Note préliminaire sur la minéralogie des phases solides contenues dans les inclusions des phénocristaux de quartz du porphyre cuprifère de Cerro Verde/ Santa Rosa, Pérou méridonal

Autor(en): **Le Bel, Laurent**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **73 (1976-1977)**

Heft 350

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-277054

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

BULLETIN N° 220 des Laboratoires de Géologie, Minéralogie, Géophysique et du Musée géologique de l'Université de Lausanne.

Note préliminaire sur la minéralogie des phases solides contenues dans les inclusions des phénocristaux de quartz du porphyre cuprifère de Cerro Verde/Santa Rosa, Pérou méridional

PAR

LAURENT LE BEL [1]

Résumé. — L'étude de la minéralogie des phases solides des inclusions a été entreprise au moyen des techniques de microscopie à balayage (M.E.B.). Les phases identifiées sont: des silicates, des chlorures, des sulfates, des phosphates, des sulfures et des oxydes. Ces observations peuvent être interprétées en termes de pétrologie et de métallogénie.

Mots clefs: quartz, porphyre cuprifère, Pérou, inclusions fluides, inclusions solides, M.E.B.

Abstract. — The study of "daughter minerals" in fluid inclusions has been carried out by mean of scanning electron microscopy, (S.E.M.). The identified minerals are: silicates, chlorides, sulfates, phosphates, sulphides and oxides. Some further applications in petrology and metallogeny are suggested.

Key words: quartz, porphyry copper, Peru, fluid inclusions, daughter minerals, S.E.M.

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années on assiste aux tentatives de détermination des phases solides contenues dans les « inclusions fluides » des cristaux. En effet, la connaissance de la minéralogie de ces microphases et du chimisme des fluides avec lesquels elles peuvent être en équilibre, donnent des informations tant géochimiques que thermobarométriques sur les milieux de croissance du minéral hôte et sur les phénomènes de transformation, métasomatose ou « altération » que peuvent subir ce minéral et l'ensemble paragénétique de la roche dont il fait partie.

Ce sont les techniques de microscopie à balayage (M.E.B.) couplées à des techniques de microanalyses électroniques qui rendent possible l'étude de la minéralogie des microphases dont la taille se compte généralement en micromètres.

[1] Université de Lausanne, Institut de minéralogie, Palais de Rumine, CH-1005 Lausanne.

Les premiers travaux se sont faits à la microsonde électronique sur des inclusions fermées amenées près de la surface de la lame cristalline par polissage (in ROEDDER, 1972), ou bien décrépitées (EADINGTON, 1974). Le terrain d'étude privilégié sont les inclusions ouvertes par un procédé mécanique (broyage, choc thermique), dans lesquelles les phases minérales ont été conservées. La localisation de telles inclusions se fait au M.E.B. et l'analyse quantitative ponctuelle au moyen de l'analyseur « dispersif en énergies » qui équipe les microscopes. La morphologie de la phase et son analyse qualitative suffisent souvent à son identification. Les travaux de ce genre se font nombreux et l'on peut les consulter, le plus souvent sous forme d'« abstracts », dans les « Proceedings of COFFI » (1968-1973). L'entrée se fait sous «daughter minerals» (minéraux fils) ou bien sous le nom de minéral. Dans le volume 6 (1973), dernier paru, les phases suivantes ont été identifiées: albite, ankérite, calcite, columbo-tantalite, cryolite, elpasolite, fluorine, halite, hauyne, hématite, ilménite, mica, quartz, rutile, sylvite et topaze. En langue française, la plus récente note publiée est celle de J. P. SAINTIVES (1976). Il y est discuté de l'origine des phases microcristallines contenues.

II. MATÉRIEL ÉTUDIÉ

C'est au cours de l'étude systématique des inclusions fluides des phénocristaux de quartz du complexe sub-volcanique de Cerro Verde/Santa Rosa, Pérou méridional, auquel est liée une minéralisation de type porphyre cuprifère, qu'il a été remarqué de nombreuses inclusions fluides multiphasées (type A de l'auteur, planche I, photos 1 à 4). Ces inclusions, parfois bipyramides « quartz négatif », ont une taille comprise entre 8 et 20 micromètres. Le nombre des phases minérales incluses peut avoisiner la dizaine. Le propos n'est pas ici de relater l'étude thermo-optique qui a été entreprise mais de signaler qu'il y a deux types de phases contenues. Certains minéraux en effet apparaissent être en équilibre avec les fluides dans lesquels ils baignent (ceci apparaît au cours des essais d'homogénéisation). Ce sont de réels « minéraux fils ». Dans ce cas-là, l'étude des relations entre phases solides et phases liquides précise les conditions thermodynamiques de trappage. D'autres, par contre, ne sont pas en équilibre avec la phase fluide (le plus souvent de chimisme fort différent) et leur cristallisation est antérieure à celle du minéral hôte, et ont induit dans celui-ci des lacunes de croissance remplies par la suite par les différents fluides historiques ayant présidé aux destinées de la roche.

