

Étude sur la solubilisation du quartz en voie d'altération

G. CLAISSE

Pédologue de l'ORSTOM - S.S.C.-Bondy

RÉSUMÉ

Le quartz pur présente une certaine solubilité à l'analyse aux trois acides, telle qu'elle est utilisée dans les laboratoires des Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM. Il en est de même pour le quartz altéré tiré d'un profil ferrallitique. La solubilité est très forte puisque pour des dimensions inférieures à 2 μ elle atteint 12 %.

A la solubilité normale du quartz s'ajoute celle due à la fragilité du quartz altéré, et à la présence d'une quantité de silice amorphe importante.

Dans l'altération du quartz « in situ », on assiste à une phase d'amorphisation qui pourrait fournir une partie de la silice entrant dans la synthèse de la Kaolinite. Le quartz pourrait donc être par suite de son abondance dans les profils, un fournisseur de silice non négligeable à côté des composés silicatés.

L'altération du quartz est mise en évidence par :

— La présence de silice amorphe en grande quantité dans les éléments fins.

— L'étude de photographies de surface.

— L'étude aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle.

— La présence de kaolinite en faible quantité.

SUMMARY

Pure quartz has a certain solubility in the three acids mixture (nitric acid + chlorhydric acid + sulphuric acid) used in the S.S.C. laboratories. It is the same thing with impaired quartz drawn from a lateritic profile. The solubility is very high since it comes up to 12 % for the clay size particles.

This comes from the normal solubility of quartz, the solubility due to the fragility of the impaired quartz and the presence of amorphous silica.

It seems that when the quartz is impaired « in situ », one can observe a stage of amorphisation, that might provide a part of silica which plays a part in the synthesis of the kaolinite.

The fact that quartz is weathered is proved by :

— the presence of amorphous silica in large quantity

— the study of surface photographs

— the study by X rays diffractions and differential thermic analysis

— the presence of kaolinite in small quantity.

ZUSAMMENFASSUNG

Der reine Quarz zeigt eine sichere Löslichkeit mit Hilfe der drei Säuren Analyse (Chlorwasserstoffsäure + Schwefelsäure + Salpetersäure). Der aus einem lateritischen Boden verwittrte Quarz zeigt eine grosse Löslichkeit mit der selben analyse. Zum Beispiel 12 % für kleine Quarzkorngrösse von $1,25 \mu - 2 \mu$.

Diese Löslichkeit entspringt :

- *der normal Löslichkeit des Quarzes,*
- *der Gebrechlichkeit des verwittrten Quarzes,*
- *einer grossen Quantität von unkristallisierter Kieselsäure aus.*

Die Verwitterung des Quarzes gibt einen unkristallisierten Stoff, der die Kieselsäure für den Aufbau des Tons liefert.

Die Verwitterung des Quarzes ist durch :

- *die Gegenwart der unkristallisierten Kieselsäure,*
- *die Untersuchung mit dem polarisierenden Mikroskop,*
- *die Untersuchung nach den Verwitterungsfiguren der Quarzkristallfläche mit Hilfe der Mikrofoto,*
- *die Gegenwart einer kleinen Tonsquantität in dem Quarz herausgestellt.*

1. INTRODUCTION

Les résultats d'une étude antérieure du comportement du quartz au cours de l'attaque triacide, conformément aux normes employées dans les laboratoires de Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM, ont montré une certaine solubilisation du quartz pur (CLAISSE, 1968).

Il est intéressant d'étudier le comportement d'un quartz altéré, tiré d'un profil ferrallitique de Côte d'Ivoire. Les analyses ont été faites dans les mêmes conditions, à part le fait que les séquences granulométriques ont été modifiées. Une analyse de quartz pur a été reprise en parallèle pour faciliter la comparaison. Les résultats obtenus ont été tels qu'ils ont orienté ensuite la recherche vers les causes possibles de la solubilisation très forte du quartz altéré.

L'extraction des éléments minéraux amorphes a été exécutée par Mme ICHTERTZ, du Laboratoire de

P. SEGALIN, les plaques minces ont été faites par R. BAILLON, du laboratoire de Géologie de J.-F. PARROT, Chef de Service, les analyses aux rayons X et à la thermobalance ont été faites par Mlle G. FUSIL et M. KOUKOU, du laboratoire de Spectrographie, sous la direction de M. PINTA. Les photos de surface ont été obtenues par M. le Professeur N. LENEUF, de la Faculté des Sciences de Dijon.

Que toutes ces personnes voient dans la parution même de ce modeste rapport la matérialisation de leur coopération désintéressée, et l'expression des remerciements de l'auteur.

2. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS DE QUARTZ

2.1. Méthodes utilisées

Il a été fait usage de 2 sortes d'échantillons : des quartz purs pris dans des éléments filoniens non altérés et des quartz provenant d'un profil de sol ferrallitique de Divo, Côte d'Ivoire.

Ces derniers se présentent très ferruginisés ; ils sont de couleur blanc rouille. Ils ont été extraits, caillou par caillou, grain par grain, à la main, de manière à éliminer toutes les concrétions ferrugineuses qui pourraient apporter des éléments étrangers à l'analyse. Ces quartz rouille ont été brossés avec soins, lavés à l'eau distillée, puis à l'eau légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique, enfin à l'eau distillée, de manière à présenter des surfaces externes propres. Tous ceux qui étaient associés à des concrétions ont été éliminés.

Quant aux quartz purs de couleur blanche, ont seuls été choisis les morceaux absolument propres. Les morceaux présentant quelques veines ferrugineuses, ou associés à des feldspaths ou des paillettes micacées ont été éliminés.

Ces quartz sont cassés en morceaux de 1 cm^3 environ, puis broyés au mortier d'Abiche et triés au tamis de 2 mm. La poudre obtenue est passée à l'aimant très fort qui retient les limailles produites par le mortier en acier. Des analyses faites sur de la poudre de quartz pur non passée à l'aimant indiquent que la proportion de fer donnée par le mortier d'acier varie entre 5 à 8 %. La technique de la préparation des échantillons devrait tenir compte de cet apport étranger. La poudre de quartz est ensuite lavée à l'eau distillée dans un bécher, puis décantée. Les poussières de quartz sont ainsi éliminées.

Cette poudre propre est passée sur une série de tamis qui la fractionne en cinq classes :

1	2 mm à 1 mm
2	1 mm à 0,5 mm
3	0,5 mm à 0,2 mm
4	0,2 mm à 0,1 mm
5	0,1 mm à 0,05 mm

Les trois premiers tamis retiennent une très grande partie du quartz. Le 5^e tamis laisse passer un peu de poudre inférieure à 0,05 mm. Celle-ci est éliminée.

Une autre fraction obtenue après broyage au mortier d'Abiche est dirigée vers le broyeur à boules en agathe. Pour obtenir une bonne répartition et une certaine quantité de particules fines, il est nécessaire de broyer la poudre pendant un temps assez long (de 1 à 2 h pour 50 g). A partir de cette masse pulvérulente, on extrait, par sédimentation les classes :

6	de 50 μ à 32 μ
7	de 32 μ à 20 μ
8	de 20 μ à 12,5 μ
9	de 12,5 μ à 7,9 μ
10	de 7,9 μ à 5 μ
11	de 5 μ à 3,2 μ
12	de 3,2 μ à 2 μ
13	de 2 μ à 1,25 μ ou < 2 μ

Pour les dimensions très fines, les quantités obtenues sont faibles. Aussi est-on obligé d'enrichir les suspensions en éléments fins, de la manière suivante. Dans un bécher de 500 cc, on place environ 100 g de poudre broyée. On délaye avec une spatule en verre et de l'eau légèrement ammoniacquée. Puis on laisse reposer 1/2 heure environ. Les éléments les plus gros forment un dépôt. On décante et on recommence avec le dépôt formé. Les eaux de décantation sont dirigées vers les allonges à sédimentation. On procède alors à la sédimentation des particules de diamètre inférieur à 2 μ ; selon le procédé de sédimentation d'Atterberg, (soit 10 cm de hauteur pour une sédimentation de 8 h à 20° de température).

On répète chaque jour, et plusieurs fois de suite, l'opération de manière à obtenir une quantité importante de particules fines en suspension dans l'allonge à sédimentation. Les particules grossières restées au fond du bécher à décantation, sont dirigées une seconde fois vers le mortier à boule où elles donneront des éléments plus fins par broyage.

Lorsque le temps de sédimentation des éléments de diamètre supérieur à 2 μ est accompli, on sépare par siphonnage les particules restées en suspension, (de diamètre inférieur à 2 μ). La suspension siphonnée est dirigée vers une deuxième allonge où, par un procédé

analogue, on sépare les éléments inférieurs à 1,25 μ qui sont en suspension. En procédant ainsi pendant un certain nombre de jours, on enrichit les 2 allonges en éléments fins, et on obtient des produits de sédimentation soit inférieurs à 2 μ , soit compris entre 2 μ et 1,25 μ et inférieurs à 1,25 μ .

Lorsqu'on estime que l'enrichissement est suffisant, on cesse de nourrir les allonges, mais on continue les sédimentations, jusqu'à ce que le liquide soit définitivement clair. Cette manipulation dure plusieurs jours. On s'assure de la parfaite définition de la classe granulométrique en constatant qu'après chaque sédimentation la hauteur des éléments en suspension diminue dans la colonne d'eau de l'allonge. Après de nombreuses sédimentations, les éléments fins recherchés se situent à la limite inférieure de la hauteur de sédimentation. La séparation entre les deux milieux (eau, et eau et suspension) est rigoureusement nette et horizontale si la température autour de l'allonge varie peu.

Lorsque cette extraction est terminée, on peut extraire à partir de l'allonge utilisée pour les particules de 2 μ , les poudres de dimensions supérieures. Chaque catégorie de suspension est recueillie dans un bécher. On laisse sédimenter sans ajouter aucun sel ou produit flocculant de manière à conserver intacte la dimension de la particule. On décante, puis on recueille le dépôt dans une capsule de porcelaine. On fait sécher à 60° maximum, jusqu'à obtention d'un produit sec. Cette poudre est placée avec une spatule en verre (et non acier pour éviter des traces de fer reconnaissables par diffraction des rayons X ou à la thermobalance) dans une boîte à fermeture rodée pour permettre une déshydratation et la conservation à l'état sec au moment de la prise d'échantillon.

Les temps de sédimentation pour une température de 20-22° sont donnés par le tableau suivant :

TABLEAU 1

Relation entre le temps de sédimentation et la dimension des particules

	Dimension (μ)	Hauteur de chute (cm)	Temps de sédimentation	Nombre de sédimentations en 24 h
1	1,25	12	23 h 30 - 24 h 30	1
2	1,25-2	10	7 h 30 - 8 h	2
3	2 - 3,2	10	2 h 58 - 3 h 07	2 à 3
4	3,2-5	10	1 h 15	4 à 5
5	5 - 7,9	10	30 mn	10
		20	1 h	6
6	7,9-12,5	20	24 mn	
7	12,5-20	20	9 mn 20	
8	20 - 32	20	3 mn 40	

La fabrication des poudres en classes granulométriques est une opération qui demande un temps très long, par suite du nombre de sédimentations nécessaires à l'obtention d'une grande quantité de poudre dont la dimension des grains doit être parfaitement délimitée.

2.2. Choix des classes granulométriques et causes d'erreur

1) Classes grossières

Les 5 premières classes sont fixées par les tamis eux-mêmes. Elles sont entre elles dans les rapports 5-2-1, ceci jusqu'à la dimension 0,05 mm. La grosseur des éléments, les erreurs sur cette grosseur et le pourcentage sont fonction des aléas du tamisage (BERTHOIS L. et C. 1951, 1955, GRIFFITH 1953, GULNICK 1943).

2) Classes fines

Les dimensions 50, 20, 10, 5 et 2 μ ont été assez rapidement abandonnées. En effet : ces dimensions ne définissent que 4 intervalles. Les intervalles ne sont pas logarithmiquement égaux, l'intervalle 2 - 5 étant plus grand. L'intervalle étant, toute proportion gardée, « large », la répartition des grains était plus aléatoire que dans un intervalle « étroit ».

L'homogénéité et la répartition des grains doit être identique pour des échantillons de même classe granulométrique, si on veut que les résultats soient comparables pour plusieurs échantillons de même classe subissant les mêmes attaques, sinon il peut exister une variation plus grande des résultats. Ceci peut expliquer le chevauchement de courbes voisines.

Ce changement de normes dans les classes granulométriques entraîne la disparition de la classe de dimension 10 μ et un changement d'échelle quand on passe aux séries obtenues par sédimentation. Cependant on obtient, grâce à ce changement, une plus grande précision dans la construction des courbes de solubilisation. En effet on possède désormais 7 intervalles granulométriques au lieu de 4, pour une même répartition. Il s'en suit un resserrement des intervalles qui deviennent logarithmiquement égaux entre eux.

Les coupures 2 μ , 5 μ , 20 μ qui sont des normes internationales sont respectées. Enfin, il y a apparition d'une nouvelle classe granulométrique. Celle allant de 2 μ à 1,25 μ et dont l'extraction se fait pour un temps de sédimentation égal à 24 h.

