Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 50 (1970)

Heft: 1: Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralien

Artikel: Le degré de liberté des solutions géochimiques dans le règne minéral : rapports entre les phases cristallogénétiques et les inclusions fluides des minéraux

Autor: Deicha, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-39236

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: 17.07.2025

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

Le degré de liberté des solutions géochimiques dans le règne minéral; rapports entre les phases cristallogénétiques et les inclusions fluides des minéraux

Par *G. Deicha* (Paris)*)

Abstract

Experimentation on inclusions gives valuable informations about movements of various origin, in trapped fluids. These fluids can be of very different chemical composition and physical property.

Besides the Brownian movements and displacements caused by superficial tension, there are also convective circulations and concentration streams. These currents appear as a result of specific mass gradients inside of the trapped fluids. These specific mass variations result from temperature and composition gradients in the inclusions.

Switching to the big scale of the lithosphere, this situation has to be modified: in very large hollows, pressure gradients appear and can hamper or block up the operation of the thermosiphons.

The pneumatolytical, hydrothermal, hydromagmatic and magmatic phases have various abilities to supersaturations and undercoolings, thus crystallogenetic desequilibrium gradients must also be considered. Formation of growth lacunae in minerals directly depends on this physico-chemical desequilibrium.

Résumé

L'expérimentation sur les inclusions permet de se familiariser avec les mouvements d'origines diverses au sein de fluides emprisonnés. Ceux-ci offrent une gamme très complète de compositions chimiques et de propriétés physiques.

A côté des mouvements browniens, ainsi que des déplacements dûs aux tensions superficielles, on peut constater la présence de courants de convection et de courants de concentration. Ces courants apparaîssent à la faveur de gradients de masse spécifique au sein des solutions géochimiques emprisonnées. Les gradients de masse spécifique naissent dans les inclusions à la faveur de gradients de température et de compositions des fluides.

En passant à l'échelle plus grande de la lithosphère, le modèle doit être modifié. En effet au sein de réservoirs plus importants les gradients de pression se manifestent à grande échelle, pouvant freiner ou bloquer le fonctionnement des thermosiphons.

---

*) Adresse: 50, rue de Mareil, 78 Saint-Germain-en-Laye (Yvelines), France.
E.R., C.N.R.S. No. 45. Géol. Appliquée, Faculté Sciences, Paris.

Les phases pneumatolytiques, hydrothermales, hydromagmatiques, et magmatiques, présentant des aptitudes variables aux sursaturations ou aux surfusions, les gradients des déséquilibres cristallogénétiques doivent également être pris en considération: la formation même des lacunes de croissance des minéraux est d'ailleurs sous la dépendance directe de ces déséquilibres physico-chimiques.

INTRODUCTION

Les recherches directes sur les liquides et les gaz présents dans l'Ecorce terrestre méritent autant l'attention des minéralogistes, des métallogénistes et des pétrographes que les investigations sur les solides. Mais en raison même de leur mobilité les masses géochimiques fluides se dérobent aux investigations géologiques. Ce n'est guère qu'en surface que les volcanologues et les spécialistes des sources thermominérales ont la possibilité d'entrer, sur le terrain, en contact avec des magmas et des solutions hydrothermales et pneumatolytiques. Ces études ne portent, en fait, que sur la phase finale de l'activité des „esprits et humeurs de la Terre". L'essentiel de l'intervention des matières fondues, liquides et gazeuses se dérobe dans les profondeurs, même lors qu'il s'agit de minéralisations n'impliquant que des températures et des pressions géologiquement modestes. Prenons l'exemple des fentes alpines: lorsque le „chasseur de cristaux" ou le minéralogiste y pénètre, la masse du fluide minéralisateur a disparu depuis longtemps, ne laissant en place que le revêtement de cristaux tapissant les parois.

Pour tenter de reconstituer la genèse de ce dépôt on pourra imaginer différents mécanismes de transfert de matière:

1° On fera venir le solvant soit *per descensum*, soit *per ascensum*.

2° On fera intervenir soit un apport de matière étrangère, soit un simple *lessivage* latéral des parois par le fluide imbibiteur pour expliquer le dépôt.

3° Le transfert de la matière dissoute peut être interprété soit par des *courants*, soit par *diffusion*.

Des observations cristallographiques fines pourront fournir des compléments d'information: saupoudrages témoignant d'une lente sédimentation de particules minérales, fantômes d'accroissement provoqués par des modifications dans les conditions de cristallisation, etc.

