

## ENDOSCOPIE ET EXOSCOPIE DE GRAINS DE QUARTZ DES FORMATIONS DU PLIOCÈNE ET DU QUATERNAIRE DE LA PAZ (BOLIVIE)

R. GLOCCIATTI\*, L. LERIBAUT\*\*, L. A. RODRIGO\*\*\*

\* Laboratoire de Géochimie-Université Paris XI 91405, Orsay, France

\*\* Laboratoire C.F.P., 114 Cours Galliani 33400 Talence, France.

\*\*\* Inst. de Geodinamica y Limnologia-Universidad Mayor de San Andrés,  
Casilla 96, La Paz, Bolivia

### RÉSUMÉ

*Le travail exposé ici avait pour but de différencier des unités lithologiques dans la région de La Paz (formations La Paz, Chijini, Calvario) en Bolivie, de mieux situer la discordance entre la Formation La Paz et la Formation Calvario, et de définir les paléoenvironnements de ces formations.*

*Pour cela, nous avons utilisé deux méthodes complémentaires: l'endoscopie (étude des inclusions fluides et solides des grains) et l'exoscopie (étude de la surface des grains au microscope électronique à balayage) des quartz.*

*En fonction de la nature des inclusions, l'endoscopie a permis de distinguer dans les sédiments trois lots de grains respectivement d'origines granitique, filonienne et volcanique; les quartz volcaniques marquent le début de la Formation Calvario et proviennent en majeure partie de la Cinerite de Chijini.*

*L'exoscopie a permis de différencier l'histoire sédimentaire des quartz filoniens et granitiques (altération, transport continental aquatique, puis parfois reprise glaciaire) de celle des quartz volcaniques plus récents et moins évolués. L'histoire géologique, particulière à des quartz très arrondis remaniés du Paléozoïque, a également été mise en évidence par cette méthode d'analyse.*

### RESUMEN

*El presente trabajo tiene por objeto diferenciar las unidades litológicas de la región de La Paz-Bolivia (formaciones La Paz, Chijini y Calvario), ubicar mejor la discordancia entre la Formación La Paz y la Formación Calvario y definir los paleoambientes de estas formaciones.*

*Para ello, hemos utilizados dos métodos complementarios: la endoscopia (estudio de las inclusiones fluidas y sólidas de los granos) y la exoscopia (estudio de la superficie de los granos al microscopio electrónico de barrido) de los cuarzos.*

*En función de la naturaleza de las inclusiones, la endoscopia a permitido distinguir en los sedimentos tres lotes de granos de orígenes granítico, filoniano y volcánico respectivamente. Los cuarzos volcánicos marcan el comienzo de la Formación Calvario y provienen en su mayor parte de la Cinerita Chijini.*

*La exoscopia ha permitido diferenciar la historia sedimentaria de los cuarzos filonianos y graníticos (alteración, transporte continental acuático y en ciertos casos retrabajo glacial) de aquellos cuarzos volcánicos más recientes y menos evolucionados. La historia geológica particular de los cuarzos muy redondeados, retrabajados del Paleozoico ha sido igualmente puesta en evidencia por este método de análisis.*

## ENDOSCOPY AND EXOSCOPY OF QUARTZ GRAINS IN PLIOCENE AND QUATERNARY FORMATIONS NEAR LA PAZ (BOLIVIA)

## SUMMARY

The purpose of the present work was to differentiate the lithological units in La Paz area (La Paz, Chijini, Calvario formations) in Bolivia, to precise the location of the unconformity between La Paz and Calvario formations, and to determine the palaeoenvironments of these formations.

To that purpose, we have used two complementary procedures: endoscopy (study of fluid and solid inclusions in grains) and exoscopy (study of grain surfaces with scanning electron microscope) of quartz.

According to the nature of inclusions, the endoscopic study revealed among sediments three sets of grains which are respectively of granitic, veiny and volcanic origin; the volcanic quartz underline the beginning of Calvario formation and are mainly derived from Chijini cinerite.

The exoscopic study allowed for differentiating the sedimentary lives of veiny and granitic quartz (weathering, continental transportation by waters, then sometimes renewal of glaciation) from those of more recent and less transformed volcanic quartz. Through that investigation procedure, it has also been possible to set forth the particular geological story of paleozoic reworked very rounded quartz.

## ЭНДО- И ЭКСОСКОПИЯ КВАРЦЕВЫХ ЗЁРЕН ПЛИОЦЕНОВЫХ И ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЛА ПАС (БОЛИВИЯ)

## РЕЗЮМЕ

Изложенная здесь работа имела целью дифференцировать литологические единицы в районе Ла Пас (образования Ла Пас, Чихини, Кальварико) в Боливии, уточнить место несогласия между образованиями Ла Пас и Кальварико, и определить палеосреды этих образований.

Для этого были использованы два дополнительных метода: эндоскопия (исследование жидких и твердых включений зёрен) и экзоскопия (исследование поверхности зёрен при помощи сканирующего электронного микроскопа) кварцев.

Соответственно с природой включений, эндоскопия позволила различить, в отложениях, три набора зёрен — гранитного, жильного и вулканического происхождения; вулканические кварцы относятся к началу образования Кальварико и происходят большей частью из чихинийского цинерита.

Экзоскопия позволила отличить историю отложения жильных и гранитных кварцев (выветривание, водный континентальный перенос, и затем, иногда, ледниковое возобновление) от таковой же вулканических, более рецентных и менее развившихся кварцев. Особая геологическая история весьма окатанных, преобразованных в Палеозое, кварцев, была также выявлена при помощи этого аналитического метода.

## PLAN

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| I. INTRODUCTION                                    | IV. EXOSCOPIE                      |
| II. STRATIGRAPHIE                                  | 1. Formation La Paz                |
| III. ENDOSCOPIE                                    | A. Quartz granitiques et filoniens |
| 1. Formation La Paz                                | B. Quartz remaniés                 |
| A. Les grains d'origine granitique                 | 2. Formation Calvario inférieure   |
| B. Les grains d'origine filonienne                 | A. Quartz granitiques et filoniens |
| C. Les grains remaniés                             | B. Quartz remaniés                 |
| 2. Formation Calvario                              | C. Quartz volcaniques              |
| 3. Étude Endoscopique                              | 3. Formation Calvario supérieure   |
| A. Quartz rhyolitiques ou microgranitiques anciens | V. CONCLUSION                      |
| B. Les quartz rhyolitiques récents                 |                                    |

INTRODUCTION

La ville de La Paz se situe au pied de la Cordillère Royale des Andes orientales de Bolivie, entre 4.000 m d'altitude dans la partie haute de la ville, et 3.500 m dans la partie basse. Cette vallée, qui s'est individualisée par érosion régressive du Rio La Paz, recoupe diverses formations plio-quaternaires de plus de 1.000 m d'épaisseur. Ces formations présentent des problèmes stratigraphiques et sédimentologiques complexes qui ne peuvent pas être résolus entièrement par les méthodes géologiques classiques. On tentera ici de résoudre certains de ces problèmes en utilisant l'analyse endo et exoscopiques des grains de quartz des dépôts détritiques et pyroclastiques.

STRATIGRAPHIE

Les échantillons étudiés furent prélevés dans les régions de Achachicala (Qda Capellani) et Calvario (Qda Viscachani). Ils correspondent à la Formation La Paz, à la cinérite Chijini et à la Formation Calvario (fig. 1 et 2).

La Formation La Paz, définie d'abord par GREGORY en 1913, a été redéfinie par TROLL *et al.* (1935) et DOBROVOLNY (1955, 1962). Elle est formée d'une succession de sables argileux, à niveaux conglomératiques dont certains se présentent sous

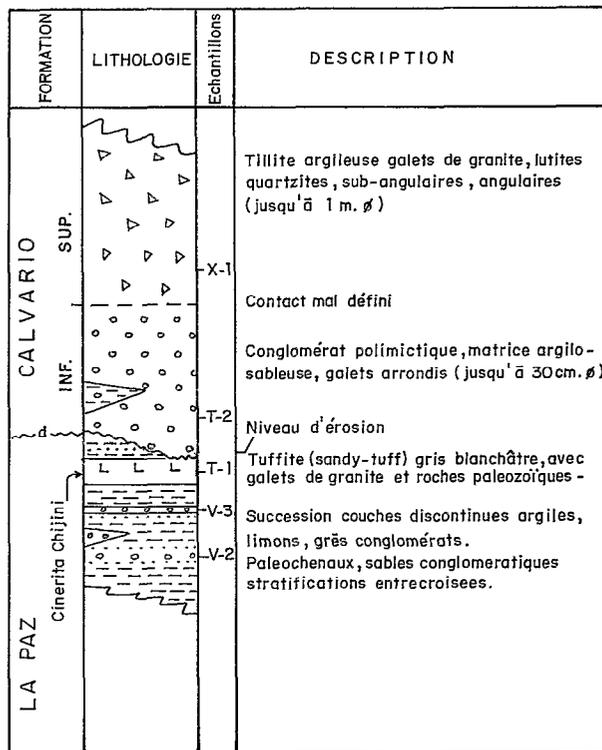


Fig. 2. — Colonne stratigraphique généralisée.

la forme de chenaux étroits et peu épais ; ces conglomérats contiennent des galets de granite, et de quartzites. Elle fut attribuée au Tertiaire supérieur (Pliocène) en raison de la présence de restes de Vertébrés (VILLARROEL, 1977).