Ces inclusions ont été étudiées dans la zone d'altération dite « quartz séricite » ou « phyllique » et parfois dans la zone « propylitique » du gise-

ment, là où la paragenèse qui se développa sur les assemblages minéraux originaux est: quartz-séricite-calcite-épidote-muscovite-chlorite-hématite-pyrite-chalcopyrite. L'étude thermo-optique permet de définir les couples pression-température contrôlant cette paragenèse: environ 400 °C. pour des pressions passant de 1100 bars à 200-300 bars (interprétées pour l'instant par passage d'un contrôle lithostatique des pressions à un contrôle hydrostatique).

III. Méthodologie

A) Préparation et observation: la fractographie

Les phénocristaux de quartz, extraits de la roche par broyage, sont fragmentés soit par écrasement, soit par choc thermique dans la surplatine chauffante (décrépitation). Les morceaux submillimétriques sont montés directement sur un porte-échantillon et métallisés à l'or par un procédé d'anodisation cathodique sous faible pression d'argon.

Les échantillons sont alors examinés au M.E.B. et l'on cherche parfois à lever les indéterminations à la microsonde. L'instrument actuellement le plus complet pour entreprendre une telle étude est le microquantomètre électronique à balayage (SEMQ) qui allie les avantages d'un M.E.B. à ceux d'une microsonde (recherche des éléments plus légers que le sodium et focalisation du signal X).

La présente étude a été réalisée en partie avec le M.E.B. Jeol-SM 35 du Centre de microscopie électronique de l'Université de Lausanne, en partie avec le M.E.B. Jeol-03 du BRGM à Orléans, appareil équipé d'une diode Nuclear Conductor et d'un dispositif de traitement Tracor NS 880 PDP 8K et parfois avec la sonde ARL SEMQ du Centre de microanalyses électroniques de l'Université de Lausanne.

B) Ambiguïté de la méthode

Elle est directement liée aux limites de l'analyseur « dispersif en énergies » et à la nature de l'objet en observation. L'analyseur ne détecte pas les éléments dont le numéro atomique est inférieur à celui du sodium et incorpore largement sur le microspectre les éléments qui constituent la matrice de l'inclusion (murs du minéral hôte, sauf lorsque la microphase dépasse largement de la cavité), ainsi que les éléments constituant les phases voisines. L'emploi de la microsonde permet la détection de F, C et B ainsi qu'une meilleure focalisation de l'analyse. Toutefois, celle-ci reste qualitative, car l'influence de la géométrie du cristal analysé et de son absence de poli est très grande. Dans les meilleurs cas les analyses quantitatives se sont bouclées aux alentours de 60 % en poids (plagioclase, planche II et anhydrite, planche IV, photo 4).

C) Perspectives

On ne peut s'empêcher de penser que les développements de la technologie de l'analyseur ionique vont bientôt faire disposer d'un instrument très complet pour effectuer ce genre d'étude (éléments légers, nombre d'oxydation, isotopes, etc.) (CLOCCHIATTI, 1975).

IV. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés sous forme de commentaires aux planches photographiques (planches II à V).

Sur les photos des inclusions avec le contenu minéral sont superposées les photographies des microspectres. On distingue d'abord la constance du pic de Si imputable au silicium contenu des microphases et/ou au silicium de la matrice (quartz). Immédiatement à droite de ce pic on trouve toujours celui de l'Au de la métallisation. Il se trouve pratiquement à la même place que celui de S, et la présence de cet élément se marque seulement par un épaulement sur la droite. L'autre pic de Au se situe en fin de spectre (le plus souvent coupé par le cadrage de la photo). Ce métal n'est pas le métal idéal de métallisation pour une telle étude, même si c'est celui qui donne des images M.E.B. excellentes.

A) Planche II: silicates

Les minéraux inclus sont suspectés d'avoir été piégés en phase solide. Deux possibilités s'offrent à eux: 1) il y a eu cocristallisation (est-ce que les phases piégées sont compatibles avec la silice exprimée sous forme de quartz?) et 2): les minéraux préexistaient et ont induit les lacunes de croissance du minéral hôte lors de sa cristallisation.

Photo 1. Santa Rosa, 510-36, 462 m

Deux cristaux subsistent dans la cavité:

a) plaquette dont l'aspect monoclinique est renforcé par l'observation de figures de dissolution sans formes caractéristiques. L'habitus pseudo-hexagonal et le microspectre font penser à un mica. On constate l'absence de Mg mais la teneur en Fe évaluée à la microsonde (2,2% FeO) n'est pas suffisante pour en faire une biotite ferrifère. Ne serait-ce pas alors une muscovite ou une phengite ferrifère?

b) pour ce cristal, on peut attribuer le Si du microspectre à la gangue, comme semble le montrer l'étude faite à la microsonde. Ce ne serait donc pas un silicate, mais plutôt un oxyde de Fe, Mn, Zn (et Al), du groupe des spinelles (franklinite?) ou un carbonate.

