



HAL
open science

Les grandes étapes du développement de l'étude des inclusions fluides

Michel Dubois

► **To cite this version:**

Michel Dubois. Les grandes étapes du développement de l'étude des inclusions fluides. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2003, 3ème série (tome 17), pp.1-22. hal-00916750

HAL Id: hal-00916750

<https://hal.science/hal-00916750>

Submitted on 10 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TRAVAUX
DU
COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE
- Troisième série -
T.XVII (2003)

Michel DUBOIS
Les grandes étapes du développement de l'étude des
inclusions fluides

COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGEO) (séance du 12 mars 2003)

Résumé.

L'étude des inclusions fluides est très ancienne. Les premières observations et les essais de caractérisation datent de l'époque de la naissance de la géologie moderne (1810-1830). Six grandes étapes ont ainsi été distinguées : 1) les toutes premières observations, 2) les premiers essais de caractérisation dans le cadre du débat finissant entre neptunistes et plutonistes (années 1820), 3) la conceptualisation dans le cadre de la question sur l'origine des granites, où s'exprime le père fondateur de la discipline H. C. [Sorby](#) (années 1840-1860), 4) le repli, voire l'abandon (fin XIX^e siècle – Seconde Guerre mondiale) lié aux doutes profonds concernant l'intérêt de la méthode, recul marqué en Occident mais pas en Union soviétique, 5) la renaissance (années 1945-1970), 6) l'époque moderne avec l'élargissement des techniques de caractérisation et des champs d'application. L'histoire des recherches dans cette discipline a connu des accélérations et des ralentissements et a été largement influencée à la fois par les grandes théories de la géologie, les développements techniques et les autres disciplines scientifiques.

Mots-clés : inclusions - gemmologie - minéralogie - cristallographie - pétrologie - XIX^e siècle - XX^e siècle.

Abstract.

The study of fluid inclusions is very ancient. First observations and chemistry characterisation took place at the beginning of the XIXth century. Six main steps were distinguished : 1) preliminary observations, 2) first analytical tests in the scope of the finishing debate between neptunists and plutonists (years 1820), 3) conceptualisation during the middle of the XIXth century when geologists were dealing with the origin of granites, and the extraordinary work of H. C. [Sorby](#), 4) the regression of the end of the XIXth century to the middle of the XXth century, in

reaction to the doubts on the method in the West, whereas research on the subject went on in the Soviet Union, 5) the reappearance in the years 1945-1970, and finally 6) the modern period and the development of new techniques and enlargement of the scope of application. The story of fluid inclusions has undergone acceleration and slowing down stages and has been influenced by the great theories of geology and other sciences.

Introduction

L'étude des inclusions fluides est, dans sa phase moderne, une discipline jeune qui a à peine cinquante ans. Cette discipline fait maintenant partie des techniques de base pour caractériser les fluides anciens dans des domaines aussi variés que les bassins sédimentaires, les domaines métamorphiques et magmatiques, les gîtes minéraux, les domaines fracturés et même les corps extra-terrestres. La découverte de l'existence des inclusions fluides est pourtant pluricentenaire, probablement même antique, et les premières études datent de la période des débuts de la « *géologie scientifique* ». En effet, dès les années 1820, on trouve des travaux analytiques et expérimentaux sur le sujet et l'article que l'on peut considérer comme fondateur remonte à 1858 (Sorby, 1858a).

L'objectif du présent article est de montrer comment l'étude des inclusions fluides s'est finalement imposée comme outil en géologie, malgré une longue période de doute, voire de dépréciation, dont l'origine sera discutée. Six grandes étapes de l'évolution de la discipline ont été définies, en fonction des grands débats sur l'origine des roches, notamment celles qu'on qualifie maintenant de magmatiques, et des relations avec les autres disciplines en marge desquelles elle se situe. Les avancées techniques sont brièvement rappelées.

Les inclusions fluides : les principes

Les inclusions fluides sont de petites cavités à l'intérieur des minéraux. Ces cavités ont une taille de moins d'un micromètre à plusieurs centaines de micromètres. Elles contiennent des micro-volumes du fluide présent dans la roche à un moment donné de son évolution et en sont pratiquement les seuls témoins directs. Leur étude permet d'avoir accès à deux types d'informations capitales en sciences de la Terre : la composition de la phase fluide et les conditions de pression et température (c'est-à-dire la géothermobarométrie) qui régnaient dans l'environnement.

Les inclusions fluides sont en général composées de deux phases à température ambiante, une phase liquide et une phase vapeur sphérique issue de la contraction du fluide, plus importante que celle du minéral qui le contient. Mais, d'autres phases peuvent être présentes, comme des solides ou un liquide immiscible avec l'eau (Fig. 1).

Pour valider les données issues de l'étude des inclusions fluides, il est nécessaire de faire trois postulats. Le

premier stipule que la composition du fluide piégé n'a pas varié depuis le piégeage. Selon le second postulat, le volume de l'inclusion fluide n'a pas varié depuis le piégeage. Enfin, on considère que le micro-volume de fluide était homogène au moment du piégeage.

D'un point de vue chimique, ces postulats font de chaque inclusion fluide un système particulier. En effet, les deux premiers conduisent à considérer une inclusion comme un système à composition constante (isoplèthe) et à densité constante (isochore). L'exploitation des données d'inclusions fluides en termes de géothermobaromètres nécessite donc de connaître parfaitement la nature des constituants du système et les propriétés thermodynamiques P - V - T - x de ce système. Toutes les techniques mises en jeu depuis les prémisses ont donc emprunté à la chimie thermodynamique les éléments nécessaires pour tenter de caractériser ces objets et leurs conditions de formation.

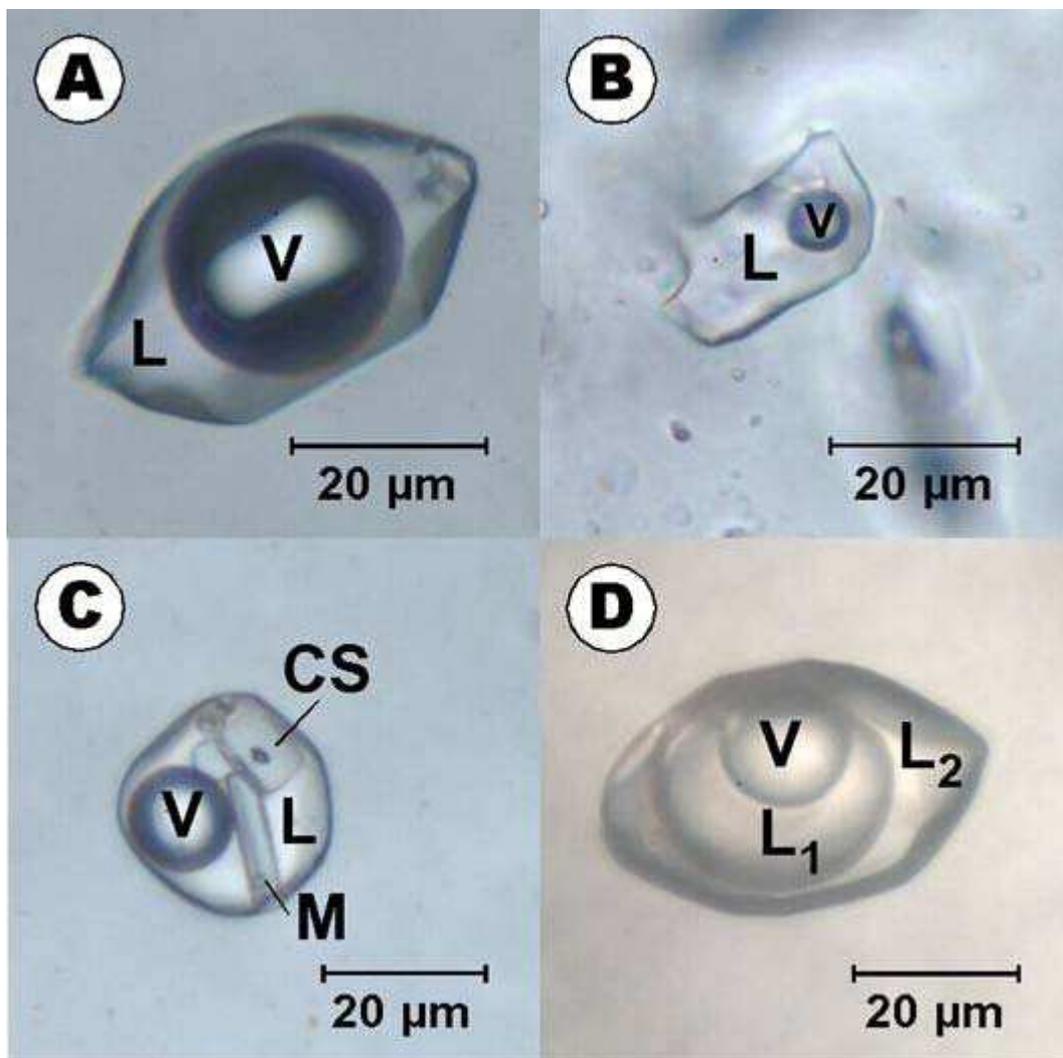


Figure 1. Quelques exemples d'inclusions fluides.