2.3. Variation des dimensions à l'intérieur d'une classe

Cette variation influe sur les résultats et peut donner lieu à des interprétations faussées. Divers facteurs peuvent la provoquer :

1) *Température*. S'il existe à l'intérieur de l'allonge de sédimentation de faibles différences de température, dues en général à la place que l'allonge occupe dans le laboratoire, il peut se produire des différences de vitesse de chute, ou encore de légers courants de convection qui perturbent la régularité de la sédimentation. On conçoit ainsi qu'en dehors d'une enceinte thermique la séparation à la limite de deux classes est délicate.

2) *Répartition des éléments granulométriques dans une classe* (fig. 1). Soient A, B, C, trois classes granulométriques consécutives. En 1 et en 2, la répartition des éléments est équilibrée ou homogène. C'est-à-dire que l'ensemble des grains présente un regroupement maximum au centre de la classe.

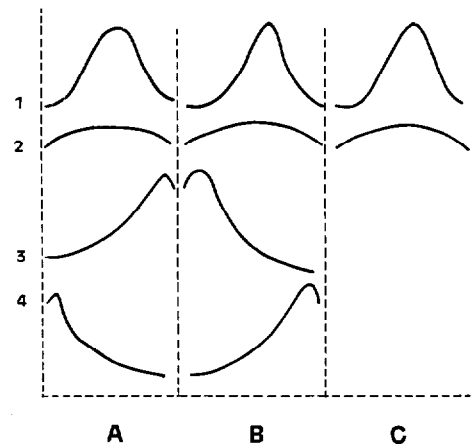


FIG. 1. — Répartition des poudres dans les classes granulométriques.

1-2 bonne répartition

3-4 répartition défectueuse.

En 3 et en 4, par suite du déplacement dans les classes de la majeure partie des grains d'une même dimension vers les limites de la classe, on peut obtenir dans 2 classes voisines :

— des répartitions de grains proches l'une de l'autre, donc ayant des propriétés presque identiques.

— des répartitions de grains trop éloignées l'une de l'autre, donc ayant des propriétés trop différentes, ne reflétant pas les propriétés réelles des 2 classes.

Il est nécessaire pour pallier cette difficulté de procéder à plusieurs sédimentations sur des quantités plus faibles de poudre, plutôt que de faire un petit nombre de sédimentations sur des quantités de poudre plus importantes, ceci afin que la répartition aléatoire des grains conduise à une classe granulométrique équilibrée.

3. ÉTUDE DE LA SOLUBILISATION DU QUARTZ A L'ATTAQUE TRIACIDE

3.1. Solubilisation du quartz pur (fig. 2)

Toute solubilisation du quartz devant se comparer à la solubilisation du quartz pur à l'analyse triacide, il

était nécessaire de refaire l'étude avec la nouvelle répartition granulométrique. Cette nouvelle étude conduit à des résultats comparables à la précédente (CLAISSE, 1968). Les conclusions diffèrent légèrement en ce qui concerne les résultats obtenus pour les éléments très fins. Les pourcentages de solubilisation sont un peu supérieurs à ceux obtenus précédemment

23 ‰ pour 2 μ au lieu de 22 ‰

26 ‰ pour 1,25 μ .

La quantité de silice solubilisée reste très faible jusqu'aux dimensions 0,2/0,1 mm. Elle augmente pour des dimensions inférieures. La courbe de solubilisation est une droite. Les dimensions des grains étant disposées sur une échelle logarithmique, la courbe de solubilisation de la silice du quartz est une fonction logarithmique des dimensions.

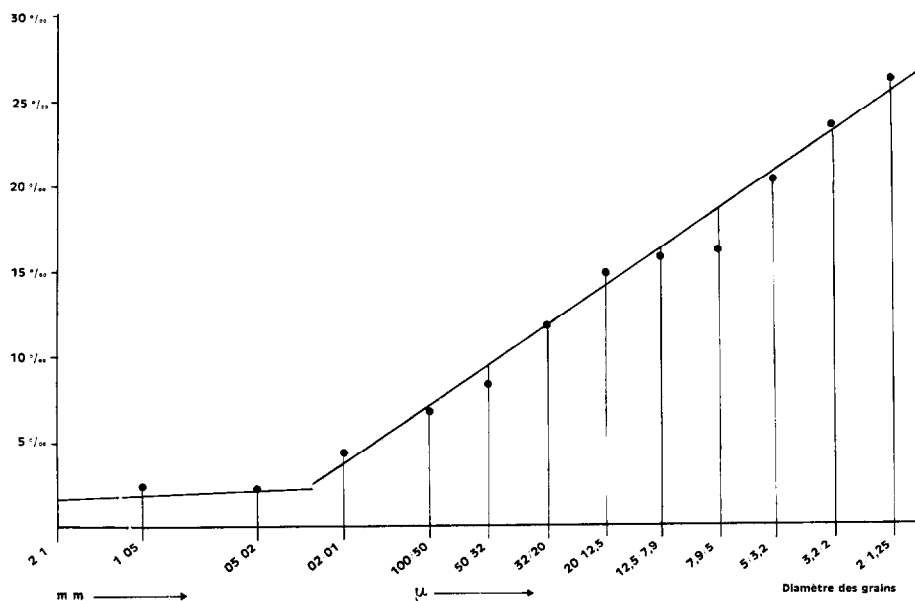


FIG. 2. — Solubilisation du quartz pur en fonction des classes granulométriques, après attaque triacide.

3.2. Solubilisation d'un quartz tiré d'un profil de sol ferrallitique

(= quartz ferrugineux) (fig. 3)

Cette étude est intéressante, car les résultats obtenus sont réellement ceux que l'on obtient pour le quartz

dans l'analyse d'un sol ferrallitique, si on suppose qu'il n'y a pas interférence des autres éléments qui entrent dans la composition de l'échantillon.

On peut tirer les conclusions suivantes :

1. L'attaque solubilise une quantité importante de silice à partir du quartz.

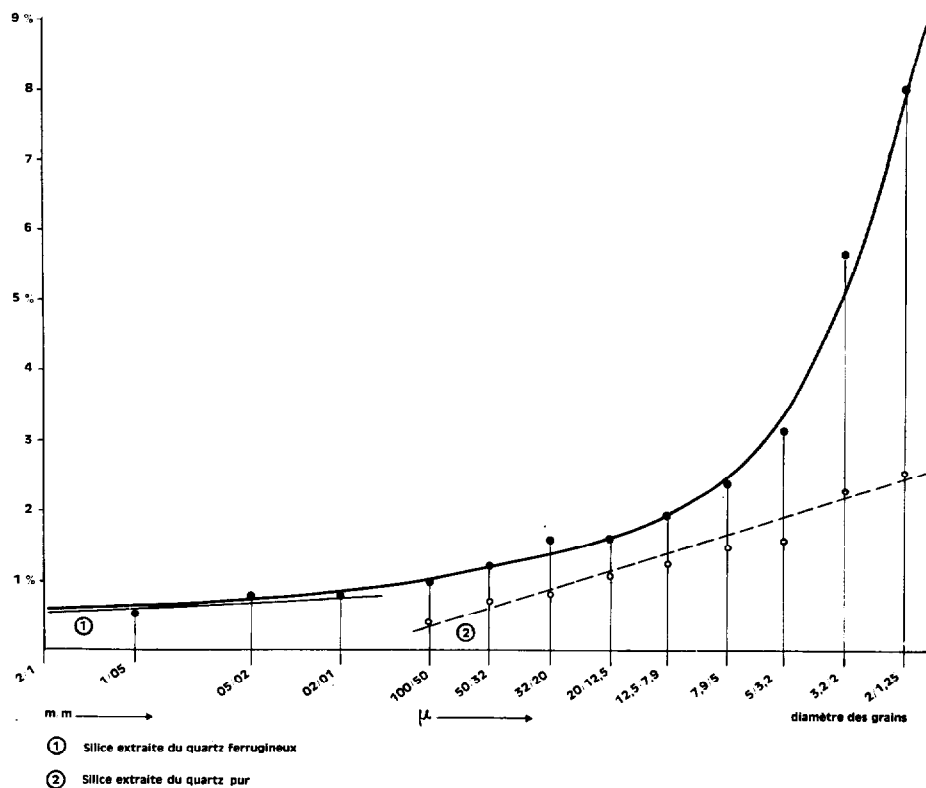


FIG. 3. — Solubilisation du quartz ferrugineux en fonction des classes granulométriques, après attaque triacide.

2. La quantité de silice solubilisée est variable suivant la granulométrie du quartz. Elle varie de 0,7 ‰ pour les éléments de 2 à 1 mm, jusqu'à 121,1 ‰ pour la fraction très fine inférieure à 1,25 μ .

3. Pour un diamètre des grains de quartz compris entre 2 mm à 50 μ , l'augmentation de la solubilisation est régulière et est représentée, en échelle logarithmique, par une droite.

4. Pour des dimensions inférieures à 50 μ , la pente de la courbe représentative augmente progressivement. On peut assimiler la portion entre 50 μ et 12,5 μ à une droite d'inclinaison plus forte que la première.

5. Enfin, pour des dimensions inférieures à 12,5 μ , l'accélération de la solubilisation va croissant pour atteindre des valeurs de 121 ‰.

On reconnaît donc une zone critique qui commence à 50 μ , et au-delà de laquelle la solubilisation, qui était déjà forte, devient très importante.

Il est intéressant de comparer la différence de solubilité du quartz altéré avec celle du quartz pur. Cette comparaison souligne l'ampleur de la solubilisation du quartz altéré, qui ne suit pas la loi logarithmique du quartz pur. Cependant pour les tailles intermédiaires elle tend à s'en rapprocher (fig. 4).

La courbe de solubilisation du quartz ferrugineux se rapproche de la droite du quartz pur dans la zone 100 μ - 12,5 μ , délimitant ainsi trois sections :

— une pour les diamètres supérieurs à 100 μ , où la différence de solubilisation est forte.

— une autre de 100 μ à 12,5 μ , où la différence de solubilisation est faible. On se trouve alors dans la section de la deuxième droite logarithmique.

— une troisième pour les diamètres inférieurs à 12,5 μ , où la solubilisation redevient très forte.

Le rapport de solubilisation (fig. 4) des deux types

de quartz présente une variation comparable. On peut distinguer 3 parties dans la courbe représentative :

- une partie entre 2 m/m et 0,2 m/m dans laquelle le rapport est irrégulier et élevé.
- une partie entre 0,2 m/m et 12,5 μ ; le rapport est le plus faible et varie peu : il passe de 1,9 à 1,1.
- une partie comprenant les dimensions inférieures à 12,5 μ ; le rapport augmente de nouveau et passe de 1,2 à 3,1.

Ce rapport passe par un minimum. La solubilisation importante du quartz ferrugineux par rapport au quartz pur se manifeste dans les dimensions grossières et les dimensions très fines. Cela nous explique le comportement du quartz vis-à-vis de l'attaque triacide. Le quartz pur en grains grossiers résiste bien à l'attaque triacide ; par contre, le quartz ferrugineux

est plus ou moins désagrégé et corrodé, si bien qu'au cours de la désagrégation il passe à une granulométrie inférieure.

Ensuite, dans les zones moyennes, le quartz ferrugineux par suite de sa fragilité normale donne une proportion de silice soluble légèrement supérieure au quartz pur, alors que, dans le troisième stade, on observe un excès de solubilisation de la silice, comme si un autre facteur de solubilisation intervenait. C'est ce qui sera démontré plus loin. En effet, pour des dimensions inférieures à 10 μ , on peut considérer la solubilisation totale comme provenant :

- de la solubilisation normale du quartz.
- du supplément dû à sa fragilité.
- de l'apport dû à la transformation du quartz en silice amorphe.

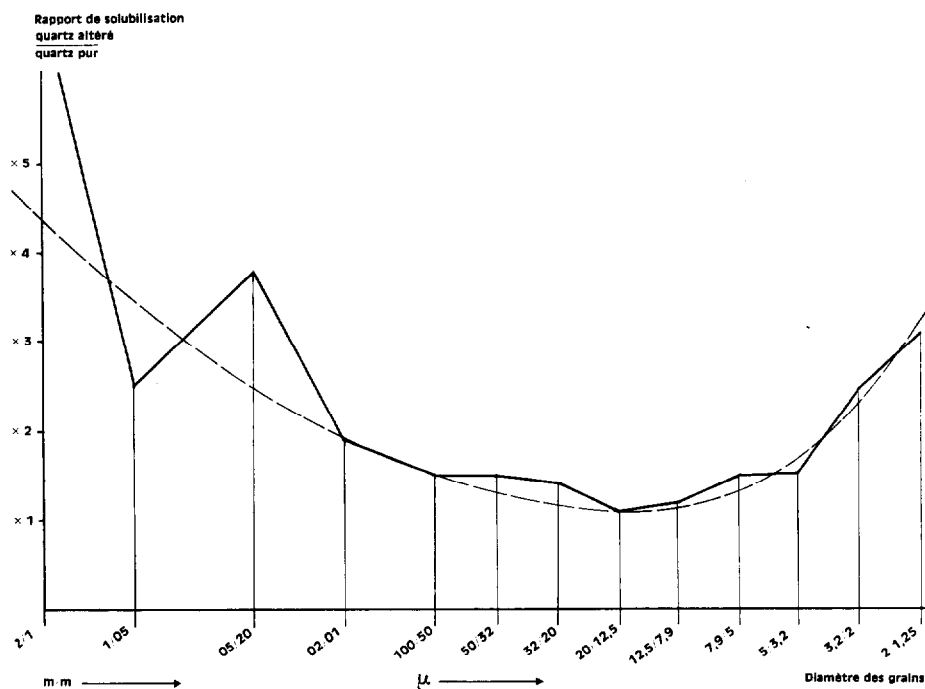


FIG. 4. — Rapport de solubilisation quartz altéré sur quartz pur en fonction des classes granulométriques.

