

ETIENNE BETTETINI, GUY TURCO

DE L'UTILISATION DE LA MACRO
ET MICROKINEMATOGRAFIE APPLIQUEE A L'ETUDE
DES INCLUSIONS DANS LES CRISTAUX ET LES GEMMES,
ET EN PARTICULIER AUX INCLUSIONS FLUIDES

ABSTRACT. — The crystallographic Orientation, that is the ENDOTAXY, makes it possible as to the solid inclusions to ascertain the authenticity of the gems and precious stones.

As to the fluid inclusions, they are the distinctive mark of the liquid and gaseous phases which took place during the genesis and the evolution period of the minerals and the rocks.

Under the effect of the heat one can observe in certain internal cavities of the stones an ebullition; such as an « operation of the open heart » which gives the impression of a beating heart. An inward world animates itself agitating sometimes other solid inclusions floating within the fluid or gaseous realm.

Cinematographic technical makes possible the dynamic study of these phenomena.

Les prises de vue, faites en particulier sur des gemmes dont les faces planes d'observation ont été polies « optiquement », permettent, sans utiliser de liqueur d'indice, ni aucune méthode destructrice, de pénétrer à l'intérieur des pierres d'une façon parfaite, nette et précise. L'utilisation d'objectifs particulièrement adaptés à chaque prise de vue, ainsi que le choix judicieux des éclairages, autorisent l'obtention de grandes profondeurs de champ apportant ainsi le maximum de netteté pour chaque plan. Le film couleur complète les informations captées.

Les cristaux contiennent la plupart du temps des inclusions solides et fluides qui sont une source d'enseignement pour les géologues, les gemmologistes, et les minéralogistes.

L'orientation cristallographique des INCLUSIONS SOLIDES ou ENDOTAXIE permet l'authentification précise des gemmes ou pierres précieuses.

Quant aux INCLUSIONS FLUIDES, elles sont les témoins directs des phases liquides, gazeuses ou fondues qui sont intervenues dans la genèse et dans l'évolution ultérieure des minéraux et des roches.

Sous l'effet de la chaleur, on peut voir dans certaines cavités internes des pierres, un bouillonnement qui, telle une « opération à coeur ouvert », donne l'impression d'un coeur qui bat. Un monde intérieur s'anime, agitant parfois d'autres inclusions solides en suspension dans le milieu liquide et gazeux.

On observe ainsi divers phénomènes curieux et intéressants :

- Passage de l'état liquide à l'état gazeux et inversement
- Disparition et réapparition d'une bulle de retrait
- Phénomène de rétro-ébullition
- Démixtion du CO_2
- Mouvements d'une minuscule particule solide accrochée à une bulle faisant partie d'un ensemble de deux liquides non-miscibles et gazeuse qui se déplace en suivant très fidèlement et immédiatement les variations d'intensité lumineuse.

Intérêt de la cinématographie dans l'étude des inclusions.

La cinématographie, qui permet de *conserver* ce qui est fugace ou rare, est une méthode précieuse pour l'observation approfondie des « inclusions fluides ». Sa technique nous offre la possibilité d'analyses très précises de certains phénomènes dynamiques pouvant s'y produire et que l'observation directe peut ne pas toujours révéler.

Joint au microscope, le cinéma rend possible le changement d'échelle géométrique comme il permet de modifier l'échelle du temps par la combinaison de projections au ralenti ou en accéléré (fig. 1).

L'utilisation de la macro et micro-cinématographie, appliquée à l'étude des inclusions fluides dans les cristaux et les gemmes, permet ainsi de fixer sur la pellicule l'enregistrement de certains mouvements observés dans les « inclusions négatives ».

Ces enregistrements, effectués dans les conditions optimales de leur apparition, peuvent donc reproduire ces observations aussi sou-

vent que l'intérêt scientifique l'exige: il est ainsi possible de mieux les analyser et de discuter leur caractère et leur signification devant un auditoire élargi.

