

LOÏC LE RIBAUT (\*)

## EXOSCOPIE ET ENDOSCOPIE DES QUARTZ D'ORIGINE DETRITIQUE

RÉSUMÉ. — La détermination des caractères particuliers propres aux divers milieux évolutifs a permis de mettre en évidence sur les grains de quartz deux grandes catégories de critères de reconnaissance: les traces d'actions mécaniques et les traces d'actions chimiques; leurs combinaisons, leur forme et leurs relations par rapport à la morphologie du cristal qu'elles affectent permettent par exoscopie au microscope électronique à balayage (M.E.B.) de retracer sur un grain plusieurs stades évolutifs dans leur ordre chronologique. Cela concerne le grain de quartz individuel. Mais le problème de l'étude d'une formation sableuse est beaucoup plus complexe, car plusieurs stocks, ayant chacun une origine et une histoire propres, peuvent se trouver réunis en un milieu de dépôt final. L'endoscopie intervient alors comme étroit complément de l'exoscopie et permet de remonter, stade après stade, à l'origine de chacun des stocks concernés.

On sait depuis longtemps que la morphologie de détail des grains de sable traduit fidèlement leurs conditions de transport et éventuellement de sédimentation.

Le quartz étant généralement le constituant le plus répandu des sables, il était logique que les chercheurs ayant tenté de déchiffrer cette « mémoire » géologique aient songé à étudier d'abord les caractères morphologiques des grains de quartz.

Au point de vue morphologie externe, les premiers résultats importants ont été obtenus dès 1942 par A. CAILLEUX, inventeur de la morphoscopie. Celle-ci est basée sur l'observation à la loupe binoculaire des grains sur fond noir et à sec. CAILLEUX distingue quatre grandes catégories de grains: les Non-Usés (« NU »), grains peu évolués d'arènes, de rivières courtes, de glaciers et de petites plages; les

---

(\*) *Adresse*: Compagnie Française des Pétroles Laboratoire Central - 114, Cours du Maréchal Galliéni - 33400 Talence (France).

Emoussés-Luisants (« EL »), grains usés par un long frottement dans l'eau; les Ronds-Mats (« RM »), grains usés par les chocs éoliens; enfin, les Ronds-Mats-Sales (« RMS »), anciens grains RM cimentés puis repris.

Plus tard, l'utilisation des microscopes électroniques à transmission (1962) puis à balayage (1968) a permis à divers auteurs et principalement à KRINSLEY d'étudier en détail la morphologie des quartz. Malheureusement, les critères de reconnaissance ainsi établis (principalement basés sur l'étude des traces de chocs) ne permettent de déterminer que des grains déjà très évolués, ayant subi une longue histoire géologique. En outre, l'étude des seules traces de chocs interdit, à mon avis, de distinguer plusieurs évolutions successives dans des milieux différents à forte agitation, car les actions mécaniques (chocs notamment) s'exercent dans la plupart des milieux aquatiques, glaciaires et éoliens.

Aussi, la morphosopie classique, qui permet également de retracer à l'aide d'une loupe binoculaire plusieurs évolutions sur des grains bien évolués, et d'isoler les grains peu usés, s'affirme-t-elle comme la méthode d'analyse des quartz la plus fiable (grand nombre de grains observés en peu de temps) et la moins onéreuse.

Par contre, la loupe binoculaire ne peut déceler des traces de très petites tailles et interdit donc de discerner des évolutions embryonnaires, dont la durée est insuffisante pour modifier la forme des grains, même lorsqu'il s'agit d'une éolisation brutale. Dans ce domaine, les méthodes basées sur les seules traces de chocs, même au microscope électronique, sont également tenues en échec. Or, il est fréquent de rencontrer des grains de quartz dont la morphologie générale indique que les évolutions subies par eux ont été peu accusées.

Il importait donc de mettre au point une méthode d'étude qui, utilisant au maximum les capacités de grandissement du microscope électronique à balayage (Meb), isole des caractères d'origine tant chimique que mécanique apparaissant sur les grains dans les divers environnements, même après une très courte période d'évolution des grains dans ces derniers. C'est cette méthode que j'ai appelé l'EXOSCOPIE. L'exoscopie des quartz est basée sur l'observation des relations qui existent, d'une part entre les traces d'actions mécaniques et chimiques et d'autre part entre les arêtes, les faces planes et les dépressions qui affectent la surface des grains.

Outre la description de l'exoscopie, cet article a pour but de montrer la complémentarité étroite qui existe entre cette méthode et l'endoscopie (étude des inclusions) pour la détermination de l'histoire géologique des quartz détritiques d'un sable constitué de différents stocks.

## I. - Exoscopie. Les évolutions simples.

### 1. - Les quartz non-évolués.

Je qualifie de quartz non-évolués ceux qui n'ont subi ni altération, ni transport, ni évolution d'aucune sorte: il peut donc s'agir de quartz prélevés dans une roche-mère saine, ou de quartz de néogénèse en cours de croissance.

La *forme des cristaux*, due à leur génèse, est très différente selon le type de roche considérée; mais, quelque soit leur origine, les quartz non-évolués présentent au point de vue de l'exoscopie les caractères principaux suivants:

- L'existence de surfaces « nues », totalement dépourvues de dépôts ou de traces de corrosion.
- Surtout, absence totale de toute trace d'action mécanique provoquée par un agent évolutif externe (éolisation, brassage, etc.).

Les traces d'actions mécaniques, les dépôts et les figures de corrosion pouvant atteindre des tailles extrêmement petites (fraction de micron), seul le m.e.b. peut permettre d'affirmer qu'un quartz est réellement non-évolué.

### 2. - Les quartz d'altérite et les quartz pédologiques.

La distinction que j'introduis ici entre quartz d'altérite et quartz pédologiques peut apparaître comme un artifice; en fait, cette distinction est nécessaire pour la clarté de l'exposé et l'interprétation des analyses exoscopique. Nous qualifierons de « quartz d'altérite » un quartz qui subit une altération au sein de la roche-mère dont il est originaire. Il s'agira donc d'un quartz n'ayant encore jamais été transporté.

Nous appellerons « quartz pédologique » un quartz ayant déjà subi un transport et donc une ou plusieurs évolutions plus ou moins complexes, et qui aura ensuite été immobilisé à un moment quelconque de son histoire, immobilisation qui se traduira par des influences d'ori-

## PLANCHE I

## LES TRACES D' ACTIONS MECANIQUES

- Photo 1. — *Cupule de choc*. La partie gauche de celle-ci montre la limite nette illustrant l'arrachement de la partie saïse du quartz; le point d'impact (P) et le bulbe de percussion (B), ainsi que les « lignes d'arrachement » (L) sont bien visibles; noter que dans la partie la plus profonde de la cupule, des diatomées sont piégées: nous sommes donc en présence d'un quartz à évolution intertidale de haute énergie. Les cupules de choc peuvent également être trouvées sur des quartz éoliens, et torrentiels, ainsi qu'en milieu glaciaire; mais dans ce dernier cas, on ne voit pas de trace d'impact: la cupule n'est pas due à un choc, mais à une pression élevée.  
(Echantillon de plage, Sainte-Lucie, Martinique; collection R. Clocchiatti).
- Photo 2. — Quartz éolisé artificiellement. La zone de faiblesse ayant favorisé la formation de la *cupule* (flèche) trouve son origine dans les nombreux chocs qui ont désorganisé la périphérie du cristal.
- Photo 3. — *Croissant de choc* typiquement éolien (bordure aigue, sans la moindre trace de polissage).  
(Echantillon de Haute-Plage, Montmartin, Manche, France).
- Photo 4. — « V » de choc typiquement éolien, qui recoupe une trace de choc plus ancienne. Noter que celui-ci a une orientation totalement différente de celle du petit « V » (cercle) qui recoupe également la trace ancienne. L'orientation très variable des « V » de choc permet de les différencier des figures de dissolution qui suivent l'édifice cristallin du quartz. Les « V » de choc existent sur les quartz éoliens, fluviaux, marins et glaciaires.  
(Echantillon de Haute-Plage, Montmartin, Manche, France).
- Photo 5. — Trace illustrant le frottement de deux grains de quartz l'un contre l'autre. *Les traces de frottement* existent sur les quartz intertidaux de haute énergie et sur les quartz glaciaires, ainsi que sur les quartz d'origine volcanique.  
(Echantillon de plage, Sainte-Lucie, Martinique; collection R. Clocchiatti).
- Photo 6. — *Traces de frottement polies*: Les stries subparallèles visibles sur la photo 5 ont disparu.  
(Echantillon fluvial du Trieux à Lézardrieux, Côtes-du-Nord, France).

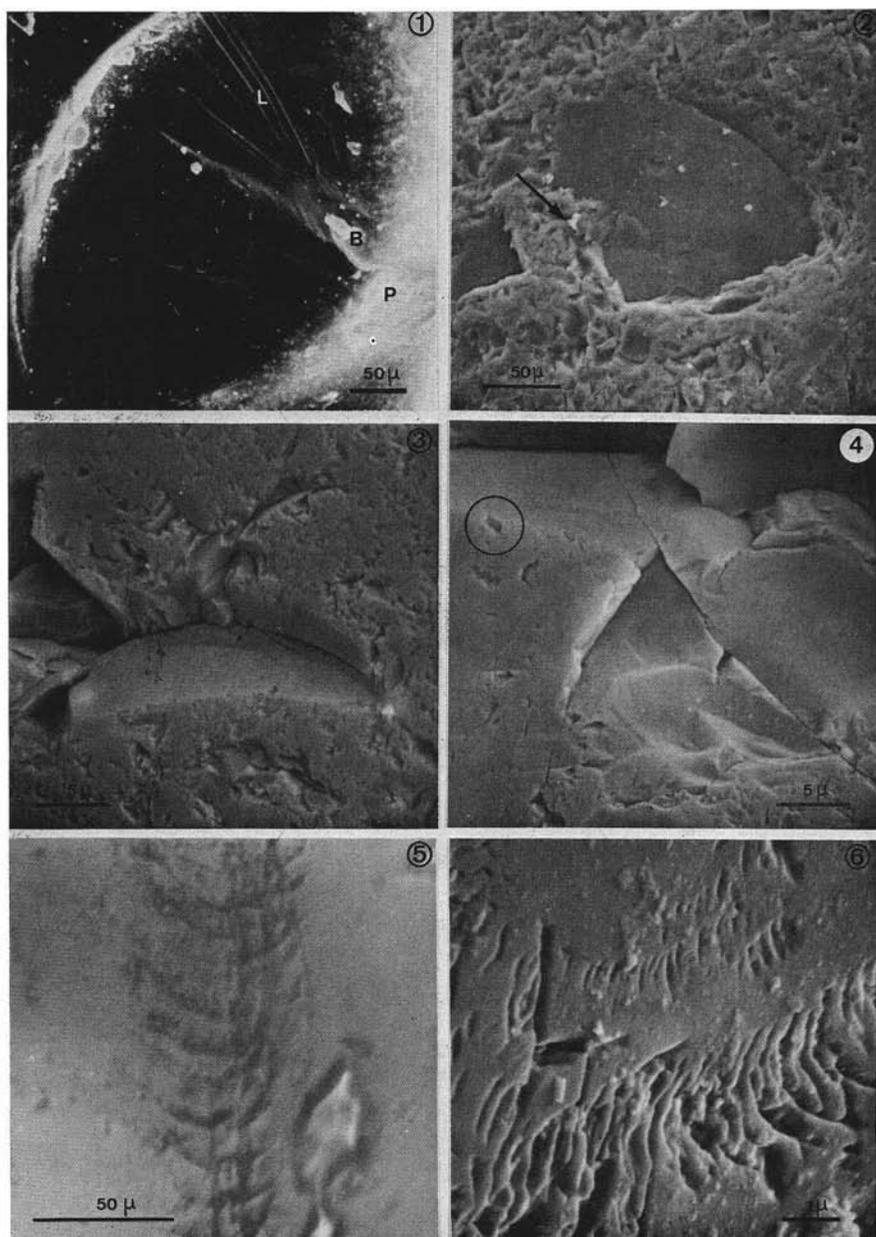


Planche I.

## PLANCHE II

## LES QUARTZ NON-EVOLUES

- Photo 7. — La surface des quartz est dépourvue de tout indice d'altération (dissolution ou dépôt); les arêtes ne montrent aucune trace d'action mécanique et prouvent l'absence de tout transport: il s'agit ici de quartz non-évolués typiques.  
(Echantillon des banes sédimentaires du delta de la Dumbéa, Nouvelle-Calédonie; collection F. Baltzer).

## LES QUARTZ D'ALTERITE ET LES QUARTZ PEDOLOGIQUES

- Photo 8. — Section polie d'un quartz d'altérite; le phénomène d'amorphisation se traduit par le passage progressif du quartz bien cristallisé (à gauche) à la pellicule externe de silice soluble (à droite) par l'intermédiaire de la zone de transition.  
(Echantillon de quartz granitique, Ploumanach', Côtes-du-Nord, France).
- Photo 9. — Quartz pédologique ayant subi une évolution dans un horizon où la silice est dissoute. Les anciens points de contact entre minéraux (surfaces «protégées») ne montrent aucune figure de dissolution (SP); par contre, les solutions dissolvantes ont attaqué les portions du grain voisines de la dépression centrale où se produisait une circulation dirigée des fluides matérialisée sur le cliché par les flèches.  
(Sol forestier, région de Kindia, Guinée; collection L. R. Lafond).
- Photo 10. — Détail de la photo précédente. Surfaces «protégées» (SP) et figures de dissolution s'individualisent nettement; contrairement à ce qui se produit en milieu infratidal, les figures de dissolution sont plus marquées dans les dépressions et sur les faces planes que sur les arêtes.
- Photo 11. — Figures de dissolution typiques: l'orientation et les angles homologues sont identiques d'une figure à l'autre, quelque soit la dimension de celle-ci.  
(Echantillon des épanchements fluviaux du Villafranchien, Cessenon, Hérault, France; collection M. Rivière).
- Photo 12. — Groupe de fleurs disséminées sur un quartz pédologique ayant subi une évolution dans un horizon où s'accumulait la silice: les dépôts de silice en mamelos parsèment toute la surface du grain-support, y compris les arêtes.  
Ce cliché a été réalisé au microscope électronique à balayage du Museum National d'Histoire Naturelle de Paris.  
(Echantillon fluvial de haute énergie des Sables du Bourbonnais; collection J. Tourenq).