Photos 2, 3, 4. Santa Rosa 510-36, 462 m

Les cristaux sont d'allure triclinique. La photo 3 en représente deux, maclés. Les microspectres tous identiques (celui de la photo 3 non figuré), ne sont pas influencés par la matrice car les minéraux dépassent largement des cavités. La forme et les microspectres en font des plagioclases et la microsonde précise le rapport Na_2O/CaO. Il est d'environ 2,5:1, ce qui place les cristaux dans le domaine des oligoclases; à ce sujet, il faut noter que le rapport des pics donnés par l'analyseur « dispersif en énergies », Na/Ca est inverse. Le Na ne « répond » en effet que très mal aux sollicitations du faisceau électronique.

B) Planche III: Chlorures *

Pour cette planche, il est probable que toutes les phases minérales sont en équilibre avec les fluides.

Photos 1 et 2 (2 est un agrandissement de 1). Santa Rosa 510-36, 460 m

Les trois cristaux A, B et C sont des chlorures.

A) Chlorure de Fe, Mn. Aspect hexagonal ou monoclinique.
B) Chlorure de Fe, Mn et K.
C) Chlorure de Fe, Mn et K.

Ni le bore, ni le fluor (qui ne sont pas détectables à l'analyseur « dispersif en énergies ») n'ont été recherchés à la microsonde. L'identification de ces phases reste délicate.

Photo 3. Santa Rosa, 510-36, 462 m

Exemple didactique pour montrer les limites des possibilités de l'analyseur à diode. Il y a une interaction certaine des différentes phases. A est vraisemblablement la halite, B la sylvite et C un chlorure de Fe (et K).

Photo 4. Santa Rosa, 510-36, 462 m

Cube de halite montrant des figures de dissolution (la dissolution commence sur les arêtes du cristal).

C) Planche IV: Chlorures * *et sulfates*

Minéraux en équilibre avec les fluides.

* A moins de reprendre systématiquement le travail à la microsonde (recherche de B et F souvent associés aux chlorures), il n'est pas possible d'identifier ces chlorures souvent complexes. La littérature parle de chlorocalcite, d'hydrophyllite (EADINGTON, 1974), mais ici nous constatons un net déficit en Ca dans les chlorures. Cet auteur signale $FeCl_2.2H_2O$, sans nom, qui pourrait être nos phases III, —3C et IV—3A.

Photo 1. Santa Rosa, 510-36, 408 m

Sulfo-chlorure complexe de Na, Fe, K, Cu et Ba.

Photo 2. Santa Rosa, 510-36, 247 m

Chlorure de Fe, Mn et Na.

Photo 3. Santa Rosa, 510-36, 247 m

A) Chlorure de Fe.
B) Chlorure de Fe, K, Na et Al.

Photo 4. Santa Rosa, 510-36, 408 m

Cristal orthorhombique d'anhydrite.

D) Planche V: Oxydes et sulfures

Les déterminations ne sont pas ambiguës car les minéraux dépassent largement des cavités.

Photo 1. Santa Rosa, 510-36, 247 m

Coexistent dans cette cavité un cristal *a)* d'ilménite manganésifère et un cristal *b)* de chalcopyrite.

Photo 2. Santa Rosa, 510-36, 247 m

Dans chaque cavité, il y a un cristal de chalcopyrite.

Photo 3. Santa Rosa, 510-36, 247 m

Cristal de chalcopyrite.

Photo 4. Santa Rosa, 510-36, 247 m

Cristal de pyrite avec figures de dissolution tendant à arrondir la forme (Isotropie).

V. Interprétations

A. Pétrologiques

La paragenèse relique rencontrée, ferro-muscovite-oligoclase-spinelle, est une paragenèse classique de granitoïdes. Le déficit en Mg et la teneur en albite des plagioclases montrent le caractère acide du bain, conforme à la sursaturation en SiO_2 de la roche exprimée en surface.