DOBROVOLNY (1955) a individualisé une cinérite dite Chijini, qu'il attribue au Pléistocène. Cette cinérite reposerait, d'après cet auteur, en discordance sur la Formation La Paz. Mais SERVANT (1977) considère que ce niveau pyroclastique est interstratifié dans la Formation La Paz. En effet, dans la coupe de Viscachani, nous avons mis en évidence plusieurs niveaux peu épais de cinérite (le niveau supérieur étant le plus épais) ; tous ces niveaux sont contenus dans la formation.

La cinérite Chijini est constituée par un tuff ou cendre volcanique de couleur blanche, ivoire à gris clair. Elle contient des fragments de granite, lutites et quartzites de dimensions variées. Il s'agit d'un sédiment hybride « pyroclastique-clastique » (tuffite, sandy-gravel tuff). Ce sont ces caractéristiques qui rendent les datations radiométriques difficiles comme on a pu s'en rendre compte d'après les essais qui ont été effectués par EVERDEN *et al.* (1977) et BONHOMME (comm. verbale).

Au-dessus de cette cinérite, se trouve l'Unité 4 de DOBROVOLNY (1955). C'est une formation conglom-

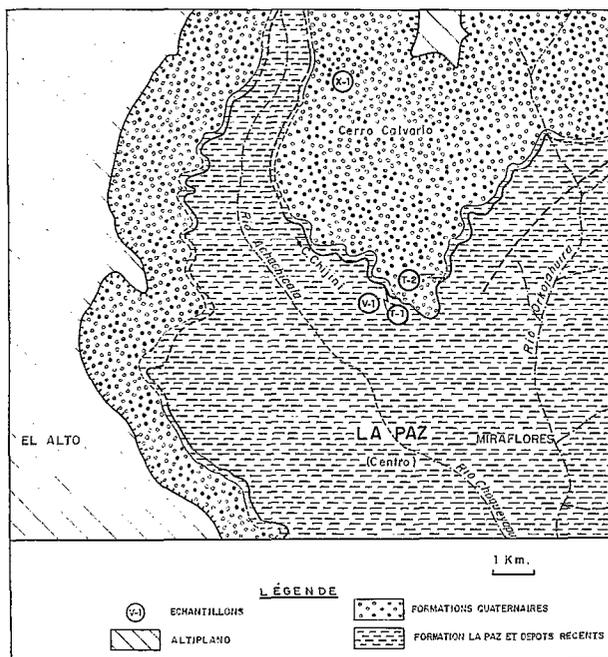


Fig. 1. — Carte de localisation (d'après BLES, 1976).

méridionale contenant des fragments de granite et de roches paléozoïques dans une matière argilo-sableuse. Dans ce niveau, les éléments d'origine glaciaire ne sont présents ni dans les galets roulés, ni dans les grains de quartz étudiés au microscope électronique à balayage. Les dépôts, qui présentent des caractères fluviaux, reposent en discordance d'érosion sur la cinérite Chijini; cependant la surface de discordance n'est pas toujours visible sur le terrain. Mais dans les grains de quartz étudiés par endoscopie, on trouve sans aucun doute des quartz qui proviennent de la cinérite. Ces quartz n'ont pas subi un transport long car les grains présentent des marques de chocs uniquement sur les arêtes du cristal.

L'âge de ce conglomérat n'est pas défini relativement à l'échelle chrono-stratigraphique internationale. Les analyses géologiques régionales le situe conventionnellement dans le Pléistocène ancien.

En concordance sur ce niveau de graviers se développe la *tillite Calvario*, formée de blocs de granite (pouvant atteindre 1 m de diamètre) et de fragments de lutites et quartzites paléozoïques, dans une matrice argileuse. L'échantillon étudié correspondant à cette unité provient de la Qda de Capellani (fig. 1).

Ces dernières années, certains auteurs ont mis en doute le caractère glaciaire de ce dépôt qu'ils ont alors attribué à une coulée boueuse. Mais la présence de galets striés, de graviers avec des marques de frottement groupées suivant des directions préférentielles, milite en faveur d'un dépôt glaciaire.

## ENDOSCOPIE

### *Formation La Paz (Échantillon V.3)*

Le sédiment de la Formation La Paz est caractérisé par la présence de grains de quartz peu évolués d'origines granitique et filonienne et de grains remaniés d'origines variées mal déterminées (Pl. A).

#### *Les grains d'origine granitique*

Ils constituent plus de 80 % des éléments détritiques quartzeux. L'observation à la loupe binoculaire permet de voir que les grains sont anguleux et peu usés. L'étude endoscopique, c'est-à-dire l'observation des cristaux montés dans une liqueur d'indice ( $\mu = 1,54$ ) aux forts grandissements du microscope optique, permet de mettre en évidence plusieurs types d'inclusions solides et fluides.

#### *Les Inclusions Primaires*

*Les inclusions solides.* Elles sont représentées par les minéraux ayant cristallisé avant ou en même temps que le quartz dans le magma granitique.

Les plus fréquents sont des cristaux de feldspath tabulaires ou arrondis présentant parfois des mâcles caractéristiques, des cristaux colorés (verdâtres) et pléochroïques d'amphibole, des lamelles hexagonales ou arrondies de biotite rouge, des cristaux automorphes de zircon, des baguettes d'apatite et des aiguilles submicroscopiques de rutile (voir pl. B).

*Les Inclusions magmatiques.* Il s'agit d'inclusions vitreuses presque totalement ou totalement cristallisées, analogues à celles décrites par DEICHA (1955) et appelées par cet auteur « pores à dépôts solides » dans les quartz des granites Rapakivi. Les inclusions sont actuellement l'objet d'études très approfondies par les chercheurs de l'Institut de Géologie de Novosibirsk (Laboratoire du Professeur A. DOLGOV).

La mise en évidence de ces inclusions est très difficile en raison de leurs faibles dimensions ( $< 5 \mu\text{m}$ ) et par le fait qu'elles sont masquées par la masse, largement dominante, d'inclusions fluides secondaires. Les inclusions sont constituées par plusieurs cristaux (2 ou 3 généralement), par un pore de retrait déformé (DEICHA, 1955) et par un résidu magmatique (frange de verre) difficilement visible et pas toujours présent.

Elles peuvent très facilement être confondues avec certaines inclusions à dépôt salin fortement sursaturées (GLOCCIATTI et EL GHOZI, 1977).

*Les Inclusions fluides.* Les inclusions fluides sont épigénétiques, ce qui signifie qu'elles se sont mises en place dans le cristal après sa solidification. Leur disposition souligne des plans de fracture attribuables soit à des phénomènes liés à la contraction thermique, soit à des actions mécaniques liées à une ou plusieurs phases tectoniques. Le remplissage de ces cavités est généralement uniquement aqueux (inclusions monophasées) ou bien aqueux avec une phase vapeur individualisée sous forme de bulle (inclusions déphasées). Ces inclusions ont été piégées à des températures peu élevées, inférieures à 150 °C.

#### *Les grains d'origine filonienne*

Ils apparaissent d'une couleur blanche, laiteuse à l'observation à la loupe binoculaire. Très semblables aux cristaux de feldspaths des granites, ils s'en différencient essentiellement par la présence de cassures conchoïdales. L'aspect laiteux résulte de la diffraction des rayons lumineux sur les innombrables plans d'inclusions fluides très petites (5 à 10  $\mu\text{m}$ ) et très rapprochées les unes des autres. Si l'on admet que la distance moyenne séparant chaque inclusion est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  (estimation souvent inférieure à la réalité) cela nous donne 1 million d'inclusions par  $\text{mm}^3$ . Les phases cristal-

Planche A  
Echantillon V-3

Quartz granitique

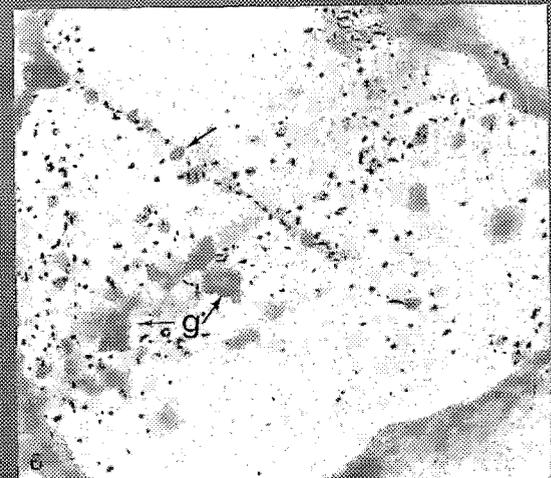
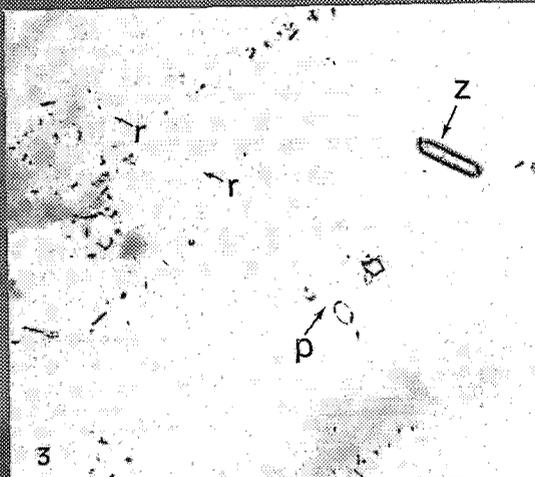
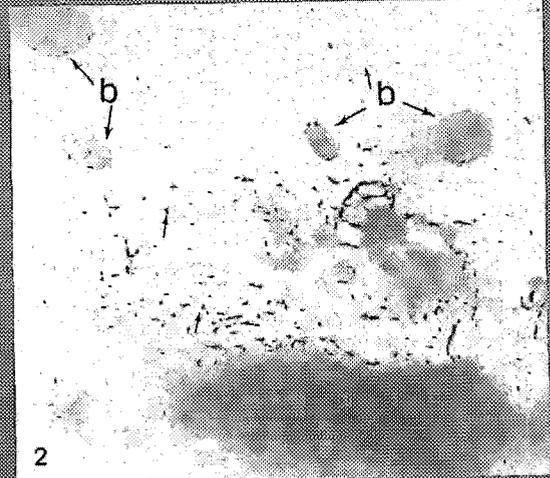
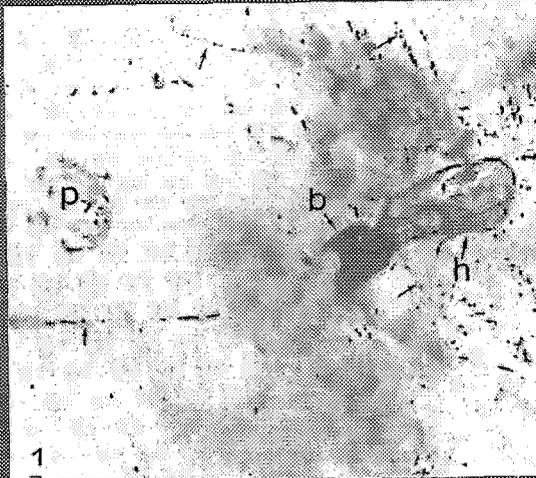
Quartz filoniens