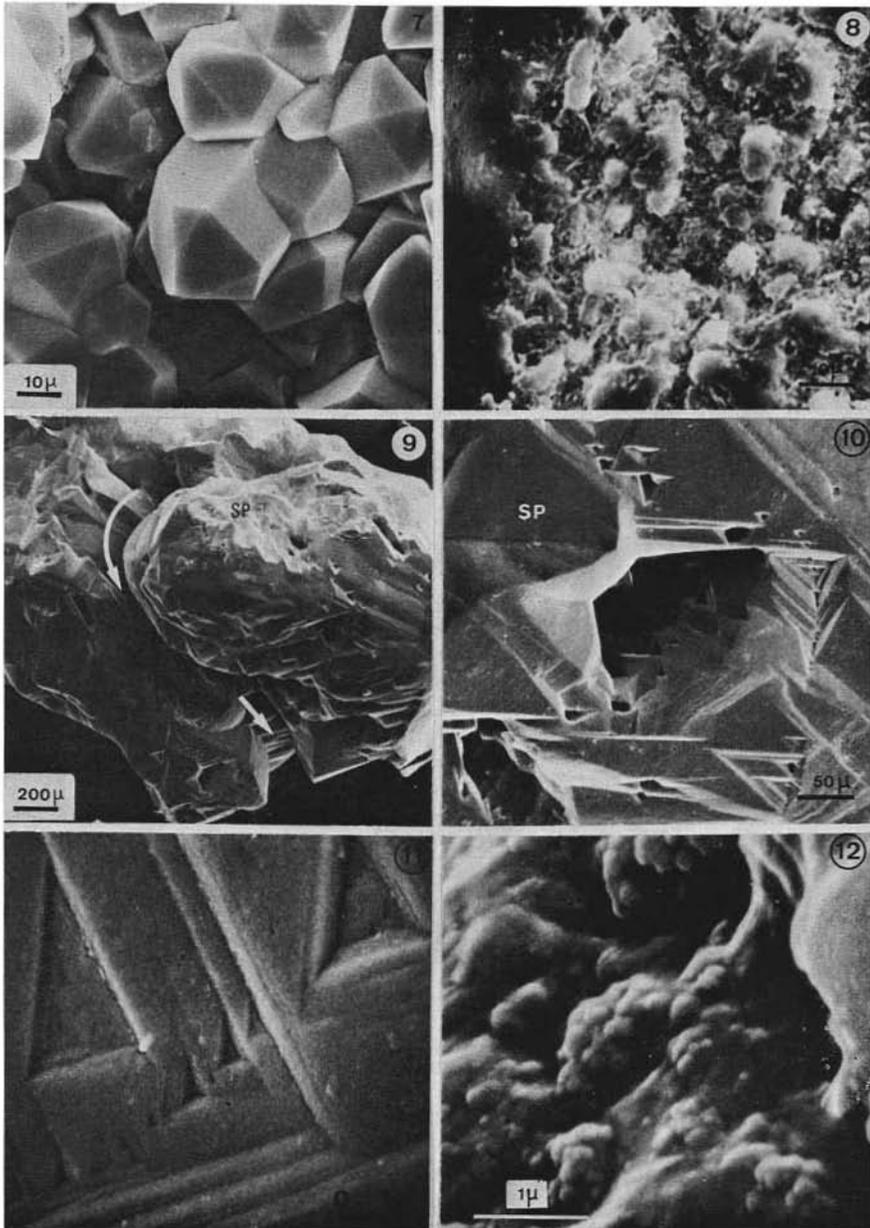


Planche II.

gine pédologique (dépôts secondaires ou corrosion) superposées aux caractères hérités de l'histoire antérieure de grain.

#### A - MISE EN ÉVIDENCE D'UNE PELLICULE NATURELLE DE SILICE SOLUBLE SUR LES QUARTZ D'ALTÉRITES ET PÉDOLOGIQUES.

Divers traitement physiques et chimiques (dosage colorimétrique de la silice extraite après attaque alcaline, clichés radio cristallographiques en chambre type Guinier-Dewolf, etc.) et de nombreuses observations au m.e.b. avant et après attaque à la soude sur de nombreux échantillons de quartz altérés et pédologiques ont révélé (47) sur ces derniers l'existence d'une pellicule de silice très soluble.

Cette pellicule apparaît comme un cas général sur ce type de quartz, quels que soient leurs caractères (forme, taille, etc.) géomorphiques (48).

#### B - MORPHOLOGIE DE LA PELLICULE.

Aux forts grossissements (entre 1.000X et 30.000X), celle-ci montre un aspect en « écailles » caractéristique, plus ou moins prononcé (photos 15-16). Son épaisseur sur les quartz de 0,5 mm de diamètre est comprise entre 0,01 et 1  $\mu\text{m}$ , la moyenne étant 0,08  $\mu\text{m}$ ; le diamètre moyen des écailles est d'environ 0,5  $\mu\text{m}$ .

Dans la plupart des cas, la pellicule soluble n'est pas nettement distincte du cristal sur lequel elle repose, mais passe progressivement au quartz par l'intermédiaire d'une « zone de transition » qui peut atteindre plusieurs dizaines de microns d'épaisseur; cette dernière, plus ou moins bien cristallisée, se présente sous deux formes principales: comme simple état intermédiaire entre le quartz et la silice amorphe écouant étroitement la forme du cristal; ou en « coulées » (photo 13). Ces deux variétés illustrent en fait deux phénomènes très différents:

a) *L'amorphisation du quartz.* Des actions dissolvantes d'origines diverses se produisent dans certains horizons de la plupart des profils pédologiques, provoquant une *desquamation* de la surface originelle des quartz, qui se désagrège sous forme d'écailles. En ce cas, la genèse de la pellicule est à rapprocher de celle de la pellicule créée artificiellement par divers auteurs américains (19, 20, 26, 64): il y a amorphisation progressive de la surface originelle des cristaux. Il

*n'existe pas alors de discontinuité nette entre la pellicule et le quartz support* (photo 8).

Dans certains horizons pédologiques où se produit une forte dissolution, la corrosion peut être si rapide que l'amorphisation lente traduite par la zone de transition n'est pas observée: les grains de quartz présentent alors au m.e.b. et même au microscope optique de magnifiques formes de dissolution (photo 11). Les « circulations dirigées » qui existent entre les grains immobilisés dans un profil pédologique, conduisent à des corrosions localisées, et il arrive que les dépressions soient plus corrodées que les arêtes, ce qui ne se produit jamais en milieu aquatique où existe un brassage. En outre, la surface des grains montre (photo 10) des régions « protégées », qui correspondent à d'anciens points de contacts étroits entre les minéraux et à travers lesquels les eaux percolantes ne pouvaient pas circuler. Ainsi, grâce à ces régions protégées, pourrions-nous retracer l'histoire géologique de grains même très corrodés, puisqu'ils conservent par endroits leurs caractères évolutifs antérieurs.

b) *Les phénomènes de dépôt.* Ils caractérisent les horizons pédologiques où circulent ou s'accumulent des solutions riches en silice.

#### *La pellicule.*

Le processus de dépôt de la pellicule de silice exogène commence par l'apparition d'amas globuleux épars. Quand les apports de silice sont importants (ou le deviennent), les amas de silice deviennent joints et forment la pellicule proprement dite. La morphologie de celle-ci traduit fidèlement la position du cristal-support dans son environnement: sur les surfaces horizontales, elle forme un simple placage moulant toutes les formes du cristal, tandis que sur les portions inclinées du grain elle se présente en « coulées » orientées (photo 14) sans aucune relation avec la structure cristalline du quartz. Sur les grains de 0,5 mm de diamètre, ces coulées ont une épaisseur moyenne comprise entre 1 et 10  $\mu$ m.

La pellicule, quelle que soit sa morphologie, épaissit progressivement et la partie la plus ancienne tend à s'organiser en donnant une « zone de transition » qui est en fait une *zone de cristallisation*. Celle-ci se distingue nettement de celle qui se produit par amorphisation: *le contact entre pellicule et quartz-support est ici très franc.*

## PLANCHE III

## LES QUARTZ D'ALTERITE ET LES QUARTZ PEDOLOGIQUES (suite)

- Photo 13. — Vue à faible grandissement d'un quartz rhyolitique altéré porteur d'une forte épaisseur de pellicule siliceuse. Celle-ci présente une morphologie en coulées, caractéristique, et illustre un phénomène de dépôt.  
(Rhyolite de l'Estérel; collection R. Clochiatti).
- Photo 14. — Vue à plus fort grandissement de la pellicule siliceuse en coulée.
- Photo 15. — Détail de la photo précédente. La zone de transition en coulées cristallisées apparaît nettement sous les écailles de silice très soluble; cet aspect écailléux présent même sur les arêtes indique l'absence totale de transport.
- Photo 16. — Un autre aspect d'une pellicule formée par dépôt; ici, on ne voit pas de coulées: la zone de transition moule simplement les aspérités du quartz-support sans en modifier profondément la morphologie de détail. Nous sommes sur une portion horizontale du quartz selon la position qu'il occupait au sein de la roche-mère lors de l'altération.
- Photo 17. — Ce cliché montre l'évolution d'un profil pédologique: le quartz a subi d'abord un dépôt de silice, illustré principalement par une fleur de silice (flèche); puis il a été soumis à une dissolution, comme le prouvent les figures qui apparaissent sur le quartz (en haut à gauche, et à droite sur le cliché) et la morphologie de la fleur.  
(Echantillon des épanchements fluviaux du Villafranchien, Cessenon, Hérault, France; collection M. Rivière).
- Photo 18. — Détail de la photo précédente. Après le stade de dépôt de silice, la fleur a cristallisé. La dissolution qui a suivi est très visible en bas à droite et en haut à gauche.

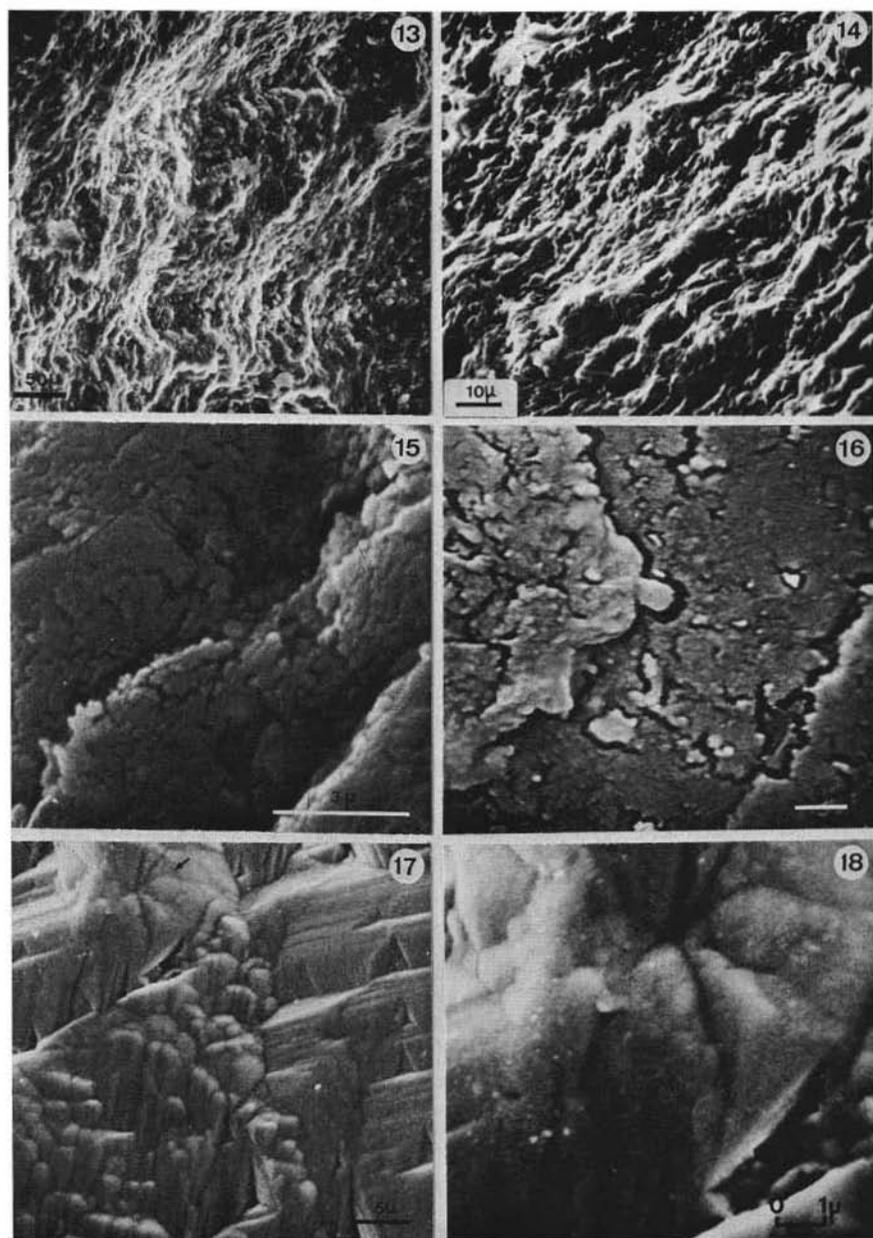


Planche III.

