Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 113 (1990)

Artikel: Minéralogie et granulométrie des poussières éoliennes, dites "sahariennes", du 24 avril 1989 à Neuchâtel : leur importance pour l'environnement, les sols et les sédiments

Autor: Kübler, Bernard / Jantschik, Rüdiger / Huon, Sylvain

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89313

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

MINÉRALOGIE ET GRANULOMÉTRIE DES POUSSIÈRES ÉOLIENNES, DITES «SAHARIENNES», DU 24 AVRIL 1989 À NEUCHÂTEL. LEUR IMPORTANCE POUR L'ENVIRONNEMENT, LES SOLS ET LES SÉDIMENTS

par

BERNARD KÜBLER, RÜDIGER JANTSCHIK ET SYLVAIN HUON

AVEC 9 FIGURES ET 6 TABLEAUX

INTRODUCTION

POCHON (1978) avait dû admettre une origine éolienne pour les associations minéralogiques des sols postglaciaires tout particulièrement pour les sols de la Haute-Chaîne du Jura, choisis expressément sur les conseils d'AUBERT parce qu'elle échappe à toute influence glaciaire alpine.

De nos jours, alpinistes comme citadins sont souvent frappés par le fin manteau de poussières ocres qui recouvre parfois neige, tables de jardins ou automobiles. On leur attribue, généralement une origine saharienne.

Le 24 avril 1989, ce manteau a été relativement abondant sur le Littoral neuchâtelois, en tout cas assez abondant, pour que l'on puisse en recueillir des quantités suffisantes pour analyse diffractométrique.

ÉCHANTILLONS, MÉTHODES

Deux échantillons ont été récupérés sur une carrosserie de voiture, l'un au pinceau, échantillon 1 et l'autre par lavage à la pissette, échantillon 2.

Un autre échantillon a été récupéré sur les vitres inclinées de la serre du jardin botanique au Mail, échantillon 3.

Du premier échantillon, il a été fait 2 préparations, l'une de la poussière brute: 1R, et l'autre à partir de la poussière mise en suspension et coulée sur une rondelle de verre: 1A. Cette préparation a par la suite été saturée à l'éthylèneglycol: 1G.

Au total, 6 préparations ont été analysées par diffraction X à l'aide d'un SCINTAG XRD 2000.

Pour la détermination de l'âge apparent par la méthode du potassium/argon, l'échantillon 3 a été décarbonaté, le K mesuré par spectrométrie de flamme et l'Ar par spectrométrie de masse (HUNZIKER 1979).

LES MINÉRAUX DE CES POUSSIÈRES

L'association minéralogique est double: *carbonatée* avec calcite et dolomite et *silicatée* où le quartz domine les micas, chlorite, kaolinite, feldspaths potassiques et plagioclases acides (fig. 1).

Cependant les abondances des minéraux ne sont pas toutes les mêmes dans toutes les préparations.

TABLEAU 1

	SMC	*C14*	*MI10*	*CK07*	*QTZ*	*FK*	*PL*	*CC*	*DOL*
1R	0	2805	12437	9567	35495	4811	5583	17063	12506
1A	0	2805	11757	8850	33867	4589	7851	17219	15583
1G	1845	2370	8151	6264	21768	3036	4679	10289	11315
2R	0	0	7462	9087	40626	2821	3001	30444	3057
2A	0	2884	10995	14762	71829	3519	3397	50318	4182
3	0	0	5973	3893	55098	2702	3877	26110	4064

Intensités brutes en CPM des pics de diffraction, bruit de fond et Kα déduits. SMC: «smectites» glycolées à 1.7nm, C14: chlorite à 1.4, MI10: mica à 1.0, CK07: chlorite et kaolinite à 0.7, QTZ: quartz, FK: feldspaths potassiques, PL: plagioclases acides, CC: calcite, DOL: dolomite.

Suivant les échantillons et le mode de préparation les intensités varient beaucoup, mais la plus forte différence est enregistrée entre les 3 préparations de l'échantillon 1 et les 2 autres échantillons par une diminution très forte du pic de la dolomite. On remarquera que la smectite ne peut être déterminée que dans la préparation 1G celle pour laquelle, les poussières recueillies par lavage ont été coulées sur la rondelle de verre et saturées à l'éthylèneglycol.

Par la méthode de l'étalon externe on peut tenter d'approcher les teneurs des minéraux en grain.

TABLEAU 2

	QTZ	*FK*	*PL*	*CC*	*DOL*	*ND*
1R	5	4	2	8	3	77
1A	5	4	3	8	4	76
1G	3	3	2	5	3	84
2R	6	2	1	14	1	75
2A	10	3	1	24	1	60
3	8	2	2	12	1	75

Teneurs des minéraux en grain en %. Essai par la méthode de l'étalon externe. Les minéraux dosés sont le quartz, les feldspaths potassiques, les plagioclases acides, la calcite, la dolomite. ND: les indosés.

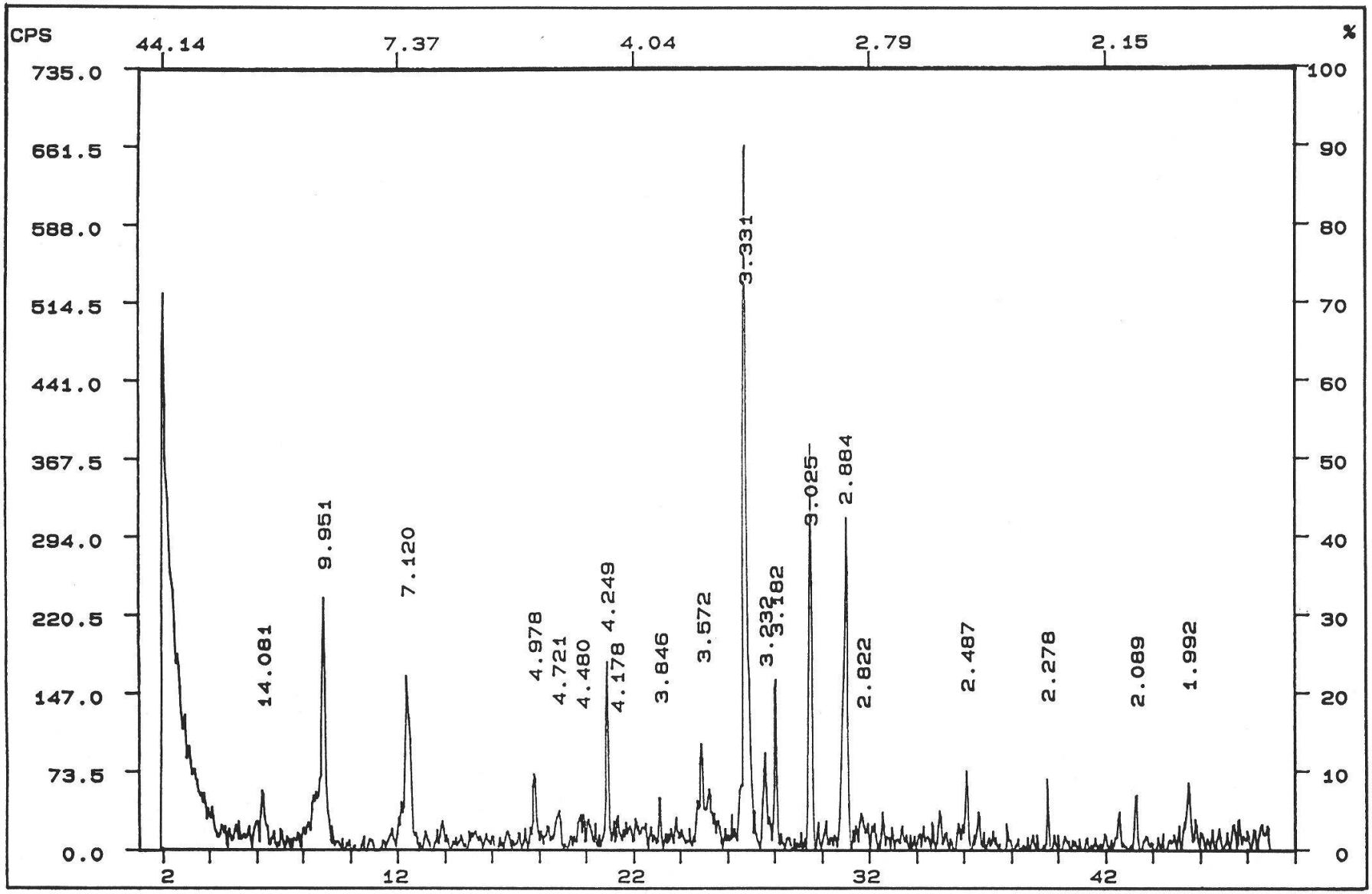


Fig. 1. Diffractogramme de l'échantillon 1R: en abscisse les angles de diffraction, en ordonnées, les intensités absolues en cps ou relatives en %. Les d en Å correpondent aux divers pics des minéraux. La chlorite apparaît par 5 pics à 14, 7, 4.7, 3.5 et 2.8 Å; les micas à 9.9, 4.9, 3.03, 2.4 et 1.99 Å. Les pics principaux du quartz sont à 4.2 et 3.4, de la calcite à 3.8 et 3.3, de la dolomite à 2.88, des plagioclases à 3.18 et des feldspaths potassiques à 3.23. Il y a superposition du 1er et 2e pic de la kaolinite avec les 2e et 4e des chlorites, du 3e des micas avec le pic principal du quartz.

Il ne faut considérer, dans ces teneurs, que l'ordre de grandeur. La faible quantité de poudre ainsi que l'obligation de ne pouvoir faire une préparation que par évaporation d'une suspension pour les échantillons 2 et 3 n'ont pas permis de remplir les conditions normales pour un dosage par diffraction.

Les meilleures analyses sont celles de l'échantillon 1 (1R et 1A). Pour la préparation 1G, la saturation à l'éthylèneglycol a diminué toutes les intensités, l'indosé a augmenté en conséquence. Nous ne tiendrons pas compte de ce résultat. Dans les préparations des échantillons 2 et 3, la dolomite diminue considérablement et la calcite augmente jusqu'à 24 %; le quartz peut même doubler.