50  $\mu$ m

Quartz remaniés

PLANCHE A : Types de grains présents dans l'échantillon V-3 de la Formation La Paz : granitiques, filoniennes, remaniés.

Planche B



lines et les inclusions magmatiques, caractéristiques des cristaux granitiques, sont absentes dans les grains d'origine filonienne.

#### *Les grains remaniés*

Les grains remaniés constituent moins de 1 % (en volume) des éléments détritiques quartzeux. Leur étude endoscopique ne peut fournir de renseignements utiles car les zones d'alimentation ne sont pas connues. Toutefois, nous avons observé parmi ces grains des cristaux d'origine granitique et des cristaux d'origine hydrothermale.

#### *Formation Calvario (Échantillon T. 2)*

On rencontre dans la Formation Calvario, en plus de toutes les catégories de grains que nous venons de décrire dans la Formation La Paz, des cristaux automorphes, rarement entiers, de quartz éruptif (quartz B) (pl. C).

Ces cristaux sont caractérisés par un éclat très vif, adamantin, lié d'une part à l'absence ou à la rareté des inclusions fluides, d'autre part à la présence sur la surface des cristaux de traces de fusion magmatique. Les cristaux sont des dihexaèdres négatifs, ils résultent de l'accroissement de deux pyramides par une base hexagonale commune. Parfois les pyramides sont séparées par un prisme, caractérisée par une hauteur très réduite. Certains cristaux montrent un développement inégal des faces. Les plans de fracture de ces cristaux montrent des cupules qui sont des lacunes de cristallisation à remplissage vitreux.

#### *Étude endoscopique*

Tous les cristaux d'origine magmatique et notamment le quartz, renferment des petites quantités de lave figée sous forme d'un verre silicaté ou bien cristallisée, en fonction de la vitesse de refroidissement de la lave (GLOCCIATI et MERVOYER, 1976).

La morphologie, la densité, la disposition, les dimensions et la nature du remplissage de ces cavités

sont caractéristiques pour un type de lave donnée (GLOCCIATI, 1975). Dans les sédiments du Quaternaire continental, nous avons pu distinguer en fonction des caractères de leurs inclusions, quatre types de cristaux de quartz éruptif provenant de quatre formations distinctes. Actuellement une seule de ces formations a été individualisée sur le terrain, il s'agit de la cinérite de Chijini.

#### *Quartz rhyolitiques ou microgranitiques anciens*

Ils contiennent des inclusions de dimensions importantes ( $> 70 \mu\text{m}$ ) dont le remplissage vitreux initial a été transformé en un mélange de calcédoine, oxydes de fer et minéraux argileux. Cette altération est liée à la fracturation des cristaux et à la pénétration de fluides (actuellement présents sous forme d'inclusions aqueuses) qui sont venus lessiver les inclusions vitreuses.

En effet, les plans d'inclusions vitreuses constituent des discontinuités dans la structure des cristaux donc des plans de moindre résistance favorables à toute fracturation.

Les inclusions de dimensions inférieures à  $70 \mu\text{m}$  ont conservé leur remplissage vitreux car leur petite taille les rend moins vulnérables aux actions mécaniques. Les inclusions sont diphasées ; en plus d'une phase vitreuse dominante, elles possèdent un vide de retrait (bulle) de dimension importante ( $1/6$  à  $1/10$  du volume de la cavité).

La dimension du vide de retrait traduit une évolution du remplissage de la cavité par cristallisation du minéral hôte aux dépens du liquide magmatique piégé (GLOCCIATI et WEISS, 1973). Ce type d'inclusion est caractéristique des laves à refroidissement très lent. Par rapport aux autres cristaux de quartz d'origine éruptive, les grains de ce type sont quantitativement négligeables ( $< 0,1 \%$ ).

#### *Les quartz rhyolitiques récents*

Ils se distinguent des précédents par leur aspect brillant en liaison avec l'absence totale d'inclusions

← PLANCHE B : 1 à 5. — Cristaux d'origine granitique dans la formation La Paz.

1. Inclusions cristallines de feldspaths (P), d'amphibole (h) et de biotite (b) recoupées par des plans d'inclusions fluides secondaires indiquées par les petites flèches. Échelle 1 cm = 50  $\mu\text{m}$ .
2. Paillettes de biotite (b) recoupées par un plan d'inclusions aqueuses monophasées indiquées par les petites flèches. Échelle : 1 cm = 25  $\mu\text{m}$ .
3. Sur le côté gauche de la photo on aperçoit des alignements d'inclusions aqueuses secondaires qui recoupent des plans d'aiguilles de rutile (2) submicroscopiques orientées NE-SW. Au centre du cliché de fines lamelles feldspathique (p) et en haut à droite un cristal de zircon (2). Échelle 1 cm = 25  $\mu\text{m}$ .
4. Alignements d'inclusions aqueuses monophasées (flèches). Sur la droite du cliché on aperçoit une inclusion aqueuse avec la bulle de vapeur (inclusion diaphasée d). Échelle 1 cm = 15  $\mu\text{m}$ .
5. Vue d'ensemble d'un cristal de quartz contenant des cristaux aciculaires d'apatite et de rutile. Échelle 1 cm = 100  $\mu\text{m}$ .
6. Cristal remanié caractérisé par un grand nombre d'alignements d'inclusions à remplissage uniquement gazeux (g) d'origine indéterminée. Échelle 1 cm = 25  $\mu\text{m}$ .

