

Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie
Band: 50 (1970)
Heft: 1: Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralien

Artikel: Analyse thermo-optique des familles d'inclusions à dépôts salins (principalement halite)
Autor: Touray, J.C.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-39240>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Analyse thermo-optique des familles d'inclusions à dépôts salins (principalement halite)

Par *J. C. Touray* (Paris) *)

Avec 3 figures dans le texte

Abstract

The Ariadne thread of this work has been a search for the causes of the dispersions observed during the study, on the heating stage, of primary salt-bearing inclusions, either in a same crystal or in different samples from the same occurrence, apparently grown simultaneously.

The case of synchronous inclusions is of special interest in such a perspective. Their study shows in some occurrences (at least for fluorite) a dispersion occurring in a small range. By exemple: $\pm 10^{\circ}\text{C}$ for a hundred of inclusions occurring in the same growth zone. Evidently, this range is an upper limit to secondary effects (leakage and necking-down) whose influence may have been lesser. Postulating, on this observation, that more generally secondary effects are negligible with respect to primary ones (trapping of solid salts, variations of the thermodynamic parameters in the ore-forming fluids) it is possible to design some evolution-models for mineral-forming hypersaline brines.

Three cases have been studied with details:

- An hydrothermal vein (fluorite from El Hammam, Maroc).
- An occurrence of halite, whose recrystallisation occurred under the influence of Volcanism (halite from Dallol, Ethiopia).
- An occurrence of so called "authigenic" minerals (albite from Roc-Tourné, France).

Résumé

Le fil directeur du travail présenté a été la recherche des causes de la dispersion des mesures thermométriques, souvent observée lors de l'étude à la platine chauffante des inclusions primaires à dépôts salins d'un même cristal ou de plusieurs cristaux d'un même gîte.

Le cas des familles d'inclusions synchrones permet de montrer, au moins pour la fluorine, que les causes secondaires sont d'importance minime pour autant que l'on raisonne d'un point de vue statistique. On peut considérer comme vraisemblable que la dispersion observée pour les familles d'inclusions formées successivement résulte de causes primaires, autrement dit qu'elle est géologiquement significative.

*) E.R. C.N.R.S., N° 45, Laboratoire de Géologie E.N.S., 24, rue Lhomond, Paris 5e.

Ayant rappelé les bases des interprétations thermométriques et barométriques pour les inclusions à dépôt d'halite, on présente les résultats relatifs à trois cas :

- Un filon „hydrothermal classique“ (fluorine d'El Hammam, Maroc).
- Un gîte d'évaporites recristallisé sous l'influence de venues volcaniques (halite de Dallol, Ethiopie).
- Un gisement de minéraux réputés authigènes (albite du Roc Tourné, France).

L'utilisation de diagrammes T_s — T_b ou T_s — T_s — T_b) permet de proposer des modèles évolutifs des saumures minéralisantes dans ces trois cas, sous l'angle des variations des paramètres thermodynamiques suivants : Salinité, Température et Pression.

Introduction

1. Généralités

Indépendamment des exsolutions, la présence dans les minéraux d'inclusions solides associées ou non à des phases fluides largement développées est due essentiellement à trois processus :

- piégeage de solides préformés,
- dépôts intracavitaires,
- dépôts fissuraux.

A titre d'exemples, le premier cas correspond aux soies du rubis, le second aux inclusions pluriphasées des émeraudes de Colombie, le dernier aux cristaux d'halite présents dans certains plans de clivage de gypses actuels.

La distinction entre ces diverses origines ne pose habituellement pas de problèmes. Elle peut cependant être délicate, voire impossible quand il s'agit d'espèces facilement solubles. Ainsi, dans la halite de Dallol, Ethiopie (cf. infra), la sylvite et la carnallite existent en inclusions solides, parfois sous forme de grains mixtes formés d'un cristal de chaque espèce. Lorsqu'elles se trouvent associées à une phase liquide largement développée, il devient difficile de faire la part de ce qui a été englobé et de ce qui s'est déposé ultérieurement lors du refroidissement des échantillons.

Par ailleurs, toute étude d'inclusions fluides suppose implicitement que les diverses phases présentes au sein des cavités intracristallines sont à l'équilibre. En fait, on connaît deux catégories de métastabilité relevant l'une de l'absence de phase gazeuse, l'autre de l'absence de phase solide. Si le premier phénomène est bien connu (DEICHA, 1955), le second a été moins souvent décrit (PRINTZ, 1882). Il est probable cependant qu'il n'est pas exceptionnel : nous avons pu le mettre en évidence dans la fluorine d'Ouezzane, Maroc (TOURAY, SABOURAUD, à paraître) comme dans celle d'El Hammam, Maroc (YAJIMA, TOURAY, 1967) et il est raisonnable de faire figurer ces inclusions métastables sans phases solides (avant réfrigération) dans la catégorie des inclusions à dépôts salins.