PLANCHE IV  
LES FLEURS DE SILICE

Photo 19. — Ce cliché montre les conditions de formation des fleurs de silice dans une zone confinée sur un quartz: à gauche, un important dépôt de silice a provoqué la formation d'une pellicule en coulées (P); par contre, à droite, la surface du quartz apparaît « nue », dépourvue de tout globule siliceux: cette portion du grain correspond à une ancienne surface de contact entre deux minéraux au sein de l'altérite. Des solutions sursaturées en silice se sont infiltrées (flèche) dans la dépression centrale et, dans cette zone confinée, sans renouvellement important des fluides, les fleurs ont pu cristalliser.

(Conglomérat de Base de l'Oligocène, Lantillac, Cantal, France; collection P. Larroque).

Photo 20. — Vue d'un groupe de fleurs; noter que toutes les fleurs ont sensiblement le même aspect; comme dans le cas précédent, elles se sont formées dans une zone confinée sur un quartz altéré, à partir d'une même solution sursaturée en silice; cette origine explique l'homogénéité du groupe de fleurs.

(Géode altérée, Saint-Prix, Morvan; collection M.-F. Pesme).

Photo 21. — Aspect d'un autre groupe de fleurs sur une ancienne surface de contact entre deux minéraux. Les fleurs sont moins bien formées que dans le cas précédent.

(Géode altérée, Saint-Prix, Morvan; collection M.-F. Pesme).

Photo 22. — Vue d'un groupe de fleurs attaqué par NaOH 0,5 N à ébullition pendant 2,5 mn; on constate l'indépendance totale qui existe entre deux dépressions voisines. Cela explique que deux groupes de fleurs proches l'un de l'autre puissent présenter une morphologie très différente: les solutions sursaturées en silice qui pénètrent à un instant donné dans une dépression ne pénétreront pas nécessairement dans la seconde; or, le degré d'organisation cristalline des fleurs est fonction du temps.

(Géode altérée, Saint-Prix, Morvan; collection M.-F. Pesme).

Photo 23. — Fleurs bien cristallisées; des fleurs de ce type, qui disparaissent en milieu marin, subsistent à une évolution fluviale.

(Géode altérée, Saint-Prix, Morvan; collection M.-F. Pesme).

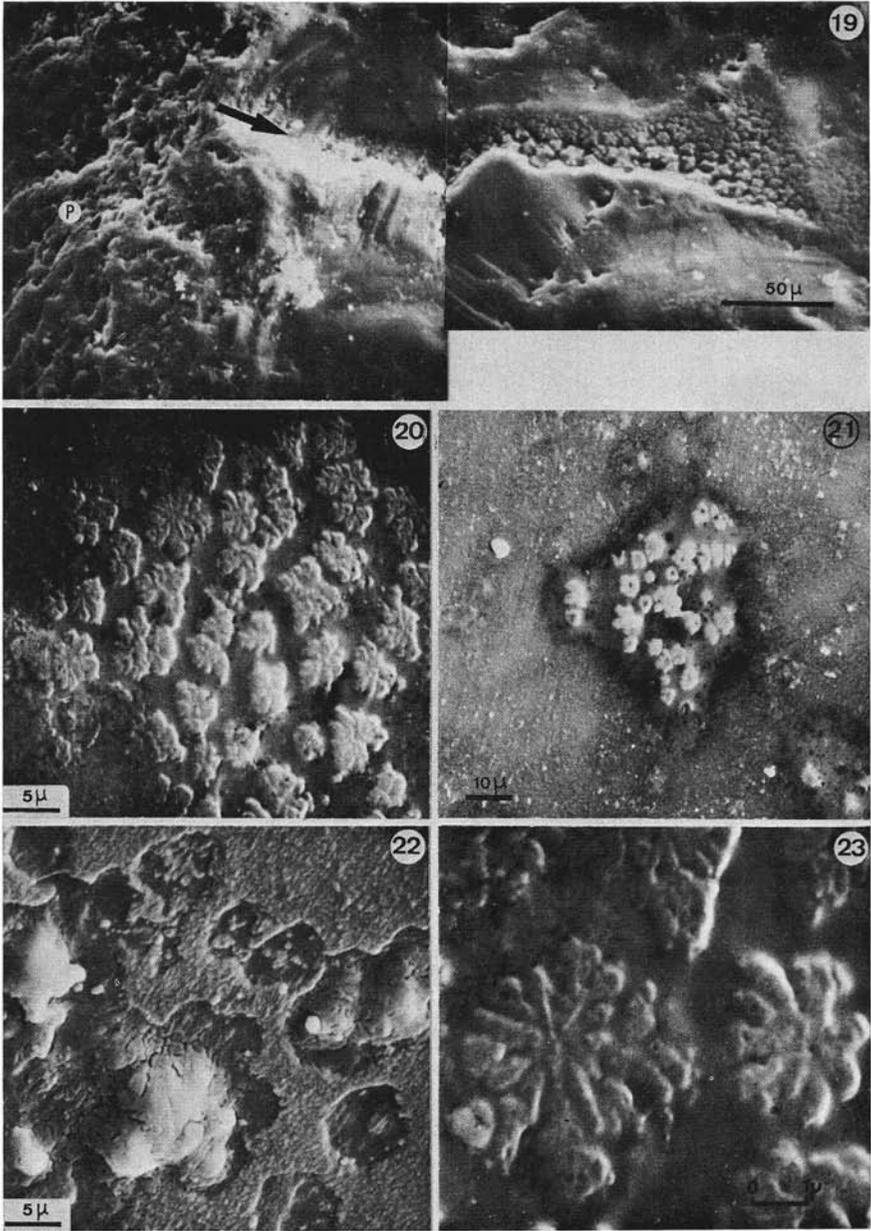


Planche IV.

Comme dans le cas précédent, les quartz pédologiques montrent des régions « protégées » sur lesquelles il est possible de « lire » leurs évolutions antérieures.

### *Les fleurs de silice.*

Les fleurs de silice (47, 52) sont des indices de cristallisation d'un dépôt siliceux. Tous les types de transition existent entre les amas globuleux de silice et les fleurs bien cristallisées en quartz; cette organisation se traduit par l'apparition progressive d'une structure radiée (photo 23). La relation entre l'apparition de la structure radiée et l'augmentation du degré de cristallinité est montrée par la résistance de plus en plus poussée des fleurs aux attaques alcalines à mesure que s'affirme leur géométrie. En coupe, les fleurs présentent toujours une morphologie convexe lorsqu'elles n'ont subi ni transport ni dissolution. On les trouve sur les mêmes quartz que la pellicule de dépôts; toutefois, alors que celle-ci traduit des dépôts très importants, recouvrant intégralement une portion donnée de la surface du quartz-support, les fleurs se forment généralement sur des portions de surface « protégées » où les solutions percolantes qui s'infiltrèrent sont difficilement renouvelées et tendent à une forte sursaturation: dans un tel milieu confiné, les sursaturations aboutissent à la cristallisation de la silice en « fleurs » plus ou moins bien formées.

La cristallisation en fleurs peut également correspondre à un phénomène de dépôt moins important et plus discontinu dans le temps que celui conduisant à la formation d'une pellicule: la silice polymérise et s'organise lentement, les apports étant insuffisants pour recouvrir la totalité de la surface du quartz. Ce dernier type de fleurs est très courant sur les quartz pédologiques (photo 12).

c) *Le rôle des fleurs dans l'analyse exoscopique des quartz.* L'importance des fleurs de silice est considérable: en effet, elles traduisent toujours une immobilisation du grain. En outre, leur petite taille les rend très sensibles aux conditions chimiques des milieux où évoluent les quartz. *Elles seront donc d'excellents indicateurs « écologiques »* (31, 49).

*Conclusion.*

Que les quartz proviennent de roches altérées ou de profils pédologiques, ils en portent le témoignage sous forme d'une pellicule soluble, avec ou sans fleurs de silice. Celle-ci, grâce à sa sensibilité aux conditions de milieu va évoluer différemment selon les divers environnements auxquels elle sera soumise.

**3. - Les quartz glaciaires.**

J'ai étudié peu de quartz glaciaires (Alpes, limons quaternaires du Bassin Aquitain (31) et Pyrénées).

Toutefois, un point intéressant m'a paru être l'absence de point d'impact sur les cupules et les cassures conchoïdales typiquement glaciaires, ce qui indique bien leur origine due à des pressions ou des éclatements (alternance gel-dégel) d'origine physique et non à des percussions éoliennes ou aquatiques.

Cette précision apportée, j'ai retrouvé sur mes échantillons des textures en tous points identiques à celles décrites par Krinsley et renvoie pour plus de détails le lecteur aux publications de cet auteur (36 à 42).

**4. - Les quartz fluviatiles.**

Depuis les débuts des études sur les aspects de surface des quartz, la mise en évidence de caractères particuliers aux grains fluviatiles est apparue comme le problème majeur.

**A - TRAVAUX ANTÉRIEURS.**

Selon Cailleux et Tricart (1959), la seule distinction possible à la loupe binoculaire entre quartz marins et fluviatiles concerne la forme et l'éclat des grains, en moyenne plus anguleux et moins limpides dans les fleuves que sur les plages (7).

Leur conclusions sont confirmées par Krinsley en 1962, qui au microscope électronique à transmission n'observe rien de typique sur les quartz fluviatiles, si ce n'est une usure moindre que sur les grains de plages marines.

En 1959, Kuenen, à la suite de travaux expérimentaux, note que « pour un sable subanguleux, l'abrasion fluviatile est inférieure à

0,1% par 1000 km de transport. Pour un sable lisse et moyennement arrondi, elle peut être considérée comme pratiquement égale à 0 » (43).

C'est toujours vers l'étude des traces d'actions mécaniques que vont se tourner Margolis et Kennett pour tenter de résoudre le problème des quartz fluviatiles (57). Selon eux, il est possible de différencier, entr'autres, les sables de plage et de rivière en se basant sur la densité de « V » d'impacts sous-aquatiques. Les sables de rivières possèdent moins de traces d'impacts par micron carré. Hormis ces figures, les quartz fluviatiles montrent peu de textures caractéristiques, excepté un arrondissement du contour, un relief peu marqué, des surfaces irrégulièrement et finement picotées, des figures de corrosion diagénétique et des croissances cristallines, ces deux dernières étant antérieures au transport.

En résumé, nous constatons que ces travaux n'apportent pas de solution nette au problème de la caractérisation des quartz fluviatiles.

#### B - EXOSCOPIE - LES CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES QUARTZ FLUVIATILES.

a) *Le Milieu fluvial*. Toutes les mesures récentes de teneur en silice des eaux naturelles donnent des valeurs inférieures à celle de la solubilité de la silice amorphe (115 ppm à 25°C), mais supérieures à celle du quartz. Cela signifie que les rivières, si elles sont sous-saturées par rapport à la silice amorphe, ne le sont pas par rapport au quartz.

Enfin, les cours d'eau de moyenne et haute énergie sont caractérisés par un brassage plus ou moins vigoureux. On sait qu'une abrasion naturelle purement mécanique en milieu aquatique est insuffisante pour transformer les particules de quartz anguleuses en particules arrondies. Mais il est prouvé que les particules de quartz peuvent être dissoutes chimiquement plus vite sous des conditions d'abrasion, d'une part par enlèvement des zones superficielles perturbées et d'autre part par la formation de fissures et de craquelures dues aux chocs qui facilitent la diffusion de silice (19, 61, 73, 78).

b) *Conséquences générales*. En milieu fluvial, la sous-saturation par rapport à la silice amorphe dissoute et le brassage, provoquent une dissolution de la pellicule soluble héritée de l'altération qui conduit à la disparition progressive des écailles sur les arêtes et au polissage de la zone de transition; celle-ci est affectée de traces de chocs avec gradient d'émoussé, caractéristiques des évolutions aquatiques où se produisent des actions mécaniques (photo 24).

Les fleurs de silice les moins bien organisées montrent, elles aussi, une dissolution progressive, qui se marque par une oblitération du relief, et une égalisation des surfaces: en section les fleurs n'apparaissent plus convexes, mais tendent à devenir planes. En outre, il arrive qu'elles soient affectées de traces de chocs.

c) *Les caractères particuliers aux quartz à évolution torrentielle.*

La dissolution par abrasion libère la silice du quartz vers les eaux libres de l'environnement. A cause du mélange rapide et constant des eaux, la concentration en silice dissoute du milieu n'augmente pas, ou très peu. La pellicule soluble et la zone de transition subissent donc une dissolution poussée qui peut même conduire à leur disparition. En outre, les traces de chocs sont très nombreuses quand le grain est bien évolué.

d) *Les caractères particuliers aux quartz à évolution fluviatile de moyenne énergie.* Toute la partie supérieure du corps sableux transite en étant soumise à des chocs; la mutuelle abrasion des grains favorise comme dans le cas précédent la mise en solution de la silice du quartz; mais le mélange se fait mal entre l'eau interstitielle et la tranche d'eau libre située au-dessus des sables; aussi des concentrations en silice dissoute peuvent-elles s'amorcer localement et donner des solutions sursaturées. Ce phénomène se traduit par la précipitation de dépôts siliceux secondaires sur les surfaces planes et à proximité immédiate des arêtes même les plus exposées et des parties saillantes des grains; ces dépôts sont généralement de petite taille (diamètre supérieur moyen =  $2,5 \mu\text{m}$ ), globuleux ou en écailles; ils peuvent être en très grand nombre et, en ce cas, former une véritable pellicule qui recouvre les traces de chocs anciennes et s'étend sur tout le grain, à l'exception du sommet des arêtes. Des diatomées peuvent être recouvertes par les dépôts secondaires de silice (22); la localisation des diatomées (dépressions, faces planes) constitue un excellent critères de reconnaissance des quartz à évolution fluviatile de moyenne énergie (photo 27). Je n'ai jamais encore constaté la présence de diatomées sur les quartz torrentiels sans doute parce que le brassage très violent des eaux et des sables empêche le phénomène de sursaturations locales, et interdit donc le piégeage des diatomées.