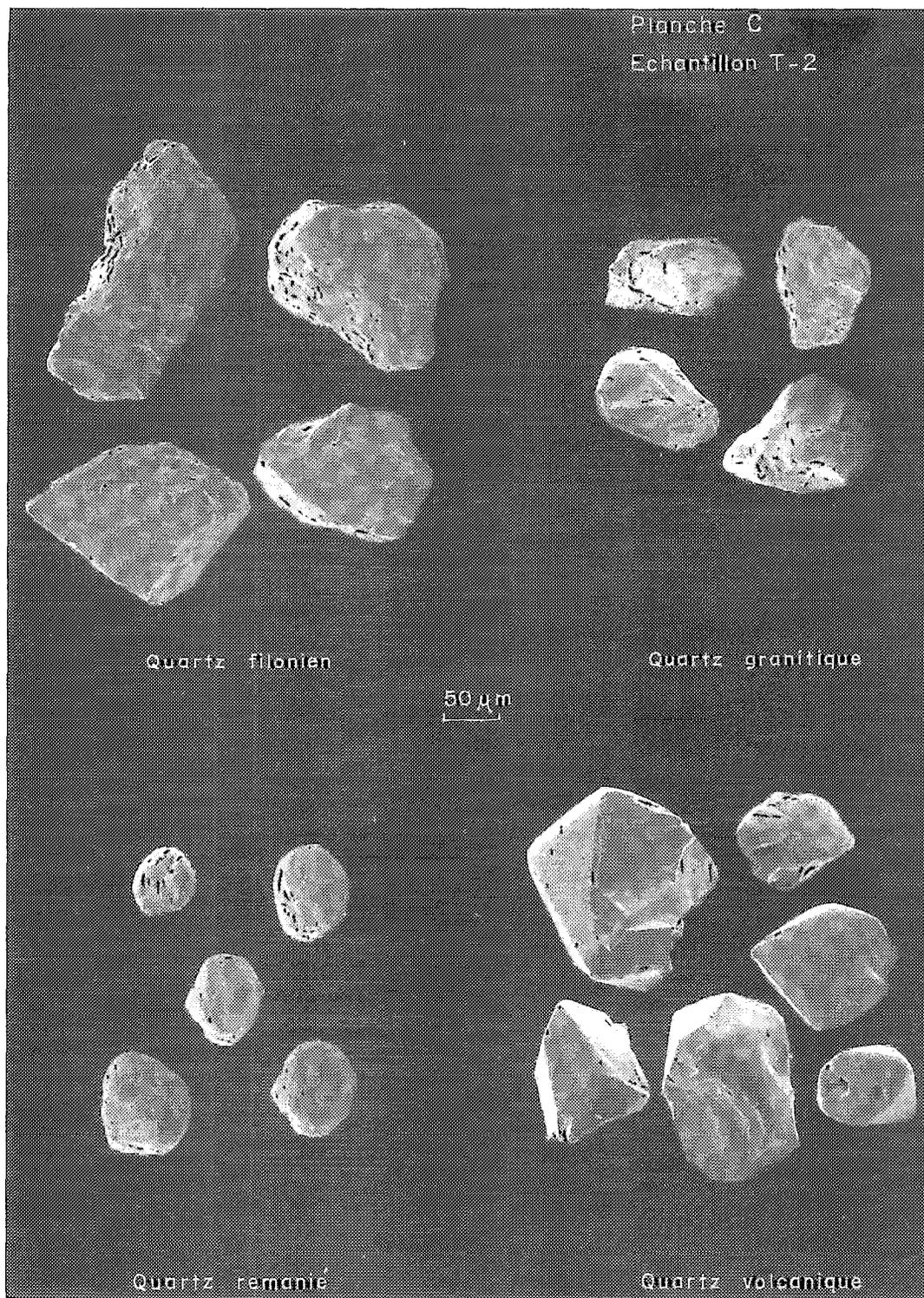


PLANCHE C : Différents types de grains de quartz dans l'échantillon T-2 de la partie inférieure de la Formation Calvario : filoniens, granitiques, remaniés et volcaniques.

fluides. Ils proviennent donc de matériaux n'ayant subi aucune contrainte tectonique et préservés de toute action hydro-thermale. Les caractères de leurs inclusions permettent de distinguer trois types de cristaux :

*Cristaux contenant des inclusions vitreuses monophasées* en forme de dihexaèdre négatif suivant l'habitus cristallin du minéral hôte (planche C-1). Leur dimension maximale peut atteindre et dépasser 150  $\mu$ m. Les plus grandes inclusions sont partiellement décrépitées ; en effet, on peut observer qu'à partir de la cavité, s'amorce une cassure conchoïdale (planche C-3).

Plusieurs bulles apparaissent en relation avec l'augmentation de volume liée à la perte d'étanchéité de la cavité. Ces bulles peuvent être considérées comme des vides de retrait ou bien comme le résultat d'une démixtion partielle de la phase volatile dissoute dans le remplissage magmatique de l'inclusion par suite de la diminution de pression.

Les inclusions monophasées sont caractéristiques des formations volcaniques qui subissent un refroidissement très brusque lors de leur émission comme certaines ponces, les cinérites et les pyroclastiques. Les cristaux décrits ont été retrouvés dans la cinérite de Chijini. Dans la roche mère ils n'ont subi aucun remaniement ainsi que le témoigne la très fragile gaine de verre bulleuse qui les recouvre.

*Cristaux contenant des inclusions vitreuses pluriphasées.* La morphologie générale des cavités est analogue à celle des inclusions décrite dans les cristaux de la cinérite de Chijini. Le remplissage vitreux est presque entièrement remplacé par des cristaux de quartz et de biotite verte. Les cristaux de quartz sont disposés en couronne contre les parois de la cavité et de manière quelconque dans la partie centrale.

Les cristaux de biotite se disposent contre les cristaux de quartz (CLOCCHIATTI, 1975). Ce type d'inclusion a été décrit dans des coulées de ponces à refroidissement lent (CLOCCHIATTI et MERVOYER, 1976).

La roche mère de ces cristaux n'a pas encore été individualisée sur le terrain, peut-être proviennent-ils des autres niveaux pyroclastiques de la Formation La Paz.

*Cristaux avec inclusions magmatiques presque totalement cristallisées* sous forme de très fins minéraux non déterminables au microscope optique. Les cristallites résultent d'un phénomène de dévitrification (opalisation) qui est aussi responsable de la démixtion des constituants volatils et de l'éclatement

partiel des cavités. Les inclusions pourraient être, du point de vue génétique, comparables aux inclusions de type 2 décrites précédemment donc provenir de la même roche mère.

## EXOSCOPIE

L'exoscopie des quartz consiste à étudier les grains au microscope électronique à balayage, afin de déterminer leur histoire sédimentaire grâce à l'identification des microcaractères d'origine variée (chimique, mécanique, biologique) qui ont progressivement modifié leur surface au cours de celle-ci (LE RIBAUT, 1977).

Les différents stocks de quartz constituant les échantillons V3, T2 et X1 ont donc été soumis à l'analyse exoscopique (\*) afin de chercher à déterminer les événements sédimentaires auxquels chacun d'eux a été soumis. Les résultats obtenus sont résumés sur la figure 3.

### Formation La Paz (Échantillon V3)

#### *Quartz granitiques et filoniens (planche E 1 à 4)*

Les quartz granitiques et filoniens ont connu la même histoire géologique ; celle-ci se marque par les épisodes successifs suivants (dans l'ordre chronologique) :

*Allération* au sein de la roche-mère, avec formation d'une pellicule siliceuse plus ou moins épaisse, présentant parfois une morphologie caractéristique en coulées orientées (planche E-1).

*Transport continental aquatique de haute énergie* : la pellicule siliceuse héritée de l'allération est recoupée par de grandes traces de choc fréquemment en forme de cupules (planche E-1) ; quand la pellicule est absente, ces traces de choc entaillent directement la surface du quartz (planche E-2).

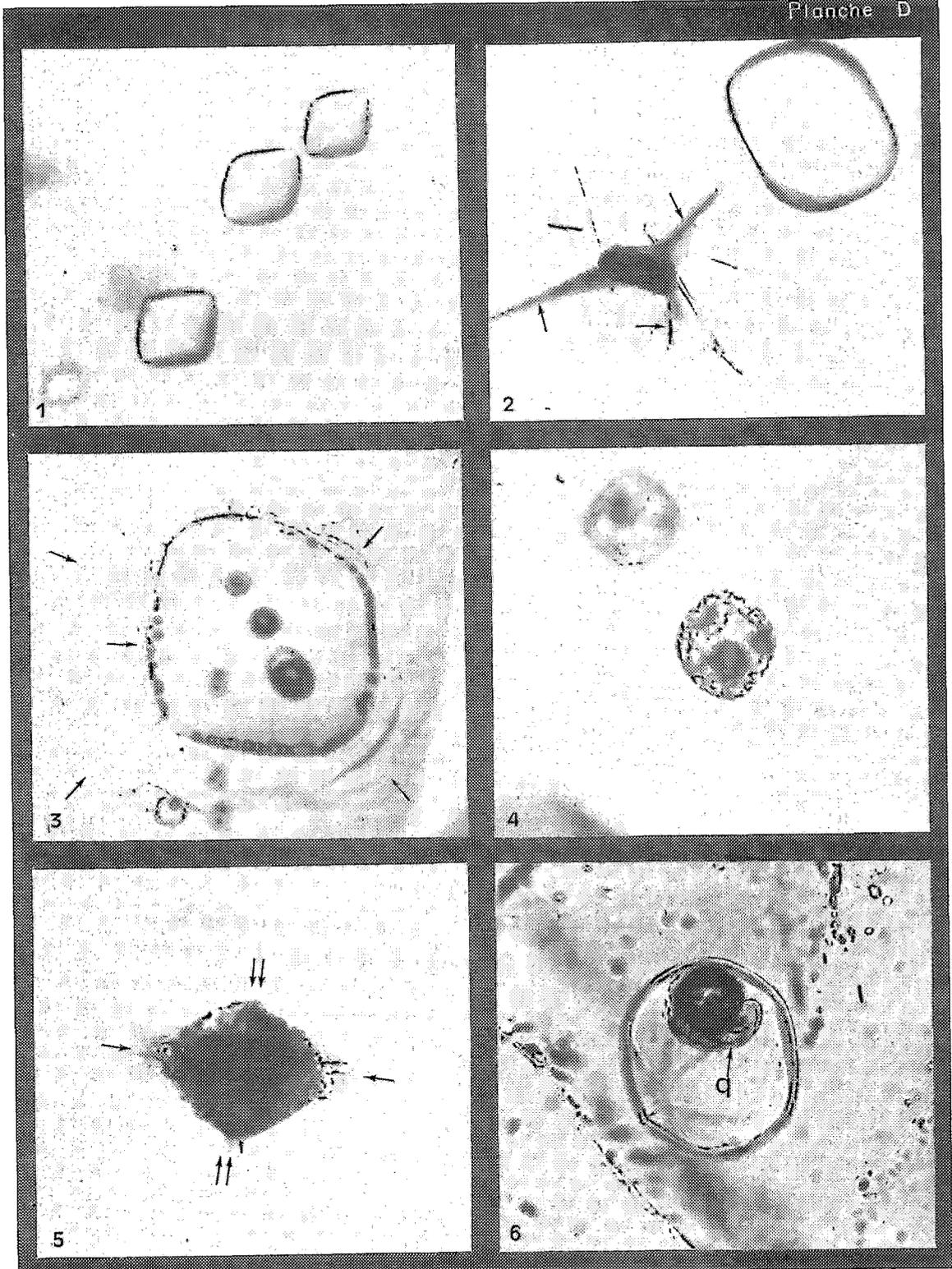
*Reprise continentale aquatique de basse énergie* : cette reprise, qui correspond au milieu de sédimentation finale de l'échantillon V3, se traduit par la précipitation de nombreux globules siliceux sur toute la surface des quartz, y compris sur le sommet des arêtes (planche E 1 à 4) ; en outre, toutes les traces de choc provoquées par le transport antérieur de haute énergie sont polies (planche E-3).

