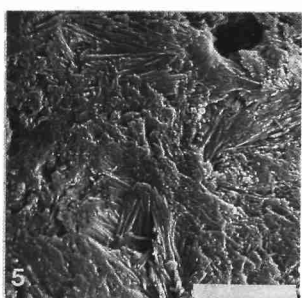
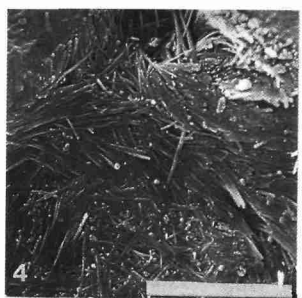
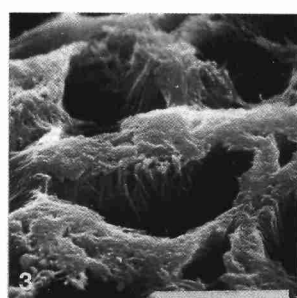
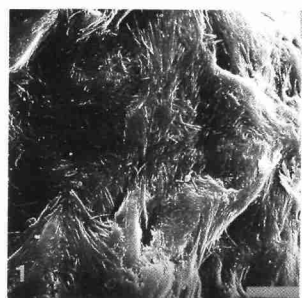


Tableau XIV. – Les caractères morphométriques, génétiques et minéralogiques des poussières sahariennes (d'après G. Coudé-Gaussen [12]).

Taille	Type de forme	Forme originelle/héritée			Attribution minéralogique/génétique
0,5-5 μm	Géométrique	+			matière organique pollution/volcanisme NaCl sulfate de Ca/kaolinite gypse/epsomite
	globule				
	sphère				
	cube/parallélépipède				
	hexagone				
	aiguille				
	Quelconque	?	?	?	?
	agrégat en chaîne				
	flocon				
	micro-agrégat				
	paillette	+	+	?	mélanges argileux mélanges argileux quartz/mica/gypse quartz/feldspath potassique albite/carbonates minéraux lourds gypse/hématite phyllites
	sub-anguleuse				
	façonnée				
10-20 μm	Géométrique	+			gypse/NaCl/carbonate de Ca gypse/palygorskite NaCl/trona/chlorites
	baguette				
	fibre				
	cube/parallélépipède	+	?	+	?
	Quelconque				
	agrégat en chaîne				
	allongée				
	lamelle				
> 20 μm	sub-anguleuse	+	+	+	fibre végétale quartz/minéraux volcaniques quartz/palygorskite mélange argileux/carbonate de Ca feldspath/kaolinite phyllites
	façonnée				
	ronde				
	Géométrique	+		+	calcite/dolomite diatomées/phytolites mica
	rhomboédre				
	disque/cylindre	+	+	+	gypse/microcodium/fibres végétales quartz/minéraux volcaniques/gypse quartz/palygorskite carbonate de Ca/micas feldspath/mélange argileux minéraux lourds phosphorites Zn/Ca
	Quelconque				
	allongée				
	anguleuse				
	sub-anguleuse				
	façonnée				
	ronde				

Planche 28. – Etats de surface des grains éolisés de palygorskite. - 1) fibres parallèles à la surface, faisceaux souples de cristaux délicats et peu altérés, 2) faisceau en éventail, fins cristaux souples associés en baguettes, état frais, 3) surface trouée à empreintes de rhomboédres, cloisons méandriques à fibres perpendiculaires à la surface du grain et mécaniquement arasées, 4) feutrage superficiel, au centre cristaux bien individualisés et couchés parallèlement à la surface, à la périphérie coalescence et écrasement des fibres, 5) surface feutrée et partiellement compactée au centre, 6) lames souples de fibres coalescentes, début de feutrage, 7) feutrage et compaction, fibres écrasées et déformées, 8) faisceaux couchés ou obliques, fibres tronquées, 9) fibres accolées par tassement, 10) fibres feutrées et agglomérées en surface, fibres peu altérées dans les creux, 11) grain mixte (particule non argileuse visible en bas), structure de fibres courtes en tas 12) début de compactage, fibres tassées en surface.

Bibliographie

- [1] Kuenen P.H. (1960). Experimental abrasion. IV. Eolian action. *J. Geol.*, 68 : 427-449.
- [2] Krinsley D.H., Margolis S.V. (1971). Grain surface textures. in Carver Ed., Wiley, New York, pp. 151-180.
- [3] Krinsley D.H., Doornkamp J.C., (1973). Atlas of Quartz Sand Grain Surface Textures. Cambridge Univ. Press, New York, 91p.
- [4] Le Ribault L., (1975). L'exoscopie, méthode et applications. Notes et Mémoires C.F.P., 12, 230 p.
- [5] Le Ribault L. (1977). L'exoscopie des quartz. Masson, Paris, 150 p.
- [6] Krinsley D.H., McCoy F. (1978). Aeolian quartz sand and silt. in Whalley W.B. Ed., «SEM in the study of sediments», Geo Abstracts, Norwich, pp. 249-260.
- [7] Wellendorf W., Krinsley D.H. (1980). The relation between the crystallography of quartz and up-turned aeolian cleavages plates. *Sedimentology*, 27 : 447-453.
- [8] Bloss D.F., Gibbs G.V. (1963). Cleavage in quartz. *Amer. Mineral.*, 48 : 821-838.
- [9] Bagnold R.A. (1941). The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen, London, 265p.
- [10] Coudé-Gaussen G., Blanc P. (1985). Présence de grains éolisés de palygorskite dans les poussières actuelles et les sédiments récents d'origine désertique. *Bull. Soc. géol. France*, 1; 4 : 571-579.
- [11] Coudé-Gaussen G. (1987). Observations au MEB de fibres de palygorskite transportée en grains par le vent. in Fédoroff N., Bresson L.M., Courty M.A. Eds. Micromorphologie des sols. AFES, Paris, pp. 199-205.
- [12] Coudé-Gaussen G. (1989). Local, proximal and distal Saharan dusts : characterization and contribution to the sedimentation. in Paleoclimatology and Paleometeorology : Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport. NATO ASI, Tucson, USA, 282 : 339-358.

6

Les poussières locales

Considérées globalement, dans la totalité de leur matériel, les poussières sahariennes connaissent des déplacements éoliens de longueur variée. Les unes, *poussières locales*, ont été observées et prélevées en domaine désertique, les autres atteignant les marges du désert ou allant au-delà feront l'objet d'un développement ultérieur.

L'une des principales questions de l'étude des *poussières locales* est leur relation avec les substrats désertiques. Lors du prélèvement, on s'interroge toujours sur leur *caractère autochtone* ou *allochtone* par référence aux sols et terrains sous-jacents. Y-a-t-il, homogénéisé par les vents à l'échelle du Sahara, un *fonds commun* de poussières (*background*) suggéré par certains auteurs [1, 2] ou subsiste-t-il, une différenciation sédimentologique locale ou régionale des poussières désertiques en relation avec la géologie des substrats ? Toute réponse à cette question implique des recherches à différentes échelles et dans des conditions de temps calme ou de vents de sable.

Les caractères des poussières dans les vents de sable

S'il existe toujours des poussières dans l'atmosphère saharienne, le phénomène prend une ampleur particulière lors des tempêtes désertiques (*Pl. 29*). Or les observations sur les poussières mobilisées par vent fort au-dessus de leur zone de départ sont peu fréquentes, car la possibilité d'échantillonner alors en plein désert est évidemment circonstancielle, du fait du caractère imprévisible et éphémère du vent de sable. Trois exemples de tels matériels ont néanmoins été étudiés : 1) un prélèvement effectué au Tanezrouft lors d'une tempête désertique en Décembre 1980 [3]; 2) un prélèvement fait en 1981 entre Tessalit et le Khnachich (Foum el Alba) dans le Sahara malien; 3) un prélèvement en Mars 1985 à El Abiodh Sidi Cheikh (Nord du Grand Erg Occidental).



Les caractères granulométriques

Deux des courbes granulométriques cumulatives établies au Sédigraph (fraction < 1mm), pour les échantillons d'El Abiodh et du Tanezrouft, ont l'allure sigmoïdale classique de sédiments éoliens et celle de Tessalit est bimodale (Fig. 24). D'après les indices granulométriques, ces poussières ont un bon classement (SO_2 compris entre 1 et 1,3) confirmé pour Tanezrouft et El Abiodh par le $Qd\Phi$ (0,62-0,68). Au vu des indices de dissymétrie (Sk) positifs (0,23/0,42), la fraction grossière domine. L'indice d'acuité $K_g > 1$ confirme le médiocre classement de la partie médiane de la courbe de Tessalit, ce qui transparaît dans sa bimodalité; au contraire, le $K_g > 1$ d'El Abiodh et Tanezrouft assure du bon classement de l'essentiel de leur stock.

Sur l'image MEB de grande dimension (30×30 cm) d'une portion de filtre total, on a mesuré par comptage la taille d'environ 250 particules de poussières mobilisées par vent fort à El Abiodh (Pl. 30). L'histogramme montre un mode dominant à $0,2 \mu m$. La courbe cumulative

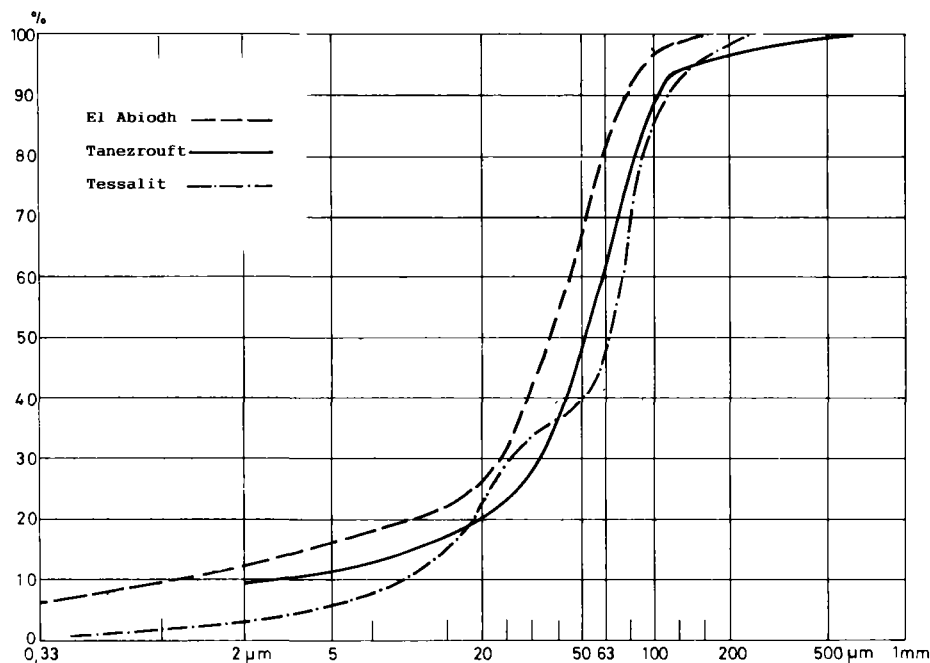


Figure 24. – Les courbes granulométriques cumulatives de trois poussières locales.

Planche 29. – Types de mobilisation de poussières. A) tourbillon sur le Grand Bara, Djibouti (Cliché P. Rognon), B) chasse-sable à Bidon V, Sahara algérien (Cliché P. Rognon), C) mur de sable au Mouydir, Sahara algérien (Cliché O.Gariel).

en résultant a été mise en regard de celle de l'échantillon total (Fig. 25) étudié ci-dessus. La pente régulière de la première montre l'absence de classement de la fraction $< 2 \mu\text{m}$, fait habituel des poussières argileuses.

Une étude au Coulter (fraction $< 200 \mu\text{m}$) a été menée pour les échantillons du Tanezrouft et Tessalit (Fig. 26). Pour comparaison, la même analyse a concerné 2 chasse-sables prélevés par vent fort près d'El Abiodh en Mars 1985. La poussière du Tanezrouft montre 2 populations granulométriques : l'une dominante à $61 \mu\text{m}$ (57 % du volume), la seconde à $31 \mu\text{m}$ (30 %). La poussière de Tessalit avec 3 populations est moins homogène : une famille dominante à $69 \mu\text{m}$ (40 %), une deuxième à $37 \mu\text{m}$ (16 %) et une troisième à $21 \mu\text{m}$ (31 %). D'autre part, s'esquisse une population vers $4-5 \mu\text{m}$. Les chasse-sables ont en commun une population dominante à $110-120 \mu\text{m}$ et une secondaire à $5-6 \mu\text{m}$. L'un a une autre population secondaire vers $25-35 \mu\text{m}$ et le second, 2 autres secondaires à 40 et $75 \mu\text{m}$.

En domaine désertique, les poussières levées par vent fort ont donc une fraction grossière importante, à la limite supérieure des silts d'après les médianes granulométriques et les populations dominantes des échantillons de Tessalit et du Tanezrouft. Toutefois, les poussières

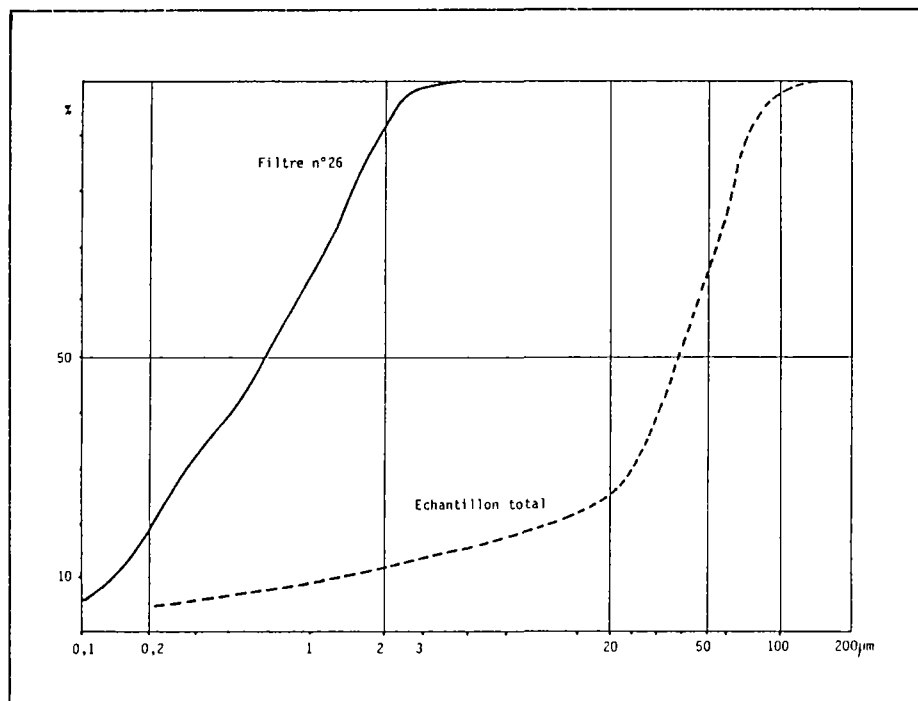


Figure 25. – Courbes granulométriques cumulatives des poussières prélevées à El Abiodh en mars 1985.

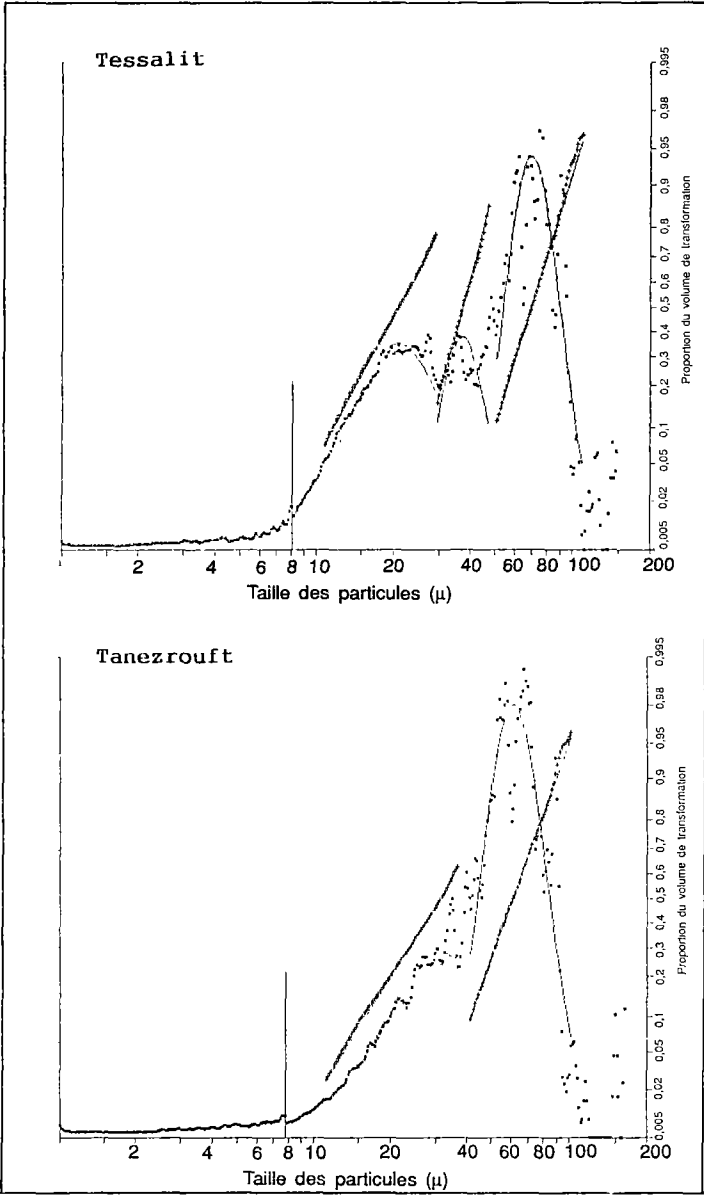
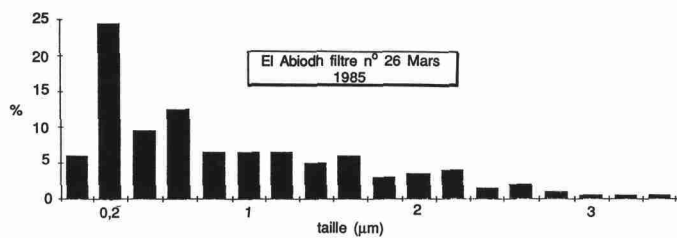


Figure 26. — Les populations granulométriques mises en évidence au Coulter dans les poussières locales de Tessalit et du Tanezrouft.



d'El Abiodh, certes prélevées à une altitude plus grande (6 m contre 1,5 m), sont un peu moins fortes. Cette granulométrie grossière répond nécessairement au tri éolien imparfait de matériels fraîchement mobilisés (ou remobilisés) évoquant les poussières recueillies aux confins du Negev à Yéroham en 1958 [4] et Be'er Sheva en 1973 [5] dont le caractère grossier a aussi été mis en rapport avec la proximité des zones de départ. Mais la comparaison avec les chasse-sables, surtout valable pour les poussières d'El Abiodh, montre néanmoins qu'un tri granulométrique s'est nettement manifesté par rapport au matériel circulant au sol. Dans les chasse-sables, seules les populations secondaires très fines (5 μm) et moyennes (25-40 μm) sont encore susceptibles d'alimenter les poussières. Par ailleurs, ce caractère grossier des poussières locales n'est pas exclusif de l'occurrence d'une fraction fine comme le montre bien la poussière sur filtre d'El Abiodh. *En fait, dans la zone de mobilisation, les poussières offrent un spectre granulométrique très large : c'est sans doute, au sein des poussières d'origine saharienne, le caractère sédimentologique distinctif le plus marquant des poussières locales.*

Les caractères minéralogiques et chimiques

Grâce à des analyses morphoscopiques sur la poussière du Tanezrouft on a pu établir les relations entre la nature minéralogique et la taille des grains aux fractions grossières. On a calculé le pourcentage des principaux minéraux des grains (Tableau XV). Dans les minéraux colorés, on a regroupé minéraux lourds, accessoires et ferro-magnésiens sauf les micas. Les grains divers sont des carbonates, diatomées et grains argileux. Les quartz sont prépondérants dans toutes ces fractions grossières. Les minéraux colorés, souvent minéraux lourds, disparaissent au-dessus de 200 μm . La muscovite domine nettement la biotite plus fragile; bien que dense, elle abonde jusqu'à 500 μm car ses paillettes minces et aplaties «planent» très bien dans un vent violent. Mais sa «chute» brutale au-dessus de 500 μm suggère la destruction des paillettes trop grandes, dans un environnement granulométrique désormais dominé par les gros quartz.

Les déterminations aux RX de la minéralogie des poudres et des argiles ont porté sur les filtres totaux d'El Abiodh, les prélèvements de Tessalit et du Tanezrouft et les chasse-sables pour comparaison (Tableau XVI). La faiblesse relative des taux de quartz dans les poussières sur filtres s'explique par le type de prélèvement sélectionnant de manière privilégiée les par-

Tableau XV. – Répartition de la nature minéralogique des grains de poussières en fonction de leur taille.

%	50-100 μm	100-200	200-500	500-1000
quartz	73,4	61,6	53,3	99,3
micas	11,4	27,3	44,2	–
minéraux colorés	15,2	6,9	–	–
divers	–	4,2	2,5	0,7

Planche 30. – Portion du filtre de poussières prélevées à El Abiodh (mars 1985) ayant servi à la mesure de la taille des particules.

Tableau XVI. – La minéralogie des argiles et des poudres de poussières locales au Sahara.

Echantillon	KAO	SME	ILL	CHL	PALY	Ar	Q	Fk	Pl	Ca
Filtre 10	8	–	11	–	9	–	39	–	–	33
Filtre 12	11	–	17	–	11	–	33	–	–	28
Filtre 13	10	–	17	–	17	–	29	–	–	27
Tessalit	10	70	10	10	–	6	59	19	16	–
Tanezrouft	5	75	5	5	10	–	–	–	–	–
Ch. sable 1	–	–	–	–	–	1	94	2	–	3
Ch. sable 2	10	20	55	15	–	–	90	2	–	8

ticules plus fines, alors que les fractions < 2 mm des autres poussières sont marquées par une forte population grossière quartzueuse. Ce dernier caractère est encore plus accentué dans les chasse-sables. La calcite des filtres d'El Abiodh est due à son abondance sous forme de micrite fine dans les sols et substrats au Nord du Grand Erg Occidental. L'absence de smectite sur les filtres retient l'attention car elle est présente (entre 10 et 20 %) dans la fraction < 2 μ m des substrats de la région et des chasse-sables. C'est sans doute lié à l'analyse sur filtre, car les particules sont indifféremment orientées au moment de la filtration. La présence de palygorskite est normale près des hamadas tertiaires. Les forts taux de smectite des prélèvements du Tanezrouft et de Tessalit s'expliquent par le contexte géologique des substrats. Enfin, les caractéristiques minéralogiques de ces poussières grossières sont confirmées par leur *nature chimique*, comme le montre la composition de l'échantillon de Tessalit (SiO_2 : 70 %, Al_2O_3 : 11 %, Fe_2O_3 : 4,2 %, TiO_2 : 0,7 %, MgO : 1,4 %, CaO : 2,5 %, Na_2O : 2,1 %, K_2O : 2,4 %, MnO : 0,07 % et perte au feu : 4,4 %).

Enfin, l'étude sédimentologique de poussières locales doit évoquer les particularités micro-morphologiques des grains et particules. Dans la fraction grossière, la forme et les états de surface des grains sont les indices d'une mobilisation au sol avant le départ en suspension. Les poussières sur filtre sont évidemment de plus petites tailles et de formes plus quelconques, comme c'est normal dans les poussières déjà fines (*Pl. 30*).

Caractères de poussières prélevées à poste fixe ou dans un cadre régional limité

L'incidence du vent et des substrats

La prise en charge des particules dépend évidemment de la vitesse du vent. Si tout le matériel disponible au sol est uniformément mobilisé, les compositions chimiques et minéralogiques de la poussière et des sols et substrats où s'est exercée la déflation doivent être comparables. Mais on peut s'interroger sur l'éventualité d'une mobilisation différentielle induisant une composition de la poussière différente de celle des substrats, ce qui s'expliquerait par la variabilité des caractères des particules et/ou l'intensité du vent.

L'échantillonnage et la méthode

Pour apprécier l'incidence de la composition chimique et minéralogique des substrats sur les poussières les survolant, des campagnes d'échantillonnage ont eu lieu au Nord du Grand Erg Occidental parallèlement à l'étude des sols et substrats :

— des prélèvements sur filtres totaux de poussière à poste fixe sur la terrasse d'un édifice à 6 m de hauteur, à El Abiodh Sidi Cheikh : 1) pendant une série de tempêtes de sable de secteur Nord (Mars-Avril 1985); 2) en période de vents variables (Mars 1986).

— des prélèvements de poussières au Nord et dans le Grand Erg Occidental, en une période atmosphérique stable (Décembre 1985), par station mobile successivement installée sur 9 sites différents : 2 à Hassi Mejna, 1 à Bour ech Chaamba, 1 à Dayet el Anz, 1 à Hassi Cheikh, 1 à Dayet el Mellah, 1 à M'Tilfa, 1 à Khrabeg el Djemel et 1 à Dayet oum Deb Deb (Fig. 26). Au sommet d'un mât de 9m, avec 2 filtres (chimie et minéralogie), les aérosols ont été pompés en durées de 5 à 12 h. Les poussières se déplaçant près du sol ont été recueillies par 2 impacteurs placés à 1 m. Pendant ces prélèvements, les vents ont été mesurés, variant de 1-2 à 10-12 m/s à l'anémomètre Richard (soit un temps calme pour le Sahara) et soufflant de N-NE sauf lors des 3 derniers prélèvements où les orientations ont varié.

L'étude sédimentologique intégrée des filtres s'est faite par une succession des traitements allant du moins au plus destructeur. Les variations des éléments chimiques Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe et Zn, dosés par fluorescence X, ont d'abord été mesurées grâce à leur niveau de concentration par rapport à Si, le principal d'entre eux, considéré comme référence [6]. Puis, afin de caractériser les minéraux, des analyses minéralogiques par diffraction des RX ont porté sur les filtres totaux et/ou les filtres de chaque étage des impacteurs. Enfin, pour appréciation minéralogique et granulométrique du matériel à l'échelle de la particule, nos observations au MEB et EDS ont concerné des fragments de filtres et les particules recueillies sur l'entonnoir d'entrée des impacteurs.

Les variations de la composition chimique et minéralogique des poussières

Lors des tempêtes de Mars-Avril 1985, le rapport Ca/Si passe de 0,8 à <0,2 quand la concentration de Si augmente de 2 à 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, résultat confirmé en Décembre 1985 et Mars 1986. De même P, K et Zn baissent quand Si augmente. Au contraire, Al croît parallèlement à Si. Enfin, Fe, Mn et Ti n'évoluent qu'avec de très fortes concentrations de Si [6].

A propos de la minéralogie par diffraction RX des poussières, les filtres sont peu chargés pendant les périodes calmes; leur étude qualitative ne montre alors que les calcite, gypse, halite et quelques autres éléments (Tableau XVII). Au contraire, par vent de sable, les analyses semi-quantitatives indiquent sur 3 filtres des quartz, micas, calcite et argiles. Sur 4 échantillons, avec des concentrations de Si de 3, 15, 24 et 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, si la calcite est le minéral majeur par vents faibles (le rapport Ca/Si est alors proche de 1), le quartz domine par vents forts (chute du rapport Ca/Si) [6].

Tableau XVII. – Analyse minéralogique des poussières prélevées en décembre 1985 au Nord du Grand Erg Occidental (mesures sur filtres d'impacteurs).

Localisation	Fraction granulométrique (étage de l'impacteur)	Minéraux
Hassi Mejna I	7-10 μm 2-3,5 1,2-2	pyrolusite (+) calcite (++) halite (+) calcite (++) halite (+)
Hassi Mejna II	matériel insuffisant	
B. e. Chaamba	1,2-2 μm 0,5-1,2	calcite (+) trona (+) gypse (+)
Dayet el Anz	0,5-1,2 μm	calcite (+) gypse (+)
Hassi Cheikh	2-3,5 μm 1,2-2 0,5-1,2	calcite (++) calcite (++) trona (+) mascanite (+)
Dayet el Mellah	2-3,5 μm 1,2-2	calcite (+) gypse (+) gypse (+++) nitre (+)
M'Tilfa	matériel insuffisant	
K. el Djemel	matériel insuffisant	
Dayet o. Deb Deb	1,2-2	calcite (++)

L'étude granulométrique et micromorphologique

L'observation au MEB/EDS de 7 échantillons (filtres totaux) prélevés lors des vents de sable de Mars 1985 a distingué différents modes granulométriques. Les plus fins correspondent aux plus fortes concentrations de Si (*Tableau XVIII*), ce qui suggère une fourniture croissante de particules fines avec l'augmentation de la vitesse du vent. L'idée de cet *accroissement d'une mobilisation des particules fines en fonction de la vitesse du vent* est confirmée par la part croissante (en masse) de matériel accumulé, lors de vents forts, dans les étages de l'impacteur en cascade recueillant les plus fines des particules. Comme cet appareil est inopérant dans le domaine des grosses particules, seule est évoquée ici la distribution granulométrique

Tableau XVIII. – Variations des modes granulométriques des poussières observées au MEB (filtres totaux) et de la concentration en Si.

Nombre de filtres	Modes granulométriques (en μm)	Concentration en Si ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
3	4-5 1-2 < 1	50-70
3	7-9 1-2 < 1	8-15
1	12-15 3 < 1	3

des particules $<25 \mu\text{m}$. Pendant les périodes de calme (où $\text{Si} = 0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$), le mode des particules se trouve vers $3-5 \mu\text{m}$; en revanche, par vent fort ($\text{Si} = 12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), on voit apparaître outre le mode précédent un autre mode plus fin $<0,6 \mu\text{m}$.

Discussion

D'après ces observations sur des poussières fines, il y a donc *une mobilisation différentielle en fonction de la nature chimique et minéralogique des particules et de la force du vent*. Pendant les périodes de calme et de vent faible, les poussières du Nord du Grand Erg Occidental sont plus carbonatées alors que l'augmentation de la vitesse du vent se traduit par un caractère de plus en plus siliceux. On pourrait considérer un peu hâtivement que l'augmentation de silice dans les poussières ne résulte seulement, par vent croissant, que de la mobilisation d'une fraction fine quartzeuse libérée par une abrasion et une fragmentation alors plus efficaces des quartz au sol. En fait, d'après le MEB/EDS, les particules très fines piégées sur filtre sont en majorité de composition argileuse.

Ainsi, au Nord du Grand Erg Occidental, la composante siliceuse fine des poussières relève autant de la participation de fines particules argileuses que de celle de quartz [7]. On connaît déjà le rôle de la *pellicule rousse* dont, par vent croissant, les grains grossiers se mobilisent de plus en plus par roulement/saltation. Les plus résistants, principalement des quartz, sont autant d'outils qui, heurtant les particules argileuses, les fragmentent en provoquant ce croît de fines dans les poussières (*sandblasting* des anglo-saxons). De plus, ils abrasent à la manière d'une rape tous les substrats argileux.

La libération de poussières fines est donc fonction de la force du vent. Dans les fractions plus grossières dont les prélèvements sur filtres ou à l'impacteur ne peuvent témoigner, la mobilisation est aussi liée à la vitesse du vent comme l'attestent les développements antérieurs sur les vents de sable. Ainsi, dans l'*alternative substrats/force du vent* qui semble contrôler la mobilisation des poussières, *le second paramètre paraît jusqu'à présent le plus important*.

Mais on ne peut éliminer l'incidence de la nature des substrats, ou plus précisément celle de leur stock disponible pour la mobilisation éolienne. Ainsi, lors des périodes calmes au Nord du Grand Erg, la poussière fine carbonatée dominante est nécessairement locale, puisqu'il n'y a pas de vent : elle est issue de la micrite qui abonde dans la région. De même, la participation du gypse, de la halite et autres sels. Ces constituants forment un *fond local de poussières* modifié par des contributions plus allochtones, de nature argileuse ou non, par vent de sable. Les observations sur la minéralogie de poussières plus méridionales confirment cette hypothèse.

Les observations à poste fixe avec une certaine durée : l'exemple des poussières de Béni-Abbès

On a pu disposer de portions de 53 filtres prélevés à Béni-Abbès en 1973-74 lors d'études polliniques au Sahara. Sur ces échantillons ont eu lieu des analyses minéralogiques des poussières piégées. Le traitement pour dissoudre le silicone des filtres a sans doute éliminé des minéraux très fragiles et la très faible quantité de matériel recueilli, n'autorisant pas de mesure granulométrique des poussières, n'a été suffisante que pour l'analyse des argiles et leurs pour-

Tout ceci suggère des variations saisonnières dans les proportions d'argiles des poussières. De plus, certaines argiles, chlorite altérée, illite, et chlorite, ont plus tendance à «tomber» que d'autres, palygorskite et smectite.

La comparaison des périodes de calme et de vents de sable a porté sur 6 couples opposant des périodes de durées comparables (de 1 à 6 jours d'observation) et très proches (pour éviter toute différence saisonnière), les unes calmes et les autres par vent de sable (Tableau XX). En Avril 1973, il y a augmentation par vent de sable d'WNW des kaolinite, illite et chlorite altérée et baisse relative des smectite et palygorskite. En Décembre 1973, quand le vent de sable souffle d'WSW, les kaolinite, illite et chlorite augmentent et les smectite, palygorskite et chlorite altérée diminuent. En Février 1974, le vent de sable s'accompagne d'une baisse des smectite, palygorskite, chlorite altérée et d'une montée des kaolinite, illite et chlorite. Les brumes sèches par vents de Sud-Est et Sud et de forts vents de sable de Sud, correspondent au croît des kaolinite, chlorite et palygorskite en Mars 1974, alors que les illite, smectite et chlorite altérée font une chute relative. En Mai 1974 par vent de sable, la proportion d'illite est stable, les kaolinite, chlorite et palygorskite s'accroissent et les smectite et chlorite altérée baissent.

Enfin, en Juin 1974, dans une période complexe de vents tournants passant de l'WSW au Nord-Ouest, à l'ENE et au Sud-Est avec des brumes sèches et vents de sable, il y a une montée des smectite et chlorite altérée, une diminution relative des kaolinite, chlorite et palygorskite et un maintien de l'illite.

Il y a donc clairement modification dans la composition minéralogique des argiles des poussières en suspension entre les périodes de temps calme et celles de vent de sable ou brume sèche au-dessus d'un site précis d'observation au Sahara.

Tableau XX. – Comparaison des valeurs moyennes des argiles des poussières prélevées à Béni-Abbès pendant des périodes de temps calme et de vents de poussières d'avril 1973 à juin 1974.

	KAO	ILL	CHL	CHLalt.	SME	PAL
avril 1973						
semaine sans vent	tr.	2,5	2,5	tr.	2,3	2,5
semaine avec vent	tr.	3	—	3	2	2
jour avec vent	0,5	3,3	—	2,5	2	1,7
décembre 1973						
jours sans vent	0,4	3,4	—	1,9	2,5	2
jour avec vent	1	4	2	—	1,5	1,5
février 1974						
jours sans vent	tr.	2,5	1	2,8	2,5	2
jour avec vent	0,5	3	3	0,5	1	2
mars 1974						
jours sans vent	tr.	2,7	—	3,3	1,7	2,3
jours avec vent	0,5	2,5	1	1,3	1,5	3,3
mai 1974						
jours sans vent	1	3	1,5	0,8	2,6	1,1
jour avec vent	1,5	3	2	—	2	1,5
juin 1974						
jours sans vent	1	2,7	2	tr.	2	1,8
jours avec vent	tr.	2,8	1	2	2,5	1,6

Le premier point à souligner est la constance minéralogique du fond d'aérosols, au-dessus de Béni-Abbès par temps calme, caractérisé par les smectite et chlorite altérée et plus relativement la palygorskite. D'après ce qu'on a entrevu de leurs aptitudes différentes à «voler» ou à «tomber», on peut penser que, par temps calme, la smectite et la palygorskite «volant bien» participent d'une composante géographique assez large du fond alors que la chlorite altérée qui «vole mal» relève d'un secteur plus strictement localisé.