A. Inclusion fluide biphasée avec un remplissage vapeur fort. B. Inclusion fluide biphasée avec un remplissage vapeur moyen. C. Inclusion fluide triphasée avec un cube de sel (CS), un minéral en baguette (M) et d'autres solides. D. Inclusion fluide triphasée comprenant deux liquides (notés L_1 et L_2) immiscibles. L = liquide. V = vapeur. Pegmatite de la Crête du Tanargue, Dôme du Velay, Ardèche (Dubois, 1992).

L'étude d'une inclusion fluide est rendue difficile par le fait même qu'il s'agit d'une cavité remplie de liquide à l'intérieur d'un solide. On peut distinguer quatre grands groupes de méthodes : 1) les méthodes optiques qui ont pour but de repérer les positions des inclusions dans les cristaux et d'évaluer la proportion de vapeur qui est une fonction de la température de formation, 2) les méthodes d'extraction et d'analyse du fluide, 3) les méthodes basées sur le comportement des différentes phases en fonction de la température (microthermométrie), 4) enfin les méthodes spectroscopiques qui consistent à déterminer la nature et la proportion des constituants à partir des interactions entre différentes formes de rayonnement et le contenu de l'inclusion.

L'analyse des inclusions fluides se situe à l'interface de plusieurs disciplines. Elle fait d'abord partie de la minéralogie, en ce sens que les inclusions sont des parties intégrantes des minéraux et influent sur leurs propriétés. Ensuite, elle apporte des informations fondamentales en géologie globale, par les estimations de pression et de température qu'elle apporte. De plus, l'interprétation des données d'inclusions fluides, notamment en microthermométrie, requiert de plus en plus les apports de la chimie des solutions (voir Spencer *et al.*, 1990), des propriétés *P-V-T-x* et des modèles thermodynamiques (voir par exemple Van den Kerkhof, 1988 ; Dubessy *et al.*, 1992 ; Thiéry *et al.*, 1994). Enfin, depuis peu, elle se rapproche de plus en plus de la physique par l'application des techniques spectroscopiques.

Sa position à l'interface de plusieurs disciplines a largement influencé le développement de la discipline dont nous détaillerons les six grandes étapes.

Étape 1 : Les premières observations

Les inclusions (solides ou fluides) sont responsables de certaines propriétés optiques des cristaux et notamment des gemmes (les « jardins »^[1]). Aussi, les premières mentions d'inclusions dans les cristaux sont-elles très anciennes et traduisent l'intérêt antique des hommes pour les pierres précieuses. Pline, dès le I^{er} siècle, évoque « certaines petites inclusions, défauts et vésicules, qui ressemblent à de l'argent » visibles dans les pierres précieuses (traduit de Hughes, 1997). Claude, au IV^e siècle, écrivit neuf épigrammes avec le titre *De crystallo cui aqua inerat* (Wiesheu & Hein, 1998). Toutefois, selon Lemlein (cité dans Roedder, 1984), la première description spécifique d'inclusions date du XI^e siècle. Elle est due au savant arabe Abu Rayhan [al Burini](#) (973-1050) qui a discuté de la qualité gemmologique des pierres précieuses, dont le rubis, en en recensant les défauts visibles (Hughes, 1997). Bien plus tard, les observations d'inclusions ont été utilisées pour tenter de comprendre l'origine des pierres et des gemmes. Les observations d'inclusions dans des cristaux de quartz par [Sténon](#) (Sténon, 1669), par [Boyle](#) (Boyle, 1672), puis par Scheuchzer (Wiesheu & Hein, 1998) ont montré la nature aqueuse des cavités et établi dès lors une relation entre la formation des cristaux de quartz et l'eau dont ils sont issus par précipitation, et non par cristallisation comme on le pensait classiquement depuis [Aristote](#). C'est vers le tournant du XIX^e siècle que vont se multiplier de brèves descriptions d'inclusions dans des spécimens exceptionnels. [Dolomieu](#) signale par exemple dans une courte note (Dolomieu, 1792) des « gouttelettes de [ce] fluide » dans des cristaux de quartz. Il détermine qu'il est composé de pétrole et en déduit que le quartz « n'est point une substance simple » (p. 319). Plus tard, Dwight (1820) décrit des inclusions fluides observées dans des cristaux et, en reprenant la méthode de Dewey (1818), applique des changements de température pour tenter de congeler le fluide inclus.

Étape 2 : Les premiers travaux analytiques

La présence des inclusions fluides dans les minéraux est donc connue, mais un bond technique est fait au début du XIX^e siècle grâce à l'application de la microscopie. Dans les années 1820, Nicol développe des techniques ingénieuses pour confectionner des lames minces ; l'observation des lames confirme de façon évidente l'abondance des inclusions fluides (Nicol, 1828 ; Nicol, 1829).

Les premières études se placent dans le contexte des théories de la fin du XVIII^e siècle et du début du XIX^e siècle concernant l'origine des roches. Selon Gohau (1990b), la seconde partie du XVIII^e siècle est incontestablement l'époque des débuts des observations de terrain, notamment des montagnes. La distinction entre montagnes *anciennes* et montagnes *jeunes* est établie depuis de Maillet (1748) (Gohau, 1990a). Les *neptunistes*, dont le chef de file est Abraham [Gottlob Werner](#) (1749-1817), attribuent à toutes les roches une origine sédimentaire (Gohau, 1990b ; Bonin *et al.*, 1997). En effet, les observations de terrain montrent classiquement le dépôt de roches incontestablement sédimentaires (les montagnes *jeunes*), reposant sur un soubassement cristallin (granites, gneiss et schistes; montagnes *anciennes*). Les neptunistes interprètent cette succession comme résultant d'une sédimentation dans un océan primitif, d'abord saturé en silice (formation des roches cristallines), puis en carbonates. Or, sous l'impulsion de [James Hutton](#) (1726-1797), mais surtout de ses successeurs, dans les années 1820-1830, une autre théorie est apparue à la fin du XVIII^e siècle (communiquée en 1785 et publiée en 1788) (Hutton, 1788). Selon cette théorie, l'intérieur de la Terre est le siège d'un *feu souterrain* (*subterraneous fire or heat*) (Hutton, 1788) qui est responsable de plusieurs phénomènes connus : la transformation des sédiments en roches indurées (connue sous le nom de diagenèse), le soulèvement des strates (la tectonique) et la mise en place du granite à partir d'un liquide (le plutonime) (Gohau, 1990a).

L'observation des cavités des minéraux et l'identification de leur contenu devient un argument pour étayer l'une ou l'autre théorie. La détermination de la nature essentiellement aqueuse est documentée (Breislak, 1822), mais, bien que soulignant l'importance des inclusions aqueuses dans les roches cristallines, cet auteur conclut que l'eau était présente au moment de la cristallisation, mais pas forcément que cette précipitation s'est faite à partir d'une solution aqueuse. La présence d'abondantes inclusions aqueuses est alors un argument fort en faveur de la théorie neptuniste, comme le souligne Deuchar (1822).

En 1822, [Sir Davy](#) publie un article se posant résolument dans le cadre du débat entre Wernerien (Neptunistes) et Huttonien (Plutonistes) (Davy, 1822). Il avoue s'intéresser au sujet depuis trois années, lorsqu'il rend compte de l'intérêt présenté par les inclusions fluides et « *aérimorphes* » dans les cristaux. Considérant le fait que l'eau et les autres fluides sont plus expansibles que les silicates, il explique la présence de la bulle de vapeur comme résultant de la contraction du fluide piégé à plus haute température. En estimant le volume de vapeur des inclusions fluides, il objecte aux neptunistes que celles-ci n'ont pu se former qu'à des températures élevées, ce qui inflige un sérieux démenti aux théories neptunistes. [Sir Davy](#) parvient aussi à extraire et à analyser le fluide inclus.