Il existe une très grande différence entre l'échantillon 1 et les 2 autres. Cela ne signifie pas que les poussières éoliennes ont changé de composition mais que celle-ci dépend du support et du mode de récupération. L'attraction électrostatique est bien différente d'une peinture à une surface de verre, l'inclinaison de la surface réceptrice joue aussi son rôle.

Nous retenons les résultats des 2 préparations de l'échantillon 1 comme les plus proches de la composition des poussières éoliennes.

En ce qui concerne l'indosé, les phyllosilicates doivent en former la majeure partie. Pour en rendre compte, les intensités relatives à la somme de toutes les intensités des minéraux en grain et des phyllosilicates ont été calculées (tabl. 3).

TABLEAU 3

	QTZ	*FK*	*PL*	*CC*	*DOL*	*SMC*	*C14*	*MI*	*CK7*
1R	35	5	6	17	12	0	3	12	10
1A	33	4	8	18	15	0	3	11	9
1G	31	4	7	15	16	3	3	12	9
2R	42	3	3	32	3	0	0	8	9
2A	44	2	2	31	3	0	2	7	9
3	54	3	4	26	4	0	0	6	4

Intensités relatives des pics de diffraction pour les minéraux en grain: quartz à dolomite, des phyllosilicates, smectite, micas, chlorite et kaolinite-chlorite.

Cette autre manière de présenter les résultats de la diffraction met bien en évidence les différences entre les échantillons: enrichissement en quartz et calcite mais appauvrissement en chlorite, micas, dolomite et plagioclases pour les échantillons 2 et 3.

Il s'agit jusqu'ici de résultats globaux qu'il convient de préciser dans le détail, notamment en ce qui concerne la dolomite et la kaolinite.

La dolomite et l'ankérite

Dans la dolomite, le Mg peut être substitué par le Fe^{2+}. La solution solide est alors ternaire: $CaCO^3$, $MgCO^3$ et $FeCO^3$. Comme le Fe^{2+} a un

rayon ionique (0.074 nm) plus grand que celui du Mg^{2+} (0.066 nm), la maille élémentaire est légèrement plus grande et en conséquence les angles de diffraction plus petits que ceux de la dolomite. On peut donc détecter et même apprécier les teneurs en Fe^{2+} par le déplacement des pics de diffraction. Ce type de minéral est connu sous le nom d'ankérite.

L'écart entre le pic 10.4 de la dolomite stoechiométrique idéale calculé par GRAF (1961) et celui d'une ankérite mesuré par HOWIE et BROADHURST (1958) est de 0.14° $2\theta CuK\alpha^1$. Cet écart est relativement faible et si dolomite et ankérite sont toutes les deux présentes, il est difficile de les séparer. La seule façon de distinguer les 2 pics est de déconvoluer, ce qui a été fait selon une fonction de «PEARSON VII» (SCINTAG 1987).

Les résultats de la déconvolution des pics de diffraction sont reproduits aux figures 2 et 3. L'écart entre la position du pic de la dolomite à 31.00° et celui de l'ankérite à 30.86° est de 0.14°. Le rapport entre l'intensité de l'ankérite sur celle de la dolomite est après déconvolution de 0.48. La teneur en ankérite est à peu près la moitié de celle de la dolomite. Pour la préparation 1A, l'écart reste de: 31.018 – 30.879 = 0.139° malgré que le rapport des intensités soit plus faible: 0.38 (fig. 3).

La position du pic de l'ankérite correspond à une solution solide de composition: Ca 1.03 Mg 0.63 Fe 0.33 (CO3)2. C'est à notre connaissance la première fois que l'on signale une telle ankérite dans les poussières éoliennes.

Dolomite et ankérite ne sont pas assez abondantes dans les 2 autres échantillons pour une déconvolution sûre.

La kaolinite

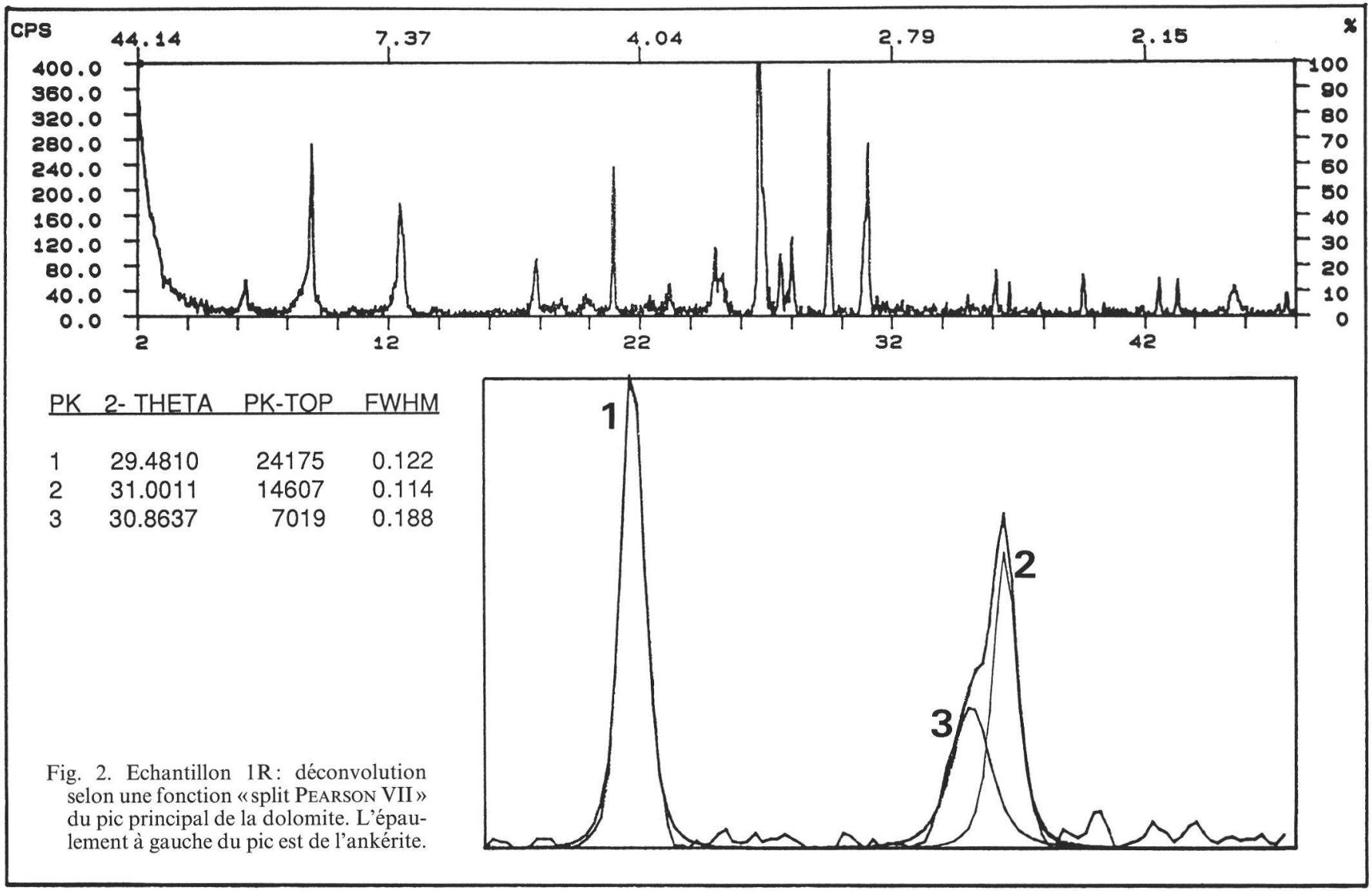
Les pics de diffraction 002 et 004 de la chlorite sont très proches de 001 et 002 de la kaolinite. Ces deux minéraux ne sont pas assez bien cristallisés pour que l'on puisse en mesurer les intensités respectives. Seule la déconvolution permet de les séparer (fig. 4). Le rapport des intensités kaolinite/chlorite est alors de 1.95. Il varie de 1.5 à 2 dans les 6 préparations.

Ce rapport joue un rôle important dans les poussières éoliennes de Méditerranée (cf. plus bas).