#### *Quartz remaniés (Planche E, 5 et 6)*

Ces quartz, généralement très arrondis, sont d'anciens grains sédimentaires fossilisés (origine

(\*) Travaux réalisés sur le microscope électronique à balayage CAMECA M.E.B. 07 du Laboratoire Central de la Compagnie Française des Pétroles à Talence (France).

Planche D



supposée : grès paléozoïques) puis libérés et repris avant de se déposer finalement en compagnie des quartz granitiques et filoniens décrits plus haut. Leur histoire est la suivante :

*Évolution marine côtière* : la surface des quartz est entaillée de nombreuses traces de choc éoliennes en croissant (planche E-5) dont certaines, polies (planche E-6) sont exploitées par des figures de dissolution sur les parties des grains les plus exposées

au brassage ; ces caractères sont généralement observés sur les quartz évoluant en milieu marin côtier, où les allées et venues entre la zone intertidale et les dunes littorales sont très fréquentes.

*Fossilisation et grésification* : la grésification des sables est indiquée par des restes de ciment siliceux qui se présentent sous forme de pointements cristallins masquant plus ou moins les croissants de choc d'origine éolienne (planche E-6).

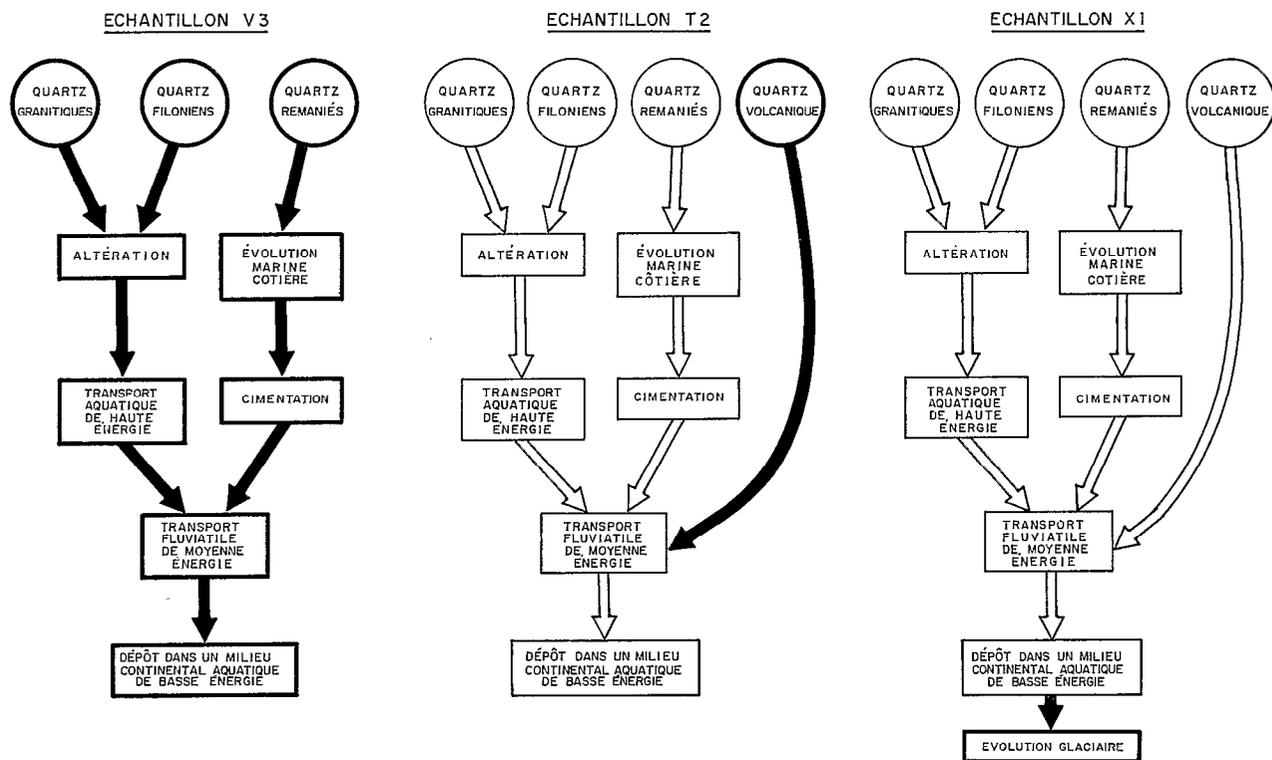
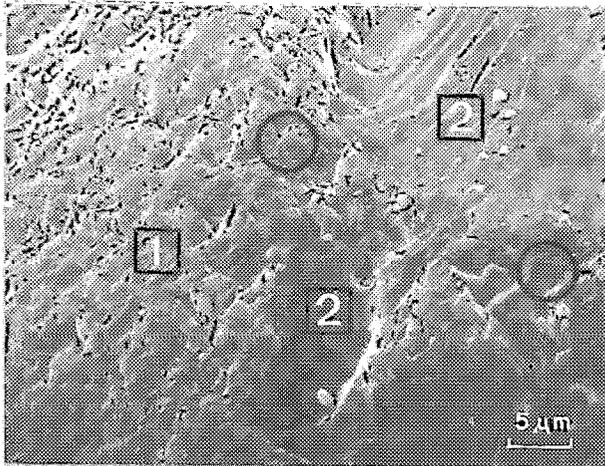


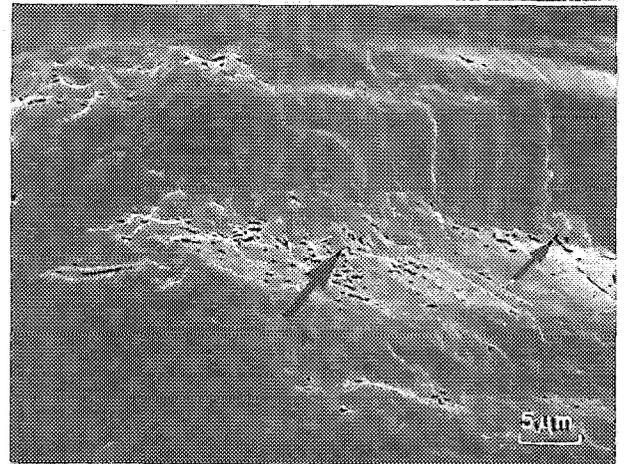
Fig. 3. — Évolution des différents types de quartz.

← PLANCHE D : Cristaux d'origine volcanique dans la Formation Calvario inférieure.

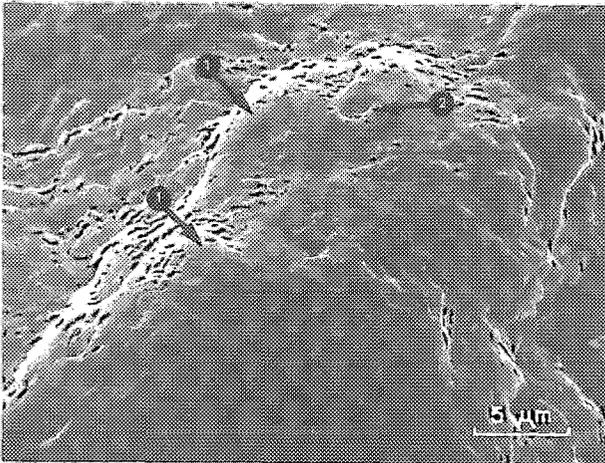
1. Inclusions vitreuses à remplissage monophasé. Leur morphologie rappelle le « dihexaèdre négatif ». On rencontre ce type d'inclusion (type 1) dans le sédiment de la Formation Calvario et dans la cinérite de Chijini. L'axe sénaire des cavités est orienté parallèlement à l'axe sénaire du minéral hôte. Échelle : 1 cm = 100  $\mu$ m.
2. En haut à droite inclusion vitreuse monophasée caractérisée par un développement inégal des faces (111) de la cavité. On remarque aussi plusieurs cristaux aciculaires d'apatite et un pyroxène noir qui provoquent une fracture (flèches) dans le minéral hôte. Échelle : 1 cm = 50  $\mu$ m.
3. Inclusion vitreuse partiellement décrépîtée. Un chapelet de bulles souligne le contour de la cavité initiale. Les flèches indiquent l'amorce d'une cassure conchoïdale qui n'a pas abouti à l'éclatement total du cristal. Cinérite de Chijini. Échelle : 1 cm = 10  $\mu$ m.
4. Inclusion cristallisée de type 2. On remarque la couronne de cristaux de quartz tapissant les parois de la cavité et deux vides de retrait de dimensions importantes. Cristaux de provenance non encore déterminée. Échelle : 1 cm = 25  $\mu$ m.
5. Inclusion de type 3 finement cristallisée (opalisation) ayant perdu ses éléments volatils. Remarque l'amorce de fentes axiales (flèches) et équatoriales (flèches doubles) dans lesquelles se sont accumulés les éléments volatils ( $H_2O - CO_2$ ) actuellement visibles sous forme d'inclusions gazeuses. Cristaux de provenance non encore déterminée. Échelle : 1 cm = 25  $\mu$ m.
6. Inclusion vitreuse avec vide de retrait encroûté par une cristallisation de quartz (q). Remarque la présence d'alignements d'inclusions fluides secondaires (flèches), absentes dans tous les cristaux précédents et marquant le caractère ancien de ce grain. Cristal de provenance non déterminée ; probablement filons microgranitiques ou rhyolites anciennes. Échelle : 1 cm = 10  $\mu$ m.