C'est incontestablement [Brewster](#) qui a le plus étudié les inclusions fluides à cette époque. Son intérêt pour les cavités des minéraux débute en 1818, lorsqu'en chauffant un cristal de topaze pour le décolorer, celui-ci explose violemment (anecdote citée dans [Brewster](#), 1823). La raison en est la dilatation du contenu des inclusions (ce que l'on nomme la décrépitation). Brewster commence alors à rassembler une large collection d'observations dans des minéraux variés (le quartz, la topaze, la fluorite, l'olivine, l'émeraude, etc.) (Brewster, 1823 ; Brewster, 1826 ; Brewster, 1853), le béryl et la calcite (Brewster, 1848) et même le diamant (Brewster, 1835). Il a confirmé la nature aqueuse du contenu des cavités, mais a aussi mis en évidence un autre type de fluide ("*The Second Fluid*") (Fig. 2), beaucoup plus expansible que l'eau (Brewster, 1823) et dont il mesure l'indice de réfraction

(Brewster, 1826) (il a été établi que le fluide observé par Brewster était du CO₂, Simmler, 1858).

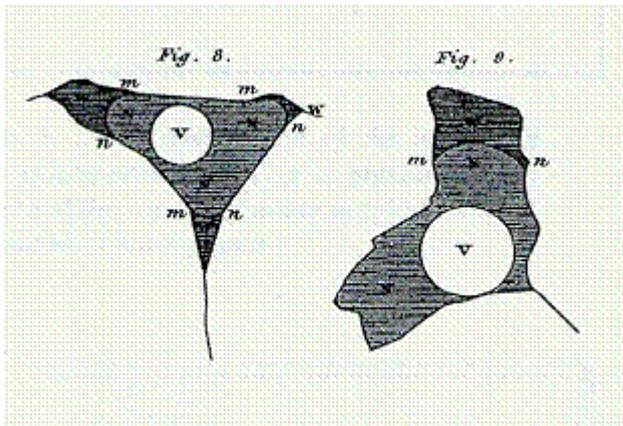


Figure 2. Illustrations des inclusions comprenant le « *nouveau fluide* ».

Ces inclusions ont été observées dans la topaze. "V is the vacuity, N the new fluid, and W another fluid, which we shall distinguished by the name of the Second Fluid" (Brewster, 1823).

Étape 3 : la question de la formation des granites

Les roches cristallines (notamment les granites) ont, selon la théorie plutoniste qui triomphe, une origine ignée, à l'égal des laves, dont l'émission, la mise en place et la solidification ont été couramment observées.

Brewster amène la seconde avancée technologique. Il construit le premier prototype de platine microthermométrique : les échantillons sont plongés dans un container d'eau chaude. Les températures de disparition des bulles de vapeur sont mesurées (températures d'homogénéisation). Les mesures d'homogénéisation du « *nouveau fluide* » sont comprises entre 23,3 et 28,8°C. Brewster conclut que, compte tenu des faibles températures obtenues, ces inclusions tendent à confirmer l'hypothèse neptuniste.

Les successeurs de Hutton, [John Playfair](#) et [James Hall](#), ont largement contribué à expliquer et diffuser le modèle de Hutton et peu à peu, à l'image de l'élève de Werner, Leopold [von Buch](#), le plutonisme a conquis la plupart des esprits.

Pour confirmer l'origine ignée du granite, des travaux expérimentaux tentent de fondre, puis de synthétiser du granite dans des fourneaux (travaux de Hall et de Saussure notamment à la fin du XVIII^e siècle) (Bonin *et al.*, 1997). Ces travaux restent ambigus et non concluants. En effet, les seuls produits de la fusion de roches sont des verres, même si la vitesse de refroidissement joue un rôle sur la nature des produits. De plus, la position chronologique du quartz est un problème insoluble. Il est connu que le quartz a un point de fusion très élevé (jamais atteint par les expérimentateurs de l'époque, mais estimé à l'époque à 2800°C ; or, le quartz apparaît toujours xénomorphe entre feldspaths et micas, dont le point de fusion est pourtant plus bas ([Scheerer](#), 1847). [Durocher](#) (1844) estime intuitivement que la composition du liquide peut influencer la séquence de cristallisation. Mais insatisfaite de cette explication peut-être prématurée au regard des chimistes du XIX^e siècle (Bonin *et al.*, 1997), la communauté scientifique opte pour une autre théorie, dite de la *plasticité aqueuse*. Selon cette théorie, exprimée pour la première fois par Breislak (1822), le granite serait initialement une roche rendue plastique par la présence d'eau à haute température, et non une roche fondue. C'est l'opinion exprimée par [Scheerer](#) (1847) et reprise par [Virlet d'Aoust](#) en 1857 (Bonin *et al.*, 1997). Une violente polémique s'ensuit entre [Scheerer](#) et [Durocher](#) sur l'origine du granite, tempérée par [Elie de Beaumont](#). La théorie de la plasticité fondue où l'eau reprend un rôle fondamental semble être un « *véritable retour vers le système neptunien* » (Durocher, 1844) (p. 1276), peut-être son dernier avatar (Bonin *et al.*, 1997).

C'est dans ce contexte qu'intervient le travail qui est sans aucun doute le texte de base en ce qui concerne l'étude des inclusions fluides (Sorby, 1858a). H.C. Sorby (Fig. 3), réalise un travail de pionnier, considérable et moderne dans sa conception.



Figure 3. Photographie de Henry Clifton Sorby (1826-1908)
(extraite de Shepherd *et al.*, 1985).

Après une étude bibliographique exhaustive des travaux antérieurs, Sorby tire des principes généraux (encore actuellement valables) d'expériences nombreuses et intelligemment conçues. Il applique ensuite ces conclusions à des exemples naturels et aboutit à une quantification des conditions de formation de certaines roches.

Le travail de Sorby comprend d'abord une partie décrivant des expériences de synthèse d'inclusions à partir de solutions aqueuses de compositions variées, dans des conditions de température variées et pour des fluides homogènes ou en ébullition. Les conditions de préparation et d'observation des échantillons sont détaillées. La description typologique (aspect, forme, abondance, nombre de phases) est présentée sous forme de plusieurs planches (Fig. 4). Certaines observations sont encore d'actualité (Touret, 1984). Du point de vue analytique, Sorby a fait évoluer la platine microthermométrique ; le chauffage se fait par de la paraffine. Il réalise aussi des tests d'écrasement d'échantillons et d'analyse du contenu des inclusions. Il établit des corrélations entre les mesures de température de fusion de glace et d'homogénéisation et le contenu en sel des solutions. Il détermine les propriétés P - V - T de l'eau le long de la courbe liquide-vapeur avec une différence de quelques pourcents (Touret, 1984).

Du point de vue conceptuel, les postulats de base de la technique apparaissent en filigrane dans cette étude. Les principes de base de la géothermobarométrie sont présentés, essentiellement à partir de la mesure du volume relatif de vapeur et de liquide (« remplissage vapeur ») ; la notion et la signification de la température d'homogénéisation sont exposées. Dans la deuxième partie de son article, Sorby applique les conclusions de son étude expérimentale à la caractérisation des fluides dans des contextes hydrothermaux, métamorphiques et granitiques. Sorby observe également des inclusions *vitreuses* dans les roches volcaniques.

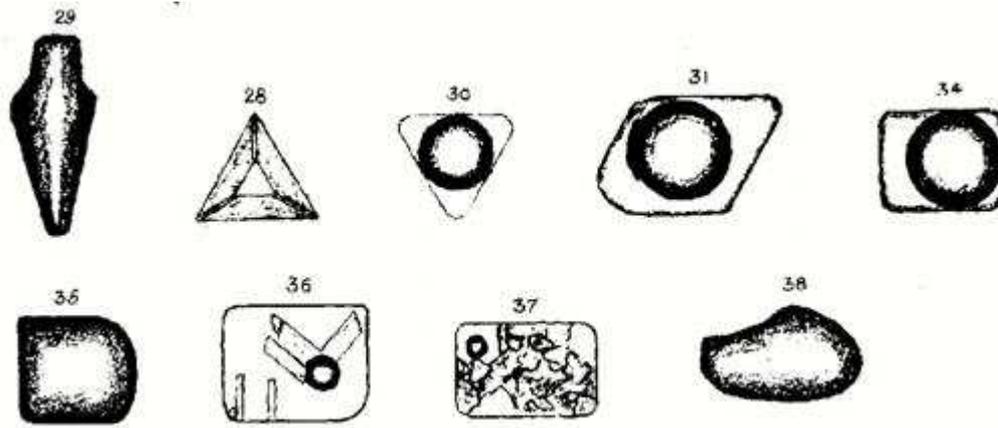


Figure 4. Exemples de dessins d'inclusions de l'article de Sorby (1858a)

(extrait de la planche XVII).