Le cinéma nous offre la possibilité de conserver des images de transformations dont le déclenchement n'est pas toujours facile, ni absolument contrôlable. Le film de surcroît restera toujours un témoin précieux de phénomènes s'étant produits dans des édifices depuis disparus par destruction soit au cours d'expériences soit en des circonstances fortuites.

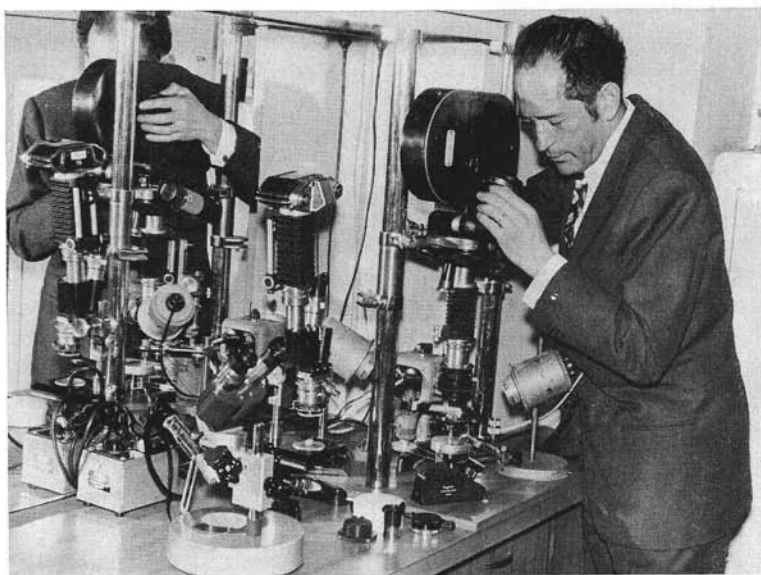


Fig. 1. — Matériel de prise de vue.

La communication des faits détectés est ainsi rendue plus facile et plus vivante surtout au-delà des frontières. Le cinéma devient alors, dans le domaine des « inclusions fluides » en particulier, un moyen d'échange mais, encore plus, un moyen extraordinaire d'investigation et de diffusion de la connaissance.

Cette note est un extrait du mémoire de la thèse de Doctorat d'Université qui a été soutenue en Novembre 1973, à laide de documents photographiques et cinématographiques à l'Université de Nice.

Application aux séquences filmées.

1°) RÉTRO-ÉBULLITION.

Dans un quartz améthyste clair, une inclusion négative (dont la forme rappelle un peu celle d'une cornue) présente le phénomène de la *rétro-ébullition*. En effet, après un léger échauffement du cristal, simplement dû à l'éclairage à *partir de +28°C*, quelques secondes après l'allumage, une vaporisation s'amorce, dure quelques secondes, et le phénomène *s'arrête à +30°C*.

La transformation état liquide \rightarrow état gazeux est alors complète et achevée. Il suffit de laisser refroidir pour voir s'opérer la rétro-ébullition: le gaz revient à l'état liquide; toutefois on peut observer qu'au refroidissement, la démixtion du CO_2 en deux phases s'effectue avec un léger retard. (Il semble intéressant de noter que ce retard à la séparation des phases présente une certaine analogie avec le retard observé à l'apparition des germes cristallins.)

Il a pu ainsi être filmé l'apparition d'un brouillard de gouttelettes suivi de l'apparition simultanée de plusieurs petites bulles gazeuses.

Ce phénomène ne peut être pleinement saisi et parfaitement précisé qu'à l'aide de la cinématographie. Sa fugacité et sa finesse font que l'observation directe en est assez difficile. La révélation des mouvements de ces fluides n'apparaît même bien souvent qu'après le développement des films.

2°) BULLE DE RETRAIT (fig. 2).

Une bulle de gaz peut parfois se trouver enfermée dans une inclusion négative (comme celle qui disparaît et réapparaît lors de l'avant dernière séquence du film de Thèse (*)). Si cette bulle est comprise dans une inclusion liquide comme c'est le cas, on peut supposer que le cristal-hôte a grandi à température élevée et que l'inclusion était liquide lors de sa capture.