On sait combien de telles reconstitutions gagnent en véracité et en précisions physico-chimiques lorsqu'on examine les inclusions liquides emprisonnées dans les lacunes de croissance des édifices minéraux. Au cours des dernières années, les fentes alpines des massifs cristallins externes ont ainsi été l'objet de thèses de doctorat, qui ont considérablement enrichi les connaissances générales et régionales. Il s'agit des travaux de H. A. Stalder (1964, Massif de l'Aar), P. Ypma (1963, Belledonne), B. Poty (1967, Mont-Blanc). Ces ouvrages montrent

que les minéralisations alpines ne sont pas toutes hydrothermales, mais que certaines sont à tendance carbopneumatolytique. L'étude des inclusions permet donc de répondre à la première questions, celle de l'origine du solvant. La réponse à cette question apporte un complément d'information pour la solution de la seconde: celle de l'origine de la matière du dépôt, apport au lessivage local. La présente note a pour objet de serrer de plus près la troisième question, celle du *transfert de la matière*. Notre étude comportera deux parties: l'une portant sur le modèle réduit du microcosme des inclusions, l'autre sur l'extrapolation des renseignements ainsi obtenus à des ensembles de plus en plus vastes.

I. LES MOUVEMENTS DES FLUIDES MINÉRAUX CAPTIFS DES PORES INTRA- ET INTERGRANULAIRES

Paradoxalement ce sont les inclusions prisonnières des cavités les plus exigues des gangues et des roches qui fournissent les exemples les plus démonstratifs de mouvements au sein du Règne minéral. Nous allons distinguer ceux qu'il est loisible d'observer en l'absence de changements notables de température de ceux dont le déclanchement requiert un tel changement.

1. Dans les conditions d'une observation microscopique normale, le mouvement apparaît déjà comme la marque caractéristique des inclusions les plus banales. On peut distinguer, d'après leur origine, trois expèces de mouvements, qui se traduisent essentiellement par des déplacements de la bulle gazeuse, plus rarement par ceux de gouttes liquides en suspension ou même de particules solides présentes dans la cavité:

a) Mouvements browniens. Tirant son origine de l'agitation thermique des molécules, ce mouvement n'affecte sensiblement que des objets dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur du micron. Toutes choses étant égales par ailleurs, ce mouvement est sensible à la densité du corps sur lequel il s'exerce: ainsi dans l'eau une simple bulle de retrait, formée de vapeur d'eau, ne réagira pas de la même façon qu'une goutte d'anhydride carbonique liquide. A noter également qu'au sein de ce dernier, les mouvements browniens sont particulièrement vifs. G. G. I. Friedlaender (1970), consacrant actuellement à ces mouvements une étude mathématique complète, nous ne nous attarderons pas d'avantage sur ces questions.

b) Déplacements par gravité. Contrairement aux précédents, ces mouvements peuvent être observés dans les inclusions les plus grosses, parfois à l'œil nu. La bulle gazeuse se comporte alors comme la „libelle" d'un niveau à bulle. L'expression „inclusion à libelle mobile" tire probablement son origine de cette comparaison. Dans le cas des observations microscopiques en l'utilisant, on se

refère plutôt, par extension au mouvement brownien. La tendance de la bulle à remonter au point le plus haut ne se manifeste guère lors d'observations sous un microscope à platine horizontale, mais il suffit d'incliner l'axe de l'appareil pour la rendre manifeste. Ce mouvement devient particulièrement évident lorsque l'examen est fait sous un microscope muni d'une platine tournante, et dont on a orienté l'axe à l'horizontale. Même dans le cas de bulles coincées, leur tendance passée à s'élever est attestée par leur disposition dans la partie supérieure des inclusions. Ce fait est particulièrement net dans certaines albites de fentes alpines, où on dispose ainsi de véritables niveaux à bulles. Il serait intéressant de confronter les indications, ainsi enregistrées par blocage automatique, avec les données du fil à plomb minéralogique, fournies par le saupoudrage. D'ailleurs les particules solides, captives des inclusions, tendent également à descendre, dans la mesure où elles ne sont pas fixées aux parois ou attachées par capillarité sur la bulle (autoflottation).