Sorby montre ainsi la nature essentiellement aqueuse des fluides associés à ces contextes et parvient à déterminer les conditions de formation de ces différents types de roches. Le modèle qu'il propose à la fin de son article consiste en une « chaîne » qui s'étend depuis les roches incontestablement fondues (les roches volcaniques) présentant des inclusions vitreuses, jusqu'aux filons de quartz « déposés à partir de l'eau » et présentant des inclusions « liquides ». L'intermédiaire entre ces deux extrémités de la chaîne est constitué par les granites. Sorby caractérise le mode de solidification des granites « aquo-ignés », exprimant son soutien à la théorie de la plasticité fondue (Sorby, 1858b).

Suite à ce travail considérable, la technique a été souvent ré-appliquée. La seconde partie du XIX^e siècle est l'époque de la « géologie microscopique » (Bonin *et al.*, 1997). Sorby, qui a par ailleurs hérité de l'expérience des lapidaires (Eyles, 1951), a largement diffusé son savoir-faire en matière de confection de lames minces (Sorby, 1860). L'utilisation de la lame mince est alors rendue systématique et donne naissance à la pétrographie sous l'impulsion de [Ferdinand Zirkel](#), [Harry Rosenbusch](#), [Fouqué](#) et [Auguste Michel-Lévy](#). De même que la majorité des roches sont observées sous le microscope à cette époque, les inclusions font aussi objet de multiples descriptions dans des contextes extrêmement variés : granites, roches métamorphiques, roches sédimentaires, gemmes (Zirkel, 1873)..., et même météorites (Sorby, 1864) ! (voir la liste exhaustive de Smith, 1953). Dans les années 1870, Vogelsang élabore une platine microthermométrique dans laquelle le chauffage se fait par des électrodes (Zirkel, 1873). Parmi les découvertes importantes des années 1860-1870, notons la mise en évidence du CO₂ en tant que composant principal dans de nombreux contextes géologiques (voir Simmler, 1858 ; Sorby, 1869 ; Vogelsang & Geifslor, 1869).

Étape 4 : les doutes et la récession du début du XX^e siècle

Malgré ces débuts prometteurs, la technique subit par la suite de vives critiques quant à la représentativité des inclusions fluides. La raison souvent invoquée est le fait que selon Sorby, la température d'homogénéisation était considérée comme égale à la température de formation des cavités (« l'hypothèse de Sorby ») (Touret, 1984) - cette « hypothèse » ne sera reconsidérée qu'en 1921 (Nacken, 1921). La grande variation des volumes relatifs de vapeur et de liquide des inclusions fut un argument à l'encontre des inclusions fluides ; par exemple, (Phillips, 1875), en tentant des estimations de température sur des granites de Cornouailles, conclut que les inclusions présentent des propriétés très variables ce qui rend leur utilisation douteuse. Pourtant, comme le souligne Bakker (1999), les développements de la physique et de la chimie aboutissent à une connaissance des propriétés des systèmes chimiques : le système CO₂, le phénomène critique, ... Mais ces développements

ont été complètement ignorés. Tout s'est passé comme si le monde de la géologie et le monde de la chimie devenaient hermétiques l'un à l'autre. Est-ce un effet nocif du début de la spécialisation en sciences ? La question est posée. Quoi qu'il en soit, la microthermométrie reste alors dans une phase balbutiante, aboutissant à des interprétations simplistes (« *oversimplified* ») (Bakker, 1999), à la source de nombreuses erreurs.

Suite à cet écho assez négatif, il y a un net fléchissement des études sur les inclusions fluides durant la première moitié du XX^e siècle ; le nombre d'articles parus connaît une nette diminution (Fig. 5).

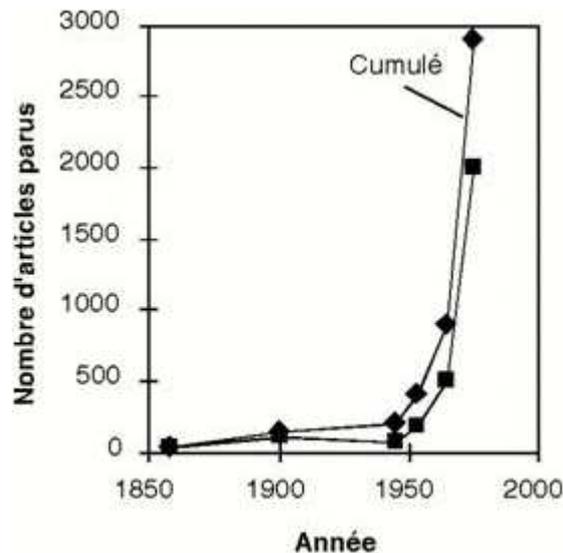


Figure 5. Nombre de publications parues entre 1858 et 1975.

Données en 1858, 1900, 1945 et 1953 : Smith (1953) (année 1858 : article de Sorby; années 1900 et 1945 choisies arbitrairement) - Données en 1965 et 1975 : Roedder (1984).

G. Deicha écrivait à ce propos : « *il suffit de relire les pages consacrées aux inclusions liquides dans les traités anciens [...] pour constater qu'il y eut un fléchissement notable dans ces études [des inclusions] au cours du dernier demi-siècle* » (Deicha, 1950a). Touret (1984) parle même d'un « *oubli* » pour caractériser cette période de régression. Selon cet auteur, l'« *oubli* » aurait été consacré lors du passage de la pétrographie à la pétrologie expérimentale sous l'impulsion de Bowen ; l'approche descriptive n'est plus à la mode et le monde des inclusions fait les frais de ce changement de mentalité. Comme le souligne Bowen en 1928, l'utilisation des inclusions fluides en géothermométrie se trouve limitée naturellement par le manque de données thermodynamiques concernant l'eau, le CO₂, les solutions salées et les mélanges.

Toutefois, comme le souligne [Jacques Touret](#) (1984), cette situation concerne uniquement les pays occidentaux, car dans le bloc soviétique, l'étude des inclusions fluides a toujours fait partie intégrante de la minéralogie. Les travaux ont été indiscutablement marqués par l'empreinte d'un génie, Lemmlein (Touret, 1984).

La première partie du XX^e siècle voit l'acquisition d'un nombre considérable de données sur les systèmes fluides par les physiciens et les chimistes, dans des gammes de température et de pression de plus en plus étendues ; les principales références sont données dans Bakker (1999). Le cadre devient donc favorable à la résurgence des études d'inclusions, avec tout un environnement de données récentes.

Étape 5 : le renouveau

Ce n'est que dans les années 1947-50 que l'attention se porte à nouveau sur les inclusions fluides. Trois

raisons de ce renouveau sont présentées dans [Jacques Touret](#) (1984). Tout d'abord, l'intérêt pour la phase fluide émerge en réaction aux excès des théories solidistes : il faut envisager l'existence d'une phase fluide pour expliquer les migrations de matière à grande échelle.

La seconde raison évoquée par Touret (1984) est l'amélioration des techniques d'étude. Dans les années 50, des prototypes de platines microthermométriques destinés à mesurer la température de fusion de la glace *in situ* ont été élaborés par les chercheurs soviétiques (revue dans Roedder, 1962). Mais la première description détaillée d'une platine microthermométrique précise date de 1962 (Roedder, 1962). Dans ce dispositif, l'échantillon était placé dans une chambre soumise à un flux d'acétone réfrigéré. Il était alors possible d'atteindre -35°C . Malheureusement, le problème de la surcongélation de l'eau liquide (« *supercooling* ») rendait cette platine inefficace, le décalage entre la température de congélation et la température de fusion de la glace étant de l'ordre de 36°C dans l'eau pure et supérieure encore dans l'eau salée. Le dispositif a alors été adapté de façon à plonger l'échantillon dans un bain de glace d'acétone (à $-78,5^{\circ}\text{C}$) ou d'azote liquide (à -196°C), avant de le placer dans les conditions d'observation. Le chauffage (jusqu'à 350°C) était possible grâce à la circulation d'huile de silicone. Roedder a présenté les premiers résultats concernant l'application de cet appareil à divers types de gisements minéralisés dans un article ultérieur (Roedder, 1963). L'amélioration de l'appareillage a débouché sur différents modèles, avec l'apparition notamment d'un circuit d'azote gazeux refroidi à l'azote liquide pour assurer le refroidissement (revue dans Roedder, 1984).

La troisième raison exposée par Touret (1984) est le « *facteur humain* ». Les grands développements du monde des inclusions fluides sont issus du travail de quelques chercheurs « *souvent liés par des liens d'amitié, ou même familiaux* » (Touret, 1984). Sorby a marqué son temps de manière considérable et a directement influencé [Ferdinand Zirkel](#) et [Hermann Vogelsang](#).

Lors du renouveau des années 1950, quelques grands noms ont émergé dans la discipline : E. Roedder, F. G. Smith aux U.S.A., G. Lemlein, N. P. Ermakov et Y. A. Dolgov en Union soviétique, G. Deicha, B. Poty en France (Touret, 1984), puis J. Touret.