Avec les vents de sable et brumes sèches, le cortège minéralogique se modifie par une affirmation du couple kaolinite/illite suggérant leur caractère allochtone par opposition au couple plus local de la smectite/chlorite altérée. Ces deux couples évoluent alors en raison inverse (coefficient de régression $r = -0,73$), alors que par temps calme il y a peu de relation entre eux ($r = -0,30$). Le comportement de la palygorskite est mixte, participant du fond minéralogique de temps calme ce qui l'associe au cortège des poussières d'origine locale, mais augmentant aussi lors des vents de sables ou brumes sèches en compagnie de la kaolinite, sous influences extérieures. Il y a, en somme, dans ces dernières circonstances, un «surcroît» de palygorskite allochtone venant enrichir celle du fond local.

Enfin, il faut s'interroger sur l'origine des poussières allochtones prélevées à Béni-Abbès. *Nombre de vents de sable soufflant d'un large secteur Ouest* (en Avril 1973 de l'WNW, en Décembre 1973 de l'WSW et pour partie de l'WSW et du Nord-Ouest en Juin 1974) ont balayé les vastes hamadas des confins algéro-marocains, voire les marges septentrionales des ergs Iguidi et Er Raoui. Ils ont mobilisé le couple allochtone habituel kaolinite/illite avec, ce qui est plus exceptionnel, des chlorites altérées ou non. Par ailleurs, *d'autres vents de sable et brumes sèches sont venus de Sud à ESE*, en Mars, Juin et Juillet 1974. Ils étaient certes dotés de kaolinite, d'illite et, on l'a vu, de palygorskite. Ces vents remontaient la Saoura, longeaient le Grand Erg Occidental, provenant d'Adrar et plus généralement de la dépression du Touat. Pour s'en assurer, on a comparé les moyennes en argiles des poussières des vents de sable de Sud et Sud-Est à Béni-Abbès avec celles de 2 prélèvements itinérants, en Mai 1973 entre Béni-Abbès et Adrar, et entre Bahmer ($0^{\circ}15'N-27^{\circ}30'N$) et Adrar [8]. Ces prélèvements à l'avant du véhicule (*cf. infra*) représentent une composition moyenne des poussières proches du sol des régions au Sud et Sud-Est de Béni-Abbès (*Tableau XXI*). Les chlorites et la smectite sont plus abondantes dans les poussières des vents de sable de Béni-Abbès que dans celles des transects, confirmant la nature locale de ces argiles à Béni-Abbès. En revanche, la kaolinite est bien plus abondante dans les poussières des transects que dans les vents de sable de Béni-Abbès. Les régions méridionales sont donc des sources probables pour la kaolinite des poussières arrivant du Sud à Béni-Abbès. En effet, la kaolinite associée à l'illite existe en abondance dans les grès du continental intercalaire le long du Touat ainsi que dans les ocres des bas pays de l'Ahnnet [9].

Tableau XXI. – Comparaison des valeurs minéralogiques moyennes des poussières venant du Sud prélevées à Béni-Abbès avec celles des poussières de deux transects au Sud de Béni-Abbès.

	KAO	ILL	CHL	CHLalt.	SME	PAL
moyenne vents de sable de secteur Sud/ESE à Béni-Abbès	0,5	2,5	1	1,2	1,7	2,2
moyenne des transects Béni-Abbès/Adrar Bahmer/Béni-Abbès	1,2	1,7	0,5	–	1,5	2,2

Des taux comparables suggèrent à nouveau la mixité de la palygorskite des poussières de Béni-Abbès, locale pour une part, allochtone pour une autre; de plus, elle doit abonder dans les poussières du Sud sachant qu'il n'y avait pas de vent pour la mobiliser particulièrement lors des transects. On peut s'étonner *a priori* que le taux d'illite soit supérieur dans les vents de sable à Béni-Abbès car on pouvait s'attendre à la voir, comme la kaolinite, baisser relativement. En fait, le contexte météorologique calme des prélèvements itinérants est à l'origine de la relative faiblesse de l'illite au Sud. On a vu que cette argile tendait à «tomber» lors des périodes calmes, d'autant plus que les micas dont elle dérive sont de densité élevée : ce comportement explique sans doute la faiblesse en illite des transects. En revanche, lors des vents de sable de Béni-Abbès, elle était activement mobilisée, d'où sa notable abondance.

Vers une distribution macrorégionale de la minéralogie des poussières

Dans le cadre de l'alternative *autochtone/allochtone* des poussières sahariennes par rapport aux substrats, des relations de dépendance sont déjà apparues à l'échelle locale.

L'exploitation de deux séries de prélèvements itinérants a permis d'aborder ce même problème, à l'échelle régionale des grands ensembles géographiques et géologiques du Sahara septentrional et central.

Les enseignements des deux transects

La première série de prélèvements [10] a eu lieu le long d'un itinéraire Oran/Béni-Abbès/In Salah/Tamanrasset/In Guezam/Bidon V/Adrar/Béni-Abbès du 4 au 23 Mai 1973 et la seconde série [11] sur un itinéraire Hun/Sabhah/Djanet/Tamanrasset/In Salah/Ghardaïa du 23 Février au 21 Avril 1977, dans le but de prélever des pollens dans les poussières. A 2 m du sol à l'avant des véhicules, sans pollution par les particules soulevées du sol par les roues, les filtres ont recueilli des poussières en suspension et en saltation très haute.

On a comparé par Analyse factorielle des correspondances les conclusions sur le transect occidental déjà publiées [8] avec les résultats minéralogiques du transect oriental (Fig. 27). A partir des seuils habituellement retenus pour les données minéralogiques (cf. Annexe), l'AFC a porté sur 59 individus et 7 paramètres divisés en 28 variables. Les 7 premiers axes ont fourni 74 % de l'information, dont 29 % pour les 2 premiers. Dans l'interprétation des attributions minéralogiques se sont définies pour chaque axe de l'AFC (Tableau XXII).

On a reporté sur une carte les attributions minéralogiques retenues par l'AFC pour chaque échantillon (Fig. 28). Il en résulte la mise en évidence d'un certain nombre d'ensembles régionaux homogènes et majeurs transverses aux 2 itinéraires :

— un premier groupe d'échantillons se définit au Sud-Ouest de la carte (Hoggar central, méridional, occidental et Tanezrouft) par les plus forts pourcentages de smectite

— un autre ensemble important, entre l'Est du Hoggar et la retombée méridionale et orientale du Tassili n'Ajjer présente aussi de très forts pourcentages de smectite, associée avec de la chlorite à l'Ouest de Djanet et au Nord du Murzuk

Tableau XXII. – Les attributions minéralogiques par axe de l'AFC transects.

Axes	I	II	III	IV	V	VI	VII
+	PAL4 ILL1 KAO3	SME4	ILL4 PAL1	SME3	IG1		CHL2
-	KAO3 PAL2	SME1	KAO2 ILL3 PAL3	IS2 CHL4	IG2	KAO1 ILL2	CHL1

— un groupe septentrional s'étire du Nord du Maghreb, par le piémont de l'Atlas, à la moyenne Saoura, caractérisé par les interstratifiés et accessoirement par une modeste illite

— dans le prolongement du précédent, un autre ensemble concerne l'aval de la Saoura, le Touat et s'étend jusqu'à Aoulef, avec des taux importants de palygorskite et illite et des taux moyens de kaolinite.

D'autres attributions minéralogiques sont localisées sur des sites plus disséminés. Les alentours d'In Salah sont riches en kaolinite. L'absence de smectite caractérise le secteur à l'Ouest d'In Salah et les affleurements de socle près d'In Ekker au Nord du Hoggar. Un prélèvement proche signale une très forte proportion d'illite et l'absence de palygorskite, faits qui existent dans un autre échantillon du transect oriental, à l'Ouest de Sabhah. Deux échantillons isolés, à El Goléa et Hun, signalent les taux les plus élevés de palygorskite, des taux faibles d'illite et la présence de kaolinite. Enfin, à Ghardaïa, l'ultime prélèvement de la mission orientale signale de très faibles taux de kaolinite et une certaine abondance d'illite.

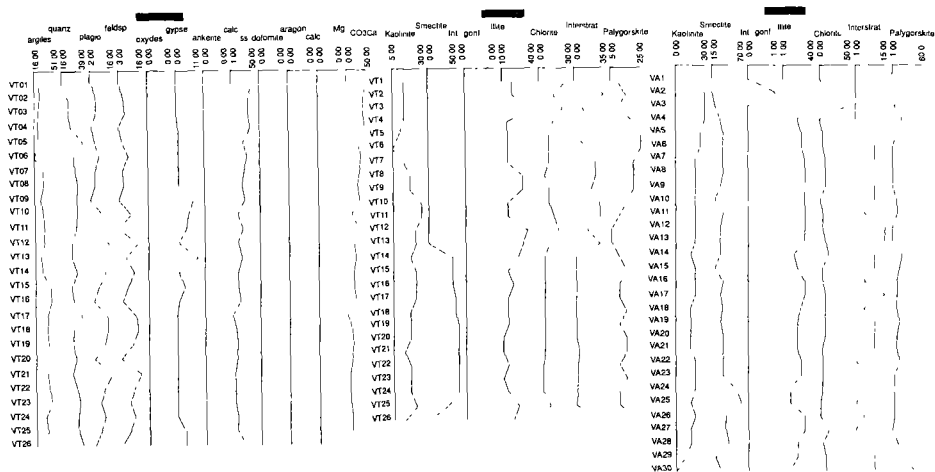


Figure 27. – L'évolution de la minéralogie des poudres (transect occidental VT) et des argiles (transect occidental VT et transect oriental VA).

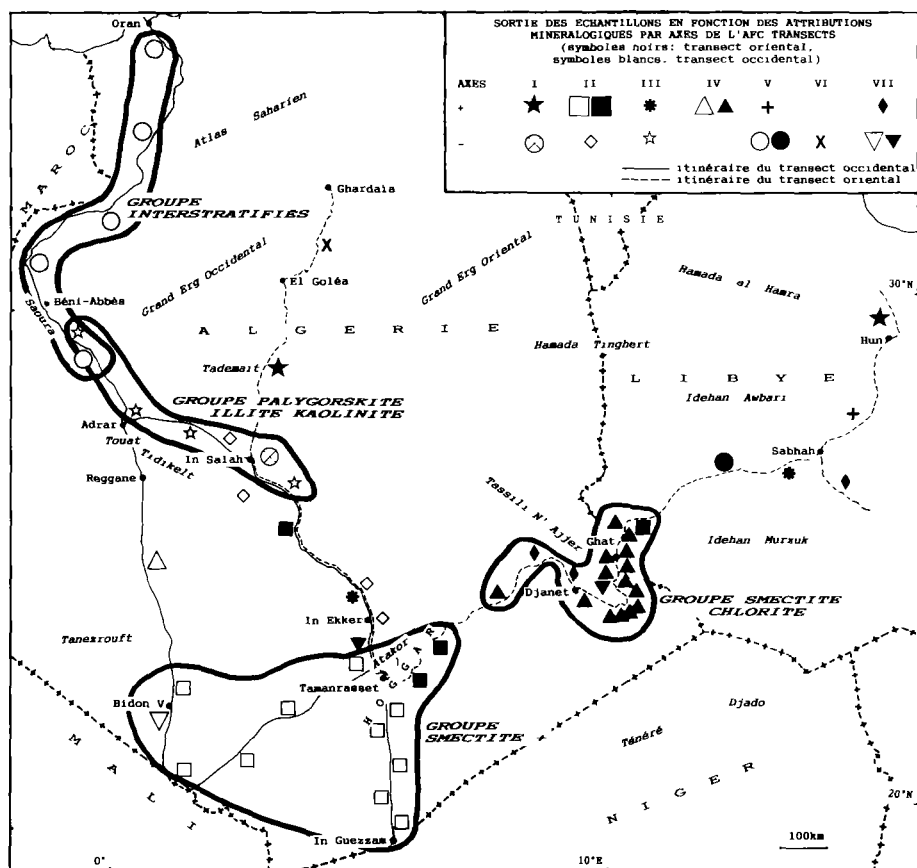


Figure 28. – Répartition géographique des groupes d'attributions minéralogiques proposés par l'AFC (pour les attributions des axes, se reporter au Tableau XXII).

Commentaire

Cette transposition cartographique des attributions minéralogiques de l'AFC *confirme et étend vers l'Est* les conclusions déjà connues grâce au transect occidental. Son principal intérêt est d'avoir imposé des groupements régionaux même si les caractères minéralogiques les définissant peuvent paraître incomplets, voire peu évocateurs. Ainsi, le groupe septentrional du Maghreb et Nord-Sahara, seulement discriminé par la présence d'interstratifiés dans ses poussières est pourtant très significatif car il se distingue ainsi nettement du reste du lot analysé. Le caractère minéralogique discriminant peut d'ailleurs avoir un grand rôle dans l'explication :

ainsi, l'individualisation du groupe centre- et Sud-Hoggar par sa très forte smectite est un fait minéralogique particulièrement significatif, vu le contexte volcanique régional.

Une distribution géographique zonale (Fig. 29) se dessine au Sahara septentrional et central en fonction de 2 pôles minéralogiques : la *smectite* et la *palygorskite*. Relativement à ces deux

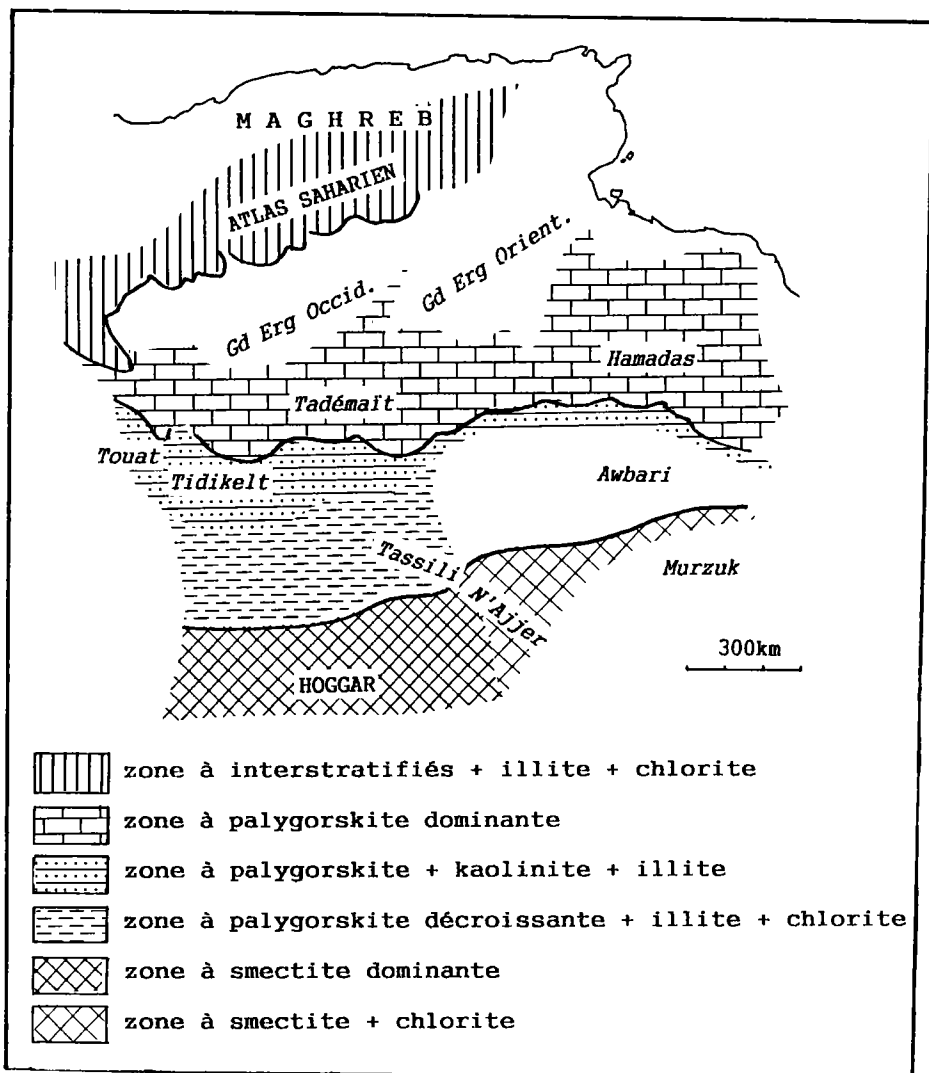


Figure 29. — La zonation de la palygorskite et de la smectite dans les poussières du Sahara central et septentrional.

espèces, l'intervention des autres argiles paraît plus ubiquiste, liée à des impératifs stationnels ou à des particularités lithologiques locales.

— Au Sud, une zone latitudinale de près de 1000 km d'Est en Ouest, à *smectite* prépondérante dans les poussières, apparaît sur le transect oriental et plus encore à l'Ouest où se recoupent remarquablement les informations minéralogiques des 2 itinéraires. Sa limite septentrionale est franche, voire brutale. Ainsi, dès les plaines de granite précambrien autour d'In Ekker, les poussières sont sans *smectite* alors qu'à quelques dizaines de kilomètres au Sud, les grands épanchements basaltiques de l'Atakor y occasionnent les taux maximums. On voit là indiscutablement l'incidence de la minéralogie des substrats sur la composition argileuse des poussières.

— Une deuxième zone de poussières s'étend sur le Sahara septentrional, diversement marquée par la *palygorskite*. Au Nord, ses taux les plus élevés coïncident avec les substrats tertiaires (surtout la *torba*) et mésozoïques des hamadas et plateaux calcaires comme le Tadémaît [8]. Vers l'Est, cette relation se prolonge par les hamadas de Tingher et Al Hamra. Au Sud, les taux de *palygorskite* décroissent. Encore notable à l'Ouest, dans les dépressions au Sud-Ouest du Tadémaît et vers In Salah, cette argile disparaît plus loin, sur le socle du piémont nord du Hoggar. De même, vers le Sud-Est, elle ne subsiste qu'en traces dans les poussières vers Sabhah.

— Le groupe septentrional à *interstratifiés* correspond à celui caractérisé dans le Maghreb oranais par Paquet *et al.* [8] sur des formations superficielles et sédiments riches en illite et chlorite, présents aussi sur le piémont saharien de l'Atlas. Cette zone ne doit pas exister vers les rivages libyens où le domaine aride atteint la mer, mais les informations du transect oriental ne permettent pas de le confirmer.

La kaolinite, accompagnée secondairement de l'illite, est importante dans certaines attributions minéralogiques de l'AFC. Localisée dans le centre-Ouest du secteur étudié (Sud du Tadémaît, autour d'In Salah et un peu au Sud), elle n'a cependant pas la même extension zonale dans les poussières sahariennes que les *smectite* et *palygorskite* : la kaolinite ne s'explique, on le sait, dans ce secteur que par son occurrence dans certains grès du Touat et des Tassili.

Ainsi toutes ces observations confirment l'étroite relation existant entre la composition argileuse des poussières sahariennes et celle des substrats survolés. Toutefois, cette conclusion mérite deux précisions importantes liées aux conditions mêmes des échantillonnages : il s'agit de poussières proches du sol; les prélèvements ont eu lieu par temps calme ou peu perturbé permettant le déplacement des véhicules et par vents de sable. Aussi cette mise en évidence de la parenté minéralogique des substrats et poussières n'est, à notre sens, nullement exclusive de la présence à des altitudes plus élevées, d'un fond de poussière déjà homogénéisé, du moins à l'échelle régionale voire macrorégionale, surtout par vent de sable et *a fortiori* dans un lithométéore important.

Les poussières locales ont essentiellement au Sahara comme caractère commun une granulométrie à forte fraction grossière où le quartz est le minéral majeur. Dans leur fraction fine, cette prééminence s'estompe et le quartz est en partie relayé par des particules argileuses variées et complexes.

La question de la dépendance sédimentologique des poussières vis-à-vis des substrats désertiques mérite une réponse très nuancée, variable suivant le contexte météorologique et fon-

tion de l'approche scalaire. A l'échelle locale du poste d'observation isolé ou de la petite région, le degré d'allochtonie ou d'autochtonie de la poussière dépend de l'occurrence ou non de vents de sable. Par temps calme, les poussières, de taille fine, sont chimiquement et minéralogiquement apparentées aux substrats, formant un fond local typé. En revanche, le vent de sable mobilisant ou remobilisant les poussières confère une connotation plus allochtone aux plus fines, se traduisant par un début d'homogénéisation au niveau de la petite région. Mais les poussières grossières, les plus abondantes en masse dans le vent de sable, sont moins facilement exportées et elles conservent un caractère local.

A l'échelle des grandes régions naturelles du Sahara septentrional et central, il y a bonne coïncidence entre les caractères minéralogiques des poussières et ceux des vastes ensembles lithologiques survolés. Certes les observations fondant cette opinion s'appuient sur des prélèvements à faible altitude dans des conditions de temps peu perturbé. Mais à un tel niveau scalaire, on imagine mal qu'un remaniement puisse affecter radicalement tous les caractères des poussières lors d'un lithométéore, fut-il considérable, et occulter la sujétion sédimentologique imposée par les grandes régions naturelles. En définitive, la mise en évidence de signatures minéralogiques des poussières typées à l'échelle macrorégionale suggère certes une véritable homogénéisation par les vents et tempêtes désertiques au sein de chacun de ces grands domaines, mais aussi que le phénomène n'a pas transgressé les limites imposées par la nature lithologique de leurs substrats. En conséquence, la connaissance sédimentologique fine, principalement chimique et minéralogique, d'une expulsion de poussières hors du Sahara devrait permettre d'identifier sa provenance régionale désertique. A l'appui de cette position, il a déjà été possible de découvrir, grâce à l'argument chimique, les origines sahélienne et sud-marocaine de deux lithométéores observés aux Canaries.

Faciès originel des poussières d'origine saharienne, les poussières locales sont la référence obligée de l'étude du matériel des lithométéores exportés plus ou moins loin du Sahara. En effet, dès les marges du désert et à plus forte raison au-delà, les poussières connaissent de notables modifications sédimentologiques altérant plus ou moins leur caractère désertique.

Bibliographie

- [1] Schütz L., Rahn K.A. (1982). Trace-element concentrations in erodible soils. *Atmos. Environ.*, 16 : 171-176.
- [2] Schütz L., Sebert M. (1987). Mineral aerosols and source identification. *J. Aerosol Sci.*, 18; 1 : 1-10.
- [3] Coudé-Gaussen G. (1981). Etude détaillée d'un échantillon de poussières éoliennes prélevé au Tanezrouft, le 10 décembre 1980. *Recherches géographiques à Strasbourg*, 16/17, pp. 121-130.
- [4] Yaalon D.H., Ginzbourg D. (1966). Sedimentary characteristics and climatic analysis of easterly dust storms in the Negev (Israel). *Sedimentology*, 6 : 315-332.
- [5] Yaalon D.H., Ganor E. (1979). East Mediterranean trajectories of dust carrying storms from the Sahara and Sinai. in Morales C. Ed., *Saharan Dust : Mobilization, Transport, Deposition*. Wiley, Chichester, UK., pp. 187-193.
- [6] 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, pp. 167-184.
- [7] Gomes L., Bergametti G., Coudé-Gaussen G., Rognon P. (1990). Submicron desert dusts : a sand-blasting process ? *J. Geophys. Res.*, 95, D9 : 13927-13935.
- [8] Paquet H., Coudé-Gaussen G., Rognon P. (1984). Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19 et 35° de latitude Nord. *Rev. Géol. dyn. Géogr. phys.*, 25; 4 : 257-265.
- [9] Conrad G. (1969). L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. CNRS, CRZA, 10, 527p.
- [10] Cour P., Duzer D. (1976). Persistance d'un climat hyperaride au Sahara central et méridional au cours de l'Holocène. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.* (2); 18 : 175-198.
- [11] Schülz E. (1984). The recent pollen rain in the eastern central Sahara. A transect between northern Libya and southern Niger. *Palaeoecol. of Africa*, 16 : 245-253.

7

Les poussières proximales et distales

Mobilisées au Sahara ou à sa périphérie immédiate, les poussières peuvent parvenir sur les confins septentrionaux et occidentaux de l'Afrique ou se déplacer sous forme de brume sèche ou d'expulsion au-dessus de la mer et au-delà. Lors de tels trajets, leurs caractéristiques originelles vont se modifier.

Sur les marges maghrébines du Sahara, les poussières ont un faciès *proximal* encore peu transformé. En revanche, des modifications plus importantes existent dans les poussières sahariennes lointaines prélevées sur l'Europe, conduisant à définir un faciès *distal*. Entre les deux faciès, les poussières piégées sur filtres aux Canaries ont un caractère proximal, à faible distance du désert, mais avec une contamination sensible par des apports insulaires et marins.

Les poussières proximales

Les caractères sédimentologiques

Des prélèvements ont été effectués lors de chutes de poussières en divers sites nord-africains : Rabat (Mars 1983), Souss (Octobre 1984), Gabès1 (Février 1984), Gabès2 (Mai 1984), Gabès3 (Mai 1984), Annaba (Avril 1987), Oran1 (Avril 1987), Oran2 (Avril 1987). Ces poussières ont été recueillies en quantités variables, parfois insuffisantes pour les soumettre aux analyses sédimentologiques habituelles.

La distribution granulométrique est illustrée par les courbes granulométriques cumulatives (Fig. 30). D'allure commune aux matériels éoliens fins, le tri varie suivant l'importance de la fraction argileuse $< 2 \mu\text{m}$ (2 à 30 %). Cette fraction atteint, dans le cas d'Annaba, près de 2 % d'argiles $< 0,2 \mu\text{m}$.

Toutefois, ces poussières appartiennent surtout à la fraction limoneuse ($\geq 70 \%$). Si la courbe des unes est redressée, relevant majoritairement des limons grossiers (20-50 μm), la partie centrale de la courbe des autres est plus rectiligne et moins redressée du fait d'abondants

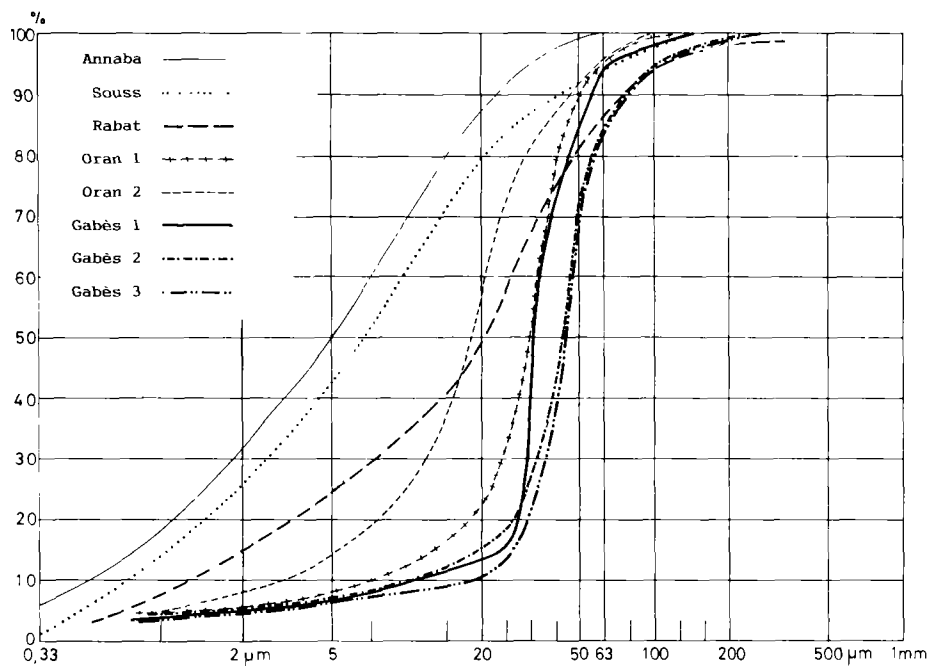


Figure 30. – Les courbes granulométriques cumulatives de poussières proximales prélevées au Maghreb.

limons fins (2-20 μm). Les courbes de Gabès, Oran1 et, à moindre titre, Oran2 font partie des premières alors que celles de Rabat, Souss et Annaba sont du second groupe. Parmi les indices granulométriques (*Tableau XXIII*), les médianes entre 5-40 μm confirment bien la place d'ensemble de ces poussières dans la classe limons. L'écart-type SO_2 souligne le mauvais classement de Rabat, Souss et surtout Annaba lié à leur forte fraction argile-limon fin. En revanche, les échantillons oranais et tunisiens sont bien classés, surtout Gabès1, ce qui est corroboré par les $\text{Qd}\Phi$. Pour l'indice de dissymétrie, 3 cas se présentent :

Tableau XXIII. – Les indices granulométriques de poussières proximales.

Ech.	Md	Mz	SO_2	Sk	Kg	$\text{Qd}\Phi$
Souss	11	6,4	1,58	-0,15	0,96	1,06
Rabat	25	5,5	1,61	0,17	1,04	0,99
Annaba	5	8,1	2,16	0,20	0,91	1,5
Gabès 1	32	4,8	0,93	0,08	3,68	0,25
Gabès 2	40	4,7	1,04	0,26	2,35	0,40
Gabès 3	40	4,6	1,06	0,28	3,01	0,35
Oran 1	32	5,2	1,15	0,40	2,64	0,35
Oran 2	18	5,9	1,60	0,27	1,98	0,60

— *Sk négatif*, cas de la poussière de Souss, où l'asymétrie négative indique la légère prépondérance du stock fin sur le grossier

— *Sk positif* dans les autres poussières (sauf Gabès1) où les populations grossières sont supérieures aux fines d'après l'asymétrie positive

— *Sk proche de 0* pour Gabès1, cas assez rare d'une distribution platykurtique avec un équilibre entre les fines et grossières confirmant un tri poussé.

Enfin, d'après leurs indices d'acuité $K_g < 1$, la partie médiane des stocks de Souss et Annaba n'est pas mieux classée que les extrêmes, en accord avec un mauvais tri suggéré par les courbes cumulatives et d'autres indices, et avec la finesse des matériels. Un $K_g > 1$ indique un meilleur classement de la partie centrale du stock des autres poussières, mais Gabès1 se distingue à nouveau par un indice très élevé.

Dans la fraction minéralogique < 2 mm, le minéral dominant est le quartz (47 à 75 %), surtout dans les poussières du Sud-Tunisien. La constance et l'abondance de calcite (15 à 30 %) sont notables et la dolomite (0 à 15 %) est un bon traceur de l'origine saharienne. Dans la fraction argileuse, le minéral le plus abondant et constant est l'illite (20-70 %) avec un rôle notable de la kaolinite (0-20 %). La palygorskite n'existe fortement qu'à Oran (30-40 %), en liaison avec la source commune des deux prélèvements, le piémont de l'Atlas saharien.

Discussion

Quelle est la *provenance de ces poussières* ? Tous ces traits minéralogiques évoquent ceux des poussières locales d'El Abiodh Sidi Cheikh (*Tableau XVI*), même si les résultats respectifs ne sont pas toujours aisément comparables dans le détail. Les nombreux points communs poussent à considérer que ces poussières proximales sont originaires du Sahara septentrional et de ses confins nord-africains, ce que l'étude météorologique de certaines de ces poussières confirmera. En fait, l'origine géographique de ces poussières proximales paraît bien coïncider avec celle du *groupe nord-saharien* de poussières locales mis en évidence par la précédente étude minéralogique des deux transects. D'après Paquet *et al.* [1], ces poussières locales ont un cortège illite/chlorite/interstratifiés gonflants de 70-75 %, accompagné par les kaolinite (15 %) et palygorskite (10-15 %). Dans les poudres, les taux de calcite varient entre 40-50 %, mais le quartz ne dépasse pas 16-23 %. Ces poussières locales ont été minéralogiquement corrélées avec les substrats sous-jacents du Maghreb méridional et du piémont saharien de l'Atlas.

Compte-tenu de l'analogie minéralogique entre ces poussières locales et les poussières proximales étudiées ici, il est légitime d'avancer que ces dernières dérivent des poussières locales de l'extrême-Nord du Sahara et du Sud du Maghreb et que, comme elles, elles ont été alimentées par les substrats de ces régions. On a là, avec des poussières proximales, un excellent exemple de l'identification d'une région-source désertique par l'intermédiaire de caractères sédimentologiques dérivés de poussières locales, dans le cadre d'une investigation conforme à une démarche suggérée précédemment.

D'après la comparaison granulométrique des poussières proximales et locales, il y a glissement des premières vers les fractions fines traduisant évidemment un *affinement du matériel en fonction de la distance parcourue* depuis la source désertique. *Le caractère limoneux des poussières proximales est sans doute leur critère majeur d'identification* au sein des autres

poussières sahariennes, ce qui n'exclut certes pas l'éventualité de recouvrements granulométriques entre les 2 familles. Ainsi, Gabès3 (Fig. 30) a une courbe cumulative vraiment proche de la *poussière locale* d'El Abiodh, il est vrai particulièrement fine (Fig. 24). Au sein des poussières proximales, si les plus fines sont mal classées (sous-faciès Annaba/Souss), les plus grossières le sont très bien, parfois excellentement (comme Gabès1). *Il faut chercher l'explication de ces différences granulométriques dans les compositions minéralogiques contrastées de ces 2 sous-faciès de poussières proximales.* En effet, les poussières proximales fines ont les plus forts taux d'argiles minéralogiques, alors que les poussières proximales grossières sont les plus riches en quartz. Au sein des poussières locales du Nord du Grand Erg Occidental, l'abondance de fines de nature argileuse est due à la fragmentation d'agrégats argileux grossiers dans la pellicule rousse, processus conduisant à la mobilisation de particules fines argileuses très fines mais peu triées. Il en résulte nécessairement *une poussière minéralogiquement argileuse, de caractère granulométrique argile/limon fin dont le matériel mal classé se déplace en bon équilibre avec sa dynamique de transport* (courbe granulométrique de type logarithmique). Compte-tenu de l'importance de ses argiles minéralogiques et de la finesse d'un matériel mal classé, le type Annaba/Souss doit s'expliquer de cette façon, illustrant au sein des poussières proximales un sous-faciès fin, mal classé et de nature argileuse. Au contraire, *les poussières proximales bien classées et assez grossières dérivent du tri poussé d'un matériel quartzeux*, attesté par leur dominante minéralogique. Elles sont un matériel résiduel plus fin issu du vannage de sables quartzeux, dont la chute s'effectue par excès de charge (courbe de type parabolique). Pour les poussières de Gabès répondant à ce sous-faciès grossier, on envisage évidemment comme source l'Est du Grand Erg Oriental dont on a noté la parenté des grains irréguliers et allongés avec ceux des loess des Matmata. Dans le même esprit, *il est essentiel de souligner la coïncidence granulométrique entre la fraction sableuse de ces poussières actuelles de Gabès et celle des loess des Matmata* : c'est l'un des arguments les plus solides à l'appui de la thèse de la mise en place de ces dépôts par des chutes de poussières issues du vannage des sables quartzeux du Grand Erg Oriental.