2. Définition

Le but de cette communication est de présenter quelques résultats d'études minéralothermométriques dans lesquelles l'analyse des populations complète celle des individus.

Je me suis limité à l'étude des ensembles d'inclusions fluides représentant des prélèvements simultanés ou successifs d'une saumure hypersaline localement et temporairement isolée vis à vis des apports de matière provenant d'autres sources que les phases avec lesquelles elle est en équilibre. Dans la suite de l'exposé, j'appellerai de tels ensembles (donnant au refroidissement une population d'inclusions à dépôts salins et dont l'isolement s'est effectué dans des conditions de température variables ou non) „familles d'inclusions à dépôts salins“. On remarquera que cette définition est un cas particulier d'une formule plus générale qui permet de définir aussi bien des familles d'inclusions à CO₂ liquide par exemple (TOURAY, 1968). Il est entendu que les inclusions d'une même famille se retrouvent en général dans plusieurs cristaux d'un même gîte.

Une question pratique importante consiste à savoir si toutes les inclusions primaires d'un même cristal appartiennent ou non à une seule famille et si certaines des inclusions secondaires peuvent y être rattachées. J'en ai jugé sur chaque cas particulier, peut-être de façon arbitraire, en postulant que le fait se traduirait par des brisures nettes dans les caractéristiques des inclusions amenant à y individualiser des populations distinctes. Quoi qu'il en soit, le concept de famille d'inclusions constitue un cadre théorique au sein duquel j'ai pu formuler, à partir des données de l'analyse thermo-optique, quelques modèles d'évolution des saumures minéralisantes.

I. Principes des interprétations géothermométriques et géobarométriques: cas des inclusions à dépôts salins

I. 1. Généralités

On peut classer en deux catégories les données de la platine chauffante relatives aux inclusions à dépôts salins:

- Celles pour lesquelles la température de disparition de la phase solide (T_s) est inférieure ou égale à T_b , température de disparition de la phase gazeuse.
- Celles pour lesquelles au contraire T_s est supérieure à T_b .

L'interprétation, dans la première situation, se ramène à celle que l'on donne dans le cas classique des inclusions biphasées: la température de formation de l'inclusion est supérieure ou égale à T_b . De plus, la valeur de T_s permet de calculer la salinité de l'inclusion en „équivalent NaCl“, grandeur que l'on

doit déterminer par microcryoscopie dans le cas des inclusions à solutions sous saturée.

Dans le second cas, la température de formation est supérieure ou égale à T_s , température d'homogénéisation totale. De plus, la valeur de la différence: $T_s - T_b$ peut s'interpréter d'un point de vue barométrique moyennant quelques hypothèses et la connaissance de données expérimentales relatives au système NaCl - H₂O. Les résultats les plus directement utilisables sont extraits de ceux de KLEVTSOV et LEMMLEIN (1959) qui donnent les valeurs des „corrections à la pression“ pour des concentrations variables en NaCl. On supposera que le diagramme construit pour des solutions à 20% de NaCl s'applique à des solutions plus concentrées (de 30 à 40% NaCl) et, par ailleurs, que la présence éventuelle d'une certaine proportion d'ions Ca⁺⁺ ou K⁺ ne modifie que faiblement ces diagrammes. Du fait de ces hypothèses, les valeurs des pressions que l'on peut obtenir à l'heure actuelle doivent être considérées comme des approximations assez grossières.

Dans ces conditions, $T_s - T_b$ représente une „correction à la pression“ minimale, exacte dans le cas où la saumure mère était à saturation. Le diagramme de KLEVTSOV-LEMMLEIN permet de transformer en pression minimale cette „correction“ sans qu'il soit nécessaire de connaître très précisément la température de formation des inclusions; on constate en effet que les isobares sont pratiquement parallèles à l'axe des températures.

I. 2. Exemples

Albites du Roc Tourné (France) (YAJIMA, TOURAY, IYAMA, 1967). Les modes des histogrammes de distribution des valeurs de T_s et T_b sont respectivement de 300–330° et 150–170°. $T_s - T_b$ vaut donc 150° C ce qui correspond à 1700 bars sur le diagramme de Klevtsov-Lemmléin, que l'on peut arrondir à 1,5 kilobar: valeur *minimum* de la pression *moyenne* ayant présidé à la formation des albites du Roc Tourné¹).