4. ÉTUDE DES OXYDES DE FER ET D'ALUMINE EXTRAITS DU QUARTZ FERRUGINEUX

Le quartz tiré du sol ferrallitique est fortement teinté de rouille. Cela implique la présence de fer oxydé,

accompagné éventuellement d'autres produits non colorés, tels que les hydroxydes d'aluminium. L'analyse triacide solubilise l'ensemble des oxydes métalliques, ceux-ci ont été analysés. Deux résultats sont intéressants à étudier : l'évolution de la quantité

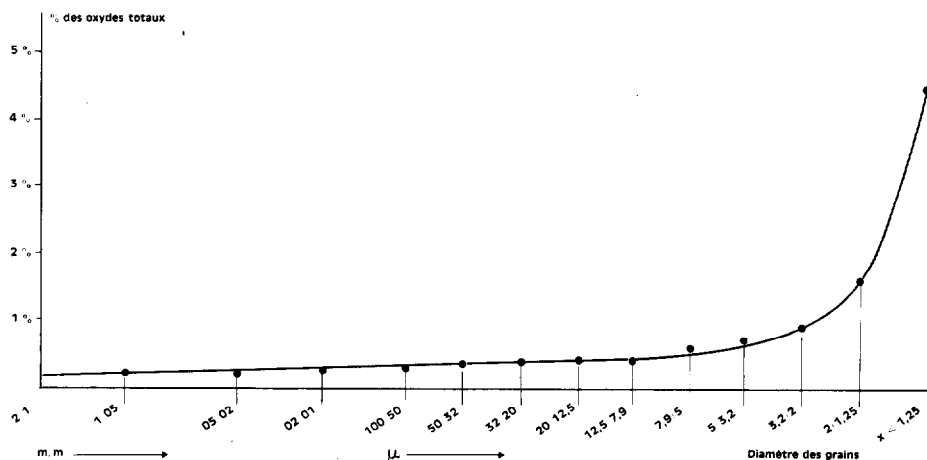


FIG. 5. — Oxydes totaux extraits du quartz ferrugineux après attaque triacide, en fonction des classes granulométriques.

totale des oxydes en fonction de la granulométrie et le rapport oxydes de fer sur oxydes totaux (fig. 5 et fig. 6).

Les oxydes sont en quantité croissante non négligeable à mesure que la granulométrie décroît. Les quantités extraites croissent très rapidement à partir des granulométries inférieures à 12,5 μ : on passe alors de 0,5 % à 4,5 % d'oxydes extraits.

Le rapport fer sur alumine croît très lentement à partir des éléments grossiers jusqu'aux éléments fins passant de 0,56 à 0,72, ce qui signifie que la quantité de fer augmente un peu plus rapidement que la quan-

tité d'alumine. Cela peut-être expliqué par d'autres méthodes d'analyse qui signalent la présence de goethite dans les éléments fins (analyse thermique différentielle).

Cependant le rapport varie peu, ce qui implique une quantité pratiquement constante de ces 2 éléments dans les quartz altérés, quelle que soit la dimension des grains de quartz.

De cette série d'analyses, il apparaît que si le quartz pur est soluble à l'analyse triacide, le quartz tiré du sol présente une solubilité fortement augmentée. Il est donc nécessaire de situer exactement la source de l'excès de silice ainsi trouvé, et de pousser plus loin l'investigation analytique avec des moyens appropriés.

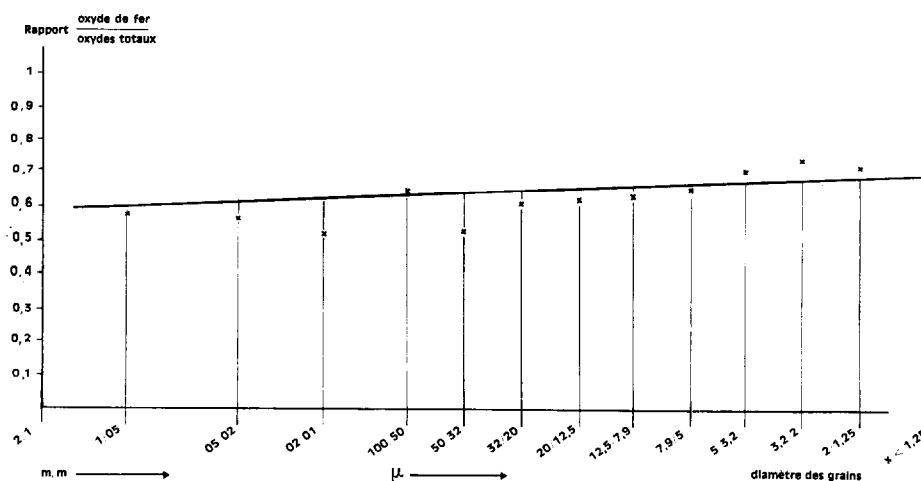


FIG. 6. — Rapport oxyde de fer sur oxydes totaux en fonction des classes granulométriques.

5. ÉTUDE DU QUARTZ ET DES CONSTITUANTS ÉTRANGERS ASSOCIÉS AU QUARTZ

Il a été fait appel à des moyens d'investigation plus poussés que ceux de l'analyse courante afin de trouver une explication au problème posé par une solubilité fortement augmentée du quartz ferrugineux à l'analyse triacide. Les procédés employés sont divers : ce sont des procédés optiques (microphotographie et microscope polarisant), des procédés d'investigation physique (analyse thermique différentielle et rayons X) et des procédés chimiques beaucoup plus spécialisés que l'analyse totale (analyse des produits amorphes).

5.1. Examen des surfaces par microphotographies

Pour cet examen, il a été choisi 3 échantillons (numérotés I, II, III) de quartz : un échantillon de quartz pur, un de quartz en voie d'altération, et enfin un échantillon de quartz fortement ferruginisé. L'étude photographique de ces échantillons se fait en passant d'un faible grossissement ($\times 20$ ou 55) à un grossissement très fort ($\times 6600$). C'est une série de 8 photographies remarquables obtenues par le laboratoire de N. LENEUF.

Les comparaisons de surface sont particulièrement frappantes et explicites pour des photos prises au même grossissement. Ainsi le quartz pur non altéré présente toujours une surface glacée, polie, ou l'on remarque seulement quelques petits décrochements dus au phénomène d'arrachement lorsqu'on a séparé l'échantillon de la masse de quartz. Les quartz altérés présentent des écaillages très nets et des phénomènes de desquamation. C'est entre ces écailles et sur ces surfaces de desquamation que s'insinuent et se disposent des produits accessoires, cortège de l'altération du quartz, venant soit de l'extérieur soit de l'intérieur, c'est-à-dire du quartz même.

Ainsi, si le quartz pur apparaît comme une masse solide homogène, par contre le quartz altéré apparaît comme un agrégat de particules, de formes diverses, plus ou moins soudées entre elles, et aménageant des lacunes, des surfaces de contact, et des canalicules, dans la masse quartzreuse.

DESCRIPTION DES PHOTOS DE SURFACE DES QUARTZ

Photo n° 1 ($\times 55$) Quartz pur sain (I)

La surface observée est compacte, relativement plane avec de légers décrochements dus à la cassure conchoïdale caractéristique des cassures du quartz.

Ces décrochements sont plus ou moins parallèles. Il existe également quelques trous très petits dans la surface.

Photos n° 2 et 3 ($\times 20$ et $\times 55$) Quartz ferrugineux (III)

On n'observe plus de surfaces planes étendues. La surface apparaît très bosselée et très burinée. Il existe de nombreuses petites fractures et cavernes reliées entre elles, ainsi que des veines de pénétration de l'altération. Les lignes de décrochement sont multiples ; les zones d'altération se situent dans tous ces accidents topographiques.

Photo n° 4 ($\times 2\,200$) Quartz pur sain (I)

La surface est compacte, plane. Il n'existe que quelques rides de décrochement subparallèles. On remarque quelques petites fissurations très étroites, formant des angles variables entre elles.

Photo n° 5 ($\times 2\,000$) Quartz en voie d'altération (II)

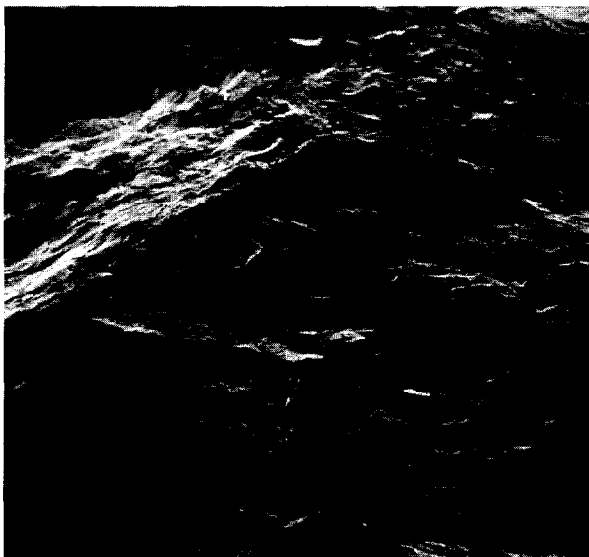
On remarque immédiatement deux plans parallèles avec une zone de décrochement entre ces 2 plans, formant ainsi une falaise parfaitement définie. Le bord de cette falaise est net, et présente un écaillage conchoïdal. Par contre, la paroi de la falaise est façonnée de micro cavernes et d'écailles quartzreuses qui forment des figures de desquamation. La desquamation se poursuit au pied de la falaise sur une bande parallèle à cette dernière. La largeur totale de la bande d'altération ainsi décrite varie de 15 à $20\ \mu$.

Photo n° 6 ($\times 2\,200$) Quartz en voie d'altération, non ferruginisé (II)

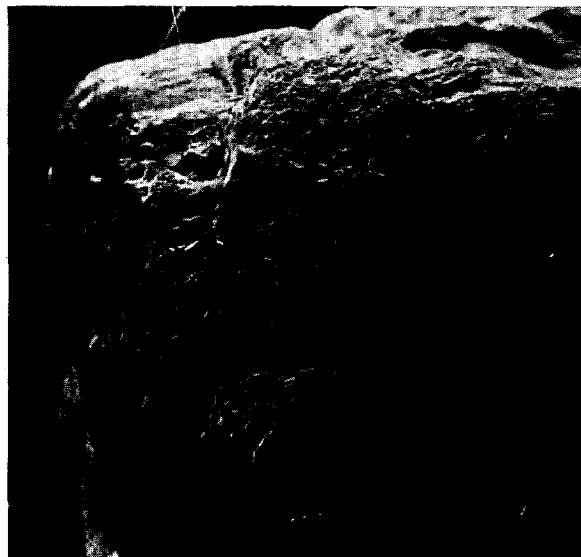
La surface apparaît très propre bien qu'étant typiquement écailleuse. Elle est sillonnée de fractures étroites, et présente deux grosses cavernes profondes donnant l'aspect d'un gouffre. La surface écailleuse est formée d'une multitude d'écailles de toutes dimensions, les plus grosses étant nettement hexagonales. On retrouve la trace des clivages des cristaux rhomboédriques de quartz.

L'ensemble de l'écaillage semble provenir de la fragmentation de feuillets superposés dont chacun débordé un peu du précédent qui le recouvre. Le bord des feuillets forme des lignes plus ou moins discontinues de tracé varié. C'est ainsi que certaines écailles sont détachées du feuillet auquel elles appartiennent.

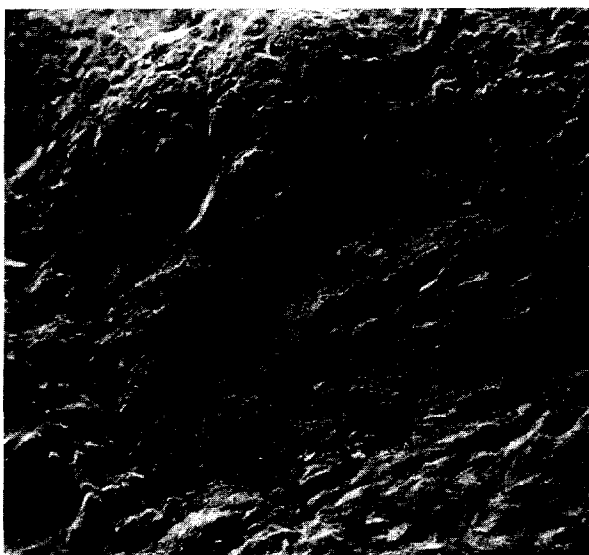
Un autre phénomène est observable : chaque écaille ou fragment séparé est entouré d'un liséré blanc.