Au cours du refroidissement du cristal l'inclusion liquide diminue de volume et, la cavité étant hermétiquement close, un vide se forma.

(*) Ce film est déposé au Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie de l'Université de Nice (Parc Valrose Nice).

Une bulle de gaz s'est alors dégagée du liquide. *C'est une bulle de retrait* dont la disparition dans la séquence cinématographique est due à une élévation de température provoquée par l'éclairage au delà de $+25^{\circ}\text{C}$. Le phénomène se termine à $+26^{\circ}\text{C}$.

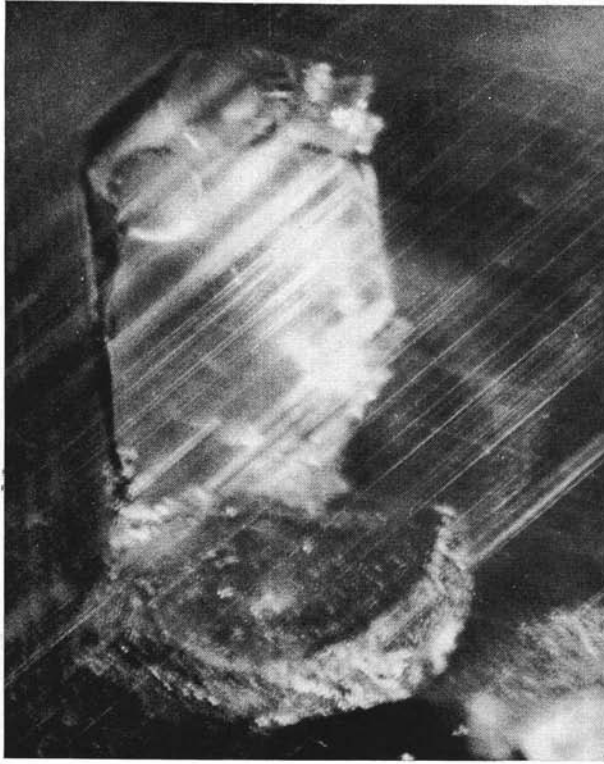


Fig. 2. — Bulle de retrait dans un SAPHIR
(dimension de l'inclusion 1 millimètre).

(Photos Bettetini)

Le liquide, en s'échauffant, se dilate et dissout la bulle. Il remplit alors tout l'espace disponible à l'intérieur de la cavité (fig. 4).

Après refroidissement de la gemme (ici un saphir), la bulle faite de la vapeur du même liquide reprend sa place initiale et sa forme primitive (figg. 3 et 4).

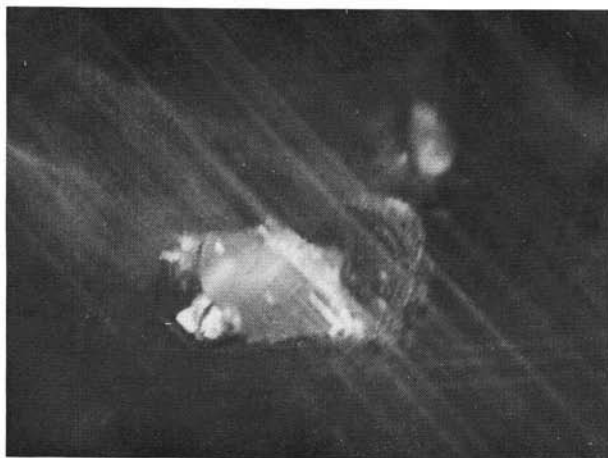


Fig. 3.

Dans le coin gauche, en bas de l'inclusion, la bulle gazeuse a son volume maximum (+ 25°C).



Fig. 4.

La bulle gazeuse dissoute dans le liquide, après échauffement (+ 26°C).

Fig. 3, 4. — Bulle de retrait dans un SAPHIR. (Protos Bettetini)

Il est intéressant de noter que la nucléation des bulles ne se produit pas forcément à leurs points de disparition. Elles se reforment presque toujours en des endroits différents sous forme de plusieurs petites bulles qui s'agglutinent ensuite en une seule, laquelle revient à sa place de départ.