Fluorine d'Ouezzane (Maroc). Les cristaux renferment des inclusions secondaires métastables qui, après réfrigération à l'azote liquide, se transforment d'inclusions monophasées en inclusions triphasées. (TOURAY, SABOURAUD, à paraître.) T_s vaut: 129° à 141° et T_b : 89° à 52° C. On obtient pour $T_s - T_b$ 100°, ce qui correspond à 1200 bars (que l'on peut arrondir à 1 kilobar).

Il est probable en l'occurrence que les chiffres obtenus sont des chiffres exacts et non des minima (malheureusement, les inclusions sont secondaires!). En effet, l'observation au microscope montre que ces inclusions métastables pas-

¹ Si l'on considère les valeurs les plus extrêmes (fig. 3) de la pression on atteint 2,2 Kb, sans tenir compte de la différence de compressibilité entre saumures à 20% de NaCl et 35–40%. Il est donc fort possible que la pression *réelle* ait été aussi forte que 3 Kilobars à certains moments.

sent latéralement à des inclusions secondaires triphasées „anormales“ (cristaux d'halite proportionnellement trop gros). Nous interprétons ces faits en suggérant qu'il peut s'agir d'un phénomène de „necking down“ à l'échelle des plans de clivage: après injection d'une saumure hypersaline proche de la saturation dans des clivages ouverts, il y a eu, au refroidissement, cristallisation d'halite avant que le mécanisme de formation de chambres et piliers n'ait amené l'individualisation des cavités secondaires. Quand celle-ci s'est produite, il y a pu avoir piégeage, dans certaines lacunes, de cristaux d'halite déjà formés. Autrement dit, il semble qu'il y ait eu, à un stade du refroidissement de la fluorine d'Ouezzane, formation de *dépôts fissuraux*. De ce fait, la phase liquide piégée dans les inclusions aujourd'hui métastables était, au moment de l'individualisation de ces cavités, à saturation en NaCl: la valeur de T_s donne donc la température réelle à laquelle s'est opéré ce processus, et $T_s - T_b$ permet d'estimer avec toutes les extrapolations indiquées la pression correspondante.

Dans le même minéral, les cavités primaires donnent 205° à 225° pour T_s et 120° environ pour T_b (détermination rendue imprécise par le phénomène de décrépitation discrète). $T_s - T_b$ vaut donc environ 100° . Cette valeur est évidemment „trop faible“ car elle est approximativement la même que celle obtenue pour les cavités secondaires. On en déduira que pour les cavités primaires, la valeur mesurée de $T_s - T_b$ donne une estimation de la pression de formation des inclusions *nettement inférieure à la réalité*, ce qui signifie que la saumure minéralisante était *nettement au-dessous de la saturation en NaCl* lors de la cristallisation de la fluorine.

II. Dispersions d'origine essentiellement secondaire d'après l'étude des familles d'inclusions synchrones

II. 1. Généralités

Divers arguments d'ordre géométrique permettent de savoir si des cavités intracristallines se sont formées simultanément ou quasi-simultanément: c'est très souvent le cas des inclusions secondaires d'une même cassure cicatrisée, c'est à un moindre degré le cas des cavités primaires d'un même fantôme de croissance.

L'étude de telles familles d'inclusions formées simultanément ou presque est, d'une manière générale, d'un grand intérêt: c'est le plus sûr moyen pour obtenir des informations sur l'homogénéité à petite échelle des fluides profonds par exemple les mélanges H_2O - Hydrocarbures liquides, qui forment des émulsions, ou les mélanges CO_2 - H_2O , pour lesquels il est plus difficile de conclure (TOURAY, 1968). Dans la perspective qui nous intéresse, c'est-à-dire l'explication de la dispersion des mesures minéralothermométriques, l'étude de telles inclusions permettra d'éliminer la plupart des causes primaires, de la même

façon qu'en génétique humaine, l'étude des jumeaux permet de distinguer le rôle du milieu et le rôle du génotype sur l'expression du phénotype.

II. 2. Causes des dispersions d'origine secondaire ²⁾

On doit mentionner d'abord les effets mécaniques dûs à la confection des préparations. Il s'agit de véritables artefacts qui se traduisent par une augmentation du volume des bulles gazeuses. Ce phénomène est particulièrement visible lors de la réalisation de lamelles de clivage de gypse. Au chauffage, par ailleurs, le phénomène de décrépitation perturbe les mesures: il peut se manifester soit de façon explosive, soit de façon discrète: au cours de mesures effectuées en compagnie de J. YAJIMA, on a pu constater plusieurs fois une brusque augmentation du volume de la phase gazeuse ou même sa réapparition à une température supérieure à celle où elle avait disparu. Dans des minéraux peu résistants et de basse température comme le gypse, cette décrépitation discrète (pouvant avoir eu lieu au soleil avant récolte de l'échantillon) est susceptible d'amener des erreurs difficiles à détecter vu la petitesse de leur ordre de grandeur: parfois moins de 20° C.