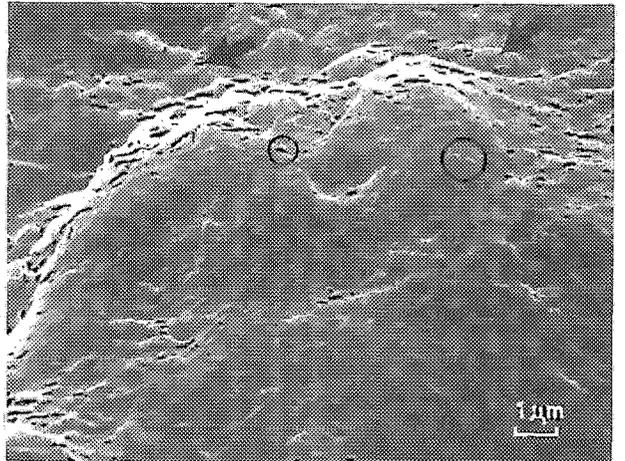
1



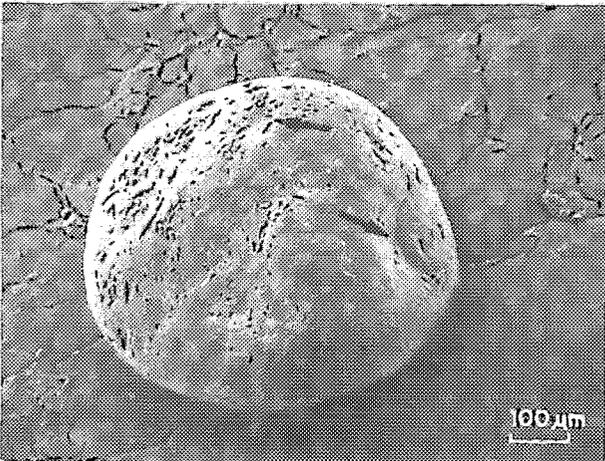
2



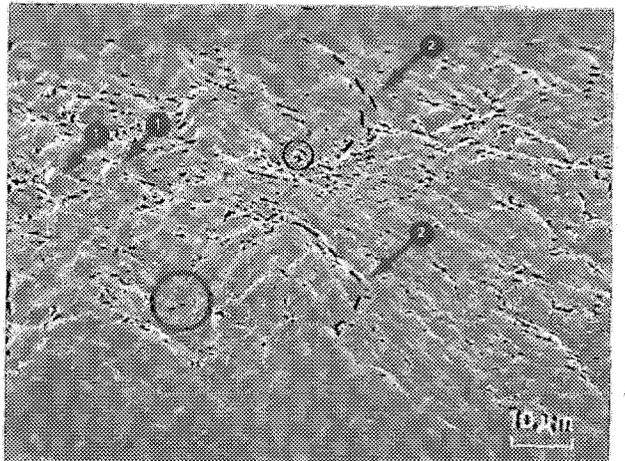
3



4



5



6

*Reprise continentale aquatique de basse énergie* : les grains libérés au cours du processus d'altération des grès ont été transportés puis se sont finalement sédimentés dans un milieu continental aquatique de basse énergie marqué par le polissage des pointements cristallins et les globules siliceux parsemant toute la surface des grains (planche E-6).

*Formation Calvario inférieure*

*Quartz granitiques et filoniens (planche F, 7 et 8)*

Ils présentent les mêmes caractères superficiels (et donc la même histoire sédimentaire) que leurs homologues de l'échantillon V3, exception faite des traces héritées d'un épisode fluviatile de moyenne énergie, qui apparaissent encore nettement ici et ont peut-être disparu sur les grains de V3 à cause d'une plus longue reprise finale dans un milieu aquatique de basse énergie. Les épisodes sédimentaires successifs sont les suivants :

*Altération*

*Transport continental aquatique de haute énergie*

*Évolution fluviatile de moyenne énergie* : apparition de nombreuses traces de choc à gradient de polissage (planche F-8).

Dépôt final dans un milieu continental aquatique de basse énergie.

*Quartz remaniés (planche F-9)*

Leur histoire est en tous points semblables à celle des quartz remaniés de l'échantillon V3 :

*Évolution marine côtière*

*Fossilisation et grésification*

*Reprise continentale aquatique de basse énergie.*

*Quartz volcaniques (planche F, 10 à 12)*

Ces quartz présentent un aspect beaucoup plus « frais » que ceux appartenant aux catégories précédemment décrites. Leur histoire est la suivante :

*Transport fluviatile* (planche F, 10 et 11) : présence de chocs à gradient de polissage localisés essentiellement sur les arêtes.

Dépôt final dans un milieu continental aquatique de basse énergie : précipitation de globules siliceux (planche F-12) sur toute la surface des grains, y compris sur le sommet des arêtes.

*Formation Calvario supérieure*

Quel que soit le type de quartz, cet échantillon se caractérise par l'apparition de traces d'origine glaciaire (en particulier des figures de frottement) qui se superposent à toutes celles décrites sur les grains des échantillons précédents (pl. G, 16 et 17).

CONCLUSION

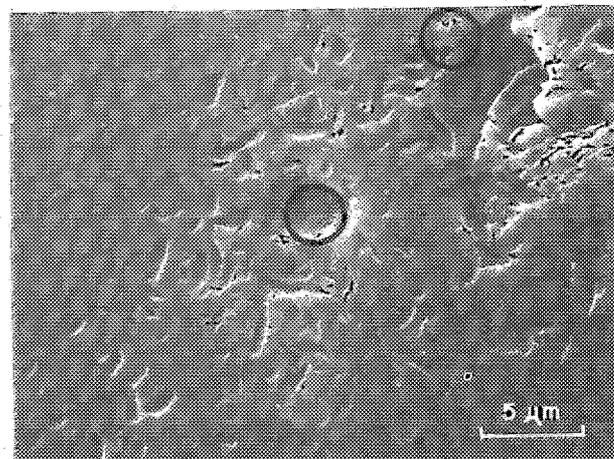
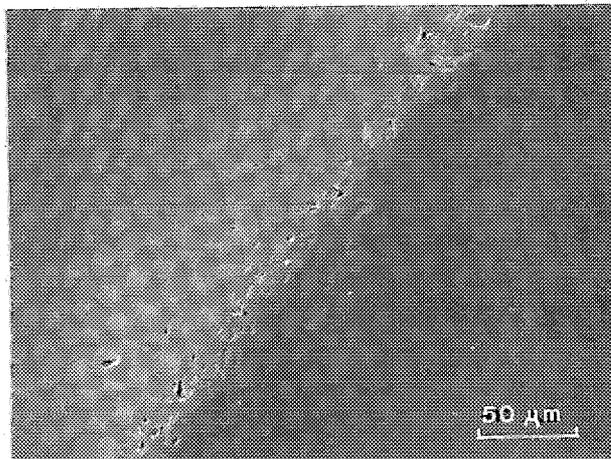
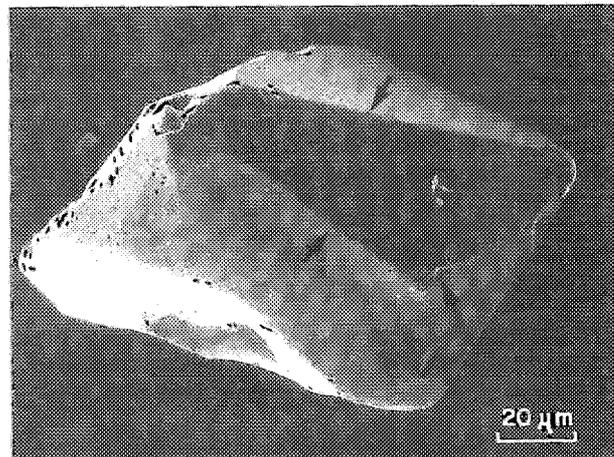
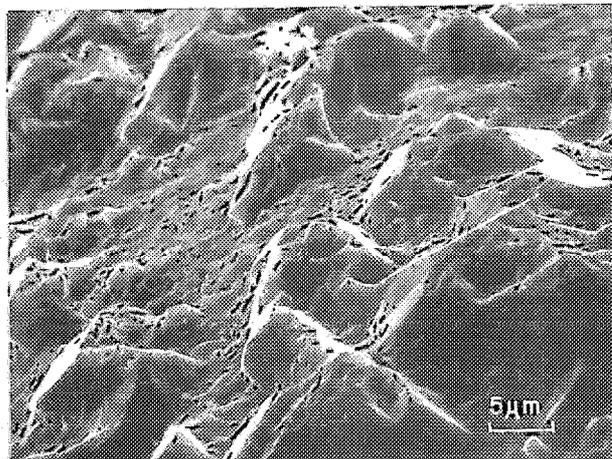
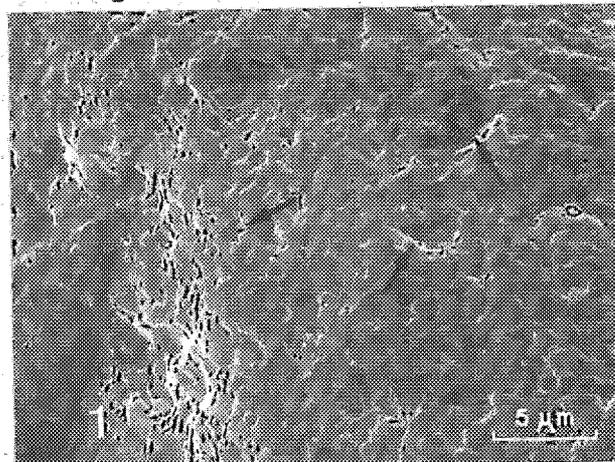
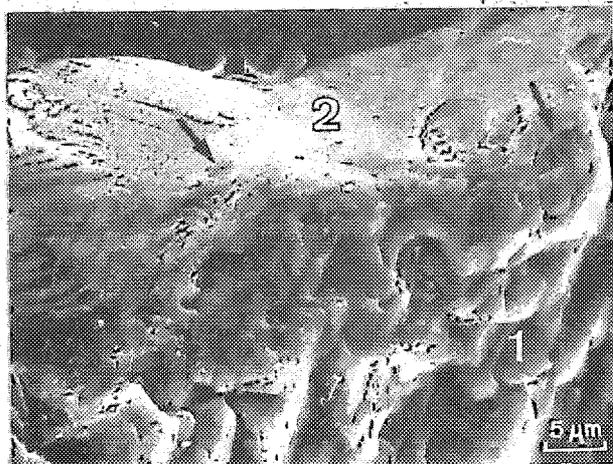
*L'analyse endoscopique des grains de quartz correspondants aux différents échantillons étudiés permet d'établir :*