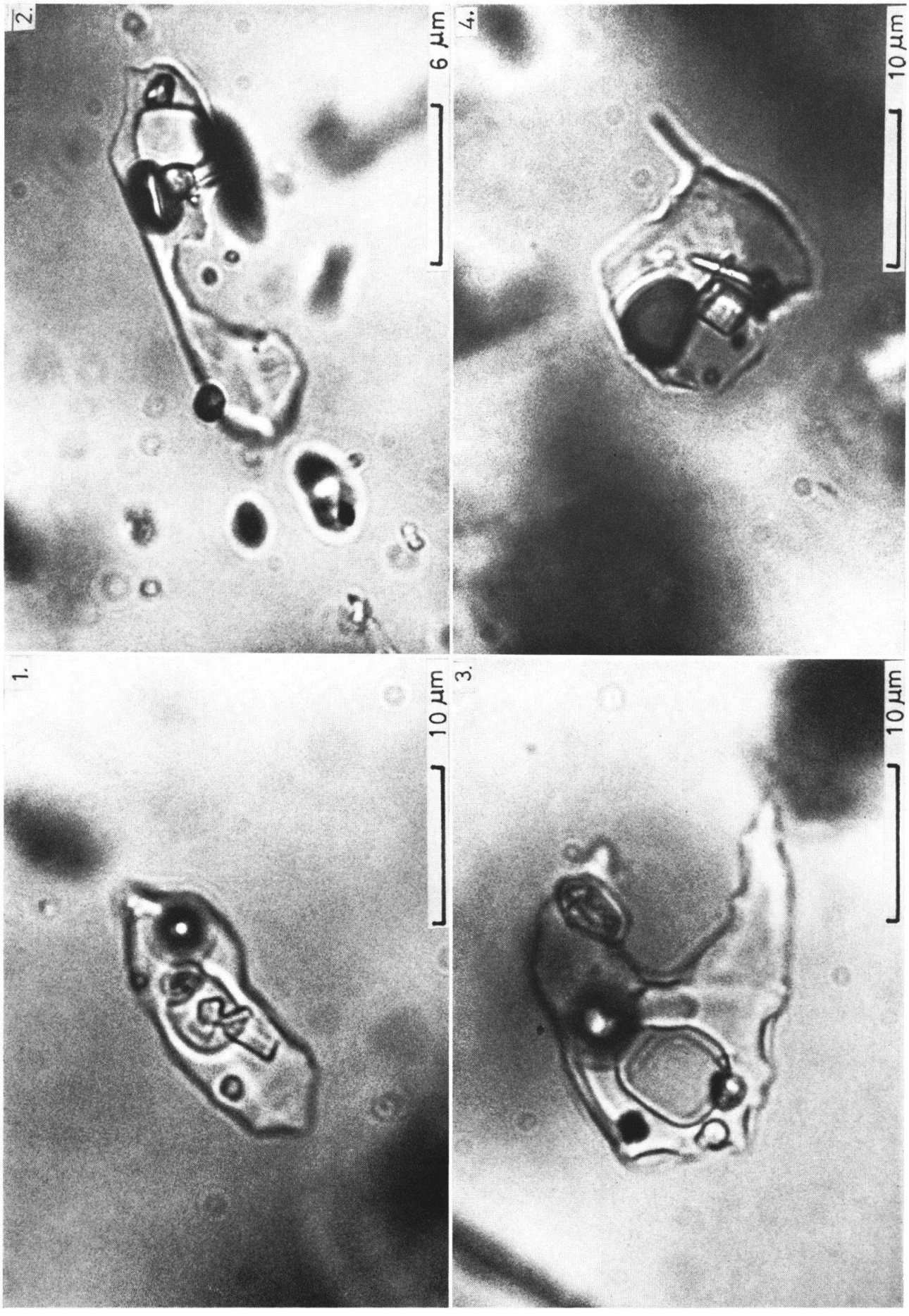

2.
6 µm
4.
10 µm
1.
10 µm
3.
10 µm

PLANCHE II

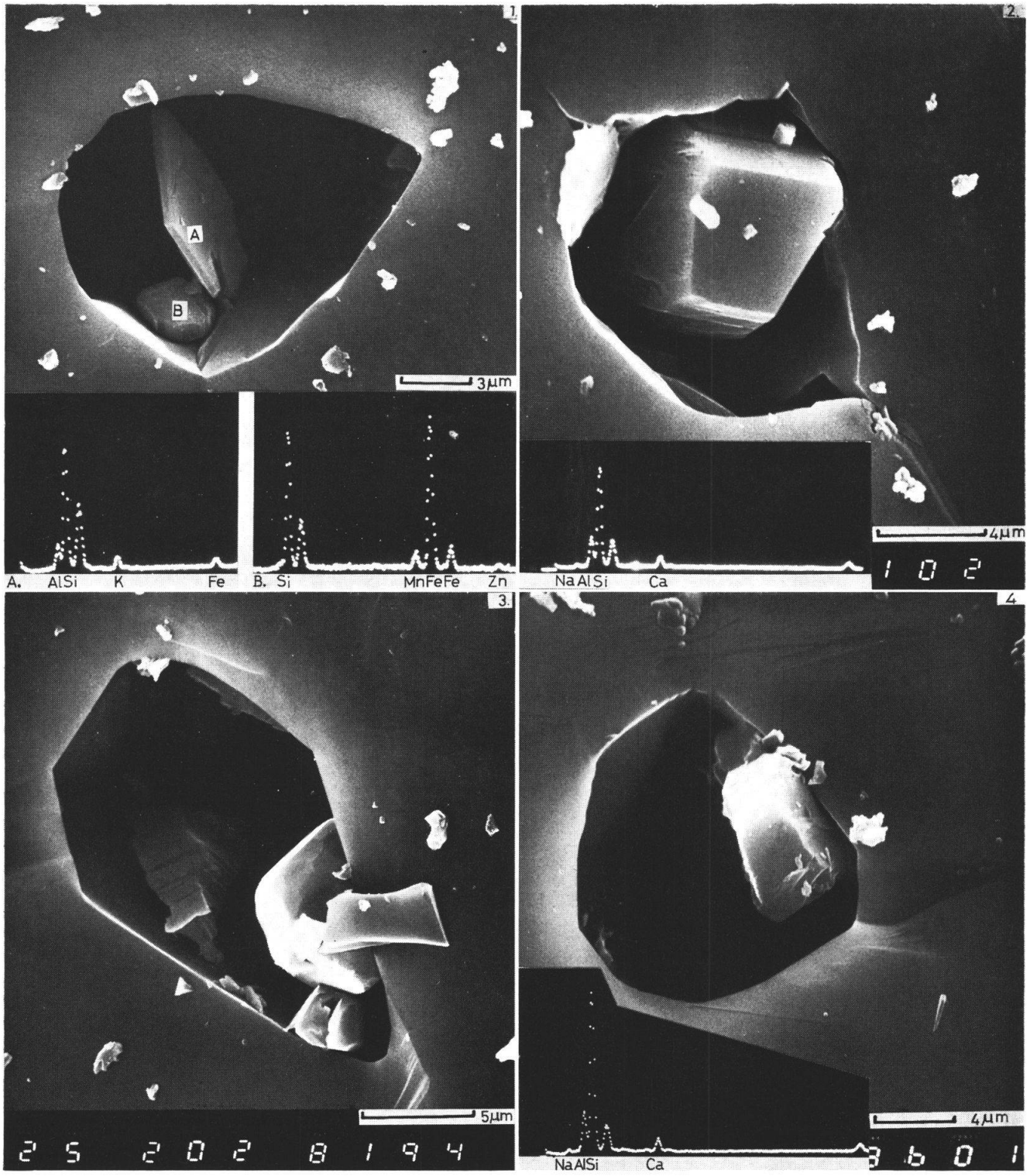

1
A
B
3µm
A. AlSi K Fe
B. Si MnFeFe Zn
2.
4µm
NaAlSi Ca
1 0 2
3.
5µm
2 5 2 0 2 8 1 9 4
4
4µm
NaAlSi Ca