c) Courants de convection. Ces mouvements naîssent à la faveur de gradients thermiques introduits par l'éclairage de la préparation examinée sous le microscope. Malgré le faible échauffement ainsi provoqué, on conçoit que les gradients puissent être élevés, de l'ordre de plusieurs dégrés sur une distance de l'ordre du millimètre, d'après une estimation sommaire. Ces courants de convection se manifestent de deux façons:

Changement de position de la bulle, qui marque la modification du régime thermique de l'inclusion. Ce déplacement peut se manifester au moment où la préparation vient d'être éclairée, c'est à dire au début de l'observation. Plus généralement l'observateur est à ce moment préoccupé de la mise au point optique générale. C'est plus souvent en faisant glisser la préparation sur la platine, pour l'explorer, que l'observateur remarquera des changements de position de la bulle des inclusions, au moment où celles-ci se trouvent transférées d'une région périphérique peu éclairée vers la région centrale de la platine, c'est à dire celle de l'éclairage maximum. Inversement, il suffit de décentrer l'éclairage pour perturber la répartition des gradients thermiques autour de l'inclusion et modifier le régime des courants de convection. Il en résulte souvent un déplacement de la bulle. Lorsque l'installation microscopique comporte deux éclairages il est loisible de faire „naviguer" la bulle entre deux positions, en utilisant alternativement ces deux élairages: un „saut", souvent assez brusque, de la bulle se produit par exemple lorsqu'on passe de l'observation en lumière transmise à l'observation en fond noir asymétrique. Ce dernier correspond d'ailleurs à une forte intensité lumineuse, propre à provoquer de véritables tourbillons au sein des fluides captifs.

Entraînement de germes cristallins, qui permet de reconnaître le caractère cyclique de courants de convection. Un tel spectable est beaucoup plus instructif que le précédent, il est malheureusement plus rare: sa réalisation nécessite des conditions intrinsèques et extrinsèques assez particulières. En effet l'inclu-

sion doit contenir de nombreuses particules libres susceptibles d'être entraînées par les courants. Etant donné la faible intensité de ceux-ci, seules les particules très fines peuvent être mises en mouvement. Dans la pratique ces particules sont justiciables de l'ultramicroscopie. L'éclairage en fond noir asymétrique rend également ici de bons services, surtout lorsque les particules sont constituées par des germes cristallins. Ces individus présentent des facettes brillantes, dont le scintillement attire immédiatement l'attention sur le mouvement du fluide qui les emporte dans ses tourbillons. Il semble que ce soient les inclusions de la phase hydrothermale des pagmatites qui offrent le plus de chances pour de telles observations.

La forme de telle ou telle particule minérale peut être plus favorable pour souligner le rythme de courants de convection. En modifiant l'intensité de l'éclairage on agit sur ce rythme. Celui de quelques cycles par minute est facile à suivre, ce qui correspond à des vitesses de courants de l'ordre du millimètre par minute, dans des inclusions de quelques dizaines de microns de plus grande dimension. L'enregistrement microcinématographique rendrait également de grands services; mais on ne possède jusqu'ici que quelques microphotographies mettant en évidence le mouvement d'une particule sous l'effet des courants de convection au sein d'une inclusion.

2. *Dans les conditions dynamiques de déséquilibre entre les phases*, les mouvements de matière au sein des inclusions sont fortement exaltés. Lors des expériences sur les effets de changement de température l'observateur note souvent des déplacements des phases en présence les unes par rapport aux autres. Nous allons donner quelques exemples complémentaires de tels mouvements accompagnant les changements d'état physique qui se déroulent dans diverses espèces d'inclusions:

a) Ebullition. Ce sont surtout les inclusions d'anhydride carbonique liquide qui offrent les meilleurs exemples d'ébullition d'une phase liquide. Contrairement aux courants de convection dont il a été question dans le précédent paragraphe, ce phénomène a déjà fait l'objet de divers enregistrements microcinématographiques. C'est ainsi que dans le film en couleur de E. Bettetini „le cœur des pierres" ce phénomène a été capté dans toute sa vivacité.

