

ROBERT CLOCCHIATTI (*)

LE INCLUSIONI VETROSE O RELITTI MAGMATICI
NEI CRISTALLI DI QUARZO DI ORIGINE ERUTTIVA.
DESCRIZIONE MORFOLOGICA, COMPOSIZIONE CHIMICA,
TERMOMETRIA E APPLICAZIONI GEOLOGICHE (**)

RIASSUNTO. — Si passano in rivista gli aspetti morfologici, la densità, la disposizione, la natura del contenuto, la composizione chimica e l'evoluzione termica delle inclusioni vetrose del quarzo effusivo. La composizione chimica dei relitti magmatici imprigionati nel quarzo è una testimonianza della composizione del magma al momento della cristallizzazione del minerale e sembra indicare che esso è in equilibrio con il vetro racchiuso. Viene proposta una spiegazione per interpretare i golfi di corrosione come lacune di cristallizzazione vicine alla superficie del cristallo (inclusioni aperte). Questa spiegazione elimina il controsenso della presenza di golfi di corrosione sui cristalli di formazioni ricche in quarzo normativo. Il ruolo della dilatazione delle inclusioni, generalmente ricche in gas, nella fratturazione dei cristalli al momento dell'emissione delle vulcaniti, viene sottolineato. Le temperature di cristallizzazione dei quarzi, ottenute mediante la termometria ottica sono comprese entro 700 e 900°C. Nel caso dei valori più bassi, si hanno magmi viscosi nei quali possono crescere cristalli morfologicamente aberranti. Si dimostra con alcuni esempi l'interesse mineralogico, petrografico e sedimentologico dello studio delle inclusioni vetrose.

Premessa.

Nel presente lavoro si cerca di fornire un quadro generale sulle inclusioni vetrose o relitti magmatici nei cristalli di quarzo. Per maggior informazione, per quanto riguarda la preparazione dei campioni, si veda R. CLOCCHIATTI e G. PERNA (1973) e per quanto attiene ai campioni citati, vedasi la bibliografia.

(*) E. R. 45 C.N.R.S. Laboratoire de Géochimie Bat. 504 Université Paris-Sud - 91 Orsay (France).

(**) Lavoro effettuato con il contributo del Centre National de la Recherche Scientifique e Consiglio Nazionale delle Ricerche.

1. - Cenni storici.

Le prime descrizioni di inclusioni vetrose nei minerali di origine magmatica datano della seconda metà del XIX secolo, esse sono l'opera di H. SORBY e soprattutto del suo allievo G. VOGELSANG (1867). All'inizio di questo secolo A. LACROIX (1901) ci fornisce una descrizione dettagliata delle lacune di cristallizzazione a riempimento vetroso nel quarzo delle rioliti d'Agay (Var, Francia). Molti altri studiosi di questo periodo segnalano le inclusioni nelle loro opere, fra questi citiamo: T. ROSENBUSCH, F. FOUQUE, D. WARD, A. MICHEL-LEVY, K. KHRSHKEV, D. IDDINGS. Più recentemente G. DEICHA (1953-1955), L. BARABE e G. DEICHA (1956-1957) descrivono l'evoluzione del magma rianimato al tavolino scaldante entro 550° e 1000°C. La termometria mineralogica si sviluppa soprattutto in Unione Sovietica con gli studi di I. T. BAKUMENKO ed altri (1967) sui minerali sintetici, di V. B. NAYMOV (1969) sulle inclusioni vetrose del quarzo, di V. S. SOBOLEV ed altri (1972) su diversi minerali fra i quali: l'apatite, la biotite, gli anfiboli e la nefelina.

R. CLOCCHIATTI (1970), R. CLOCCHIATTI e A. BOUTIERE (1971) descrivono l'evoluzione termica dei relitti magmatici dei quarzi delle rioliti dell'Esterel (Var, Francia) e delle piroclastiti del deserto del Dach-e-Nawar (Afganistan).

J. P. CARRON (1961) pubblica i risultati delle prime analisi chimiche di inclusioni vetrose ottenute grazie ad un metodo misto sonda elettronica/analisi chimica classica. Le prime analisi ottenute unicamente con la sonda elettronica si devono a M. KOMATSU e J. YAJMA (1970) ed a R. CLOCCHIATTI (1971). Negli Stati Uniti P. W. WEIBLEN e E. ROEDDER (1970 al 1972) studiano la composizione chimica e l'evoluzione termometrica delle inclusioni vetrose nelle olivine lunari. Essi descrivono dei fenomeni di immiscibilità tra vetri basici e acidi ed è solo dopo lo studio di questi materiali che ritrovano aspetti analoghi nelle olivine dei basalti hawaiani. S. TAKENOUCI (1972) al Congresso Geologico di Montreal descrive otto tipi di inclusioni vetrose in base alla natura del loro riempimento. Recentemente R. CLOCCHIATTI e J. WEISS (1973) mettono in evidenza alla sonda ionica che il cristallo di quarzo può continuare la sua crescita a partire dal vetro imprigionato nelle lacune di cristallizzazione.