(a) L'absence de fragments de quartz d'origine volcanique dans la partie supérieure de la Formation La Paz et la présence de fragments d'origine granitique, quartz filoniens et quartz remaniés à partir de roches sédimentaires plus anciennes.

(b) La présence de cristaux de quartz avec inclusions vitreuses caractéristiques, dans une ponce vitreuse typique de la cinérite Chijini. Dans cette tuffite (sandy-tuff) se rencontrent en plus, des

← PLANCHE E : Échantillon V3.

1. — *Quartz granitique.* Trois évolutions successives apparaissent sur ce cliché : l'altération du grain au sein de la roche dont il est originaire se traduit par une épaisse pellicule siliceuse en coulées (1) ; celle-ci est recoupée par de grandes cupules de choc (2) dues à un transport dans un milieu aquatique de haute énergie ; enfin, les nombreux globules siliceux (cercles), qui parsèment toute la surface du quartz et s'étendent même sur ses arêtes, montrent que l'environnement de dépôt final est de type continental aquatique de basse énergie.
2. — *Quartz Filonien.* Sur ce grain, on n'observe aucune trace d'altération, mais le transport aquatique de haute énergie se marque par une grande trace de choc emplies de nombreux dépôts siliceux fluviatiles (flèches).
3. — *Quartz filonien.* Sur un autre grain, le transport final dans un milieu continental aquatique de basse énergie apparaît plus nettement sous forme du polissage des sommets (1) et de toutes les traces de choc (2) qui affectent ces derniers.
4. — *Quartz filonien.* Détail de la photographie précédente. A plus fort grossissement, on constate que les dépôts siliceux globuleux d'origine fluviatile s'étendent non seulement sur les faces planes (flèches), où ils sont très nombreux, mais aussi, en plus faible densité, sur les arêtes elles-mêmes (cercles), ce qui est un indice de très basse énergie.
5. — *Quartz remanié.* Tous les grains de ce type, très arrondis, portent de nombreuses traces de choc en croissant (flèches), visibles même à faible grossissement et qui sont l'indice d'une violente éolisation.
6. — *Quartz remanié.* La surface de tous les quartz anciens arrondis est en partie recouverte d'un ciment siliceux très résistant qui se présente sous forme de pointements cristallins (1) masquant plus ou moins les croissants de choc éoliens polis (2) par une longue évolution aquatique antérieure à la cimentation. Mais les pointements cristallins eux-mêmes ont été émoussés à leur tour par la reprise finale fluviatile qui a parsemé de globules siliceux (cercles) toute la surface des grains.



fragments de quartz d'origine granitique, filonienne et sédimentaire en petite proportion.

(c) Dans le niveau conglomératique immédiatement supérieur à la cinérite Chijini (partie inférieure de la Formation Calvario) se trouvent des grains de quartz d'origine granitique, filonienne, sédimentaire et volcanique. Ces derniers peuvent provenir de la cinérite Chijini et d'une autre formation volcanique encore indéterminée.

(d) L'échantillon provenant de la partie supérieure de la Formation Calvario, présente des fragments de quartz de même origine que la partie inférieure, mais la quantité de grains de quartz volcaniques est insignifiante.

*Les analyses en exoscopie, réalisées au microscope à balayage précisent l'histoire sédimentologique des grains de quartz étudiés.*

(a) L'évolution finale des échantillons V3 et T2 (Formation La Paz et Formation Calvario, partie inf.) est identique : il y a d'abord eu un transport fluvial d'énergie moyenne et ensuite dépôt dans un milieu continental aquatique de basse énergie. Si on considère les caractéristiques sédimentologiques générales (textures et structures sédimentaires), l'échantillon T2 correspond à un dépôt fluvial, caractérisé par un transport très important de matériel en suspension, alors que l'échantillon V3 correspond à un dépôt lacustre de basse énergie.

(b) L'échantillon X1 qui provient de la partie supérieure de la Formation Calvario, montre, en plus de l'évolution décrite dans le précédent paragraphe, une action glaciaire nette.

(c) Les quartz volcaniques de la partie inférieure de la Formation Calvario présentent des marques de chocs uniquement sur les arêtes de cristal, ce qui indique qu'il y a eu transport sur une courte distance.

*Les résultats obtenus permettent de proposer les conclusions suivantes :*

(a) Présence d'une discordance d'érosion au-dessus de la cinérite Chijini. Par conséquent il faut placer la limite supérieure de la Formation La Paz au niveau de cette surface d'érosion, laissant la cinérite Chijini comme guide stratigraphique au sein de la Formation La Paz.

(b) Les sédiments de la Formation La Paz, proviennent des granites et des roches paléozoïques de la Cordillère Royale, ils se sont déposés dans un milieu lacustre.

(c) Les sédiments de la partie inférieure de la Formation Calvario ont la même origine que les sédiments de la Formation La Paz mais il s'y est ajouté un matériel remanié de la cinérite Chijini. Ces sédiments ont été déposés par une rivière de basse énergie.

(d) Les matériaux de la partie supérieure de la Formation Calvario ont la même origine que les précédents, mais le nombre peu important de quartz volcaniques indique que l'érosion de la cinérite Chijini a été localisée à la zone d'apport. La partie supérieure de la Formation Calvario est de type glaciaire.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.  
le 29 mars 1978.*

← PLANCHE F : Échantillon T2.

7. — *Quartz filonien.* La pellicule siliceuse en coulées (1), formée lors de l'altération du grain au sein de la roche-mère, est entaillée par une grande trace de choc (2) dont le bord est poli et affecté de nombreuses petites traces de choc à gradient de polissage (flèches). Noter également la présence des globules siliceux fluviaux qui parsèment toute la surface du grain. *L'évolution de celui-ci est donc la suivante* : 1. altération ; 2. Reprise aquatique de haute énergie ; 3. dépôt final dans un milieu continental aquatique de basse énergie.

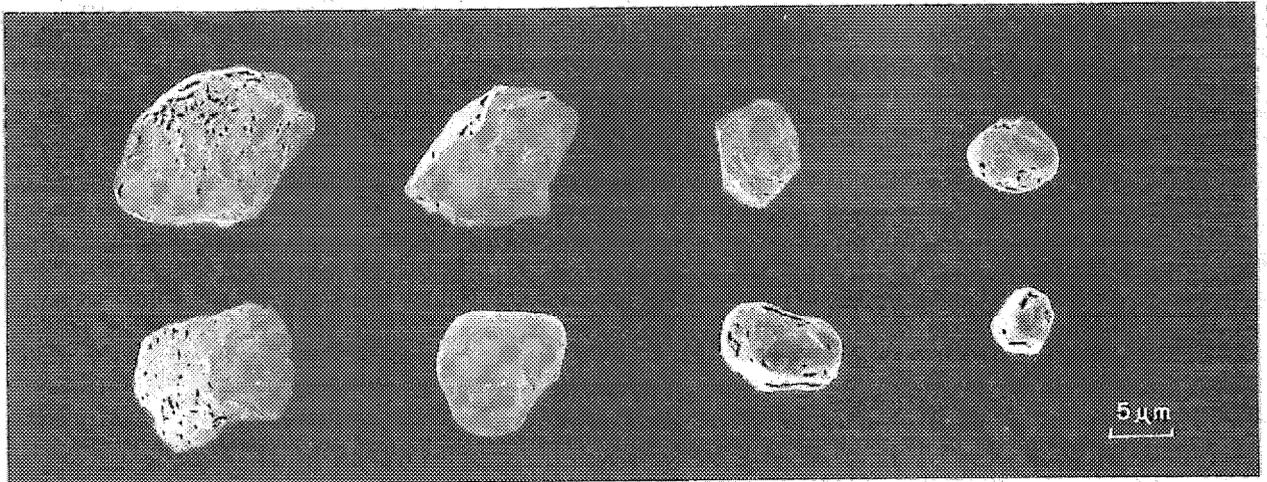
8. — *Quartz granitique.* En (1), on reconnaît une trace de choc de grande taille. Mais elle est très émaillée et toute la surface du grain est recouverte d'une multitude de traces de choc à gradient de polissage (flèches) qui indiquent un très long transport dans un milieu fluvial de moyenne énergie. Ce grain, contrairement à la majorité des autres constituants de l'échantillon T2, n'a pas encore acquis les caractères du dépôt final dans un environnement continental aquatique de basse énergie : en effet, les globules siliceux sont beaucoup plus rares que ceux visibles sur le cliché 7, ce qui indique une arrivée récente du grain dans cet environnement final.