Donnant une portée générale aux considérations précédentes, *il paraît possible de déduire de la simple courbe granulométrique cumulative de poussières d'origine saharienne, la nature minéralogique de leurs constituants* : une courbe redressée (de type parabolique) et à médiane assez grossière suggèrera un matériel où le quartz (et/ou les minéraux résistants) domine; une courbe inclinée et rectiligne (de type logarithmique) à médiane fine suggèrera au contraire un matériel où les particules de minéralogie argileuse abondent. Il faut retenir ces conclusions pour l'étude des poussières distales, sachant que les caractères des poussières proximales d'Oran vont déjà dans ce sens.

Une chute différentielle des poussières s'effectue en fonction de leur minéralogie. Si Oran1 a plus d'affinité granulométrique avec le sous-faciès Gabès1, Oran2 s'apparente à celui d'Annaba (Fig. 30) : en effet, l'échantillon Oran2 est plus argileux que celui d'Oran1. Comme les 2 prélèvements ont été recueillis à 24 h d'intervalle dans le même *sirocco*, ce sont donc les poussières grossières, quartzueuses, qui ont chuté d'abord, sans doute par excès de charge, alors que les poussières argileuses, plus fines et en meilleur équilibre avec le courant transporteur, n'ont sédimenté que le lendemain. *Il y a donc eu, au sein d'un lithométéore proximal, une ségrégation de la chute des poussières en fonction des deux facteurs convergents : la granulométrie des particules et leur minéralogie.*

Les poussières proximales évoluées des Îles Canaries

L'archipel des Canaries offre la particularité géographique évidente, mais capitale pour l'étude de l'allochtonie des poussières, de son *insularité*. De plus, le substrat y est volcanique (essentiellement basaltique à Fuerteventura) offrant un argument décisif pour assurer du caractère minéralogique «discordant» de quartz déjà repérés dans les sols et dépôts [2, 3] et y affirmer des apports éoliens sahariens [4, 5, 6]. La connaissance du passage de lithométéores sur ces îles situées sur la bordure nord de la principale zone d'expulsions sahariennes et de sédimentation éolienne sur l'Atlantique (la *Dunkelmeer* d'Ehrenberg [7]), est ancienne et des chutes de poussières y ont été précocément étudiées [8].

Toutes ces raisons, associées à l'étude de la contribution éolienne aux sols et dépôts quaternaires des Canaries orientales et à sa signification paléoclimatique, ont conduit à prélever des poussières à l'impacteur en cascade à Fuerteventura, à 100 km seulement de la côte africaine. L'étude sédimentologique de ces poussières a été associée à celle des dynamiques météorologiques de transport, dans le cadre de recherches intégrées ayant déjà donné lieu à publication [9, 10, 11]. A proximité du désert saharien, les poussières prélevées à Fuerteventura ont un type proximal. Toutefois, d'après bien des caractères minéralogiques et chimiques, la question d'une contribution locale, insulaire et marine, s'y est souvent posée.

Les poussières prélevées à Fuerteventura du 12 au 19 avril 1984

Le prélèvement à l'impacteur en cascade a eu lieu sur la terrasse d'un immeuble (20 m d'altitude) de Puerto del Rosario à l'Est de l'île. Des études convergentes (imagerie satellitaire, trajectographies des masses d'air, analyses chimiques et minéralogiques, examen au MEB/EDS) ont été menées pour identifier l'origine géographique et les caractères sédimentologiques du matériel des filtres. Cette méthodologie [10] est nouvelle car la mise en évidence d'un lithométéore et de son suivi ne s'était appuyée jusqu'ici que sur son expression visuelle dans les différents canaux de l'imagerie satellitaire.

L'évolution antérieure à la période d'échantillonnage

Il a fallu examiner la situation atmosphérique dès le 6 Avril pour comprendre l'évolution. Les informations de NOAA 7 et la comparaison de 3 canaux de NOAA 7 (2, 3, 4) du 6 Avril à 15 h 36 TU délimitent l'expulsion de poussière et son vortex d'environ 150 km de diamètre. Le canal 3 met en évidence la structure hétérogène du lithométéore. Le 7, le nuage n'est plus visible sur NOAA. Météosat II a permis d'apprécier la dynamique du lithométéore, montrant en IR (6 Avril, 9 h 00 TU) son extension sur la façade du Sud-Marocain. Le panache quitte le continent entre les caps Sim et Rhir (Maroc), d'après Météosat et NOAA. Sur les images VIS 1 + 2 de 9 h 30, 12 h 30 et 15 h TU, le lithométéore progresse vers les Canaries (*Fig. 31*), mais ne se discerne plus ensuite. Les informations chimiques et minéralogiques et le calcul des trajectographies ont donc été nécessaires pour comprendre l'évolution lors de l'échantillonnage.

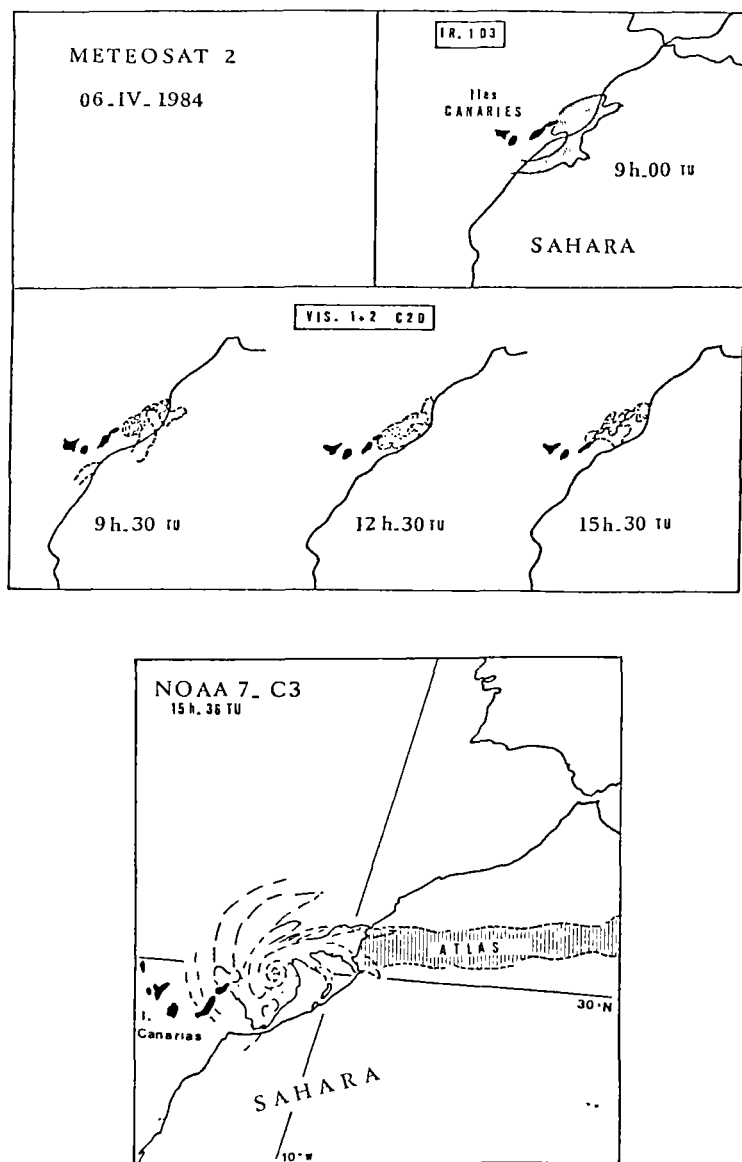


Figure 31. – L'expulsion de poussières du 6 avril 1984 d'après NOAA 7 et Météosat 2. A) NOAA 7, canal 3; B) Météosat 2, images IR et VIS 1+2.

Les enseignements de la chimie et des trajectographies

Les concentrations globales des aérosols ont caractérisé 3 périodes durant cet échantillonnage (Fig. 32-A) : phase 1 de fortes concentrations (Si) $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Al $> 0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) du 12 Avril à la nuit du 14, avec un maximum le 14; phase 2 de faibles concentrations (Si, $210 \text{ ng}/\text{m}^3$; Al, $85 \text{ ng}/\text{m}^3$) du 15 au matin du 17, correspondant au bruit de fond atmosphérique de l'Atlantique;

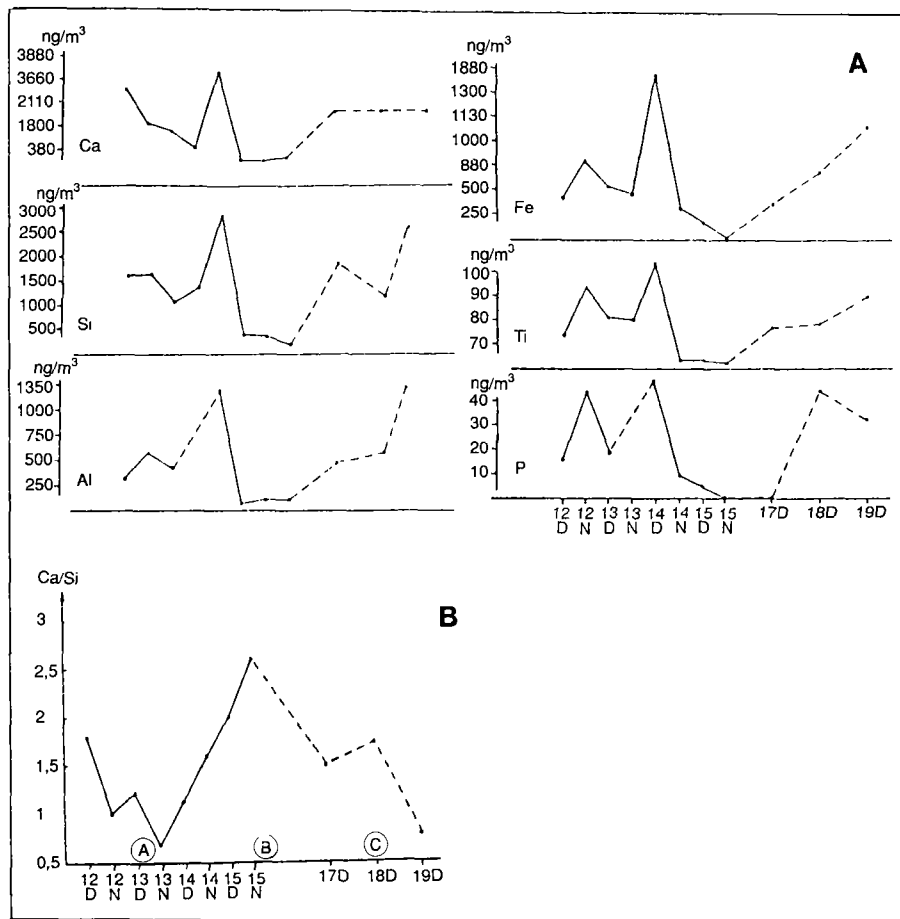


Figure 32. – La variation de concentration des éléments chimiques (Ca, Si, Al, Fe, Ti, P) des poussières prélevées à Fuerteventura pendant l'épisode du 12 au 19 avril 1984 (D : jour, N : nuit).

phase 3 de fortes concentrations du 17 matin au 19. Les variations du rapport Ca/Si illustrant ces 3 phases (Fig. 32-B) sont en opposition avec celles des 2 éléments pris isolément (Fig. 32-A). Aussi, les fortes valeurs du rapport durant la phase 2 de faibles concentrations indiquent une origine marine du Calcium, tandis que des variations parallèles de Ca et des éléments terrigènes (Al, Si, Fe) pendant les phases 1 et 3 de fortes concentrations suggèrent l'origine africaine de Ca.

Sur 7 trajectographies finissantes à 925 hPa pour la période d'échantillonnage (12 au 18 Avril à 12 h GMT) se dégagent 2 périodes : du 12 au 16, l'origine est océanique; les 17 et 18, il y a une possible origine continentale. Ces 2 périodes concordent avec les phases 2 et 3 mises en évidence par la chimie.

Il a fallu approfondir la démarche pour expliquer la phase 1 à rapport Al/Si très élevé. L'expulsion de poussières vue le 6-IV sur Météosat et NOAA 7 a guidé la recherche. Le départ de 4 trajectographies commençantes (du 6 Avril 12 h au 13, 12 h) est la limite atteinte par le lithométéore avant sa disparition des images satellitaires. D'abord nul, le nuage accompagne ensuite un flux de Sud puis s'opère une nette divergence : une partie du nuage va vers l'Est, tandis que l'autre s'oriente à l'Ouest (Fig. 33), revenant finalement vers les Canaries et l'Afrique, responsable de la phase 1 riche en poussières, après un voyage de 6 jours sur l'océan... Pour mieux comprendre la phase 3, 4 autres trajectographies finissantes arrivant le 18 Avril sur Fuerteventura indiquent la provenance africaine d'un second lithométéore et son itinéraire depuis l'Ouest algérien *via* le Maroc saharien (Fig. 34).

Les recherches minéralogiques et micromorphologiques

L'évolution minéralogique pendant les trois phases : pour la phase 1, la minéralogie par diffraction des RX sur les filtres et les observations au MEB/EDS sur les filtres et particules recueillies dans l'entonnoir d'entrée de l'impacteur ont mis en valeur des quartz, de très petites

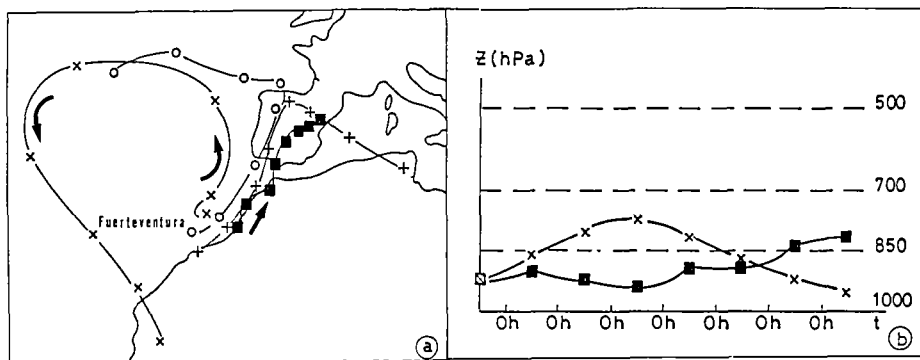


Figure 33. — Trajectographies commençantes calculées du 6 au 12 avril 1984. A) depuis l'endroit où le lithométéore n'a plus été visible par satellite; B) les altitudes atteintes par les masses d'air.

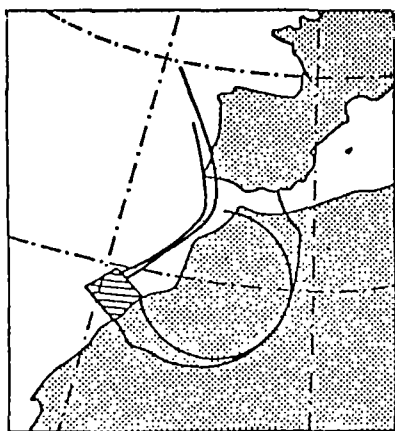


Figure 34. — Trajectographies finissantes arrivant au large de Fuerteventura (Canaries) calculées pour le 18 avril 1984.

tailles surtout (étage 5 des impacteurs), et de la palygorskite. Lors de la phase 2, il y a prépondérance des constituants argileux, dont les illites-micas (au MEB, il y a surtout la biotite parmi les micas). En phase 3, la minéralogie retrouve les constituants de la phase 1, avec en plus l'augite. Les quartz fins sont moins abondants mais les teneurs en calcite élevées.

Les observations micromorphologiques consacrent le caractère saharien des phases 1 et 3. Sur les filtres, la taille des particules varie entre 0,5-10 μm , principalement 2-5 μm , dimensions de nombreuses poussières carbonatées (cristaux de micrite altérée, carbonates d'Al), de particules de gypse, albite, quartz, hématite et de nombreux agrégats floconneux alumino-silicatés, potassiques et ferreux. Des particules de forme quelconque correspondent à des argiles micacées. D'autres observations ont également concerné des grains plus gros déposés sur l'entonnoir de l'impacteur. Mesurant 20-80 μm en moyenne, ils sont façonnés, voire arrondis sauf quelques quartz anguleux ou micas à bords rebroussés. A ces grains composés de carbonates et phosphates de Ca, d'oxydes de Fe, de feldspaths potassiques altérés s'ajoutent des fragments végétaux et des particules de *microcodium*. Des observations très significatives à ces tailles concernent des grains de quartz roulés, orangés d'après leur examen morphoscopique, avec en surface, de nombreux microfaçonnements issus d'une éolisation énergétique ou une pellicule de silice amorphisée ou un revêtement argileux. Tout aussi intéressants, de typiques grains éolisés de palygorskite dont les fibres tapissent aussi des minéraux variés.

Discussion

Les résultats convergents de l'étude météorologique, de l'analyse chimique et minéralogique, de l'observation micromorphologique font conclure à l'arrivée de poussières sahariennes lors des première et dernière phases. D'après l'évolution visible sur images satellitaires et l'abondance des petits quartz, les poussières de la phase 1 venaient de zones à processus éoliens très actifs, domaine sans couvert végétal continu comme la plaine alluviale du Souss, recouverte

localement par des dunes, d'où est venue l'expulsion du 6 Avril 1984. En revanche, les teneurs moindres en quartz fins, la richesse en palygorskite et calcite de la phase 3 résultent d'une provenance depuis les domaines calcaires et hamadas des confins maghrébins et du Nord-Ouest saharien. Ces 2 cas de poussières sur les Canaries ont donc été très propices à la localisation de régions-sources peu lointaines de la mer, authentifiant le caractère proximal des poussières.

Les poussières de la phase 1 ont effectué un trajet long et complexe au-dessus de la mer avant de revenir vers les Canaries et l'Afrique. Ce phénomène de retour s'intègre bien au modèle de budget sédimentaire des poussières sahariennes de Schütz *et al.* [12] où 60 millions de tonnes seraient rabattues sur l'Afrique sur les 260 millions annuellement exportées. Vu ce détour, les poussières sahariennes se maintiennent longtemps en suspension, même dans une fraction grossière : des quartz examinés au MEB dépassaient les 100 μm après un trajet de 6 jours, sachant que la masse d'air est montée à 750 hPa, soit vers 3000 m d'altitude dans le Saharan Air Layer (Fig. 33-B).

Enfin, d'après l'observation au MEB (confirmée par les taux de Si de l'analyse chimique), des quartz extrêmement fins, microniques à submicroniques ont été pour la première fois signalés dans des aérosols.

Entre les deux chutes de poussières sahariennes, la phase 2 est bien particulière car y triomphe un fond atmosphérique de nature locale et océanique. En fait, ce fond est continu et les poussières sahariennes se sont simplement surimposées lors des autres phases. Il est caractérisé par de faibles apports de zéolite, pyrolusite et augite d'origine volcanique, évidemment autochtones et, vu la présence d'augite en phase 3, la contribution atmosphérique insulaire se maintient pendant les expulsions sahariennes. Les gypse, halite (en gros cristaux vus au MEB) et autres sels (KCl, trona, sulfates etc.) ont une connotation marine, vu l'environnement océanique des prélèvements. Ainsi, dès leur stade proximal, les poussières sahariennes se transforment par perte d'une partie de leur capital qui sédimente et prise en charge d'apports non désertiques.

Les poussières prélevées à Fuerteventura du 16 au 31 Juillet 1985

Le but de cette recherche a été de déterminer les régions-sources de poussières pendant l'été, par circulation atmosphérique différente de celle du printemps, mais avec une méthodologie comparable. L'échantillonnage a eu lieu sur une terrasse d'immeuble à Corralejo sur le littoral nord de Fuerteventura, du 16 au 31 Juillet 1985. Quand la charge des filtres était suffisante, l'échantillonnage par filtration totale s'est fait toutes les 12 h, distinguant des prélèvements de jour et de nuit.

Les enseignements des trajectographies, de la météorologie et de la chimie

Les trajectographies finissantes (Fig. 35) à 925 hPa indiquent une influence océanique de secteur Nord pendant l'échantillonnage, sous système alizéen maritime. Les advections africaines n'apparaissent que sur les trajectoires à 850 hPa, ce qui s'explique par le contraste thermique vertical des masses d'air. Elles sont complexes, mais on identifie deux zones-sources par les trajectographies : 1) l'une septentrionale venant du Sud de l'Atlas marocain (Fig. 35, n° 9, 10, 11); 2) l'autre plus méridionale (Fig. 35, n° 2, 6, 7, 8, 17, 18).

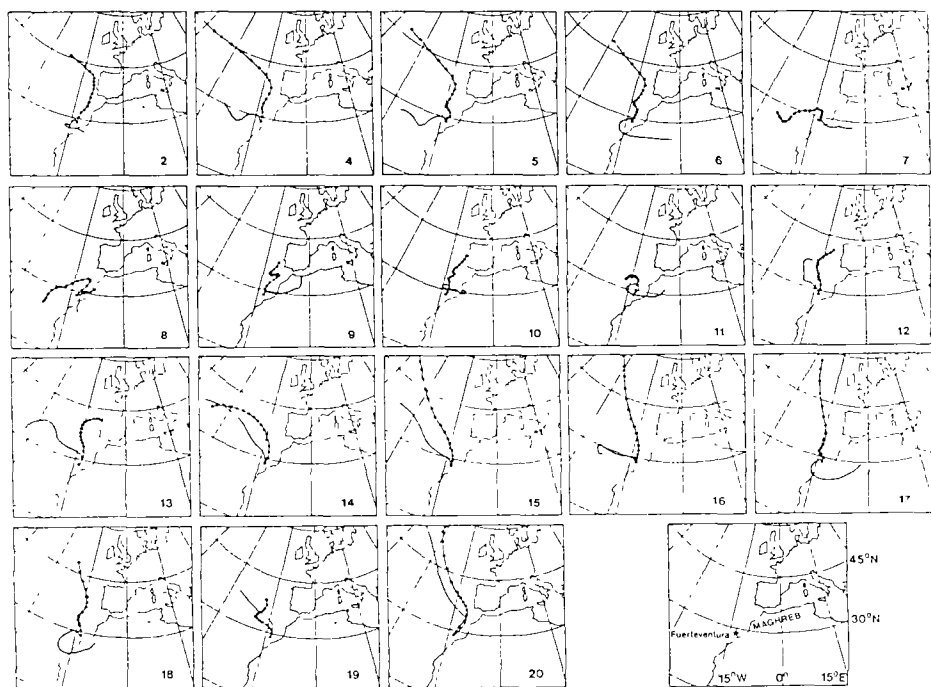


Figure 35. — Trajectographies finissantes pour les deux niveaux barométriques (925 hPa : trait pointé ; 850 hPa : trait fin) calculées du 16 au 31 juillet 1985.

Les BME, les néphanalyses d'après Météosat, l'imagerie satellitaire (NOAA 9 et Météosat) en canal VIS sur la mer et IR sur la terre, et les trajectographies *précisent l'origine des masses d'air* : 1) du 16 au 18, un nuage de poussières se déplace de la boucle du Niger vers le Nord et s'infléchit vers l'Ouest pour quitter le continent au Cap Juby, la nuit du 18-19 et le 19 (Fig. 35, n° 2); 2) le 21, une concentration de poussières partant du Tafilalet suit le piémont atlasique vers l'Atlantique et se manifeste le 24 par un lithométéore visible sur les Canaries sur NOAA 9 (Fig. 35, n° 9, 10, 11); 3) du 24 au 29, un lithométéore se déplace de Gao au Sahara central où, pris en charge vers l'Ouest par une autre masse d'air, il oblique vers le littoral mauritanien pour être ensuite dévié sur les Canaries (Fig. 35, n° 17, 18); 3) entre ces arrivées d'air saharien, les Canaries sont soumises aux influences océaniques, voire littorales du Maroc septentrional (Fig. 35, n° 4, 5; 12, 14, 15, 16; 19, 20). Une autre expulsion de poussières d'origine mauritanienne, non signalée par les données météorologiques, est sans doute parvenue aux Canaries du 21 au 23 Juillet d'après les trajectographies (Fig. 35, n° 6, 7, 8) et les observations micromorphologiques.

Afin d'étudier les variations de composition de l'aérosol lors de l'échantillonnage suivant son origine, on a repris une démarche déjà utilisée en Corse [13]. Sur les Canaries, 2 secteurs

«chimiques» ont été centrés à partir des trajectographies à 850 hPa (Fig. 36) : 1) un secteur A correspondant aux masses d'air océanique; 2) un secteur B concernant les masses d'air d'origine africaine. Le Silicium a été choisi comme traceur terrigène et le Soufre comme traceur d'activité anthropogénique. Les concentrations de Si et S sont plus basses pour les échantillons associés aux trajectographies océaniques. Mais si les concentrations en S sont identiques à celles connues en atmosphère océanique, celles de Si sont supérieures à celles d'atmosphère océanique en l'absence d'expulsion de poussières, ce qui suggère un apport local, confirmé par l'observation au MEB de particules argileuses.

Les concentrations de Si sont 2 fois plus élevées quand les trajectographies indiquent une origine continentale (Fig. 37-A). Or, pour préciser cette provenance, on note que S venant du Nord (du 30°N) a des concentrations de 3470 ng/m³ et seulement 908 ng/m³ au Sud (Fig. 37-B). Cette différence est liée à l'activité anthropique du Maroc septentrional, alors que le Sud du Maroc et la Mauritanie sont peu urbanisés et industrialisés.

D'autre part, les rapports Si/Al et Si/Fe ont un fort accroissement lors de poussières de source sahélienne. La comparaison de ces rapports avec ceux de poussières du Maroc nord-occidental captées en Corse et de poussières venant du Sahel le 18 Juillet 1985, montre de fortes similitudes. Par ailleurs, les poussières d'origine sahélienne ont une signature chimique où les fortes teneurs en Fe résultent de l'apport de sols ferralitiques; en effet, d'après les examens au MEB/EDS, les poussières originaires du Sahel abondent en particules argileuses avec Fe dominant ce qui n'est pas le cas des poussières du Maroc.

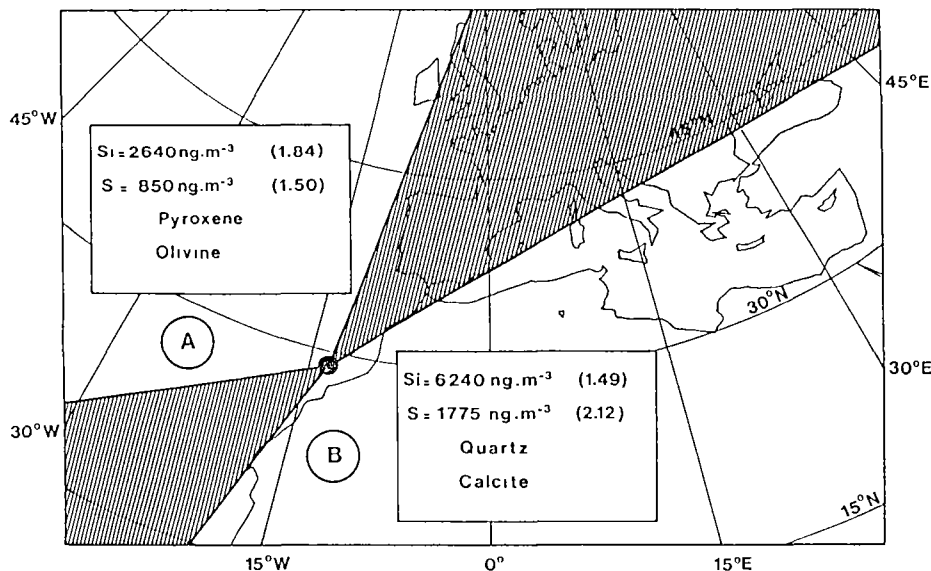


Figure 36. – Sectorisation des concentrations des éléments chimiques à partir des trajectographies à 850 hPa.

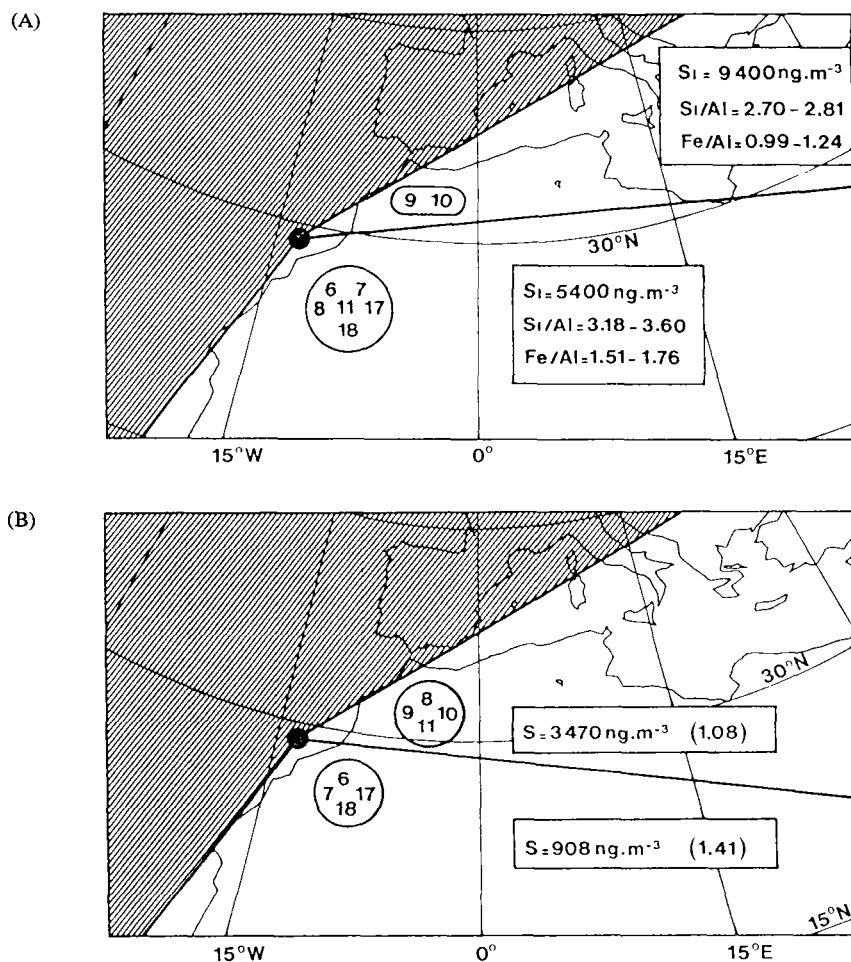


Figure 37. — Sectorisation sur le nord de l'Afrique des concentrations de Si (A) et de S (B) en fonction des trajectographies indiquant une origine africaine.

Les évolutions dans la concentration, la taille et la minéralogie des poussières

L'examen systématique au MEB des particules de tous les filtres, leur comptage sur 2 filtres et l'appréciation du taux de couverture des filtres ont permis de suivre l'évolution des concentrations, tailles et compositions des poussières pendant l'alternance phase maritime/insulaire et phase saharienne ou entre le jour et la nuit.

Tableau XXIV. – Les différentes contributions aux poussières des Canaries.

Contribution	Filtre 1	Filtre 10
Anthropogénique (billes Al, KCl, Ba, talc, fly ash)	10 %	4 %
Marine certaine/possible (gypse, KCl, composés argiles + gypse)	35 %	26 %
Local (pyrox., verres volc., ilménite, magnétite)	13 %	16 %
Allochtone (quartz, Fk, kaolinite, diatomée, palygorskite, dolomite)	13 %	16 %
Ubiquiste (carbonate de Ca, argiles, phyllites)	26 %	38 %

Au MEB/EDS, on a *compté et déterminé minéralogiquement* une soixantaine de particules sur les filtres 1 (nuit du 18-19 Juillet) et 10 (jour du 24). Certaines attributions sont retenues avec réserve vu le caractère complexe et énigmatique de certaines informations. Ainsi, certaines particules de KCl ont des caractères cristallins suggérant leur origine marine, alors que d'autres, sous forme de billes, sont plutôt anthropogéniques; de même, à côté de particules de gypse bien cristallisées, chimiquement typées, d'origine marine, il y a des particules plus problématiques composées de gypse et argiles indéterminables. D'autres attributions sont sans ambiguïté : les quartz, pyroxènes, billes anthropogéniques (Al et Ba), sans parler des dolomites et diatomées. Pour dépasser toute incertitude, on a globalisé les résultats (*Tableau XXIV*).

La composition des poussières des 2 filtres est assez proche, avec des apports soit allochtones, soit insulaires et marins : cette mixité d'origine, déjà apparue pour la première campagne de prélèvement, est donc la grande originalité des aérosols canariens. Mais la poussière du filtre 10 semble pourtant plus allochtone que l'autre : les allogènes dominent, ainsi que les ubiquistes où la proportion de «local» est *a priori* la même dans les 2 échantillons, ce qui implique une part allochtone supérieure dans le filtre 10. Le contexte des 2 prélèvements renforce cette opinion : le filtre 1 correspond à la fin du premier épisode sahélien, quand le fond continu local et marin se réaffirmait; au contraire, le filtre 10 a été prélevé au plus intense du passage sur l'île du lithométéore du Tafilalet, d'où des allochtones, mais aussi dans l'atmosphère un surcroît de carbonates de Ca érodés sur les contreforts atlasiques et les hamadas calcaires du Draa.

Les *taux de couverture des filtres* et la *taille des particules* ont été appréciés sur les clichés MEB de tous les filtres de la campagne. Au même grossissement, on a comparé l'importance du recouvrement en particules et la dimension des particules en employant la charte visuelle usitée en pédologie [14] qui estime à la fois taux de couverture en pourcentage et taille moyenne des objets (*Pl. 31*). Les dimensions des particules ont été calées sur images MEB à forts grossissements. Des tailles se sont ainsi dégagées, parfois en léger recouvrement, qualifiant la dimension moyenne des particules sur chaque filtre : 1) classe 1 : 10-15 μm ; 2) classe 2 :

8-12 μm ; 3) classe 3 : 5-10 μm ; 4) classe 4 : 4-8 μm . Les variations du taux de recouvrement et de la taille des poussières pendant la séquence illustrent remarquablement les phases déjà mises en évidence, exprimant la concentration plus ou moins grande en poussières de l'atmosphère de l'île (Fig. 38).

— le filtre 1 (nuit du 18-19 Juillet 1985), déjà décrit *supra*, a des caractères locaux et marins, des traces de pollution anthropogénique et aussi quelques petits quartz et allochtones. Correspondant à la fin de la première phase d'origine sahélienne (Fe souvent noté à l'EDS), il résulte d'une *traîne d'expulsion* à particules assez petites.

— le filtre 2 (jour du 19) est très peu chargé avec le matériel le plus fin de toute la séquence (cristaux de NaCl, de gypse et particules argileuses et carbonatées d'après le MEB). Ces traits sont autochtones et océaniques, en accord avec les trajectographies. On n'a pas analysé le filtre 3, accidentellement détruit, mais les échantillons 4 et 5 (20 Juillet et nuit du 20-21) ont des caractères minéralogiques et micromorphologiques peu différents du n° 2. Le filtre 4 a un faciès local typé, avec des particules argileuses dotées de titane, des pyroxènes, des particules déchiquetées d'illite-mica auxquels s'ajoutent les formes submicroniques géométriques de chlorures divers. Avec le n° 5 disparaissent les particules marines.