Les causes proprement secondaires invoquées classiquement sont la perte d'étanchéité („leakage“) et l'effet d'étranglement („necking down“). Diverses expériences (ROEDDER, SKINNER, 1968) montrent que le premier phénomène n'a pas la généralité que certains auteurs ont voulu lui accorder. Le second phénomène correspond, à l'échelle d'une cavité, à ce que nous avons décrit dans la fluorine de Djebel Tirrémi, Maroc (TOURAY, 1969) et dans celle d'Ouezane, Maroc (cf. paragraphe I): une lacune se fragmente en plusieurs chambres distinctes, postérieurement à la démixtion de son remplissage fluide. Toute la question est de savoir quelle est la fréquence du processus. Il est probable qu'il est avant tout conditionné par la morphologie des cavités, la présence de canalicules reliant entre elles des chambres isodiamétriques devant largement de faciliter.

II. 3. Exemples

Dans le cas où les saumures à NaCl-H₂O sont pauvres en CO₂, les cavités synchrones qui se forment ont des remplissages apparemment identiques, exception faite du cas où la phase liquide est métastable. L'analyse thermo-optique permet, par une approche plus fine, de confirmer cette impression en termes quantitatifs, qu'il s'agisse d'ailleurs d'inclusions à dépôts salins ou d'inclusions à saumure saline sous saturée. Les mesures que nous avons effectuées sur des inclusions synchrones à dépôts salins portent principalement sur les inclusions de la fluorine.

²⁾ On peut négliger les erreurs sur les mesures, ingénieuses à $\pm 2^\circ\text{C}$ en général.

Dans le cas des inclusions primaires (YAJIMA, TOURAY 1967 et 1970), on constate que les histogrammes des valeurs de T_b et T_s ont pour enveloppe approximative des courbes de Gauss dont la „largeur à mi-hauteur“ n'excède pas 20° C.

Dans le cas des inclusions secondaires, la dispersion est encore plus faible. Ainsi, dans la fluorine d'Ouezzane (cf. paragraphe I.2) les „largeurs à mi-hauteur“ sont respectivement 5° C et 3° C pour les histogrammes relatifs à T_s et T_b .

On peut en conclure, pour le cas des inclusions de la fluorine, que les causes secondaires de dispersion énumérées précédemment peuvent être négligées. Il est plausible de généraliser ce résultat aux inclusions des minéraux plus durs que la fluorine; ce postulat ne peut évidemment être appliqué comme une règle absolue: on connaît en effet les inclusions décrépitées des quartz hydrothermaux en enclave dans les roches effusives; mais dans un cas semblable, l'effet de perte d'étanchéité ne peut échapper à l'examen.

III. Dispersions d'origine essentiellement primaire

III. 1. Généralités

L'étude à la platine chauffante des cavités primaires d'un même cristal ou d'un lot de cristaux analogues d'un même gisement montre souvent une assez forte dispersion des résultats. Nous avons vu qu'on peut la considérer comme essentiellement d'origine primaire. Dans le cas des inclusions biphasées, pour lesquelles on dispose des seules valeurs de T_b , il peut être difficile d'interpréter le phénomène en termes géologiques.

Dans quelques cas particuliers cependant, divers auteurs (YERMAKOV et al., 1965) ont pu suivre d'une zone de croissance à la suivante, dans des cristaux de quartz, une variation régulière des températures d'homogénéisation. Dans certains cas, cette variation est accidentée de brisures interprétées comme de petits épisodes de réchauffement perturbant quelque peu la monotonie (au sens mathématique) du refroidissement des saumures hydrothermales.

Les cristaux permettant de telles études sont cependant exceptionnels. Je n'ai guère observé d'inclusions à dépôts salins distribuées selon des fantômes successifs que dans quelques fluorines. Du fait de cette rareté, pour pouvoir proposer des interprétations dans un plus grand nombre de cas, j'ai été amené à construire des diagrammes ne tenant pas compte de la distribution géométrique des inclusions. Il s'en suit que leur interprétation suppose *explicitement* que l'évolution des solutions minéralisantes ait été monotone, au sens mathématique du terme. Soulignons que la méthode proposée n'est pas forcément fructueuse et que bien des dispersions observées restent, pour le moment, indéchiffrables (SABOURAUD, TOURAY 1970).