Enfin, des croissances cristallines peuvent se produire (photo 29): en 1970, Harder et Flehmig ont montré que, même dans des solutions fortement sous-saturées (concentration de  $0,5 \times 10^{-6}$ ) en silice dissoute,

## PLANCHE V

## LES QUARTZ FLUVIATILES

- Photo 24. — Traces de chocs présentant un gradient d'éroussé caractéristique des quartz ayant évolué en milieu aquatique: les traces les plus anciennes (1) sont les plus polies, les traces les plus récentes ont un contour bien marqué (3); en 2, « V » de choc à polissage moyen, dans d'un âge intermédiaire entre celui des traces de choc (1) et (3). (Rivière la Sioule, au Nord de Jenzat, France; collection J. Tourenq).
- Photo 25. — Dépôts siliceux secondaires globuleux à proximité immédiate d'une arête: ceci est une preuve d'une évolution fluviale de moyenne énergie. Noter l'arête bien polie. (Rivière la Sioule, au Nord de Jenzat, France; collection J. Tourenq).
- Photo 26. — Groupe de fleurs de silice. On distingue nettement la dépression (ancienne inclusion) circulaire dans laquelle elles se sont organisées au cours de l'altération du quartz qui les porte. Les deux fleurs du bas ne montrent guère de modifications par rapport à leur aspect originel. Par contre, la fleur en haut de la photo montre des indices caractéristiques d'une dissolution déjà avancée (atténuation du relief). Des dépôts siliceux secondaires globuleux parsèment la surface du quartz. (Ruisseau le Guillec au Moulin de Sibiril, Finistère, France).
- Photo 27. — Localisation typique de diatomées sur un quartz fluviale évoluant en un milieu à agitation moyenne: on constate que cette localisation (proximité immédiate des arêtes, surfaces planes) correspond à celle des dépôts siliceux secondaires: en effet, ce sont eux qui piègent ou recouvrent les organismes. (Rivière le Loing à Episy-sur-Loing, Seine-et-Marne, France).
- Photo 28. — Détail d'une diatomée recouverte de dépôts siliceux, sur une face plane de quartz fluviale évoluant en un milieu à agitation moyenne. (Fleuve la Seine, Marnay-sur-Seine, Aube, France).
- Photo 29. — Néogenèse de quartz dans une dépression très peu profonde affectant la surface d'un grain de quartz. (Fleuve la Seine, Marnay-sur-Seine, Aube, France).

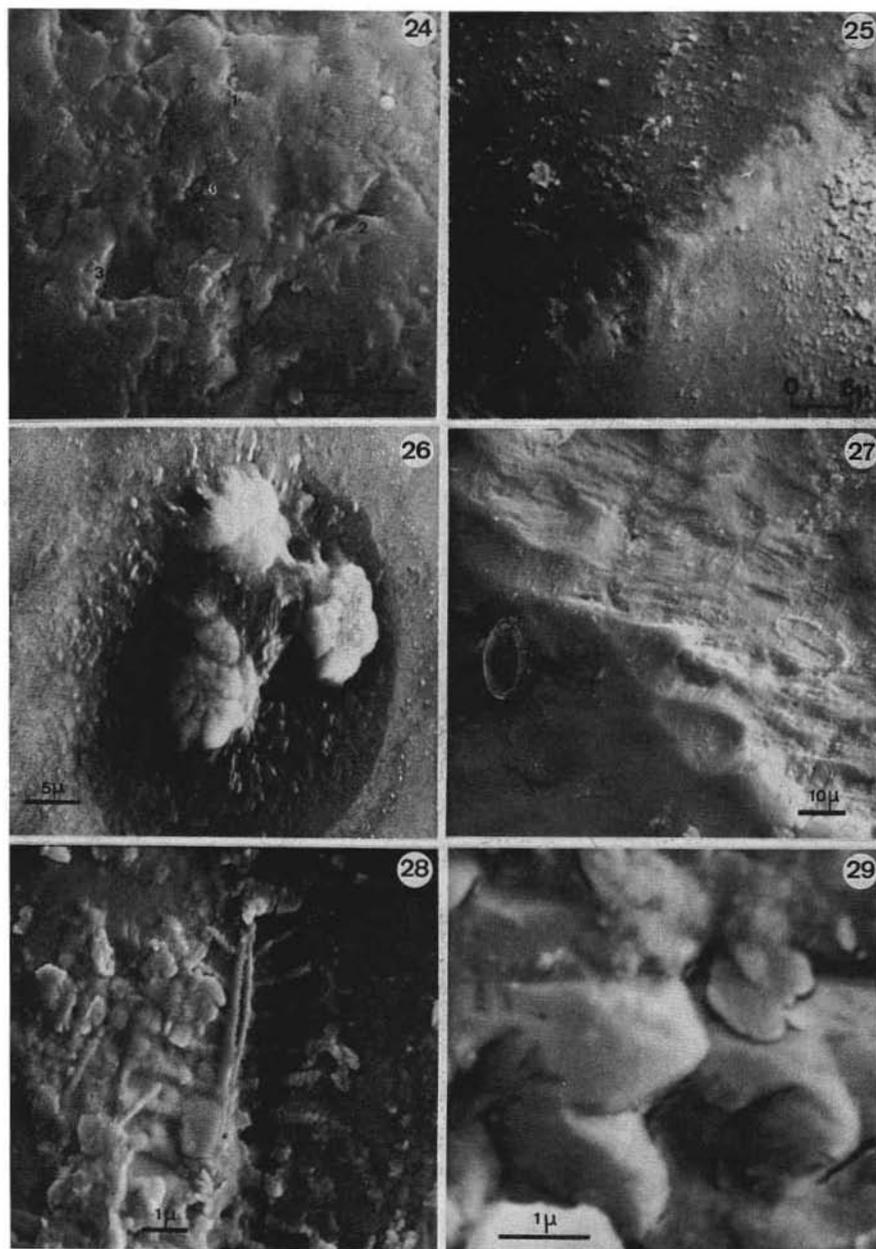


Planche V.

celle-ci peut-être absorbée notamment par des hydroxydes de fer, d'aluminium, de manganèse et de magnésium, et conduire à la formation de quartz en 14 jours, à pression et températures normales. Or, ces hydroxydes, et particulièrement les hydroxydes de fer, sont souvent abondants dans les rivières et les fleuves. L'observation de ce phénomène en milieu naturel confirme donc les travaux expérimentaux de Harder et Flemig. Ces néogénèses de quartz sont localisées aux dépressions, où le brassage ne peut empêcher leur développement.

#### C - LES CARACTÈRES PARTICULIERS AUX QUARTZ À ÉVOLUTION FLUVIATILE DE BASSE ÉNERGIE.

Il peut s'agir par exemple de quartz évoluant dans un bras mort de rivière: en ce cas, le brassage est presque nul, et la plupart des traces d'actions mécaniques qui affectent la surface des grains sont héritées du transport antérieur; les néogénèses de quartz peuvent s'étendre, non seulement aux dépressions, mais même aux faces planes.

Les diatomées piégées sont souvent très nombreuses.

L'observation des fleurs de silice permet parfois de diagnostiquer une coulée boueuse ou un simple ruissellement: seules les fleurs montrent un début de polissage très discret, et le grain est dépourvu de traces d'actions mécaniques fraîches (31).

#### *Conclusion.*

Les caractères distinctifs des quartz fluviatiles sont donc les suivants:

- a) Apparition de traces d'actions mécaniques (milieux de haute et moyenne énergie) avec un gradient de polissage.
- b) Légère (milieux de moyenne énergie) ou forte (milieux de haute énergie) dissolution de la zone de transition héritée de l'altération de la roche-mère.
- c) Disparition de la pellicule écailleuse soluble héritée de l'altération (milieux de haute et moyenne énergie).
- d) Dissolution progressive des fleurs de silice avec polissage et égalisation de la surface de ces dernières (milieux de haute, moyenne et basse énergie).

- e) Formation de dépôts secondaires sur les faces planes et à proximité immédiate des arêtes (milieux de moyenne et basse énergie).
- f) Piégeage de diatomées (milieux de moyenne et basse énergie) (photo 28).
- g) Néogénèse de quartz dans les dépressions (milieux de moyenne et basse énergie) et sur les faces planes (milieux de basse énergie).

Les caractères *a*, *b*, *f*, et parfois *g* peuvent être décelés au *microscope optique*. Mais, seul le microscope électronique à balayage permet de donner un diagnostic certain : en effet, les caractères *b*, *c*, et *d* ne sont observables que sur les grains fluviatiles provenant *directement* de roches altérées ou de quartz pédologiques ; si le quartz étudié a antérieurement subi une évolution complexe (par exemple grain marin fossile repris par un fleuve), seuls les caractères *a*, *e*, *f* et *g* permettent d'identifier l'évolution fluviatile ; or, les diatomées (caractère *f*) et les néogénèses (caractère *g*) ne sont pas toujours présentes. En outre, s'il s'agit d'un quartz torrential, le caractère *e* sera absent : il ne reste plus alors que les traces d'actions mécaniques avec un gradient de polissage (caractère *a*) comme critère d'identification et ces traces sont présentes dans tous les milieux aquatiques, y compris les milieux marins. En ce cas, c'est seulement l'absence des caractères particuliers aux évolutions marines qui permettra de donner le diagnostic exact : il s'agira donc d'une identification « par défaut ».

Ainsi, le milieu fluviatile s'affirme-t-il comme étant le plus difficile à caractériser sur un grain de quartz.

## 5. - Les quartz marins.

Les parties de l'océan que possèdent les plus hautes concentrations en silice dissoute ( $4 \times 10^{-6}$ ) sont légèrement sous-saturées en ce qui concerne le quartz, mais très sous-saturées par rapport à la silice amorphe (73) ; cette sous-saturation en silice dissoute des parties profondes des océans sera encore plus vraie pour les zones littorales où la température est plus élevée, puisqu'à 25°C, la solubilité du quartz est de  $7$  à  $14 \times 10^{-6}$  et celle de la silice amorphe de  $115 \times 10^{-6}$ .

L'évolution des quartz sera très différente selon la zone marine dans laquelle ils se trouvent immergés, et nous établissons une distinction entre les zones intertidale et infratidale.

PLANCHE VI  
LES QUARTZ INFRATIDAUX

- Photo 30. — Arête d'un quartz infratidal. Toutes les traces de choes, d'origine éolienne, présentent sensiblement le même degré de polissage; la surface du grain est très propre, car les dépôts siliceux hérités de l'altération et/ou d'une évolution fluviale antérieure ont disparu à cause de la dissolution chimique quise produit en milieu marin. (Bois-de-Cise, Somme, France).
- Photo 31. — Les traces de choes (« V » et croissants) commencent à être exploitées par une légère dissolution (flèche). (Echantillon provenant de la carotte 20 prélevée en Manche par le navire Térébel; profondeur dans le sédiment = 10 cm).
- Photo 32. — L'évolution infratidale est bien marquée sur ce grain: la dissolution exploite nettement les traces de choes héritées de l'histoire antérieure du grain, et des figures de dissolution typiques apparaissent (flèche). (Echantillon provenant de la carotte 20 prélevée en Manche par le navire Térébel; profondeur dans le sédiment = 10 cm).
- Photo 33. — Grain de quartz à évolution infratidale poussée: les figures de dissolution ont envahi toute la surface du grain, qui prend un aspect uniforme caractéristique: tout caractère éventuellement hérité d'une évolution antérieure a disparu de la surface du grain. (Pirou, Manche, France).
- Photo 34. — L'exoscopie permet de constater les passages d'un quartz de la zone intertidale à la zone infratidale. Ce cliché présente la localisation des diatomées sur un grain ayant connu un épisode intertidal. (Plage de Sainte-Lucie, Martinique; collection R. Clochiatti).
- Photo 35. — Grandissement d'une autre zone du quartz présenté sur le cliché précédent; cette photo montre que tous les dépôts siliceux secondaires, ainsi que les diatomées elles-mêmes, sont en voie de dissolution. Nous sommes donc en présence d'un grain de quartz qui est passé de la zone intertidale à la zone infratidale.