— les filtres 6, 7 et 8 (21 au 23 au soir) répondent à l'expulsion de poussières non décrites jusqu'à présent qui ont quitté l'Afrique par la Mauritanie. Les taux de recouvrement sont plus élevés, en rapport avec des poussières plus abondantes et grossières. Au MEB, on y observe

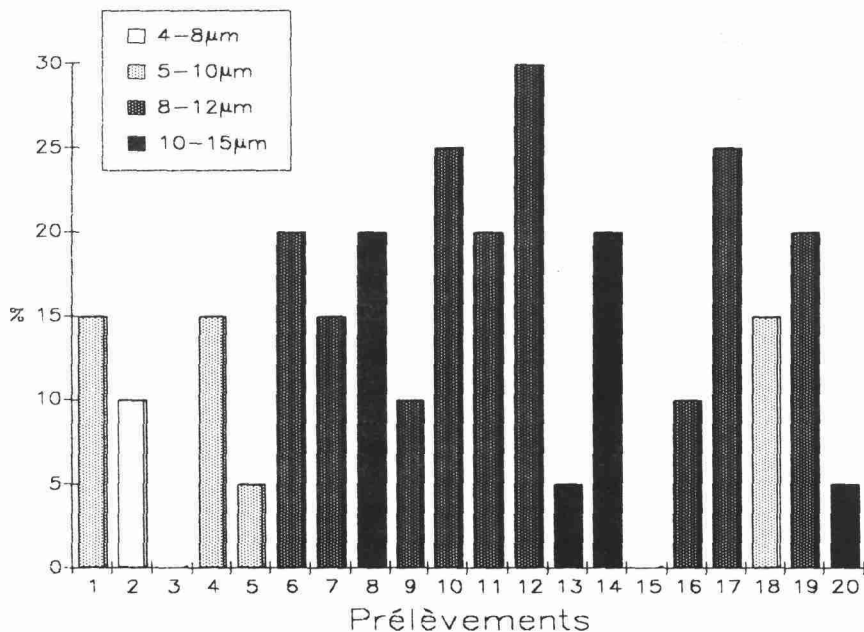
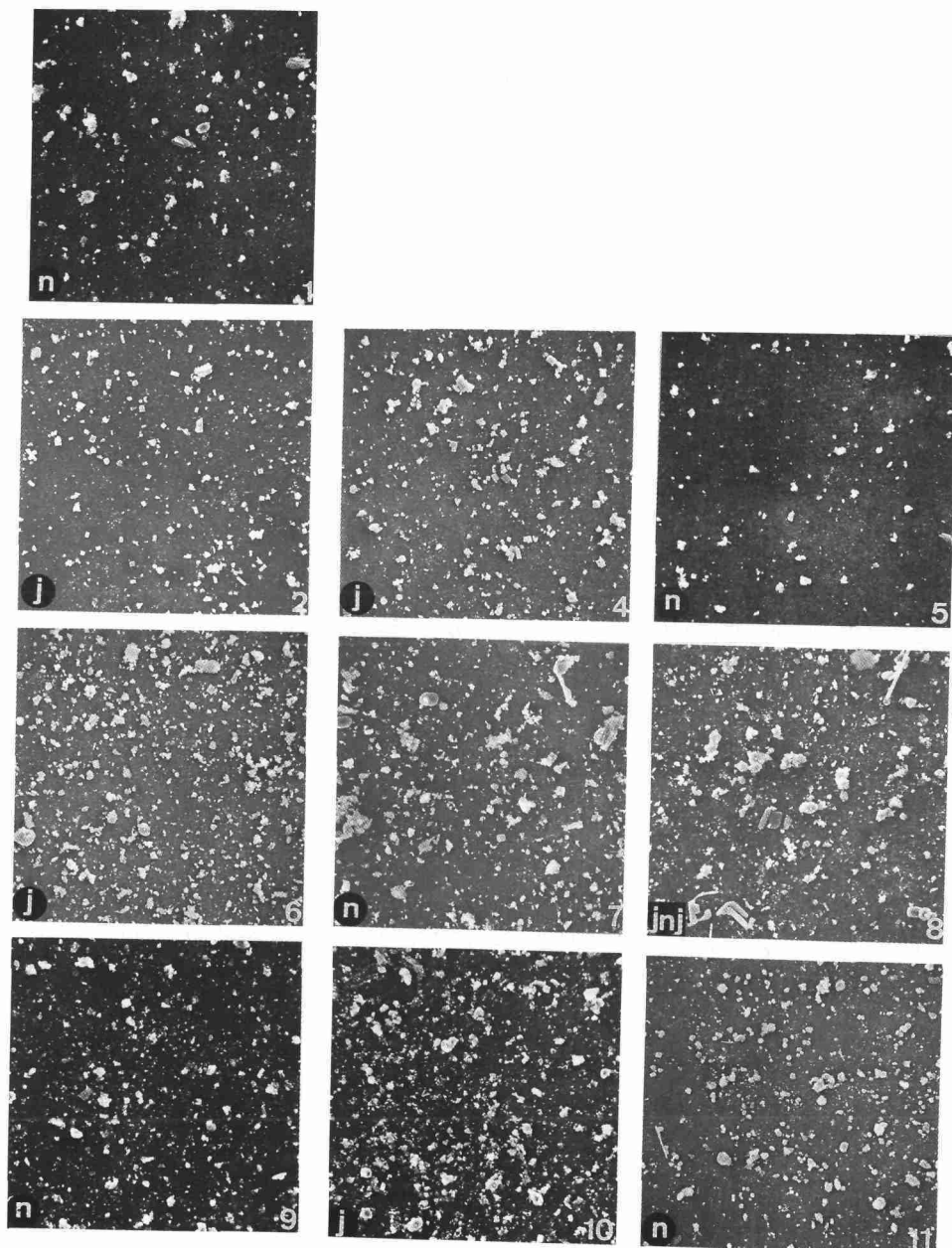


Figure 38. — Taux de recouvrement et taille des poussières prélevées sur filtres totaux du 18 au 31 juillet 1985 à Fuerteventura.



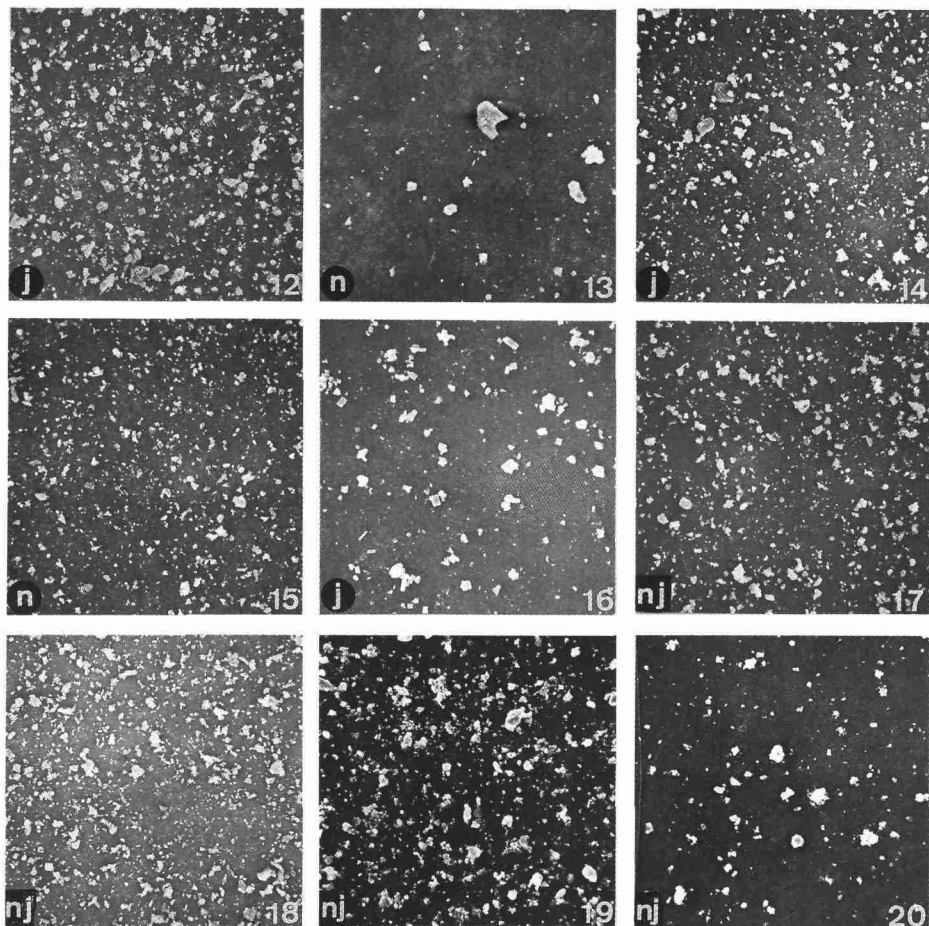


Planche 31. – Les poussières sur filtres totaux de la campagne d'échantillonnage du 18 au 31 juillet 1985 à Corralejo (Fuerteventura, Canaries). n : nuit, j : jour.

quelques très petits quartz, de grosses fibres de calcite, beaucoup de particules argileuses et des agrégats en chaîne. Les silicates de fer abondent dans le n° 8. Ces caractères suggèrent des poussières d'origine sahélienne mais une expulsion peu active d'après l'abondance des sels marins.

— le filtre 9 (nuit du 23-24) retrouve les traits marins et locaux (pyroxènes, mélanges titanés). Des billes de pollution attestent d'une reprise de la circulation de Nord.

— les filtres 10, 11, 12 (24 matin au 25 soir) ont des traits sahariens avec des particules fines de quartz «sales», de kaolinite, de diatomées, de carbonates de Ca et de dolomite, ce qui n'exclut pas d'après l'exemple du n° 10 (*cf. supra*), des témoins locaux (ilménite, ferromagnésiens) ou marins. C'est l'épisode du Tafilalt où, parmi les particules grossières des porte-filtres ont été recueillis des quartz souvent très gros.

— les filtres 13, 14, 15 et 16 (nuit du 25 au 27 soir) ont un cortège minéralogique local à particules assez grossières : sphènes, pyroxènes altérés et surtout olivines. Ces dernières, inconnues à Fuerteventura, abondent dans les basaltes de Lanzarote, île à une vingtaine de kilomètres au N-NE : c'est un excellent traceur du caractère local des poussières, en relation avec l'alizé.

— les filtres 17 et 18 présentent des quartz et nombreuses particules argileuses riches en Fe ce qui n'interdit pas les gypses, pyroxènes et chlorures du fond continu local et marin. Dans les particules grossières, les caractères allochtones sont corroborés par les grains carbonatés façonnés et roulés, les micas à bords rebroussés, diatomées et feldspaths. La concentration des poussières était très modérée car il a fallu exposer les filtres 2 fois plus longtemps. Il s'agit de la dernière arrivée de poussières sahéliennes.

— Le filtre 19 (nuit du 29 et journée du 30 Juillet) reproduit les traits de l'échantillon n° 1 : peu de particules, plus grossières toutefois, ambiance locale et marine mais traîne résiduelle de quartz du lithométéore antérieur. Le filtre 20 (nuit du 30-31) est comparable, avec des quartz et un fort cortège de carbonates de Ca et de dolomites visibles sur les filtres et dans les grains plus grossiers.

En définitive, il faut souligner, la remarquable coïncidence du déroulement de cette séquence micromorphologique et minéralogique avec l'évolution synchrone du total des éléments chimiques de la concentration atmosphérique.

Les *poussières diffèrent de jour et de nuit* indépendamment du processus plurijournalier, scandé par les arrivées de poussières sahariennes. L'étude sédimentologique des filtres oppose nettement les aérosols canariens suivant un cycle jour/nuit. La comparaison entre le n° 1 (nocturne) et le n° 20 (diurne) était déjà significative, mais on sent aussi des différences entre 2 prélèvements nuit/jour consécutifs, au sein d'un même épisode allochtone ou autochtone : le graphique évolutif a un tracé en dents de scie où les nuits ont des taux de recouvrement moindre et des poussières plus petites que le jour (*Fig. 38*), ce qui suggère des atmosphères nocturnes moins chargées en poussières. Selon toute vraisemblance, la cause en est un phénomène climatique local *brise de mer/brise de terre* habituel aux îles tropicales où, pour des raisons thermiques, le vent souffle de terre vers la mer pendant la nuit (le sol se refroidit plus par rayonnement et déperdition thermique) et *vice-versa* le jour. La brise nocturne suffit donc à contrôler sinon refouler les influences allochtones au sein des aérosols, d'où leur moindre concentration dans la basse atmosphère de l'île, et le croît relatif des influences locales et marines du fond continu.

Les poussières distales

Des auteurs ont étudié certains aspects de poussières lointaines, prélevées en Europe ou au Moyen-Orient, soulignant *l'ampleur des expulsions sahariennes vers le Nord, phénomène souvent sous-estimé par rapport aux exportations vers l'Atlantique tropical*, les seules prises en compte dans les modèles généraux sur le budget actuel des poussières sahariennes [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Ils ont souvent conclu sur la nécessité de prendre en compte ces apports éoliens dans les sols de l'Europe et du Moyen-Orient.

Poussées par des dynamiques météorologiques complexes, ces poussières distales quittent l'environnement des marges désertiques et traversent la mer. Leurs caractères sédimentologiques sont évidemment influencés par ce transport : *des traits notoirement sahariens s'atténuent ou disparaissent, et d'autres, ajouts lors du déplacement, viennent modifier les faciès initiaux.*

Les caractères sédimentologiques généraux de poussières distales prélevées sur l'Europe

Des prélèvements de poussières ont été effectués à : Villefranche/Mer (3 VII 1981), Montpellier/Montaud (30 V 1983), Vic de Bigorre (27 VII 1983), Madrid (20 II 1985), Lisbonne (20 II 1985), Caen1 (17 VIII 1987), Caen2 (17 VIII 1987), Trappes (7 V 1988), Amiens (7 V 1988) et Marne (7 V 1988).

Les caractères granulométriques des poussières distales

Si la faible quantité de matériel prélevé n'a pas toujours autorisé les analyses classiques, plusieurs échantillons ont malgré tout subi les procédures granulométriques. Pour le cas d'Amiens, on a pratiqué un comptage optique de la taille des particules sur le cliché MEB à faible grossissement d'un plot saupoudré de poussières [22]. Bien entendu, cette mesure n'a porté que sur les particules «visibles» au MEB et les particules submicroniques ont pratiquement échappé à l'investigation; la courbe d'Amiens ne considère donc que le *squelette granulométrique* au sens des pédologues, soit la granulométrie sans phase argileuse [23].

Sur 4 courbes cumulatives (Fig. 39), 2 (Montpellier; Vic de Bigorre), à granulométrie fine et pente inclinée, sont significatives des poussières distales prélevées en France, comparables à celles déjà décrites [19]. En revanche, le sous-faciès de Villefranche et d'Amiens est plus grossier, avec un aspect proche de poussières proximales. Ainsi se confirment, entre grands types de poussières, des recouvrements granulométriques déjà évoqués.

Pour comparer des données hétérogènes, les calculs des *indices granulométriques* ont été faits à partir des squelettes granulométriques. Aussi les médianes sont-elles un peu plus fortes que sur les courbes (Fig. 39). Les poussières de Vic de Bigorre et Montpellier ont évidemment les plus fines médianes (8-11 μm) et, d'après l'indice de dissymétrie ($Sk < 0$), le stock le plus fin y est très abondant. Dans les poussières à médiane plus forte (17-20 μm), le Sk positif traduit une fraction grossière dominante. Amiens et Trappes se distinguent par un indice d'acuité

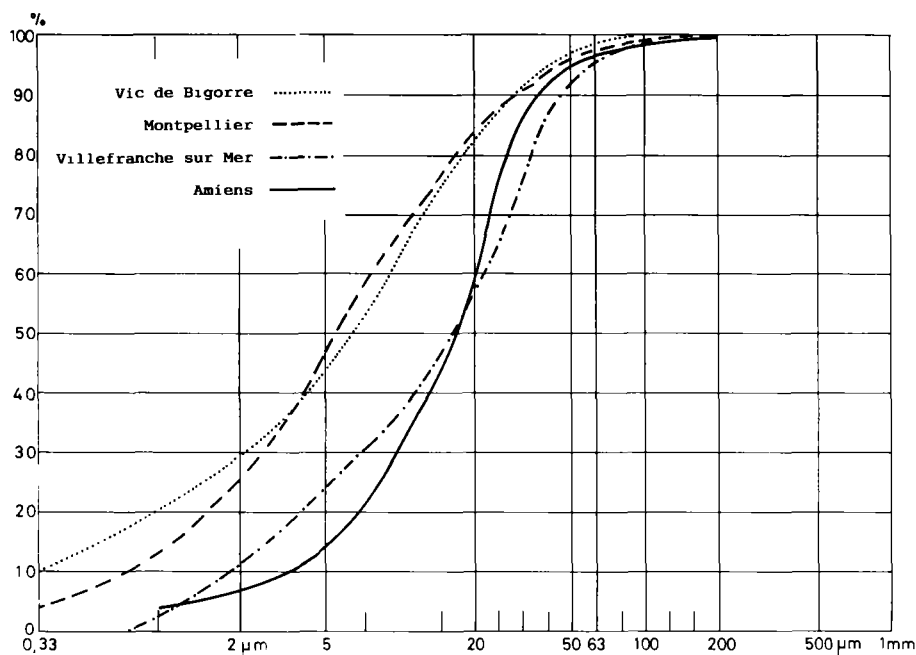


Figure 39. — Les courbes granulométriques cumulatives de poussières distales prélevées en France.

(Kg >1,15) confirmant le bon classement du centre du stock, alors que les autres poussières sont assez mal classées (Kg : 0,84-0,88).

Les caractères minéralogiques

L'extraction de la fraction $< 2\mu\text{m}$ s'est aussi heurtée à la faible quantité de matière de plusieurs échantillons. Mais des argiles minéralogiques suffisamment abondantes sont apparues sur les spectres de poudre. Les kaolinite, illite et palygorskite sont le cortège argileux commun à ces poussières, satisfaisant pour identifier une *origine saharienne*. Dans la minéralogie globale, le quartz (sans doute un peu surévalué par calcul, car seuls les taux de calcite ont été calés par calcimétrie) domine, accompagné par les feldspaths, calcite (10-40 %), parfois la dolomite et une fois le gypse : cette association est significative de la provenance désertique des poussières.

Les observations micromorphologiques

L'examen au MEB a principalement porté sur les poussières de Villefranche, Amiens et Trappes. A Villefranche, la composition chimique globale du plot à l'EDS correspond à une moyenne d'argile phylliteuse (Al, (Si) dominant, K, Ca, Fe, Ti). A Trappes et Amiens, on note

des phyllites potassiques et des grains composés d'argiles (Al, (Si), Fe; Al,(Si),K, Fe; Al, (Si), Ca, Fe); et aussi des mélanges carbonatés complexes et des agrégats de carbonates de Ca avec des grains de silice enchâssés. Dans ces 2 échantillons, les grains grossiers (40-50 μm voire beaucoup plus) sont souvent des quartz émoussés, recouverts d'un épais revêtement argileux (Pl. 32), accompagnés d'albites et feldspaths potassiques. A côté de ces minéraux dont les

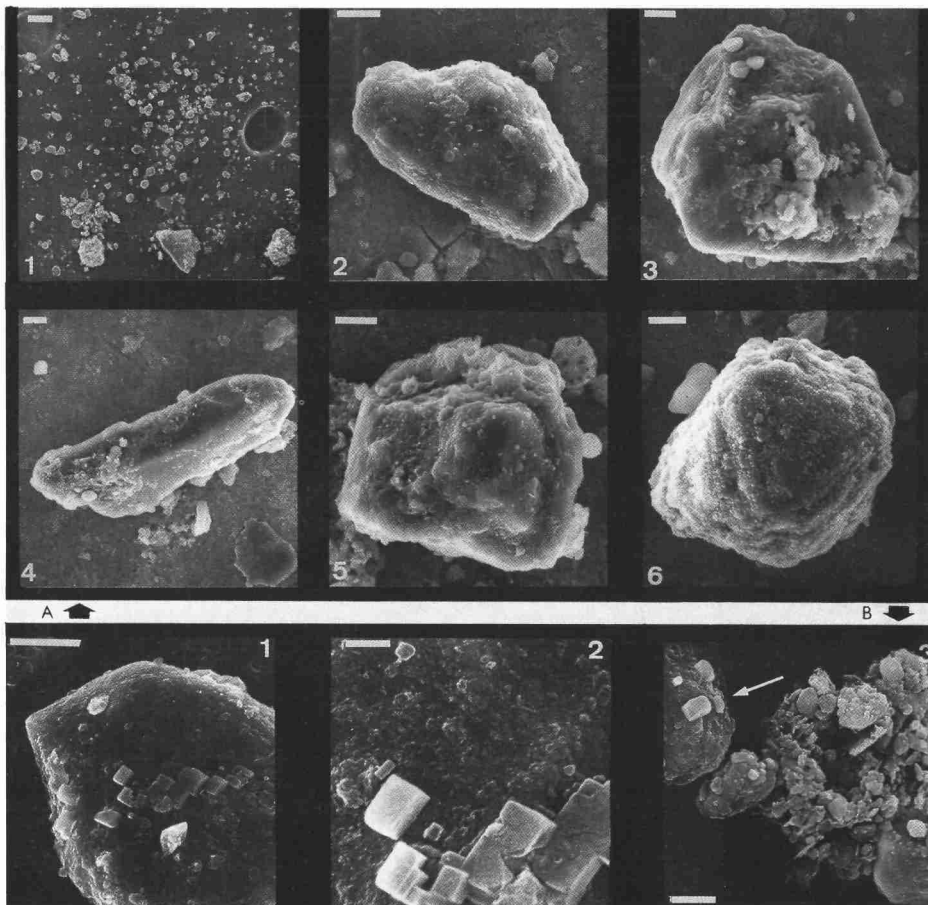


Planche 32. – Observations au MEB des poussières d'Amiens et de Trappes. A) le matériel: 1) vue générale, noter la présence de grosses particules de 50-100 μm , e = 50 μm , 2) quartz émoussé à épais revêtement argileux de type orangé désertique, e = 5 μm , 3) idem, e = 5 μm , 4) quartz altéré (bipyramidé?), e = 5 μm , 5) amphibole pédogénétisée, e = 5 μm , 6) carbonate de Ca arrondi et pédogénétisé, e = 5 μm . B) Les cristaux de halite en surface: 1) cristaux de sel sur un grain de quartz, e = 10 μm , 2) détail de la précédente, noter le caractère altéré des cristaux, e = 2 μm , 3) cristaux de halite non altérés sur un agrégat, e = 10 μm .

minéralogie et micromorphologie illustrent bien la provenance saharienne, apparaissent à Trappes et Amiens des particules de pollution industrielle et urbaine dont l'origine locale et régionale est évidente : billes de verre, scories et *fly-ashes*.

Par ailleurs, les pollen et fibres végétales sont assez nombreux dans le cas de Villefranche.

Les poussières d'Amiens ont comme première originalité quelques fragments coquilliers impossibles à identifier. Mais surtout, on voit sur certains grains de problématiques cristaux de halite : NaCl a pu s'acquérir lors du survol de l'océan par ces poussières, avant leur déviation vers la France septentrionale.

Un tel enrichissement par les aérosols marins, déjà souligné dans les Canaries, a été signalé pour des poussières sahariennes en Irlande [24]. Mais ce peut être aussi un caractère initial issu des sols évaporitiques très répandus dans la région-source de ces poussières, au Nord du Sahara algéro-tunisien. L'aspect altéré de certains cristaux de sel peut conforter cette hypothèse «longue», mais d'autres, très frais, vont dans le sens de l'hypothèse «courte»...(Pl. 32-B).

La question des particules «géantes» dans les poussières distales

L'occurrence de très grosses particules dans les poussières locales est banale et sans problème. Il a déjà été plus étonnant d'en récolter au-dessus des Iles Canaries où des quartz de 150-200 μm indiscutablement sahariens existent de plus dans les sols. Mais surtout on en voit dans des échantillons de poussières distales, comme à Villefranche/Mer, Trappes et Amiens. Ces particules «géantes» (80-100 μm , souvent plus), qui échappent d'ordinaire à la classe des aérosols atmosphériques, ont pourtant, à l'image de fréquents quartz orangés, des traits micromorphologiques et minéralogiques sahariens (Pl. 32-A). Des observations comparables ont été rapportées surtout sur micas, à l'Ouest des côtes africaines [25, 26, 27, 28]. Mais jusqu'à présent, un très long transport en suspension de telles particules était non seulement méconnu mais considéré comme incompatible avec les modèles physico-mathématiques classiques. Il faut désormais prendre en compte ces particules «géantes» très au-delà des aires désertiques et, en particulier, les comptabiliser dans les résultats chimiques globaux des aérosols atmosphériques dont elles étaient jusqu'à présent exclues car elles modifient tous leurs bilans. De même, dans une perspective sédimentologique, il faut envisager l'incidence de tels apports dans les sols et dépôts de lointaines zones de chute.

La «pluie rouge» du 8 novembre 1984 sur Paris

Contrairement aux cas précédents où seul un échantillon a permis l'étude sédimentologique de l'évènement, le cas de la chute de poussières sur Paris (8 Novembre 1984) s'insère dans une procédure de prélèvement continu dans le temps. Aussi les informations la concernant, comparées à d'autres données antérieures ou postérieures, permettent une étude diachronique de la séquence où elle s'insère. En outre, dans les autres cas, une certaine confusion inhérente à l'aspect circonstanciel des prélèvements a, de fait, existé quant aux conditions-mêmes de la fin du cycle des poussières : décantation sèche par simple gravité des particules en suspension, ou rabattement au sol par la pluie ? Or on dispose ici d'une série de prélèvements d'aérosols mais aussi de la pluie qui a rabattu les poussières.

Le mode de prélèvement et les circonstances météorologiques

Les prélèvements ont été effectués sur la terrasse d'une tour de Jussieu (Université Paris VII) à Paris, à 25 m d'altitude dans les conditions d'atmosphère urbaine. Les précipitations sont recueillies par un collecteur séquentiel automatique recevant 0,1 mm de pluie successivement dans chacun de ses 20 godets pendant la précipitation et éventuellement le reste de la pluie dans un 21^e godet [29]. Puis le contenu des godets est filtré (membrane nuclépore, filtre 0,4 μ m) pour collecter les poussières. Les aérosols sont prélevés en continu sur filtre total par un collecteur les renouvelant automatiquement chaque 6 h, pas d'échantillonnage bien adapté pour une chute de poussières. Cette méthode est développée *in Jaffrezo* [30].

L'étude météorologique de la période du 5-15 Novembre 1984 permet d'indiquer que les poussières sahariennes sont mobilisées par vent de sable sur le Chott Chergui (Algérie) le 5 Novembre. Les soulèvements se poursuivent les 6-7, au Nord du Grand Erg Occidental et sur les chotts sud-oranais. Une situation perturbée sur le Sud de l'Europe crée des aspirations vers le Nord, bien montrées par les trajectographies finissantes (*Fig. 40*), conduisant les poussières sur Paris, dès le 8, où elles sont rabattues par la *pluie rouge*. Les poussières se maintiennent dans l'atmosphère parisienne jusqu'au 14.

L'évolution des aérosols pendant la période

La *composition chimique* des filtres d'aérosols a été mesurée par fluorescence X suivant la procédure adoptée dans l'étude des poussières locales d'El Abiodh et des poussières proximales des Canaries. Dans l'étude diachronique des résultats, Jaffrezo et Colin [31] opposent l'évolution d'éléments représentatifs de l'atmosphère en climat tempéré océanique (Na) ou de régions urbaines (S) à celle d'autres éléments *détritiques* ou *crustaux*, considérés comme caractéristiques de l'érosion continentale (Al, Si, K, Ca, Fe...). Une période s'étendant jusqu'au 15 Novembre, riche en éléments crustaux, s'oppose ainsi à une seconde période dominée par le fond atmosphérique urbain (*Fig. 41*). La première période correspond à la présence des poussières sahariennes sur Paris. Les pluies en lessivant l'atmosphère engendrent des minimums brutaux et courts des concentrations (A, B et C sur les graphiques). Moins de 12 h après, les taux remontent du fait de l'effet de recharge de l'atmosphère parisienne par la masse d'air saharien.

L'*analyse minéralogique par diffraction des RX* a porté sur les filtres des 8-9 Novembre (536-543) dont beaucoup, peu chargés, n'ont rien donné. Les indications tangibles de poussières sahariennes sur Paris apparaissent sur le filtre 538 du 8 Novembre (9-15 h) où l'on note kaolinite, mica et quartz. Or, d'après l'analyse chimique, l'atmosphère s'était modifiée dès le filtre 537 (3-9 h). Ce décalage s'explique car la quantité de matériel exigée par l'autre analyse était insuffisante (concentration trop faible de l'aérosol). Les quartz, micas et kaolinite sont les seuls minéraux reconnus, sauf une occurrence de halite (peut-être liée au maintien du fond continu atmosphérique ou à tout autre facteur anthropogénique). Si les quartz et micas ont une signification éventuellement ubiquiste, la présence de kaolinite est plus convaincante dans un contexte d'air saharien. Mais, à ce propos, *le plus intéressant paraît surtout l'association minéralogique des trois minéraux et sa constance tout au long de l'évènement d'origine saharienne.*

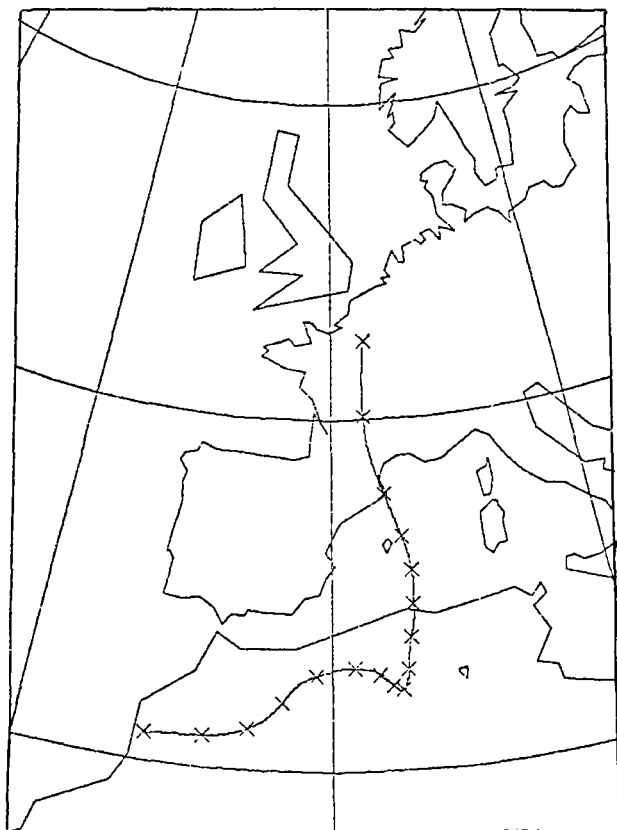


Figure 40. – Trajectographie finissante du 4 XI au 8 XI 1984 à 12h TU à 925 hPa reconstituant le trajet de la masse d'air saharien responsable de la "pluie rouge" sur Paris.

On a procédé à l'analyse micromorphologique des filtres 536 à 541 :

— le filtre 536, montrant l'état de l'aérosol parisien avant l'arrivée des poussières (Pl. 33-a), est globalement très chargé de particules hétérométriques dont de grosses et moyennes reposent sur un tapis de plus petites. Ces dernières se révèlent être à forts grossissements des agrégats à états de surface écaillés et effilochés (Pl. 33-b). Quelques esquilles de quartz assez grossières ont des formes et microfaçonnements «frais» suggérant leur extraction récente (Pl. 33-c). La composition moyenne de la portion de filtre dosée à l'EDS est la suivante : Al, (Si), un peu de Ca et Fe. Les petites particules floconneuses et/ou argileuses sont responsables de cette composition. Il y a aussi de nombreuses particules dues à la pollution.

— le filtre 537 montrant l'arrivée de l'épisode saharien est assez chargé, mais les particules sont plus fines et homométriques et les grosses (5-10 μm) composées d'un empilement de

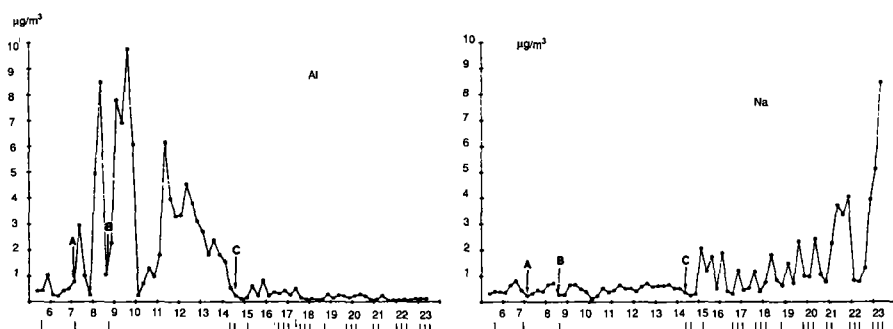


Figure 41. — Mise en évidence des poussières sahariennes au-dessus de Paris par l'opposition des évolutions de Al (critère crustal) et de Na (critère d'origine océanique). Tiré de Jaffrezo et Colin [31].

petites compactées et façonnées. Des quartz émousés, des feldspaths altérés sont désormais là, accompagnés de particules organiques et de plaques argileuses aluminosilicatées, potassiques et ferreuses. Les billes et les *fly-ashes* anthropogéniques sont toujours présentes.

— le filtre 538 est comparable (Pl. 33-d), avec un cortège allochtone de quartz (15 µm), de feldspaths alcalins altérés, de fibres végétales abimées (Pl. 33-e), d'assez nombreuses particules carbonatées, de diatomées, de gypse et d'abondantes particules argileuses (Al, (Si), K, Fe, Ca). La surface des éléments porte de nombreuses traces chimiques et les formes sont évoluées, même aux petites tailles. Le cortège habituel des billes et cendres industrielles est évidemment visible (Pl. 33-f).

— le filtre 539, prélevé juste après la pluie, est peu chargé, en accord avec la chute momentanée des concentrations chimiques. Les gypses (6-7 µm), quartz et spores sont assez abondants.

— le filtre 540 a une charge qui réaugmente avec des constituants sahariens.