1. Quartz sain ($\times 55$).

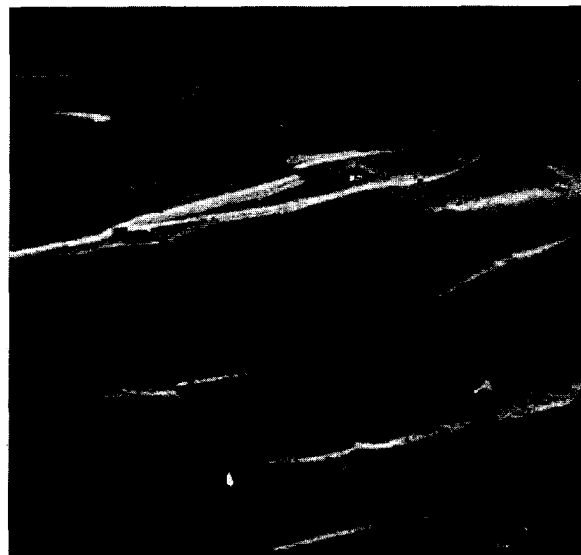


2. Quartz altéré ferruginisé ($\times 20$).
Tiré d'un profil ferrallitique.



3. Quartz altéré ferruginisé ($\times 55$).

Tiré d'un profil ferrallitique.
La surface apparaît profondément burinée avec des veines de pénétration de l'altération.



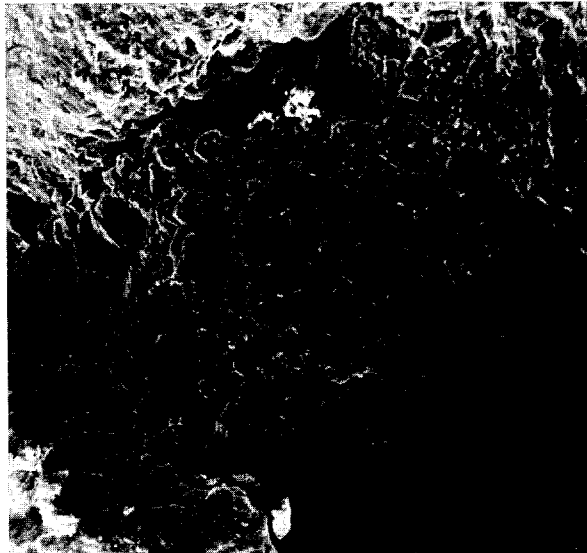
4. Quartz sain ($\times 2200$).

Les lignes de décrochement sont caractéristiques. Ce sont elles qui donnent l'aspect de cassure conchoïdale au quartz.



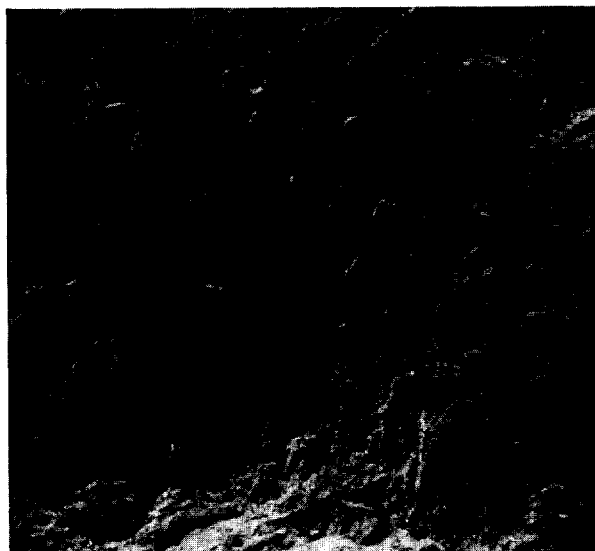
5. Quartz en voie d'altération ($\times 2200$).

Quartz tiré d'un profil ferrallitique
Le long de certaines directions privilégiées s'amorcent des lignes d'altération qui désagrègent le quartz en petites masses plus ou moins hexagonales.



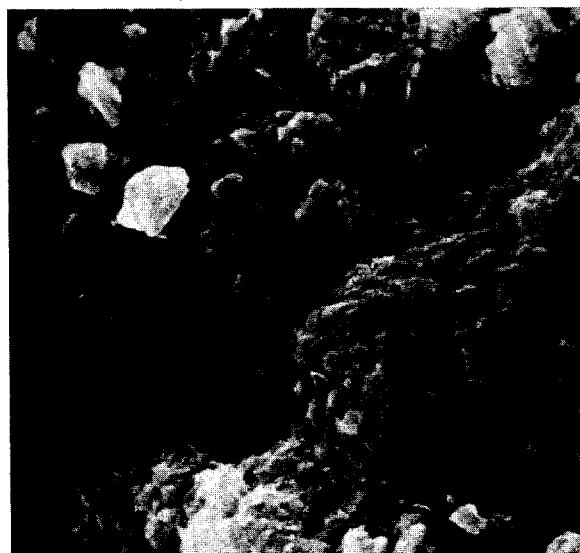
6. Quartz altéré ($\times 2200$).

Quartz tiré d'un profil ferrallitique.
La desquamation en écailles hexagonales est parfaitement visible. Chaque écaille est entourée d'un liséré blanchâtre.



7. Quartz altéré ferruginisé ($\times 2200$).

Tiré d'un profil ferrallitique.
La surface apparaît irrégulière, spongieuse — il se détache des cristaux qui semblent collés à la surface d'altération.



8. Quartz altéré ferruginisé ($\times 6600$).

Tiré d'un profil ferrallitique.
La desquamation est visible — Les écailles sont individualisées, ou en plaques — les hexagones des rhomboédres sont également visibles.

D'après ce qui a été observé au microscope polarisant, il se peut qu'on se trouve en présence d'une bordure d'amorphisation du quartz, le phénomène étant visible sur cet échantillon car il n'est pas masqué par des apports de produits ferrugineux. Ce liséré blanc correspondrait au bord des îlots de quartz et à l'ensemble des canalicules des plaques minces (ici représentés par les fractures) et serait constitué par les produits amorphes décelés dans l'étude au microscope polarisant.

Dimension des cavernes : $28 \mu/18 \mu$
et $12 \mu/4 \mu$

Dimension des écailles, quelques unes entre 3 et 6μ ,
de nombreuses entre $0,5$ et 1μ .

Photo n° 7 ($\times 2\ 200$) Quartz altéré, échantillon très ferruginisé (III)

Il ne s'agit plus d'une photo d'ensemble, mais d'un aspect d'une caverne d'altération. Celle-ci a la forme d'un hémicycle avec une paroi d'un côté, et une large ouverture de l'autre qui donne sur la masse quartzreuse. La paroi de l'hémicycle présente un aspect spongieux. A l'opposé, vers la partie ouverte, on remarque des restes, des morceaux de quartz en forme de tables polygonales, reliées à la masse quartzreuse. Ces morceaux ont aussi un aspect scoriacé. Sur la paroi spongieuse se trouvent également des débris de quartz polygonaux.

L'aspect général est sale et encrouté, ce qui contraste beaucoup avec l'aspect net et propre de la photo précédente.

Le diamètre de l'hémicycle est d'environ 27μ , celui des tables de débris de quartz de 2 à 4μ .

Photo n° 8 ($\times 6\ 600$) Quartz altéré, échantillon très ferruginisé (III)

Le champ d'observation est notablement plus étroit, et l'on n'observe qu'une partie de la paroi d'une caverne.

La structure lamellaire de cette paroi est très visible. Elle est constituée par la superposition de nombreuses lames quartzreuses donnant le caractère chaotique de cette paroi. De nombreux trous y sont visibles. On remarque la fragmentation des lames en écaille polygonales allongées, mais conservant les angles de 120° . Il existe même un certain nombre de fragments complètement détachés et libres sur le substratum. D'autres sont encore reliés par des sortes de pédoncules, mais sont en voie de détachement.

Les grosses écailles sont bordées d'une frange grisâtre dont on peut évaluer la largeur à environ $0,1 \mu$. Quelques écailles ont des dimensions de l'ordre de $1,5 \mu$ à 2μ , les plus nombreuses se situent entre $0,4$ et $0,8 \mu$.

5.2. Examen de plaques minces au microscope polarisant

5.2.1. DESCRIPTION DU QUARTZ EN PLAQUE MINCE AUX FAIBLES GROSSISSEMENTS (fig. 7)

Cette étude se révèle complémentaire de l'étude photographique des surfaces. Elle permet de pénétrer à l'intérieur d'un caillou de quartz et d'étudier par le moyen de lames minces l'ensemble des microcristaux et de leur articulation à l'intérieur de la masse quartzreuse.

Différents morceaux de quartz ont été choisis en fonction de leur structure interne. Ce sont des quartz purs non altérés (nommés échantillon A) et des quartz altérés plus ou moins ferruginisés (nommés échantillon B).

5.2.1.1. Nomenclature des échantillons

Voici la liste de ces échantillons avec la description de leur surface polie examinée à très faible grossissement.

a) Quartz normal

Echantillon 1 A

Ce quartz d'aspect macroscopique sain apparaît très finement fissuré. L'ensemble des fissures se regroupe en deux directions principales et forme un premier réseau. Celui-ci recouvre un 2° réseau de fissures très fines formant une sorte de filet régulier dans la masse.

Echantillon 2 A

Ce quartz d'aspect macroscopique compact laisse apercevoir à la loupe quelques fissures grossières.

b) Quartz altéré

Echantillon 1 B

Ce quartz apparaît avec une série de fissurations assez larges, recoupant d'autres fissurations de même ordre. L'intersection produit des vides plus ou moins cruciformes.

Echantillon 2 B

La fissuration a augmenté en largeur. Il se produit à l'intersection des fissures de larges cavernes, de l'ordre de 1 à 2 mm pour un caillou de quartz de 2 cm de dimensions.

Les échantillons 1 B et 2 B résultent de l'évolution de l'échantillon 1 A.

Echantillon 3 B

L'échantillon de quartz est parcouru de fissures fines et d'autres plus importantes et nombreuses. Elles sillonnent en tous sens le quartz, et subissent un début d'envahissement par des produits ferrugineux de couleur rouille. Ceux-ci forment une bordure qui peut à

certains endroits atteindre 0,5 mm d'épaisseur. Certaines grosses fissures sont également envahies par des produits ferrugineux rouille, mais qui ne pénètrent que sur 2 à 3 mm de profondeur à l'intérieur de quartz. C'est une ferruginisation de bordure.

Echantillon 4 B

On observe un même type de fissuration, mais avec envahissement total des fissures par les produits ferrugineux, et remplissage des cavernes à l'intérieur du quartz par les produits ferrugineux. Il existe également à l'intérieur du quartz des plages ferrugineuses très craquelées de l'ordre de 2 à 3 mm. Les craquelures du bord s'enfoncent de 2 à 5 mm et peuvent avoir 0,25 mm de largeur. Elles sont remplies de produits ferrugineux

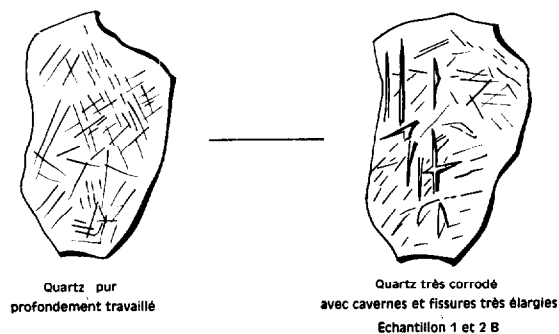


FIG. 7 a. — Corrosion du quartz pur.

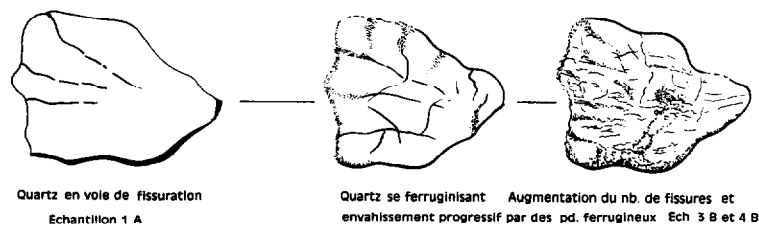


FIG. 7 b. — Ferruginisation du quartz.

On assiste donc à deux phénomènes :

1) Augmentation des craquelures en nombre et en importance,

2) Envahissement progressif des conduits par des produits ferrugineux rouille jusqu'à l'établissement d'un réseau complet à l'intérieur du quartz, remplissant l'ensemble des craquelures.

Il y a apport ferrugineux ; cet apport est très certainement accompagné par d'autres éléments, en particulier par des éléments alumineux.

5.2.1.2. EXAMEN EN LUMIÈRE POLARISÉE

a) quartz pur

Echantillon 1 A

Le quartz observé est typique. Il est transparent, faiblement réfringent. En lumière polarisée, il est gris blanc, à extinction droite.

Echantillon 2 A

On observe le quartz en masse ; on reconnaît des lignes de clivage à angle de 120° dues à leur projection sur le plan section, caractéristique du système rhomboïdal.

On distingue également des lignes remarquables, constituées par des alignements de bâtonnets ou de ménisques incurvés. Ces lignes de virgation s'éteignent ensemble, mais pour une position différente de l'extinction du quartz. Elles représentent un décrochement conchoïdal dans les cristaux de quartz. Elles sont dues à des effets de pression qui ont produit des lignes de cisaillement.