III. 2. Exemples

III. 2.1. Exemple de la fluorite d'El Hammam (Maroc)
(Inclusions à dépôt d'halite)

Les données relatives à plusieurs échantillons de ce gîte (YAJIMA, TOURAY, 1969) sont reportées figure 1. On constate que les résultats pour chacun des échantillons ne sont que des parties d'un même ensemble continu formant un nuage de points allongé presque parallèle à l'axe des abscisses. Cela revient à dire que chacun des cristaux étudiés n'a „enregistré“ qu'une fraction des événements ayant donné naissance au filon auquel il appartient.

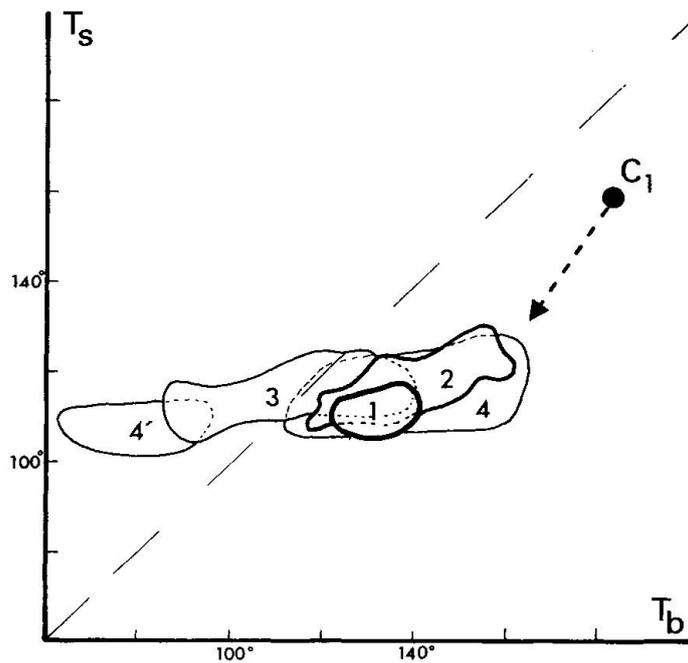


Fig. 1. Diagramme $T_b - T_s$ pour la fluorite du gîte d'El Hammam (Maroc).

1. K. 42: provenance Galerie K. 51 mesures
2. K. 37: provenance Galerie K₁. 52 mesures
3. K. 38: provenance Niveau 3, taille 38. 49 mesures
4. K. 40: provenance Niveau 2 (dé-pilage). 4' correspond à des mesures faites sur des inclusions pseudo-secondaires. 64 mesures.

C_1 : Calcite I, valeurs moyennes de T_b et T_s (22 mesures).

Pour la clarté du dessin, on a représenté seulement les cerces ceinturant pour chaque cas les nuages de points représentatifs. Explications dans le texte.

Le simple examen des résultats montre:

- que l'évolution s'est faite à salinité constante (environ 30% en poids en équivalent NaCl), pendant une part importante de la phase de dépôt de la fluorite massive,
- que la „correction à la pression“ est d'au moins 20 à 30° C pour les inclusions primaires de l'échantillon n° K 38 et d'au moins 40° C pour les inclusions pseudo-secondaires de l'échantillon n° K 40.

L'hypothèse de la constance de la pression de formation est nécessaire pour mener plus loin l'interprétation. On peut alors appliquer à toutes les valeurs de T_b , en particulier aux plus élevées (160°), la correction à la pression minimale de 20 à 30° C (40° C si l'on tient compte des inclusions pseudo-secondaires de l'échantillon n° K 40).

Finalement, on peut proposer le modèle suivant: température décroissante depuis 180–190° C (au moins) jusqu'à 110°–120° C (au moins). Pression: 300 à 400 bars (au moins).

Avant cet épisode, il y a probablement eu dilution de la saumure initiale, comme l'indiquent les résultats relatifs à la calcite I, premier minéral de la paragenèse (fig. 1).

III. 2.2. Exemple de la halite de Dallol (Ethiopie) (Inclusions à dépôts de sylvite et carnallite)

Les échantillons étudiés, qui seront décrits ultérieurement (TOURAY, VARET, en préparation) proviennent du „cratère d'explosion phréatique“ de la région de la mine de potasse de Dallol.

Les résultats sont reportés figure 2. On constate, à l'examen du diagramme que les points sont distribués selon trois „tendances générales“:

- Une verticale à l'aplomb de la valeur $T_b = 45^\circ$ C environ.
- La diagonale $T_b = T_s$.
- Une horizontale au niveau de la valeur $T_s = 100^\circ$ C environ.