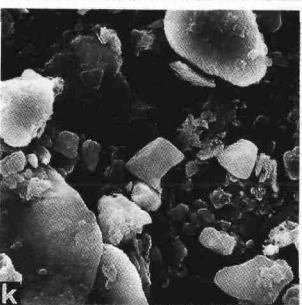
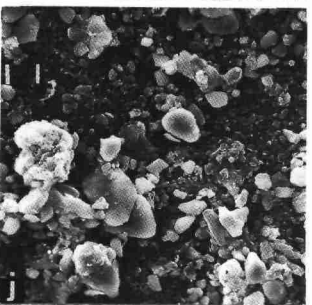
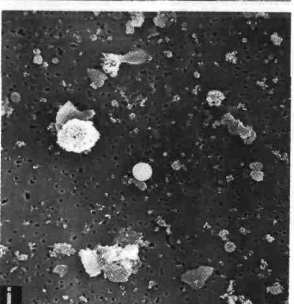
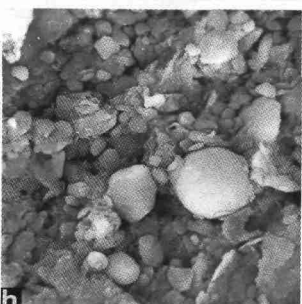
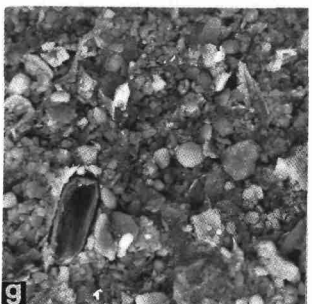
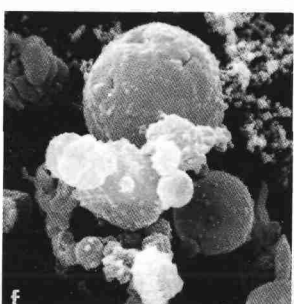
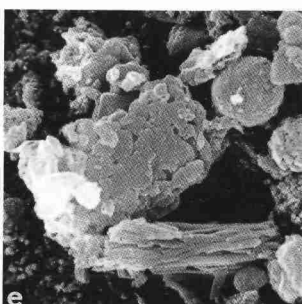
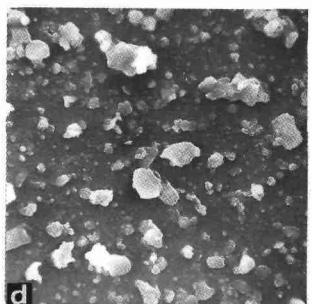
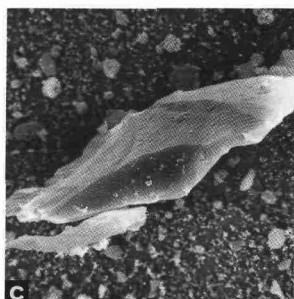
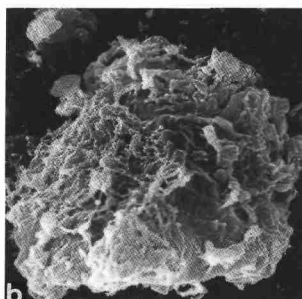
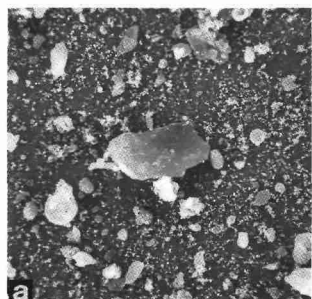
— le filtre 541 se distingue par ses particules grossières aux arêtes émousées et états de surface écaillés (quartz sales, gypses, ilménites, feldspaths et argiles) et des kaolinites cristallisées.

En définitive, il faut retenir de ces observations au MEB/EDS la *permanence d'un cortège minéral commun de signature saharienne* plutôt que l'occurrence occasionnelle de tel ou tel minéral même si certains sont très significatifs. En outre, le *degré d'altération, les formes et les états de surface* sont des arguments convergents.

L'étude des poussières rabattues par la pluie du 8 XI 1984

D'après le dosage par fluorescence X des 20 godets du collecteur, les concentrations des éléments crustaux (Si, Ca) baissent au fur et à mesure de la pluie. Les éléments locaux anthropogéniques (Zn, Cl) ont le même comportement car, d'altitude moindre que les poussières sahariennes dans l'atmosphère parisienne, ils ont aussi été lessivés par la pluie.

La filtration du contenu des godets a permis une *étude minéralogique séquentielle*. Une pluie antérieure (non saharienne) a été analysée pour comparaison. A l'évidence, le quartz



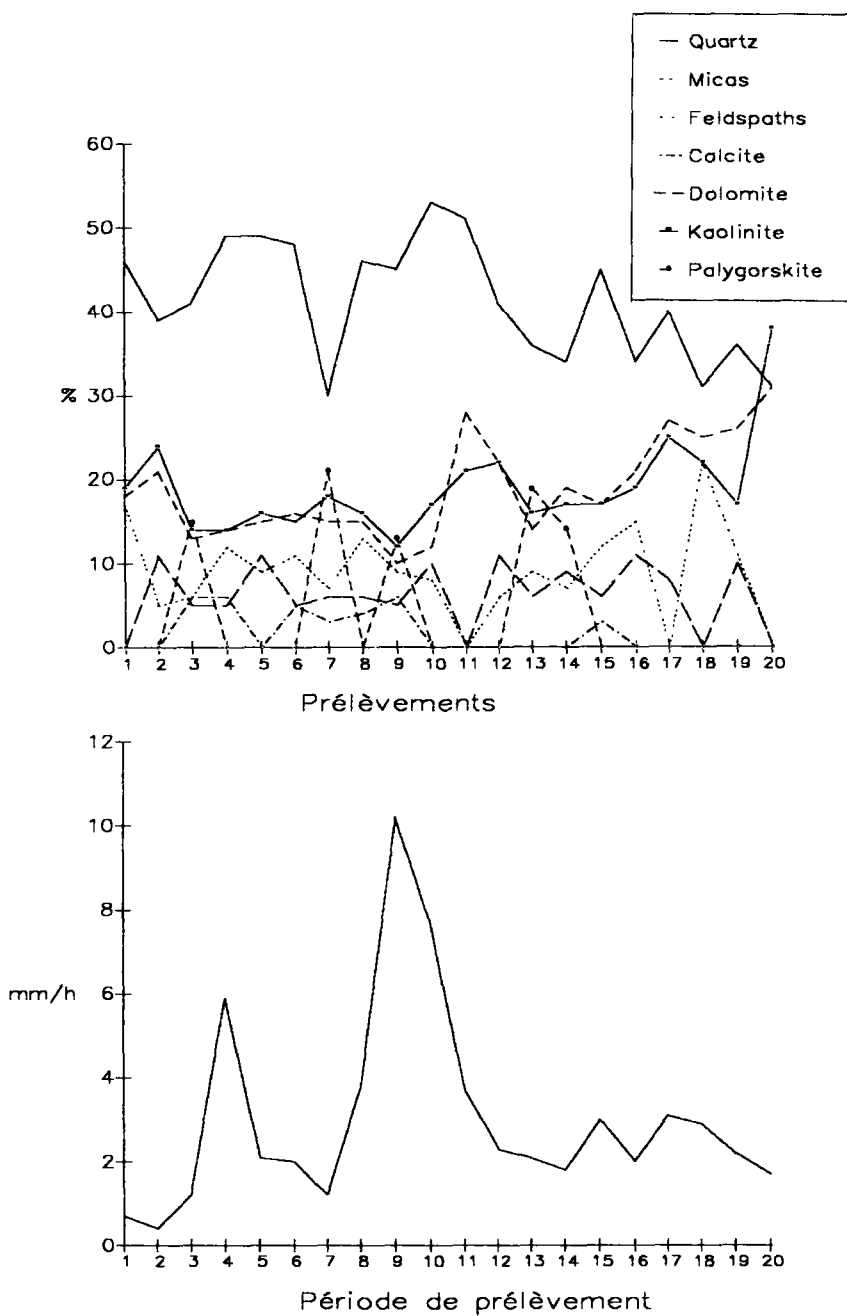
(parfois notable ici) n'est pas l'unique apanage d'une atmosphère chargée de poussières sahariennes... et son caractère ubiquiste doit introduire beaucoup de prudence quant à sa signification génétique au sein des aérosols. C'est en accord avec l'examen MEB du filtre 536 où des quartz anguleux étaient visibles. Par ailleurs, la présence possible d'aragonite va dans le sens du caractère océanique habituel de la circulation atmosphérique sur Paris. D'après cette étude séquentielle de la pluie rouge du 8 Novembre, on note que les comportements des minéraux lors du lessivage de l'atmosphère varient en fonction de l'intensité de la pluie (Fig. 42) :

— la concentration du quartz dans les filtrats est très sensible aux variations d'intensité de la pluie. Après un taux initial notable (godet 1), issu du lessivage immédiat des plus gros quartz, les pics du quartz (godets 4; 5; 10; 11; 15; 17) coïncident assez bien avec les maximums d'intensité de la pluie, suggérant la *propension des quartz à tomber par décantation humide*. Les raisons en sont énigmatiques, mais les quartz sont peut-être d'excellents noyaux de condensation. De toute façon, il faut retenir cette donnée pour comprendre la *chute massive des poussières quartzieuses là où l'humidité atmosphérique augmente et qu'il commence à pleuvoir*. On pense évidemment à la *sédimentation des loess péri-désertiques nord-africains et plus généralement de tous les loess*. Les taux de quartz décroissent globalement vers les derniers filtrats par épauement (ici temporaire puisque l'aérosol se reconstitue en 12 h) de leur stock par la pluie.

— Les micas et la kaolinite (parfois difficile à distinguer de la chlorite) ont des comportements proches, avec des taux de départ assez forts (en léger décalage cependant par rapport au quartz) suggérant aussi la chute rapide de grosses particules. Sur les courbes, on sent l'incidence de l'intensité maximum de la pluie, avec un godet de décalage (10, 11). Mais l'essentiel tient dans la lente augmentation des taux vers la fin, surtout pour la kaolinite, impliquant une certaine inertie face au rabattement par la pluie. En l'expliquant par la morphologie de ces poussières qui planent bien, on retrouve en d'autres lieux un comportement dynamique évoqué pour ces argiles dans les poussières de Béni-Abbès (*cf. supra*). La courbe feldspaths (alcalins et plagioclases) adopte une évolution voisine, moins typée cependant. Au contraire, la calcite disparaissant vite des spectres doit rapidement tomber. La palygorskite n'est signalée qu'épisodiquement par pluie moins intense. Enfin, la dolomite peu abondante se répartit uniformément le long de la séquence.

Pour ultime comparaison, on a analysé 3 échantillons de la pluie du 14 Novembre 1984 sur Paris en fin d'influence de l'air saharien. Dans ces filtrats, les taux sont très proches, du fait du degré avancé d'homogénéisation minéralogique de la masse d'air. Par rapport à la pluie du 8, les taux de micas (30-35 %) et de kaolinite/chlorite (25-30 %) ont peu évolué, voire légèrement augmenté, mais ceux des quartz (30-35 %) ont baissé au moins du quart. L'aptitude des micas et kaolinite à se maintenir en suspension se confirme donc à l'inverse des quartz dont le réservoir paraît à cette date s'être épuisé.

Planche 33. — La « pluie rouge » du 8 novembre 1984 sur Paris. a) vue générale du filtre 536, $e = 10 \mu\text{m}$, b) particule d'argile (Al,Si,Fe,K,Ca), $e = 4 \mu\text{m}$, c) esquille de quartz, $e = 14 \mu\text{m}$, d) vue générale du filtre 538, $e = 20 \mu\text{m}$, e) feldspath potassique très altéré au centre et fibre végétale en bas, $e = 2,5 \mu\text{m}$, f) billes de pollution anthropogénique et agrégats en chaîne, $e = 1,6 \mu\text{m}$, g) allure générale d'un filtrat de la pluie du 8 XI 1984, $e = 20 \mu\text{m}$, h) détail du précédent, noter l'émoussé des particules, $e = 6 \mu\text{m}$, i) filtre peu chargé de la pluie non saharienne du 5 novembre, $e = 6 \mu\text{m}$, j) filtrat de la pluie du 14 novembre, $e = 20 \mu\text{m}$, k) détail du précédent, noter l'émoussé des particules, $e = 6 \mu\text{m}$, l) une esquille de quartz de la pluie du 5 XI, $e = 6 \mu\text{m}$.



Les observations micromorphologiques sur les poussières rabattues par la pluie ont porté sur 2 filtrats du 8 Novembre (pluie rouge), 2 du 14 Novembre (pluie tardive) et, pour comparaison, 2 du 5 Novembre (pluie antérieure à la séquence saharienne).

— Pendant la pluie du 5, l'atmosphère était peu chargée en particules minérales, vu le faible recouvrement des filtrats (Pl. 33-i). Cette pluie a engendré un fort rabattement de matière organique (débris végétaux, pollen, bois brûlés). Les particules de pollution (*fly-ashes*, suies et mullite) abondent. Parmi les rares particules minérales, des particules argileuses (Al, Si, Fe, parfois Ti), des esquilles de quartz et micas. Ces éléments aux arêtes défilées sont subanguleux (Pl. 33-l). Toutes ces observations rappellent ce qui a été noté sur filtres atmosphériques avant l'arrivée des poussières sahariennes.

— A l'EDS, 2 filtrats terminaux de la pluie du 8 Novembre (godet 21) ont donné le spectre chimique moyen (Al, Si, K, Ca, Fe, Ti) analogue à la composition d'une phyllite dont les 2 échantillons ont montré de nombreux exemples. Mais la grande originalité tient au caractère émoussé, voire arrondi des particules minérales (Pl. 33-g, h) : outre les particules argileuses et des grains carbonatés, on a repéré des quartz (50 μ m parfois) enrobés d'une forte pellicule superficielle, couverts de particules adhérentes et de formes allant du subanguleux à l'émoussé. A côté des billes de suie, mullite et autres expressions de la pollution, il y a dans le second filtrat de nombreux pollen, surtout de pin, indiquant l'enrichissement de la poussière saharienne en cours de transport. Là encore ces observations ne démentent pas ce qui a été vu sur les filtres atmosphériques contemporains de la pluie rouge.

— Les filtrats du 14 Novembre sont très chargés, surtout le premier (Pl. 33-j). D'analyse globale (Al, Si, Fe), ils sont presque exclusivement couverts de particules phyllito-argileuses, outre les traces habituelles de pollution. De très rares micas, quartz, feldspaths potassiques et pyroxènes apparaissent çà et là avec des formes émoussées relativement propres (Pl. 33-k).

Pour conclure cette étude des poussières proximales et distales et en tenant compte de la référence indispensable aux caractères initiaux des poussières locales, on peut retenir comme critère fondamental de discrimination au sein des poussières sahariennes un affinement granulométrique du matériel en fonction de la distance parcourue depuis les régions-sources désertiques. Il s'effectue surtout aux dépens des particules quartzeuses car les particules de nature argileuse, plus fines ou plus «portantes», restent plus longtemps en suspension.

Si l'arrivée des lithométéores sahariens modifie temporairement la composition chimique et minéralogique de l'atmosphère des régions-puits, ils perdent en réciproque une partie de leur identité après s'être chargés d'un matériel varié non désertique, parfois marin et souvent anthropogénique.

Aussi, à l'arrivée de poussières distales, les minéraux contenus sont souvent ubiquistes et seules les observations micromorphologiques peuvent éclairer sur l'origine saharienne, si la taille des particules le permet. On remarque alors que les caractères hérités de la phase désertique des particules sont peu modifiés et subsistent même dans les poussières les plus lointaines. La vraisemblance de l'origine saharienne d'une poussière distale apparaît aussi

Figure 42. — L'étude séquentielle des constituants minéralogiques des filtrats de la "pluie rouge" du 8 novembre 1984 sur Paris. A) L'évolution des différents minéraux au cours de la pluie (le spectre du filtrat n° 11 a été difficilement exploitable); B) les variations d'intensité de la pluie, d'après Jaffrezo et Colin [31].

quand existe un cortège minéralogique caractéristique d'une telle provenance. Mais il est indispensable, pour asseoir la certitude de cette attribution, de bien connaître les conditions météorologiques de la mobilisation et du transport des poussières.

Bibliographie

- [1] Paquet H., Coudé-Gaussen G., Rognon P. (1984). Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19 et 35° de latitude Nord. *Rev. Géol. dyn. Géogr. phys.*, 25; 4 : 257-265.
- [2] Fedoroff N., Rodriguez R.A. (1977). Micromorphologie des sols rouges de Ténérife et de La Palma (Iles Canaries). Comparaison avec les sols rouges méditerranéens. Congr. Intern. Micromorphologie, Granada, Avril 1977, pp. 887-927.
- [3] Rodriguez Hernandez C.M., Fernandez-Caldas E., Fedoroff N., Quantin P. (1979). Les vertisols des îles Canaries occidentales. Etude physico-chimique, minéralogique et micromorphologique. *Pedologie*, 29; 1 : 71-107.
- [4] Rognon P., Coudé-Gaussen G. (1987). Reconstitution paléoclimatique à partir des sédiments du Pléistocène Supérieur et de l'Holocène du Nord de Fuerteventura (Canaries). *Z. für Geomorph. NF*, 31; 1 : 1-19.
- [5] Chamley H., Coudé-Gaussen G., Debrabant P., Rognon P. (1987). Contribution des aérosols à la sédimentation quaternaire de l'île de Fuerteventura (Canaries). *Bull. Soc. géol. France*, 8, 3; 5 : 939-952.
- [6] Coudé-Gaussen G., Rognon P. (1988). Origine Eolienne de Certains Encroûtements calcaires sur l'île de Fuerteventura (Canaries orientales). *Geoderma*, 42 : 271-293.
- [7] Ehrenberg C.G. (1862). Erläuterungen eines neuen wirklichen passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeer vom 29 Octo. 1861. *Monatber. Kgl. Preuss. Acad. Wiss.*, Berlin, pp. 202-224.
- [8] Fernandez Navarro L. (1921). A proposito de una caída de polvo en Canarias. *Real Soc. Española de Historia Natural*, T. 50^e Anniv. pp. 436-445.
- [9] Coudé-Gaussen G. (1986). Observations au MEB de poussières sahariennes prélevées aux Canaries. Symposium INQUA «Changements globaux en Afrique», Dakar 1986, pp. 83-86.
- [10] 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.
- [11] Coudé-Gaussen G., Rognon P., Hoyos-Gomez M. (1988). Indicadores mineralogicos de polvo de origen sahariano recogido en la Isla de Fuerteventura (Canarias). *Estudios Geologicos* (sous presse).
- [12] Schütz L., Jaenicke R., Pietrek H. (1981). Saharan dust transport over the North Atlantic Ocean. in Péwé T.L. Ed., *Desert Dust : Origin, Characteristics and Effect on Man*. *Geol. Soc. Amer.*, spec. paper, 186 : 87-100.
- [13] Bergametti G. (1987). Apport de matière par voie atmosphérique à la Méditerranée occidentale : aspects géochimiques et météorologiques. Thèse Sci., Univ. Paris VII, 296 p.
- [14] Fitzpatrick E.A. (1980). The micromorphology of Soils. Dept. of Soil Sci. University of Aberdeen, Scotland.
- [15] Bücher A., Lucas C. (1975). Poussières africaines sur l'Europe. *La Météorologie*, 5; 33 : 53-69.
- [16] Prodi F., Fea G. (1979). A case of transport and deposition of Saharan dust over the Italian peninsula and southern Europe. *J. Geophys. Res.*, 84 : 6951-6960.
- [17] Yaalon D.H., Ganor E. (1979). East Mediterranean trajectories of dust carrying storms from the Sahara and Sinai. in Morales C. Ed., *Saharan Dust: Mobilization, Transport, Deposition*. Wiley, Chichester, U.K., pp. 187-193.

- [18] Ganor E., Mamane Y. (1982). Transport of Saharan dust across the eastern Mediterranean. *Atmos. Environm.*, 16; 3 : 581-587.
- [19] Bücher A., Dubief J., Lucas C. (1983). Retombées estivales de poussières sahariennes sur l'Europe. *Rev. Géol. dyn. Géogr. phys.*, 24; 2 : 153-165.
- [20] Tomadin L., Lenaz R., Landuzzi V., Mazzucolletti A., Vannucci R. (1984). Wind-blown dusts over the Central Mediterranean. *Oceanol. Acta*, 7; 1 : 13-23.
- [21] Chester R., Sharples E.J., Sanders G.S., Saydam A.C. (1984). Saharan dust incursion over the Tyrrhenian Sea. *Atmos. Environm.*, 18; 5 : 929-935.
- [22] Coudé-Gaussen G., Désiré E., Regrain R. (1988). Particularité des poussières sahariennes distales tombées sur la Picardie et l'Ile-de-France le 7 Mai 1988. *Hommes et Terres du Nord*, 4 : 246-251.
- [23] Baize D. (1980). Granulométrie et homogénéité initiale des profils. Applications aux planosols de Champagne humide (France). *Sci. du Sol*, 2 : 83-112.
- [24] Vernon P.D., Reville W.J. (1983). The dustfall of November 1979. *J. Earth Sci. Roy. Dublin Soc.*, 5 : 135-144.
- [25] Game P.M. (1964). Observations on a dust fall in the eastern Atlantic, February 1962. *J. Sediment. Petrol.*, 34 : 355-359.
- [26] Jaenicke R., Junge C. (1967). Studien zur oberen Grenzgrösse des natürlichen Aerosols. *Beitr. Phys. Atmos.*, 40 : 129-143.
- [27] Schütz L. (1977). Die Saharastaube-Komponente über dem subtropischen Nord-Atlantik. PhD. Thesis, Univ. Mainz, FRG., 153p.
- [28] Glaccum R.A., Prospero J.M. (1980). Saharan aerosols over the tropical North Atlantic, mineralogy. *Mar. Geol.*, 37; 3/4 : 295-321.
- [29] Jaffrezo J.L., Colin J.L. (1987). Construction and exploitation of an automatic sequential wet-only rain sampler. *Env. Techn. Lett.*, 8 : 467-474.
- [30] Jaffrezo J.L. (1987). Etude du lessivage de l'aérosol atmosphérique par les précipitations. Thèse Sci. Univ. Paris VII, 183 p.
- [31] Jaffrezo J.L., Colin J.L. (1988). Study of aerosol scavenging by precipitation from an episode of Saharan dust input collected sequentially in Paris. (à paraître).

8

Les conditions météorologiques du transport des poussières

Les développements précédents se sont consacrés aux aspects sédimentologiques du phénomène poussière. L'étude d'une autre facette du phénomène, le *transport par les dynamiques atmosphériques*, doit aussi retenir l'attention. En effet, l'examen des conditions météorologiques ayant présidé à l'expulsion et au déplacement de poussières lointaines s'avère le complément indispensable à la connaissance de leurs caractères sédimentologiques car il authentifie la provenance saharienne et permet souvent de préciser les régions sources.

Les situations météorologiques occasionnant ces exportations sont diverses et il n'est pas question ici d'en faire l'inventaire exhaustif. On a déjà fait l'analyse sédimentologique des chutes de poussière de la plupart des 15 cas abordés ici et leur explication météorologique a donc pour principal objet d'en confirmer les provenances.

Néanmoins, ces cas correspondent à des *situations fréquentes sinon classiques de mobilisation et de transport de poussières sahariennes* qu'il est, en soi, intéressant d'illustrer. De plus, leur mise en évidence et leur suivi dynamique résultent d'une *démarche intégrée* reposant sur l'exploitation complémentaire d'informations d'ordre météorologique plus ou moins complexes (BME, néphanalyses, trajectographies des masses d'air) et du dépouillement de l'imagerie satellitaire. Par commodité, les cas étudiés sont qualifiés par le nom du lieu de collecte de leurs poussières.

Les traversées directes vers l'Europe

Les 7 cas de traversée directe de poussières du Maghreb vers l'Europe correspondent à des situations de cyclogenèse aux latitudes plus élevées. Ils se regroupent suivant 4 situations-types.

Le blocage d'une dépression sur la péninsule ibérique

Vic de Bigorre : 26-27 juillet 1983 (Fig. 43)

— le 25 VII à 12 h 00TU, une dépression stationne à l'Est du Golfe de Gascogne, devancée par une brume sèche à Barcelone. Une tempête de sable a lieu dans le Sud-Oranais (vent de SSE) liée aux hautes pressions centrées sur le Golfe de Gabès.

— le 26 VII à 12 h 00TU, une dépression bloquée par une dorsale de hautes pressions Sud-Tunisien-Europe centrale se développe de la Belgique au Maroc oriental. La tempête de sable se poursuit sur le Sud-Oranais avec la poussière en suspension notée sur Oran (BME) et visible sur Météosat (IR). Un lithométéore sud-nord atteint Valence (Espagne). Il pleut à Vic de Bigorre où les poussières arrivent en soirée. Une autre expulsion se dessine sur le Constantinois (Météosat).

— le 27 VII à 12 h 00TU, ni la dépression du Golfe de Gascogne ni la dorsale orientale de hautes pressions n'ont bougé. Un fort courant sud-nord de poussières s'engouffre entre elles et envahit le Nord-Est de l'Espagne, le Midi méditerranéen, la Corse etc., visible sur Météosat. NOAA 8 en révèle à 7 h 19TU l'arrivée à Barcelone. D'après NOAA 7 à 13 h 46TU, ces poussières se sont déplacées du Constantinois au Roussillon.

Bilan : La source des poussières (NOAA 8) se localisait vers El Abiodh Sidi Cheikh-Brézina. La traversée s'est faite en moins de 12 heures.

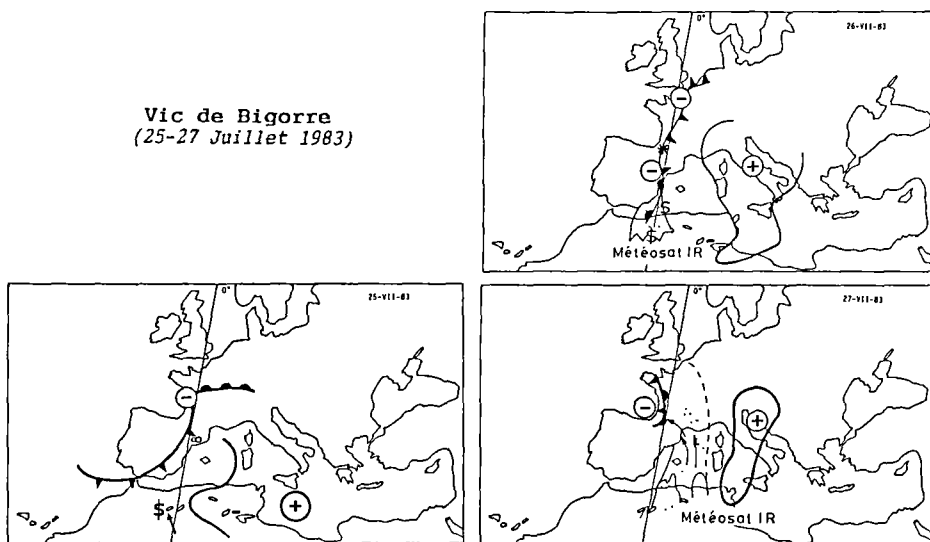


Figure 43. – La situation météorologique de la chute de poussières de Vic de Bigorre (25-27 juillet 1983).

Montpellier Montaud : 31 mai-1^{er} juin 1983 (Fig. 44)

Cette situation correspond au cas des poussières distales de Montpellier.

— le 30 V, une dépression bien circonscrite (920 hPa) centrée à 46°N-24°W est précédée par un front froid abondant la Galice. Aucune poussière n'est signalée sur l'Afrique.

— le 31 V, le front s'est dédoublé; à l'Est, il est en relation avec une petite dépression située près de la Bretagne. D'après Météosat (Vis) de 9 h30 TU à 15 h 00TU, des linéaments nuageux nord-sud alternent avec des poussières, de l'Est du Maroc à l'Algérie centrale. Ces régions constituent les sources d'une rapide expulsion atteignant l'Est de l'Espagne et le Languedoc. Ces poussières ne sont pourtant pas signalées par les BME.

Montaud
(30 Mai-1^{er} Juin 1983)

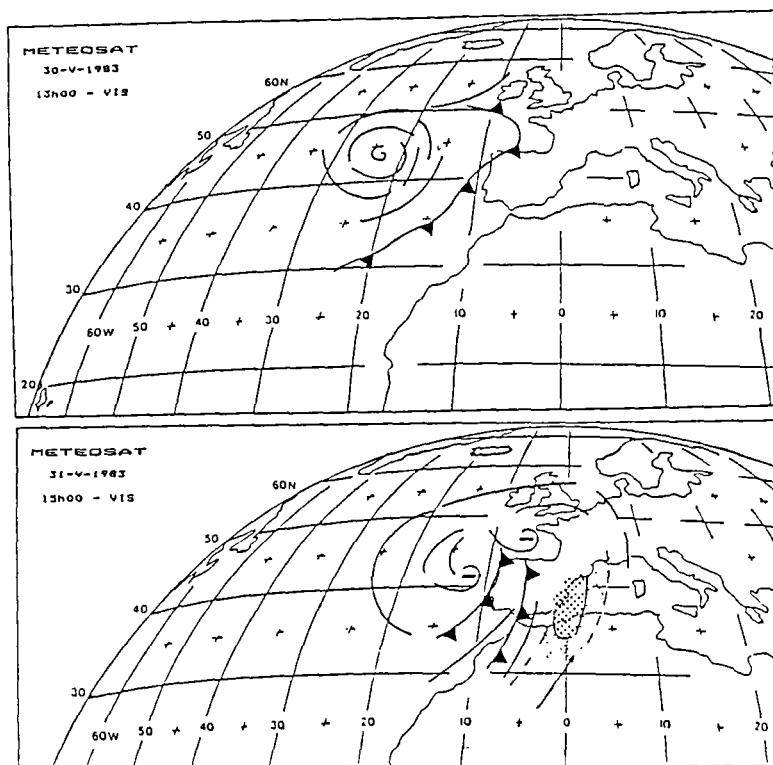
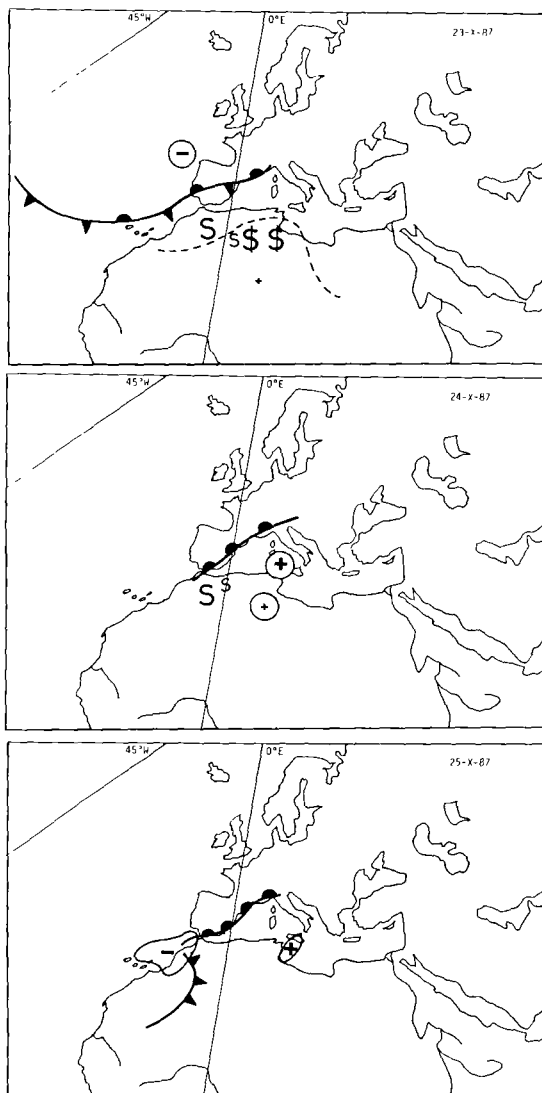


Figure 44. – La situation météorologique de la chute de poussières de Montaud (31 mai-1^{er} juin 1983).

— le 1^{er} VI, le front est occlu d'Alger à la vallée du Rhône, bloqué par un anticyclone sur l'Italie; il disparaît le 3 VI.

Bilan : Les poussières ont mis 24 heures pour parvenir de leur source (Ouest algérien) sur le littoral nord-méditerranéen.



Oran : 25-27 octobre 1987 (Fig. 45)

— le 23 X, de fortes tempêtes de sable sont signalées sur les chotts. Des poussières sont soulevées au sol dans le Sud-Marocain et existent en altitude dans le Sud-Oranais. Ces soulèvements correspondent à la bordure nord d'un anticyclone centré sur le Hoggar à 500 hPa.

— le 24 X, cet anticyclone est monté vers le Sud-Est du Maghreb. Les poussières se concentrent au sol et en altitude dans le Sud-Oranais.

— le 25 X, si on n'a aucune indication sur les poussières, une situation nouvelle se prépare. En effet, l'anticyclone se met en place sur le Golfe de Gabès et une dépression apparaît sur le Maroc atlantique sur l'emplacement d'un front occlu les jours précédents.

— le 26 X, l'anticyclone se renforce sur la Méditerranée centrale. La dépression présente un front froid nord-sud en avant duquel sont aspirées les poussières du Sud-Oranais vers le Nord, d'où leur chute à Oran.

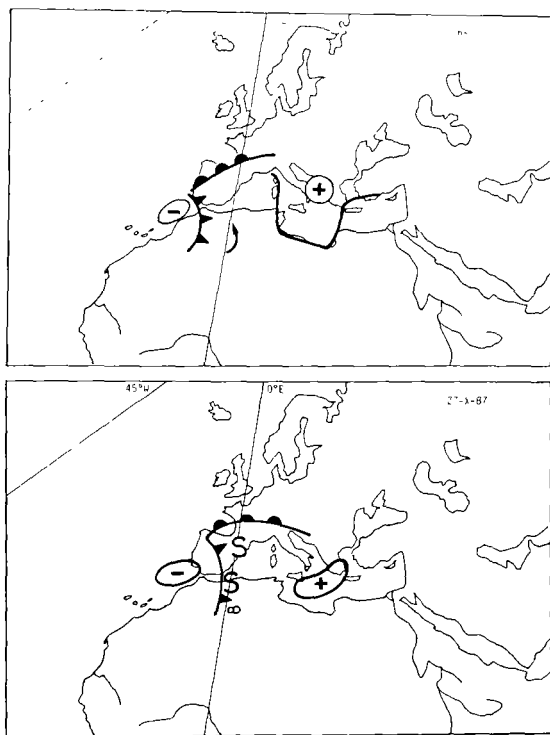


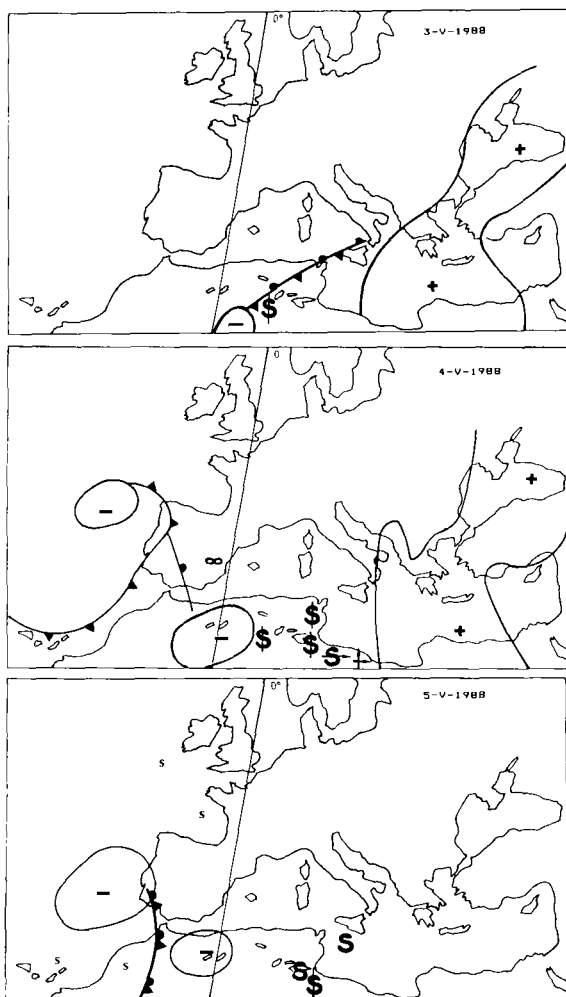
Figure 45. — La situation météorologique de la chute de poussières à Oran (23-27 octobre 1987).