La mise en évidence de cette observation n'a été possible que par l'enregistrement des phases successives sur film.

3°) PHÉNOMÈNE D'AUTO-FLOTTATION DANS UN QUARTZ-AMÉTHYSTE.

Dans un cristal de quartz-améthyste un corps sphérique se déplace, comme dans un niveau à bulle, à l'intérieur d'une cavité et cela suivant l'inclinaison donnée à l'échantillon.

Dans cette sphère d'un diamètre égal à un millimètre environ, une bulle plus petite se trouve en état d'auto-flottation, au centre. (Son diamètre: un dixième de millimètre (fig. 5).



Fig. 5. — On distingue, au centre de la sphère, la bulle flottante à laquelle est accrochée une particule solide (partie claire sous la bulle). (dimension de la sphère 1 millimètre) (Photo Bettetini)

Le phénomène pourrait s'expliquer de la manière suivante: il s'agit probablement d'une cavité remplie d'eau où flotte une goutte d'un autre liquide (anhydride carbonique ou hydrocarbure) entourant la bulle gazeuse de petit diamètre.

Accrochée à cette bulle une particule solide, peut-être de la pyrite ou particule d'or (Machairas, Berne 1970), flottant en équilibre parfait de sustentation, s'anime à la moindre variation de température.

En faisant varier l'intensité lumineuse, donc la température, à l'aide de filtres anti-caloriques on peut voir la particule se déplacer et suivre très fidèlement et immédiatement les variations imposées.

Ce phénomène est dû à la naissance de courants de convection ⁽¹⁾ et à la variation de concentration consécutifs à l'établissement de gradients de température et de pression.

Cette particule prend alors des positions étranges, s'accroche et se décroche de la bulle centrale, donne enfin « l'impression de naître à la vie » sous l'action de la chaleur.

Les trois états de la matière *solide-liquide-gazeux* sont ainsi réunis.

Le liquide ayant entraîné avec lui au cours de la formation du cristal, un minuscule fragment minéral (sulfure de fer ou autre...) lequel se trouve ainsi enfermé dans l'inclusion liquide du cristal-hôte; la composition chimique de l'ensemble est vraisemblablement:

- de l'anhydride carbonique liquide,
- de l'eau contenant des sels en solution,
- une infime particule d'un composé métallique non défini.

4°) ÉBULLITION.

À une pression donnée, chaque corps entre en ébullition à une température fixe qui se maintient constante pendant la durée de l'ébullition.

La température d'ébullition est celle pour laquelle la tension de vapeur du liquide est égale à la pression exercée par la vapeur à sa surface.

L'ébullition peut être faite sous pression plus ou moins forte. Dans ces conditions, la température d'ébullition est d'autant plus élevée que la pression est plus haute. Il existe une pression limite-au-dessous de laquelle le liquide, même à basse température, peut entrer en ébullition.

La déroulement de ce phénomène est parfaitement suivi grâce à la mobilité de l'image cinématographique.

⁽¹⁾ Déplacement du fluide provenant des parties chauffées, par suite de la variation de densité: effet le plus important de la propagation de la chaleur au sein d'une masse fluide.

5°) ÉBULLITION ET RÉTRO-ÉBULLITION DANS UN SAPHIR.

Les phénomènes d'ébullition et de rétro-ébullition observés dans des saphirs (corindons) sont presque toujours dus à du CO_2 emprisonné sous pression à l'intérieur du cristal.