L'ébullition peut d'ailleurs être particulièrement intense lorsque l'on refroidit une phase hypercritique au-dessous de sa température critique: on peut alors faire apparaître, pour quelques fractions de seconde, des centaines de bulles d'une extrême finesse. Certaines inclusions à CO_2 révèlent ainsi la nature exacte de l'„opalescence critique", qui accompagne la séparation d'une phase hypercritique unique en deux phases complémentaires, l'une liquide, l'autre gazeuse. C'est ce phénomène que J. Painleve et J. Rasumny ont pu enregistrer en prenant au ralenti un film cinématographique de la „rétroébullition" au sein d'un quartz tessinois de la collection C. Taddei. Dans ce cas spécial les

propriétés physiques des deux fluides sont excessivement proches les unes des autres de sorte que leur différenciation s'en trouve masquée.

b) Différenciation des inclusions carbo-hydrothermales. Les expériences d'homogénéisation des inclusions comportant une phase gazeuse riche en anhydride carbonique et une phase liquide essentiellement aqueuse ne donnent généralement pas lieu à des mouvements aussi animés que ceux évoqués dans le paragraphe précédent. Il s'agit ici d'une évaporation lente de l'eau qui enrichit la phase gazeuse et d'une dissolution progressive de l'anhydride carbonique dans la phase liquide. Suivant que l'homogénéisation aboutit à une phase unique gazeuse ou à une phase unique liquide, c'est le premier ou le second des deux phénomènes qui l'emporte en définitive. Mais, en tout état de cause, on assiste à un transfert de matière. Au cours du refroidissement d'une inclusion ainsi homogénéisée on assiste à des transferts inverses, caractéristiques d'une différenciation de la solution géochimique en un fluide pneumatolytique et un fluide hydrothermal.

c) Courants de concentration. Les spécialistes des cristallisations expérimentales sont familiarisés avec les mouvements des solutions mères, qui peuvent résulter de leur enrichissement ou de leur appauvrissement en substances dissoutes. Dans une inclusion microscopique ces courants sont beaucoup plus difficiles à mettre en évidence que dans un cristallisoir. Leur réalité découle cependant des observations qui peuvent être faites au sein des inclusions pendant le déroulement expérimental de dissolutions, ou de cristallisations artificielles. Nous distinguerons donc, pour ordre, courants de dissolution et courants de cristallisation:

Les courants de dissolution. Prenant naissance au contact des phases cristallines en voie de dissolution, ces mouvements correspondent à la descente du fluide enrichi en soluté. De tels phénomènes doivent être particulièrement actifs au cours de l'homogénéisation des inclusions hydromagmatiques. Ces courants peuvent prendre naissance non seulement au contact des dépôts (en particulier salins) existant dans de telles inclusions, mais également au contact de leurs parois. En effet lorsque l'expérience est poussée, sur le microscope de chauffe, au-delà de l'homogénéisation, le minéral hôte est attaqué à son tour. Des faits analogues ont déjà été observés dans les reliquats magmatiques réanimés, qui font l'objet des recherches de R. Clocchiatti (1968). En sens inverse des courants de dissolution peuvent intervenir à la faveur de la fusion des cryohydrates. Mais c'est là un phénomène dont l'importance est réduite dans la Nature, malgré l'intérêt analytique de ces expériences cryométriques sur les inclusions.

Les courants de cristallisation sont contrairement aux précédents des courants généralement ascendants. Leur remontée résulte de l'appauvrissement des solutions mères, en substances dissoutes au contect des faces cristallines en voie de croissance. Déjà délicats à mettre en évidence dans un cristallisoir ces mouvements n'en jouent pas moins un rôle essentiel dans le déroulement des

cristallisations artificielles. Il est évident que les microcourants de cristallisation interviennent au cours des croissances minérales „in cristallo", par exemple lorsqu'un dépôt salin se forme dans une inclusion hydromagmatique préalablement homogénéisée.

3. Pour terminer cette première partie de notre exposé nous signalerons encore quelques particularités des mouvements des fluides minéraux captifs des inclusions liés à des actions de surfaces:

a) Contact gaz-liquide. Dans le cas de l'apparition de plusieurs bulles gazeuses dans une même inclusion, celles-ci se rejoignent généralement pour n'en former qu'une seule. Si une telle „coalescence" par contact direct n'est pas possible le même résultat est obtenu à distance sous l'effet de la différence des tensions superficielles, qui existent entre des bulles de dimensions différentes: les plus petites se dissolvent au profit des plus grandes.

b) Contact entre deux liquides. Dans le cas des inclusions à trois phases fluides on constate que les bulles cernées d'une couche d'anhydride carbonique liquide présentent une remarquable sensibilité aux gradients thermiques. Leur mobilité résulte probablement d'une conjonction des courants de convection qui prennent naissance dans les deux liquides.

c) Contact entre fluide et solide. On observe parfois des germes cristallins collés sur la bulle gazeuse. C'est un véritable phénomène de flottation, son explication nécessiterait un examen physico-chimique très approfondi. On notera d'ailleurs que les phénomènes qui se déroulent dans le microcosme minéral d'une inclusion fluide révèlent une complexité qui fait déjà penser, toutes proportions gardées, à celle de la cellule vivante.