Micas-illite

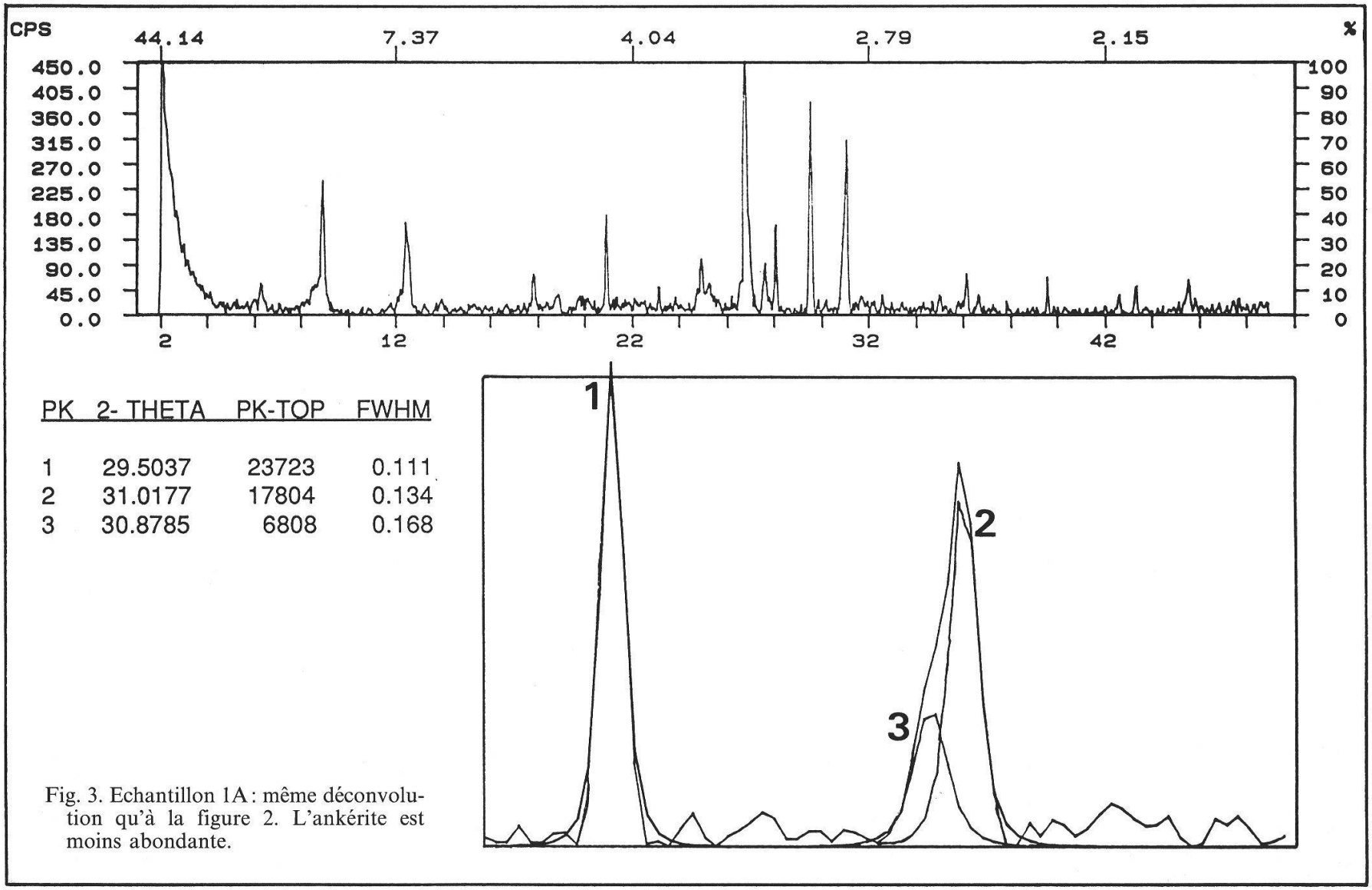
Il y a malheureusement trop souvent confusion sur le terme illite et mica. Nous appellerons ici mica les minéraux pour lesquels les pics de diffraction sont bien effilés. Nous n'utiliserons pas le terme illite parce que, par recours à la déconvolution, il est maintenant possible de séparer les interstratifiés même ceux dont les pics sont très proches de ceux des micas et que, faute de mieux, on appelait jusqu'à ces derniers temps illite.

Par exemple, à la figure 5, le premier pic du mica déconvolué est épaulé vers les petits angles par un large pic centré à 8.70°. Ce pic correspond à des interstratifiés désordonnés qui ont au maximum 10% de couches gonflantes. Le pic principal à 8.91°, est un mica bien cristallisé comme en atteste sa largeur à mi-hauteur: 0.120°.



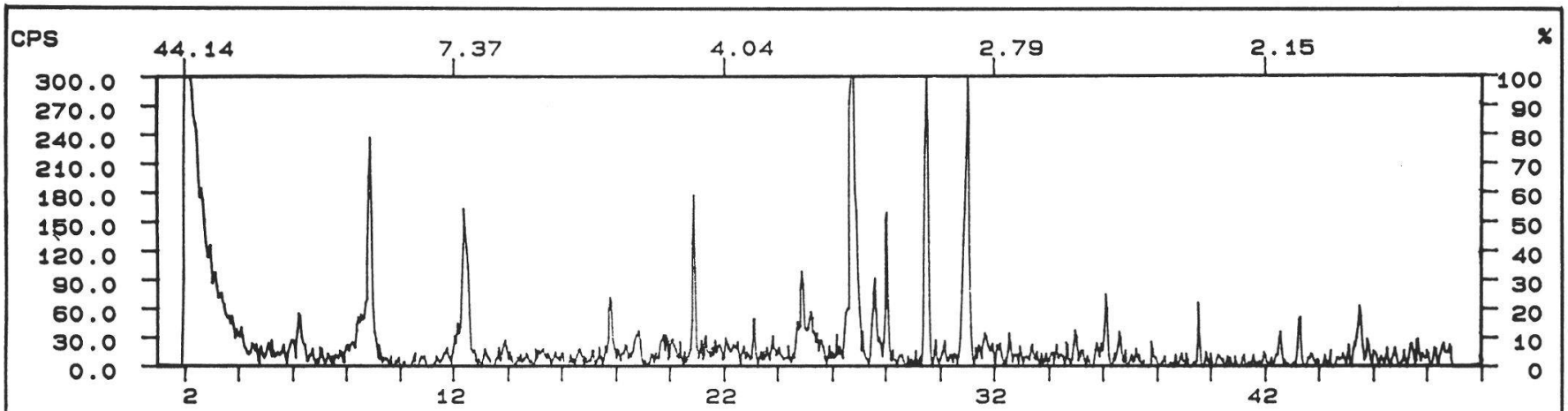
PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	29.4810	24175	0.122
2	31.0011	14607	0.114
3	30.8637	7019	0.188

Fig. 2. Echantillon 1R: déconvolution selon une fonction «split PEARSON VII» du pic principal de la dolomite. L'épaulement à gauche du pic est de l'ankérite.



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	29.5037	23723	0.111
2	31.0177	17804	0.134
3	30.8785	6808	0.168

Fig. 3. Echantillon 1A : même déconvolution qu'à la figure 2. L'ankérite est moins abondante.



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	24.9029	5961	0.217
2	25.2094	3057	0.202

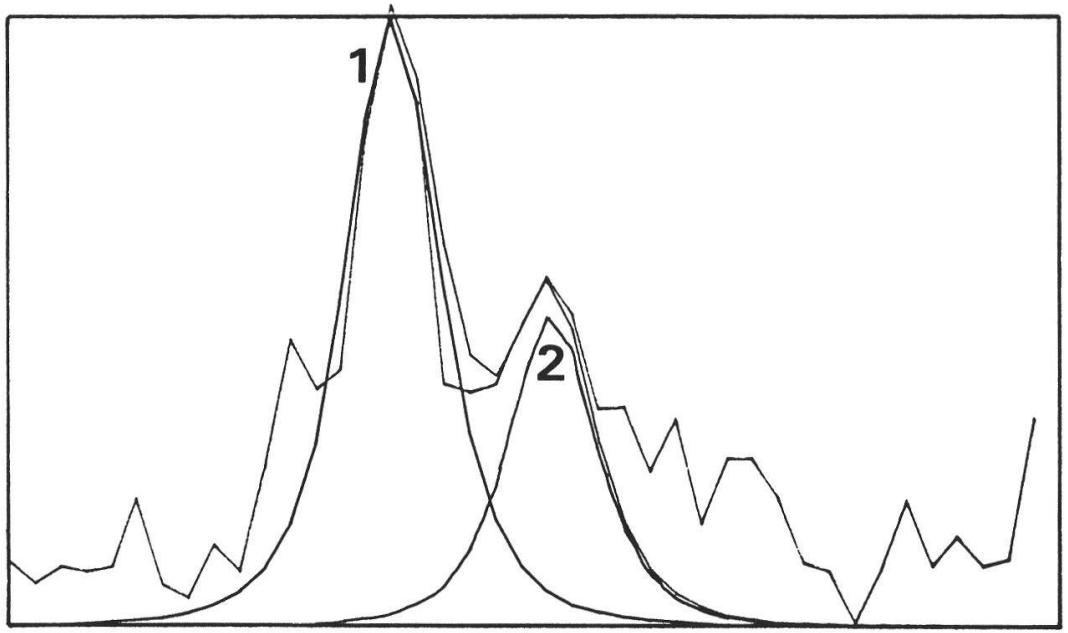
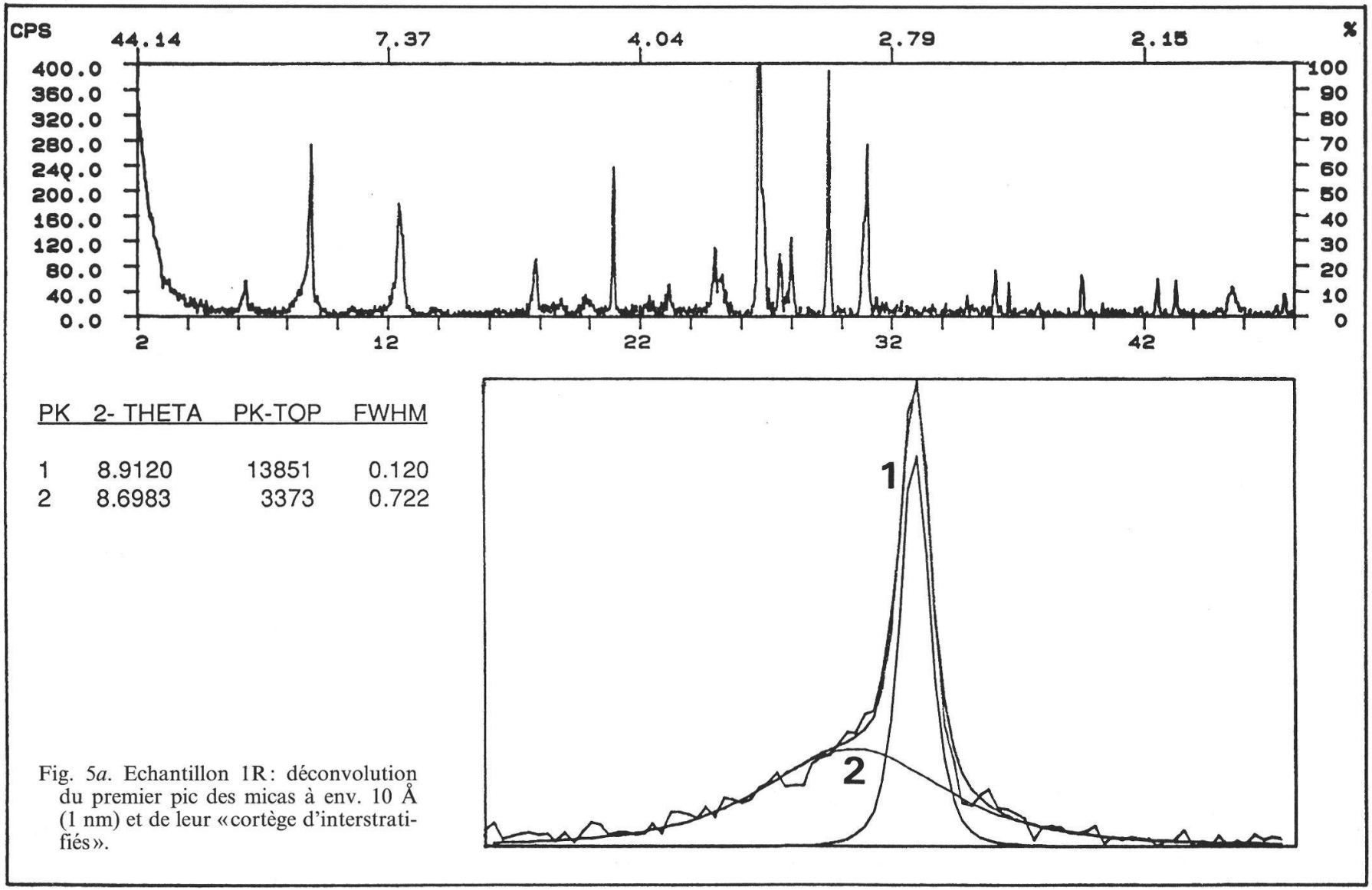
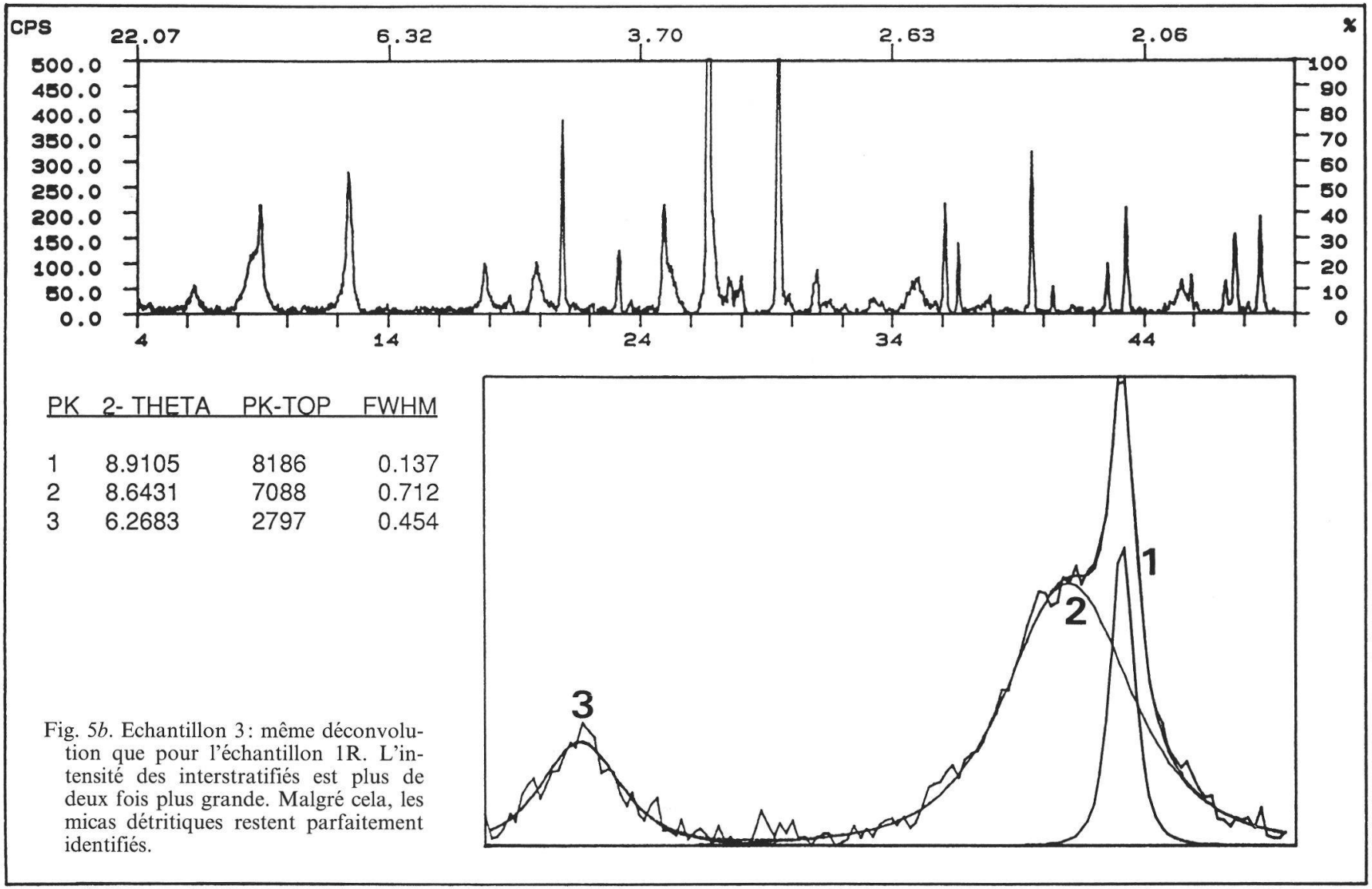