— le 27 X, le BME signale des poussières dans l'atmosphère, en avant du front froid, d'Oran à Barcelone et l'Est-espagnol.

Bilan : Ces poussières ont donc comme origine géographique le piémont de l'Atlas saharien.

Le départ à partir du Maghreb oriental

Le cas de Trappes-Amiens : 7 mai 1988 (Fig. 46)



— le 2 V, un front froid traverse la Méditerranée occidentale alors qu'une barrière de hautes pressions s'étend de Scandinavie à la Tunisie.

— le 3 V, le front connaît une occlusion d'où une tempête de sable au sol à l'Ouest du Chott Melhrir, près d'une petite dépression nord-saharienne.

— le 4 V : cette dépression s'amplifie sur l'Est du Maroc oriental et l'Algérie occidentale. Des tempêtes de sable se généralisent de l'Algérie centrale à la Tunisie et la Libye septentrionale. Une brume sèche apparaît sur l'Est de l'Espagne.

— le 5 V : les tempêtes de sable se poursuivent dans le Sud-Tunisien et la poussière en vol existe sur la Tunisie et la Sicile du Sud. Un front occlu au sol sépare la dépression précédente d'une seconde établie au large du Portugal.

— le 6 V : les deux dépressions ont fusionné, bordées à l'Est par un front froid occlu au centre de la Péninsule ibérique et un front froid actif déclenchant des tempêtes de sable sur l'Algérie centrale. Les flux d'air saharien tournant dans le sens positif apportent des brumes sèches sur le Levant espagnol et la côte cantabrique.

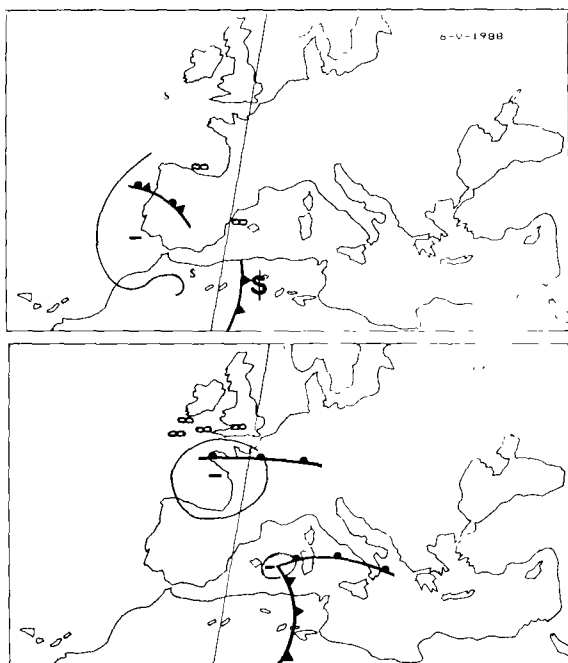


Figure 46. — La situation météorologique de la chute de poussières de Trappes-Amiens (3-7 mai 1988).

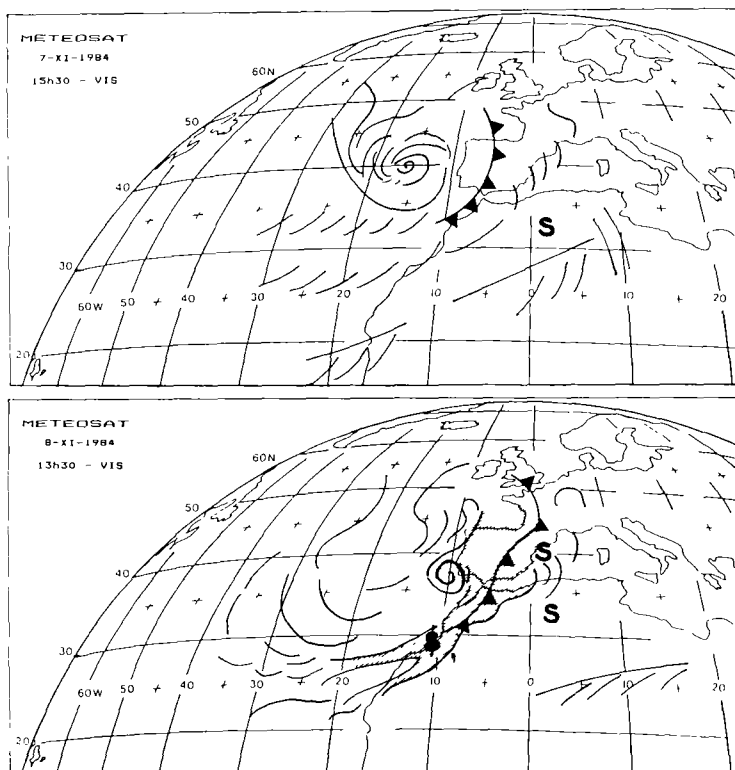
— le 7 V : la dépression s'est déplacée sur le Golfe de Gascogne, bordée au Nord par des brumes sèches sur l'Atlantique oriental et la Manche. Un front chaud formé sur la Normandie et l'Île de France est sans doute la cause des chutes de poussières collectées simultanément à Trappes et Amiens.

Bilan : Ces poussières provenant du Sud-Est du Maghreb ont effectué un trajet sur l'Atlantique avant de revenir vers l'Europe occidentale.

Le balayage d'Ouest en Est du Maghreb

Le phénomène limité à la moitié ouest du Maghreb : Paris, 5-15 novembre 1984 (Fig. 47)

La première pluie du 5 XI s'explique par un flux de Sud lié à une première dépression allant du Golfe de Gascogne aux Baléares; on a vu *supra* qu'elle n'a pas apporté de poussières



sahariennes, fait confirmé par les BME où il n'y a pas soulèvement de poussières en Afrique dans les 6 jours précédents. Les trajectographies étayent cette interprétation.

— le 5 XI, un soulèvement de sable sur le Chott Chergui (34°N - 0° long.) est consécutif au passage du front froid de la dépression précédente.

— le 6 XI, la poussière se soulève vers El Abiodh Sidi Cheikh.

— le 7 XI, une poussière en suspension se situe toujours sur les chotts du Sud-Oranais; une dépression centrée sur le Nord-Portugal provoque un phénomène d'aspiration. La trajectographie du 7 XI montre clairement que le flux d'air a balayé le Sud-Oranais du 3 au 5 XI et s'est élevé le 6 au-dessus de la Méditerranée et du Sud de la France. Il y a toujours de la poussière à l'Est du Chergui.

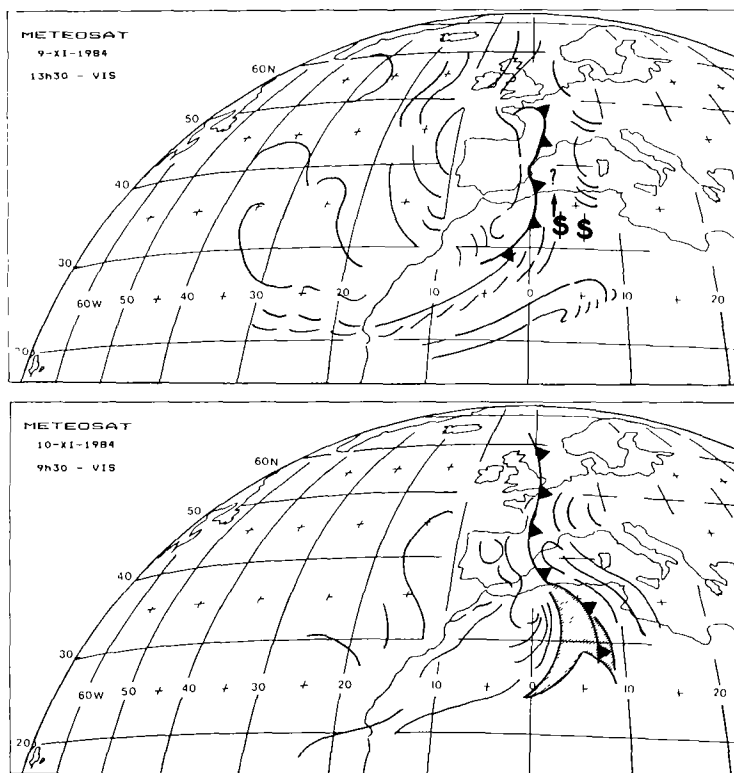


Figure 47. – La situation météorologique de la chute de poussières de Paris (5-15 novembre 1984).

— le 8 XI, la poussière stagne autour du Chergui (BME). La dépression portugaise est relayée par une autre, plus accentuée, sur la Mer d'Irlande avec un front froid qui va du Maroc oriental par l'Espagne vers l'Ouest français. A l'avant du front, les poussières soulevées dès le 5 XI sur le Chott Chergui sont aspirées vers le Nord et signalées en vol à Barcelone (BME); il survient une «pluie rouge» sur Paris. Ce front froid provoque une violente tempête de sable dans le secteur de Tarfaya à 12 h 00TU sur BME, avec des langues de poussières SW-NE montrées par Météosat (VIS, 13 h 30TU).

— le 9 XI, le front froid passe sur le Chergui et provoque des soulèvements sur l'Aurès. De Tarfaya à l'Aurès s'opère donc une prise en charge de poussières par balayage du Maghreb par ce front froid de la dépression du Golfe de Gascogne. Le front, stationnaire sur la Normandie, a pivoté sur l'Afrique du Nord et alimente Paris en poussières.

— le 10 XI, le front froid est orienté Nord-Sud de l'Aurès à Paris.

— le 11 XI, une dépression sur les Baléares provoque une aspiration de poussières sur la Libye mais elle est en cours d'occlusion. Les poussières continuant à tomber sur Paris ont été soulevées précédemment sur le Maghreb.

— le 12 et le 13 XI, il ne se passe plus rien sur l'Afrique.

Bilan : En conclusion, une première dépression, formée le 7 Novembre sur le Nord du Portugal, commence à aspirer la poussière soulevée dès le 5. Son déplacement vers la Mer d'Irlande permet l'aspiration jusqu'à Paris, le long du front froid balayant le Maghreb. Ce front est occlu le 11, la zone-source est tarie et la traîne de poussières arrive encore à Paris pendant quelques jours. Le 13, une nouvelle dépression se forme sur l'Ibérie, mais trop basse en latitude pour provoquer une nouvelle aspiration vers Paris; son front déjà en altitude ne provoque pas de soulèvement sur l'Afrique du Nord. Ce passage de la dépression sur le Maghreb est anormalement lent (du 7 au 11, soit 4 jours). En effet, pendant ce temps, une dorsale nord-sud de hautes pressions se maintient de Scandinavie à la Sicile, bloque son déplacement vers l'Est et provoque son occlusion spectaculaire les 11-12 sur la Tunisie orientale.

Le phénomène s'étendant à la totalité du Maghreb : Poitiers, 23 avril 1985 (Fig. 48)

— le 16 IV, un petit anticyclone s'installe sur le Golfe de Cadix à l'arrière d'un front froid balayant la Libye où s'opèrent un soulèvement de poussières et une aspiration vers la Sicile et la Grèce. Autour de cette haute pression, des soulèvements se produisent au niveau de l'Aurès et il y a des poussières en suspension jusqu'au Hoggar et vers l'Ouest : soulèvement à Tarfaya et vent d'Est (Levante) chargé de poussières aux Canaries.

— le 17 IV, la dépression orientale se fixe sur l'Italie du Sud et aspire les poussières sur la Grèce; les poussières s'élèvent toujours sur le Hoggar et sont transportées vers le SE. La néphanalyse montre une extension considérable de ces 2 zones de poussières plus une, non identifiée sur les BME, allant du Tchad à l'Egypte occidentale. On y voit aussi des brumes sèches du Hoggar à la Mauritanie et le Sud du Maroc, avec une aspiration vers une dépression à l'Ouest de la Péninsule ibérique (25°W-45°N). Sur Météosat, un lithométéore s'étend sur la côte de Mauritanie jusqu'à Safi (Maroc).

— le 18 IV, des poussières subsistent dans l'atmosphère des zones-sources libyennes et nigéro-sénégalaises tandis qu'une autre zone sur la Mauritanie (poussières en vol aux Canaries) émet un panache aspiré par la dépression 20°W-40°N. Il atteint le SW de l'Ibérie à 9 h 30TU.

— le 19 IV, les poussières en suspension continuent à partir vers l'Ouest depuis Dakar, suivies par la brume sèche. Le lithométéore s'est localisé sur l'Espagne et sa traîne s'élargit des Canaries à l'Aurès. Il se développe à l'avant d'un front froid longeant les côtes marocaines et portugaises.

— le 20 IV, le front froid s'est décalé vers l'Est sur le Maroc oriental renforcé par une petite dépression sur le Golfe de Cadix, d'où des tempêtes de sable sur le Sud-Marocain. Sur Météosat à 9 h 30 TU, on repère la fin du panache précédent sur la Mer d'Alboran et vers Valence (Espagne).

— le 21 IV, le front froid marocain s'est décalé vers Annaba et s'est affaibli mais il y a sur Météosat une aspiration de poussière de Tunisie vers le Golfe du Lion. Un anticyclone se déplace vers le Sud sur l'Europe occidentale, bordé par un front froid traversant la Péninsule ibérique.

— le 22 IV, ce front atteint Gibraltar et la Gascogne; en avant, il y a des tempêtes de sable sur le Maroc et des poussières en suspension sur l'Algérie centrale.

— le 23 IV, ce front passe sur Poitiers à midi et provoque la chute des poussières.

Bilan : Les poussières ont donc été soulevées sur une grande partie du Sahara septentrional et leur transfert vers l'Europe s'explique par un effet d'aspiration en avant d'un vaste front froid.

Un long soulèvement affectant aussi le Sahara central

Le cas de Villefranche sur Mer : 3 juillet 1981 (Fig. 49)

— le 27 VI, un front froid parcourt le Maroc. On note sur les BME une tempête de sable sur le Tafilalet et des poussières au-dessus des chotts Chergui et Melhir et sur Ouargla; les

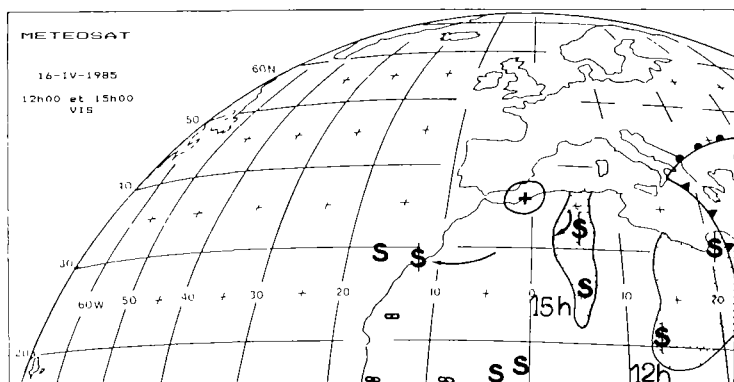


Figure 48. — La situation météorologique de la chute de poussières à Poitiers (23 avril 1985).

Hautes Plaines et le NE du Sahara sont couvertes. Une forte dépression sur le Nord-Hoggar provoque une violente tempête de sable.

— le 28 VI, la dépression remonte. A la rencontre du front froid, le lithométéore se généralise du Hoggar au Sud du Maroc et au Nord de la Tunisie. Une tempête de sable à l'Ouest de l'Aurès est en relation avec la dépression.

— le 29 et le 30 VI, la poussière soulevée reste dans l'atmosphère sur le NE du Sahara et l'Est du Maghreb.

— le 1^{er} VII, une autre dépression, liée cette fois à la CIT, se forme à l'Ouest du Hoggar avec une nouvelle occurrence de poussières.

— le 2 VII, cette dépression s'amplifie avec une violente tempête de sable à sa bordure nord, dans le Sud-Oranais. La poussière survole l'Algérie orientale et des brumes sèches atteignent la côte vers Alger.

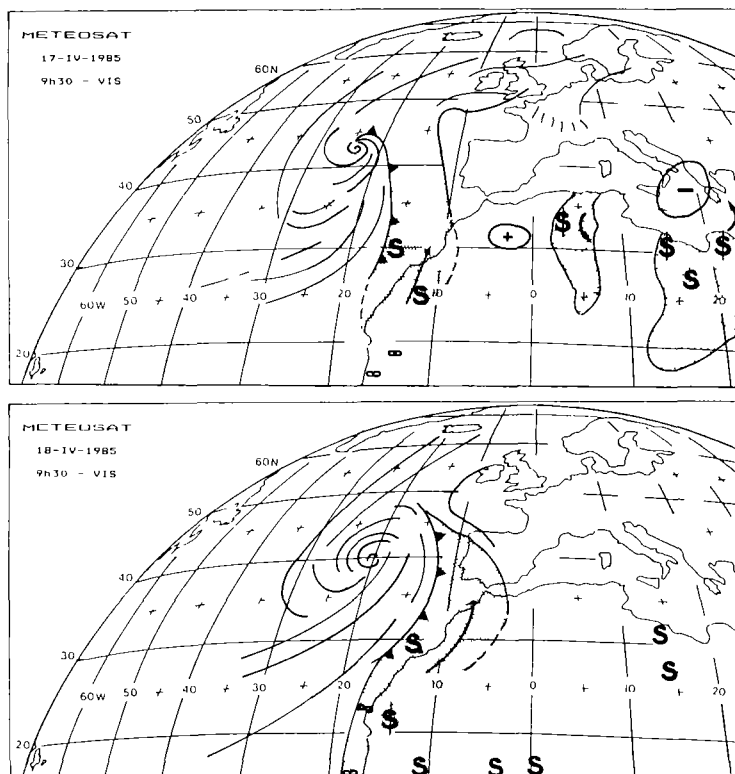


Figure 48. (suite)

— le 3 VII, le front froid situé sur le Golfe de Gascogne le 27 VI aborde la Méditerranée occidentale en se dédoublant. Ces deux fronts convergent sur le Golfe de Gênes et Villefranche sur Mer, en connection avec l'aspiration de poussières subsistant sur le SE algérien. Cette connection est confirmée par les néphanalyses de NOAA 6 entre 17 et 21 h 00TU le 2 VII : une grande bande nuageuse relie l'Algérie centrale à la Provence. Le 3, entre 7 et 9 h 00TU, elle passe exactement sur Villefranche où a lieu la chute de poussières.

Bilan : Les poussières tombées sur Villefranche proviennent donc en grande partie du centre-nord du Sahara.

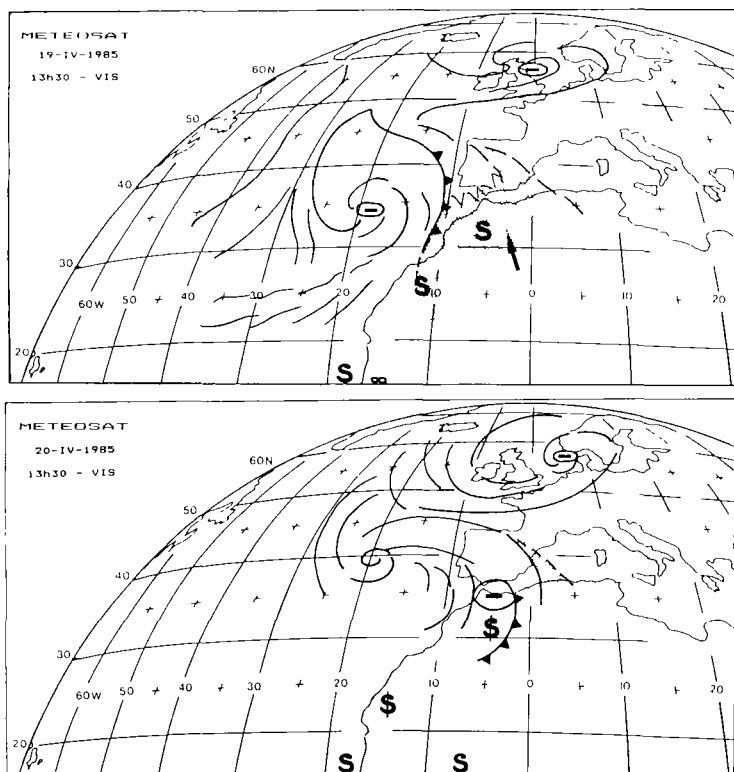


Figure 48. (suite)

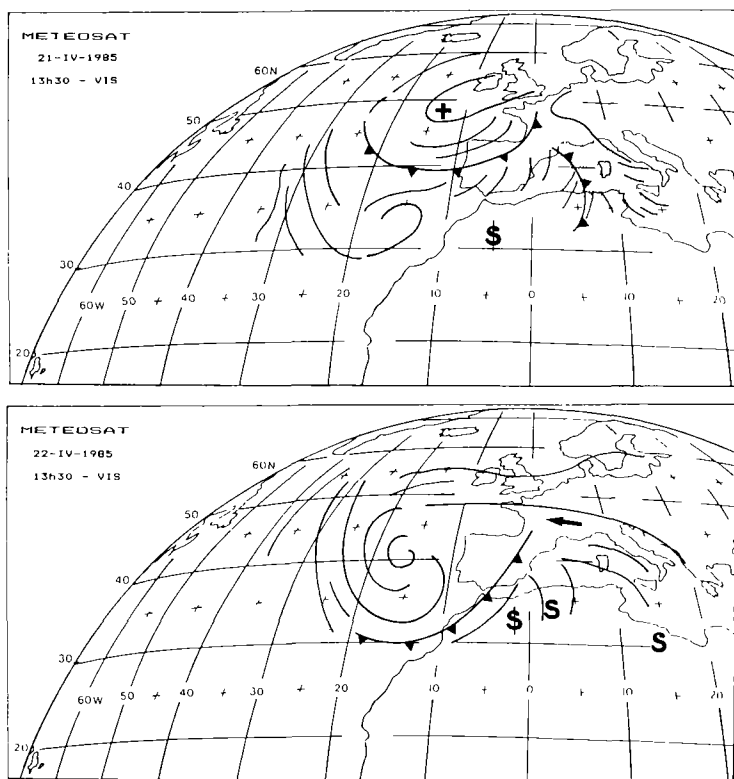


Figure 48. (suite)

Les descentes d'air polaire

Un cas de soulèvement très localisé

Annaba : 18 avril 1987

— le 15 et le 16 IV, une zone de hautes pressions sur la Manche (1035 hPa) envoie une langue d'air froid sur l'Algérie centrale et le Nord du Sahara. Aucun soulèvement de sable n'est signalé.

— le 17 IV, cet air froid crée une cellule de hautes pressions allant de l'Angleterre à la Méditerranée occidentale.

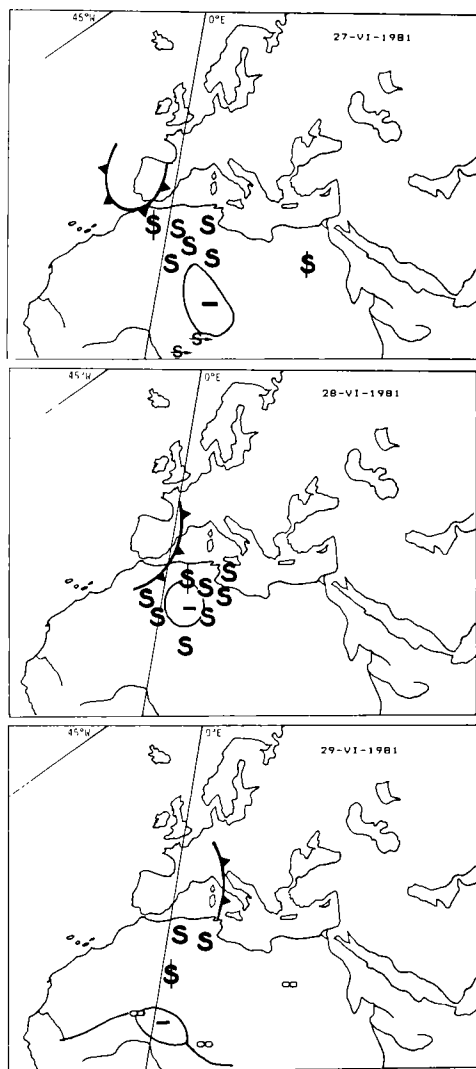


Figure 49. – La situation météorologique de la chute de poussières à Villefranche sur Mer (27 juin-3 juillet 1981).

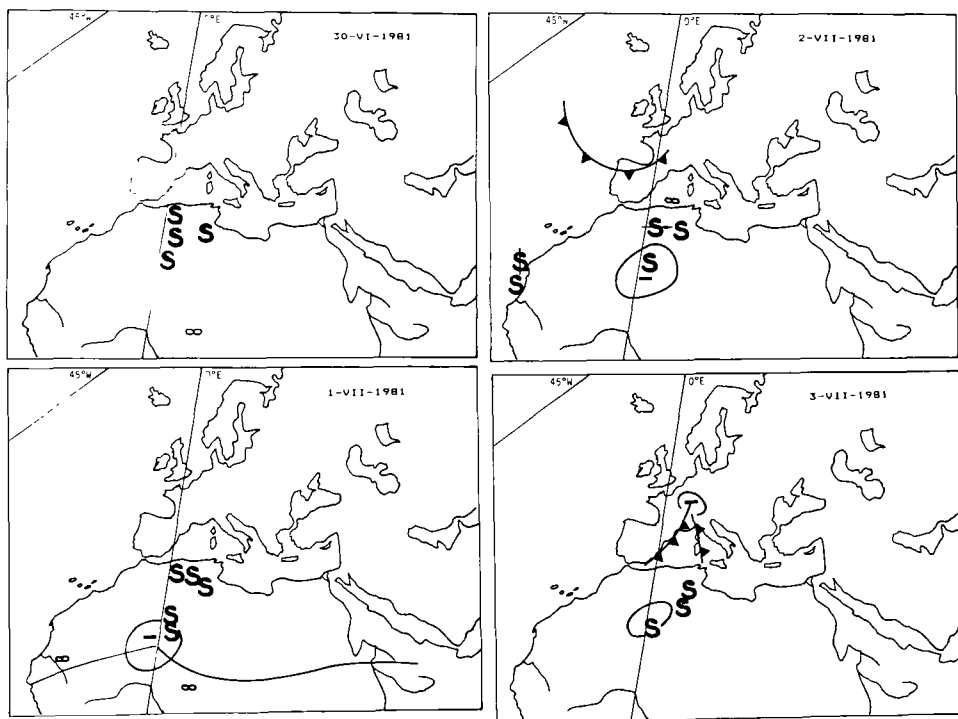


Figure 49 (suite)

— le 18 IV, cette cellule anticyclonique se réduit à la Méditerranée occidentale, l'Italie et l'Est du Maghreb.

Bilan : Dans ce contexte général, aucun des documents consultés ne signale de poussières en Maghreb central et oriental. Or, il y a pourtant eu chute de poussières à Annaba... On en conclut que l'origine des poussières est régionalement très proche (par exemple, les hautes plaines constantinoises), sans doute sous l'effet de vents locaux assez indépendants de la situation météorologique générale.

Un cas de départ vers le Sud

El Abiodh Sidi Cheikh : avril 1986 (Fig. 50)

— le 3 IV, des vents de poussière de secteur NNE, signalés sur le piémont saharien du Maroc à l'Aurès, sont fonction d'un anticyclone installé sur l'Ouest du Maroc après le passage d'une dépression en Méditerranée occidentale.

El Abiodh Sidi Cheikh
(3-8 Avril 1986)



Figure 50. – La situation météorologique des vents de sable à El Abiodh Sidi Cheikh (3-8 avril 1986).

— le 4 IV, un chapelet de dépressions s'égrène du proche Atlantique à la Libye, trop basses en latitude pour aspirer de l'air vers l'Europe. Des tempêtes de sable sont signalées sur les chotts tunisiens et des poussières en vol sur la Libye et la Sicile.

— le 5 IV, les basses pressions sont toujours basses en latitude sur les confins algéro-marocains et la Cyrénaïque et des soulèvements notés sur la côte libyenne et égyptienne.

— le 6 IV, les dépressions restent stationnaires sur l'Ouest du Maroc et au Nord de la Cyrénaïque, d'où la formation d'une aire anticyclonique en Méditerranée occidentale. Un deuxième départ de poussières a lieu d'Aïn Sefra par vent de Nord.

— le 7 IV, la dépression de l'Ouest du Maroc est passée en Méditerranée occidentale; son front occlu est précédé de poussières en suspension.

— le 8 IV, à l'arrière de cette dépression s'établit un petit anticyclone à l'Ouest du Portugal; en conséquence apparaissent de nouvelles poussières autour d'Aïn Sefra par vents de NW.

Bilan : Les déplacements de poussières liés aux vents de Nord et de NW, au Nord du Grand Erg Occidental, s'expliquent par de petites cellules anticycloniques localisées en Méditerranée occidentale, à la faveur d'interruptions momentanées de la circulation d'Ouest.

Un cas de départ vers le Sud-Est

Le Tanezrouft : 10 décembre 1980 (Fig. 51).

— le 9 XII, un anticyclone centré sur la France du Nord envoie de l'air froid en Méditerranée occidentale, causant de forts vents de sable Est-Ouest au Sud du Tanezrouft. Une petite dépression au sol se situe au Sud du Souss.

— le 10 XII, cet anticyclone stationne sur le Sud de la France et les poussières sont soulevées par des tempêtes généralisées du SE du Maroc à l'Ouest du Hoggar et au Nord des Iforas. La dépression du jour précédent est devenue une large dépression d'altitude sur le Maroc et le Nord-Mauritanien. Elle a contribué à aspirer les poussières soulevées par vent d'Est.

— le 11 XII, l'anticyclone est centré sur la Méditerranée occidentale. L'air froid s'étale largement sur l'Est du Maghreb, le Sahara central et la Libye, d'où de très violentes tempêtes de sable sur le Tanezrouft (l'échantillon est prélevé près de Bidon V), le Hoggar et l'Aïr, toujours en bordure de l'air polaire. L'exportation de poussières par vent d'Est est confirmée par leur existence dans l'atmosphère des Canaries (12 h 00TU à 850 hPa) et sur les Canaries et Madère le lendemain à 12 h 00TU.

Un cas de départ vers le Sud-Ouest

El Abiodh Sidi Cheikh : mars-avril 1985 (Fig. 52)

— le 20 III, un soulèvement de poussières a lieu à Aïn Sefra, à l'Ouest du Chott Melrhir et sur les chotts tunisiens après le passage d'une dépression centrée sur la Sardaigne. Les poussières se soulèvent par des vents de Nord en bordure d'un anticyclone sur le proche Atlantique.

Tanezrouft
(9-11 Décembre 1980)

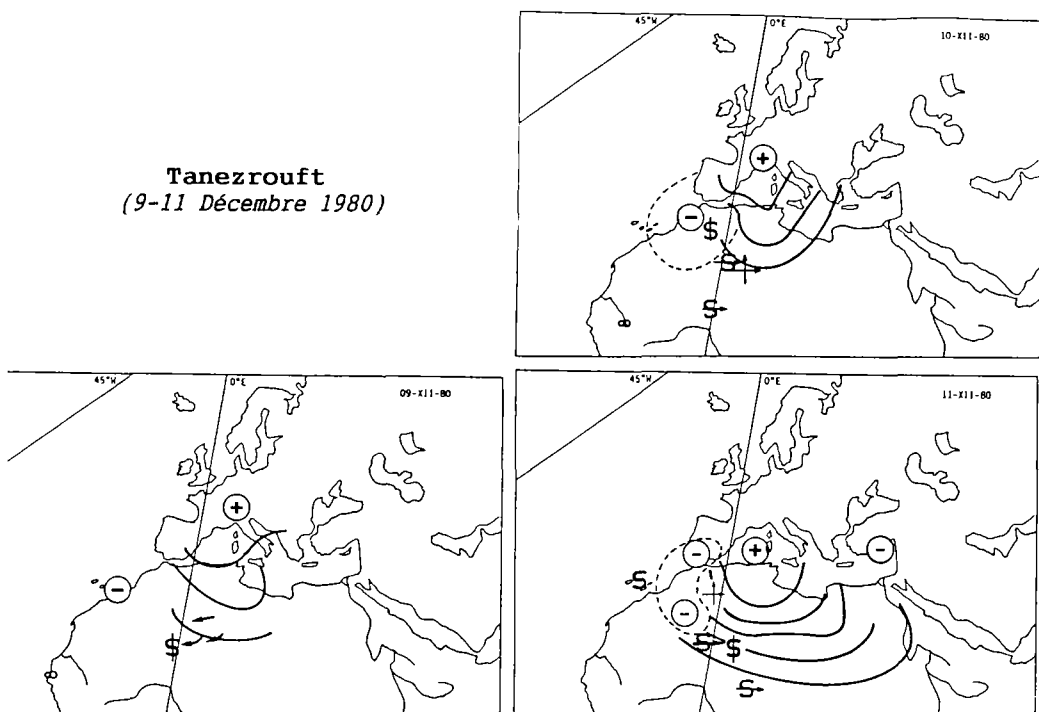


Figure 51. – La situation météorologique de la tempête désertique sur le Tanezrouft (9-11 décembre 1980).

— le 21 III, la tempête de sable se poursuit dans les mêmes secteurs, s'étendant à la Libye et en partie à l'Egypte, en liaison avec le passage bas en latitude de 2 dépressions sur la Méditerranée. Les vents de Nord à Aïn Sefra s'expliquent toujours par l'anticyclone du proche Atlantique.

— le 22 III, les dépressions s'éloignent sur la Méditerranée orientale. On note la poussière sur la Libye, la Cyrénaïque et des tempêtes de sable sur le Nil. L'anticyclone s'est écarté vers l'Ouest et la situation est calme sur le Maghreb.

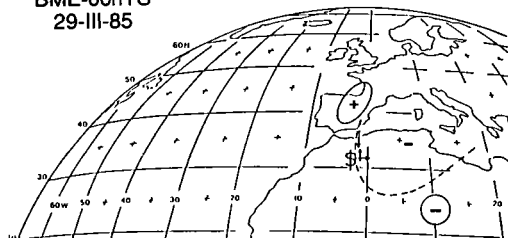
— le 23 III, il n'y a rien sur le Maghreb mais des tempêtes de sable existent sur l'Egypte.

— le 24 III, un anticyclone s'installe au Sud de la Cyrénaïque et repousse ces poussières au NW (Tademaït et région d'Aïn Sefra) avec vents de Sud.

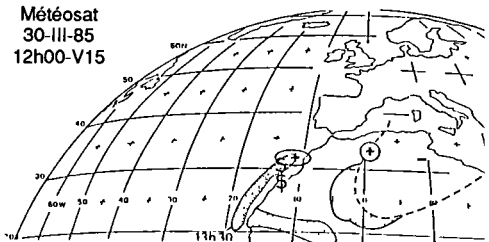
— le 25 III, l'anticyclone a glissé vers l'Est et une dépression apparaît aux confins tuni-so-libyens. Un nouvel anticyclone s'établit au large du Maroc et de la Mauritanie engendrant une nouvelle tempête de sable par vent de Nord à Aïn Sefra (0h00TU). A 12 h 00TU, le soulèvement de sable s'est déplacé vers le Chott Melrhir.