II. LES MOUVEMENTS DES FLUIDES MINÉRAUX LIBRES DANS LES CAVITÉS DE LA LITHOSPHÈRE

Après avoir analysé les enseignements que peut fournir l'observation et l'expérimentation directe sur les inclusions microscopiques nous allons essayer d'extrapoler à l'échelle des masses fluides intervenant dans les profondeurs de la lithosphère. En préambule à la présente note nous avons considéré le cas des fentes alpines. Ce sont là des réservoirs dont les dimensions se chiffrent en mètres, mais leur volume se trouve en quelque sorte à mi-chemin entre celui des inclusions (microns cubes) et celui des réseaux filoniens dont l'étendue se mesure en kilomètres, voir en dizaines de kilomètres. S'il nous est possible, dans le cas d'un „four à cristaux" de dimensions modestes, de retrouver les équivalents de la plupart des mouvements de matière que nous avons considéré dans la première partie, il nous faut pour des réservoirs plus importants introduire un facteur nouveau. Ce facteur nouveau est *le gradient des pressions.*

Nous allons successivement examiner les conséquences de son intervention sur les principales espèces de mouvements, qui peuvent se manifester dans les cavités de l'écorce terrestre:

a) La compressibilité des diverses espèces des fluides géochimiques. Si entre le point le plus bas et le plus haut d'une inclusion la différence de pression, en régime statique, ne saurait être que minime il n'en est plus de même dans les cavités ou réseaux de cavités affectant la lithosphère. Il est classique de distinguer à l'intérieur de celle-ci d'une part la pression lithostatique, d'autre part la pression hydrostatique. Dans cette conception simplifiée on prend pour masse spécifique moyenne des roches 2,7 kg/dm^3 et pour celle des solutions hydrothermales simplement 1 kg/dm^3. Ainsi dans un réservoir hydrothermal on estimera que la différence des pressions qui règne entre des points dont la différence de niveau est par exemple de 4 km, sera de 400 kg/cm^2.

En réalité les renseignements que nous fournissent les inclusions aqueuses montrent assez que la masse spécifique des solutions hydrothermales est des plus variables. Les tableaux de correction à la pression souvent utilisés en matière de thermométrie minéralogique indiquent que la compressibilité des solutions aqueuses intervient largement dans les profondeurs de la lithosphère.

Pour les solutions dont le solvant est constitué pour une large part par l'anhydride carbonique les corrections à la pression deviennent beaucoup plus importantes et il est très difficile de se faire une idée sur le gradient des pressions qui peuvent règner dans un réservoir rempli par un mélange d'anhyride carbonique et d'eau formant un fluide homogène. Dans le cas où l'anhydride carbonique prédomine on se trouve confronté avec des problèmes plus proches de ceux de la physique de l'atmosphère que de ceux de l'hydrostatique. Par contre les hydromagmas et le magma n'offrent qu'une compressibilité relativement plus réduite et le problème des pressions qui règnent à différents niveaux peut être traité d'une façon simplifiée. D'ailleurs même pour les magmas acides, si on peut convenir de prendre une masse spécifique de 2,4 kg/dm^3 en première approximation, les observations effectuées sur les reliquats magmatiques, sous le microscope de chauffe, permettent déjà de serrer de plus près le problème de leur dilatation thermique. Par contre on ne possède encore guère de données précises au sujet de leur compressibilité.

Le déclenchement des mouvements de masses gazeuses liquides ou fondues au sein de la lithosphère est essentiellement sous la dépendance de la profondeur: les gradients de température et les gradients de pression décideront de ces mouvements, en agissant en sens inverse sur la masse spécifique des fluides.