Fig. 4. Séparation par déconvolution du 2e pic de la kaolinite et du 4e de la chlorite. Kaolinite: 24.9, chlorite: 25.2°2θCuKα.



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	8.9120	13851	0.120
2	8.6983	3373	0.722

Fig. 5*a*. Echantillon 1R: déconvolution du premier pic des micas à env. 10 Å (1 nm) et de leur «cortège d'interstratifiés».



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	8.9105	8186	0.137
2	8.6431	7088	0.712
3	6.2683	2797	0.454

Fig. 5*b*. Echantillon 3 : même déconvolution que pour l'échantillon 1R. L'intensité des interstratifiés est plus de deux fois plus grande. Malgré cela, les micas détritiques restent parfaitement identifiés.

La question est alors de savoir s'il s'agit d'une véritable muscovite ou d'une phengite, mica dioctaédrique légèrement plus riche en Si dans les couches tétraédriques et en Mg-Fe dans les couches octaédriques. Pour les faibles quantités de poudre disponibles, il n'est pas possible d'appliquer la méthode REY et KÜBLER (1983) et la distinction n'est possible que par la mesure aussi exacte que possible de la position des pics 006 et 0010. Ici aussi les pics sont si rapprochés que seule la déconvolution permet de les séparer efficacement.

Pour 006, l'écart entre une phengite et une muscovite peut être, par exemple, 0.23°, entre une muscovite et le quartz 10.1, 0.04° et entre quartz et phengite, 0.27°. Pour la préparation 1R, l'écart entre le pic mixte de quartz et de muscovite confondus et le mica à déterminer est de 0.17° (fig. 6). Il s'agit donc bien d'une phengite.

A 0010, l'écart entre une phengite et le quartz 20.1 est de 0.12, entre la muscovite et le quartz, 0.52 et entre la muscovite et la phengite 0.40. Pour la préparation 1R l'écart entre la muscovite et le quartz est de 0.46°, entre la phengite et le quartz, 0.22° et entre la muscovite et la phengite, 0.24° (fig. 7 et tabl. 4).

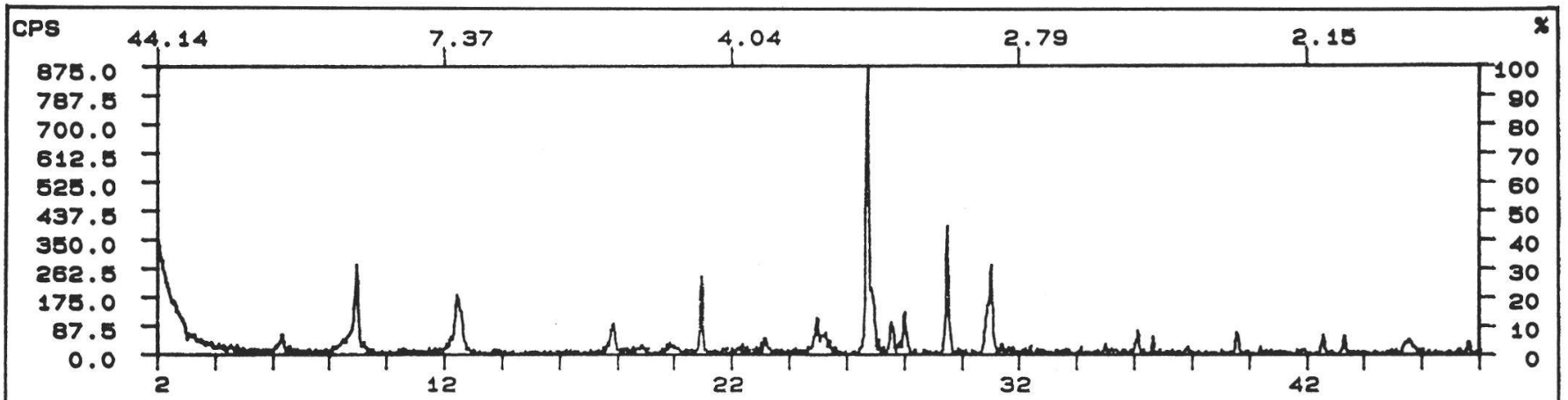
TABLEAU 4

	Réf.	*Mes.*	*Diff.*
Quartz - muscovite	0.52	0.46	−0.06
Quartz - phengite	0.12	0.22	+0.10
Muscovite - phengite	0.40	0.24	−0.16

Ecarts en °2θCuKα[1] entre 0010 muscovite et phengite, quartz 20.1 selon les références de BORG et *al.* (1969) et les valeurs mesurées par déconvolution pour les poussières éoliennes 1R.

Le rapport des intensités (hauteurs du pic uniquement) muscovite/phengite est de 10. La muscovite est à peu près dix fois plus abondante que la phengite. Celle-ci, du reste, est moins substituée par Fe, Mg et Si que la phengite de référence de GÜVEN (1968 *in:* BORG et *al.* 1969).

Il n' y a donc pas d'illite dans cet éolien mais de la muscovite majoritaire, un peu de phengite et des interstratifiés très irréguliers.