On observe également quelques fractures réelles, c'est-à-dire qu'il y a eu séparation des deux lèvres. Ces fractures sont remplies de silice de néoformation qui s'éteint avec un angle différent et présente également une biréfringence différente. Quelques fractures s'éteignent à 45° . Ces caractéristiques semblent correspondre à une forme de silice, la lutécite.

b) quartz altéré

Echantillon 1 et 2 B

Le quartz est très fracturé. Les fractures sont très larges, avec remplissage de matière de néoformation. Ces fractures sont remplies de grains de quartz très fins ; certains présentent des côtés hexagonaux, d'autres des figures très nettes de corrosion. Sur les bords de ces larges fractures, il en existe d'autres plus fines qui décollent de longues écailles de quartz.

Echantillon 3 B

On observe des craquelures fines, rouille, irrégulières, en dents de scie s'avancant dans toutes les directions et délimitant des îlots de quartz de différentes dimen-

sions. Certains petits îlots sont regroupés et plus ou moins alignés.

L'ensemble forme une mosaïque à éléments de taille variée dont l'agencement fait apparaître un réseau assez largement aplati, orienté parallèlement au bord de l'échantillon de quartz. Les éléments de la mosaïque sont à la fois plus petits et très aplatis sur les bords de quartz. On retrouve là le phénomène de formation d'écailles qu'on avait observé lors de l'étude des microphotos de surface. Elles sont beaucoup plus visibles sur le bord du morceau de quartz. En d'autres endroits, il existe des lignes de craquelures qui s'enfoncent perpendiculairement au bord, dans la masse du quartz, certaines très profondément.

Il existe enfin des craquelures très épaisses, qui délimitent des plages quartzeuses. Elles sont remplies de matière couleur rouille. Lorsque ces craquelures gagnent en épaisseur, elles forment soit des canaux, soit des plages rouille dans lesquelles on distingue des petits éléments de quartz.

Il existe également des taches grises à gris noir dans les plages de quartz. Les contours sont plus ou moins nets et on reconnaît à l'intérieur quelques petits quartz. Ces taches correspondent à des cavernes dans le quartz qui sont dues à des zones de fragilité ayant cédé lors de la fabrication de la lame mince. Bien que ce phénomène soit un artefact, il souligne la fragilité du quartz dans des zones internes de l'échantillon. Elles se situent en dehors des zones atteintes par les craquelures rouille. Elles prédisposent ainsi de larges zones internes à la pénétration d'éléments ferrugineux le long de craquelures potentielles.

Echantillons 1 B, 2 B, 3 B, 4 B

Les îlots de quartz en lumière polarisée correspondent à ceux observés en lumière naturelle. Mais leur surface est relativement diminuée par suite d'un phénomène qu'on peut appeler « élargissement optique des craquelures ». Ces dernières apparaissent maintenant comme de larges bandes noires toujours éteintes. Certains îlots, identiques aux îlots observés en lumière naturelle, sont totalement éteints ou polarisés en gris très foncé. Nous savons que la biréfringence de la silice cristallisée autre que le quartz est très faible, d'où des teintes de polarisation très foncées.

5.2.2. ÉTUDE A FORT GROSSISSEMENT (fig. 8 et 9)

Les craquelures se présentent comme des canaux de calibre variable sur l'ensemble de leur parcours. On remarque plusieurs types de remplissage de ces craquelures.

1) Celles qui sont remplies d'une multitude de grains de quartz de toute dimensions enveloppés de produits qui ne sont pas toujours éteints en lumière polarisée. Ils peuvent être constitués par un gel de silice.

Les grains de quartz présentent, soit des surfaces hexagonales avec angles caractéristiques dus au système de cristallisation rhomboïdal (ce peut être des cristaux de néoformation), soit des grains plus gros, brisés, ou des grains avec des figures de corrosion.

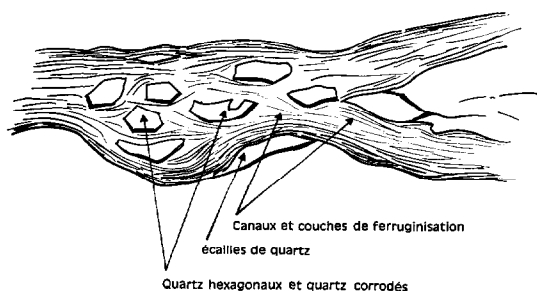
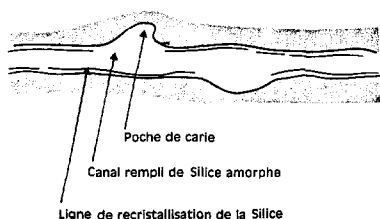


FIG. 8. — Divers canaux dans le quartz et leur remplissage.

2) Celles remplies de produits ferrugineux rouille. On remarque l'accroissement du remplissage par couche le long des parois avec des concentrations plus foncées. La couleur varie donc de rouille clair à brun rouille.

On distingue également, par suite de la différence de couleur à certains endroits, l'apport de 3 à 4 couches d'éléments ferrugineux. Dans les gros canalicules ou les cavernes, on rencontre des grains de quartz entourés de plusieurs couches de produits ferrugineux. L'ensemble du remplissage à une allure fluidale.

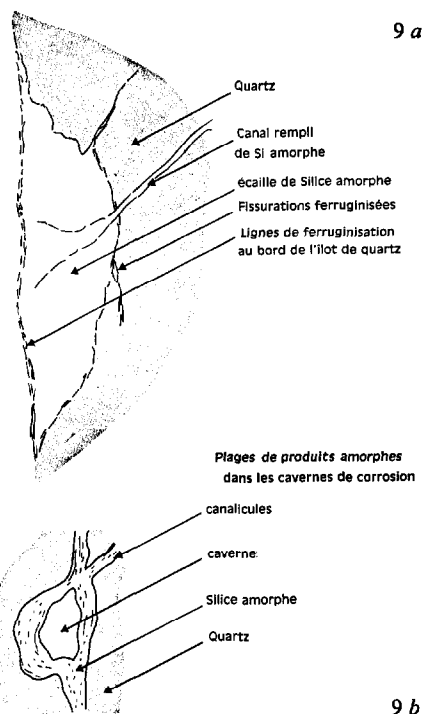


FIG. 9 a. — Ecaille de silice amorphe.

FIG. 9 b. — Caverne dans le quartz.

Mise en évidence de silice amorphe

1) Dans de nombreux canaux, on distingue une matière différente du baume, incolore, translucide et qui reste complètement éteinte en lumière polarisée. Elle remplit entièrement le canal. Il s'agit de silice amorphe. On observe sur le bord une bande de recristallisation très fine qui polarise en gris, donnant l'impression d'un dédoublement de la paroi. Cette recristallisation est de la silice, provenant de la fraction amorphe précédente.

2) Les cavernes présentent également sur les parois des couches d'éléments amorphes.

3) La bordure des îlots de quartz ferruginisé est délimitée par une couche d'éléments ferrugineux. Des fissurations délimitent de grosses écailles qui peuvent être traversées par des canalicules. Ces écailles de bordure présentent souvent une extinction complète en lumière polarisée.

Plusieurs zones de ce genre ont été relevées avec des points de cristallisation en leur sein. On peut les attribuer à des produits amorphes.

Ainsi on observe dans le quartz altéré un réseau de fractures et de canalicules qui est tapissé ou rempli d'éléments étrangers au quartz. Ce sont des formations amorphes, ferrugineuses, ou siliceuses. Ces dernières peuvent recristalliser.

On observe encore un mélange de petits cristaux de quartz soit corrodés, soit parfaitement cristallisés au milieu de ces formations amorphes.

On observe enfin des écailles de silice amorphe indépendantes du réseau de fractures et de canalicules.

5.3. Etude des Poudres de Quartz à l'analyse thermique différentielle et aux rayons X

L'examen optique des quartz a permis de déceler des phénomènes de desquamation des cristaux et la présence de produits amorphes. Il est intéressant d'étudier les poudres de quartz avec l'aide de méthodes d'investigation physique. En effet, si certains composés ne peuvent s'individualiser par les méthodes d'analyse chimique totale qui réduit la matière en ses composants élémentaires, ils peuvent au contraire s'identifier facilement à l'analyse différentielle et aux rayons X, ceux-ci précisant les produits cristallisés, celle là indiquant les départs d'eau. Ces analyses sont faites sur des poudres dont les dimensions sont inférieures à $2\ \mu$.

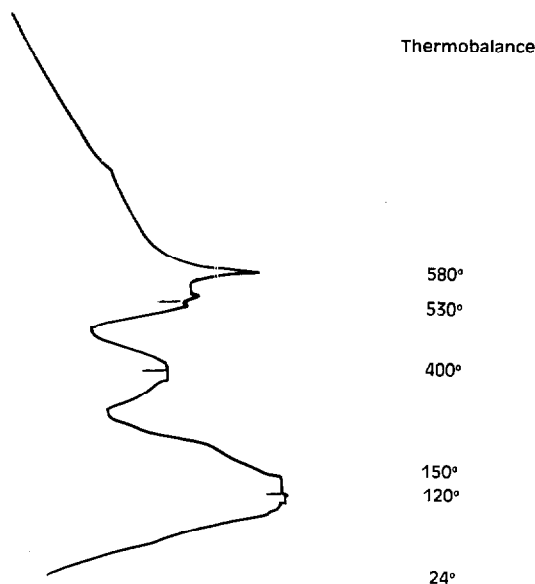


FIG. 10. — Courbe de l'analyse thermique différentielle de la poudre de quartz ferrugineux.

Analyse thermique différentielle (fig. 10)

On observe d'abord dans le diagramme, deux crochets indiquant deux départs d'eau. Entre 120° et 150° ce qui montre la présence de substance amorphe en assez grande quantité, et entre 250° et 400° ce qui montre la présence de goethite.

On observe ensuite au voisinage de 550° un petit crochet et un grand crochet qui correspondent à la kaolinite et au quartz.

Cependant on ne trouve pas à $900-1\ 000^\circ$ le crochet exothermique de la kaolinite ; à sa place se trouve une vague exothermique due à la présence d'oxyde de fer, qui semble être en quantité suffisante pour masquer le crochet kaolinique (CAILLERE, HENIN, 1963).

On peut établir le tableau suivant :

Départ d'eau entre $120-150^\circ$	présence de substance amorphe
entre $350-400^\circ$	présence de goethite
Petit crochet	voisin de 550° { attribué à la kaolinite Quartz
Grand crochet	
Vague exothermique vers 900°	présence d'oxydes de fer

Rayons X (fig. 11 et 12)

Les analyses ont été effectuées sur des poudres inférieures à $2\ \mu$ et $0,79\ \mu$ avec différentes sensibilités (sensibilité : S 80, S 40, S 20). L'ensemble des diagrammes donne, toutes les raies du quartz.

Cependant, il y a des différences légères entre la poudre de quartz pur et celle d'un quartz ferruginisé. En effet, sur cette dernière on remarque : à $3,56\ \text{\AA}$ et à $7,15\ \text{\AA}$ deux petits pics qui correspondent à la présence de kaolinite, et à $2,69\ \text{\AA}$ un petit pic qui correspond à la présence de goethite. Sur les poudres fines (inférieures à $0,79\ \mu$) et à une sensibilité plus forte (S 40 et S 20) les deux pics à $7,15\ \text{\AA}$ et $3,56\ \text{\AA}$ sont parfaitement visibles.

Par l'emploi de ces 2 méthodes d'investigation, on peut se faire une idée précise de la composition du cortège d'éléments qui accompagne le quartz en voie d'altération dans un profil ferrallitique.

— Des éléments amorphes, dont l'étude en lame mince nous a précisé qu'ils se composent de silice, de fer, et probablement d'alumine qui doit accompagner le fer.

— *Des hydroxydes de fer* cristallisés sous forme de goethite, dont on décèle la présence dans le diagramme d'analyse thermique différentielle et aux rayons X. Ils ne peuvent provenir que du profil ferrallitique et se sont glissés dans les plans d'altération du quartz.

— *Enfin de la kaolinite*, en vérité en très faible quantité, mais présente. Elle pose le problème de son existence au sein du quartz altéré : provient-elle d'une migration à partir du profil, ou d'une synthèse dans les plans d'altération du quartz ?

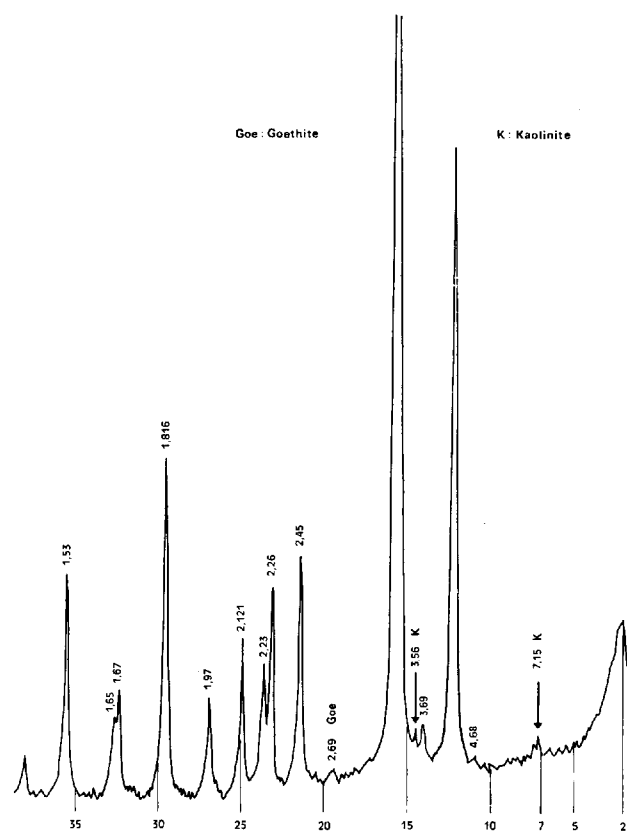


FIG. 11. — Spectre aux rayons X de la poudre de quartz altéré.