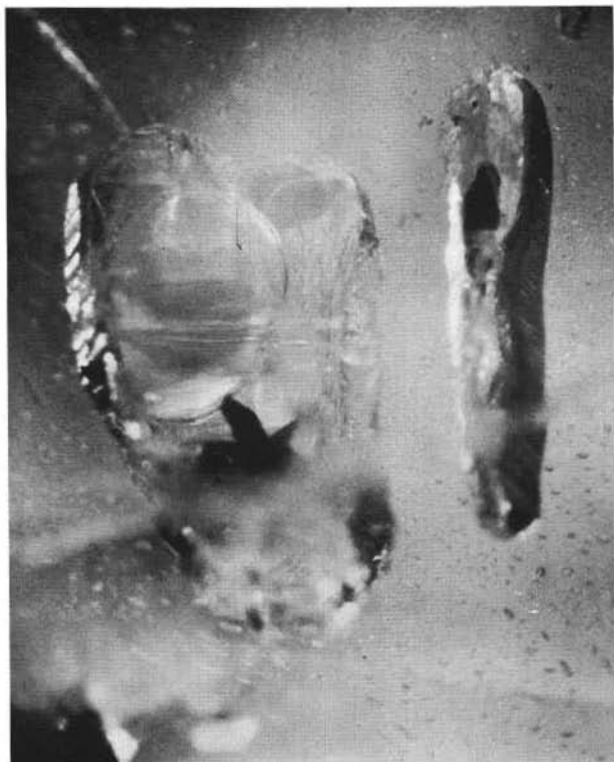


Fig. 6. — Ebullition et rétro-ébullition dans un SAPHIR (dimension de l'inclusion 1 millimètre). (Photos Bettetini)

A température ambiante (à moins de 25°C pour les pierres observées) le CO_2 se trouve à l'état liquide, dont une partie peut rester à l'état gazeux: on observe ainsi la présence d'une ou plusieurs libelles (petites bulles gazeuses). Lorsqu'on chauffe l'échantillon, on observe, suivant le procédé, la direction et le trajet des rayons lumineux, plusieurs cas:

a) *Déplacement des libelles* (Observation faite dans un saphir de Ceylan, entre $+27^{\circ}\text{C}$ et $+28^{\circ}\text{C}$). Il arrive assez fréquemment que les libelles se déplacent. Ce phénomène serait dû au fait qu'au moment où le liquide se dilate par l'augmentation de température, les bulles gazeuses deviennent plus petites, se dégagent du « piège » causé par la morphologie de l'inclusion et se déplacent jusqu'au « piège » suivant qui sera également abandonné lorsque la diminution du volume permettra une nouvelle migration (S. OGNAR).

La cinématographie permet alors de mettre en évidence ces pièges en les décourrant successivement lors des projections.

b) *Disparition de la bulle de retrait*: entre $+25^{\circ}\text{C}$ et $+26^{\circ}\text{C}$ (dans un saphir de CEYLAN) la bulle se résorbe et disparaît (fig. 3 et 4).

c) *Ébullition et rétro-ébullition*: entre $+26^{\circ}\text{C}$ et 29°C dans un saphir de Ceylan un bouillonnement se produit agitant des particules solides en suspension dans le milieu liquide et gazeux (fig. 6-7-8).

Lorsque le phénomène est achevé, il suffit de laisser refroidir la pierre pour que le gaz se liquéfie à nouveau, la rétro-ébullition s'amorce et la ou les libelles se reforment.

Il est à noter que le phénomène peut inlassablement être reproduit et surtout *indéfiniment entretenu*.

En effet, au cours d'expériences multiples afin de déterminer les durées des mouvements consécutifs aux prises de vue, le fait d'utiliser des filtres anti-caloriques entraîne une régulation précise de la température, ce qui permet au phénomène de se poursuivre sans interruption.

L'observation peut se poursuivre durant des heures... des jours... de l'état liquide à l'état gazeux, redevenant liquide pour se transformer à nouveau. Cela prouve bien qu'à une certaine profondeur sous terre, dans des conditions de températures idéales, il y a certainement, au plus profond des cristaux et surtout dans les gemmes, des mouvements se produisant sans arrêts modulant l'éternelle palpitation de l'univers.