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	26.7014	53546	0.095
2	26.8752	10243	0.162
3	27.9946	7211	0.141
4	27.5366	5846	0.155

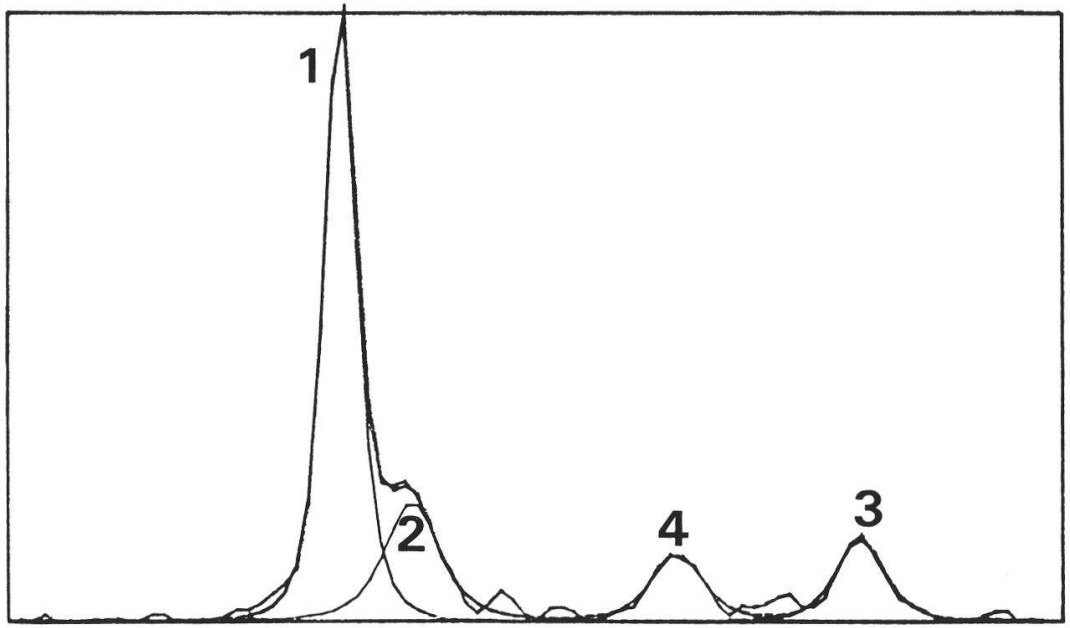
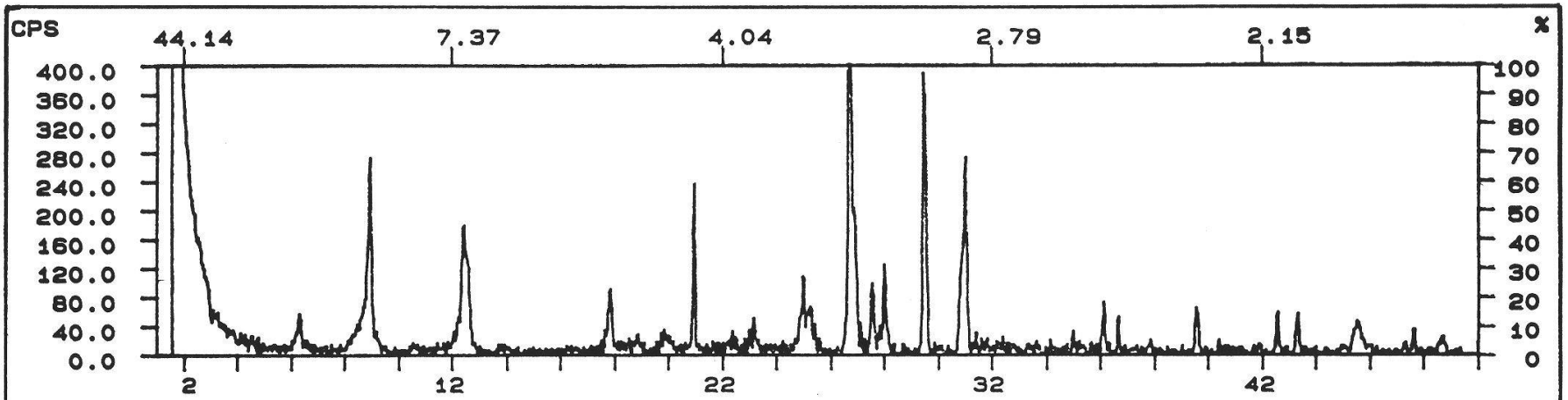


Fig. 6. Echantillon 1R : déconvolution du 3e pic de la muscovite 2M et de la phengite 2M. La muscovite à 26.7° est confondue avec le quartz. Le petit pic de la phengite à 26.8 est parfaitement isolé. Le pic des feldspaths potassiques est ici à 27.54° et celui des plagioclases acides à 27.99°.



PK	2- THETA	PK-TOP	FWHM
1	45.5112	2551	0.358
2	45.7512	255	0.086
3	45.9667	579	0.158

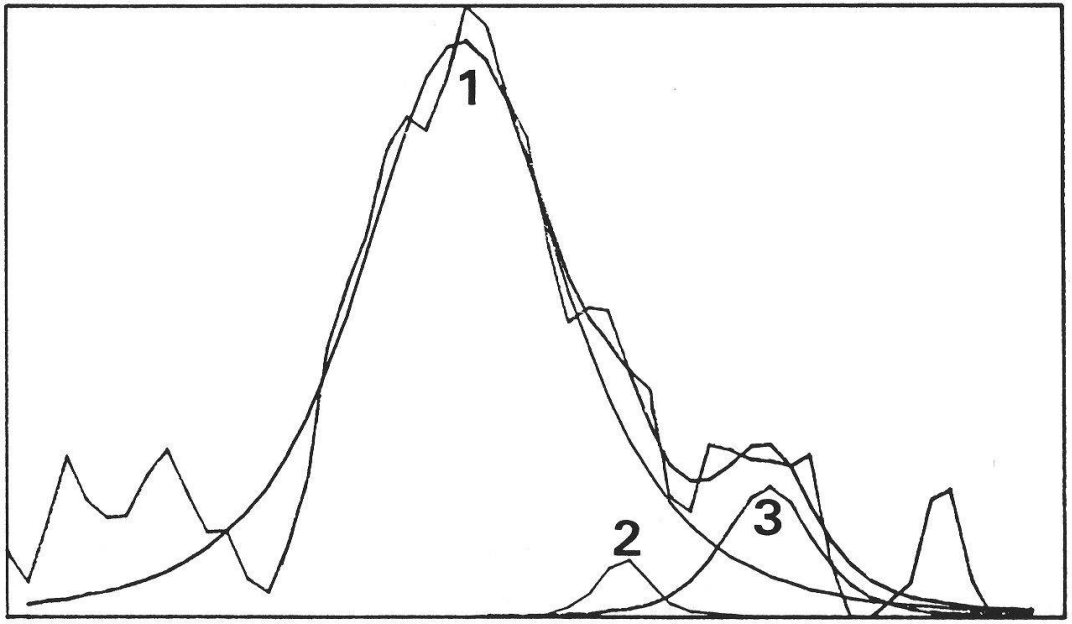


Fig. 7. Echantillon 1R : déconvolution du 5e pic de la muscovite 2M à 45.51°, de la phengite 2M à 45.75° et du quartz de référence à 45.97°.

TAILLE DES GRAINS

Pour le granulomètre à laser ORIEL LOT - CIS 1, il suffit d'une goutte de suspension pour obtenir une analyse granulométrique de 0.5 à 150 µm. Pour l'éolien déposé, on ne connaît pas l'état d'agrégation en aérosol. En plus des essais préliminaires, la suspension a d'abord été analysée après une agitation simple, puis après 30 sec et après 60 sec d'exposition aux ultra-sons. Les conditions d'analyse sont décrites au tableau 5.

TABLEAU 5

	1	*2*	*3*	*4*	*5*
Essai 1	0	381	121728	3.1 E+6	65
Essai 2	30	321	120193	3.6 E+6	48
Essai 3	60	285	108969	4.3 E+6	30

Conditions de mesure
1: temps d'exposition aux ultra-sons en secondes; 2: temps de comptage en secondes; 3: nombre total de particules comptées; 4: concentration en millions de particules/ml; 5: concentration des solides en mg/l.

Temps de comptage, nombre de particules comptées et concentration des suspensions sont assez proches pour que les résultats soient comparables.

TABLEAU 6

	Moy. N	*E.-t. N*	*Méd. V*	*Moy. V*	*E.-t. V*
Essai 1	3.42	±2.42	17.12	22.54	±19.09
Essai 2	2.94	±1.95	10.24	19.65	±21.21
Essai 3	2.37	±1.48	5.57	10.85	±14.18

Moyennes, écarts-type, médianes exprimées en µm; pour le nombre de particules: N; pour le volume des particules: V.

Les paramètres centraux de ces analyses granulométriques, telles que les moyennes et médianes décroissent avec l'augmentation du temps d'exposition aux U.-S. C'est le résultat de la désagrégation.

Dans le détail, d'après les histogrammes de la figure 8, l'éolien non traité présente 3 modes centrés à respectivement à 45, 20 et 5 µm.

Après 30 secondes de désagrégation aux U.-S., l'individualisation de ces modes s'améliore mais le mode à 5 µm augmente.

Avec une minute aux U.-S., le mode à 50 µm disparaît, celui de 20 µm décroît fortement et le mode à 5 µm devient majoritaire.