— le 26 III à 0 h 00TU, il y a des tempêtes de sable au NE du Hoggar et en Cyrénaïque en liaison avec la dépression du Golfe des Syrtes. L'anticyclone se dédouble sur le proche

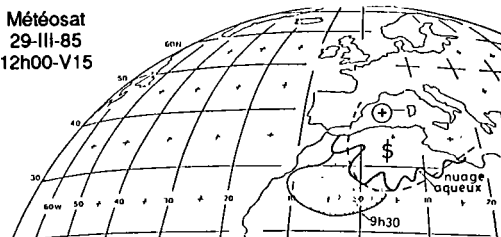
BME-00hTU
29-III-85



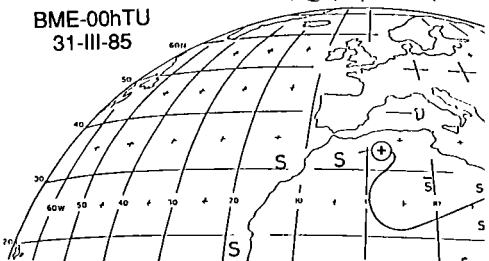
Météosat
30-III-85
12h00-V15



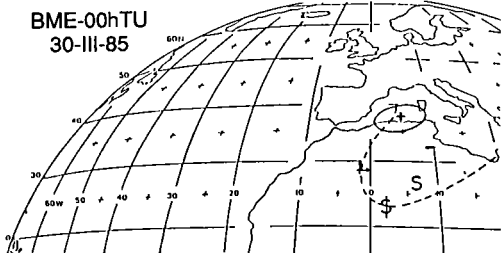
Météosat
29-III-85
12h00-V15



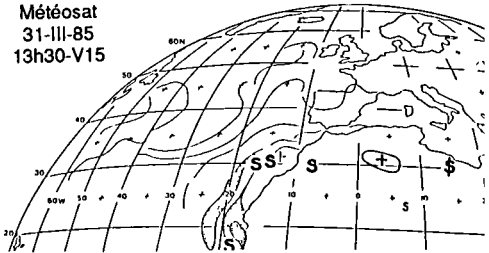
BME-00hTU
31-III-85



BME-00hTU
30-III-85



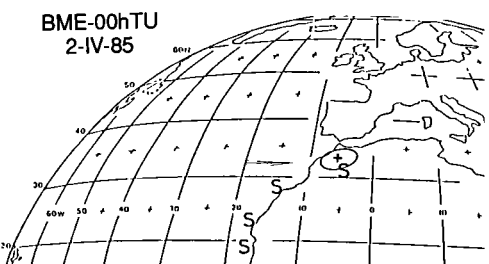
Météosat
31-III-85
13h30-V15



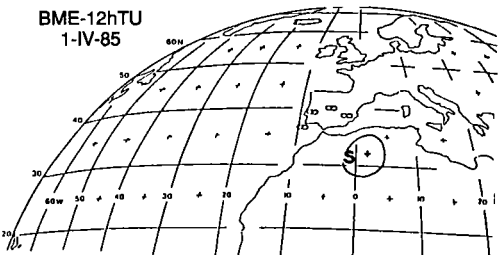
Météosat
01-IV-85
00h00-V15



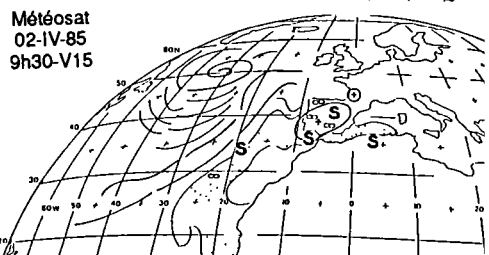
BME-00hTU
2-IV-85



BME-12hTU
1-IV-85



Météosat
02-IV-85
9h30-V15



Atlantique. A 12 h 00TU, il s'est déplacé sur le Maghreb central et les soulèvements de sable continuent au Nord de la Libye et la Cyrénaïque.

— le 27 III à 0 h 00TU et 12 h 00TU, l'anticyclone stagne sur l'Afrique du Nord par temps calme. Une tempête de sable sur l'Égypte résulte de la dépression. Une goutte d'air froid se dirige des hautes pressions du Groënland vers les Iles Britanniques, progresse à 12 h 00TU sur la France selon 2 fronts froids. Avec les vents de Nord, il neige sur la France.

— le 28 III à 0 h 00TU, le front froid pénètre en Méditerranée occidentale et en Ibérie avec des vents de secteur Nord. Lors de l'avance du front froid, les hautes pressions ont disparu sur l'Afrique du Nord. A 12 h 00TU, elle est atteinte par la descente d'air froid. Le centre des hautes pressions se situe sur le Golfe de Gascogne. Les vents soufflent de Nord à Aïn Sefra.

— le 29 III à 0 h 00TU, l'anticyclone descend sur l'Espagne. On note un soulèvement de poussière à Aïn Sefra par un vent de Nord de 20 noeuds. A In Salah, il atteint 10 noeuds avec brume sèche. A l'avant de cette situation anticyclonique, une dépression saharienne se forme en Libye du Sud. A 12 h 00TU, il y a tempête de sable à l'Ouest du Chott Melrhir en relation avec les hautes pressions au Sud des Baléares. Ces dernières provoquent le soulèvement du sable, tandis que la dépression d'altitude favorise l'aspiration et la formation de nuages. La dépression d'altitude correspond sur Météosat à la limite sud des nuages aqueux.

— le 30 III à 0 h 00TU, les hautes pressions abordent le Nord du Maghreb et la dépression d'altitude aspire des poussières depuis des tempêtes de sable du Sud-Hoggar (Tamanrasset). Pendant ce temps, le lithométéore progresse vers le Sud-Ouest. A 12 h 00TU, il tourne au Sud autour de 2 cellules anticycloniques à l'Ouest et au centre du Maghreb (Laghouat) et atteint la côte ouest de l'Afrique à 13 h 00TU. Ce lithométéore se dirigeant vers l'Atlantique tropical et l'Amérique s'est donc trouvé attiré vers le Nord en contournant les hautes pressions par l'Ouest.

— le 31 III à 0 h 00TU, les hautes pressions se centrent sur la région de Laghouat et la dépression d'altitude s'est stabilisée. A basse altitude, des sables sont signalés à l'avant du lithométéore (Sud-Marocain, Canaries, vers Dakar). A 12 h 00TU, les hautes pressions restent

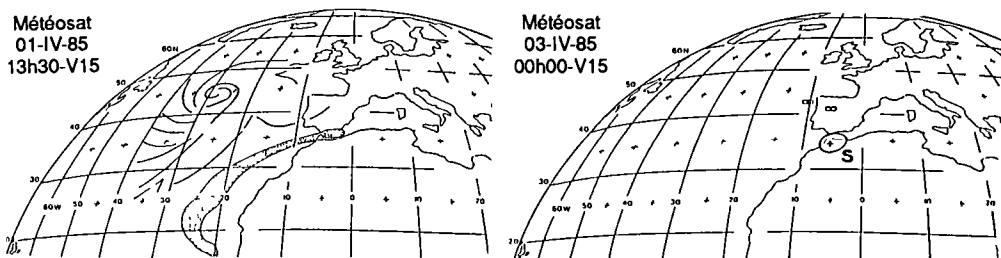


Figure 52. — La situation météorologique des vents de sable du 29 mars au 4 avril 1985 à El Abiodh Sidi Cheikh.

fixes. Le lithométéore s'écarte de la côte africaine; des poussières s'observent en altitude de l'Anti-Atlas et des Canaries à Dakar, devancées par la brume sèche.

— le 1^{er} IV à 0 h 00TU, l'anticyclone s'étend sur le Maghreb et le Nord Sahara, bordé au SE par un lithométéore allant du Sahara oriental au Sud-Hoggar (Météosat). Au contraire, l'autre lithométéore s'échappe de plus en plus vers l'Ouest et son extrémité nord-est pénètre en Méditerranée. A 12 h 00TU, il est annoncé par des brumes sèches au Sud et au centre de l'Ibérie. Ces brumes semblent aspirées par une dépression se formant en Mer d'Irlande.

— le 2 IV à 0 h 00TU, la situation est identique, les hautes pressions se déplacent vers le Maroc, renforçant leur action sur la poussière au sol. A 09h30TU et 12 h 00TU, elles remontent sur la Péninsule ibérique. Le lithométéore dépasse Annaba à l'Est. La poussière reste en suspension du Sud du Sénégal à l'Est algérien, faute de pluie pour la rabattre.

— le 3 IV à 0 h 00TU, la situation est la même. Les hautes pressions se déplacent vers le centre de la France selon une dorsale SW-NE bloquant le déplacement d'un cyclone sur l'Atlantique central. Cette dorsale est doublée en altitude par une dorsale à 500hPa de Tanger au Sud-Ouest de l'Irlande. La poussière se maintient dans cet air stable. A 12 h 00TU, les hautes pressions abandonnent le Maroc et l'Espagne et se décalent vers l'Europe centrale. La dépression avance alors sur la Péninsule ibérique et la France, alors qu'une brume sèche généralisée recouvre la Péninsule ibérique.

— le 4 IV à 0 h 00TU, la dépression au NW de l'Irlande progresse vers l'Est; son front chaud aborde la Bretagne tandis que des brumes sèches remontent dans l'air chaud, du Nord du Maroc à Madrid. A 12 h 00TU, le front chaud nord-sud passe par le Sud-Ouest anglais, Nantes et Bordeaux et les brumes sèches sont sur l'Espagne centrale.

— le 5 IV à 00 h 00TU, le front chaud est sur Paris où il stationne encore à 12 h 00TU.

Bilan : Cette longue séquence révèle l'extraordinaire complexité que peuvent avoir des soulèvements et déplacements de poussière dans la moitié nord du Sahara, fonction des multiples centres d'actions atmosphériques et de dynamiques débordant largement sur la circulation d'Ouest des latitudes moyennes. Dans ce contexte général, les vents de sable soufflent le plus fréquemment à El Abiodh Sidi Cheikh de secteur Nord en liaison avec des situations anticycloniques centrées au Nord de l'Atlantique tropical ou des gouttes d'air froid interrompant la circulation d'Ouest.

Les arrivées sur l'Europe via l'Atlantique

Un cas simple

Lisbonne-Madrid : 20 février 1985 (Fig. 53)

— le 15 II, à l'Est d'un anticyclone couvrant Maghreb et Sahara central, une descente d'air froid sur l'Egypte provoque des aspirations de poussières de la Mer Rouge au Mali; des tempêtes de sable se localisent aussi à l'Est de la boucle du Niger.

Lisbonne/Madrid
(15-20 Février 1985)

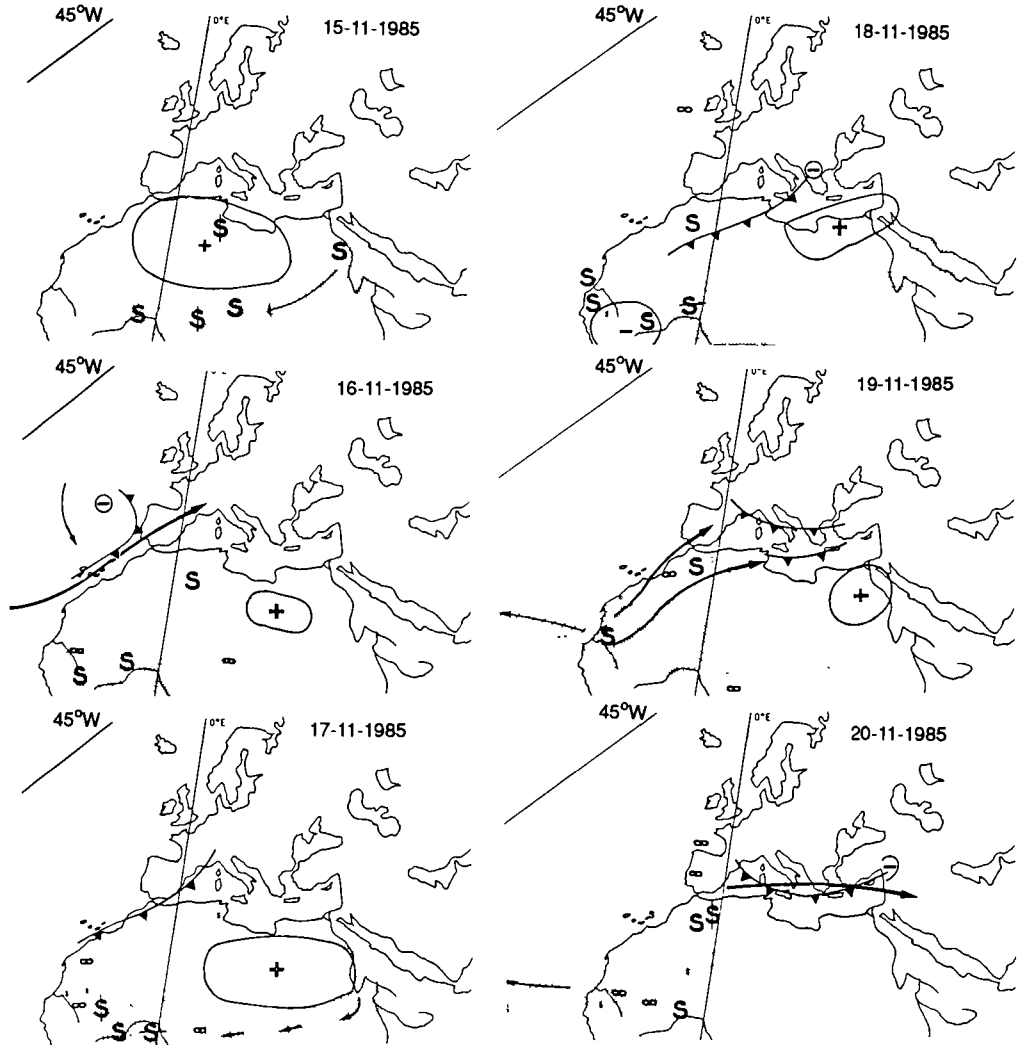


Figure 53. – La situation météorologique de la chute de poussières sur Lisbonne et Madrid (20 février 1985).

— le 16 II, l'anticyclone se restreint, se déplaçant vers l'Est; le lithométéore couvre le Sahel du Nil au Sénégal. Un violent *Jet* de SW longe les côtes africaines.

— le 17 II, l'anticyclone se renforce sur la Libye et l'Égypte, comme le lithométéore sur sa bordure sud; il est très net sur Météosat (IR) à 12 h 00TU, continu de la Mer Rouge au Mali.

— le 18 II, l'anticyclone s'oriente à nouveau au Nord et s'affaiblit; le lithométéore est toujours présent, accompagné depuis le 17 de tempêtes de sable sur le Nord-Mali et l'Est de la Mauritanie, en relation avec l'apparition d'une dépression au sol sur ces régions. Sur Météosat (13 h 00TU, VIS), une large bande nuageuse relie cette dépression, vers la Baie des Léviérs, à un front froid traversant le Maghreb du SW au NE vers une dépression sur l'Adriatique. D'après les images IR à 12 h 00TU, les poussières étaient encore abondantes sur le Sahel.

— le 19 II, une très forte expulsion traverse l'Atlantique de Mauritanie à la Guyane et 2 jets se matérialisent sur Météosat (15 h 00TU, VIS) par 2 bandes nuageuses SW-NE; la plus septentrionale arrive sur la Péninsule ibérique.

— le 20 II, le BME signale en surface des brumes sèches sur la Péninsule ibérique tandis qu'un *Jet* unique (néphanalyse) adopte une trajectoire méditerranéenne Ouest-Est. Les poussières sont recueillies simultanément à Lisbonne et Madrid. A Lisbonne, après une journée nuageuse et un ciel bas, une courte averse de faible intensité couvre la ville de boue vers 18 heures (comm. écrite, D. de Brum Ferreira). Malgré ce *Jet* exportant les poussières vers l'Est, des brumes sèches sont encore signalées à Lisbonne, Madrid et Barcelone le 22 II.

Bilan : Les poussières prélevées en Péninsule ibérique se sont échappées de l'expulsion vers l'Atlantique tropical, prises en charge par un *Jet* de SW. Elles proviennent d'un large domaine est-ouest du Sahara méridional.

Des cas complexes

Caen : 17 août 1987 (Fig. 54)

— le 11 VIII, en bordure d'une vaste zone de basses pressions au sol sur le Hoggar, des tempêtes de sable apparaissent sur la boucle du Niger par vents d'Ouest. En altitude, il y a des poussières sur l'Adrar des Iforas, Gao et Taoudeni.

— le 12 VIII, la dépression s'est déplacée au Nord, à la bordure nord-ouest du Hoggar. Des poussières en suspension sont signalées dans la boucle du Niger et aux confins Mali-Sénégal, et de la brume sèche sur la Casamance. A 500hPa, de nombreuses poussières s'étendent du Tchad vers l'océan (Iles du Cap Vert), entraînées vers l'Ouest par un anticyclone d'altitude dilaté au Sahara central, oriental et Maghreb.

— le 13 VIII, la dépression ayant entraîné vers le Nord un panache de sable dans le Sud-Oranais disparaît. En altitude, à 500hPa, une dépression marquée s'installe sur le Golfe de Cadix.

— le 14 VIII, le lithométéore est signalé dans le Sud-Oranais, avec des brumes sèches vers Marrakech et Barcelone en nuage allongé traversant la Mer d'Alboran à la longitude

Caen
(11-17 Août 1987)

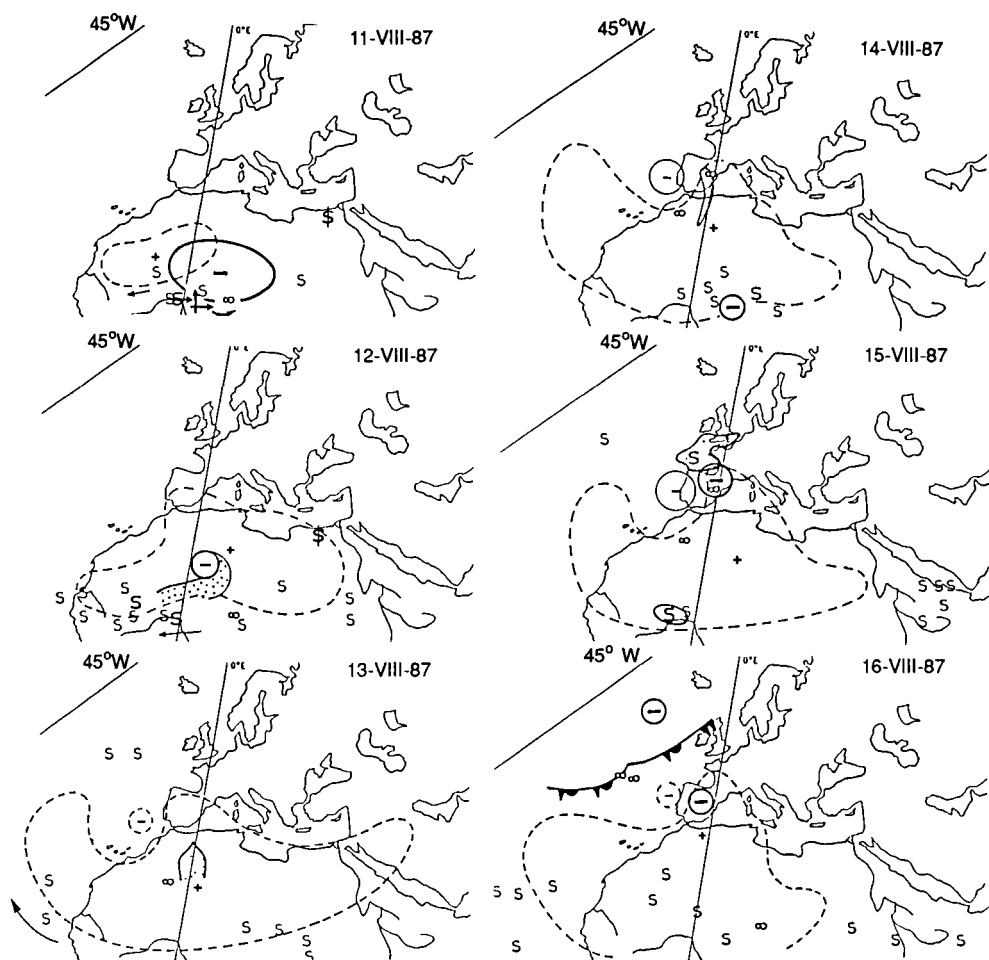


Figure 54. – La situation météorologique de la chute de poussières sur Caen (17 août 1987).

d'Oran (Météosat). Il semble s'enrouler désormais autour de la dépression d'altitude à 500 et 200hPa stationnant toujours à l'Ouest de Gibraltar.

— le 15 VIII, les basses pressions d'altitude ont progressé vers le Portugal et sont doublées au sol par une dépression marquée sur l'extrême NE de l'Espagne et les Pyrénées. Les pous-

sières ayant perdu de l'altitude du 14 au 15 s'organisent autour de ces basses pressions d'après les brumes sèches sur Barcelone et la Galice et un panache (Météosat) s'étendant du Golfe de Gascogne à la Manche. Comme aucune situation frontale n'est apparue, les poussières stationnent sur la Péninsule ibérique et l'Ouest de l'Europe.

— le 16 VIII, alors que la poussière semble se dissiper sur le Golfe de Gascogne, survient une arrivée de poussières aspirées dans le front chaud d'une dépression occluse au sol mais nette sur l'Atlantique central.

— le 17 VIII, toutes ces poussières restées longtemps dans l'atmosphère sont rabattues au sol dans la nuit du 16 au 17 par le passage sur la France du front occlu de cette dépression qui atteint les Vosges vers 12 h 00TU.

Bilan : Les poussières tombées sur Caen sont originaires de la boucle du Niger. Elles sont arrivées soit directement par le Sud-Oranais via l'Espagne autour de petites cellules de basses pressions, soit en contournant un anticyclone d'altitude resté stable sur le Sahara.

Canaries : avril 1984

Certains aspects de l'évolution de cette période ont déjà été évoqués quand ils éclairaient l'étude intégrée des prélèvements de poussières à Fuerteventura. L'étude détaillée de la situation météorologique confirme cette analyse en la replaçant dans un contexte atmosphérique plus vaste.

La phase de préparation des aérosols : 6-12 avril (Fig. 55-A)

- *la confirmation de l'origine soussie :*

— le lithométéore observé le 6 IV (Météosat) se relie aux basses pressions (950 hPa) du Maroc central surmontées de hautes pressions (850-100 hPa) d'où son faible développement en altitude et son transport vers l'Ouest, autour des hautes pressions (850 hPa) au large de l'Ibérie.

— le 7 IV, à Agadir à 950-850 hPa, les vents soufflent d'Est avec un panache visible sur les Canaries, mais sans chute de poussières.

- *une contribution d'origine sahélienne :*

— le 5 IV à 00 h 00TU, une forte expulsion de poussières à haute altitude a lieu du delta intérieur du Niger vers l'Atlantique tropical où de hautes pressions la canalisent vers l'Ouest.

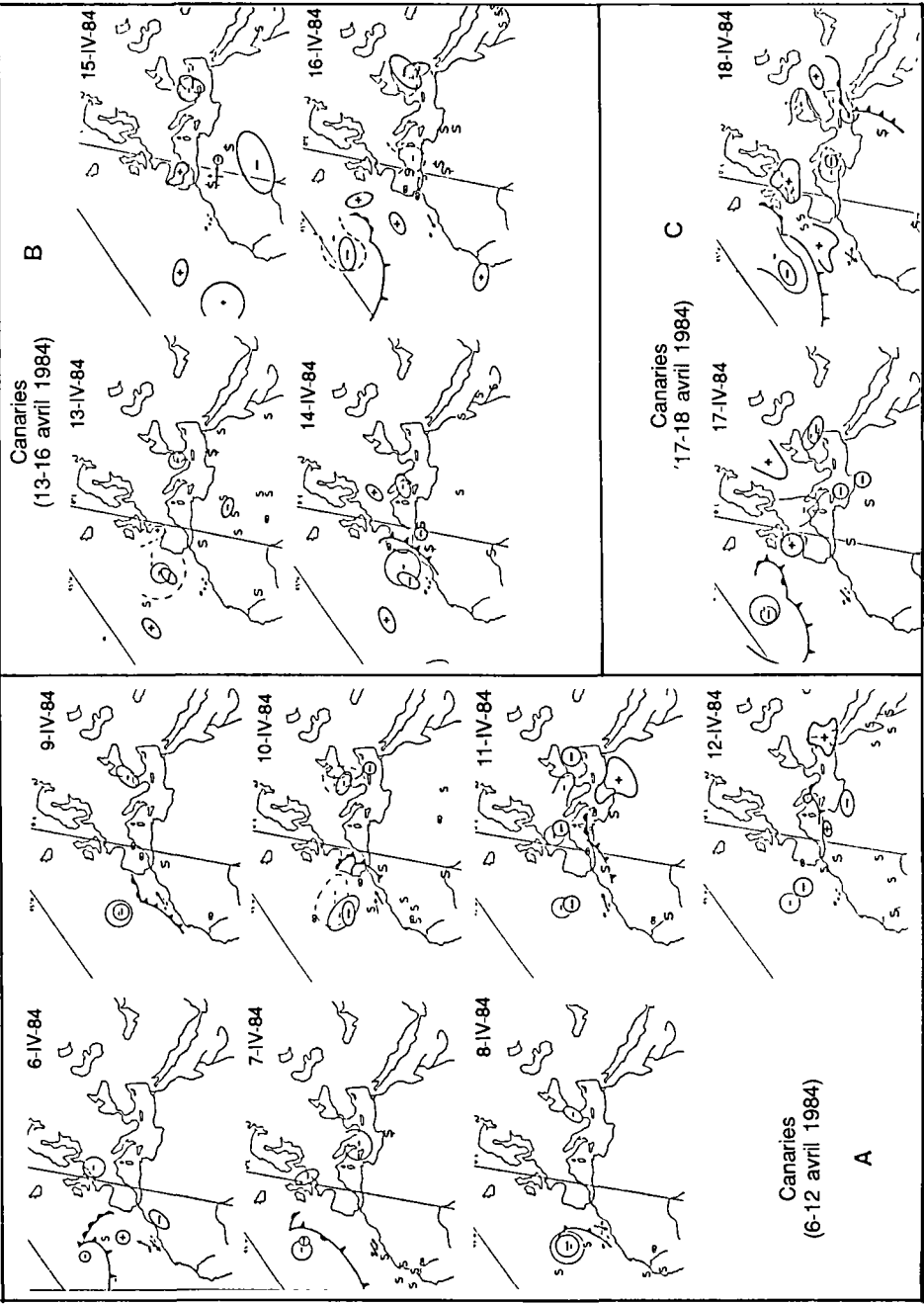
— le 6 IV, une dépression est centrée 30°W-40°N, mais il subsiste un petit anticyclone au large de Lisbonne. Ce changement des centres de pression a attiré la queue du lithométéore sahélien vers le Nord avec un nuage considérable de poussières à 850hPa sur l'Atlantique à l'Ouest de 30°W et jusqu'à 40°N (dont l'Ouest et le Nord ibériques et le Sud du Golfe de Gascogne).

— le 7 IV, des poussières au large de la Mauritanie sont aspirées vers le NE à 500 hPa vers les basses pressions du Proche Atlantique et s'y incorporent à celles venues du Souss.

- *l'évolution après le 7 IV :*

— le 8 IV, une très grosse dépression (950-850hPa) à l'Ouest de la Péninsule ibérique attire des poussières, bien visibles à 850hPa sur l'Atlantique et les Iles du Cap Vert.

— le 9 IV, cette dépression est sensible à 950, 850 et 500 hPa. Le mélange des aérosols se poursuit. Aucune pluie n'est signalée, sauf sur un vague front occlu à l'Ouest du Portugal.



- le 10 IV, la situation se maintient; de nouvelles poussières sont signalées sur l'Atlantique (0-10°N) et le Sud-Mauritanien.
- le 11 IV, l'état est stationnaire. Les poussières du 10 Avril à 500 hPa de Mauritanie sont remontées vers le Nord à 850 hPa à la latitude des Canaries occidentales.
- le 12 IV, la situation est identique avec une dépression sur le Proche Atlantique sans front défini et sans pluie, mais avec mélange des poussières antérieures. Elles sont bien signalées à 850 hPa entre 30-40°N jusqu'au voisinage de Madère et à 500 hPa au large du Maroc Atlantique.

La période «océanique» du 13 au 16 avril (Fig. 55-B)

- le 13 et le 14 IV, les aérosols sahariens sont collectés à Fuerteventura après leur détour sur l'Océan.

- le 13 IV, la dépression à 950 et 500 hPa se maintient, mais un anticyclone de surface (950 hPa) et d'altitude (500 hPa) s'approche par l'Ouest sur l'Atlantique en se renforçant. De très fins aérosols s'étalent sur l'Atlantique équatorial (0-10°N) depuis le Sénégal, sans doute du fait du renforcement anticyclonique.

- le 14 IV, la dépression progresse sur l'Ouest de l'Ibérie et du Maroc, chassée par l'accroissement des hautes pressions sur l'Atlantique (950 et 500 hPa). Se heurtant à un anticyclone de direction méridienne, elle s'occlut.

- le «background» océanique

- le 15 IV, les hautes pressions règnent sur l'Atlantique (950 et 500 hPa) et sur l'Espagne (950 hPa) alors que le Sahara devient zone de basses pressions à 950 hPa. Au sol, les vents soufflent de NE à Fuerteventura. Il n'y a plus de poussières dans l'atmosphère. Une tempête de sable avec soulèvement au SE du Maroc et vers la Saoura est peut-être une source d'aérosols à 0 h 00TU, mais à 12 h 00TU les vents sont de Nord.

- le 16 IV, les hautes pressions remontent vers le Golfe de Gascogne et l'Irlande; elles se fragmentent à l'arrivée d'une nouvelle dépression. Les vents sont de NE sur les Canaries.

La seconde arrivée de poussières (Fig. 55-C)

- le 17 IV, la dépression du NW de l'Irlande se renforce avec un front froid entre 20-30°W. A 0 h 00TU et 12 h 00TU, les vents au sol à Fuerteventura soufflent de NE. Aucun soulèvement de poussières ne s'observe au Sahara.

- le 18 IV, le front reste stationnaire et la dépression passe sur l'Ecosse. Au contraire, une dorsale anticyclonique peu marquée (950 hPa) relie l'Ibérie aux Canaries. Il y a des vents de NE à 500 et 950 hPa, mais aucun soulèvement sur le Sahara.

Bilan : D'après cette étude, des poussières méridionales sont d'abord venues enrichir celles du lithométéore du Souss. Leur déplacement commun sur l'Atlantique s'est fait autour du centre dépressionnaire stable situé à l'Ouest de la Péninsule ibérique, en accord avec les indications des trajectographies. Par ailleurs, l'absence de soulèvement sur le Sahara pendant la seconde arrivée de poussières confirme bien sa provenance du piémont et des contreforts de l'Atlas.

Figure 55. — La situation météorologique pendant la campagne de prélèvement de poussières aux Canaries d'avril 1984.

Les expulsions vers l'Atlantique

Un crochet vers les Canaries

Canaries : juillet 1985 (Fig. 56)

• *jusqu'au 19 Juillet : blocage en altitude puis première chute de poussières d'origine sahélienne*

— le 11 VII, Météosat montre une bande de poussières est-ouest dans la zone sahélienne, du Tchad au Sud de la Mauritanie.

— le 12 VII, ces poussières décollées du sol sont prises en charge en altitude sur la bordure ouest d'un anticyclone à 500 hPa couvrant le Sahara. Un grand panache (Météosat) s'infléchit vers les Canaries.

— le 13 VII, la situation est identique, avec des poussières près du sol et la brume sèche proche de l'Atlantique. L'anticyclone d'altitude s'est élargi jusqu'à l'Ibérie et les poussières atteignent l'Algarve.

— le 14 VII, l'anticyclone d'altitude s'est étendu sur l'Atlantique oriental et la Méditerranée occidentale. Il bloque la remontée nord de poussières qui stagnent vers les Canaries.

— le 15 VII, l'anticyclone s'est rétracté au Sahara occidental; les poussières en altitude stationnent dans sa partie sud-ouest.

— le 16 VII, une grande dorsale anticyclonique va de l'Atlantique moyen à l'Ouest saharien interdisant toute remontée vers les Canaries. Des poussières progressent vers l'Ouest à 500hPa (entre 15-25°W) depuis une source située sur l'Aïr. Entre 9 h 30TU et 12 h 00TU, une bande de poussières s'étend du Hoggar au Sénégal (Météosat), tournant d'Est en Ouest autour de l'anticyclone d'altitude.

— le 17 VII, l'anticyclone s'est renforcé sur l'Atlantique bloquant toujours l'expulsion vers le Nord; une simple brume sèche traduit la stagnation de poussières en altitude.

— le 18 VII, une zone continue de hautes pressions d'altitude (500 hPa) couvre le Sahara et l'Atlantique subtropical.

— le 19 VII, cette bande se scinde en 2 anticyclones d'altitude. Au niveau du sol, les vents sur les Canaries restent de NE entre 2 centres d'action inchangés depuis le 11 : l'anticyclone sur l'Atlantique vers 40°W et la dépression sur le Sahara vers 20°N. Ces vents prennent en charge les poussières d'altitude précipitant par décantation et les rabattent au SW vers les Canaries (Météosat VIS).

• *jusqu'au 23 Juillet : une autre chute de poussières méridionales*

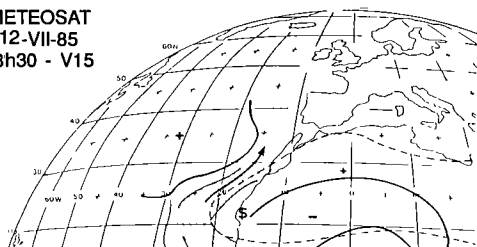
— le 20 et le 21 VII, la situation est inchangée. L'anticyclone d'altitude se localise sur le Sahara central et occidental.

— le 22 VII, une descente d'air froid sur la Grèce provoque des soulèvements de poussières aspirées en altitude (500 hPa) sur la Libye, l'Égypte et le Tchad.

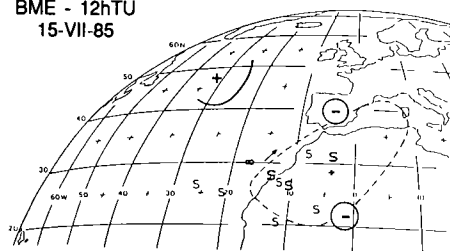
— le 23 VII, les anticyclones d'altitude s'étalent à nouveau sur l'Atlantique entre 20-30°W, le Sahara central et toute la Méditerranée. Des poussières existent à 500 hPa sur la Mauritanie

Figure 56. — La situation météorologique pendant la campagne de prélèvement de poussières aux Canaries du 12 au 30 juillet 1985.