Dans le détail, l'intérêt pour l'utilisation des inclusions en géothermobarométrie renaît. Les postulats pour toute étude d'inclusions fluides sont ré-énoncés (Ingerson, 1947 ; Bailey, 1949), même si ce dernier auteur souligne surtout les incertitudes des études dans les contextes granitiques. En réponse à ce point, Deicha (Deicha, 1950b ; Deicha, 1950a) attire tout particulièrement l'attention sur les inclusions carboniques qui ont un net critère d'antériorité sur les inclusions aqueuses sur lesquelles les estimations étaient faites jusqu'alors.

Ce renouveau se produit dans un contexte polémique. G. C. Kennedy, qui vient de publier de nouvelles données sur les propriétés *P-V-T* de l'eau (Kennedy, 1950b), attaque l'approche thermométrique par les inclusions fluides ; il souligne l'insuffisance des données thermodynamiques sur les systèmes fluides et insiste sur la possibilité des inclusions à fuir (Kennedy, 1950a). En 1953, B. J. Skinner publie un article très critique quant à l'utilisation des inclusions en géothermométrie, notamment à cause du fait qu'il existe des preuves que les inclusions « fuient » (« *leak* ») (Skinner, 1953). F. G. Smith répond à ces critiques (Smith *et al.*, 1950 ; Smith, 1954). C'est en effet dans ce contexte qu'il publie une synthèse de tous les articles consacrés à ce sujet depuis le début du XIX^e siècle, aussi bien à cause du regain d'intérêt pour la discipline, que pour contrecarrer l'oubli dans lequel elle est tombée dans l'esprit de la plupart des géologues et des minéralogistes (Smith, 1953).

Le grand développement conceptuel de cette époque vient de l'article de Tuttle (1949). La disposition planaire des inclusions fluides avait été observée au siècle précédent. Plusieurs hypothèses avaient été proposées (revue dans Tuttle, 1949), mais c'est Hicks (1884) qui envisage une origine par fracturation suivie d'une fermeture par dépôt secondaire de silice. Tuttle, par ailleurs étudiant de Bowen, propose dans son article un mécanisme selon lequel les inclusions fluides peuvent se former à partir de microfractures. Il expose ensuite une méthode pour mesurer les directions des plans dans des lames. Enfin, il l'applique sur des roches métamorphiques du district de Washington. Ses conclusions sont que les plans d'inclusions fluides se développent préférentiellement dans des directions correspondant à des plans de cisaillement et que ces plans ont une orientation à caractère régional. Les plans d'inclusions fluides (*plans de Tuttle*) sont donc d'excellents marqueurs de la déformation régionale.

Le renouveau des années 1950 s'est manifesté dans deux types d'applications. La première application était d'utiliser les inclusions (fluides et solides) pour diagnostiquer l'origine des pierres précieuses et semi-précieuses en gemmologie. Pendant longtemps, les inclusions triphasées (liquide, vapeur et cube[s] de sel) ont permis de caractériser les émeraudes dites « *de Colombie* ». Actuellement, il n'est plus possible de déterminer l'origine des pierres à partir de l'analyse des inclusions seules ; il est toutefois possible de distinguer pierres naturelles et pierres de synthèse (Schwarz, 1998). Le second facteur du renouveau, induit par E. Roedder, est intimement lié à la recherche en métallogénie (Roedder, 1962 ; Roedder, 1963). D'abord utilisée comme une technique à des fins théoriques, l'étude des inclusions fluides a évolué vers des utilisations appliquées, notamment comme guide de prospection pour les compagnies minières (Roedder, 1984). La plupart des études ont porté sur les gisements de type « *Mississippi Valley* », les gisements d'étain-tungstène, les gisements épithermaux et les porphyres cuprifères.

L'intérêt pour les inclusions se manifeste ensuite par la parution d'un ouvrage sur l'identification de l'origine des gemmes à partir des inclusions fluides et solides (Gübelin, 1953). Cet intérêt croissant se marque par la parution d'ouvrages de synthèse bibliographique sur tous les travaux antérieurs. G. Deicha, en France, F. Gordon Smith, au Canada, et E. Roedder, aux Etats-Unis, ont, grâce à leur acharnement, remis les inclusions fluides au rang des techniques de minéralogie de premier plan. La preuve du succès de cette discipline apparaît clairement par l'analyse du nombre de publications sur le sujet. En 1953, environ 400 articles font référence à l'étude des inclusions fluides (Smith, 1953) ; dans la période 1953-1965, le nombre passe à environ 900 ; en 1975, il atteint 2900 (références et chiffres issus de Roedder, 1984). Dès les années 50 apparaissent également les premiers ouvrages traitant spécifiquement des inclusions. Le premier livre est issu de la communauté soviétique (Ermakov, 1950), G. Deicha en France le suit quelques années plus tard (Deicha, 1955).

Étape 6 : époque moderne

Cette époque se place dans la continuité de l'époque précédente, sans transition marquante. J'ai placé ses débuts dans les années 1970. Le monde des inclusions fluides est enfin sorti des années d'« *ignorance et de dénigrement systématiques* » (Touret, 1984) ; B. J. Skinner, d'abord critique quant aux inclusions, venait de publier un article avec E. Roedder dans lequel il conclut que « *bien qu'occasionnellement, les inclusions peuvent fuir [...], la plupart des inclusions de moins de 1 mm n'ont pas fui* » (Roedder & Skinner, 1968). Le rôle des fluides dans les processus géologiques à l'échelle de la croûte (Fyfe *et al.*, 1978) ouvre tout un champ de recherche. Mais malgré tout, la discipline a encore du mal à se départir d'une réputation ambiguë. La situation débouche sur un « *paradoxe* » (Touret, 1984) : une petite communauté « *active et dynamique* » de chercheurs face à une « *masse* » aux sentiments « *globalement positifs* » mais qui « *se refuse* » à approfondir et à enseigner la discipline.

Actuellement, le nombre de travaux traitant des inclusions fluides est considérable. La consultation de la base de données GEOREF indique que plus de 11000 travaux scientifiques évoquent dans leur titre ou dans leurs mots-clés les inclusions fluides (consultation en juillet 1999). Deux congrès internationaux (Européen : ECROFI et Américain : PACROFI) de fréquence bisannuelle sont exclusivement consacrés aux inclusions fluides.

L'époque moderne se caractérise par trois facteurs : 1° le développement d'une multiplicité de nouvelles techniques, 2° la généralisation de l'application vers tous les domaines de la géologie – hors des champs traditionnels de la gemmologie, de la magmatologie et de la métallogénie – et 3° l'application des modèles thermodynamiques.

L'étude des inclusions fluides revêt un nouvel intérêt, en tant que sous-système microscopique des minéraux. C'est en effet l'époque où les nouveaux outils vont explorer l'infiniment petit des roches (Touret, 1984). Une avancée importante est la commercialisation de platines microthermométriques standardisées ; l'époque des prototypes est terminée. La première platine commercialisée a été construite et brevetée au Centre de Recherches pétrographiques et géochimiques à Nancy (France) et décrite par Poty *et al.* (1976) (platine Chaix Meca). Le chauffage était assuré par une résistance chauffante directement connectée sur le bâti métallique de la chambre. La platine à flux gazeux a été décrite et commercialisée aux Etats-Unis à partir de 1979 (Werre Jr. *et al.*, 1979) (type U.S.G.S.). En 1981, la platine Linkam, fabriquée à Surrey en Angleterre, a été décrite par Shepherd (1981) ; elle permet maintenant un pilotage électronique des cycles de température. Les trois platines réparties dans les différents laboratoires dans le monde ont pris dès cette époque leur forme quasiment définitive, des modifications mineures ayant été apportées ultérieurement.

Une seconde technique appliquée aux inclusions fluides est la spectrométrie Raman. L'analyse ponctuelle à la microsonde Raman date du milieu des années 1970, notamment à l'université de Lille. Rosasco & Roedder (1975) font les premières analyses des phases individuelles dans les inclusions fluides. Dhamelincourt *et al.* (1979) évaluent toutes les possibilités de l'application de la microsonde Raman, pour l'analyse des composants moléculaires, minéraux inclus et gaz, dont la prise en considération est cruciale pour les estimations thermobarométriques. Depuis lors, la microspectrométrie Raman est le complément classique et indispensable de toute analyse d'inclusions fluides.