5.4. Etude des produits minéraux amorphes

Une certaine quantité de produits amorphes a été trouvée par observations et analyses décrites dans les

paragraphe précédents, à l'intérieur du réseau cristallin des quartz altérés. Il est intéressant d'en déterminer la quantité par les mêmes méthodes chimiques appliquées à l'analyse des produits amorphes dans un profil ferrallitique. Ainsi la confirmation du quartz fournisseur de silice amorphe pourrait expliquer, du moins en partie, la forte quantité de silice solubilisée à l'analyse triacide pour un quartz altéré. Cela permet en même temps de déterminer le pourcentage de fer et d'alumine présents sous forme amorphe dans ce même quartz.

La méthode d'analyse employée (SÉGALEN, 1968) consiste en la mise en solution des produits amorphes par attaque, alternativement avec l'acide chlorhydrique et la soude, de concentration variable, et cumul des résultats obtenus à chaque attaque.

5.4.1. SUR QUARTZ PUR (fig. 13)

Il est nécessaire d'étudier l'influence du broyage des grains de quartz pur dans l'analyse des substances amorphes, afin de déceler si de fines particules de quartz libérées au broyage ne fournissent pas un peu de silice qui serait assimilée à de la silice amorphe.

Sur l'ensemble d'une série de séquences granulométriques allant de $1,25 \mu$ à 2 mm , on a procédé à l'extraction de la silice amorphe. Quelles que soient les dimensions des grains de quartz, aucune trace de silice amorphe n'a pu être décelée (fig. 9).

Par conséquent :

1) Le broyage destiné à l'obtention de particules de quartz jusqu'aux dimensions inférieures à 2μ ne fait pas apparaître de produits ayant un comportement de silice amorphe.

En corollaire, on peut dire que le quartz reste à l'état cristallin, même en particules très fines, et que les microcristaux conservent leurs propriétés. Ainsi toute présence de substance amorphe en ce qui concerne une étude sur des produits comportant du quartz pur, se rapporte uniquement à la silice amorphe et non pas au quartz.

2) La quantité constante de silice enlevée au quartz correspond à la solubilité du quartz aux réactifs qui ont été utilisés dans la méthode. Il faudrait donc considérer cette quantité comme provenant du quartz dans toute autre analyse de produits quartzueux et plus particulièrement en ce qui concerne cette étude sur le quartz provenant de profils ferrallitiques.

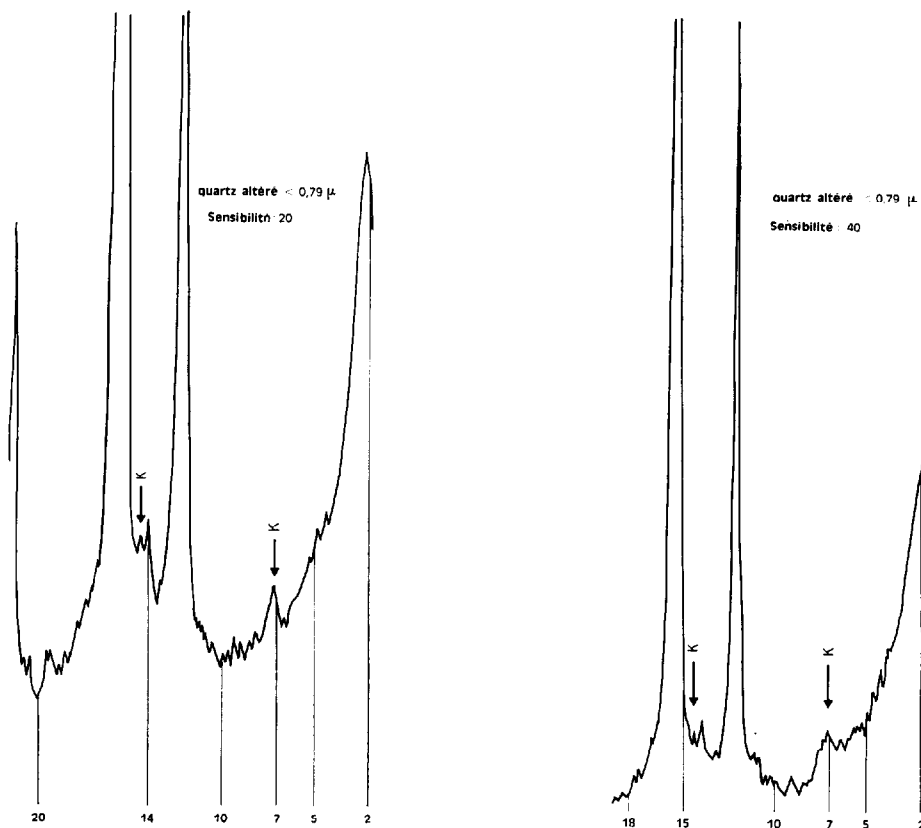


FIG. 12. — Spectre aux rayons X de la poudre de quartz altéré, à différentes sensibilités.

5.4.2. SUR QUARTZ ALTÉRÉ (fig. 13)

La méthode d'extraction des produits amorphes appliquée à de la poudre de quartz altéré a solubilisé une certaine quantité d'alumine, de fer et de silice. Les résultats obtenus confirment que le quartz altéré contient dans les mailles cristallines ces éléments sous forme amorphe.

Alumine. Des quantités très faibles de produits alumineux amorphes sont extraites. Ces quantités s'épuisent très rapidement et les produits alumineux amorphes ne sont plus décelables pour des dimensions supérieures à 5 μ .

D'autre part, les produits alumineux amorphes sont facilement mobilisables par les moyens chimiques d'extraction. La courbe cumulative devient très rapidement horizontale, indiquant que la totalité a été extraite.

Fer. Des quantités plus importantes de produits ferrugineux amorphes sont extraites. Ces quantités s'épuisent très lentement et subsistent jusqu'à des dimensions de grains assez grandes.

D'autre part, la courbe ne se stabilise pas à l'horizontale. Si on extrapole les résultats obtenus en la prolongeant, on constate que l'extraction a presque totalement épuisé les produits amorphes.

Silice. Les quantités de silice amorphe extraites sont relativement considérables, surtout en ce qui concerne l'échantillon 1,25 μ où elles atteignent 4,4 %. La courbe d'extraction monte très rapidement et, après sept extractions, l'extrapolation donne à penser qu'il reste encore des amorphes. On peut estimer la quantité de silice amorphe à 5 % environ. Pour les valeurs supérieures à 1,25 μ , les quantités extraites sont moins importantes et disparaissent à 20 μ .

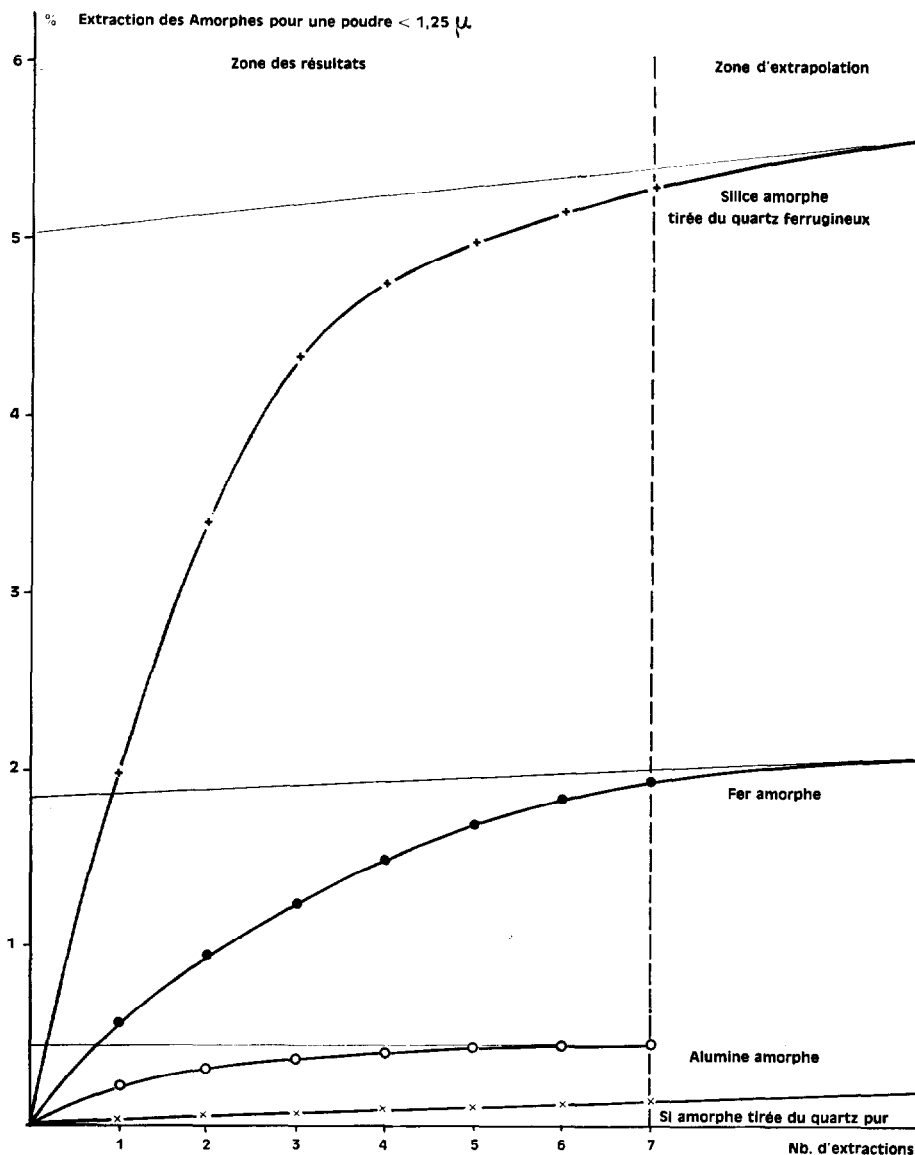


FIG. 13. — Extraction des produits amorphes de la poudre de quartz altéré et du quartz pur.

6. DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CONCLUSION

6.1. Analyse aux trois acides des quartz purs et des quartz ferruginisés

Il est généralement admis que le quartz résiste très bien à l'attaque de l'analyse aux trois acides (méthode

employée aux SSC de l'ORSTOM). Les expériences décrites dans une précédente étude sur des quartz purs non altérés (CLAISSE, 1968) ont montré que le quartz est relativement soluble.

La même opération menée sur un quartz fortement ferruginisé, dans des conditions strictement analogues, a montré une solubilisation de la silice beaucoup plus

importante. On obtient pour les éléments fins un départ de silice de l'ordre de 8 à 12 %.

Ces résultats mettent en cause, non pas l'analyse aux trois acides elle-même, mais l'interprétation des résultats obtenus par cette méthode.

Les conséquences en sont les suivantes :

— soit un échantillon pédologique broyé afin de réduire en poudre des éléments grossiers et passé au tamis de 0,2 mm. Ceci a pour effet de fragmenter les quartz en éclats plus petits dont la taille maximum est de 0,2 mm.

— Les quartz purs donnent une légère quantité de silice soluble. Celle-ci augmente lorsque la taille diminue.

— Les quartz altérés donnent des quantités plus importantes et les éléments fins donnent des quantités considérables.

Le résultat analytique de l'attaque indique une quantité de silice soluble dont la partie extraite des quartz est d'autant plus importante que l'élément quartzueux est plus fin et que la teneur en quartz altéré est plus grande.

En ce qui concerne l'analyse des horizons supérieurs des profils ferrallitiques où les minéraux autres que le quartz sont pratiquement complètement démolis la silice soluble trouvée proviendra non seulement des éléments de néoformation, mais encore en quantité non négligeable des quartz altérés.

C'est cette quantité globale qui sert à l'interprétation du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Quelle valeur peut-on accorder à ce rapport ? Quelle est surtout sa signification lorsque l'on s'en sert pour délimiter des propriétés chimiques de deux argiles différentes et, par déduction, des organisations structurales ?

Ne serait-il pas alors plus intéressant d'abandonner l'analyse aux trois acides au profit de l'analyse totale à l'acide fluorhydrique qui fournit les proportions de l'ensemble des éléments rentrant dans la composition d'une argile, excepté celle de la silice sous toutes ses formes, puisque cette dernière est volatilisée sous forme de fluorure de silicium (SiF_4).