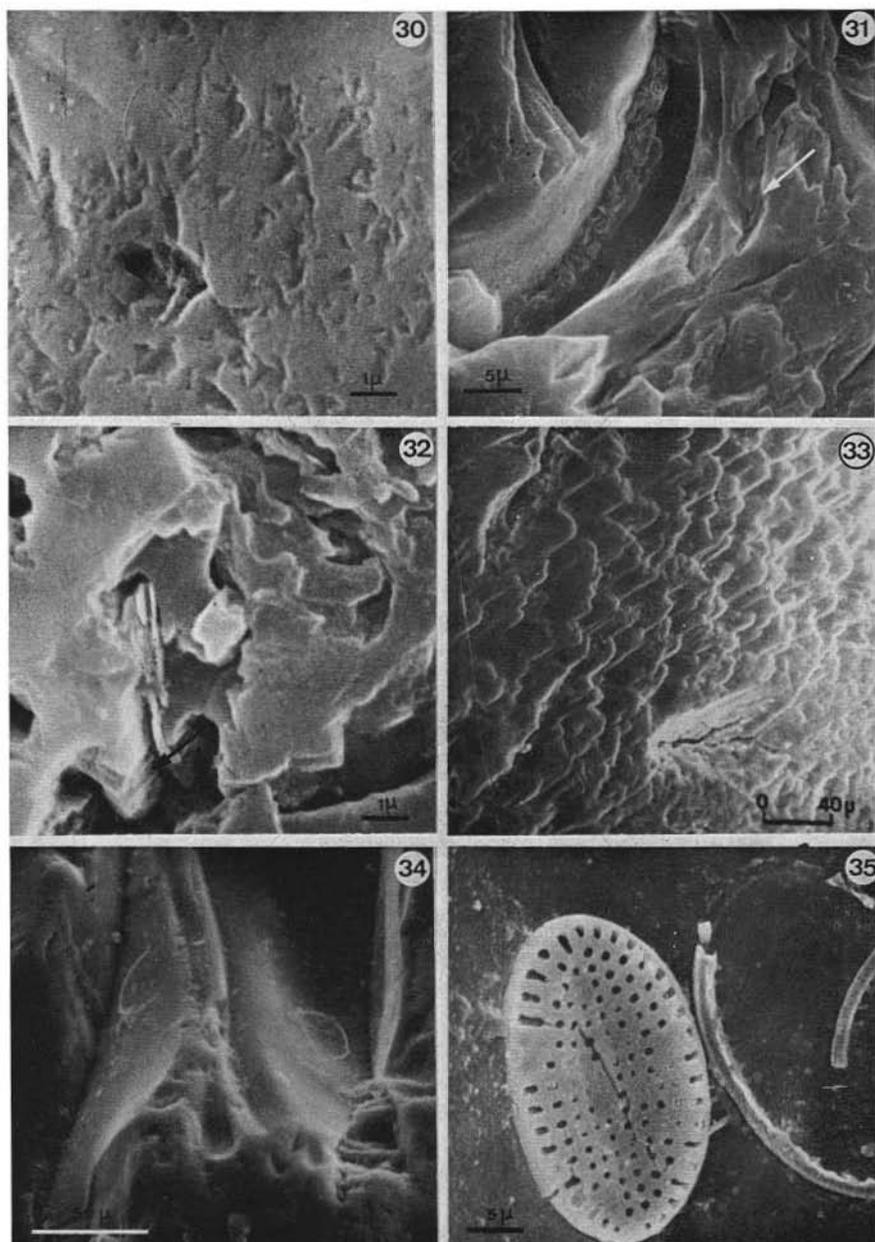


Planche VI.

## A - L'ÉVOLUTION INFRATIDALE.

### *Les caractères des quartz infratidaux.*

Les quartz, constamment immergés, sont dans un milieu sous-saturé en silice amorphe dissoute: la pellicule héritée de l'altération ou de la pédogénèse et/ou les dépôts secondaires de silice caractéristiques de l'évolution fluviatile et de certains horizons pédologiques disparaissent totalement (photo 30). Cette disparition est facilitée par le brassage éventuel des sables par les vagues, la houle ou les courants.

Le milieu est également sous-saturé par rapport au quartz: la conséquence en est une attaque du grain lui-même et l'apparition de figures de dissolution (photo 32); celle-ci exploite d'abord les arêtes et les défauts de l'édifice cristallin du quartz (traces de chocs héritées d'une évolution antérieure, fractures, etc.), puis s'étend progressivement à toute la surface du grain qui prend ainsi un aspect homogène caractéristique, d'où tout indice d'évolution antérieure a disparu. La dissolution semble être un facteur important dans l'arrondissement des quartz, ainsi que l'avait déjà suggéré Galloway (1919).

## B - L'ÉVOLUTION INTERTIDALE.

### *Les caractères des quartz intertidaux.*

Il est incontestable que les figures décrites par Krinsley et ses collaborateurs (42) soient présentes sur une forte proportion de grains de quartz intertidaux; toutefois, dans les zones intertidales abritées il est fréquent de rencontrer des quartz dont la surface n'est affectée que par une très faible densité de « V » ( $0,1/\mu\text{m}$  à Larmor-Baden, par exemple (51)), à l'exclusion de tout autre type de trace d'action mécanique, et qui cependant sont typiquement intertidaux.

Par contre, l'alternance bi-journalière d'émersion et d'immersion en milieu marin est une constante de la zone intertidale; c'est elle qui détermine la phénomorphie des grains, quelque soit le type de plage considéré (haute, moyenne et basse énergie).

*Pendant l'immersion*, le processus évolutif est le même que celui décrit pour les grains infratidaux; sur les plages de haute et moyenne énergie les traces de chocs sont toutefois beaucoup plus nombreuses ou du moins plus marquées, puisque des heurts violents entre grains peuvent se produire à chaque marée. Les relations que j'ai observées

entre les traces d'actions mécaniques, les formes de dissolution et l'énergie du milieu évolutif, confirment les conclusions de Krinsley et Margolis (1971).

*Lors de l'émerison*, la concentration en silice dissoute de l'eau retenue dans les cavités des grains augmente progressivement à cause du phénomène d'évaporation; les sursaturations locales provoquent finalement la précipitation de la silice, et la formation de dépôts siliceux secondaires dans les cavités; une preuve de ce mécanisme est donnée par le comportement des diatomées piégées dans les dépressions affectant la surface des grains (photos 37-38). Les dépôts secondaires sont *strictement* localisés aux dépressions de la surface des grains (photo 37). La persistance de ceux-ci lors des immersions (et malgré une dissolution nettement visible sur les diatomées emprisonnées (photo 38)) peut être expliquée précisément par leur position privilégiée qui les met à l'abri de l'abrasion mécanique.

#### C - APPLICATION À L'ÉTUDE DES FORMATIONS ANCIENNES.

Dans la plupart des cas, la distinction entre quartz infratidaux et intertidaux est donc relativement aisée à faire au m.e.b.; sur les quartz de formations anciennes, un phénomène intéressant est le passage de la silice amorphe au quartz: à fort grossissement la cristallisation des dépôts secondaires de silice est nette (photo 41); le temps est responsable de cette transformation. La distinction entre néogénèses fluviales (rôle des hydroxydes de fer) et néogénèses intertidales par fossilisation peut être réalisée grâce à la spectrométrie-X, puisque dans le second cas, le fer est absent. En outre, les néogénèses intertidales sont toujours plus belles, plus régulières que celles qui se produisent en milieu fluviale.

#### *Conclusions.*

- Les caractères distinctifs des quartz marins sont les suivants:
- a) Apparition de traces d'actions mécaniques (milieux de haute et moyenne énergie) avec un gradient de polissage, les plus anciennes pouvant être exploitées par la dissolution (photos 30 et 36).
  - b) Disparition de la pellicule écailleuse soluble héritée de l'altération ou de facteurs pédogénétiques.
  - c) Disparition des fleurs de silice, même bien organisées (photo 40).

## PLANCHE VII

- Photo 36. — Arête d'un quartz intertidal: comme sur les quartz infratidaux, les arêtes, soumises constamment à la dissolution et exposées en outre au brassage, montrent une exploitation des traces de choes par la dissolution.  
(Plage de Lancieux, Côtes-du-Nord, France).
- Photo 37. — Localisation typique des diatomées et des dépôts secondaires siliceux sur un quartz intertidal: les arêtes (A), affectées de traces de choes à gradient d'éroussé, sont propres; les dépôts secondaires siliceux (S) sont strictement localisés aux dépressions et emprisonnent éventuellement des diatomées et d'autres débris organiques et minéraux.  
(Plage de Pirou, Manche, France).
- Photo 38. — Dans les dépressions, protégées du brassage mécanique, la dissolution s'exerce, mais c'est le phénomène de dépôt qui l'emporte, comme le montre ici la morphologie des diatomées: certaines sont fraîches (1) mais d'autres, plus anciennes (2), disparaissent progressivement sous les dépôts siliceux tout en présentant des indices d'une importante dissolution. La flèche indique un éclat de quartz piégé par les dépôts siliceux.  
(Plage de Pirou, Manche, France).
- Photo 39. — Fleur de silice entamée par une trace de choc (flèche), preuve d'un transport; celui-ci ne peut être fluviatile (pas de dépôts siliceux secondaires sur les surfaces planes du grain): nous sommes ici en présence d'un début d'évolution marine. Ce quartz ayant été prélevé sur une plage de basse énergie au pied d'une arête granitique, le cliché 39 montre combien les fleurs de silice sont un indicateur écologique sensible aux conditions de milieu.  
(Plage à Perros-Guirec, Côtes-du-Nord, France).
- Photo 40. — Autre portion du grain illustré par le cliché 39. Sur l'arête (en bas, à gauche), les fleurs présentent un début de polissage et (au voisinage de l'échelle) on voit de très petites traces de choes. En outre, on ne distingue aucun dépôt siliceux secondaires: le quartz présente donc des indices d'une évolution marine embryonnaire.
- Photo 41. — Au fond d'une dépression, dépôts siliceux secondaires typiquement intertidaux sur un quartz de formation sableuse ancienne; l'organisation de ces dépôts et le passage de la silice amorphe au quartz sont bien visibles.  
(Sable marin de l'Oligocène moyen, Villeconin, Essonne; collection Cailleux-Boubée).

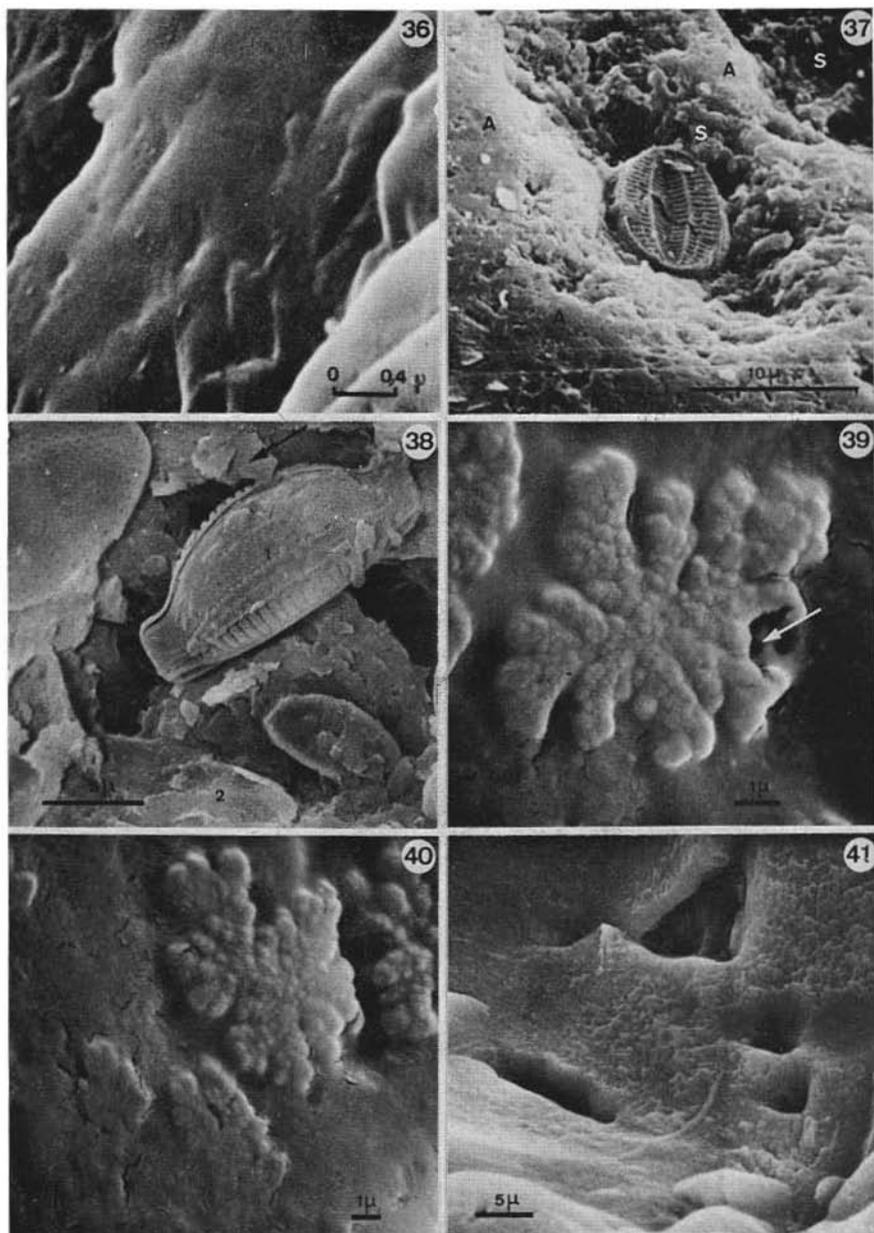


Planche VII.

- d) Dissolution de la zone de transition.
- e) Dissolution du quartz lui-même, avec apparition des figures qui caractérisent celles-ci. Le grain acquiert un aspect « propre » typique (photo 30).
- f) Dépôts secondaires avec éventuellement piégeage de diatomées, *uniquement* dans les dépressions (milieu intertidal) (photo 37).
- g) La densité des traces d'actions mécaniques décrites par Krinsley permet de déterminer le niveau d'énergie du milieu, par comparaison avec des zones de référence.

Les caractères *a*, *d*, *e* et *f* peuvent être décelés au microscope optique. Mais seul le *microscope électronique à balayage* permet une fois encore de déceler une évolution à son début. Les évolutions marines sont beaucoup plus faciles à déterminer que les fluviatiles même lorsque les grains ne proviennent pas directement d'une roche altérée (caractères *b*, *c* et *d*), les caractères *a*, *e* et (pour un quartz intertidal) *f*, suffisent pour donner un diagnostic certain.

#### D - LES QUARTZ ÉOLIENS.

##### a) *Les travaux antérieurs.*

Selon Cailleux, la quantité des grains « RM » dans un sable augmente proportionnellement à l'intensité du vent subi par celui-ci.