Si l'observation microscopique directe et l'étude approfondie physico-chimique des Inclusions (fluides en particulier) et notamment leur forme, leur aspect, leur composition chimique, leurs caractères physiques, fournissent de précieux renseignements aux spécialistes des Scien-

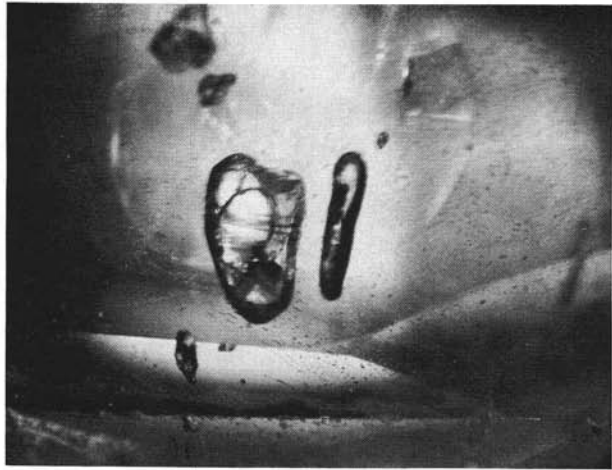


Fig. 7.
Début du phénomène
à + 26°C.

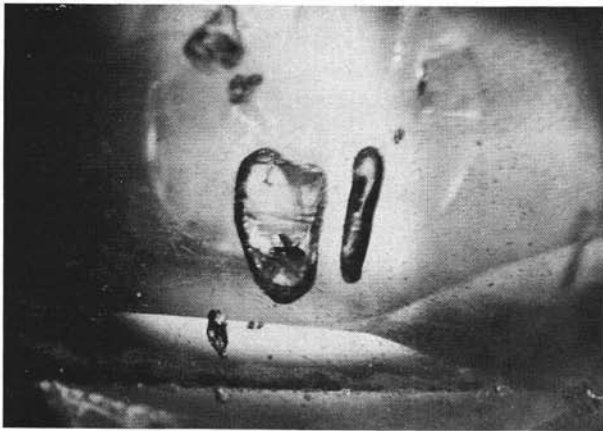


Fig. 8.
Fin du phénomène
à + 29°C.

Fig. 7 et 8. — Ebullition et rétro-ébullition dans un SAPHIR. (Photos Bettetini)

ces de la Terre (géologues, minéralogistes, gemmologues), le procédé cinématographique qui fixe les images sur la pellicule, permet leur transmission, leur conservation indéfinie et, lors de la projection, la reproduction de la dynamique des transformations enregistrées aussi souvent que l'intérêt scientifique l'exige.

Son emploi systématique met en évidence les mouvements des fluides dans la matière, et constitue une voie d'accès à la connaissance plus complète des circulations dans les profondeurs de l'écorce terrestre.

Ce travail a été effectué dans le cadre des recherches entreprises en collaboration entre l'E.R. « Stabilité et Réactivité des minéraux » associée au C.N.R.S., du Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie de l'Université de Nice (Directeur, Professeur G. TURCO) et l'E.R. « Centre d'Etudes des inclusions fluides » du C.N.R.S. à l'Université de Paris VI (Directeur G. DEICHA, Directeur de Recherche C.N.R.S.).

BIBLIOGRAPHIE

- DEICHA G. (1955) - *Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides*. Ed. Masson, Paris 1955.
- DEICHA G. (1970) - *Le degré de liberté des solutions géochimiques dans le règne minéral; rapports entre les phases cristallogénétiques et les inclusions fluides des minéraux*. Bull. Soc. Sui. Pét.-Min., 50.I.1970, pp. 25-35.
- GUBELIN E. S. (1969) - *De la nature des inclusions minérales dans les pierres précieuses*. Journal Suisse d'horlogerie et de bijouterie, n° 3-4-5.
- MACHAIRAS G. (1970) - *Association des inclusion fluides et des particules d'or dans le quartz aurifère*. Bull. Sui. Min.-Pét., 50.I.1970, pp. 167-171.
- OGNAR S. (1968) - *Etude géothermométrique des minéraux plombozincifères et satellites du crétacé de la plaine de Foussana - Tunisie centrale*. Thèse Université de Toulouse, n° 234, p. 110.
- TOURAY J. C. (1968) - *Recherches géochimiques sur les inclusions à CO₂ liquide*. Bull. Soc. Franç. Min. Crist., 91, pp. 367-382.