3 b 0 1

PLANCHE III

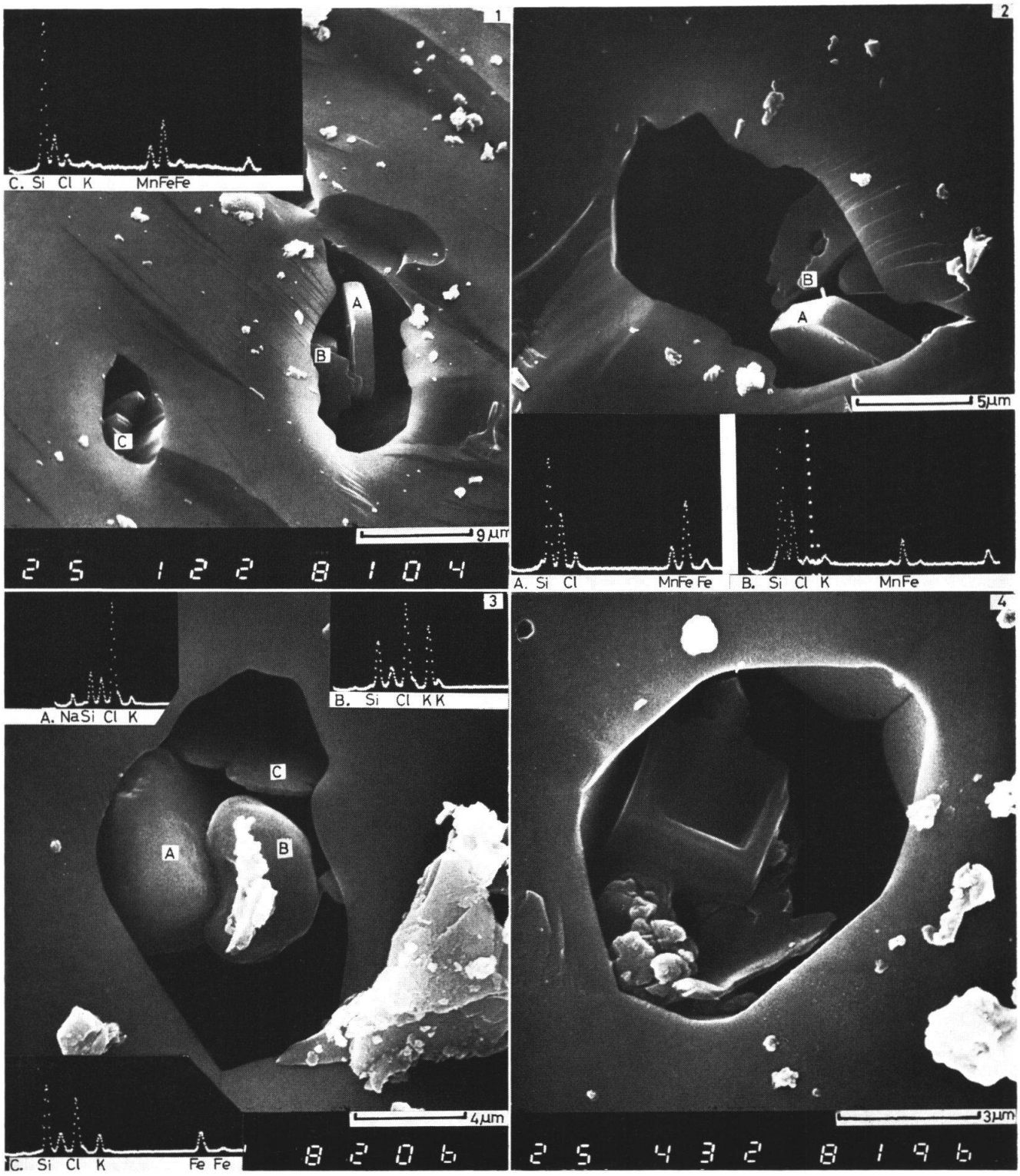

1
C. Si Cl K MnFeFe
A
B
C
9 µm
2 5 1 2 2 8 1 0 4
2
B
A
5µm
A. Si Cl MnFe Fe
B. Si Cl K MnFe
3
A. NaSi Cl K
B. Si Cl KK
C
A
B
4µm
C. Si Cl K Fe Fe
8 2 0 6
4
3µm
2 5 4 3 2 8 1 9 6