Les types d'argile seraient déterminés rapidement par les moyens physiques (Rayons X, Analyse thermique différentielle) qui ont l'avantage d'indiquer en plus de leur conclusions, le cortège des éléments accompagnateurs, oxydes purs ou plus ou moins hydratés.

6.2. Altération du quartz

Le mécanisme d'altération du quartz et de transport de la silice ainsi que sa reprécipitation ont attiré l'attention d'un certain nombre d'auteurs (MC. KEAGUE et CLINE, 1963 - MILLOT, 1959-1964). L'étude des échantillons examinés permet de se faire une idée de l'évolution du quartz du moins dans les conditions où se trouvent ces échantillons. On observe le processus suivant :

Le quartz des filons, lorsqu'il est mis en place, a déjà subi des effets dynamiques qui le préparent à l'altération :

a) Séparation en îlots par des lignes de fractures le long de ses faces cristallines.

b) Cisaillement en virgule dû à la cassure conchoïdale par des pressions dont la répercussion n'est pas forcément parallèle à un plan cristallin.

c) Compression aboutissant à des débuts d'écrasement.

Ce réseau de fractures ouvre la voie à l'altération dès que le quartz est mis au contact des facteurs chimiques externes. Des points d'attaque commencent à se manifester le long des petites fractures dues aux pressions provenant des forces tectoniques qui créent des faces de ruptures dans le réseau cristallin. Le long de ces faces s'installent des zones de carie, alors que subsistent de vastes volumes adjacents intacts.

Une fois la fracture bien individualisée, l'altération va progresser de plusieurs manières :

Soit qu'elle opère suivant certains plans privilégiés, de manière à faire sauter des plans de quartz lame par lame, qui se désagrègent suivant les plans de clivage du système, soit qu'il se produise un élargissement de l'ensemble des fractures : des cavernes apparaissent alors à l'intersection des fractures qui s'alignent selon les plans de clivage. Il y a, à la fois, processus de corrosion et d'écaillage, avec corrélativement remplissage des espaces nouvellement créés par :

— Les produits de transformation : silice amorphe, produits ferrugineux, alumineux.

— Des produits de néoformation : recristallisation de la silice, synthèse de la kaolinite.

— Des produits de désagrégation : Amas de grains de quartz en voie de corrosion.

Le quartz semble s'amorphiser sur l'ensemble de sa masse autour des microcavernes délimitées par les clivages, sous forme d'une pellicule de silice amorphe.

La coupe d'une lame mince délimite ainsi des canaux et des cavernes remplis ou tapissés de produits amorphes. La microphotographie fait apparaître soit un empilement de particules lamellaires dont les bords sont entourés de silice amorphe, soit un ensemble très sale, spongieux, résultant de couches irrégulières d'éléments amorphes plus complexes.

Le déchaussement des différents îlots se poursuit lorsque le quartz entre dans la zone pédologique.

Le remplissage des plans de fractures par des éléments endogènes et exogènes, ainsi que leur oxydation peuvent créer des pressions internes aboutissant à un déchaussement des éléments quartzeux entre eux, ce qui diminue fortement la cohésion de la masse quartzeuse.

Les phénomènes de déplacement latéral dans le profil (creeping), le lessivage oblique, créent des pressions unilatérales qui favorisent encore le dégagement des différents îlots entre eux et le remplissage des fractures par des éléments étrangers.

Enfin, les mouvements de surface, par suite de pressions multiples, achèvent de désagréger complètement les masses quartzeuses et les séparent en blocs, cailloux et grains.

La désagrégation a pour effet de remplacer la masse quartzeuse par une masse d'agréats séparés entre eux par les lacunes des clivages qui se sont matérialisés, et unis entre eux par des éléments étrangers ou de néoformation, qui jouent un rôle de ciment fragile et constituent un filet enserrant ensemble des grains de quartz désagréés.

A l'analyse triacide, ce filet est rapidement détruit par la mise des éléments ferrugineux et alumineux sous forme de sels. La masse quartzeuse éclate et chaque grain de quartz est attaqué par le réactif analytique.

6.3. Les produits amorphes (fig. 14)

Les analyses entreprises ont établi qu'un quartz sain ne libère aucun élément amorphe, alors qu'un quartz altéré libère une certaine proportion de fer, d'alumine, et de silice sous forme amorphe. Il est donc intéressant de comparer les proportions de ces éléments trouvés dans le quartz avec celles du profil d'où sont tirés les quartz (SEGALIN, 1968). Les résultats obtenus pour les substances amorphes sur le profil sont les suivants :

Silice = 0 %
 Alumine = 0,4 %
 Fer = 1 %

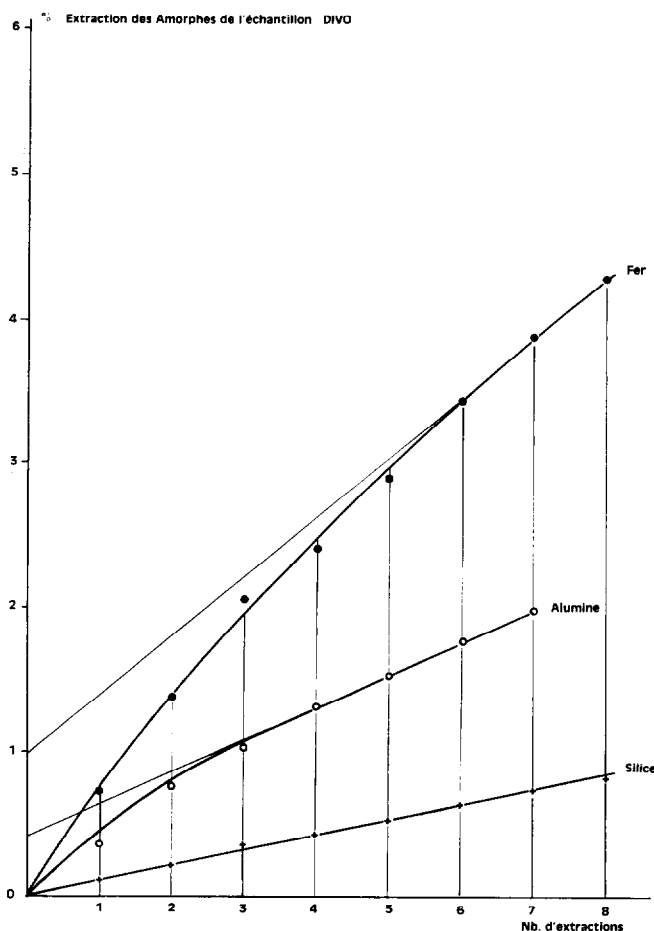


FIG. 14. — Extraction des produits amorphes de l'échantillon d'où est tiré le quartz altéré (Divo).

1) Pour l'alumine et le fer, les résultats sont comparables entre eux. Cependant il y a une plus grande proportion de fer par rapport à l'alumine dans les produits amorphes tirés du quartz altéré.

2) La proportion de silice amorphe extraite est nulle dans le profil étudié. Par contre elle est considérable pour la silice extraite du quartz.

3) On remarque, en ce qui concerne l'étude sur le quartz, qu'il existe une granulométrie supérieure limite pour laquelle l'extraction devient nulle.

Le broyage du quartz et le classement des poudres en une série granulométrique a pour effet de développer les surfaces, c'est-à-dire de faire sortir de l'intérieur d'un volume une infinité de plans sur lesquels peuvent

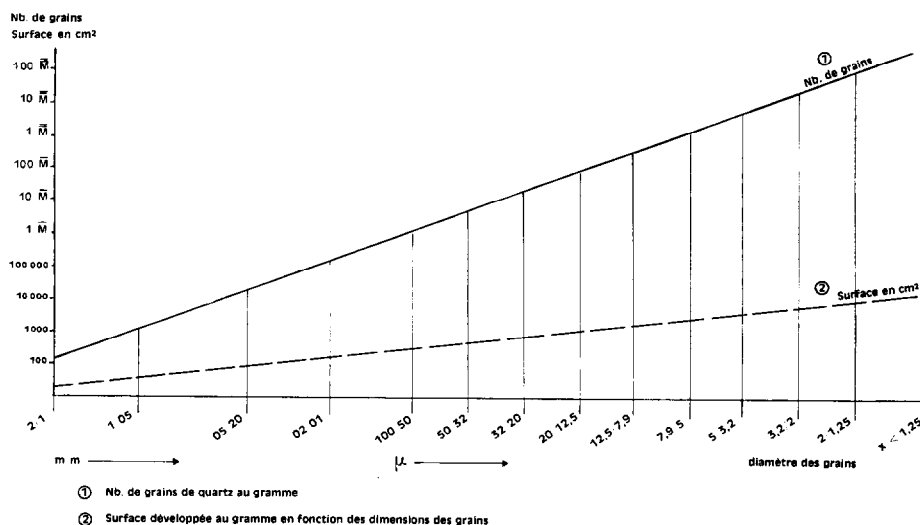


FIG. 15. — Diagramme représentant le nombre de grains de quartz et les surfaces développées pour un gramme de quartz en fonction des classes granulométriques.

se greffer des phénomènes physico-chimiques. Il en découle que si une attaque douce sur le volume primitif ne donne aucun résultat, par contre elle peut extraire des produits intéressants à partir d'un certain développement des surfaces, d'où la notion de granulométrie limite.

Il est évident que si un phénomène se trouve lié à une surface, (comme par exemple la présence de substances amorphes sur des canalicules et des plans de fractures ou de clivage qui se situent dans un quartz) et si cette surface est progressivement libérée, il arrive un moment où le phénomène est décelable à l'analyse. Le produit qui est en plus grande quantité et qui dépasse le premier la limite de précision de l'analyse se trouve détecté le premier. C'est ce qui arrive pour le fer dans le cas étudié : le fer étant en quantité beaucoup plus grande que l'alumine, il est décelé à partir des dimensions plus grandes. L'alumine étant en plus faible quantité n'apparaît que pour des dimensions plus petites (voir fig. 15 le développement de surfaces).

Ceci est bien mis en évidence par la relation entre quantité d'éléments et surface développée en fonction de la granulométrie : les résultats oscillent autour d'une valeur moyenne :

Alumine	: 100 ppm pour 2 000 cm ²
Fer	: 100 ppm pour 400 cm ²
Silice	: 100 ppm pour 300 cm ²

Les produits amorphes semblent donc se placer suivant certaines positions privilégiées : le long des plans d'altération du quartz qui correspondent aux faces de cisaillement, aux fractures et aux décollements des lames cristallines matérialisées au microscope par des canaux.

La partie très fine du quartz altéré, c'est-à-dire celle de dimension inférieure à 1,25 μ rassemble tout le reste des éléments fins, et présente à l'analyse des proportions fortes de fer et d'alumine amorphe et des proportions encore plus fortes de silice amorphe.

6.4. Mécanisme d'évolution des éléments (fig. 16)

Le quartz se trouve inclus dans un profil pédologique où sont libérés, par suite des phénomènes d'altération des minéraux, du fer et de l'alumine amorphe. Il est intéressant de rappeler l'absence dans le profil ferrallitique de silice amorphe.

On peut imaginer, par suite des courants de solution, une pression de ces éléments contre les cristaux de quartz, de telle sorte que, parallèlement à la désagrégation des quartz et à la matérialisation des plans de fracture, les produits ferrugineux et alumineux sous forme amorphe cheminent progressivement dans les quartz.

De son côté, le quartz semble évoluer d'une part par sa désagrégation, d'autre part, par la formation

de silice amorphe ou de gels de silice le long des plans de fracture et de dissociation. On trouve donc en présence dans le quartz trois éléments intéressants : fer, alumine, silice. Ces éléments peuvent réagir entre eux, surtout en ce qui concerne la silice et l'alumine.

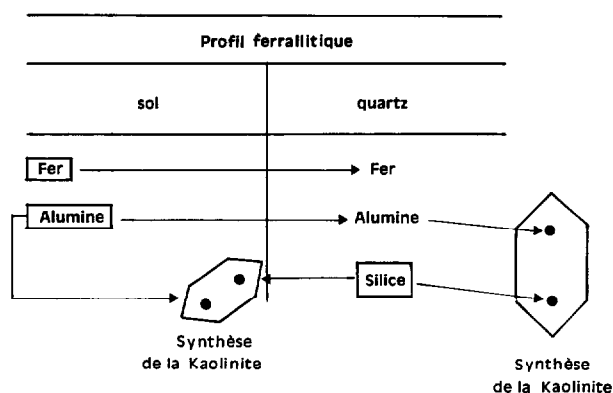


FIG. 16. — Mouvement du fer, de l'alumine, et de la silice dans le profil ferrallitique et dans le quartz.

Diverses expériences et analyses (FIELDER, 1955) (DE KIMPE et GASTUCHE, 1960) ont été faites pour obtenir par synthèse des silicates cristallisés à partir de gels ou d'éléments amorphes appelés allophanes. On peut alors émettre l'hypothèse de la synthèse de la kaolinite au sein de cristaux de quartz en voie de désagrégation et d'altération. En fait, les analyses physiques ont montré la présence d'une petite quantité de kaolinite à l'intérieur du quartz ferruginisé. Cette quantité a été mise en évidence, après broyage, dans la phase inférieure à $2\ \mu$, alors que rien n'a été décelé dans la même phase pour du quartz pur.