Vers le milieu des années 1980, les premières synthèses d'inclusions fluides par voie hydrothermale sont réalisées (Sternner & Bodnar, 1984). La représentativité des inclusions réalisées par cette voie est démontrée, et, dès lors, la technique sera utilisée pour la reconstruction des diagrammes de phases (Bodnar & Bethke, 1984 ; Bodnar & Sternner, 1985 ; Sternner *et al.*, 1988 ; Vanko *et al.*, 1988 ; Bodnar, 1994 ; Dubois *et al.*, 1994 ; Schmidt *et al.*, 1995), pour étudier les rééquilibrages des inclusions notamment durant le métamorphisme (Bodnar *et al.*, 1989 ; Bakker & Jansen, 1990), ou pour l'évaluation ou la calibration des nouvelles techniques d'analyse.

Durant les dix dernières années, les études d'inclusions fluides se sont enrichies de nouvelles techniques déjà opérationnelles ou en cours de mise au point. Ces techniques d'analyse quantitative sont essentiellement basées sur l'analyse des radiations électromagnétiques produites par l'excitation du contenu des inclusions par des flux de particules accélérées ou des électrons : analyse X d'inclusions congelées, spectroscopie d'émission X (PIXE) ou g (PIGE), synchrotron (Mavrogenes *et al.*, 1995 ; Philippot *et al.*, 1998), spectroscopie d'émission optique couplée à l'ablation laser (Fabre *et al.*, 1999).

Les études d'inclusions fluides ont commencé à toucher tous les domaines de la géologie. Les roches métamorphiques ont trouvé dans les inclusions un complément utile, à l'origine de nombreuses informations concernant les chemins pression-température-composition-temps (chemins $P-T-x-t$) (Spear, 1993). La connaissance des fluides profonds a largement profité des études d'inclusions fluides dans les faciès de croûte inférieure, granulite et éclogite (voir par exemple Touret, 1971 ; Touret, 1981 ; Newton, 1986 ; Touret, 1987). Des études récentes tendent à caractériser les fluides du manteau (Szabó & Bodnar, 1995 ; Szabó & Bodnar, 1996).

Dans les environnements sédimentaires, l'étude des inclusions fluides s'est révélée d'un intérêt crucial pour comprendre l'évolution diagénétique des roches sédimentaires, en relation avec le potentiel économique (Pagel, 1975). La technique s'est heurtée à des problèmes techniques en ce sens que les inclusions dans les ciments ou dans les surcroissances autour des grains détritiques sont généralement très petites (moins de 5 μm , souvent moins de 2 μm). Une autre voie d'étude, qui apparut très tôt dans l'histoire de la discipline (Hicks, 1884 ; Metzger *et al.*, 1977) est la caractérisation des sources des grains détritiques dans les grès ; cette voie, quoique prometteuse (Roedder, 1984), a été souvent ignorée, malgré quelques regains d'intérêt lors de la découverte des gisements d'or et d'uranium détritiques (Shepherd, 1977).

Dans le domaine de la géologie structurale, les voies inaugurées par le travail de Tuttle (1949) ont connu un renouveau dans les années 1980 (Lespinasse & Pécher, 1986 ; Lespinasse & Cathelineau, 1990 ; Boullier *et al.*, 1991). Le développement des méthodes de calcul automatique et l'utilisation des interfaces entre matériel optique et ordinateurs ont permis à certains auteurs de mettre au point une technique pour la détermination, par analyse d'images, des conditions de déformation subies par un domaine géologique (Champenois, 1989). L'intérêt résidait aussi dans le fait que le développement des techniques d'analyse permettait de re-situer les phases de circulations de fluides et des conditions pression-température dans l'histoire de la roche et de sa fracturation.

Enfin, la dernière décennie a commencé à combler un vide crucial. En effet, l'interprétation des données des inclusions, aussi bien en microthermométrie qu'en géothermobarométrie, se heurte à des difficultés d'ordre thermodynamique. L'application des modèles thermodynamiques aux inclusions fluides se heurte à un problème de cloisonnement des disciplines. Le modèle pour le système H₂O-NaCl-CO₂, pourtant représentatif du grand groupe des fluides naturels des domaines métamorphiques, n'a été présenté qu'en 1983 (Bowers & Helgeson, 1983). De nombreuses contributions ont été apportées par la suite au domaine des inclusions fluides : les modèles thermodynamiques des solutions aqueuses (voir par exemple Spencer *et al.*, 1990 ; Monnin & Dubois, 1999), les équilibres liquide-vapeur (voir Thiéry *et al.*, 1994 ; Thiéry & Dubessy, 1998) et les conditions de stabilité des hydrates de gaz dans les inclusions (voir Bakker *et al.*, 1996). L'outil numérique se révèle un outil essentiel pour le calcul automatique des propriétés thermodynamiques des fluides et des équilibres de phases (voir Brown, 1989 ; Bakker, 2003).

Conclusions

L'histoire des inclusions fluides s'étend sur de nombreux siècles, et près de deux siècles dans sa phase scientifique. Elle est jalonnée de grands noms dont le travail a été considérable et de prouesses techniques dont le détail est donné dans Roedder (1984) et surtout dans Smith (1953). Discipline à cheval entre la géologie et la chimie, l'étude des inclusions fluides a bénéficié des apports des découvertes de la chimie des fluides, qu'elle a suivies avec un retard plus ou moins important. Cette distanciation par rapport à la chimie (résultat du début de la spécialisation en sciences ?) a sans doute été à l'origine d'un discrédit qui dura environ 70 ans. La renaissance n'a pas été sans polémique. La discipline n'a peut-être pas encore totalement fait fi d'une certaine indifférence de la plupart des géologues, malgré une petite communauté très active.

Remerciements

Je tiens à remercier Jacques Touret pour l'intérêt qu'il a porté à cette partie de mon travail, qui faisait partie de mon Habilitation à diriger des recherches. Merci à MM. Gabriel Gohau et Jean Gaudant de m'avoir offert la possibilité de faire un exposé lors d'une réunion du COFRHIGEO au printemps 2002. Je n'aurais pas pu accéder à la plupart des sources anciennes sans l'aide de Magali Thévenot, documentaliste de notre UFR des Sciences de la Terre de Lille. Enfin, merci à Véronique Savary pour avoir relu de manière critique la version finale de ce manuscrit.

Références

- BAILEY, S. W. (1949). Liquid inclusions in granite thermometry. *J. Geol.*, **57**, p. 304-307.
- BAKKER, R. (2003). Package *FLUIDS* 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chem. Geol.*, **194**, p. 3-23.
- BAKKER, R. J. (1999). *Optimal interpretation of microthermometric data from fluid inclusions: Thermodynamic modelling and computer programming*. Habilitation thesis, Ruprecht-Karls-Universität, Geologisches-Paläontologisches Institut (Heidelberg).
- BAKKER, R. J., DUBESSY, J. et CATHELINÉAU, M. (1996). Improvements in clathrate modelling: I. The H₂O-CO₂ system with various salts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, p. 1657-1681.
- BAKKER, R. J. et JANSEN, B. H. (1990). Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, **345**, p. 58-60.
- BODNAR, R. J. (1994). Synthetic fluid inclusions: XII. The system H₂O-NaCl. Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 wt% NaCl solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, p. 1053-1063.
- BODNAR, R. J. et BETHKE, P. M. (1984). Systematics of stretching of fluid inclusions I: Fluorite and sphalerite at 1 atmosphere confining pressure. *Econ. Geol.*, **79**, p. 141-161.
- BODNAR, R. J., BINNS, P. R. et HALL, D. L. (1989). Synthetic fluid inclusions - VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behaviour of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *J. Metamorph. Geol.*, **7**, p. 229-242.
- BODNAR, R. J. et STERNER, S. M. (1985). Synthetic fluid inclusions in natural quartz II. Application to PVT studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, p. 1855-1859.
- BONIN, B., DUBOIS, R. et GOHAU, G. (1997). *Le métamorphisme et la formation des granites. Evolution des idées et concepts actuels*. Nathan, Paris, 317 p.
- BOULLIER, A. M., FRANCE-LANORD, C., DUBESSY, J., ADAMY, J. et CHAMPENOIS, M. (1991). Linked fluid and tectonic evolution in the High Himalaya mountains (Nepal). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **107**, p. 358-372.
- BOWEN, N. L. (1928). Geological thermometry. In FAIRBANKS, E. E. (Ed.) : *Laboratory investigation of ores*. Geophys. Lab. Paper, Washington DC, n° 671, p. 172-219.
- BOWERS, T. S. et HELGESON, H. C. (1983). Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geological systems : Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, p. 1247-1275.
- [BOYLE](#), R. (1672). *An essay about the origine & virtue of gems. Wherein are propos'd and historically illustrated some conjectures about the consistence of the matter of precious stones and the subjects wherein their chiefest virtues reside*. William Godbid, London, 184 p.
- BREISLAK, S. (1822). *Traité sur la structure extérieure du globe*. Chez Jean-Pierre Giegler libraire, Milan, 3 tomes.
- BREWSTER, D. (1823). On the existence of two new fluids in the cavities of minerals which are immiscible and possess remarkable physical properties. *Edinburgh Phil. J.*, **9**, p. 94-107.
- BREWSTER, D. (1826). On the refractive power of the two new fluids in minerals, with additional observations on the nature and properties of these substances. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, **10**, p. 1-41 + 407-427.
- BREWSTER, D. (1835). Observations relative to the structure and origin of the diamond. *Trans.*

Geol. Soc. London, **3**, p. 455-459.