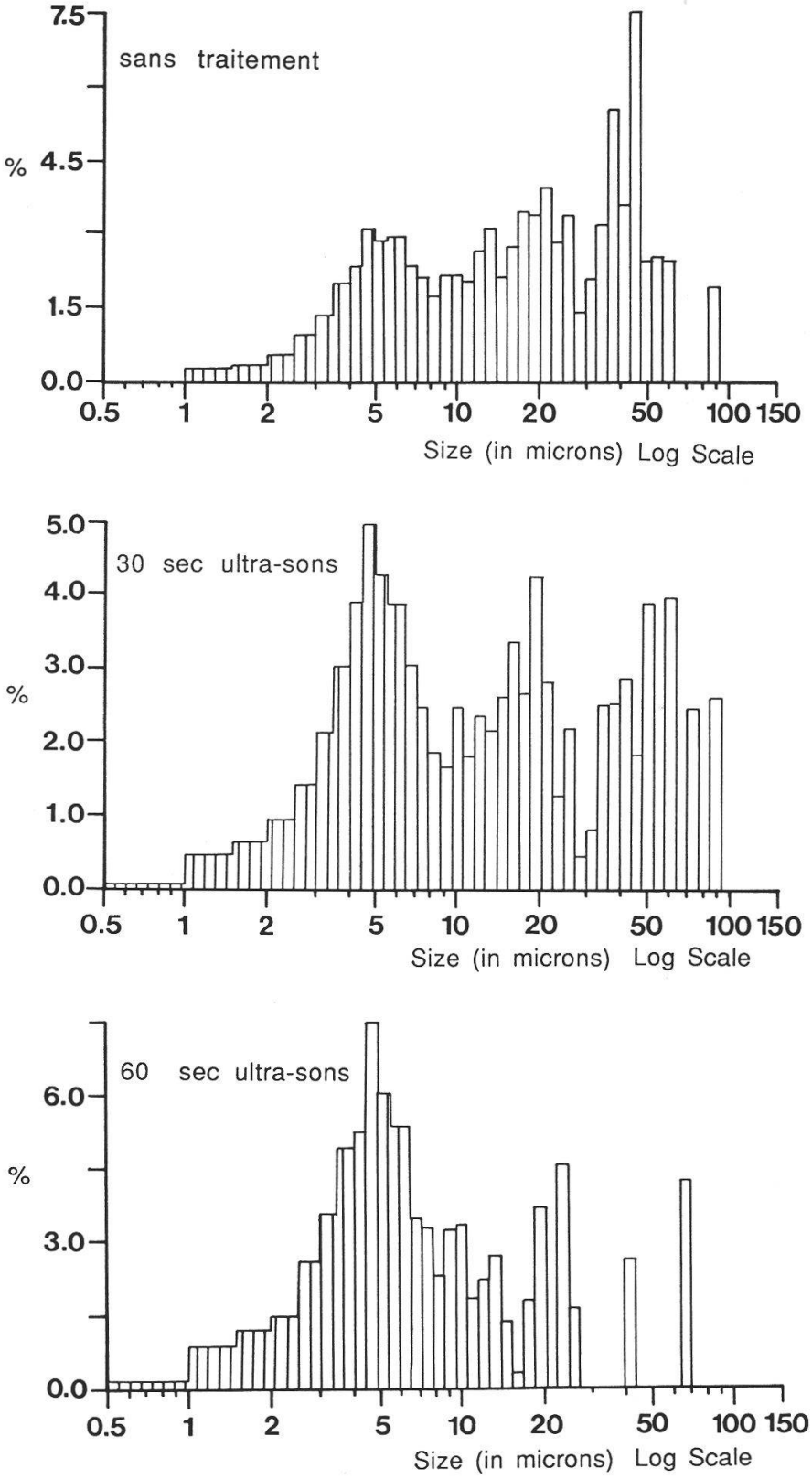


Fig. 8. Histogrammes par le granulomètre à laser ORIEL LOT CIS de l'échantillon 1R: en haut, agitation mécanique simple, au milieu après 30 sec d'exposition aux ultra-sons, en bas, après 1 minute. Les agrégats grossiers, mode à 50 μm, sont désagrégés. Ils disparaissent après une minute aux U.-S.; le mode à 4-5 μm se renforce d'autant.

Les courbes cumulatives (fig. 9) permettent une analyse plus fine. On se rappellera qu'avec ce type de représentation — en abscisse: échelle logarithmique des tailles en µm, et en ordonnées: échelle probabilitaire en pour-cent des fréquences — une droite, la «droite d'HENRI», est la représentation et la preuve d'une distribution gaussienne.

La courbe cumulative de l'éolien non traité peut être décomposée par trois droites, correspondant aux trois modes des histogrammes. Cet éolien est donc le mélange mécanique de trois «stocks», de trois distributions granulométriques à tendance gaussienne. La droite 1 correspond au mode le plus grossier, 2, le mode médian le plus abondant, 3, le mode fin.

Par traitement aux U.-S. (ultra-sons), le stock 1 tend à disparaître mais il apparaît un stock 4 qui correspond à la taille des argiles.

Les U.-S. désagrègent les plus grosses particules de 30 à 100 µm augmentant d'autant le stock argileux et celui centré à 5 µm.

Par traitement aux U.-S., on tend à ramener les grains aux particules «élémentaires» ce qui respecte le principe d'immanence, condition sine qua non pour la comparaison des résultats non seulement dans le même laboratoire mais aussi interlaboratoires. On ne peut toutefois en tirer des conclusions sur le degré d'agrégation des aérosols naturels.

Cependant, quel que soit le traitement appliqué, le tri reste mauvais, les différences entre les pentes des diverses droites sont relativement faibles. Ce mauvais tri est le résultat du mélange de plusieurs «populations» granulométriques tant de particules en agrégats que de particules «libres». Les modes de ces populations sont centrés à 40-50, 15-20, 4-5 µm et, pour la fraction argileuse, probablement inférieur à 2 µm. C'est la caractéristique cardinale qu'il faut retenir de ces dépôts éoliens.

ÂGE APPARENT K/Ar

La méthode conventionnelle de datation K/Ar est fondée sur la décomposition radioactive du 40K en 40Ar. Elle permet théoriquement d'estimer l'âge de la source géologique du mélange de minéraux potassiques contenu dans l'aérosol (muscovite, phengite, interstratifiés mica-smectite, feldspath potassique et plagioclases) pour peu que tout l'Ar mesuré puisse être attribué à la désintégration du potassium.

L'âge obtenu pour l'échantillon 3 est de 243 ± 7 Ma. Il correspond d'après l'échelle chronostratigraphique d'ODIN (1982) au Trias inférieur et/ou au Permo-Trias non différencié. Comme les séries de cette époque sont peu exposées à l'affleurement en Afrique du Nord, ce résultat préliminaire montre qu'il s'agit d'un mélange complexe de minéraux:

1. soit de minéraux hercyniens rajeunis au cours des processus de formation, de diagenèse ou d'altération de roches plus jeunes soumises actuellement à l'altération;
2. soit de minéraux issus d'un mélange dans la province d'origine ou au cours du transport éolien.

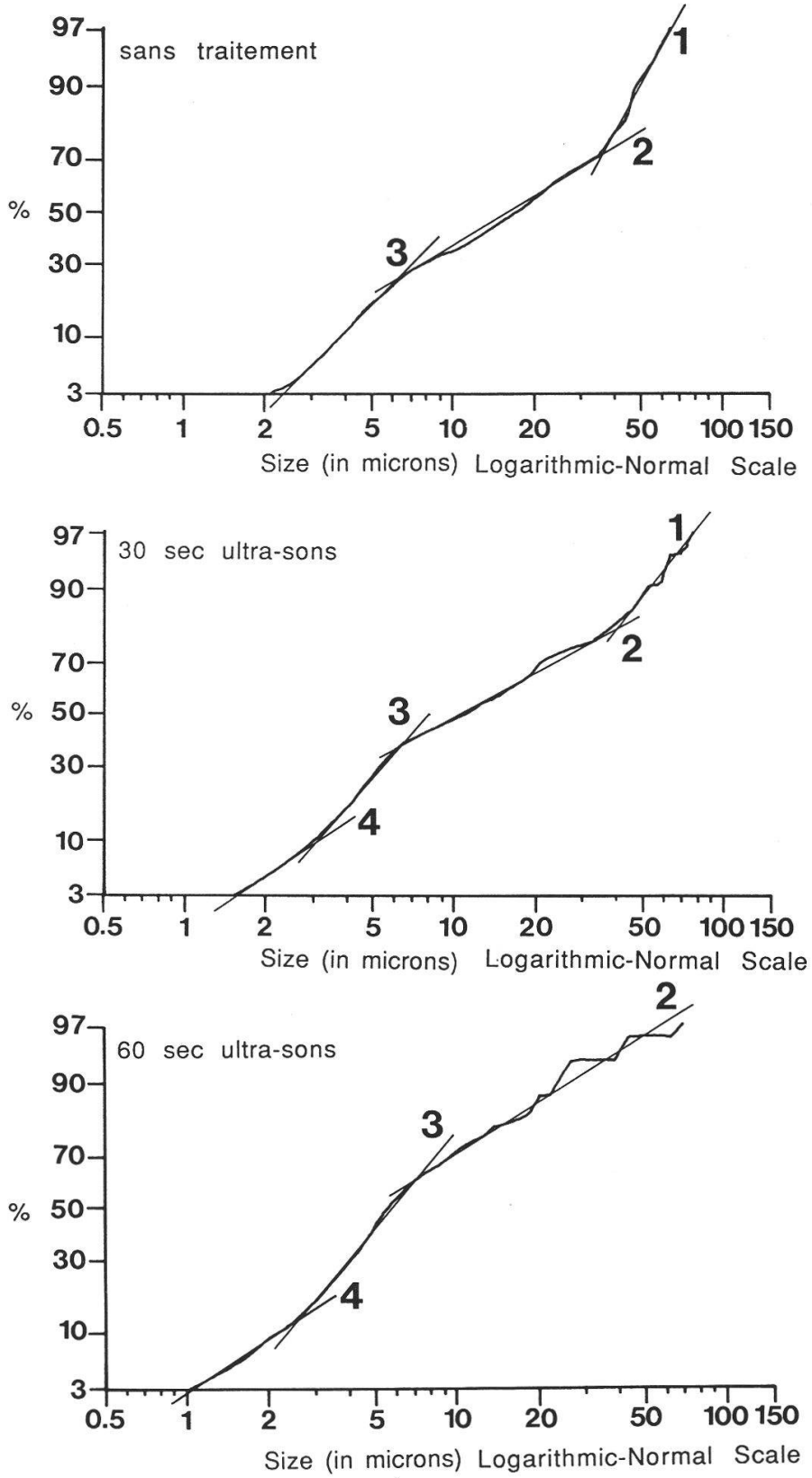


Fig. 9. Echantillon 1R, Courbes cumulatives: agitation mécanique simple, en haut; après 30 sec aux U.-S., au milieu et après 1 min aux U.-S., en bas. Ces courbes se décomposent en 4 droites d'HENRY correspondant à 4 «stocks» granulométriques. On notera un tri faible dû au mélange mécanique de ces divers stocks.