Sachant que la région de Dallol est encore active au point de vue volcanique et qu'il existe des anomalies géothermiques locales aussi bien spatiales que temporelles, on peut proposer le modèle suivant: A pression très faible (quel-

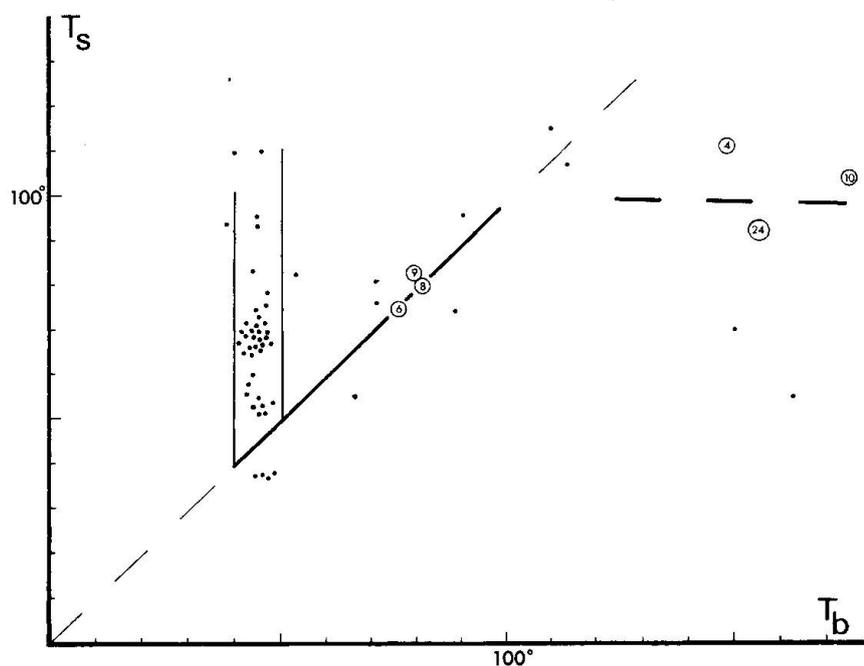


Fig. 2. Diagramme $T_b - T_s$ pour les inclusions multiphasées de la halite de Dallol (dans le cas où les inclusions renferment à la fois sylvite et carnallite, c'est la température de disparition du dernier dépôt salin présent qui est appelé t_s). Les chiffres cerclés de noir indiquent un certain nombre de points représentatifs très voisins.

ques atmosphères ou quelques dizaines d'atmosphères), il y a recristallisation d'halite, d'origine évaporitique, en présence de cristallites de sylvite et de carnallite; température: 45° C environ. Ensuite débute une anomalie géothermique locale correspondant à une augmentation de la température et de la salinité des saumures interstitielles. Lorsque le stock de carnallite et de sylvite est totalement passé en solution, l'évolution se fait à salinité constante. La température est alors d'au moins 150° C et l'augmentation simultanée de la pression amène l'explosion phréatique.

Il est probable que ce modèle doit être compliqué par la mise en jeu de mélanges avec des solutions directement liées à des émanations volcaniques; on observe en effet dans certaines des inclusions la présence de chlorure ferrique en solution (leur donnant une coloration jaune vif).

III. 2.3. Exemple des albites du Roc Tourné (France)

(Inclusion à dépôt d'halite)

Les mesures à la platine chauffante donnent des résultats assez dispersés avec cependant un maximum à 300–330° C pour T_s et 150–170° C pour T_b sur les histogrammes de fréquence (YAJIMA, TOURAY, IYAMA, 1967). Si l'on construit un diagramme $T_s - (T_s - T_b)$ on constate que la distribution des points n'est pas quelconque mais qu'ils sont distribués autour d'une droite de pente positive (fig. 3). L'interprétation de ce diagramme suppose une hypothèse préalable (soit A soit B).