En 1962, Krinsley, à l'aide d'un moulin à bille, provoque des éolisations artificielles sur des grains de quartz: il les compare avec des grains naturels éolisés, et définit ainsi les caractères éoliens exposés en détail plus loin.

Kuenen (1960) constate expérimentalement que l'abrasion augmente avec la taille, la vitesse du vent, l'angulosité et la rugosité de la surface. L'abrasion éolienne du quartz est de 100 à 1.000 fois plus efficace sur une même distance que l'action mécanique d'une rivière. Mais l'abrasion éolienne est faible pour les petits grains et égale à 0 pour ceux de 0,05 mm de diamètre.

En 1971, Krinsley et Margolis publient une synthèse de leurs résultats; selon eux, les grains éoliens présentent les caractères principaux suivants:

- Crêtes sinueuses, résultant sans doute de l'intersection de cassures conchoïdales légèrement incurvées. Ces cassures diffèrent de celles

qui se produisent en milieu glaciaire, car elles n'ont jamais une taille supérieure à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre et sont beaucoup plus uniformes; elles diffèrent en outre de celles produites sur les plages par leur bord incurvé et leur plus grande régularité.

— Arcs ordonnés, en séries, qui représentent des fractures dues à des percussions.

b) *Les caractères des quartz éoliens.*

Les actions éoliennes s'exercent en milieu terrestre, et il n'existe donc pas en ce cas d'effet-tampon semblable à celui dont est responsable le film d'eau entourant les grains aquatiques. Les traces de chocs, même de très petite taille, sont bien marquées et surtout ont toujours des bordures extrêmement franches, aiguës (photo 4) qui contrastent avec celles qui se produisent en milieu aquatique; les traces les plus anciennes sont recoupées par les plus récentes et aucune ne présente de gradient de polissage.

La simple apparition sur un quartz de traces de chocs à bords francs, *quelque soit leur morphologie*, indique l'existence d'une évolution éolienne, si brève soit-elle. Il m'a ainsi été possible de diagnostiquer une mise en place par éolisation d'un banc sableux de 5 cm d'épaisseur, où les quartz n'avaient que 0,05 «V» éoliens par micron carré.

Lorsque l'éolisation est bien développée, on observe les textures décrites par Krinsley; celles-ci évidemment ne sont présentes que sur les arêtes et les faces planes des grains, et totalement absentes des dépressions, comme toute trace d'action mécanique en n'importe quel milieu.

J'ai noté, sur des grains éoliens des dunes côtières, que les marques de chocs (en «V» surtout) tendent à être orientées, cela confirme les observations de Schwarzacher (1951) et Curray (1956), lesquels ont établi que dans les dépôts éoliens, les grains s'orientent de façon à ce que leur axe de plus grand allongement soit parallèle à la direction prédominante du vent (moindre résistance).

Toutefois, il ne faut pas négliger la possibilité d'une immobilisation des grains (par cimentation ou piégeage par des plantes, par exemple), qui explique dans certaines formations sableuses exposées à l'éolisation la présence sur les grains de traces de chocs orientées sans aucune relation avec le grand axe des grains.

### *Conclusions.*

L'évolution éolienne est sans doute celle que est la plus facile à diagnostiquer sur un quartz: au *microscope* optique, quand l'évolution est déjà importante, apparaissent des « V » de chocs importants et des croissants caractéristiques; en outre, les grains sont généralement mats quand l'éolisation représente le dernier stade évolutif. Au m.e.b., les traces de chocs à bords tranchants et nets permettent de diagnostiquer même une évolution à son début. Les textures persistent très longtemps, et nous les retrouverons souvent sur les quartz à évolutions complexes.

#### c) *Les caractères des quartz désertiques.*

J'ai étudié peu de quartz désertiques, et les analyses que j'ai réalisées confirment entièrement les travaux de F. Ricci Lucchi et G. Dalla Casa. La pellicule qui recouvre les grains de quartz désertiques est siliceuse (47).

## **II. - Les évolutions complexes.**

Les caractères décrits jusqu'à présent s'appliquent à des quartz ayant subi une évolution unique, soit marine, soit fluviale, soit éolienne, etc. Dans la nature, il est rare de se trouver confronté avec des échantillons aussi typiques. Le cas général est celui de sables composés de grains ayant subi une histoire plus ou moins complexe avant le stade final de dépôt; de plus, les apports peuvent être hétérogènes. Le problème consiste alors à distinguer ces derniers, retracer l'évolution propre de chaque stock et si possible son origine.

### **1. - L'origine des grains: l'endoscopie.**

Les cristaux, au cours de leur croissance, piègent des témoins du milieu générateur au sein de lacunes de structure; ces témoins sont appelés *inclusions primaires* ou *syngénétique*. Ce modèle simple, valable pour les formations récentes dont les individus cristallins n'ont subi aucune contrainte mécanique, se complique dans les roches où la solidification provoque des dislocations de cristal: en ce cas, la fracture favorise la pénétration de fluides résiduels, et les *inclusions sub-*

*syngénétiques* apparaissent. Dans le cas de roches anciennes tectonisées viennent s'ajouter aux deux types d'inclusions décrits, des lacunes dont le remplissage est constitué par des fluides hydrothermaux et supergène: on les nommera *inclusions secondaires* ou *postgénétiques*.

Iermakov (1965) a établi une classification des éléments figurés que l'on rencontre dans les minéraux. Il distingue, en fonction de leur état physique et de leur origine, les inclusions suivantes: cristallines (cristaux syngénétiques et cristaux détritiques), solidifiées (verres et leurs produits de recristallisation), liquides et gazeuses ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , hydrocarbures). La combinaison de ces quatre groupes principaux donne une série de sous-groupes avec des divisions de plus en plus complexes.

Les minéraux, dès leur croissance puis pendant leur histoire géologique sont ainsi différenciés par les solides et les fluides qu'ils contiennent. Le quartz réunit par l'étendue des domaines de pression et de température dans lesquels il peut cristalliser, par ses caractères cristallographiques et physiques (dureté, résistance aux attaques chimiques, etc.) ainsi que par son ubiquité, tous les facteurs favorables à la conservation de tels objets inclus.

En fonction de la nature de leurs inclusions, il est ainsi possible de différencier plusieurs types de cristaux de quartz: les *quartz éruptifs*, par exemple, sont caractérisés par des lacunes à remplissage vitreux, ceux d'origine *granitique* par des inclusions fluides accompagnées de fines aiguilles de rutil; les quartz de *granites hyperalcalins* contiennent des lacunes fluides à dépôts salins, ceux des *roches métamorphiques* montrent une orientation préférentielle des inclusions postgénétiques, et les cristaux de *filons* et de *géodes* sont particulièrement riches en fluides inclus (Deicha, 1955).

Les quartz éruptifs ont été les premiers utilisés en tant que traceurs sédimentologiques (Roch et Deicha, 1966); en effet, on peut distinguer les cristaux provenant de différentes provinces magmatiques grâce à la morphologie de détail et à la composition de leurs inclusions. Ainsi, les gouttelettes de verre piégées dans les cristaux de quartz des porphyres permien des Vosges peuvent-elles être distinguées de celles des porphyres de l'Estérel ou des formations poncées pliocènes du Mont-Dore. La carte d'identité d'un cristal n'est pas basée uniquement sur la morphologie de ses inclusions, mais aussi sur le comportement thermo-optique et la composition chimique de leur remplissage (Clocchiatti, 1973).

## 2. - L'histoire des grains: l'exoscopie.

### A - L'UTILITÉ DES TRACES D'ACTIONS MÉCANIQUES.

Les traces de chocs permettent de savoir si les actions mécaniques se sont exercées en milieu aérien ou aquatique: en milieu aérien, les bords des traces sont aigus, tranchants; les traces les plus anciennes sont recoupées par les plus récentes. Par contre, en milieu aquatique, un gradient de polissage existe. Si un quartz éolien passe en milieu aquatique, *toutes* les traces d'actions mécaniques éoliennes présenteront le *même* stade de polissage (notamment les croissants et les cupules) sur les arêtes exposées au brassage, tandis qu'apparaîtront de nouvelles traces de chocs (« V » surtout) qui, elles, posséderont un gradient de polissage. Inversement, un grain aquatique passant en milieu éolien montrera les traces à gradient de polissage recoupées par les « V », les croissants et les cupules à bord tranchant.

### B - L'UTILITÉ DES TRACES D'ACTIONS CHIMIQUES.

Contrairement aux précédentes, les traces d'actions chimie ont, selon les milieux évolutifs, une localisation très variables à la surface des grains. Elles permettent de *préciser* le type d'évolution aquatique, indiquent s'il y a eu immobilisation du grain ou si les actions chimiques se sont produites dans un environnement où ce dernier était libre.

a) *Les dépôts secondaires de silice.* Ils traduisent des sursaturations du milieu en silice. On peut les grouper en deux grandes catégories:

- *Les coulées:* elles traduisent toujours une immobilisation du grain dans un environnement terrestre et peuvent exister même sur les arêtes.
- *Les amas disséminés:* ils peuvent se former soit en milieu terrestre lors d'une immobilisation du grain (horizon pédologique, diagénèse), soit en un milieu aquatique; dans le premier cas, les amas sont disséminés sur toute la surface des grains, à l'exception des points de contact entre minéraux. Dans le second, les amas sont disséminés sur toute la surface à l'exclusion de la partie supérieure des arêtes (évolution fluviale), ou n'existent que dans les dépres-

sions (évolution intertidale). Dans les milieux de très basse énergie, riches en silice, ou à cause de la diagénèse, les dépôts peuvent être nombreux au point de former une véritable pellicule à aspect plus ou moins écailleux.

En outre, les dépôts peuvent cristalliser avec le temps: ceci permet la conservation de la plupart des caractères phénomorphiques sur de nombreux grains de formations anciennes. Cette transformation en quartz consolide les caractères de dépôts originellement très fugaces et permet l'interprétation d'une longue histoire, même lorsque le grain, libéré, évolue ensuite dans un milieu sous-saturé en silice.

b) *Les figures de dissolution.* Elles sont en relation évidente avec l'édifice cristallin du quartz qu'exploite la corrosion. Elles se présentent sous forme de tétraèdres ou le plus souvent de triangles qu'il ne faut pas confondre avec les « V » de chocs: contrairement à ces derniers, les figures de dissolution ont toujours, sur une face cristalline donnée d'un même grain, *la même orientation et le même angle d'ouverture*, quelle que soit leur dimension. Elles permettent d'établir une distinction entre les milieux aquatiques sous-saturés en silice dissoute et les horizons pédologiques où se produit une corrosion du quartz; dans le premier cas, la dissolution commence toujours par les arêtes et les zones de faiblesse de l'édifice cristallin (traces de chocs), puis s'étend progressivement à toute la surface du grain; au contraire, dans le second cas, la corrosion par circulation dirigée de solutions dissolvantes se produit d'abord dans les dépressions, puis s'étend aux faces planes à l'exception de surfaces protégées formées aux anciens de contact entre les minéraux immobilisés.

Ces deux grands groupes de caractères montrent que le géologue devra examiner soigneusement et systématiquement les arêtes, les faces planes et les dépressions des grains de quartz dont il cherche à retracer l'histoire géologique.

#### C - LA PROSPECTION SYSTÉMATIQUE DU RELIEF DES GRAINS.

a) *Les sommets et les arêtes:* ce sont les portions des grains les plus exposées à la fois aux chocs et aux dissolutions. Elles révéleront le dernier stade évolutif, à condition que celui-ci représente un milieu où le grain n'était pas immobilisé: ainsi, le polissage des arêtes peut-il être dû, soit à des agents dissolvants essentiellement chi-

miques (absence de traces d'actions mécaniques), soit à la dissolution accompagnant l'abrasion (présence de traces de chocs avec gradient de polissage).

b) *Les faces planes*: moins exposées aux chocs et aux dissolutions que les arêtes, les faces planes conservent souvent des caractères d'évolutions anciennes; l'observation sur les faces planes de caractères phénomorphiques en contradiction avec ceux que l'on a vu sur les arêtes indique qu'on est en présence d'un héritage: ainsi, on sait que les traces d'actions mécaniques sont de plus en plus nombreuses à mesure que l'on approche du sommet des arêtes; supposons que l'observation au m.e.b. ait révélé des arêtes dépourvues de toute marque de choc, et soigneusement polies: supposons maintenant que l'étude des faces planes révèle la présence de traces d'impacts à gradient de polissage: nous avons en ce cas la preuve qu'une évolution en un milieu aquatique de haute ou moyenne énergie a été suivie d'un polissage purement chimique en un milieu à agitation faible à nulle; la morphologie et la localisation des dépôts siliceux ou des formes de dissolution indiqueront avec précision quels sont les milieux concernés.

c) *Les dépressions*: abritées de l'abrasion et peu soumises aux dissolutions (sauf en milieu pédologique), les dépressions montrent une véritable fossilisation de caractères phénomorphiques très anciens sur les quartz à longue évolution; la mise en évidence de ces vieux caractères nécessite parfois l'emploi de techniques particulières de préparation (Le Ribaut, 1973), mais révèle une grande partie de l'histoire des grains anciens.