Cependant, on peut objecter que l'argile a pu pénétrer de l'extérieur dans le cristal du quartz. Mais dans ce cas, des quantités beaucoup plus importantes pourraient être trouvées.

Inversement, vu les grandes quantités de silice amorphe dans le quartz, on peut supposer qu'une certaine quantité migre à l'extérieur. Or dans le sol d'où sont tirés les quartz, il n'en est pas trouvé. La silice libérée pourrait alors être immédiatement immobilisée dans la synthèse d'argile kaolinique au contact de l'alumine libre du sol.

Dans ces hypothèses basées sur la présence d'une forte quantité de silice amorphe dans le quartz tiré d'un profil ferrallitique, l'accent est mis sur le fait

que le quartz, par suite de sa grande fréquence dans les sols pourrait être un des principaux fournisseurs de silice utilisée dans les synthèses d'éléments de néoformation.

Il peut alors exister deux sites de synthèse de la kaolinite : l'un dans le quartz, avec l'alumine provenant du sol, l'autre dans le sol avec la silice provenant du quartz. On peut donc exprimer cette hypothèse par le schéma suivant.

— Dans le sol existent du fer et de l'alumine sous forme amorphe, ils peuvent migrer dans le quartz.

— Dans le quartz existe de la silice amorphe ; celle-ci pourrait migrer dans le sol.

Ainsi, dans le quartz altéré, se rencontrent plusieurs sortes de produits cristallisés ou amorphes :

a) *Les produits exogènes.* Ce sont ceux existant sous forme de silicates cristallisés qui par évolution ont donné des produits amorphes et qui se trouvent individualisés dans le profil lui-même.

Ces produits ont pénétré dans le quartz à la faveur d'une pression extérieure et se sont localisés dans les plans minéralogiques des cristaux. Ce sont, soit des produits ferrugineux, qui sont en majorité amorphes, mais on a décelé quelques produits cristallisés comme la goethite, soit des produits alumineux, qui sont entièrement amorphes car ils forment la totalité de l'alumine extraite par la méthode d'analyse, et n'ont pas été décelés à l'analyse aux rayons X.

b) *Le produit endogène par excellence dans le quartz : la silice amorphe*

Elle n'existe pas dans le profil, alors qu'on la trouve dans l'analyse du grain de quartz en forte quantité (5 %) du moins en ce qui concerne les éléments fins.

La silice a été repérée par l'examen au microscope polarisant en lumière polarisée. Elle se différencie de la masse cristalline en occupant des plages complètement éteintes et de contours irréguliers.

La silice amorphe tapisse également les canaux et les cavernes d'altération qui se trouvent dans les quartz. Des débuts de recristallisation de la silice amorphe peuvent se manifester le long de la paroi des canaux.

La silice amorphe semble être décelée en surface des hexagones de quartz dans des micro-photos de quartz altéré propre, c'est-à-dire sans superposition d'éléments étrangers.

c) *On trouve enfin une petite quantité d'argile kaolinique et de goethite décelable aux investigations phy-*

siques de l'analyse aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle. La présence de kaolinite pose le problème de la formation de cette argile.

Deux hypothèses viennent à l'esprit :

— L'argile peut être importée de l'environnement du grain de quartz. Pour cela il faut une pression extérieure des cristaux et micelles et la possibilité du cheminement de cristaux de kaolin dans l'espace interfacial de l'assemblage des micrograins de quartz et le long des faces de clivage. Si ce cheminement est concevable pour des éléments amorphes donc de dimension angströmique, il est certainement plus problématique pour des cristaux complexes de kaolinite atteignant la dimension du micron.

— Ou l'argile peut être synthétisée dans le milieu même du quartz, par suite de la présence d'éléments amorphes alumineux et de silice amorphe l'un près de l'autre.

CONCLUSION

Cette étude montre la précarité de l'information que peut apporter l'analyse triacide quand on veut pousser trop loin l'interprétation des résultats.

Par contre, elle montre l'importance du quartz dans l'altération des roches, son passage par un stade d'amorphisation en ce qui concerne la silice, et les possibilités de sa présence comme fournisseur de silice nécessaire à la synthèse de produits de néoformation.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHOIS (L. et C.), 1951. — Note sur la précision des tamisages mécaniques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 6^e sér., t. I, fasc. 1-2-3, pp. 87-92.
- BERTHOIS (L. et C.), 1955. — Relation entre la granulométrie et le poids des grains de quartz. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 6^e sér., t. V, fasc. 4-6, pp. 291-294.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.), 1963. — Minéralogie des argiles, Masson, Paris 353 p.
- CLAISSE (G.), 1968. — Etude expérimentale de l'analyse aux 3 acides. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2, pp. 129-149.
- DE KIMPE (C.), GASTUCHE (M.C.), 1960. — Synthesis of clay minerals at ordinary temperature and pressure. *Int. Congr. Soil Sci.* 7, 1960. Maduison, 4, pp. 512-522.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1970. — Précis de Pédologie 3 ed. Masson, Paris, VIII, 482 p.
- FIELDS (M.), 1955. — Clay mineralogy of New Zealand soils. II Allophane and related mineral colloids *N.Z.J., J. Sci. Techn.* B 37, pp. 336-350.
- GRIFFITHS (J.-C.), 1953. — Estimation of error in grain size analysis *J. Sediment. Petrol.*, vol. 23, n° 2, pp. 75-85.
- GULNICK (M.), 1943. — Sur la précision des analyses granulométriques par tamisage. *Bull. Soc. Belge Géol. Paléontol.* t. 2, fasc. 2, pp. 206-213.
- Mc KEAGUE (J.A.), CLINE (M.G.), 1963. — Silica in soils, *Adv. in Agron.*, vol. 15, pp. 339-396.
- MILLOT (G.), RADIER (H.), MULLER-FEUGA (R.), DEFOSSEZ (M.), WEY (R.), 1959. — Sur la géochimie de la silice et des silicifications sahariennes. *Bull. Serv. Carte Géol. d'Als.-Lorr.*, t. 12, fasc. 2, pp. 3-15.
- MILLOT (G.), 1964. — Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- ORSTOM - S.S.C. — Chimie des sols (laboratoire). Analyse triacide protocole de la détermination des « éléments totaux ». ORSTOM, Paris, 22 p.
- SEGALEN (P.), 1968. — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-125.
- SEGALEN (P.), 1965. — Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide, 1^{re} partie : les produits alumineux. *Cah. ORSTOM Pédol.*, vol. III, n° 2, pp. 149-176.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 23 juin 1972.

Compendium :

1. Introduction
2. Préparation des échantillons de quartz
 - 2.1. Méthodes utilisées
 - 2.2. Choix des classes granulométriques et causes d'erreur
 - 2.3. Variation des dimensions à l'intérieur d'une classe
3. Etude de la solubilisation du quartz à l'attaque triacide
 - 3.1. Solubilisation d'un quartz pur
 - 3.2. Solubilisation d'un quartz tiré d'un profil de sol ferrallitique
4. Etude des oxydes de fer et d'alumine extraits du quartz ferrugineux
5. Etude du quartz et des constituants étrangers associés au quartz
 - 5.1. Examen des surfaces par microphotographies
 - 5.2. Examen de plaques minces au microscope polarisant
 - 5.3. Etudes des poudres de quartz à l'analyse thermique différentielle et aux Rayons X
 - 5.4. Etude des produits minéraux amorphes
 - 5.4.1. Sur quartz pur
 - 5.4.2. Sur quartz altéré
6. Discussion des résultats et conclusion
 - 6.1. Analyse aux trois acides des quartz purs et des quartz ferruginisés
 - 6.2. Altération du quartz
 - 6.3. Les produits amorphes
 - 6.4. Mécanisme d'évolution des éléments
7. Bibliographie
8. Résultats analytiques

RÉSULTATS ANALYTIQUES

TABLEAU 1

Solubilisation du quartz à l'analyse triacide

Classes granulométriques	Silice extraite de quartz pur (‰)	Silice extraite de quartz ferrugineux (‰)	Silice quartz fer. Silice quartz pur (1)
2/1 mm	1	7,1	× 7
1/0,5 mm	2,4	6	× 2,5
0,5/0,2 mm	2,2	8,4	× 3,8
0,2/0,1 mm	4,4	7,9	× 1,9
100/50 µ	6,8	10,4	× 1,5
50/32 µ	8,4	12,4	× 1,5
32/20 µ	11,6	16,1	× 1,4
20/12,5 µ	14,8	16,2	× 1,1
12,5/7,9 µ	15,8	19,6	× 1,2
7,9/5 µ	16,2	24	× 1,5
5/3,2 µ	20,2	31,6	× 1,5
3,2/2 µ	23,4	57	× 2,5
2/1,25 µ	26	80,6	× 3,1
1,25		121,1	

(1) Rapport d'augmentation de la solubilisation.

La perte de poids est donnée en milligrammes pour 1 g après attaque aux trois acides et lavage à la soude à 2 % et à la température de 80 °C.

TABLEAU 2

Fer et alumine sous forme d'oxyde tirés du quartz ferrugineux à l'attaque triacide en fonction de la granulométrie du quartz

Classes granulométriques	Oxydes totaux (‰)	Fer (‰)	Alumine (‰)	Fer oxydes tot.
2/1 mm	1,5	1	0,5	0,66
1/0,5 mm	1,9	1,1	0,8	0,58
0,5/0,2 mm	2,1	1,2	0,9	0,57
0,2/0,1 mm	2,5	1,3	1,2	0,52
100/50 µ	2,9	1,9	1	0,65
50/32 µ	3,6	1,9	1,7	0,53
32/20 µ	3,9	2,4	1,5	0,62
20/12,5 µ	3,8	2,4	1,4	0,63
12,5/7,9 µ	4,1	2,6	2,5	0,64
7,9/5 µ	5,7	3,7	2	0,65
5/3,2 µ	7	4,8	2,1	0,70
3,2/2 µ	9,1	6,8	2,3	0,74
2/1,25 µ	16,2	11,6	4,6	0,72
< 1,25 µ	44,8	31,5	13,3	0,72

La perte de poids est donnée en milligrammes pour 1 g après attaque aux trois acides et lavage à la soude à 2 % et à la température de 80 °C.

TABLEAU 3

Produits amorphes extraits du quartz tiré d'un profil ferrallitique

Produits amorphes en fonction des dimensions des quartz après sept extractions (×) en extrapolant la courbe.

	Silice (%)	Alumine (%)	Oxyde de fer (%)
<1,25 μ	4,4 (5)	0,43	1,2 (2)
1,25/2 μ	0,45 (0,6)	0,07	0,32 (0,5)
2/3,2 μ	0,25 (0,45)	0,05	0,22 (0,44)
3,2/5 μ	0,16	0,02	0,18 (0,32)
5/7,9 μ	0,05	0	0,07 (0,20)
7,9/12,5 μ	0	0	0,03
12,5/20 μ	0	0	0,02
20/32 μ	0	0	0,01
Sur l'échantillon de sol Divo ...	0	0,4	1,3

Les produits amorphes sont décelables sur les fractions fines du quartz.

L'échantillon de quartz fournit une forte quantité de silice amorphe, alors qu'on n'en trouve pas dans l'échantillon de sol correspondant.

TABLEAU 4

Rapport de saturation de surface par les amorphes: surface développée en cm² pour 100 ppm extraits

	Silice	Alumine	Fer
<1,25 μ	100/50	100/600	100/190
1,25/2 μ	100/320	100/2 000	100/450
2/3,2 μ	100/310	100/1 500	100/350
3,2/5 μ	100/300	100/2 700	100/305
5/7,9 μ	100/700	—	100/500
7,9/12,5 μ	—	—	100/365
12,5/20 μ			100/475
20/32 μ			100/360
32/50 μ			100/500
Constante	100/300	100/2 000	100/400

Ces rapports sont calculés en fonction des surfaces théoriques développées à partir d'un cristal cubique moyen.

Ces surfaces sont données par le tableau 5.

TABLEAU 5

Tableau du nombre de grains de quartz et de la surface développée par gramme de quartz pour les différentes classes granulométriques

Série granulométrique	Dimension de cube moyen	Nombre de grains de quartz	Surface développée par gramme
2/1 mm	1,5 mm	112	15,42 cm²
1/0,5 mm	0,75 mm	902	30,43 cm²
0,5/0,2 mm	0,35 mm	8 837	64,95 cm²
0,2/0,1 mm	0,15 mm	112 × 10³	151 cm²
100/50 μ	75 μ	902 × 10³	304 cm²
50/32 μ	41 μ	5 500 × 10³	554 cm²
32/20 μ	26 μ	16 703 × 10³	777 cm²
20/12,5 μ	16 μ	92 683 × 10³	1 423 cm²
12,5/7,9 μ	10 μ	380 000 × 10³	2 280 cm²
7,9/5 μ	6,5 μ	1 382 × 10⁶	3 507 cm²
5/3,2 μ	41 μ	5 500 × 10⁶	5 547 cm²
3,2/2 μ	2,6 μ	16 703 × 10⁶	7 776 cm²
2/1,25 μ	1,6 μ	92 683 × 10⁶	1,42 m²
1,25/0,79 μ	1 μ	380 000 × 10⁶ = 380 milliards de grains	2,28 m²