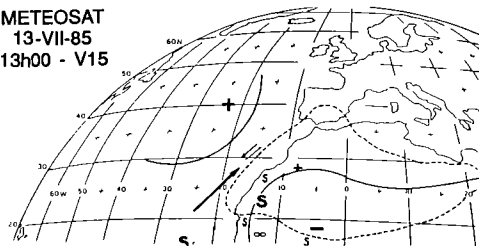
METEOSAT
12-VII-85
13h30 - V15



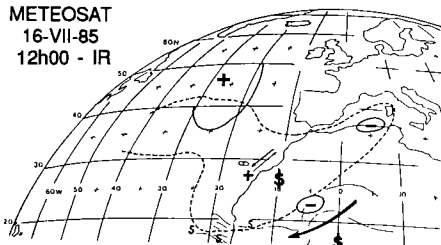
BME - 12hTU
15-VII-85



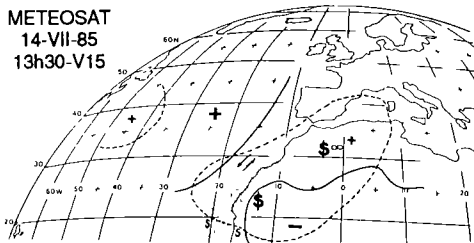
METEOSAT
13-VII-85
13h00 - V15



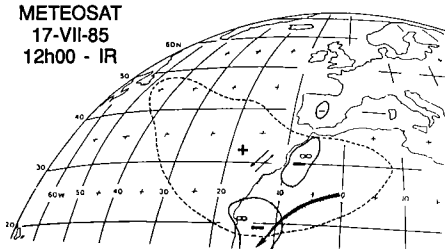
METEOSAT
16-VII-85
12h00 - IR



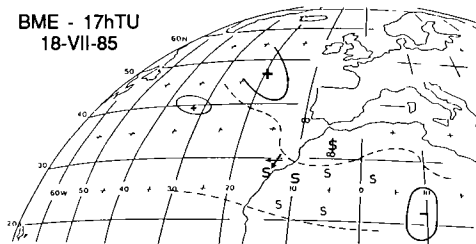
METEOSAT
14-VII-85
13h30-V15



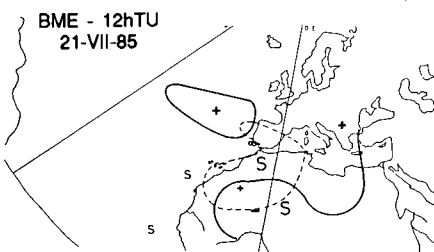
METEOSAT
17-VII-85
12h00 - IR



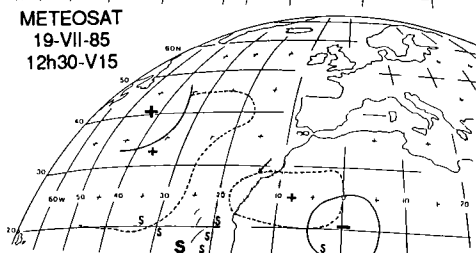
BME - 17hTU
18-VII-85



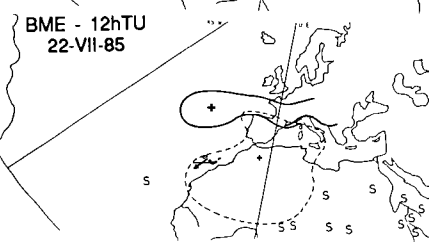
BME - 12hTU
21-VII-85



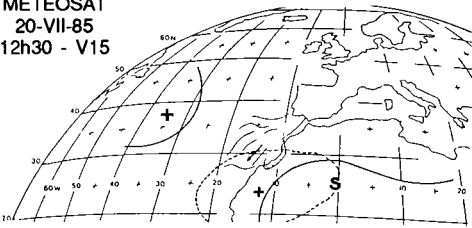
METEOSAT
19-VII-85
12h30-V15



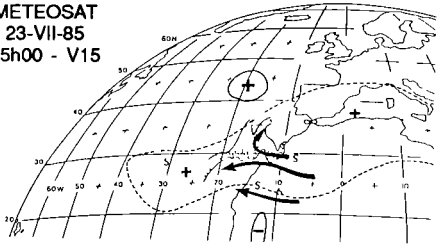
BME - 12hTU
22-VII-85



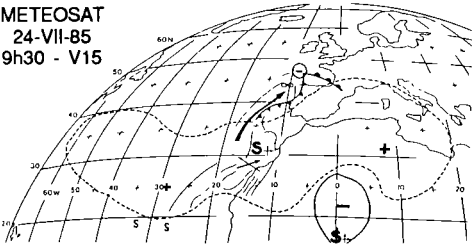
METEOSAT
20-VII-85
12h30 - V15



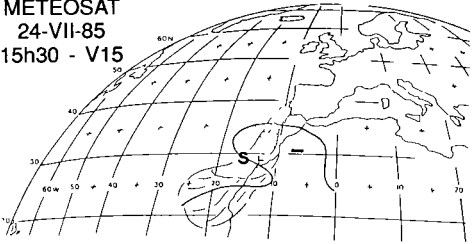
METEOSAT
23-VII-85
15h00 - V15



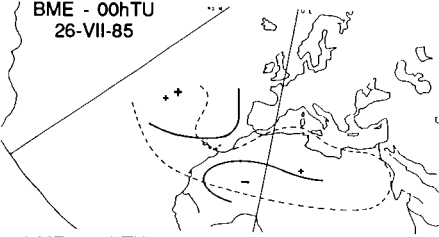
METEOSAT
24-VII-85
9h30 - V15



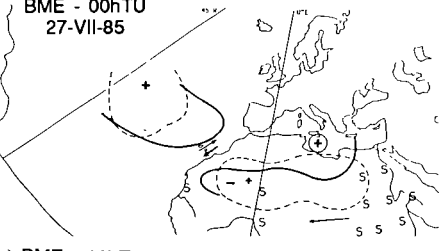
METEOSAT
24-VII-85
15h30 - V15



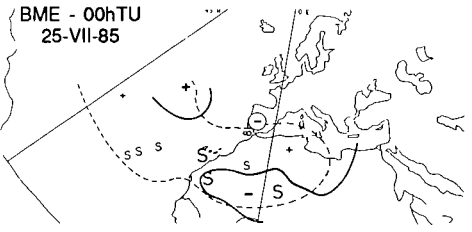
BME - 00hTU
26-VII-85



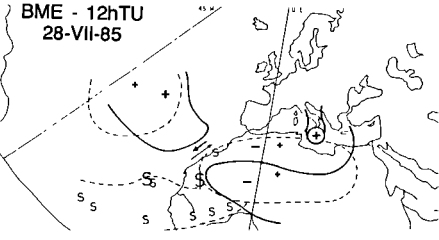
BME - 00hTU
27-VII-85



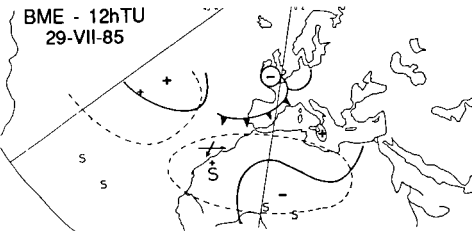
BME - 00hTU
25-VII-85



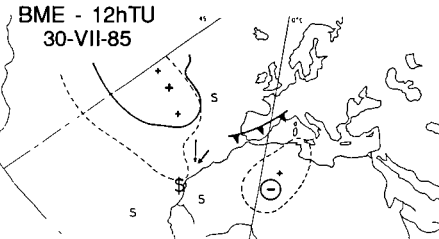
BME - 12hTU
28-VII-85



BME - 12hTU
29-VII-85



BME - 12hTU
30-VII-85



centrale dans le prolongement de celles mobilisées la veille à l'Est et au Sud du Sahara. On constate une expulsion au niveau du 30°N sur les Canaries (Météosat), en liaison avec un *thalweg* existant entre les 2 noyaux anticycloniques. Ces poussières d'altitude tombent alors par gravité sur les Canaries.

- *les 24 et 25 juillet : l'épisode du Tafilalt*

— le 24 VII, l'anticyclone d'altitude s'étale au-delà de 60°W . Pourtant des poussières vues la veille sont aspirées dans les basses couches par une dépression au large de la Bretagne. Les vents au sol sur les Canaries sont de secteur Ouest le matin. Dans l'après-midi et la nuit du 24-25 arrivent les poussières du Tafilalt sur la bordure nord de la dépression de surface du NW Sahara.

- *jusqu'au 30 juillet : un nouvel épisode sahélien*

— le 25 et le 26 VII, la dépression de surface de l'Atlantique nord est descendue sur l'Espagne; l'air à 500 hPa est immobile.

— le 27 VII, l'anticyclone d'altitude s'est scindé en deux. Un anticyclone de surface s'installe sur le Golfe de Gabès entraînant un soulèvement généralisé de poussières sur le Sahara méridional et oriental.

— le 28 VII, ces poussières portées en altitude à 500 hPa ont progressé sur la face sud de l'anticyclone saharien vers l'Atlantique et précipitent sur les Canaries, reprenant les mêmes processus et trajectoire que le 23 juillet.

— le 29 et le 30 VII, la situation n'évolue pas et les chutes de poussières persistent sur les Canaries.

Bilan : 1) jusqu'au 19 juillet, des poussières d'origine sahélienne stationnent en altitude au-dessus des Canaries où leur chute s'est certainement déjà amorcée; le 19, les alizés les ramènent vers les Canaries; 2) le 23, des poussières d'origine sahélienne tombent sur les Canaries, conformément aux études faites sur les trajectographies et données minéralogiques; 3) des poussières transportées à faible altitude arrivent du Sud du Maroc les 24-25 juillet; 4) des poussières d'origine sahélienne précipitent à nouveau sur les Canaries, en accord avec les travaux antérieurs, du 28 au 30 juillet.

Le départ vers l'Ouest

Une exportation lointaine : l'évolution du 12-30 juin 1979

Ce cas de «voyage au long cours» de poussières a fait l'objet d'une recherche collective principalement appuyée sur la télédétection [1].

— le 12 VI, un lithométéore s'échappe du continent africain entre $15-20^{\circ}\text{N}$ (Fig. 57-A). Cette migration s'accroît fortement le 13, à l'approche d'un tourbillon sur le 35°N au large de Gibraltar (Goes-E, 14 h 30TU).

— le 14 VI, le lithométéore est aspiré vers le Nord à l'avant d'une goutte froide polaire (Goes-E, 14 h 30TU).

— le 16 VI, une partie du lithométéore s'évacue vers l'Ouest, repris par les alizés. Il atteint les Caraïbes le 21 et s'y étale jusqu'au 23. Pendant ce temps, une nouvelle expulsion se dégage de la côte africaine, toujours entre $15-20^{\circ}\text{N}$ (Fig. 57-B).

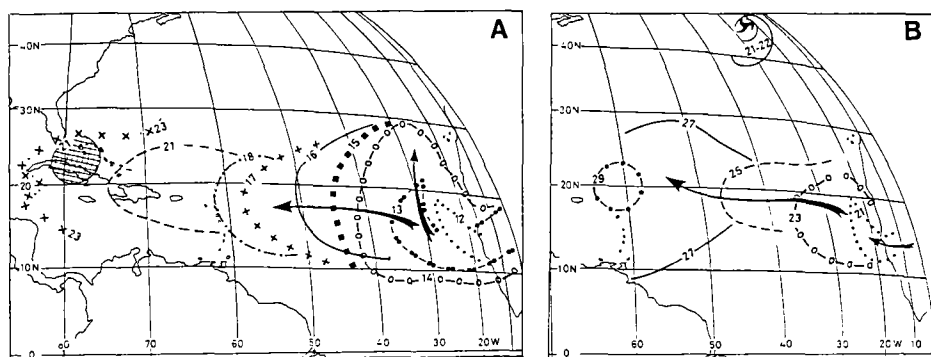


Figure 57. – Déplacement de lithométéores successifs sur l'Atlantique. A) du 12 au 23 juin 1979; B) du 21 au 26 juin 1979.

— le 22-VI, la présence d'un tourbillon à 45-30°W ne provoque aucune aspiration de poussières vers le Nord (Goes-E, 15 h 00TU). Les poussières sont entraînées les jours suivants dans le courant d'Est, situation plus normale pour la saison.

On peut donc suivre sur une période longue un lithométéore pendant son déplacement vers les Caraïbes, étant entendu que seuls des phénomènes de forte intensité initiale peuvent l'être avec netteté sur des milliers de kilomètres, même si la diffusion des nuages estompé progressivement leurs contours.

L'année 1979 : un essai statistique

Cette étude est menée par l'analyse conjointe des images de Goes-E et Météosat I jusqu'au 23-XI-1979, puis de Goes-E seul jusqu'à la fin 79 [1]. Les expulsions de poussières vers l'Ouest à partir de la côte africaine sont très fréquentes : 160 jours d'expulsion, presque un jour sur deux, en 1979 !... Les fréquences mensuelles élevées (février, mai) coïncident avec des situations de forte turbulence atmosphérique. En revanche, les fréquences faibles (avril, octobre, surtout décembre) sont imputables aux conditions de relative stabilité.

Mois	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
Nombre	11	20	14	8	24	15	13	11	14	7	13	10	160 ^(*)

(*) Environ 10 % des situations n'ont pas été analysées à cause de la couverture nuageuse ou de la qualité médiocre des images.

Pour 1979, on a dressé une carte de fréquence du passage des lithométéores au-dessus de l'Atlantique à l'Ouest des côtes africaines grâce aux données satellitaires (Fig. 58). Pour quelques séquences limitées (4 % du total annuel), tous les secteurs du carroyage de la carte ont été concernés simultanément par une expulsion. Ces expulsions généralisées se manifestaient

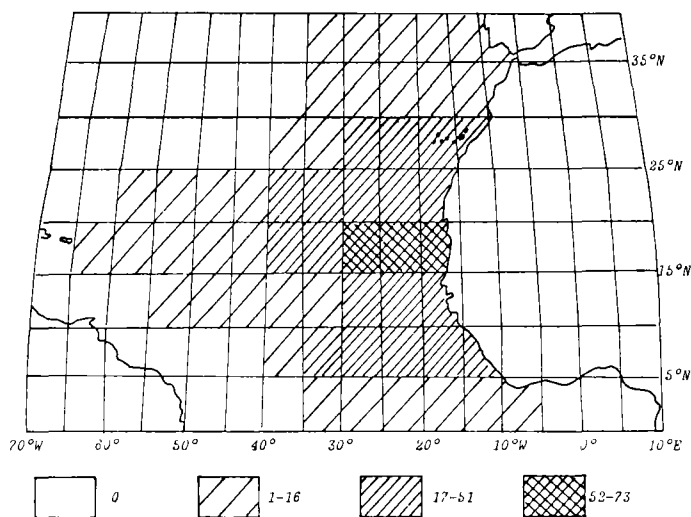


Figure 58. – Fréquence des lithométéores au large de l'Afrique occidentale en 1979 d'après Goes-Est et Météosat.

sur des périodes de 2-5 jours, liées à des phénomènes atmosphériques de grande ampleur. Pour les autres expulsions, le secteur mauritanien domine largement ses concurrents marocain ou guinéen et la durée des séquences s'échelonne de 1 à 14 jours. Les cheminements vers l'Ouest, en relation avec les alizés, n'atteignent 35°W (à 3500 km de la côte), qu'une fois sur deux en moyenne. En deçà s'opèrent les plus importantes retombées de poussières dans l'océan.

La situation sur les Antilles

Les apports éoliens d'origine africaine se sont récemment accrus aux Antilles (*Tableau XXV*) et, après un palier en 1984, la fréquence annuelle a repris son ascension. A la Martinique, la période des arrivées de poussières s'étend de Mai (moyenne : 12,6/an) à Septembre (11,3/an).

Tableau XXV. – Variations mensuelles du nombre de jours d'arrivées de poussières entre 1979 et 1984 à la Martinique (données Y. Lefel, Serv. Météor. Antilles-Guyane).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
1979	0	0	0	4	6	14	17	18	8	4	1	0	72
1980	0	0	1	3	12	15	16	7	2	4	1	2	63
1981	4	3	4	6	11	17	14	18	15	8	0	9	109
1982	5	8	5	6	16	27	22	10	14	9	5	5	132
1983	9	3	13	4	22	29	21	17	20	7	0	3	148
1984	4	2	0	4	9	21	26	18	9	11	5	4	113
X	3,6	2,6	3,8	4,5	12,6	20,5	19,3	14,6	11,3	7,1	2	3,8	

Elle concentre en 5 mois les trois-quarts des jours de poussières. Les mois de Juin et, à moindre titre, de Juillet des années 82, 83 et 84 ont été les plus propices à l'arrivée des poussières. Les années 1979 et 1980 ont des taux annuels relativement faibles (72 et 63/an) par rapport aux 4 années suivantes (> 110).

Enfin, si l'on compare pour la seule année 79 ce qui «quitte» l'Afrique et ce qui «arrive» aux Antilles (*Tableau XXVI*), les jours de poussières aux Antilles sont 2 fois moins nombreux que ceux dénombrés au départ. De Juin à Septembre, le nombre d'arrivées de poussières aux Antilles est du même ordre que celui des poussières ayant quitté l'Afrique. Il y a donc pendant l'été une destination unique (antillaise) des poussières émises vers l'Ouest par le Sahara. En revanche, les émissions du reste de l'année, mensuellement aussi fréquentes que lors des mois d'été (même supérieures en Février et Mai), sont beaucoup moins «reçues» par les Antilles. Or le secteur Sénégal-Golfe de Guinée émet le plus de poussières en Février-Mars et le secteur marocain en émet le plus en Novembre-Décembre. En conséquence, c'est le secteur mauritanien qui, pendant l'été, expulse l'essentiel des poussières arrivant *via* l'Atlantique jusqu'aux Antilles.

Il en résulte que les poussières émises par le Sahara vers l'Ouest pendant le reste de l'année n'adoptent pas une trajectoire les conduisant vers les Caraïbes et l'Amérique centrale : 1) celles de Février-Mars quittant l'Afrique depuis le secteur Sénégal-Golfe de Guinée peuvent soit sédimenter dans l'Atlantique équatorial, soit le franchir vers l'Amérique du Sud septentrionale; 2) celles de Novembre-Décembre, quittant l'Afrique depuis le Sud-Marocain, sont très vraisemblablement aspirées par le système dépressionnaire océanique des latitudes moyennes, saisonnièrement décalé au Sud; celles ne sédimentant pas dans l'océan sont alors, soit ramenées vers l'Afrique, soit déviées vers le NE et prises en charge par la circulation d'Ouest balayant alors Méditerranée et Europe méridionale et occidentale.

On peut imaginer que cette dernière voie a été particulièrement fonctionnelle au Pléistocène froid, quand l'ensemble du dispositif climatique des latitudes moyennes était décalé vers le Sud, d'où une interrogation sur l'incidence éventuelle de telles poussières sahariennes dans certaines sédimentations quaternaires marines ou continentales.

Tableau XXVI. – Comparaison du nombre mensuel de jours d'expulsions de poussières d'Afrique et d'arrivées de poussières aux Antilles pour 1979.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
Afrique	11	20	14	8	24	15	13	11	14	7	13	10	160
Antilles	0	0	0	4	6	14	17	18	8	4	1	0	72

La relation entre la cyclogenèse tropicale et les expulsions de poussières

La question générale des relations pouvant exister entre la cyclogenèse tropicale et les expulsions de poussières sahariennes a trouvé dans l'étude de l'année 1979, par exploitation systématique de l'imagerie satellitaire, un cas particulièrement intéressant et significatif.

Les cyclones tropicaux d'août et septembre 1979

Vu le nombre des perturbations tropicales estivales dans l'Atlantique nord, l'été 1979 est à considérer comme «normal» d'après les informations et bulletins internes du CEMS-Lannion.

En effet, 9 phénomènes ont été enregistrés entre Juin-Octobre, pour une moyenne de 9,85 en Mai-Décembre pour la période 1931-79. Mais parmi ces 9 perturbations, 5 ont atteint l'intensité cyclonique (vents > 63 noeuds, soit > 115 km/h) : Bob (9-16 VII), David (26 VIII-4 IX), Frédéric (29 VIII-14 IX), Gloria (4-15 IX) et Henri (14-24 IX). Les caractères de David et de Frédéric sont très classiques des cyclones tropicaux : 1) *David*, le plus intense des 100 dernières années, a eu une longévité d'intensité cyclonique de 10 jours, du 26-VIII au 4-IX, avec un vent maximal de 150 kn (noeuds), soit 280 km/h, et une pression barométrique de 924 hPa; 2) *Frédéric* a suivi une trajectoire parabolique analogue à celle de David, mais sans en atteindre la violence (vent maximal : 115 kn; pression maximale : 943 hPa).

Cyclones tropicaux et expulsions de poussières

L'étude de la période 22 Août-7 Septembre 1979 met en évidence une relation très précoce, immédiatement au large des côtes africaines, entre l'évolution de 3 grands cyclones et les expulsions de lithométéores [2]. Les cyclones s'établissent le 22 VIII (*David*), le 28 VIII (*Frédéric*) et le 3 IX (*Gloria*) très près du littoral africain entre 10-15°N. On a pu suivre leurs déplacements vers l'Ouest ou le NW grâce à Goes-E à 15 h 00TU (*Fig. 59*).

— Le 22 VIII, le tourbillon initial de *David* apparaît près du Cap Vert. Il s'éloigne vers le large le 23, mais sans manifestation visible de poussière. Le lendemain, il adopte une forme spiralée caractéristique avec apparition concomitante de poussières au-dessus de l'océan : au Sud du 26°N, un voile de poussières uniformément étalé et, juste à l'Est du cyclone, un courant dense et chenalisé, expulsé entre 15-17°N, dont l'allure incurvée traduit l'aspiration par le cyclone. Le 25 VIII, *David* s'est déplacé vers 30°W et le voile de poussière a disparu. Une nouvelle expulsion se manifeste le lendemain entre 15-30°N : son dispositif tourbillonnaire est assez net, renforcé le 27 où elle glisse vers l'Ouest au-delà du 30°W. Ce tourbillon traîne derrière lui une queue de brume sèche diffuse. Il faut souligner dans ce cas l'indépendance du tourbillon de poussière par rapport au cyclone quand *David* se rapproche des Petites Antilles.

— Le cyclone *Frédéric* se manifeste brutalement le 28 VIII au large de l'Afrique, par 10°N, sans phase incipiente perceptible auparavant. Son développement s'accompagne jusqu'à 24°N par un vaste voile de poussières sahariennes sur la mer, dont l'organisation en linéaments parallèles montre bien l'attraction de la polarité cyclonique de Frédéric. Le lendemain, le cyclone atteint 20°N, aspirant derrière lui la brume sèche dans une traîne large d'au-moins 1000km. Cette relation entre cyclone et traîne prend une allure très spectaculaire le 30 VIII. Le voile de poussières aspiré jusqu'au 30°W a un mouvement giratoire manifeste. Le plus remarquable est, à l'Est de la traîne, le renfort apporté par un vigoureux lithométéore bien canalisé, expulsé entre 15-20°N. Cet apport saharien s'intègre parfaitement dans le système cyclonique de Frédéric pourtant distant de près de 3000 km.

— Jusqu'au 3 Septembre, aucun phénomène particulier ne se manifeste près des côtes africaines. Frédéric continue à se déplacer vers l'Ouest mais le voile de poussières s'est dissipé. Le 3 IX, *Gloria* naît sans phase préparatoire nette vers 10°N. Là encore, il y a une coïncidence géographique et chronologique évidente avec l'occurrence d'une brume sèche sur la mer. Le 4 IX, comme *Gloria* se développe en allant vers le NW, parallèlement au littoral africain, le système rotationnel du cyclone affecte la brume sèche et un courant individualisé de poussières au Nord. Le lendemain, l'association cyclone-poussières dérive au NW et les limites du voile

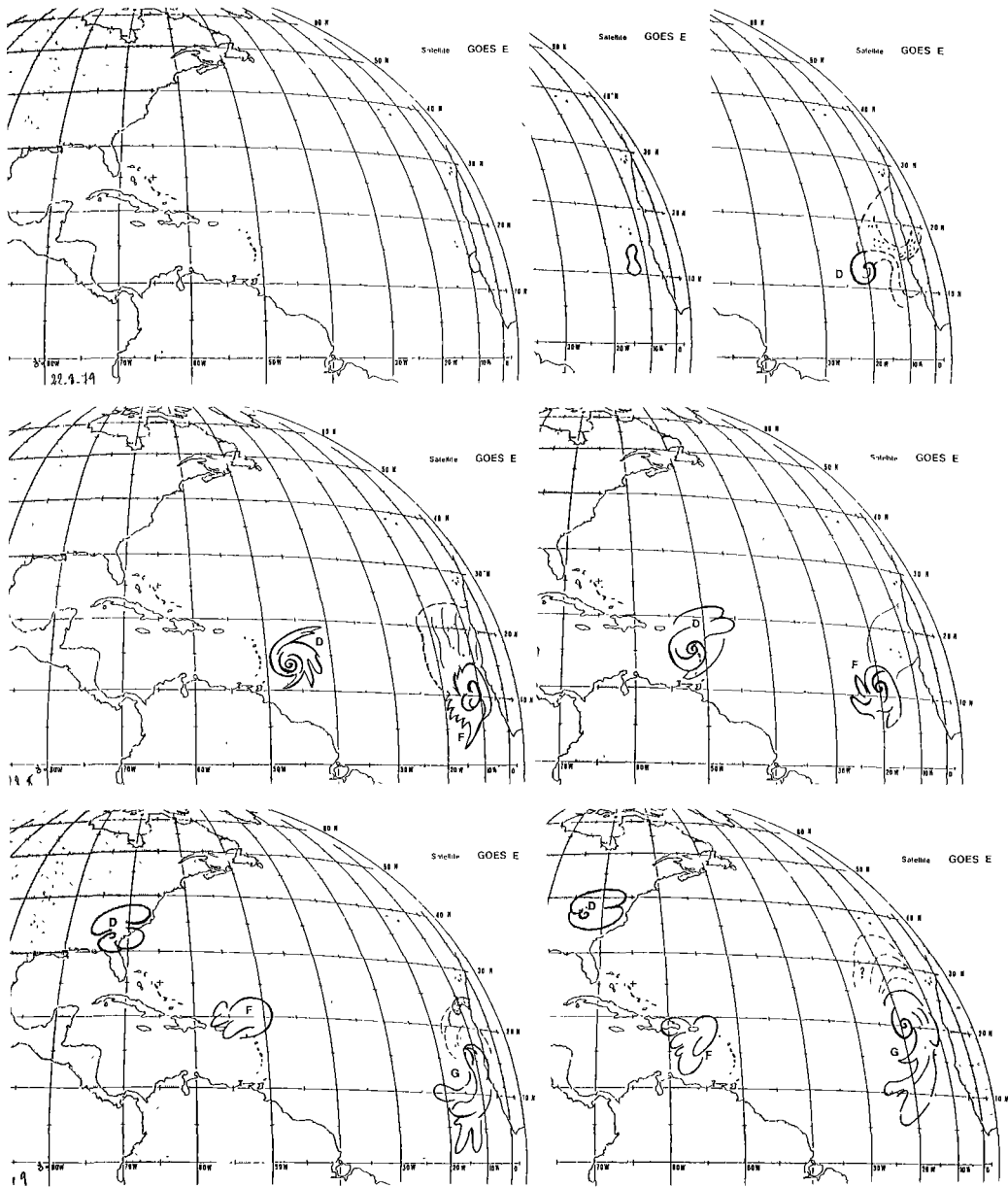
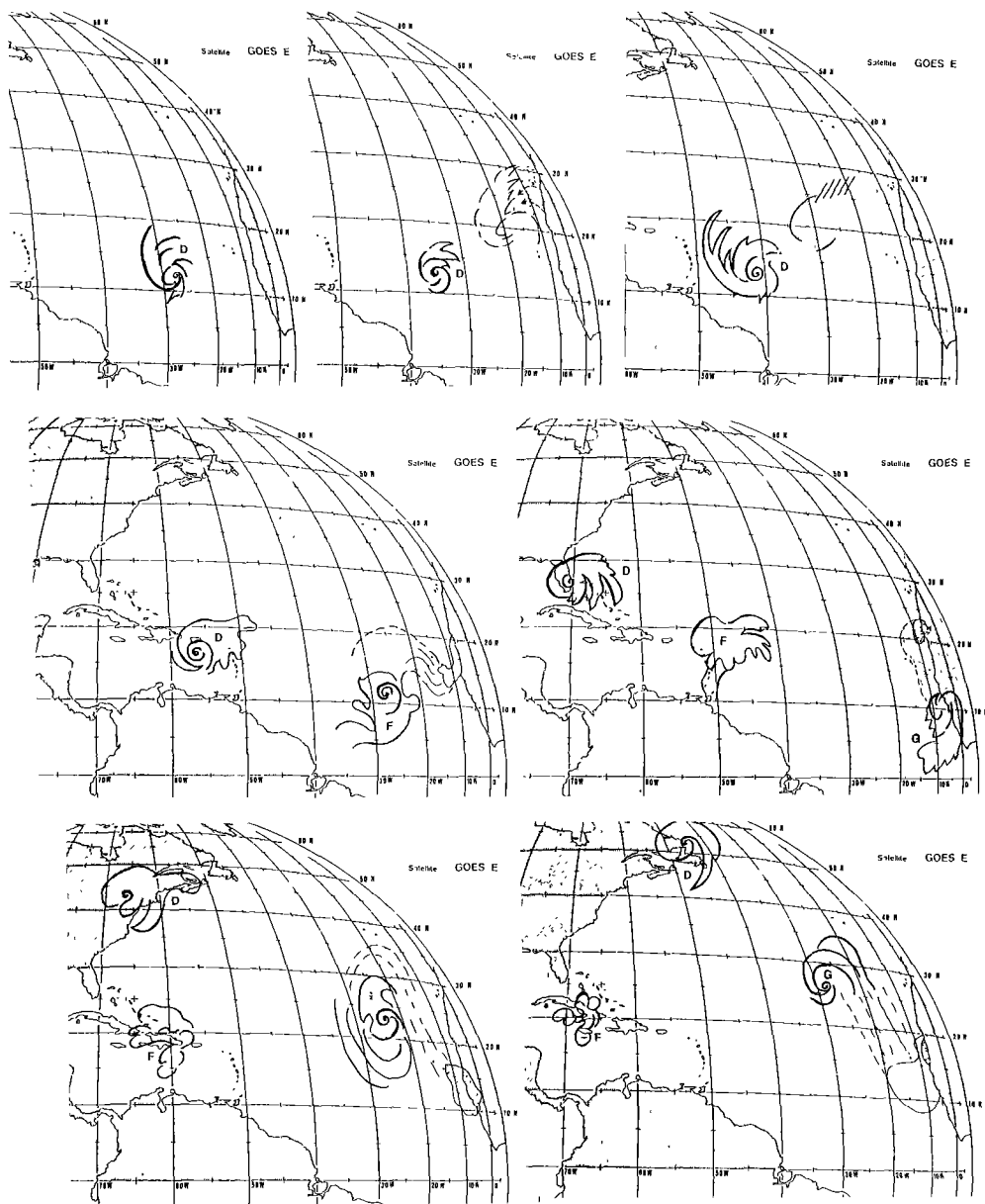


Figure 59. – Corrélation (?) entre les expulsions de poussières et la cyclogenèse tropicale sur l'Atlantique



en 1979 d'après les images de Goes-Est.

sont repoussées à 35°N. Le 6 IX, l'ensemble évolue, le dispositif giratoire de brume sèche se dilue et s'étire au Nord et à l'Est du cyclone. Dans son prolongement, une expulsion se produit sur la côte entre 9-17°N. Enfin le 7 IX, le coeur de Gloria atteint le 30°W. Disparu au Nord et à l'Est, le voile de poussières se maintient en traîne au SE. Sur le littoral, l'expulsion s'est dilatée au-dessus de la mer et un nouveau lithométéore dense vient la renforcer entre 15-20°N.

Commentaire

Ces situations montrent une relation entre la genèse de grands cyclones tropicaux près des côtes africaines et l'expulsion de poussières éoliennes sahariennes vers l'Atlantique. Il ne peut s'agir d'une simple coïncidence car *l'allure dynamique adoptée par les expulsions résulte clairement de l'énorme appel d'air du tourbillon cyclonique et de son effet de traîne*. On peut aussi s'interroger sur la possibilité de causes météorologiques communes qui, soulevant des poussières sur le continent, engendreraient aussi le tourbillon initial du cyclone sur la mer; et même, allant plus loin, s'interroger sur une genèse continentale, loin à l'Est, des cyclones à partir de la ligne des grains tropicaux qui mobiliseraient simultanément les poussières sur le Sud du Sahara.

Cette relation entre cyclogenèse tropicale et déplacement de poussières sur l'Atlantique peut prendre une notable signification pour apprécier le transport de ces dernières et l'intensité de leur chute sur l'Atlantique quand on considère la carte des trajectoires des dépressions tropicales et des cyclones établie, pour 1886-1969, par le National Hurricane Center du National Weather Service, USA [3]. La «trajectoire moyenne» des cyclones y correspond à une bande relativement étroite prenant naissance de Dakar aux Iles du Cap Vert, entre 10-20°N. Elle coïncide donc avec les itinéraires préférentiels vers l'Ouest des lithométéores et avec la zone de plus grande précipitation des poussières dans l'océan. Par ailleurs, on a pu observer grâce à David, Frédéric et Gloria que les masses «visibles» de poussières se diluaient et disparaissaient entre 1000 et 1500 km des côtes africaines ce qui suggère que les plus gros abats de poussière ont eu lieu avant. Mais, même si elles ne sont plus discernables car dispersées dans l'atmosphère, les particules les plus fines doivent aisément poursuivre leur chemin vers les Caraïbes, l'Amérique centrale et le Sud de l'Amérique du Nord, compte-tenu des formidables dynamiques cycloniques qui les entraînent toujours.

Certes, on ne peut pas restreindre la question du déplacement lointain des lithométéores vers l'Ouest à leur seule relation avec les cyclones tropicaux puisqu'il y a des expulsions hors de ce contexte météorologique bien particulier. Mais il faut souligner, malgré tout, les interrelations entre les deux phénomènes, en estimant que leur occurrence commune doit se traduire au niveau des poussières par des transports solides lointains plus massifs et granulométriquement plus grossiers.

Les circonstances météorologiques de la mobilisation et du transport des poussières sahariennes sont diverses. Elles relèvent du rôle de centres d'action atmosphériques situés ou non sur le désert et dont les mécanismes initiaux s'inscrivent au sein de la circulation atmosphérique globale. Parmi les moteurs majeurs de mobilisation et d'exportation des poussières, il faut souligner au Sahara septentrional et central le rôle des multiples fronts et celui de gouttes

d'air froid interrompant occasionnellement la circulation zonale. Dans le Sahara méridional, on a entrevu celui des grains tropicaux.

Une deuxième donnée est apparue : l'altitude considérable atteinte par les poussières dans leur déplacements lointains, ce qui se traduit nécessairement par un affinement granulométrique par gravité du matériel, trait sédimentologique spécifique des poussières distales. L'intervention du paramètre altitudinal contribue nécessairement à distinguer les types de poussières entre eux car les phases de mobilisation initiale dans le désert et les systèmes de vents locaux ne concernent, à de faibles altitudes, que les «poussières locales» dont la fraction grossière est l'une des originalités.

Vu la particularité et la complexité des conditions météorologiques afférentes au phénomène poussière, la convergence d'informations multiples s'est avérée indispensable. A côté de l'examen classique des BME, de l'analyse diachronique des séries d'observations et de mesures, de l'exploitation des reconstitutions de l'évolution des masses d'air par le calcul des trajectographies, il faut rappeler l'intérêt fondamental de l'examen et de l'interprétation de l'imagerie satellitaire pour toute cette étude.

Bibliographie

- [1] 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.
- [2] Coudé-Gaussen G., Rognon P. (1983). Les poussières sahariennes. *La Recherche*, 147 : 1050-1061.
- [3] Hope J.R., Neumann C.J. (1972). National Weather Service, NOAA, *Mariners Weather log*, 15 : 5.