PLANCHE IV

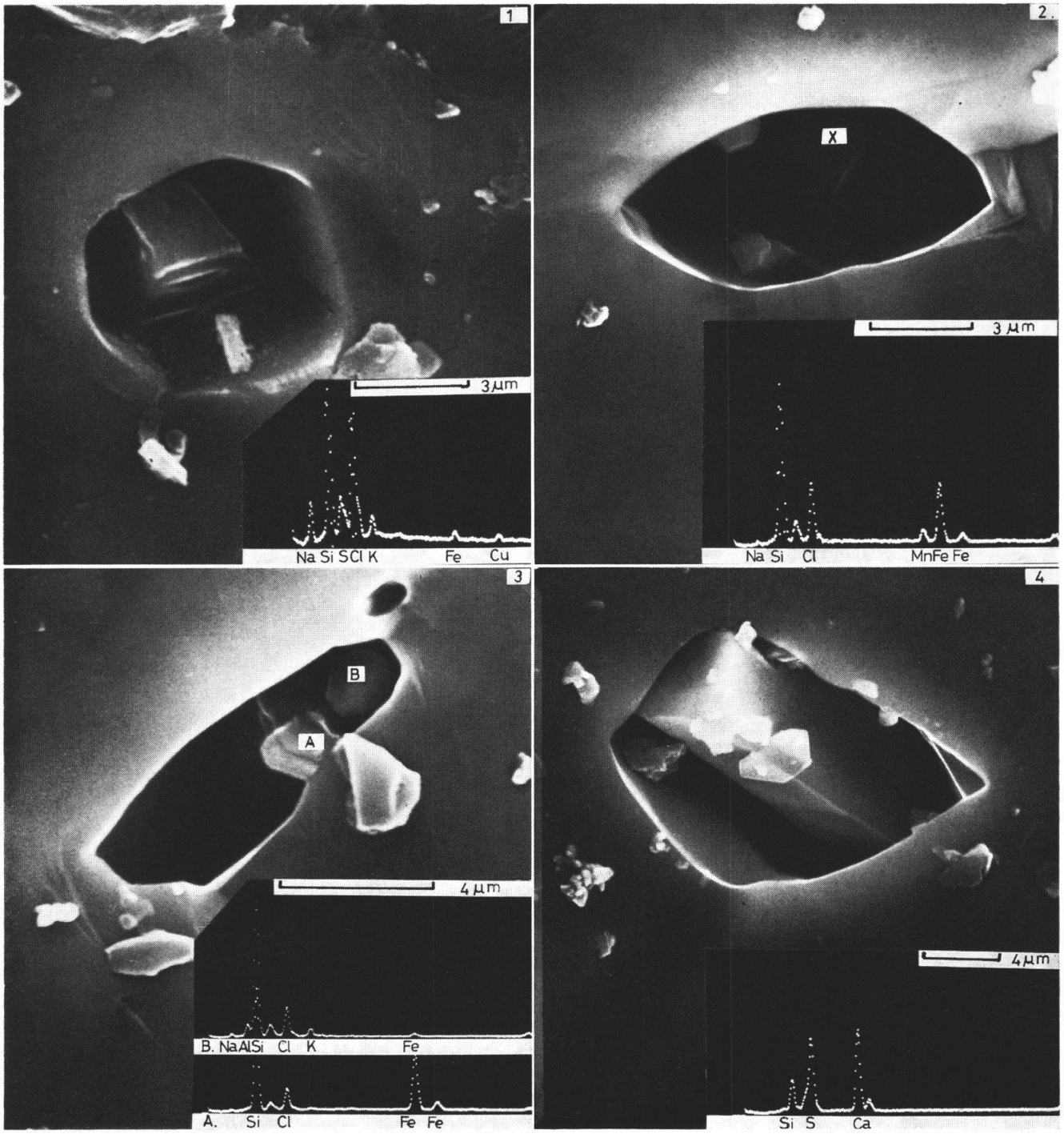