9. — *Quartz remanié.* L'histoire des grains de ce type est en tous points semblable à celle de leurs homologues de l'échantillon V3. On reconnaît ici les restes du ciment siliceux sous forme de pointements cristallins au sommet légèrement arrondi et entaillé de traces de choc à gradient de polissage.

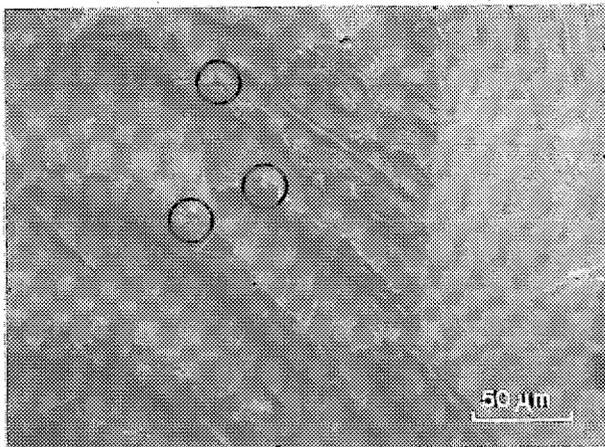
10. — *Quartz volcanique.* Vue générale. Sur les quartz de ponce, dont l'origine est très proche, le transport ne se marque que par des traces de choc localisées surtout sur les arêtes (flèches).

11. — *Quartz volcanique.* Détail de la photographie précédente.

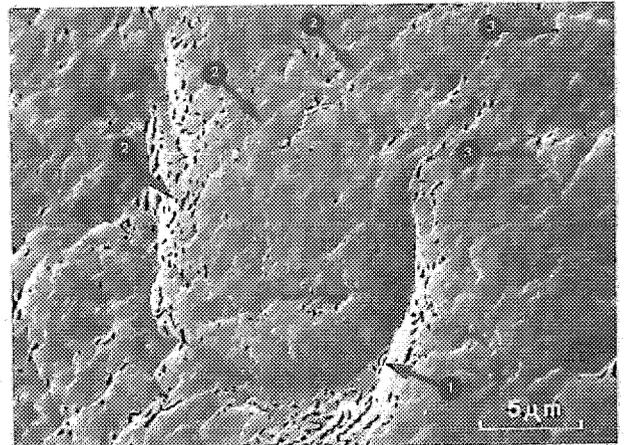
12. — *Quartz volcanique.* Détail de la photographie précédente. Toutes les traces de choc présentent un léger émaillé de leur contour. En outre, de nombreux globules siliceux (cercles) parsèment cette arête. Après un transport dans un milieu fluvial de moyenne énergie, le grain s'est donc déposé dans un environnement continental aquatique de basse énergie.



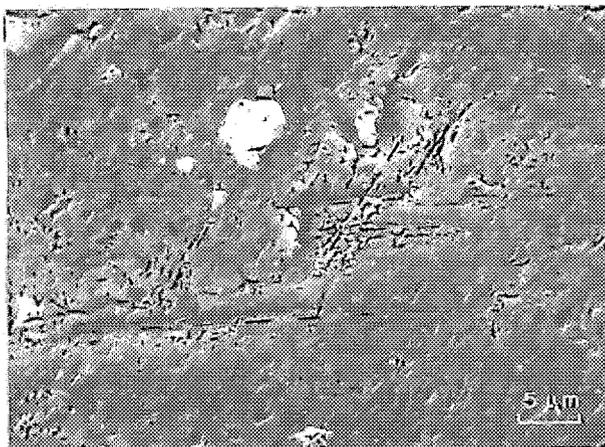
13



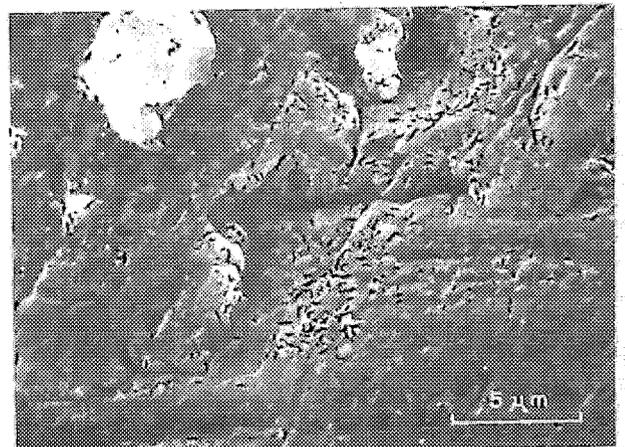
14



15



16



17

BIBLIOGRAPHIE

- BLES (J. L.), 1976. — Características litoestratigráficas de la cuenca de La Paz y alrededores. *Inf. Geológico* n° 5. Alcaldía Municipal, La Paz, 34 p.
- GLOCCHIATTI (R.), 1970. — Étude des inclusions vitreuses et de leur altération : un exemple régional des Alpes dolomitiques. *Bull. Suisse Minéral. Pétr. 50*, 1 : 159-168.
- GLOCCHIATTI (R.), WEISS (J.), 1973. — Mise en évidence par l'analyseur ionique de la croissance d'un minéral aux dépens de la phase vitreuse piégée dans ses lacunes de cristallisation. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 275 : 3405-3408.
- GLOCCHIATTI (R.), 1975. — Les inclusions vitreuses des cristaux de quartz. Étude optique, thermo-optique et chimique. Applications géologiques. *Mém. Soc. Géol. France*. T. LJV, mém. 122 : 1-96.
- GLOCCHIATTI (R.), 1975. — Des reliquats magmatiques. *La recherche*, vol. 6 : 669-672.
- GLOCCHIATTI (R.), MERVOYER (B.), 1976. — Contribution à l'étude des cristaux de quartz de la Guadeloupe. *Bull. BRGM*. Sect. IV n° 4 : 311-324.
- GLOCCHIATTI (R.), EL GHOZI (T.), 1977. — Les inclusions à dépôts salins des cristaux de quartz de la « granodiorite quartzique ». *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 284 : 263-267.
- DEICHA (G.), 1955. — Les lacunes des Cristaux et leurs inclusions fluides. Masson et C<sup>ie</sup> Paris.
- DOBROVOLNY, 1955. — Preliminary report on the geology of the upper La Paz valley, Bolivia. *Misión Norteamericana en Bolivia. Ined.*
- DOBROVOLNY, 1963. — Geologia del valle de La Paz. *Bol. Depto. Nacional de Geologia*, n° 3, 153 p.
- EVERNDEN (J. F.), KRIZ (S. J.), CHERRONI (C.), 1977. — Potassium-Argon Ages of Some Bolivian rocks. *Econ. Geol.* vol. 72 : 1042-1061.
- GREGORY (H. E.), 1913. — The La Paz, Bolivia gorge. *Am. Journ. Scienc. ser. 4*, vol. 36 : 141-150.
- LE RIBAUT (L.), 1977. — L'exoscopie des quartz, Masson et C<sup>ie</sup> éditeurs, Paris, 150 p.
- SERVANT (M.), 1977. — Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire de l'Altiplano des Andes Tropicales en Bolivie. *Sup. Bull. AFEQ* n° 50 : 323-327.
- TROLL (L.), FINSTERWALDER (R.), 1935. — Die Karten de Cordillera Real und des Talkessels von La Paz (Bolivien) und die Diluvialgeschichte der zentrale Anden. *Petermanns Mitt.*, t. 81, n° 12 : 445-455.
- VILLARROEL (C.), 1978. — Revalidación y redescrpción de *Posnanskytherium desaguaderoi* Liendo, 1943 ; *Toxodontidae (Notongulata)* del Plioceno superior boliviano. *Revista Serv. Geol. Bol.*, n° 16 (sous presse).

← PLANCHE G : Échantillon XI.

13. — Les principaux types de grains présents dans l'échantillon XI.

14. — *Quartz volcanique*. Grande cassure conchoïdale en « marches d'escalier », dont les arêtes sont recoupées par de nombreuses et profondes petites traces (cercles) qui pourraient être assimilées à des figures de broyage ; toutefois, ce type de microformes étant parfois observé sur les quartz torrentiels, dunaires et intertidaux, il ne suffit pas à affirmer que ce grain de quartz a été soumis à une évolution glaciaire.

15. — *Quartz remanié*. L'évolution de ce quartz est la même que celle des grains du même type observés dans les échantillons V3 et T2 : en (1), croissant de choc éolien très poli ; en (2), figures de dissolution très nombreuses et d'origine marine ; en (3), restes de ciment siliceux polis par un transport aquatique. Il s'agit donc d'un quartz littoral ancien provenant d'un grès et repris par un fleuve.

16. — *Quartz remanié*. Sur ce grain apparaissent de nouvelles traces superposées à toutes celles héritées des évolutions évoquées précédemment : des figures de frottement dont chaque groupe a une direction particulière (tiré). Ces figures de frottement groupées sont le meilleur critère de reconnaissance d'une évolution glaciaire.

17. — Détail de la photographie précédente.