Cette action antagoniste de la dilatation thermique et de la compression règlera la montée des fluides présentant les masses spécifiques les plus faibles et la descente des fluides présentant les masses spécifiques les plus fortes. En règle générale on peut penser qu'il s'établira des courants actionnés par thermosiphon: les fluides réchauffés en profondeur remontent et sont remplacés

par la descente des fluides refroidis en surface. Mais sur ce schéma peuvent se greffer divers mécanismes propres à exalter ou à contrarier ces gigantesques courants de convection. Nous examinerons certains de ces effets dans les paragraphes suivants. A la limite la possibilité théorique existe d'un blocage complet des thermosiphons à partir du moment où l'effet de la compression l'emporte sur celui de la dilatation thermique.

b) L'effet des concentrations sur les mouvements des solutions dans les cavités de l'écorce terrestre. L'augmentation des concentrations conduisant normalement, toutes choses étant égales par ailleurs, à une augmentation des masses spécifiques, les modifications de la concentration des fluides, en telle ou telle substance dissoute, doivent influencer les mouvements des solutions géochimiques au sein de la lithosphère. Prenons à titre d'exemple une masse aqueuse qui rencontre en profondeur une substance minérale soluble. En dissolvant cette substance les couches inférieures de la masse aqueuse peuvent se trouver suffisamment alourdies pour empêcher l'amorcage d'un thermosiphon à la faveur du gradient des températures. Il est certain que la diffusion a des chances d'égaliser progressivement la teneur en substances dissoutes, il n'en demeure pas moins certain que cette masse „stagnera" pendant une période plus ou moins longue.

Un mécanisme accessoire peut limiter l'effet uniformisateur de la diffusion. La saturation d'une solution dépend elle-même des conditions physiques. Si on se trouve dans ce cas limite les teneurs en substances dissoutes seraient normalement plus fortes au fond d'un réservoir que dans sa partie supérieure. L'activité de courants de convection se trouvera contrariée par la présence massive de substances dont la solubilité augmente fortement avec la température et la pression.

Dans le cas des solutions géochimiques, solvants et solutés sont des mélanges de constituants divers et les variations de densités qui peuvent résulter de dissolutions et de dépôts ne peuvent actuellement être prévues avec exactitude. D'ailleurs si la présence de sels très solubles est de nature à porter la masse spécifique des solutions hydrothermales à des valeurs voisines de celles des magmas on peut également envisager la possibilité de fluides pneumatolytiques plus denses que des solutions aqueuses liquides. Dans le paragraphe suivant nous allons esquisser quelques aspects possibles des échanges de matière au sein de réservoirs dont le remplissage comporte plusieurs phases fluides.

c) Diffusion et autres échanges de matière dans un réservoir contenant plusieurs fluides. Les rapports entre les différentes phases fluides qui coexistent dans un même réservoir sont d'autant plus complexes que le réservoir est plus grand et que les différences de température et de pression qui règnent en ses divers points sont plus importantes.

Dans le cas des inclusions microscopiques la coexistence de deux ou plusieurs phases fluides pose déjà d'innombrables problèmes. Parmi ces problèmes le plus ancien est celui de l'origine de la bulle gazeuse au sein de la plupart des

inclusions aqueuses. On sait que pour beaucoup d'auteurs il s'agit de bulles préexistentes emprisonnées mécaniquement par les minéraux au cours de la croissance. Cette même hypothèse avait d'ailleurs été avancée du temps de SORBY par son élève H. VOGELSANG (1867), pour expliquer la présence de bulles anormalement développées dans les reliquats magmatiques. Plus récemment E. ROEDDER (1965) envisageait la possibilité d'un mécanisme semblable pour expliquer la présence simultanée d'inclusions vitreuses et d'inclusions à CO_2 liquides. Ainsi l'hypothèse de la possibilité de véritables émultions, voire de „mousses" dans les réservoirs magmatiques, ou les systèmes filoniens, est assez souvent admise. Une variante de ces idées consiste à admettre la présence de bulles ou de gouttes microscopiques fixées par capillarité à la surface des minéraux en voie de développement. Il est par exemple probable que les inclusions d'hydrocarbures liquides, présentes dans des quartz de néoformation de série sédimentaire, ont bien une telle origine. On a également imaginé avec quelques vraisemblance la possibilité de véritables ébullitions soit de magma (gas lift) soit de solutions hydrothermales.