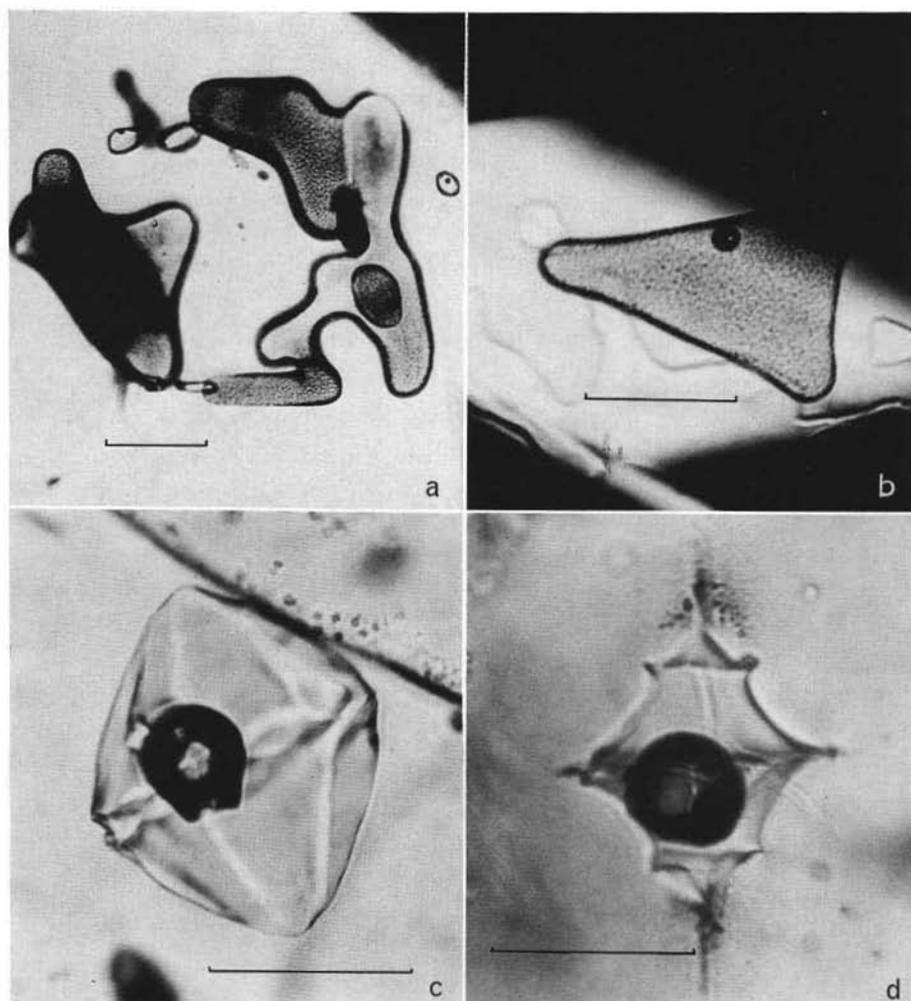


Fig. 1. — *Inclusioni vetrose nel quarzo eruttivo.*

- a) Inclusioni senza forma ben definita.
- b) Cristallo negativo disposto parallelamente alle facce della piramide. Pomici K3 del Katmai (Alaska).
- c) Inclusionione a facce leggermente concave verso il centro della cavità, morfologia analoga a quella del cristallo di quarzo. Filone riolitico Les Charbonnières Deniers (Francia).
- d) Inclusionione con facce convesse verso il centro della cavità. Nubi ardenti della Martinica (Piccole Antille).

La scala è data dal trattino nero uguale a 100 micron.

2. - Morfologia delle lacune di cristallizzazione.

La morfologia delle inclusioni vetrose nei cristalli di quarzo effusivo (forma beta cristallizzata a temperatura superiore a 573° nel sistema esagonale 622 con l'aspetto di due piramidi riunite da una base comune esagonale e a volte separate da un prisma molto ridotto) varia progressivamente entro due poli estremi rappresentati da cavità senza forma ben definita e da cavità automorfe o cristalli negativi.

2.1. - *Le cavità senza forma ben definita* (Fig. 1 a).

In questa categoria si trovano tutte le lacune la cui forma non può essere espressa da facce cristallografiche. Le figure più semplici sono costituite da cavità a contorno sia rotondeggiante che ovale, si complicano con apparizioni di digitazioni e canali che mettono in comunicazione diverse cavità. Di dimensioni abbastanza notevoli, generalmente superiori ai 100 micron, sono di preferenza localizzate nelle zone più periferiche dei cristalli in prossimità delle facce. Questo aspetto si può osservare frequentemente nei cristalli delle ignimbriti del Katmai (Alaska), in quelli del Mont Dore (Francia) e più raramente nei quarzi delle vulcaniti toscane (Roccastrada, San Vincenzo).

2.2. - *Le cavità automorfe o cristalli negativi* (Fig. 1 b).

I cristalli negativi perfetti definiti come cavità limitate da facce piane obbedienti a leggi cristallografiche precise sono estremamente rari. Si possono distinguere vari tipi di cavità in base alla loro sistemazione in rapporto agli elementi di simmetria del cristallo.

2.2.1. - I cristalli negativi descritti da VOGELSANG (1867) e da LA-CROIX (1901) imitano l'aspetto esterno del cristallo (bipiramide esagonale). L'asse maggiore delle cavità è disposto parallelamente all'asse senario del quarzo, per cui tutte le lacune di questo tipo sono ugualmente orientate. I quarzi detritici del Carniano delle Dolomiti e quelli delle rioliti permiane del sud-est della Francia ne forniscono bellissimi esempi (Fig. 1 c).

2.2.2. - Se le due piramidi sono separate da un prisma ridotto appaiono in posizione equatoriale delle cavità allungate parallele alle facce del prisma e in un piano perpendicolare all'asse senario del cristallo di