- BREWSTER, D. (1848). On the phenomenon of luminous rings in calcareous spar and beryl, as produced by tubular cavities containing the two new fluids. *Phil. Mag.*, (3), **33**, p. 489-491.
- BREWSTER, D. (1853). Account for a remarkable fluid cavity in topaz. *Phil. Mag.*, (4), **5**, p. 489-493.
- BROWN, P. E. (1989). FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *Amer. Mineral.*, **74**, p. 1390-1393.
- CHAMPENOIS, M. (1989). *Apport de l'analyse interactive d'images à l'étude de l'évolution structurale de zones déformées : application à une zone de cisaillement pan-africaine de l'Adrar des Iforas (Mali) et aux orthogneiss du massif du Grand Paradis (Alpes, Italie)*. Nancy I, France, 210 p.
- DAVY, H. (1822). On the state of water and aeriform matter in cavities found in certain crystals. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A, **2**, p. 367-376.
- DEICHA, G. (1950a). Essai de manométrie minéralogique. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, **73**, p. 55-62.
- DEICHA, G. (1950b). Observations préliminaires sur une recherche pétrographique systématique des inclusions carboniques. *Bull. Soc. géol. France*, **73**, p. 57-59.
- DEICHA, G. (1955). *Les lacunes des cristaux et leurs inclusions fluides. Significations sur la genèse des gîtes minéraux et des roches*. Masson, 126 p.
- DEUCHAR, J. (1822). Observations on the occasional appearance of water in the cavities of regular crystals; and on the porous nature of quartz, and other crystalline substances, as the probable cause of that occurrence. *Phil. Mag.*, **60**, p. 310-314.
- DEWEY, C. (1818). Sketch of the mineralogy and geology of the vicinity of Williams' College, Williamson, Mass. *Amer. J. Sci.*, **1**, p. 337-346.
- DHAMELINCOURT, P., BENY, J. M., DUBESSY, J. et POTY, B. (1979). Analyse d'inclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman. *Bull. Mineral.*, **102**, p. 600-610.
- [DOLOMIEU](#), D. GRATET de (1792). Sur de l'huile de pétrole dans le cristal de roche et les fluides élastiques tirés du quartz. *Observ. Phys., Hist. nat. Arts*, **42**, p. 318-319.
- DUBESSY, J., THIÉRY, R. et CANALS, M. (1992). Modelling of phase equilibria involving mixed gas clathrates: Application to the determination of molar volume and salinity of the aqueous solution on fluid inclusions. *Eur. J. Mineral.*, **5**, p. 873-884.
- DUBOIS, M. (1992). *Fluides crustaux : approche expérimentale et analytique. Détermination du solvus des systèmes H₂O-MCl (M=Li, K, Rb, Cs). Caractérisation et dynamique des fluides des dômes thermiques, sur l'exemple du diapir vellave (S-E Massif Central Français)*. I.N.P.L., Nancy (France), 228 p.
- DUBOIS, M., WEISBROD, A. et SHTUKA, A. (1994). Experimental determination of the two-phase (liquid and vapour) region in water-alkali chloride binary systems at 500 and 600°C using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.*, **115**, p. 227-238.
- DUROCHER, J. (1844). Sur l'origine des roches granitiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **20**, p. 1275-1284.
- DWIGHT, H. E. (1820). Account of the Kaarskill Mountains. *Amer. J. Sci.*, **2**, p. 11-29.
- ERMAKOV, N. P. (1950). *Recherches sur la nature des solutions minéralisantes*. Presses de l'université de Kharkov (U.R.S.S.), 460 p. (en russe).
- EYLES, M. J. (1951). [William Nicol](#) and H.C. Sorby: Two centenaries. *Nature*, **168**, p. 98-99.
- FABRE, C., BOIRON, M. C., DUBESSY, J. et MOISSETTE, A. (1999). Determination of ion in individual fluid inclusions by LAOES: development and applications to natural fluid inclusions. *J. Analyt. Atom. Spectr.*, **14**, p. 913-922.

- FYFE, W. S., PRICE, N. J. et THOMPSON, A. (1978). *Fluids in the Earth's crust*. Elsevier, Amsterdam, 383 p.
- GOHAU, G. (1990a). *Les sciences de la Terre aux XVII^e et au XVIII^e siècle. Naissance de la géologie*. Albin Michel, Paris, 420 p.
- GOHAU, G. (1990b). *Une histoire de la géologie*. Seuil, 277 p.
- GÜBELIN, E. J. (1953). *Inclusions as a means of gemstone identification*. Gemmological Institute of America, Los Angeles.
- HICKS (1884). On the Cambrian conglomerates in Anglesey and Carnarvonshire. *J. Geol. Soc. London*, **40**, p. 194-195.
- HUGHES, R. W. (1997). *Ruby & sapphire*. RWH Publishing, Boulder, Colorado, 512 p.
- HUTTON, J. (1788). Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution and restoration of land upon the Globe. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, **1**, p. 209-304.
- INGERSON, E. (1947). Liquid inclusions in geologic thermometry. *Amer. Mineral.*, **32**, p. 375-388.
- KENNEDY, G. C. (1950a). "Pneumatolysis" and the liquid inclusion method of geologic thermometry. *Econ. Geol.*, **45**, p. 533-547.
- KENNEDY, G. C. (1950b). Pressure-volume-temperature relations in water at elevated temperatures and pressures. *Amer. J. Sci.*, **248**, p. 540-564.
- LESPINASSE, M. et CATHELINEAU, M. (1990). Fluid percolations in a fault zone : a study of fluid inclusion planes in the St Sylvestre granite, northwest Massif Central, France. *Tectonophysics*, **184**, p. 173-187.
- LESPINASSE, M. et PÊCHER, A. (1986). Microfracturing and regional stress field : a study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central, France. *J. Struct. Geol.*, (2), **8**, p. 169-180.
- MAILLET, B. de (1748). *Telliamed ou Entretiens d'un philosophe indien avec un missionnaire français sur la diminution des eaux, la formation de la terre, l'origine de l'homme, etc.*, Paris.
- MAVROGENES, J. A., BODNAR, R. J., ANDERSON, A. J., BAKT, S., SUTTON, S. R. et RIVERS, M. L. (1995). Assessment of the uncertainties and limitations of quantitative elemental analysis of individual fluid inclusions using synchrotron X-ray fluorescence (SXRF). *Geochim. Cosmochim. Acta*, (19), **59**, p. 3987-3995.
- METZGER, F. W., KELLY, W. C., NESBITT, B. E. et ESSENE, E. J. (1977). Scanning electron microscopy of daughter minerals in fluid inclusions. *Econ. Geol.*, (2), **72**, p. 141-152.
- MONNIN, C. et DUBOIS, M. (1999). Thermodynamics of the CsCl-H₂O system to low temperatures. *Eur. J. Mineral.*, **11**, p. 477-482.
- NACKEN, R. (1921). Welche Folgerungen ergeben sich aus dem Auftreten von Flüssigkeitseinschlüssen in Mineralien. *Centralbl. Mineral. Geol. Pal.*, **1921**, p. 13-20 + 35-43.
- NEWTON, R. C. (1986). Fluids of granulite facies metamorphism. In : WALTHER, J. V. et WOOD, B. J. (Eds.), *Fluid-rock interactions during metamorphism*. Springer-Verlag, New-York, **5**, p. 36-59.
- NICOL, W. (1828). Observations on the fluids contained in crystallized minerals. *Edinburgh New Philos. J.*, **5**, p. 94-96.
- NICOL, W. (1829). On the cavities containing fluids in rock-salt. *Edinburgh New Philos. J.*, (7), **2**, p. 111-113.
- PAGEL, M. (1975). Détermination des conditions physico-chimiques de la silicification diagénétique des grès d'Athabasca (Canada) au moyen des inclusions fluides. *C. R. Acad. Sci., Paris, Série II*, **280**, p. 2301-2304.