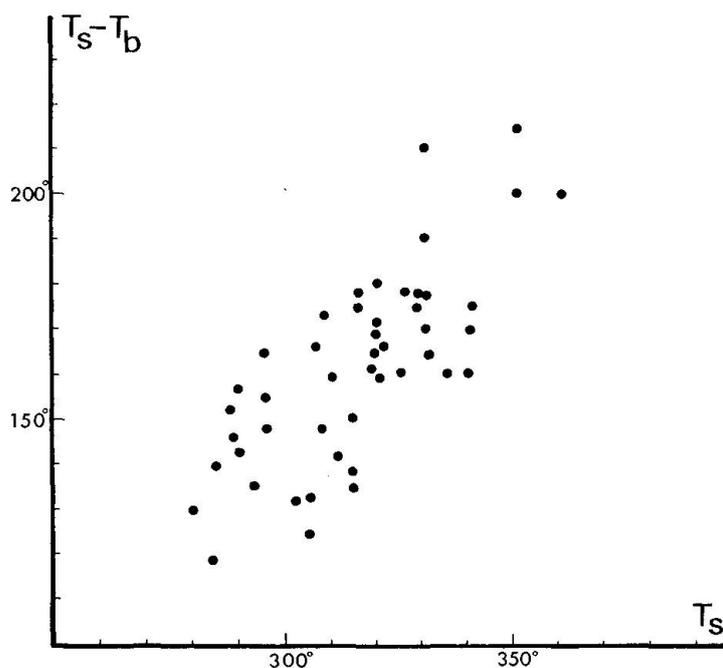


Fig. 3. Diagramme $T_s - (T_s - T_b)$ pour les albites du Roc Tourné (France). La pente de la droite D peut s'interpréter en termes de gradient géothermique (voir texte).

A. Solution minéralisante saturée en NaCl (ou au voisinage de la saturation)

Si l'on considère comme général³⁾ le critère optique mis en évidence dans le cas de la halite de Dallol, pour démontrer l'existence de la saturation (présence en inclusions solides des minéraux existant sous forme de dépôts salins) on doit rejeter cette hypothèse pour le cas des albites du Roc Tourné. Il est possible cependant que la solution se soit trouvée peu au-dessous du seuil de saturation. On peut alors proposer l'interprétation suivante:

Chaque valeur de T_s est la valeur réelle de la température de formation de l'inclusion correspondante comme l'est chaque valeur de pression obtenue à partir des valeurs de $T_s - T_b$ et du diagramme de KLEVTSOV-LEMMLEIN. La pente de la „droite expérimentale“ obtenue permet de calculer la valeur du gradient géothermique local. Dans l'hypothèse d'une pression lithostatique exercée par des roches de densité moyenne 2,7 et pour plusieurs pentes possibles (correspondant à des estimations extrêmes de la pente de la droite expérimentale) on trouve des résultats compris entre 22° C et 32° C par kilomètre. Sachant que les estimations ne tiennent pas compte des différences de compressibilité entre saumures à 20% et 35%-40% de NaCl, il s'agit de chiffres approchés. On remarquera que ces valeurs sont assez proches de celle du gradient géothermique normal. L'hypothèse d'une pression hydrostatique paraît devoir être rejetée, car elle amènerait à diviser par 2,7 le chiffre obtenu, ce qui donnerait alors une valeur trop faible pour la région considérée. Inversement, dans l'hypothèse d'une anomalie thermique locale, il faudrait faire appel à des suppressions, s'ajoutant à la pression de charge, pour rendre compte des résultats expérimentaux.

En résumé, dans le cadre de ce premier modèle, il est possible d'obtenir des informations sur la relation qui existait entre gradient géothermique et gradient de pression au moment où se sont formés les échantillons d'albite du Roc Tourné.

B. Solution minéralisante sous saturée en NaCl

Chaque valeur de T_s est alors inférieure à la température de formation de l'inclusion correspondante. Par ailleurs, on constate une diminution régulière de la salinité des saumures avec la profondeur⁴⁾ qu'on ne peut plus expliquer par un contrôle dû aux valeurs des solubilités de NaCl.

³⁾ Il est probable que le degré de déséquilibre cristallogénétique dans lequel se trouvent les solutions minéralisantes conditionne soit le développement de germes nombreux soit au contraire la croissance de quelques nucléi privilégiés. Dans ce dernier cas, les cristaux d'halite seront de grande taille et les chances de fossilisation „in cristallo“ très réduites.

⁴⁾ On suppose que pression et profondeur sont reliées linéairement; de plus, en toute rigueur, les valeurs de $T_s - T_b$ donnent seulement des estimations *minimales* des pressions de formation. Il est cependant raisonnable d'admettre que les variations de ces estimations se font dans le même sens que celles des pressions.

Le modèle de la sous-saturation rend donc délicate l'interprétation de ce point. On peut supposer l'existence de dilutions successives par des eaux douces, mais on sort alors du cadre des „familles d'inclusions“ et il faut expliquer la régularité des variations de T_s et $T_s - T_b$. Cette seconde hypothèse semble donc peu vraisemblable.

Dans l'une ou l'autre hypothèse un point d'interprétation conjecturale reste l'importance (environ 150°C) de la valeur de „l'abscisse à l'origine“, extrapolée à pression nulle à partir de la droite expérimentale. Dans l'hypothèse de la saturation, le fait équivaut à l'existence, réelle ou virtuelle, de sources thermales à un moment donné; il rend plausible une anomalie géothermique locale, nécessairement accompagnée d'une anomalie géobarique comme l'indique le paragraphe précédent.