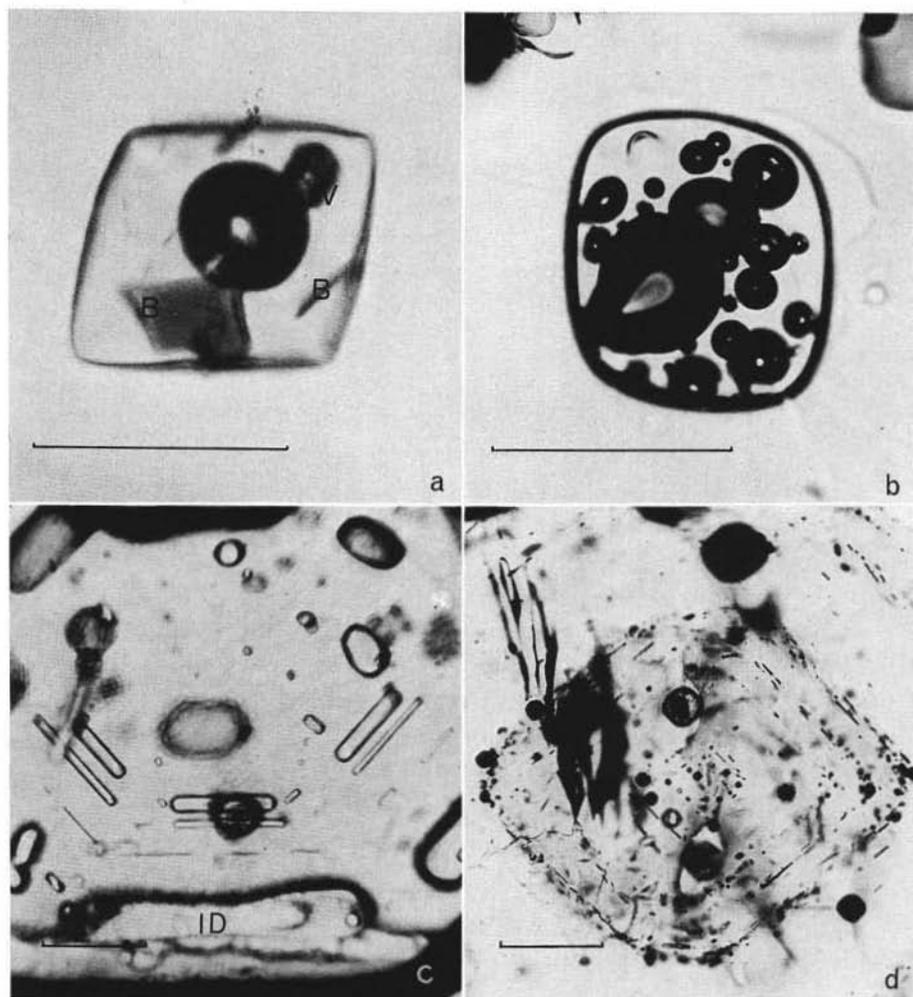


Fig. 2. — *Inclusioni vetrose nel quarzo eruttivo.*

- a) Inclusionione vetrosa a contorno romboedrico con depositi lamellari di biotite rossa (B) e anfiboli verdi (V). Cristallo piroclastico nel carniano superiore delle Dolomiti.
- b) Separazioni in laboratorio della fase gassosa disciolta nel vetro in seguito ad una elevazione di temperatura. Pomici Mont Dore (Francia).
- c) Inclusioni monofasi disposte parallelamente alle facce del prisma. Si noti l'analogia fra inclusioni aperte (ID) e golfi di corrosione. Pomici Mont Dore (Francia).
- d) Disposizione in piani di accrescimento cristallino di cristalli d'apatite e di inclusioni vetrose. Quarzo detritico Santa Lucia (Piccole Antille).

quarzo. Ne risulta una disposizione a corona classica nei cristalli delle pomici del Mont Dore (Francia) (Fig. 2 c).

2.2.3. - Le cavità automorfe parallele alle facce delle piramidi possono presentarsi con l'aspetto di un prisma a base triangolare o di una piramide a base triangolare troncata, inclinate sull'asse senario del cristallo. Questo tipo di lacuna quando si trova alla superficie del cristallo gli conferisce un aspetto scheletrico o a finestra descritto da BAIN nel 1925 nei cristalli delle rioliti d'Agate Point (Ontario) e da CLOCCHIATTI (1972) in quelli delle pomici contenute nelle ignimbriti del Katmai (Alaska) (Fig. 1 b e Fig. 3).

2.3. - *Cavità le cui pareti mostrano una concavità rivolta verso il centro della lacuna* (Fig. 1 c).

Sono caratterizzate da contorni curvi e da facce più o meno penetranti nel quarzo la loro forma varia progressivamente dal cristallo negativo a facce leggermente ricurve alla lacuna di cristallizzazione isodiametrica e tondeggiante. Secondo G. DEICHA (1955) questo aspetto morfologico potrebbe essere dovuto ad una dissoluzione del quarzo da parte dell'inclusione, cioè una corrosione interna. Tali aspetti sono presenti in quasi tutti i campioni di porfido, si trovano per esempio in Italia in tutta la serie dei porfidi permiani delle Dolomiti, nelle vulcaniti toscane e nelle comenditi sarde.

2.4. - *Cavità le cui pareti presentano la convessità rivolta verso il centro della lacuna* (Fig. 1 d).

E' l'aspetto opposto a quello delle inclusioni descritte precedentemente (paragrafo 2.3), anche a questo caso G. DEICHA ha dato un senso genetico corrispondente a un deposito di SiO_2 sulle pareti della cavità.

R. CLOCCHIATTI e J. WEISS (1973) hanno ottenuto il passaggio progressivo da cavità a pareti concave a cavità a pareti convesse lasciando i cristalli di quarzo per 15 giorni a 750° .

Nonostante ciò l'interpretazione genetica deve essere considerata con molta prudenza perchè spesso nello stesso cristallo, e ciò avviene anche in materiali di sintesi, si trovano associate inclusioni con forme antagoniste. Le inclusioni caratterizzate da un deposito di SiO_2 no-

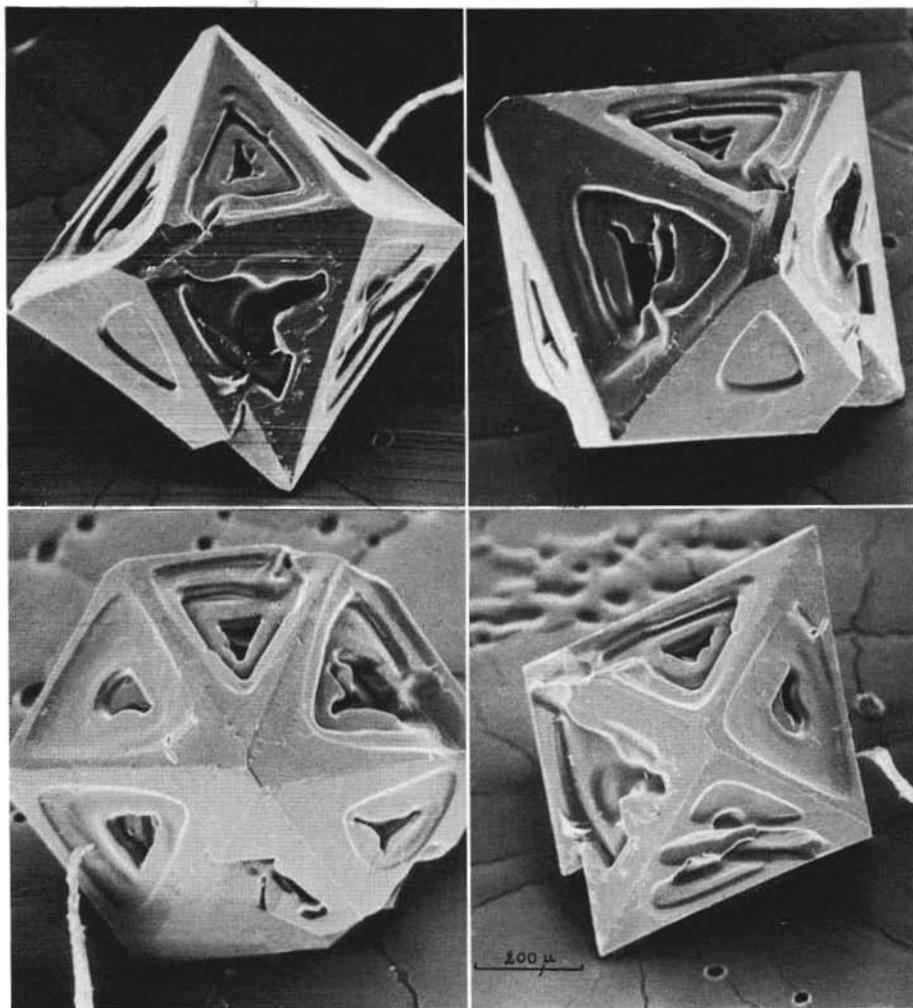


Fig. 3. — Elettromicrofotografie realizzate al Laboratorio di Geologia del Museum d'Histoire Naturelle (Paris).

Differenti orientazioni di un cristallo di quarzo del Katmai a struttura fortemente lacunare.

tevole sembrano corrispondere a rocce di grande profondità (CLOCCHIATTI, WESTERCAMP, 1973) come le daciti della Martinica e della Guadalupa.