### 3. - Présentation et exploitation des résultats obtenus.

#### A - PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.

Il est possible de retracer jusqu'à 6 et parfois 10 évolutions successives sur un seul grain de quartz. Une fois déterminée l'histoire de chaque *type* de grain présent dans le sédiment, grâce au microscope électronique à balayage, on fait au microscope optique un comptage soigneux sur 100 à 200 grains de quartz. Les résultats sont ensuite représentés par un schéma où les divers environnements reconnus sont figurés par une abréviation appropriée inscrite dans un cercle (figures 1 et 2); la largeur des flèches qui représentent le passage des grains

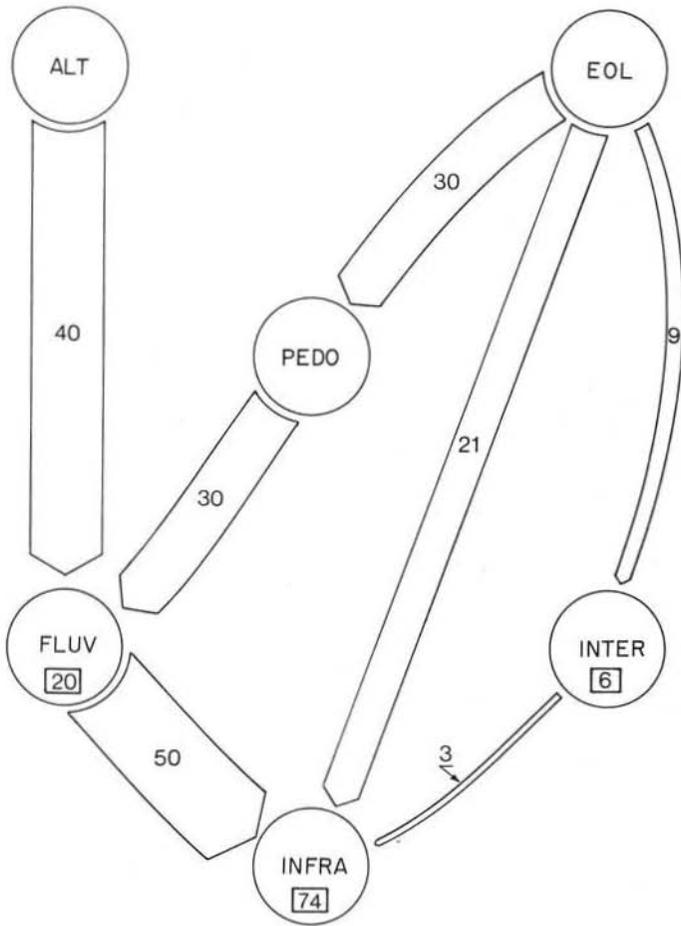


Fig. 1. — Les données de l'exoscopie des quartz.

- La largeur des flèches est proportionnelle au pourcentage des grains ayant subi le passage d'un épisode à l'autre.
- Les chiffres encadrés indiquent le pourcentage de grains qui présentent comme derniers caractères évolutifs inscrits à leur surface ceux qui sont caractéristiques respectivement des épisodes fluvial, infratidal et intertidal.

d'un environnement à l'autre est proportionnelle au pourcentage des grains ayant subi cette évolution.

## B - EXPLOITATION DES RÉSULTATS.

### a) *Les données de l'exoscopie des quartz* (figure 1).

L'exoscopie permet de retracer sur chaque quartz un certain nombre d'évolutions. La figure 1 montre les résultats obtenus par cette méthode sur un échantillon de sable.

Deux origines principales sont mises en évidence par le schéma : 40% des grains proviennent d'une altérite, et 60% ont été éolisés.

Sur ces 60%, une majorité des quartz conserve des traces d'une immobilisation qui s'est marquée par l'apparition de caractères superficiels d'origine pédologique; après cet épisode pédologique, les grains éoliens ont été repris par un fleuve dans lequel ils se sont mélangés avec les grains en provenance d'altérite; 20% des grains conservent leurs caractères fluviatiles, et 50% montrent, superposés à ces derniers, des caractères indiquant ensuite une évolution marine infratidale. 21% des quartz sont passés directement d'un milieu éolien à la zone marine infratidale. Avant cet épisode, 9% des grains ont évolué en milieu intertidal.

D'après l'analyse excoscopique des quartz, il semble donc que le sable étudié soit constitué des trois stocks suivants:

- 40% de grains en provenance d'altérite.
- 30% de grains en provenance d'une formation éolisée fossile, reprise par un fleuve dans lequel évoluent également les grains d'altérite.
- 30% de grains d'origine marine; il s'agit vraisemblablement de grains éolisés sur une haute-plage puis repris par la mer.

Au point de vue milieu de dépôt final, les derniers stades évolutifs visibles sur les quartz (6% d'intertidaux, 20% de fluviatiles, 74% d'infratidaux) indiquent que nous sommes en présence d'un échantillon de sable prélevé dans une portion d'estuaire ou de delta soumise à une forte influence marine, à proximité d'une côte sableuse.

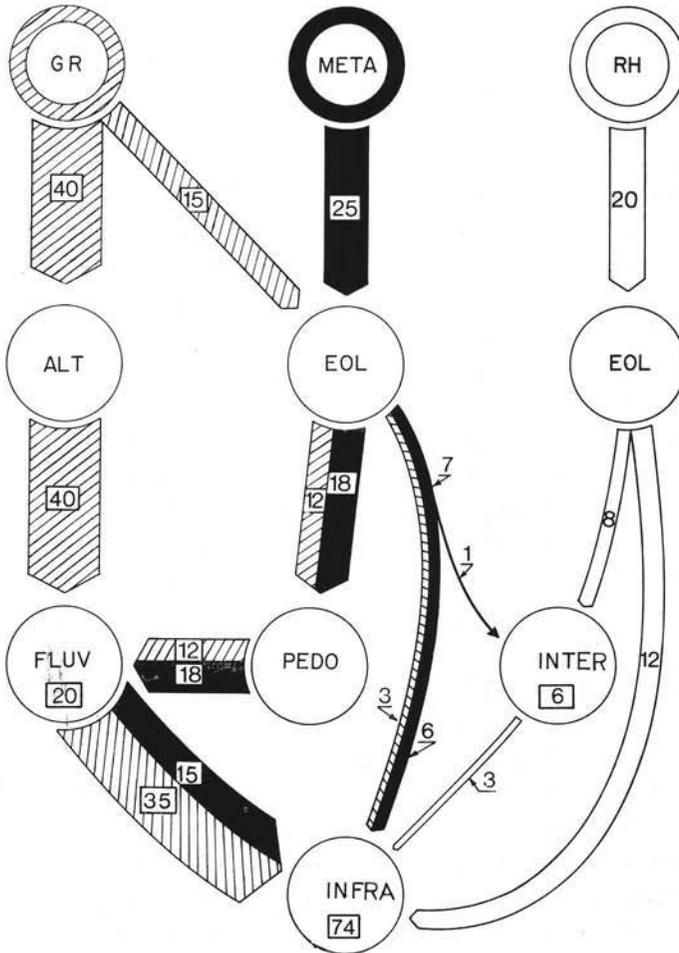


Fig. 2. — Les données de l'endoscopie et de l'exoscopie des quartz.

*Endoscopie:*

GR Quartz d'origine granitique  
 META Quartz d'origine métamorphique  
 RH Quartz d'origine rhyolitique

*Exoscopie:*

ALT Altération au sein de la roche-mère  
 PEDO Altération pédologique  
 FLUV Episode fluviatile  
 EOL Episode éolien  
 INTER Episode intertidal  
 INFRA Episode infratidal

b) *Les données de l'endoscopie et de l'exoscopie.*

Par immersion des grains de quartz dans le Baume du Canada, il est possible, grâce à l'étude de leurs inclusions (18), de déterminer leur origine. Chaque stock d'origine différente peut alors être isolé, et les grains qui le constituent étudiés séparément par exoscopie au microscope électronique à balayage.

L'endoscopie vient ainsi affiner les données de l'exoscopie, et les résultats obtenus par la conjugaison des deux méthodes sont représentés par la figure 2. L'exemple choisi est le même que celui de la figure 1. Afin de suivre l'histoire des grains de chaque stock, le figuré tireté représente les grains d'origine granitique, le figuré noir représente les grains d'origine métamorphique et les quartz rhyolitiques sont représentés par l'absence de figuré.

On constate que 55% des grains sont d'origine granitique, 25% d'origine métamorphique et 20% d'origine rhyolitique.

18% des quartz métamorphiques ont subi une éolisation, puis ont été fossilisés, et ont ensuite été repris par un fleuve, dans lequel ils se sont mélangés avec un fort pourcentage de grains en provenance d'une arène granitique. Ce fleuve a ensuite transporté les quartz (15% de métamorphiques et 35% de granitiques) en milieu marin infratidal.

On note également que la formation éolisée fossile ne contenait pas que des quartz métamorphiques, mais également un certain pourcentage de quartz granitiques. 10% des grains de l'échantillon, qui ont subi cette évolution, sont très évolués et ne portent plus de trace d'immobilisation pédologique: ils sont simplement « Eolisés » puis « Infratidaux » (9%) ou « Eolisés » puis « Intertidaux » (1%). Cette disparition de caractères évolutifs est une chose très courante. La conservation du caractère éolien s'explique par le fait qu'une éolisation marque très profondément un grain quand elle est poussée (cupules de choes, croissants de choes, etc.), tandis qu'une immobilisation en un milieu pédologique ne donne souvent que des caractères très fugaces (dépôts siliceux secondaires solubles, ou légères figures de dissolution, etc.).

Enfin, le stock d'origine rhyolitique s'individualise nettement: très évolués, les grains présentent des caractères typiques de grains marins côtiers. Sans doute s'agit-il de quartz d'origine lointaine apportés par dérive littorale.

Comme dans l'exemple exposé Figure 1, la proportion de quartz conservant les caractères intertidaux (6%), fluviatiles (20%) et infratidaux (74%) est caractéristique d'un sable prélevé dans une portion d'estuaire ou de delta soumise à une forte influence marine, à proximité d'une côte sableuse.

Par conséquent, la détermination du milieu de dépôt *final* d'un sable quartzeux peut être faite en utilisant l'exoscopie seule. Mais l'exemple présenté ici montre combien l'endoscopie est nécessaire si l'on veut entrer dans le détail, et retracer soigneusement l'histoire de l'échantillon; cette méthode intervient alors comme étroit complément de l'exoscopie et permet de remonter, étape après étape, à l'origine de *chacun* des stocks constitutifs de l'échantillon.

### Conclusion.

L'étude au microscope électronique à balayage de plus de 500 échantillons en provenance de divers milieux a permis d'isoler un certain nombre de caractères superficiels qui suffisent à distinguer les quartz évoluant en milieux fluviatile, intertidal, infratidal, éolien, pédologique. L'exoscopie permet également de distinguer les quartz d'altérite de ceux qui ne sont ni altérés ni transportés. De nombreuses applications de cette méthode ont déjà été réalisées et certaines sont publiées à l'heure actuelle (2, 9, 21, 29, 31, 49, 58, 66). Toutefois, de nombreux environnements restent encore à analyser pour déterminer l'influence qu'ils exercent sur les quartz. En outre, la diagenèse altère souvent la surface des quartz, en milieu continental et marin, et empêche totalement ou partiellement de donner un diagnostic. Certaines techniques de préparation des échantillons sont alors utiles (52), mais il est fréquent qu'elles ne suffisent pas. Aussi les problèmes qui restent à résoudre en ce domaine sont-ils au moins aussi nombreux que ceux qui sont déjà résolus. Mais le grand nombre de chercheurs qui se sont penchés depuis quelques années sur l'étude de la morphologie des quartz, et le perfectionnement dans ces accrus des appareils mis à leur disposition autorise heureusement tous les espoirs.

### Remerciements.

Les travaux exposés dans cet article ont été réalisés au cours de trois années passées au Laboratoire de Sédimentologie (section Océano-

graphie) de l'Université Paris-Sud, Orsay, sous la direction amicale du Professeur Lafond; qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance; je remercie vivement les Professeurs Cailleux, Deicha, Perna, Pomerol, Rivière et Monsieur Clocchiatti pour l'aide qu'ils m'ont prodiguée au cours de mes travaux ou dans la rédaction et la publication de ceux-ci.

Ces recherches ont été commencées dans le cadre des contrats C.N.E.X.O. n° 69/83 et 71/330, poursuivies grâce à une aide financière du C.N.R.S., et achevées grâce à l'attribution d'une bourse par la Fondation de la Vocation en 1972.

Les clichés illustrant cet article ont été réalisés au microscope électronique à balayage du B.R.G.M., Orléans-La-Source (France).

#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) ALEXANDER G. B., HESTON W. M. et ILER R. K. (1954) - *The solubility of amorphous silica in water*. J. Phys. Chem., 58, p. 453-455.
- (2) BALTZER F. et LE RIBAUT L. (1971) - *Néogène de quartz dans les bancs sédimentaires d'un delta tropical; aspect des grains en microscopies électronique et optique*. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 273, D, p. 1083-1086.
- (3) BARUSSEAU J.-P. (1973) - *Les patines internes des sables fauves de la plateforme sud-armoricaine. Mise en évidence et conditions de genèse*. Vol. Réunion Annuelle des Sc. de la Terre, Paris, p. 66.
- (4) BIEDERMAN E. W. Jr. (1962) - *Distinction of Shoreline Environments in New-Jersey*. J. Sed. Petr., 32, n. 2, p. 181-200.
- (5) BUSSON G. (1968) - *Les sables Ronds-Mats, Emoussés-Luisants et Non-Usés observés au microscope électronique à balayage (Stéréoscan)*. Bull. Mus. Nat. Hist. Nat., 2ème sér., 40, n. 4, p. 850-856.
- (6) CAILLEUX A. (1942) - *Les actions éoliennes périglaciaires en Europe*. Mém. Soc. Géol. F., XXI, fasc. 1-2, 176 pages.
- (7) CAILLEUX A. et TRICART J. (1959) - *Initation à l'étude des Sables et des Galets, I*. Centre Doc. Univers., Paris, 376 p.
- (8) CAILLEUX A. et SCHNEIDER H. (1968) - *L'usure des sables vue au microscope électronique à balayage*. Sc. Prog. Nat., 3395, p. 92-94.
- (9) CAMY-PEYRET J. et VUILLEUMIER J. (1973) - *Les faluns miocènes du Blésois: aspects sédimentologiques et paléocéologiques*. Thèse, 28 Juin, Université Paris-Sud.
- (10) CAYEUX L. (1929) - *Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses*. Mém. Carte Géol. France, Imp. Nat., Paris, p. 774.
- (11) CLOCCIATTI R. (1970) - *Etude des inclusions vitreuses et de leur altération: un exemple régional des Alpes dolomitiques (région de Bolzano, Italie)*. Bull. Suisse Minér. Pétrog., 50/1, p. 159-168.