Finalement, on notera qu'un argument géologique de poids en faveur du modèle de la saturation (ou quasi saturation) est la valeur même des chiffres obtenus (caractéristiques du „faciès à zéolites“) qui s'accorde assez bien avec les observations pétrographiques faites dans la région de Modane (BOCQUET, 1969).

Conclusions

L'idée directrice de ce travail a été la recherche des causes de la dispersion des mesures souvent observée lors de l'étude thermo-optique des inclusions fluides, et l'interprétation de ces dispersions en termes pétrologiques. Au sein de ce thème général, je me suis limité à l'étude des inclusions à dépôts salins, plus riches d'information et moins étudiées que les inclusions biphasées.

Le cas des familles d'inclusions synchrones permet de montrer, au moins pour les inclusions de la fluorine, que les causes secondaires sont d'importance minime. On peut donc considérer que la dispersion des résultats relatifs aux familles d'inclusions formées successivement résulte de causes primaires au moins pour l'essentiel. L'une de ces causes est l'entraînement possible, à l'état préformé, de cristallites du minéral qui se déposera ultérieurement dans les cavités intracristallines. L'autre est la variation régulière des paramètres thermodynamiques du fluide minéralisateur.

Dans le cadre du concept de „famille d'inclusions“, qui suppose que les variations de composition des saumures se font seulement par échange avec les phases avec lesquelles elles sont en équilibre (en l'occurrence, des phases solides), on peut proposer des modèles d'évolution des solutions hypersalines naturelles.

Après avoir rappelé comment on peut interpréter en termes géothermométriques et géobarométriques les données de la platine chauffante relatives aux inclusions à dépôts salins, j'ai présenté les résultats relatifs à trois cas étudiés de façon détaillée :

- Un filon de type hydrothermal „classique“: le gîte de fluorite d'El Hammam, Maroc.
- Un gîte d'évaporites recristallisé sous l'influence de venues volcaniques: Halite de Dallol, Ethiopie.
- Un gisement de minéraux „authigènes“: Albites du Roc Tourné, France.

Au point de vue thermodynamique, ces trois cas correspondent respectivement à trois modèles différents:

- Pression constante et température décroissante.
- Pression constante et température croissante.
- Pression et températures décroissantes.

Ces modèles, où délibérément ne figure pas le facteur „mélange entre solutions“ sont donc complémentaires de ceux que l'on a proposés, à plus grande échelle, pour expliquer la composition et la salinité des eaux connées (CARPENTER, MILLER, 1969) ou l'origine des solutions mères des gîtes stratiformes (SAWKINS, 1969).

Bibliographie

- BOCQUET, J. (1969): Sur les minéraux de métamorphisme du Roc du Bourget. C. R. somm. Soc. géol. France, p. 50-52.
- CARPENTER, A. B. and MILLER, J. C. (1968): Geochemistry of saline subsurface water, Saline County (Missouri). Chemical geology, Amsterdam, p. 135-167.
- DEICHA, G. (1955): Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides. Masson, Paris.
- KLEVTSOV, P. V. et LEMMLEIN, G. G. (1959): Correction à la pression pour les températures d'homogénéisation des solutions aqueuses de NaCl. Doklady 128, p. 1250-1253 (en russe).
- PRINZ, W. W. (1882): Les enclaves du saphir du rubis et du spinelle. Bruxelles (H. Manceaux).
- ROEDDER, E. and SKINNER, B. J. (1968): Experimental evidence that fluid inclusions do not leak (abst). Amer. Geophys. Union Trans. 49, p. 357-358.
- SAWKINS, F. J. (1968): The significance of Na/K and Cl/SO₄ ratios in fluid inclusions and subsurface waters. Econ. Geol. 63, p. 935-942.
- TOURAY, J. C. (1968): Recherches géochimiques sur les inclusions à CO₂ liquide. Bull. Soc. Minéral. Cristallogr. 91, p. 367-382.
- YAJIMA, J. et TOURAY, J. C. (1967): Observations sur la sursaturation des liquides inclus dans les cristaux de fluorine. C.R. Acad. Sci., Paris, 264, p. 1129-1132.
- YAJIMA, J., TOURAY, J. C. et IYAMA, J. T. (1967): Les inclusions fluides d'Albites de la région de Modane. Bull. Soc. franç. Minéral. Cristallogr. 90, p. 394-398.
- YERMAKOV, N. P. (1965): Research on the nature of mineral-forming solutions. Int. series of monographs in Earth Sciences, 22, Pergamon Press.