3. - Dimensioni - Densità - Disposizioni.

Le dimensioni massime misurate considerando la maggior distanza entro due pareti opposte della cavità possono raggiungere i 500 micron. Nel caso dei porfidi di Jozankei (Giappone) le singole inclusioni occupano volumi dell'ordine di $4.10.7 \mu\text{m}^3$. Globalmente possono occupare nei casi più favorevoli dal 7 al 10% del volume del cristallo. Il microscopio elettronico e la sonda ionica permettono di individuare inclusioni fittissime, localizzate a volte nelle parti centrali dei cristalli, le cui dimensioni singole sono inferiori al micron.

3.1. - I relitti magmatici si dispongono parallelamente ai piani di accrescimento cristallino, questo tipo di localizzazione venne descritto da H. VOGELSANG (1867) in cristalli di leucite e di sanidino. Si ritrova questa disposizione nei cristalli di quarzo a volte accentuata dalla presenza di piccoli minerali bacillari, particolarmente significativo è l'esempio del quarzo di St. Lucie (Piccole Antille). In altri casi le inclusioni sono situate di preferenza al centro del cristallo ove costituiscono un nucleo di cristallizzazione. La disposizione a spirale, frequente nei quarzi della Guadalupa, è stata descritta da G. DEICHA (1955). Il carattere primario o singenetico delle inclusioni vetrose è appunto sottolineato dalla loro disposizione in piani di cristallizzazione.

4. - Il contenuto.

N. P. YERMAKOV (1965) ha stabilito una classificazione delle inclusioni in base al loro stato fisico ed alla natura chimica dei materiali imprigionati nei minerali. I relitti magmatici a causa del loro comportamento a temperatura ambiente (rigidità del vetro, immobilità della bolla) sono stati classificati nel gruppo delle inclusioni solidificate. Contrariamente alle inclusioni solide, già allo stato cristallino al momento dell'incorporazione, le inclusioni solidificate sono imprigionate allo stato fuso. In uno stadio ulteriore possono evolvere

sia in profondità a temperatura elevata, che in superficie durante o dopo il raffreddamento verso lo stato cristallizzato. Si possono distinguere tre grandi categorie di relitti magmatici.

4.1. - *Le inclusioni vetrose monofasi.*

La cavità è occupata solamente da vetro con a volte una bolla di gas di dimensioni molto ridotte. Questo tipo di inclusione è stato descritto nei cristalli di quarzo delle pomici del Mont Dore, della Martinica, della Guadalupa, dell'Afganistan, nelle paleopomici dell'Esterel ed in alcuni granuli detritici delle arenarie della Val Gardena e della formazione a Bellerophon (R. CLOCCHIATTI, G. PERNA, 1973). Sembra dunque che le inclusioni monofasi siano di preferenza localizzate nei cristalli di quarzo delle rocce a raffreddamento molto rapido. Tale raffreddamento produce un fenomeno di tempera che blocca la contrazione differenziale del minerale e del contenuto delle sue inclusioni. Detta contrazione può effettuarsi solo quando il raffreddamento è sufficientemente lento.

4.2. - *Le inclusioni bifasi.*

Accanto al vetro che riempie la parte più importante della cavità appare una bolla o vuoto di ristagno di forma generalmente sferica, più raramente deformata a causa della viscosità elevata del vetro. Il meccanismo d'apparizione della bolla di ristagno è stato descritto da L. BARRABE e G. DEICHA (1957) ed è dovuto al fatto che il vetro raffreddandosi si contrae maggiormente del quarzo.

Se si frattura l'inclusione in una goccia d'olio al tavolino a schiacciamento ideato da G. DEICHA si vede che il gas presente nella bolla ha una pressione inferiore alla pressione atmosferica. In generale i gas si trovano essenzialmente disciolti nel vetro (J. P. CARRON, 1961 - R. CLOCCHIATTI, 1971). Il rapporto vetro/bolla varia passando dalle inclusioni di una roccia ad un'altra, ma è generalmente costante in quelle di uno stesso campione. Le variazioni di questo rapporto traducono dei fenomeni secondari, come la decrepitazione dell'inclusione. Le inclusioni bifasi sono di gran lunga le più frequenti, non solo nel quarzo, ma in tutti gli altri minerali delle rocce effusive.

4.3. - *Le inclusioni plurifasi* (Fig. 2 a).

Sono caratterizzate dall'associazione nella stessa cavità da una fase vetrosa, una fase gassosa e una fase cristallina. La fase cristallina può essere rappresentata da una o più varietà minerali. Per esempio, nelle inclusioni dei cristalli di quarzo della Guadalupa si incontrano sovente nella stessa cavità dei cristalli ottaedrici di ilmenite, dell'apatite in bastoncini, e del pirosseno ortorombico, nelle inclusioni del Carniano Superiore delle Dolomiti sono sovente associati anfiboli di colore verde, titanite e biotite rossa in lamelle esagonali o triangolari. Solitamente si distinguono due grandi categorie di cristalli: i primi sono imprigionati in modo meccanico durante la crescita del quarzo. Essi sono sia isolati nel minerale, che a cavallo entro il minerale e l'inclusione e vengono designati col nome di minerali estranei o imprigionati. I secondi provengono dalla cristallizzazione del vetro dell'inclusione, mentre il cristallo è ancora nella camera magmatica o durante il raffreddamento della roccia, se quest'ultimo è sufficientemente lento. Nel secondo caso si parla di *devitrificazione magmatica* caratterizzata dal fatto che si svolge in ciclo chiuso, senza perdita né apporto di materia, cioè senza alcuna relazione con l'ambiente esterno al cristallo. I minerali che appaiono nel secondo caso sono quarzo che si deposita sulle pareti della cavità, tridimite in cristalli dendritici o arborescenti che si ritrasforma rapidamente in quarzo, minerali ferromagnesiaci verdastrì a sezioni esagonali appartenenti alla famiglia dei fillosilicati ed ossidi di ferro. La separazione effettuata fra queste due categorie di cristalli è artificiale. Infatti potendo il cristallo di quarzo continuare la sua crescita a partire dalle inclusioni, è probabile che se le condizioni fisico-chimiche sono favorevoli, appaiano dei minerali che cresceranno nella cavità. In forza del successivo deposito di SiO_2 sulle pareti della cavità potranno essere imprigionati in parte dal quarzo e in parte dal vetro. Si oppone alla devitrificazione magmatica, la *devitrificazione idro-termale e pneumatolitica* che si effettua in relazione alla penetrazione di fluidi dall'ambiente esterno al cristallo. Le fratture che si creano durante gli assestamenti tettonici servono di accesso ai fluidi; evidentemente le inclusioni di dimensioni maggiori sono le prime ad essere interessate da queste fratture. Il vetro a contatto con le soluzioni si altera in minerali argillosi verdastrì e libera una parte del silicio sotto forma di calcedonio. A volte il contenuto delle inclusioni è quasi completamente asportato.