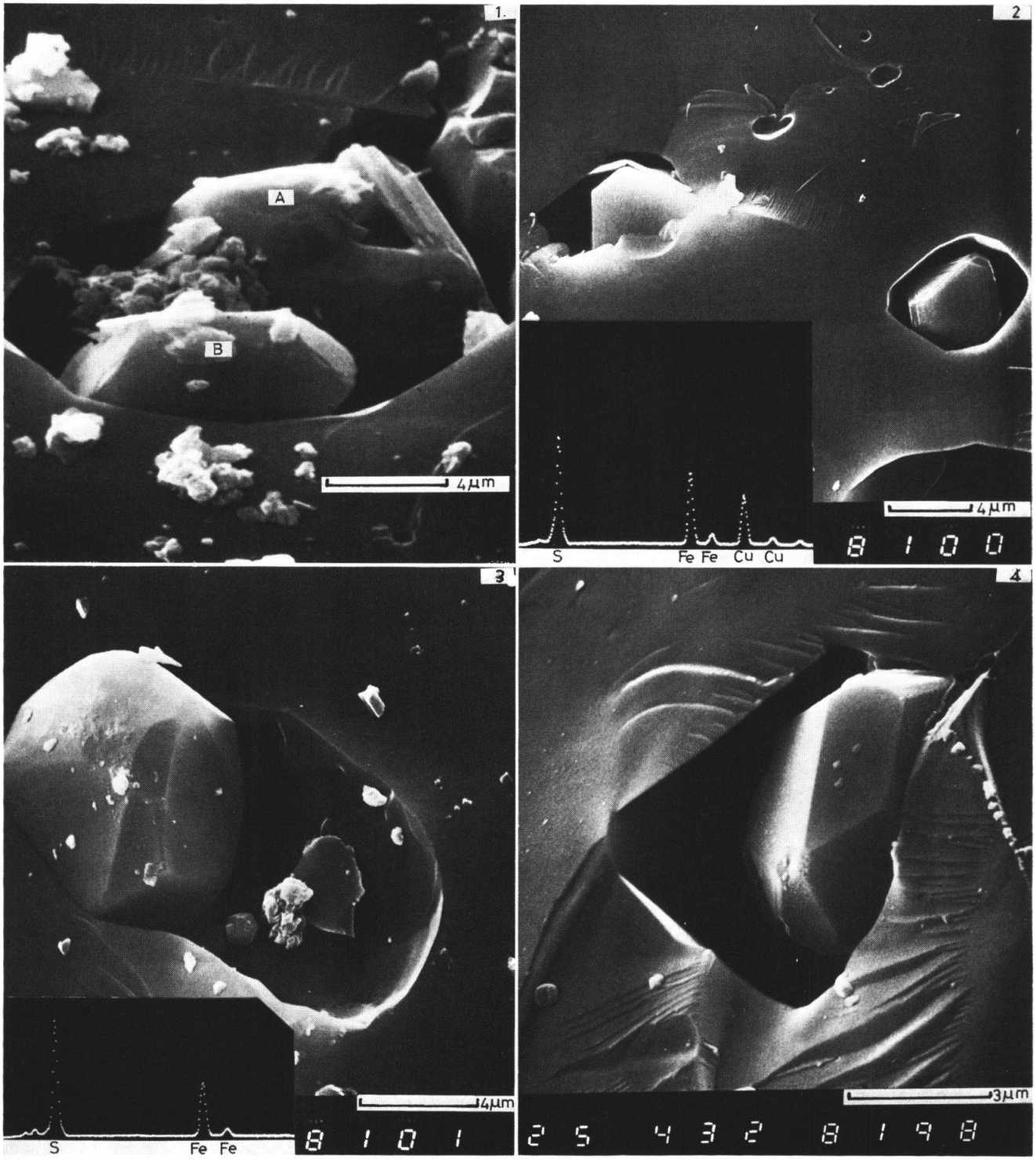