Il semble plus légitime encore de considérer que dans les grands réservoirs ou réseaux de cavités vascularisant l'écorce terrestre les phases fondues, liquides ou gazeuses tendent à se séparer en grandes masses dont la distribution est commandée par la gravité. L'évolution de ces masses et les mouvements de matière qui en résultent se trouvent sous la dépendance des gradients de température qui existent entre les différents points de leurs parois et les gradients de pression qui règent dans leur intérieur. Le cas particulier des fluides carbo-hydrothermaux permet d'affirmer l'importance géochimique de distillations et de condensations fractionnées: dans un même réseau filonien on peut envisager une différenciation complémentaire d'un fluide hydrothermal de plus en plus dense et d'un fluide pneumatolytique de plus en plus léger. Les dissolutions et les cristallisations minérales se trouvent réglées par un jeu complexe de courants de convection circulant au sein des deux fluides ainsi que par le lessivage des parois de la chambre pneumatolytique par les eaux de condensation. Il était d'ailleurs légitime de supposer que la répartition des dépôts pouvait être partiellement régie par les variations des coefficients de partage des substances dissoutes entre les deux phases fluides.

Il faudra attendre que les expériences sur les reliquats magmatiques fournissent des données sur la formation des phases gazeuses et liquides dérivées avant de pouvoir envisager une analyse des rapports entre réservoirs magmatiques et imbibitions, pneumatolytique et hydrothermale, des roches encaissantes.

* * *

Il est évident que chaque fois que de nouveaux diagrammes d'équilibre, entre des fluides et des solides de composition ou de nature apparentées à celles

des solutions géochimiques et des phases minérales cristallines, sont établis expérimentalement, notre compréhension des transformations subies par les inclusions peut être affinée. Cependant il est un facteur dont les physiciens et les chimistes ne tiennent encore que très insuffisamment compte: le déséquilibre cristallogénétique. Dans le règne minéral ce déséquilibre peut en particulier prendre la forme de surfusion de magma ou d'hydromagma, ainsi que de sursaturation de liquides hydrothermaux et de solutions pneumatolytiques, voire même d'eaux océaniques ou continentales. L'étude des inclusions a le grand mérite de familiariser avec les retards aux changements d'état, dont le retard à la nucléation et à la croissance cristalline n'est qu'un cas particulier. Certes les petites dimensions des inclusions sont favorables au déséquilibre cristallogénétique, mais il est évident que les gradients de surfusion et de sursaturation interviennent d'une façon décisive à l'échelle des réservoirs magmatiques et des réseaux filoniens hydrothermaux et pneumatolytiques. En dernière analyse on peut voir dans le champ de ces degrés de surfusion et de sursaturation l'élément principal de liberté dans l'intervention des fluides minéraux dans la lithosphère. On peut même dire qu'en l'absence de cet élément les inclusions fluides n'auraient aucune raison de se former. Les expériences sur des substances artificielles montrent d'ailleurs que les lacunes de cristallisation sont des indicateurs précieux des variations du déséquilibre physico-chimique au cours de la croissance cristalline. La formation des cavités dans les architectures minérales n'est qu'une conséquence de l'enrichissement et de la complication que les surfusions ou les sursaturations introduisent dans leur édification.

BIBLIOGRAPHIE

Clocchiatti, R. (1968): Aperçu sur la morphologie des inclusions vitreuses dans les phénocristaux de quartz des laves acides des Vosges septentrionales. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 267, série D, p. 2257–2259 (voir aussi ibid., t. 265, série D, p. 1861–1863).

Friedlaender, C. G. I. (1970): Brownian movement in quartz as attempt at quantitative evaluation. Bull. Suisse Minéral. Pétrogr., t. 50.

Poty, B. (1967): La croissance des cristaux de quartz dans les filons sur l'exemple de filon de la Gardette (Bourg d'Oisans) et des filons du Massif du Mont Blanc. Thèse, Nancy.

Roedder, E. (1965): Liquid CO_2 inclusions in olivine-bearing nodules and phenocrysts from basalts. Amer. Mineral., vol. 50, p. 1746–1782.

Stalder, H. A. (1964): Petrographische und mineralogische Untersuchungen im Grimselgebiet (Mittleres Aarmassiv). Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., Bd. 44, Heft 1, S. 187–398.

Vogelsang, H. (1867): Philosophie der Geologie und mikroskopische Gesteinsstudien. Max Cohn u. Sohn, Bonn.

Ypma, P. J. M. (1963): Rejuvenation of ore deposits as exemplified by the Belledonne metalliferous Province. Thèse, Leiden.