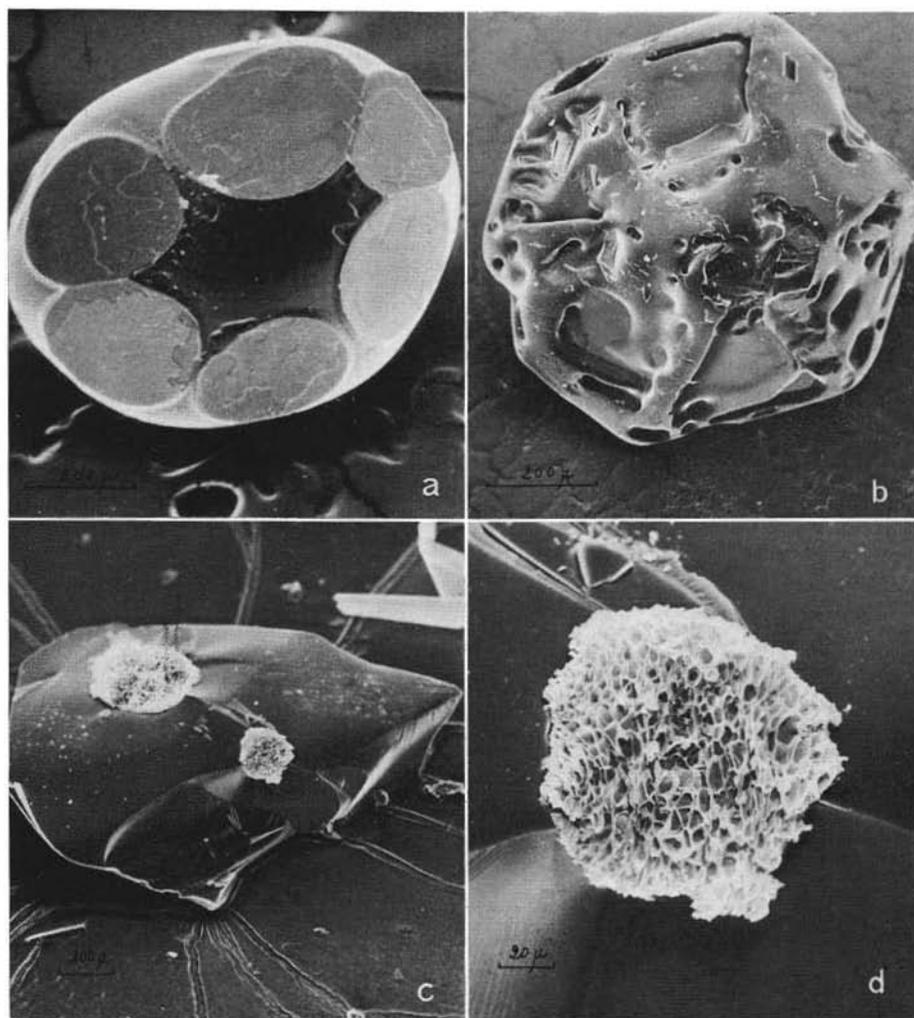


Fig. 4. — Elettromicrofotografie realizzate al Laboratorio di Geologia del Museum d'Histoire Naturelle (Paris).

- a) Quarzo globulare su cui si stanno edificando le facce della piramide. Katmai (Alaska).
 b) Cristallo d'aspetto ameboide. Pomici del Mont Dore (Francia).
 c) + d) Pomici artificiali ottenute dalla decrepitazione di inclusioni vetrose a 900°C. Pomici della Guadalupa (Piccole Antille).

Il riconoscimento dei relitti magmatici diventa sempre più difficile quando la campionatura scende nella serie stratigrafica. Le più vecchie inclusioni rimaste allo stato vetroso conosciute fino ad oggi hanno un'età superiore a 270 milioni di anni (G. DEICHA e A. OVRACHT, 1968). Quelle ricristallizzate, ma riconoscibili sono di età precambriana.

5. - Composizione chimica (Fig. 5).

L'analisi chimica delle inclusioni vetrose presenta notevoli difficoltà di ordine tecnico e analitico. Le analisi di tipo classico sono pres-

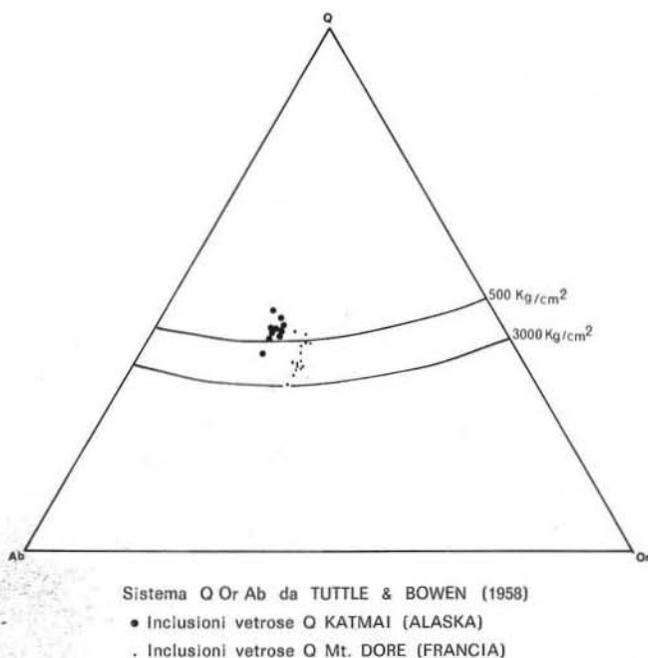


Fig. 5. — Composizione chimica delle inclusioni vetrose riportata nel sistema Q-Or-Ab.

soché impossibili perchè non si riesce a separare meccanicamente il vetro dal quarzo, per di più la quantità di materia estraibile è nella maggior parte dei casi insufficiente. La presenza di qualche minerale

estraneo basterebbe per introdurre degli errori importanti nei risultati. (R. CLOCCHIATTI e J. C. TOURAY, 1971).