1
3 µm
Na Si SCl K Fe Cu
2.
X
3 µm
Na Si Cl MnFe Fe
3
B
A
4 µm
B. NaAlSi Cl K Fe
A. Si Cl Fe Fe
4
4 µm
Si S Ca

PLANCHE V



La forte activité Ca^{++} mise en évidence par les cristaux d'anhydrite et l'omniprésence de Mn suggèrent cependant des affinités avec des bains plus basiques et une recherche systématique sur les minéraux reliques emprisonnés dans des lacunes de croissance qu'ils ont induites, pourrait peut-être apporter des précisions sur l'origine de ces bains acides: produits d'une différenciation magmatique, d'une immiscibilité de magmas, ou bien issus de bains originellement acides?

B) Métallogéniques

C'est dans ce domaine que l'on entrevoit le plus grand nombre d'applications: le travail à venir pourra porter sur les sujets suivants:

1. Les sulfates hypogènes. Il y a longtemps que l'on pense que les sulfates peuvent être hypogènes (BUTLER, 1919). La connaissance parfaite du système $CaSO_4$–NaCl–H_2O (BLOUNT et DICKSON, 1969) permet de faire des considérations sur le dépôt de l'anhydrite. On voit par exemple qu'une solution saturée en $CaSO_4$ peut à température constante (380-400 °C) et dans un environnement de NaCl 7 moles/kg H_2O déposer, lors d'une chute de pression d'environ 700 bars (entre 1000 et 300 bars, cf. plus haut sous II) 2,3 kg $CaSO_4$ par m^3.

2. La mobilisation précoce de Cu sous forme de chlorures complexes.

3. La séquence de minéralisation vraisemblable: chlorures-sulfates-sulfures + oxydes avec les réactions redox que cela implique.

VI. CONCLUSIONS ET REMERCIEMENTS

Cette étude préliminaire confirme l'intérêt que l'on peut avoir à une plus grande connaissance de la minéralogie des inclusions multiphasées. Outre de poser le problème de l'origine des roches sursaturées, ces observations couplées aux observations thermo-optiques permettent de cerner de plus près les systèmes thermodynamiques essentiels à la compréhension de la genèse des gisements hydrothermaux.

Cette note entre dans le cadre d'un travail de thèse entreprise par l'auteur sur certains aspects génétiques des gisements de type porphyre cuprifère, le matériel étant fourni par le complexe Cerro Verde/Santa Rosa, Pérou méridional.

Doivent ici être remerciés la DGRST, organe ayant supporté les frais de la mission sur le terrain, MM. Z. Johan et P. Jeanrot du BGRM à Orléans, MM. G. Burri et T. Jalanti de l'Université de Lausanne, pour leurs diverses et amicales contributions.

BIBLIOGRAPHIE

BUTLER, B.S. 1919. — Primary (hypogène) sulfate minerals in ore deposits. *Econ. Geol. XIV. 8*, 581-609.

BLOUNT, C.W. et DICKSON, F.W. 1969. — The solubility of anhydrite ($CaSO_4$) in NaCl-H_2O from 100 to 450° C and 1 to 1000 bars. *Geoch. Cosmoch. Acta 33*, 227-245.

CLOCCHIATTI, R. 1975. — Les inclusions vitreuses des cristaux de quartz. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, (7), *6*, 181-187.

COFFI (Proceedings of ...). 1968-1973. — Edwin Roedder, Editor, Ann Harbor, The University of Michigan Press.

DANA, J.D. 1951. — Dana's system of Mineralogy. N.Y., John Wiley and sons.

EADINGTON, P.J. 1974. — Microprobe analysis of the non-volatile constituents in fluid inclusions. *N. Jb. Miner. Mh.* H. *11*, 518-525.

ROEDDER, E. 1972. — Composition of Fluid Inclusions, in «Data of Geochemistry», Washington, *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 440 JJ.

SAINTIVES, J.-P. 1976. — Quelques aspects des inclusions solides révélés par le microscope à balayage sur l'exemple d'un quartz pegmatique. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr. 99*, 178-181.

WINCHELL, N. 1967. — Elements of optical Mineralogy. N.Y., John Wiley and sons.

Manuscrit reçu le 26 octobre 1976.