- (12) CLOCCHIATTI R. et TOURENÇ J. (1971) - *Présence de quartz des ponces du Mont-Dore, d'âge Pliocène, dans les argiles sableuses du Bourbonnais*. C. R. Acad. Sc., 273, D, p. 2453-2455.
- (13) CLOCCHIATTI R. (1972) - *Les cristaux de quartz des ponces de la Vallée des Dix Mille Fumées (Katmai, Alaska)*. C. R. Acad. Sc., 274, D, p. 3037-3040.
- (14) CLOCCHIATTI R. et SASSI S. (1972) - *Découverte de témoins d'un volcanisme d'âge Paléocène à Eocène inférieur dans le Bassin phosphaté de Metlaoui (Tunisie Méridionale)*. C. R. Acad. Sc., 274, D, p. 513-515.
- (15) CLOCCHIATTI R. et BROUSSE R. (1972) - *Pétrogenèse des reliquats magmatiques de quartz pyroclastiques*. C. R. Acad. Sc., 274, D, p. 349-351.
- (16) CROOK K. A. W. (1968) - *Weathering and roundness of quartz sand grains*. Sedimentology, 2, p. 171-182.
- (17) CURRAY J. R. (1956) - *Dimensional grain orientation studies of recent coastal sands*. Amer. Assoc. Petroleum Geologists Bull., 40, p. 2440-2456.
- (18) DEICHA G. (1955) - *Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides*. Masson et Cie éd., Paris.
- (19) DEMPSTER P. B. et RITCHIE P. D. (1952) - *Surface of Finely-Ground Silica*. Nature, 169, p. 538-539.
- (20) DEMPSTER P. B. et RITCHIE P. D. (1953) - *Physicochemical studies on dusts. V. Examination of Finely-Ground Quartz by Differential Thermal Analysis and other physical methods*. J. Appl. Chem., 3, p. 182-193.
- (21) DESPRAIRIES A. (1973) - *Intérêt des minéraux argileux pour l'analyse séquentielle de séries rythmiques (Macédoine et Epire - Grèce)*. Vol. Réunion Annuelle des Sc. de la Terre, Paris, p. 166.
- (22) EHRlich A. et TOURENÇ J. (1967) - *Sur la présence de diatomées épilithes dans les sables actuels de l'Allagnon (Cantal)*. C. R. Somm. Soc. Géol. France, fasc. 2, p. 51-52.
- (23) FAUCK R. (1970) - *Evolution des quartz dans les sols rouges ferrallitiques développés sur les roches sableuses et gréseuses de l'Afrique Occidentale*. C. R. Acad. Sc., 271, D, p. 2273-2276.
- (24) GALLOWAY J. J. (1919) - *The rounding of grains of sand by solution*. Amer. J. Sc., v, 1919, p. 270-280.
- (25) FRECAUT R. et STRAUSS R. (1968) - *Composition chimique des eaux continentales et nature lithologique des bassins (Moselle supérieure et moyenne)*. Rev. Géog. phys. Géol. dyn. (2) x, fasc. 3, p. 247-254.
- (26) GIBB J. G., RITCHIE P. D. et SHARPE J. W. (1953) - *Physicochemical studies on dusts. VI. Electron-optical examination of finely-ground Silica*. J. Appl. Chem., 3, p. 213-218.
- (27) GIRESE P. et WEIL R. (1970) - *Nouvelles observations sur le gisement de quartz authigènes de la lagune de Fernan-Vaz (République du Gabon)*. Bull. serv. Carte Géol. Alsace Lorraine, 32, 3-4, p. 215-222.
- (28) GUILCHER A. (1965) - *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Masson et Cie éd., Paris, 319 p.
- (29) GUILLAUME-BRUNO S. (1972) - *Le Plio-Quaternaire des côtes du Morbihan*. Thèse soutenue le 22 Janvier 1972 à l'Université Paris-Sud, Centre d'Orsay.
- (30) HARDER H. et FLEMING W. (1970) - *Quartzsynthese bei tiefen Temperaturen*. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, p. 295-305.

- (31) HUBSCHMAN J. et LE RIBAUT L. (1972) - *Détermination, par exoscopie des quartz, de l'origine des limons quaternaires dans le Sud-Est du Bassin Aquitain*. C. R. Acad. Sc., 275, D, p. 1477-1480.
- (32) ICOLE M. (1970) - *Une nouvelle méthode pour la paléopédologie du Pliocène et du Villafranchien des Pyrénées Centrales; l'étude des galets de quartzite à cortex d'altération*. Bull. A.F.E.Q., 2-3, p. 135-143.
- (33) IERMAKOV N. P. (1965) - *Research on the nature of Mineral forming solutions*. Pergamon Press.
- (34) INGERSON E., et RAMISCH J. L. (1947) - *Origin of shapes of quartz sand grains*. Amer. Mineralogists, 27, p. 595-606.
- (35) KRAUSKOPF K. B. (1959) - *The geochemistry of silica sedimentary environments*. Soc. Econ. Min., Spec. Public., n. 17, p. 4-19.
- (36) KRINSLEY D. T. et TAKAHASHI T. (1962) - *Surface textures of Sand Grains: An application of electron microscopy*. Science, 138, n. 3546, p. 1262-1264.
- (37) KRINSLEY D. H., TAKAHASHI T., SILBERMAN M. L. et NEWMAN W. S. (1964) - *Transportation of sand grains along the Atlantic Shore of Long Island, New-York: an application of Electron Microscopy*. Marine Geology, 2, p. 100-120.
- (38) KRINSLEY D. H. (1965) - *Pleistocene Glaciation: A Criterion for Recognition of its On Set*. Science, 149, n. 3682, p. 442-443.
- (39) KRINSLEY D. H. et FUNNELL B. H. (1965) - *Environmental history of quartz sand grains from the Lower and Middle Pleistocene of Norfolk, England*. Quart. J. Geol. Soc. London, 121, p. 435-461.
- (40) KRINSLEY D. H. et DONAHUE J. (1968) - *Diagenetic surface textures on quartz grains in limestone*. J. Sed. Petr., 38, n. 3, p. 859-862.
- (41) KRINSLEY D. H. et DONAHUE J. (1968) - *Methods to study surface textures of sand grains, a discussion*. Sedimentology, 10, p. 217-221.
- (42) KRINSLEY D. H. et MARGOLIS S. V. (1971) - *Grain surface textures*. Ch. 8, p. 161 in « *Procedures in Sedimentary Petrology* », R. E. CARVER édit.
- (43) KUENEN Ph. H. (1959) - *Experimental abrasion, 3: Fluvial action on sand*. Amer. J. Sc., 257, p. 172-190.
- (44) KUENEN Ph. H. (1960) - *Experimental abrasion, 4: Eolian action*. J. Geol., 68, p. 427-449.
- (45) KUENEN Ph. H. et PERDOK W. G. (1962) - *Experimental abrasion, 5: Frosting and defrosting on quartz sand grains*. J. Geol. 70, p. 648-658.
- (46) LENEUF N. (1972) - *Aspects microscopiques de la surface des grains de quartz du continental terminal de Côte d'Ivoire*. Cah. O.R.S.T.O.M. Sér. Géol., vol. IV, n. 1, p. 53-65.
- (47) LE RIBAUT L. (1971) - *Présence d'une pellicule de silice amorphe à la surface de cristaux de quartz des formations sableuses*. C. R. Acad. Sc., 272, D, p. 1933-1936.
- (48) LE RIBAUT L. (1971) - *Comportement de la pellicule de silice amorphe sur les cristaux de quartz en fonction des différents milieux évolutifs*. C. R. Acad. Sc., 272, D, p. 2649-2652.

- (49) LE RIBAUT L. et TOURENQ J. (1972) - *Mise en évidence de trois types d'apports détritiques dans les sables et argiles du Bourbonnais d'après l'examen de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage*. C. R. Acad. Sc., 274, D, p. 528-531.
- (50) LE RIBAUT L. (1972) - *Exoscopie: caractères distinctifs des quartz à évolution fluviale*. C. R. Acad. Sc., 274, D, p. 3190-3193.
- (51) LE RIBAUT L. (1972) - *Exoscopie: caractères distinctifs des quartz à évolution marine*. C. R. Acad. Sc., 275, D, p. 735-738.
- (52) LE RIBAUT L. (1973) - *L'exoscopie, méthode de détermination des évolutions subies par les grains de quartz au cours de leur histoire géologique, par l'étude de leurs aspects superficiels au microscope électronique à balayage*. Thèse, 29 Juin, Université Paris-Sud, 62 pages.
- (53) LE RIBAUT L. (1974) - *L'exoscopie, méthode de détermination de l'évolution subie par les grains de quartz, grâce à l'étude de leurs aspects de surface au m.e.b.*. Rev. Géog. phys. Géol. dyn., (sous presse).
- (54) L.I.G.U.S. (Labo. Instit. Géog. Strasbourg; TRICART J. et Coll.) (1958) - *Méthode améliorée pour l'étude des sables*. Rev. Géomorphol. Dyn., 9, p. 43-54.
- (55) LOFOLI P. (1971) - *Fractographie électronique de grains de sable*. C. R. Acad. Sc., 273, D, p. 462-465.
- (56) LOFOLI-LOBANGA P. (1973) - *Contribution à l'endoscopie des quartz détritiques*. Thèse, Faculté des Science de Paris, 15 Janvier.
- (57) MARGOLIS S. V. et KENNETT J. P. (1971) - *Genozoic Paléoglacial history of Antarctica recorded in subantarctic Deep-Sea Cores*. Amer. J. Sc., 271, p. 1-36.
- (58) MASSON Ph. (1973) - *Contribution à l'étude sédimentologique des côtes charrentaises (presqu'île d'Arvert, île d'Oléron, estuaire de la Gironde)*. Thèse, 24 Novembre, Université Paris-Sud.
- (59) MILLOT G. (1960) - *Silice, silicifications et croissance des cristaux*. Bull. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine, 13, fasc. 4, p. 129-146.
- (60) MILLOT G. (1964) - *Géologie des argiles*. Masson et Cie, édit., Paris, 499 p.
- (61) MOREY G. W., FOURNIER R. O. et ROWE J. J. (1962) - *The solubility of quartz in water in the temperature interval from 25°C to 300°C*. Geochim. Cosmochim. Acta, 26, p. 1029-1043.
- (62) MOREY G. W., FOURNIER R. O. et ROWE J. J. (1964) - *The solubility of Amorphous Silica at 25°C*. J. Geophys. Research, 69, n. 10, p. 1995-2002.
- (63) MOSS A. J. (1966) - *Origin, shaping and significance of quartz sand grains*. J. Geol. Soc. Australia, 13, p. 97-136.
- (64) NAGELSCHMIDT G., GORDON R. L. et GRIFFIN O. G. (1952) - *Surface of Finely-Ground Silica*. Nature, 169, p. 539-540.
- (65) RICCI LUCCHI F. et DALLA CASA G. (1968) - *Surface textures of desert quartz grains. A new attempt to explain the origin of desert frosting*. Giornale di Geologia, (2), XXXVI, p. 751-776.
- (66) RIVIERE M. (1973) - *Existence de caractéristiques minéralogiques communes entre la formation de las Millianas et certains éléments allochtones de flysch argilo-gréseux (province de Malaga, Espagne)*. C. R. Acad. Sc., 277, D, p. 389-392.

- (67) ROCH E. et DEICHA G. (1966) - *Sur des « argilites » de la région de Draguignan (Var)*. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., fasc. 4, p. 145-146.
- (68) ROWLANT R. A. (1946) - *Grain fabrics of elastic quartz*. Geol. Acad. Amer. Bull., 57, p. 547-564.
- (69) SCHNEIDER H. E. (1963) - *Expériences d'usure de grains de quartz*. C. R. Acad. Sc., 526, D, p. 2453.
- (70) SCHNEIDER H. E. (1970) - *Problems of quartz grain morphoscopy*. Sedimentology, 14, p. 325-335.
- (71) SCHWARZACHER W. (1951) - *Grain orientation in sands and sandstones*. J. Sed. Petr., 21, p. 162-172.
- (72) SEGALEN P. (1968) - *Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux*. Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol., 6, n. 1, p. 105-126.
- (73) SIEVER R. (1962) - *Silica Solubility, 0°-200°C, and the diagenesis of siliceous sediments*. J. Geol., 70, n. 2, p. 127-150.
- (74) SMALLEY I. J. (1966) - *Formation of quartz sand*. Nature, 211, p. 476-479.
- (75) SMALLEY I. J. et VITA-FINZI C. (1968) - *The formation of fine particules in sandy deserts and the nature of « Desert Loess »*. J. Sed. Petr., 38, n. 3, p. 766-774.
- (76) SMALLEY I. J. (1971) - *« In-situ » theories of loess formation and the significance of the calcium-carbonate content of loess*. Earth-Sci. Rev., 7, p. 67-85.
- (77) TWENHOFEL W. H. (1945) - *The rounding of sand grains*. J. Sed. Petr., v. 15, p. 59-71.
- (78) VAN LIER J. A., DE BRUYN P. L. et OVERBEEK Th. G. (1960) - *The solubility of quartz*. J. Phys. Chem., 64, p. 1675-1682.