Una prima indicazione sulla composizione chimica può essere ottenuta dalla misura dell'indice di rifrazione, infatti i vetri acidi hanno un indice di rifrazione inferiore a quello del quarzo (1,54). Tutte le misure effettuate sulle inclusioni dei cristalli di quarzo sono comprese entro questi due valori: 1,49 e 1,52, il che denota già il loro carattere acido. Si possono distinguere due categorie di vetri in base alla quantità di elementi volatili (CO_2 , H_2O) disciolti: i primi contengono tenori elevati di gas sino a 6-7%, i secondi tenori inferiori all'1% e sono designati vetri secchi. Le fasi gassose sono state analizzate unicamente in modo qualitativo allo spettrografo di massa. Si procede con un dispositivo riscaldante che provoca la trasformazione delle inclusioni in pomici (Fig. 4 c, d) dunque la liberazione dei gas, che vengono introdotti nello spettrografo. Vedremo nel capitolo successivo che la presenza o meno di gas disciolti nel vetro corrisponde a un comportamento diverso al tavolino scaldante. Un vetro ricco di elementi volatilizzabili comincia a fondere verso 500°, un vetro secco a 1000° è ancora solido. Con il miglioramento tecnico in questi ultimi anni delle microsonde elettroniche, come per esempio la possibilità di analizzare elementi leggeri quali il sodio ed il potassio anche in piccole quantità, è stato possibile realizzare il dosaggio quantitativo di tutti gli elementi maggiori. Le analisi sono state eseguite con una microsonda CAMECA MS 46 del B.R.G.M - C.N.R.S. nelle seguenti condizioni: tensione d'accelerazione 12 Kv, intensità primaria 0,02 a 0,06 μA , diametro della sonda superiore a 5 μm (per più ampie informazioni vedere R. CLOCCHIATTI 1971). Per ottenere risultati validi, la superficie analizzata non deve essere inferiore a 2500 μ^2 . Gli standard sono costituiti da vetri naturali e di sintesi di composizione acida introdotti nella preparazione. I risultati di venticinque analisi sono stati riportati in un diagramma triangolare Q.Or.Ab. di TUTTLE e BOWEN (1958). Se si considera l'insieme dei punti si vede che tutti cadono nel campo di stabilità del quarzo in modo più o meno netto, in base alla pressione considerata. Nel caso delle inclusioni dei quarzi della coltre di pomici del MONT DORE (•) i punti rappresentativi delle analisi di vetri si dispongono lungo la valle del minimo cotettico. La stessa disposizione si ritrova per le inclusioni delle pomici del Katmai

(·), in questo caso però le pressioni di formazione sono più deboli Tav. 5. La loro composizione chimica è simile a quella della roccia originaria (BORDET e altri, 1962). Questo si spiega perchè la fase cristallizzata è quantitativamente trascurabile in rapporto a volume di vetro che la contiene.

Gli esempi scelti, anche se non approfonditi in questo quadro, mostrano l'interesse dello studio dei relitti vetrosi nei processi magmatici. Bisogna però tener presente che i risultati possono essere parzialmente modificati dalla migrazione del silicio del vetro verso il cristallo e viceversa. La miglior garanzia contro questo inconveniente è la scelta sistematica di inclusioni di grandi dimensioni e di forma qualsiasi. Sono da escludere i cristalli negativi e le inclusioni di piccole dimensioni.

6. - Termometria ottica (Fig. 6).

Si intende per termometria ottica lo studio dell'evoluzione del contenuto delle inclusioni al tavolino scaldante. Essa è basata sul seguente fenomeno: quando un minerale si raffredda, si contrae e così pure fanno le inclusioni di magma da esso contenute. Nel caso del quarzo si nota, che dopo la brusca dilatazione dovuta alla transizione $\alpha \rightarrow \beta$ a 573° (distorsione del reticolo corrispondente a una variazione dell'angolo di legame tra due tetraedi adiacenti), il minerale non si dilata più. Si potrà allora osservare unicamente la dilatazione del vetro (R. CLOCCHIATTI, 1970). Entro 1000 e 600° la contrazione del vetro è materializzata dall'apparizione di un vuoto di ristagno (L. BARABE e G. DEICHA, 1957) che sarà più o meno compresso al passaggio $\beta \rightarrow \alpha$ in base alla viscosità del magma a quella temperatura. Il principio della termometria ottica consiste nel riscaldare l'inclusione fino a fare sparire il vuoto di ristagno, si ha allora, la *temperatura minima di cristallizzazione del minerale*. Un'altra indicazione è fornita dalla temperatura di decrepitazione dell'inclusione (G. PERNA, 1969) o *temperatura massima di cristallizzazione*. Quest'ultima, nel caso delle inclusioni vetrose, si manifesta a $100-150^\circ\text{C}$ al di sopra della temperatura d'omogeneizzazione della cavità. L'apparecchiatura utilizzata è costituita da un microscopio LEITZ a tavolino riscaldante 1350° con un'ottica non incollata e a grande distanza frontale.

La determinazione di temperatura viene fatta con una termocoppia (Pt-PtRh) ed un galvanometro con blocco di registrazione. Le misure non sono effettuate direttamente, ma su di una curva costruita con punti di fusione di sostanze per analisi estremamente pure. L'evoluzione termica, come è stato accennato nel capitolo pre-

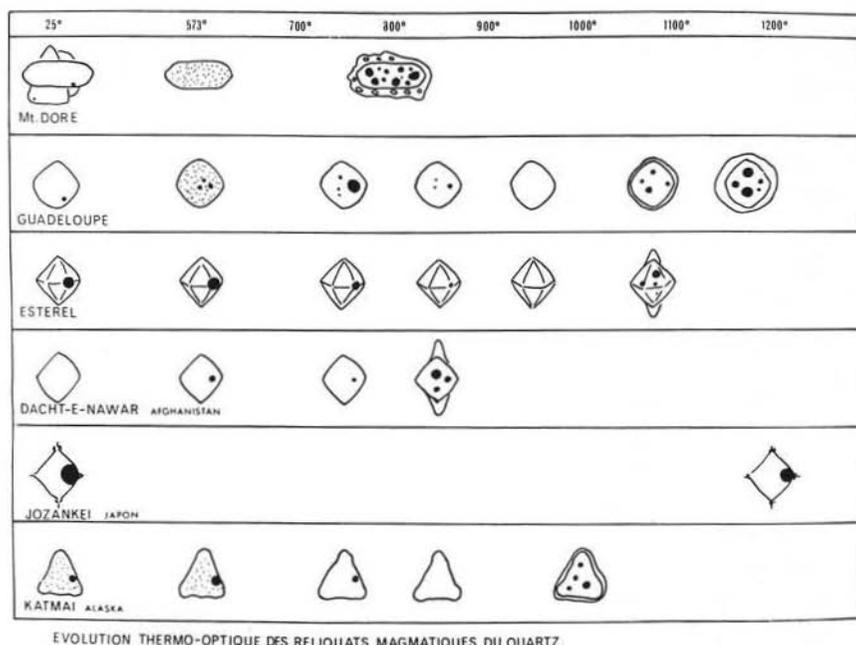


Fig. 6. — Evoluzione termo-ottica di qualche inclusioni vetrosa.