- PHILIPPOT, P., MENEZ, B., CHEVALLIER, P., GIBERT, F., LEGRAND, F. et POPULUS, P. (1998). Absorption correction procedures for quantitative analysis of fluid inclusions using synchrotron radiation X-ray fluorescence. *Chem. Geol.*, **144**, p. 121-136.
- PHILLIPS, W. (1875). The rocks of the mining districts of Cornwall and their relation to metalliferous deposits. *Quater. J. Geol. Soc. London*, **31**, p. 319-345.
- POTY, B., LEROY, J. et JACHIMOVICZ, L. (1976). Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristall.*, **99**, p. 182-186.
- ROEDDER, E. (1962). Studies of fluid inclusion I : Low temperature application of a dual-purpose freezing and heating stage. *Econ. Geol.*, **57**, p. 1045-1061.
- ROEDDER, E. (1963). Studies of fluid inclusion II : Freezing data and their interpretation. *Econ. Geol.*, **58**, p. 167-211.
- ROEDDER, E. (1984). *Fluid inclusions*. Mineralogical Society of America, 646 p.
- ROEDDER, E. et SKINNER, B. J. (1968). Experimental evidence that fluid inclusions do not leak. *Econ. Geol.*, (7), **63**, p. 715-730.
- ROSASCO, G. J. et ROEDDER, E. (1975). Application of a new Raman microprobe spectrometer to nondestructive analysis of sulfate and other ions in individual phases in fluid inclusions in minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**, p. 1907-1915.
- SCHEERER, T. (1847). Discussion sur la nature plutonique du granite. *Bull. Soc. géol. France*, (2), **IV**, p. 468-498.
- SCHMIDT, C., ROSSO, K. M. et BODNAR, R. J. (1995). Synthetic fluid inclusions: XIII. Experimental determination of PVT properties in the system H₂O + 40 wt% NaCl + 5 mol% CO₂ at elevated temperature and pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, p. 3953-3959.
- SCHWARZ, D. (1998). De l'importance des inclusions solides et fluides dans la caractérisation des émeraudes naturelles et synthétiques. In : GIARD, D., GIULIANI, G., CHEILLETZ, A., FRITSCH, E. et GONTHIER, E. (Eds). *L'émeraude*. Association française de Gemmologie, p. 71-80.
- SHEPHERD, T. J. (1977). Fluid inclusion study of the witwatersrand gold-uranium ores. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, **286A**, p. 549-565.
- SHEPHERD, T. J. (1981). Temperature-programmable, heating-freezing stage for microthermometric analysis of fluid inclusions. *Econ. Geol.*, **76**, p. 1244-1247.
- SHEPHERD, T. J., Rankin, A. H. et Alderton, D. H. M. (1985). *A practical guide to fluid inclusions studies*. Blackie, 239 p.
- SIMMLER, R. T. (1858). Versuch zur Interpretation der von Brewster in Jahre 1826 in krystallisirten Mineralien entdecken, sehr expansibeln Flüssigkeiten. *Ann. Physik Chemie*, **105**, p. 460-466.
- SKINNER, B. J. (1953). Some considerations regarding fluid inclusions as geologic thermometers. *Econ. Geol.*, **48**, p. 541-550.
- SMITH, F. G. (1953). *Historical development of inclusion thermometry*. University Toronto Press, 149 p.
- SMITH, F. G. (1954). Discussion on "Some considerations regarding liquid inclusions as geologic thermometers". *Econ. Geol.*, **49**, p. 331-332.
- SMITH, F. G., BOYLE, P. A., SCOTT, H. S., MUTCH, A. D., SPRINGER, G. D., BOYLE, R. W. et OGDEN, W. M. M. (1950). "Pneumatolysis" and the liquid inclusion method of geology thermometry (A reply to G.C. Kennedy). *Econ. Geol.*, **45**, p. 582-587.
- SORBY, H. C. (1858a). On the microscopical structure of crystals indicating the origin of rocks and minerals. *Quart. J. Geol. Soc. London*, **14**, p. 453-500.

- SORBY, H. C. (1858b). Sur le mode de consolidation du granite et de plusieurs autres roches (extrait d'une lettre de M. H.C. Sorby à M. Elie de Beaumont). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **46**, p. 146-149.
- SORBY, H. C. (1860). Sur l'application du microscope à l'étude de la géologie physique. *Bull. Soc. géol. France*, **17**, p. 571-573.
- SORBY, H. C. (1864). On the microscopical structure of meteorites. *Proc. Roy. Soc. London*, **13**, p. 333-334.
- SORBY, H. C. (1869). On the microscopical structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Monthly Microscopical Journal*, **1**, p. 220-224.
- SPEAR, F. S. (1993). *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Mineralogical Society of America Monograph, 799 p.
- SPENCER, R. J., MØLLER, N. et WEARE, J. H. (1990). The prediction of mineral solubilities in natural waters: A chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄-H₂O system at temperatures below 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, p. 575-590.
- STÉNONIS, N. (1669). *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis Prodromus*. Typogr. Stella, Florence (Italie).
- STERNER, S. M. et BODNAR, R. J. (1984). Synthetic fluid inclusions in natural quartz. I. Compositional types synthesized and application to experimental geochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, p. 2659-2668.
- STERNER, S. M., HALL, D. L. et BODNAR, R. J. (1988). Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H₂O under vapor-saturated conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, p. 989-1005.
- SZABÓ, C. et BODNAR, R. J. (1995). Chemistry and origin of mantle sulfides in spinel peridotite xenoliths from alkaline basaltic lavas, Nógrád-Gömör Volcanic Field, northern Hungary and southern Slovakia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (19), **59**, p. 3917-3927.
- SZABÓ, C. et BODNAR, R. J. (1996). Changing magma ascent rates in the Nógrad-Gömör volcanic field Northern Hungary/Southern Slovakia: Evidence from CO₂-rich fluid inclusions in metasomatized upper mantle xenoliths. *Petrology*, (3), **4**, p. 240-249.
- THIÉRY, R. et DUBESSY, J. (1998). Description of vapour-liquid phase equilibria of the H₂O-NaCl system between 100 and 900°C with a thermodynamic model based on the Mean Spherical Approximation. *Eur. J. Mineral.*, **10**, p. 1151-1165.
- THIÉRY, R., VIDAL, J. et DUBESSY, J. (1994). Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: Liquid-vapour equilibria and calculation of the molar volume in the CO₂-CH₄-N₂ system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (3), **58**, p. 1073-1082.
- TOURET, J. (1971). Le faciès granulite en Norvège méridionale. *Lithos*, **4**, 239-249; p. 423-436.
- TOURET, J. (1981). Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks. In : HOLLISTER, L. S. et CRAWFORD, M. L. (Eds.), *Short course in fluid inclusions: Applications to petrology*. Mineralogical Association of Canada, **6**, p. 182-208.
- TOURET, J. (1984). Les inclusions fluides : Histoire d'un paradoxe. *Bull. Mineral.*, **107**, p. 125-137.
- TOURET, J. L. R. (1987). Fluid inclusions and pressure-temperature estimates in deep-seated rocks. In : HELGESON, H. C. (Ed.), *Chemical transport in metasomatic processes*. Reidel Publ. Co., Dordrecht (The Netherlands), p. 91-121.
- TUTTLE, O. F. (1949). Structural petrology of planes of liquid inclusions. *J. Geol.*, **57**, p. 331-356.
- Van den KERKHOFF, A. M. (1988). *The system CO₂-CH₄-N₂ in fluid inclusions : theoretical modelling and geological applications*. Thesis, Vrije Universiteit te Amsterdam, 209 p.

- VANKO, D. A., BODNAR, R. J. et STERNER, S. M. (1988). Synthetic fluid inclusions : VIII. Vapor-saturated halite solubility in part of the system NaCl-CaCl₂-H₂O with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, p. 2451-2456.
- VOGELSANG, H. et GEIFSLER, H. (1869). Ueber die Natur der Flüssigkeitseinschlüsse in gewissen Mineralien. *Ann. Physik Chemie*, **137**, p. 56-75.
- WERRE Jr, R. W., BODNAR, R. J., BETHKE, P. M. et BARTON, P. B. (1979). A novel gas-flow fluid inclusion heating/freezing stage. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Programs*, **11**, p. 539.
- WIESHEU, R. et HEIN, U. F. (1998). The history of fluid inclusion studies. *In* : FRITSCHER, B. et HENDERSON, F. (Eds.), *Toward a history of mineralogy, petrology and geochemistry. Algorismus, Studien zur Geschichte der Mathematik und der Naturwissenschaften*, **23**. Institut für Geschichte der Naturwissenschaften der Ludwig-Maximilian-Universität, München, p. 309-325.
- ZIRKEL, F. (1873). *Die mikroskopische Beschaffenheit der Mineralien und Gesteine*. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 102 p.

1) Les inclusions (solides ou fluides) sont responsables de certaines propriétés optiques des cristaux et notamment des gemmes (les « jardins » sont des jeux de lumière à l'intérieur des pierres précieuses, notamment des émeraudes).