COMPARAISON AVEC LES AÉROSOLS CONNUS

Comme les poussières sahariennes doivent obligatoirement passer au-dessus de la Méditerranée, nous avons essayé de les comparer aux nôtres.

Pour une comparaison valable, il eût fallu harmoniser les méthodes de prélèvement. En effet suivant le mode d'échantillonnage, non seulement la teneur en aérosol mais aussi les granulométries sont susceptibles de varier. Par exemple, par la méthode des voiles de teflon utilisées dans les campagnes EOLO du CNR italien (TOMADIN et *al.* 1984), la quantité recueillie est dix fois plus faible que par filtration (CHESTER 1972). Pour la Méditerranée, les auteurs italiens ont dû multiplier par 10 leurs teneurs pour pouvoir les comparer à celle de PROSPERO (1979). Ne disposant pas de capteurs lors du dépôt des poussières, nous ne pourrons comparer les teneurs.

Pour la granulométrie, les fractions <1 µm ne sont pas retenues par la méthode des voiles alors que par filtration ou par notre méthode de récupération, elles sont retenues jusqu'à 0.4, 0.35 ou 0.1 µm suivant le filtre. Comme les fractions fines, <1 µm, ne sont pas abondantes, la comparaison des granulométries est justifiée.

Granulométrie, comparaison avec EOLO

Lors des croisières d'Ancône à Messine (EOLO 81-1) ou du Pirée à Trieste (EOLO 81-2), les histogrammes (moins détaillés que les nôtres) ont un mode principal autour de 5 µm. Pour les stations à terre de Messine et Bologne, ce mode ne varie que peu, seules les fractions argileuses sont plus abondantes. L'enveloppe des courbes cumulatives des deux croisières a la même pente que les nôtres et le même tri faible (TOMADIN et *al.* 1984).

Mais il y a plus; que les poussières viennent du sud comme au printemps 1981 ou du nord, en automne de la même année, histogrammes et courbes cumulatives sont les mêmes. Un même dépôt de poussières sahariennes (selon les auteurs cités), échantillonné à Messine et à Bologne, donc à 800 km de distance, ont aussi les mêmes caractéristiques granulométriques.

Cela signifie que seules les conditions aérodynamiques règlent le transport et les tailles des poussières quelles que soient les provinces d'origine.

On retrouve donc les mêmes caractéristiques granulométriques en Adriatique, en Méditerranée centrale, en bordure de la plaine du Pô et, au nord des Alpes, au pied du Jura.

Composition minéralogique des aérosols en Méditerranée

Contrairement à la granulométrie, la composition minéralogique reflète les provinces d'origine.

En mer Tyrrhénienne, du détroit de Sicile à Gênes, par des croisières BAN 80, plusieurs aires géographiques ont pu être distinguées d'après les associations minéralogiques des aérosols (MAZZUCOTELLI et *al.* 1984). Tout au nord, dans les aérosols au-dessus du golfe de Gênes et de la mer

Ligure, le rapport kaolinite/chlorite est plus petit que 1 (Kaol/Chl <1), la serpentine est le minéral-index de cette aire. En allant au sud, la serpentine disparaît, la smectite devient plus fréquente, il apparaît talc, palygorskite et imogolite. Les plagioclases ainsi que les feldspaths potassiques augmentent de même que la dolomite. Dans la fraction <2 µm, les illites venant du sud sont mal cristallisées au contraire de celles du nord.

En mer Adriatique et Ionienne, croisières EOLO-81, les aérosols liés aux vents du nord sont comme en mer Tyrrhénienne plus riches en micas mieux cristallisés et en serpentine. Ces minéraux seraient d'origine alpine (TOMADIN et *al.* 1984). Dans les poussières liées aux vents du sud, kaolinite et palygorskite augmentent. Les sédiments correspondants présentent les mêmes tendances et CHAMLEY (1971) considère la palygorskite et la kaolinite, dans les sédiments, comme des minéraux typiques d'environnements péridésertiques.

Avec EOLO 83-1 et 83-3, les analyses ont été étendues aux aérosols de Méditerranée orientale et occidentale (LENAZ et *al.* 1986). Il se confirme que les vents du sud entraînent en Méditerranée centrale calcite, dolomite, kaolinite et palygorskite et, en Méditerranée occidentale, calcite, dolomite et kaolinite mais moins de palygorskite et plus de feldspaths.

Les poussières sahariennes

En 10 ans d'observation sur la Méditerranée centrale, 34 épisodes de transport direct du Sahara ont été constatés par PRODI et FEA (1978, *in:* LENAZ et *al.* 1986). Ces épisodes de Sirocco transportent de grandes quantités de kaolinite (LENAZ et *al.* 1986). Ce sont eux qui traversent les Alpes et déposent leur charge jusque sur le Jura.

La composition minéralogique de ces poussières sahariennes échantillonnées le 30 mars 1981 à Messine et à Bologne est typique d'un transport direct. Elle s'écarte de la composition de toutes les autres poussières des croisières de l'Adriatique (81-1 et 81-2) par l'absence d'analcime, de talc, d'hématite, d'amphibole et une plus faible quantité de chlorite. Par contre, elles sont beaucoup plus riches en calcite et la dolomite est à Bologne presque aussi abondante que la calcite (TOMADIN, et *al.* 1984).

Les poussières de Neuchâtel ont une composition si semblable à celles de Messine et Bologne que nous les assimilons aussi à un transport direct d'origine saharienne.

QUANTITÉ ET FRÉQUENCES DE CES POUSSIÈRES SAHARIENNES

Les précipitations de poussières sèches sont celles qui frappent le plus l'attention mais ce ne sont ni les plus fréquentes ni les plus abondantes. Au col de Bavella en Corse (LOYE-PILLOT et *al.* 1986), sur 60 pluies échantillonnées tout au long de l'année 1964, 19 étaient des pluies «rouges» et leur charge en particules représentait le 84 % des charges de toute l'année. Les 16 % restant sont à attribuer soit aux vents locaux soit aux transports

indirects. Les teneurs en particules sont très variables. En mai, il est tombé le 60 % de toutes les précipitations annuelles et les pluies des 5 et 10 mai représentaient à elles seules le 40 % du total. Cela illustre bien l'importance des événements exceptionnels. Un «super événement exceptionnel» peut à lui tout seul amener une charge équivalente à la somme des charges de plusieurs années normales.

La précipitation annuelle des poussières rouges à Bavella (sèches et pluies «rouges») correspond à un flux de 1.4 g/m^2/an soit avec une densité de 1.25 à 1.65, une couche annuelle d'environ 10 µm.

Le tonnage annuel, calculé par LOŸE-PILLOT et *al.* (1986), est de 3.9 10 E6 t/an alors que le débit solide du Rhône est estimé à 4.3 10 E6 t/an. Le flux annuel des poussières rouges est, en Méditerranée occidentale, du même ordre de grandeur que le flux du Rhône.

On comprend dès lors l'importance des poussières rouges même dans nos régions.

IMPORTANCE

Ce flux de poussières sahariennes est actuellement important pour notre environnement mais c'est aussi un facteur perturbateur dont il faut tenir compte dans les recherches fondamentales.

Environnement, pluies acides

Les poussières sahariennes avec leur teneur en calcite, en dolomite et en ankérite peuvent neutraliser les pluies acides, non seulement dans l'atmosphère mais aussi après leur dépôt.

A Bavella, le pH des eaux de pluie oscille entre 4.1 et 5.6. Dans les pluies rouges déjà, les minéraux calciques neutralisent en partie cette acidité et le pH atteint 6.8 donc presque la neutralité (LOŸE-PILOT et *al.* 1986). Comme on peut encore reconnaître de la calcite dans le résidu sec de ces pluies, il est raisonnable de penser que la neutralisation se poursuivra au sol.

Les poussières sahariennes exercent donc un effet bénéfique contre l'acidité des pluies. Cependant si l'on considère que la majorité des sols du Plateau et du Jura sont acides, on doit conclure que le flux des poussières sahariennes ne peut contrebalancer l'acidité d'origine biologique.

Pédogenèse

Les sols du Haut-Jura qui ont échappé aux glaciers alpins ont été complètement décalcifiés par les premiers stades de colonisation qui comme on le sait sont très acides. Les seules associations qui ont résisté sont celles des minéraux alumino-silicatés tels les feldspaths et les phyllosilicates. Ces associations sont très différentes de celles des résidus non carbonatés des calcaires sous-jacents. POCHON (1978) leur avait donc reconnu une origine éolienne comme celle des Loess périglaciaires et postglaciaires.

La similitude des associations de POCHON et celle des poussières sahariennes actuelles nous pose un problème. En effet, pour les sols, nous ne pouvions leur trouver qu'une origine périglaciaire, le Sahara étant verdoyant à cette époque. On est alors obligé d'admettre que les vents des déserts subtropicaux et ceux des steppes périglaciaires transportent les mêmes minéraux. Cette hypothèse mérite de nombreuses recherches.

Sédimentation

Pour les lacs de Suisse en général, les taux de sédimentation sont d'après STURM (1985) étonnamment uniformes, autour de 4 mm/an. Pour le lac de Neuchâtel, ce taux est de 1.6 mm/an pour les 5000 dernières années et de 2.25 actuellement (BAPST 1987). Le flux saharien ne formerait que la 200e partie du flux annuel soit 0.5 %. Il est donc très dilué dans les sédiments lacustres.

En Atlantique NE, avec un taux de sédimentation moyen de 1 à 2 cm/1000 ans (RUCH 1987, JANTSCHIK et LOHOFF 1987), la contamination potentielle par l'éolien est beaucoup plus grande, elle atteint 5 à 10 %. On doit en tenir compte pour toutes les interprétations à partir des données minéralogiques, géochimiques et isotopiques.

CONCLUSIONS

D'après leur composition minéralogique et granulométrique, les poussières rouges du 24 avril 1989 tombées dans la région neuchâteloise sont bien des poussières d'origine saharienne. Les teneurs en calcite, dolomite et ankérite sont susceptibles de neutraliser en partie l'acidité des pluies dans l'atmosphère déjà. La neutralisation se poursuit au sol mais la réserve en minéraux calciques n'est pas assez grande pour neutraliser l'acidité d'origine biologique des sols.