cedente, dipende dallo stato di idratazione del vetro. Si vede per esempio nella Fig. 6 che le inclusioni dei quarzi della Guadalupa, dell'Esterel, del Dacht-e-Nawar e del Katmai hanno a 573° una viscosità sufficientemente bassa da permettere l'aumento di volume della bolla già esistente in certi casi ed in altri l'apparizione del vuoto di ristagno. Nel caso dei vetri degassati, come quelli di Jozankei (Giappone), dei porfidi permiani dei Vosgi e delle Dolomiti non si nota alcun cambiamento fino a temperature superiori a 1000°. Dopo la transizione del quarzo, che si traduce oltre che nell'apparizione di un vuoto di ristagno, in un assombrimento dell'inclusione dovuto al di-

stacco del vetro dalle pareti della cavità si osserva, parallelamente all'aumento di temperatura, la diminuzione del vuoto e infine la sua sparizione. Continuando ad elevare la temperatura lentamente, la dilatazione del vetro provoca la fessurazione delle pareti della cavità, allora il vetro fuso vi si inietta, preceduto dai suoi elementi volatili. All'ingrandimento della cavità corrisponde un aumento di volume che è compensato dalla comparsa di numerosi vuoti di ristagno nel centro dell'inclusione. Questo aspetto si ritrova nei quarzi delle piroclastiti del Dacht-e-Nawar (A. BOUTIERE e R. CLOCCHIATTI, 1971) dove l'accumulazione di energia creatasi poco prima e al momento dell'emissione della roccia provoca la decrepitazione delle inclusioni e la fratturazione dei cristalli di quarzo. Se il riscaldamento è molto più veloce l'inclusione si trasforma in pomice e provoca ugualmente lo scoppio del cristallo. Le prime misure di temperature d'omogeneizzazione per il quarzo eruttivo sono state eseguite da V. B. NAYMOV (1969), che trovava valori compresi tra 1030 e 1320° con una media situata tra 1200 e 1320° e da S. TAKENOUCI (1972) con misure comprese tra 900 e 1200°.

I valori ottenuti presso il nostro laboratorio sono compresi tra 900 e 1000° nel caso delle inclusioni dell'Esterel, tra 850 e 950° per quelle della Guadalupa, tra 800 e 900° per quelle del Katmai e inferiori a 800° nel caso dei quarzi della coltre inferiore delle pomici del Mont-Dore. Non sono stati presi in considerazione i valori superiori a 1100° perchè in questi casi le inclusioni mostrano segni evidenti di modificazioni posteriori alla genesi del cristallo.

Lo studio termo-ottico ci fornisce dunque, delle informazioni sulla temperatura del magma al momento della cristallizzazione, sull'abbondanza degli elementi volatilizzabili nel vetro e tra l'altro ci permette di comprendere il ruolo delle inclusioni vetrose nella fratturazione dei cristalli.

Quest'ultima dipende essenzialmente dalle condizioni fisico-chimiche al momento dell'emissione della roccia.

7. - Applicazioni.

Abbiamo visto che le inclusioni tra l'altro intervengono nella fratturazione del quarzo e ciò non soltanto in rapporto al passaggio $\alpha \rightarrow \beta$ (DEICHA, 1955; J. FOSTER, 1960) ma anche con fenomeni di

riscaldamento eccessivo come la combustione dei gas al momento dell'emissione della roccia.

Esse registrano alcuni degli eventi che interessano il cristallo durante la sua storia geologica. Ne risulta che i relitti magmatici delle pomici, per esempio, sono diversi da quelli delle lave a raffreddamento più lento, che i cristalli e le loro inclusioni emessi nella stessa formazione a momenti e in condizioni diversi presentano caratteristiche dissimili (R. CLOCCHATTI - R. BROUSSE, 1972). Un altro aspetto da sottolineare è quello dei golfi di corrosione caratteristici del quarzo eruttivo come si può leggere nella maggior parte dei trattati di petrografia. Le interpretazioni petrologiche ne fanno allora un minerale instabile anche quando la composizione chimica della roccia totale è tale da ammettere la cristallizzazione di quarzo normativo. La spiegazione si trova facilmente a condizione di studiare il cristallo nella sua integralità e non in sezione sottile. Appaiono allora analogie di forma e di dimensioni tra inclusioni vetrose e golfi di corrosione. In realtà nel 90% dei casi i golfi di corrosione sono in realtà lacune di cristallizzazione, vicine alla superficie del cristallo non ancora chiuse. Ciò è ampiamente confermato dalle analisi dei vetri (esse cadono nel campo di stabilità del quarzo), i quali, sottoposti a temperature di 750° non solo non corrodono il cristallo, ma continuano a liberare silicio. Si prosegue così l'edificazione del cristallo. Senza peraltro negare la corrosione che si manifesta sotto aspetti diversi, queste osservazioni confermano le idee enunciate venti anni fa da G. DEICHA (1953) e più recentemente da MOORHOUSE (1959) il quale nel suo trattato dice: « the suggestion has also been made that corroded quartzes are due to irregular ameboid growth rather than corrosion ». Quest'autore spiega poi, che le forme tondeggianti e corrose dei cristalli di quarzo dipendono dal loro accrescimento in un magma molto viscoso. Questo aspetto si ritrova nei quarzi del Mont-Dore ove la termometria rivela temperature di formazione inferiori a 800°. In questo caso si trovano associati cristalli di forme molto diverse: sferici, a forma di goccia, ameboidi e cristalli quasi idiomorfi. Il termine di lacuna di cristallizzazione dovrebbe sostituire quello di golfo di corrosione la cui interpretazione genetica è indubbiamente erronea nella maggior parte dei casi.

Altre applicazioni possibili ed in corso fornite dallo studio delle inclusioni vetrose sono le determinazioni delle proprietà fisiche dei

magni in presenza di tutti gli elementi volatili e le esperienze di sintesi mineralogiche osservabili al tavolino riscaldante.

Inoltre conoscendo la composizione chimica del vetro e la temperatura di cristallizzazione si può, utilizzando i sistemi d'equilibrio di TUTTLE e BOWEN (1958), calcolare la pressione dunque la profondità alla quale si è formato il magma.

In un campo totalmente diverso da quello della mineralogia e della petrografia vi sono applicazioni di tipo sedimentologico e stratigrafico. Una delle caratteristiche dei quarzi eruttivi sta nel fatto che sono marcati dalle loro inclusioni vetrose. Queste infatti, passando da un campione all'altro presentano forme, densità, indice di rifrazione, evoluzione termo-ottica, composizione chimica diversi. La conseguenza è immediata, conoscendo la roccia madre di un granulo di quarzo si può seguire l'evoluzione del cristallo durante diversi cicli sedimentari (R. CLOCCHIATTI - G. PERNA, 1973), e a volte fissare l'età di una formazione azoica (R. CLOCCHIATTI - J. TOURENQ, 1972) o individuare livelli di vulcanismo aereo in seno a formazioni sedimentarie (R. CLOCCHIATTI e S. SASSI, 1972).

Lo studio delle inclusioni vetrose è suscettibile di fornire utili informazioni a mineralogisti, petrografi e sedimentologisti. Le possibilità di ricerche che esso offre sono ancora numerose. Solo per citare un esempio mancano ancora lavori sistematici sulle inclusioni dei feldspati benchè queste siano ben visibili anche nelle sezioni sottili. Non si devono sottovalutare le difficoltà non solo dal punto di vista interpretativo, ma anche materiale che questi studi presentano. Il miglior modo di evitare questi inconvenienti è di integrare, come già si fa in alcuni paesi, lo studio delle inclusioni nel quadro degli insegnamenti universitari e della ricerca in gruppi pluridisciplinari in modo che non sia più opera di individui isolati.

NOTA BIBLIOGRAFICA

- BAKUMENKO I. T., KOLYAGO S. S., SOBOLEV V. S. (1967) - *Problem of interpreting temperature measurements on vitreous inclusions and first results of tests on artificial inclusions*. Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R., 175, 143-145.
- BARRABE L., DEICHA G. (1956) - *Expériences de fusion et de cristallisation magmatique sur des reliquats vitreux des quartz dihexaèdriques de la Guadeloupe*. Bull. Soc. franç. Minér. Crist., LXXIX, 146-155.

- BARRABE L., DEICHA G. (1957) - *Réanimation de magmas et interprétation de quelques particularités de leurs éléments de première consolidation*. B.S.G.F., 7, 159-169.
- CARRON J. P. (1961) - *Premières données sur la composition chimique de certains reliquats magmatiques*. C.R. Ac. Sc., 253, 3016-3018.
- CLOCCHIATTI R. (1970) - *Détermination du coefficient de dilation volumique des magmas rhyolitiques entre 700 et 900°C, d'après l'étude thermo-optique des inclusions vitreuses des phénocristaux de quartz*. C.R. Ac. Sc., 271, 149-152.
- CLOCCHIATTI R. (1971) - *Composition chimique des inclusions vitreuses des phénocristaux de quartz de quelques laves acides par l'analyse à la sonde électronique*. C.R. Ac. Sc., 272, 2045-2047.
- CLOCCHIATTI R., TOURAY J. C. (1971) - *Remarques sur la note « Aluminium in Quartz as a Geothermometer » de W. G. DENNEN et al.* Contr. Mineral. and Petrol., 30, 356-358.
- CLOCCHIATTI R., BOUTIERE A. (1971) - *Sur les roches pyroclastiques au Nord du Dacht-e-Nawar (Afghanistan). Les quartz et leurs inclusions vitreuses*. Bull. Soc. géol. Fr. (7), XIII, n. 3-4, 430-438.
- CLOCCHIATTI R., TOURENCQ J. (1971) - *Présence de quartz des ponces du Mont-Dore, d'âge pliocène, dans des argiles sableuses du Bourbonnais*. C.R. Ac. Sc., 273, 2453-2455.
- CLOCCHIATTI R., SASSI S. (1972) - *Découverte de témoins d'un volcanisme d'âge paléocène à éocène inférieur dans le bassin phosphaté de Metlaoui (Tunisie méridionale)*. C.R. Ac. Sc., 274, 513-515.
- CLOCCHIATTI R., BROUSSE R. (1972) - *Pétrogenèse des reliquats magmatiques de quartz pyroclastiques*. C.R. Ac. Sc., 274, 349-351.
- CLOCCHIATTI R. (1972) - *Les cristaux de quartz des ponces de la Vallée des Dix Mille Fumées (Katmai - Alaska)*. C.R. Ac. Sc., 274, 3037-3040.
- CLOCCHIATTI 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. Ac. Sc., 276, 3405-3408.
- CLOCCHIATTI R., WESTERCAMP D. (1973) - *Nature et origine des phénocristaux de quartz des laves de la Martinique (Petites Antilles) (sous presse)*.
- DEICHA G. (1953) - *A propos de reliquats magmatiques dans le quartz de première consolidation des roches à deux temps de cristallisation*. Bull. Soc. franç. Mineral. Crist., LXXVI, 457-462.
- DEICHA G. (1955) - *Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides*. In 8°, Masson et Cie, Paris.
- DEICHA G., OVTRACHT A. (1968) - *Stabilité des phases vitreuses d'origine magmatique au cours des temps géologiques*. XXIII International Congress., 2, 255-259.
- FOSTER R. J. (1960) - *Origin of embayed quartz crystals in acidic volcanic rocks*. American Mineralogist., 45, 892-894.
- KOMATSU M., YAJIMA J. (1970) - *Chemical composition of glass inclusions in the phenocrysts of some volcanic rocks*. Proceedings of the Japan Academy, 46, n. 7, 672-677.

- LACROIX A. (1901) - *Minéralogie de la France et des anciens territoires d'Outre-Mer*. A. Blanchard, Paris.
- BORDET P., MARINELLI G., MITTEMPERGER M., TAZIEFF H. (1963) - *Contribution à l'étude volcanologique du Katmai et de la Vallée des Dix Mille Fumées (Alaska)*. Mém. Soc. belg. Géol., n. 7.
- MOORHOUSE W. W. (1959) - *The study of rocks in thin section*. Harper and Bros. New York, 514 p.
- NAYMOV V. B. (1969) - *Thermometric investigation of quenched magma inclusions in the quartz phenocrysts of rhyolites*. Trans. Geokhimiya, n. 4, 494-498.
- PERNA G. (1969) - *Una nuova apparecchiatura per lo studio della decrepitazione*. Rend. Soc. ital. Min. Petr., XXV.
- ROEDDER E., WEIBLEN W. (1972) - *Silicate melt inclusions and glasses in lunar soil fragments from the Luna 16 core sample*. Earth and Planetary Science Letters, 13, 272-285.
- SOBOLEV V. S., BAZAROVA T. Yu., BAKUMENKO I. T. (1972) - *Crystallization temperature and gas phase composition of alkaline effusives as indicated by primary melt inclusions in the phenocrysts*. Bull. Volc., XXXV, fasc. 2, 479-496.
- TAKENOUCI S. (1969) - *Glass inclusions in quartz of volcanic rocks from mining areas*. Proceedings of COFFI, 23.
- TUTTLE O. F., BOWEN N. L. (1958) - *Origin of granite in the light of experimental studies in the system $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O$* . Geol. Soc. Am., Mem., 74.
- YERMAKOV N. P. et al. (1965) - *Research on the nature of mineral forming solutions*. In 8°. Pergamon Press, Oxford, London.
- VOGELSANG G. (1867) - *Philosophie der Geologie und mikroskopische Gesteinsstudien*. In 8°. Max Coln. u. Sohn, Paris.