Si en Méditerranée occidentale, on estime que le tonnage de ces poussières rouges est presque du même ordre de grandeur que la charge solide annuelle du Rhône, dans les lacs suisses et en particulier dans le lac de Neuchâtel, elle ne contribue au maximum que pour 0,5 %. Cette contribution peut atteindre 10 % par exemple dans les sédiments de l'Atlantique NE.

Il ne s'agit ici que d'ordres de grandeur. On sait que durant l'Holocène et particulièrement dans les premiers stades de colonisation végétale mais aussi au Dryas III, l'éolien n'était pas d'origine saharienne et que le flux était beaucoup plus grand.

La similitude de la composition minéralogique des 2 apports d'origine différente pose une question que seules des recherches systématiques en Suisse, dans l'actuel et dans les dépôts holocènes, pourront éventuellement résoudre.

Les âges apparents apportent des faits nouveaux capitaux. En effet, nous attribuions une origine alpine aux associations minéralogiques de l'éolien de POCHON. Comme les associations dans l'Holocène (RUCH 1987) et dans le Quaternaire de l'Atlantique NE (JANTSCHIK, en prépara-

tion) sont très semblables à celles de POCHON, nous leur conférions aussi une origine alpine. Or, dans ces séries, les premiers résultats d'âge apparent vont de plus de 400 à près de 1000 Ma donc en tout cas d'âge antéhercynien (prévarisque). Cela exclut l'hypothèse d'une origine alpine ou d'une origine unique. Avec des âges apparents permo-triasiques pour les poussières actuelles sahariennes, le schéma se complique encore.

Les rapports isotopiques deviennent donc indispensables pour mieux cerner l'origine de ces associations minéralogiquement si semblables et si différentes en âge apparent. On peut espérer reconstituer une paléoanémométrie, en tout cas dans l'Holocène, éventuellement plus largement dans le Quaternaire.

Remerciements

Nos remerciements vont à M. J.-P. Schaer qui a d'emblée saisi toute l'importance de ces poussières, à Mme Antje Schwalb et M. Romuald Magranville qui les ont soigneusement récoltées, à Mme Claudine Grétillat qui les a analysées par diffraction X, à MM. les professeurs Delaloye et Hunziker pour leur hospitalité et celle de leur laboratoire. Ces recherches sont soutenues en partie par les crédits 2-5.502 et 531 du Fonds national suisse pour la recherche scientifique.

Résumé

Les poussières rouges sahariennes, tombées le 24 avril 1989 sur le Littoral neuchâtelois sont composées de quartz, calcite, dolomite, plagioclases acides, feldspaths potassiques, mica, kaolinite, chlorite et smectite. La dolomite est accompagnée d'une ankérite et les micas, muscovite et phengite, d'interstratifiés gonflants. Cette composition étant parfaitement comparable à celle des poussières sahariennes de Messine et de Bologne, leur origine et l'apport direct depuis le Sahara sont confirmés. Les carbonates calciques tamponnent, dans l'atmosphère déjà, puis sur les sols, l'acidité des pluies. La réserve calcique ne peut toutefois neutraliser, dans les sols, l'acidité biologique. L'analogie entre les poussières sahariennes actuelles et les dépôts éoliens péri- et immédiatement postglaciaires pose des questions sans réponse pour le moment.

Un âge apparent de 243 ± 7 Ma (Trias inférieur / Permo-Trias) est déterminé par la méthode K-Ar pour le résidu de décarbonatation. Il s'agit probablement du résultat du mélange de minéraux de source différente.

Zusammenfassung

Roter Wüstenstaub aus der Sahara, im Gebiet von Neuchâtel (Schweiz) am 24. April 1989 niedergegangen, setzt sich aus folgenden mineralischen Bestandteilen zusammen: Quarz, Kalzit, Dolomit, Plagioklas, Kalifeldspat, Glimmer, Kaolinit, Chlorit und Smektit. Dolomit kommt gemeinsam mit Ankerit vor, an Glimmern finden sich Muskovit und Phengit sowie verschiedene Wechsellager Minerale.

Die K/Ar-Datierung am nichtkarbonatischen Sedimentanteil ergeben ein Alter von 243 ± 7 Ma. Es handelt sich vermutlich um Mischalter, verursacht durch den Eintrag von Mineralien verschiedener Quellen.

Die Zusammensetzung dieses äolischen Sediments entspricht exakt jener von saharischen Stäuben, die aus Italien (Messina und Bologna) beschrieben sind. An ihrer Herkunft und ihrem direkten Eintrag aus der Sahara besteht kein Zweifel.

Die karbonatischen Bestandteile dieser Stäube puffern bereits in der Atmosphäre und später im Boden den pH-Wert des Regenwassers ab. Allerdings reicht die puffernde Wirkung des Karbonats nicht immer aus um die biologisch erzeugte Säure in den Böden zu neutralisieren.

Die Ähnlichkeit rezenter Stäube aus der Sahara mit peri- und postglazialen äolischen Sedimenten gibt weitere Fragen auf, die zur Zeit noch nicht beantwortet werden können.

Summary

From the red saharan dust deposited on the 24th of April 1989 in the region of Neuchâtel, Switzerland, the following minerals were determined by X-ray diffractometry: quartz, dolomite, calcite, plagioclase, K-feldspar, kaolinite, chlorite and smectite. Dolomite is accompanied by ankerite. Micas are muscovite and phengite.

This mineralogical composition is very similar to those described in two sites in Italy (Messina and Bologna). Their origin and direct input from the Sahara is confirmed.

Carbonate composants of these dusts buffer already the acidity of rain water in the atmosphere and afterwards in the soils. But the buffer capacity is not always sufficient to neutralize the biologically produced acidity of the soils.

The similarity of the recent saharan dust and peri- and postglacial deposits leads to yet unanswered questions and needs futur work on this topic.

A 243 ± 7 Ma K-Ar age value is determined for non-carbonate residue of the dust.

BIBLIOGRAPHIE

BAPST, A. – (1987). Le Lac de Neuchâtel: Physico-chimie et turbidité des eaux. Concentration, Minéralogie et Granulométrie des Particules en Suspension. 101 pp. *Thèse Fac. Sci. Univ. Neuchâtel.*

BORG, I. Y. et SMITH, D. K. – (1969). Calculated X-ray Powder Patterns for Silicate Minerals. *Geol. Soc. of America.* 896 pp.

CHAMLEY, H. – (1971). Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Sc. Géol. Mém.* 35. 209 pp.

CHESTER, R. – (1972). Geological, geochemical and environmental implications of the marine dust veil. *In:* D. DYRSEN et D. JAGNER, The changing chemistry of the oceans. *Nobel Symposium* 20: 291-305. (Ed. Wiley Intersc. Div.) *New York.*

GRAF, D. L. – (1961). Crystallographic tables for the rhombohedral carbonates. *Am. Mineralogist.* 46: 1283-1316.

GÜVEN, N. – (1968). The crystal structure of 2M1 Phengite et 2M1 Muscovite. *Carnegie Institution, Wash. Year Book.* 66: 487-494.

HOWIE, R. A. et BROADHURST, F. M. – (1958). X-ray data for dolomite and ankerite. *Am. Mineralogist.* 43: 1210-1214.

HUNZIKER, J. C. – (1979). Potassium Argon Dating. *In:* Lectures of Isotope Geology. 329 pp. (Springer) *Berlin, New York.*

JANTSCHIK, R. et LOHOFF, R. – (1987). Sedimentation im Westeuropäischen Becken, Nordostatlantik, bei 47° 30′ N, 19° 00′ 20° 00′ W. 150 pp. *Unveröff. Dipl. Arb., Universität Göttingen.*

LENAZ, R., LANDUZI, V. et TOMADIN, L. – (1986). Apports et concentration des masses de poussières éoliennes sur le bassin oriental et occidental de la Méditerranée. *Mem. Soc. Geol. It.* 36: 189-200.

LOÿE-PILOT, M. D., MARTIN, J. M. et MORELLI, J. – (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature* 321, N° 6038: 427-428.

MAZZUCOTELLI, A., LANDUZZI, V., LENAZ, R., OLIVERI, F., TOMADIN, L. et VANNUCCI, R. – (1984). Polveri in sospensione nella bassa atmosfera del Mare Tirreno e del Canale di Sicilia (Crociera Ban 80). *Mem. Soc. Geol. It.* 27: 311-321.

ODIN, G. S. – (1982). The Phanerozoic Time Scale. *In:* Numerical Dating Stratigraphy. 1040 pp. (J. Wiley & Sons.)

POCHON, M. – (1978). Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. *Mém. Soc. Hélv. Sc. Nat.* 190 pp.

PRODI, F. et FEA, G. – (1978). A case of transport and deposition of Saharan dust over the italian peninsula and Southern Europe. *J. Geophys. Res.* 84: 6951-6960.

PROSPERO, J. M. – (1979). Mineral and sea salt aerosol concentrations in various Ocean regions. *J. Geophys. Res.* 84: 725-731.

REY, J. F. et KÜBLER, B. – (1983). Identification des micas des séries sédimentaires à partir de la série harmonique 001 des préparations orientées. *Bull. Soc. Suisse Min. Pétr.* 63: 13-36.

RUCH, P. – (1987). Relations entre suspensions et sédiments actuels dans l'Atlantique NE (45°-49° N, 16°-22° W). Minéralogie et géochimie des sédiments depuis 13 000 ans. *Thèse Fac. Sc. Univ. Neuchâtel.*

SCINTAG – (1987). PAD V, Diffraction System, Users Manual. 230 pp. Scintag Inc. *Santa Clara, California, U.S.A.*

STURM, M. – (1985). Particules en suspension dans les lacs. EAWAG *Mitt./Nouv.* 19: 9-15.

TOMADIN, L., LENAZ, R., MAZZUCOTELLI, A. et VANUCCI, R. – (1984). Wind-blown dusts over the Central Mediterranean. *Oceanologica Acta* 7: 13-23.

Adresse des auteurs: Institut de géologie, rue Emile-Argand 11, CH-2007 Neuchâtel, Suisse.