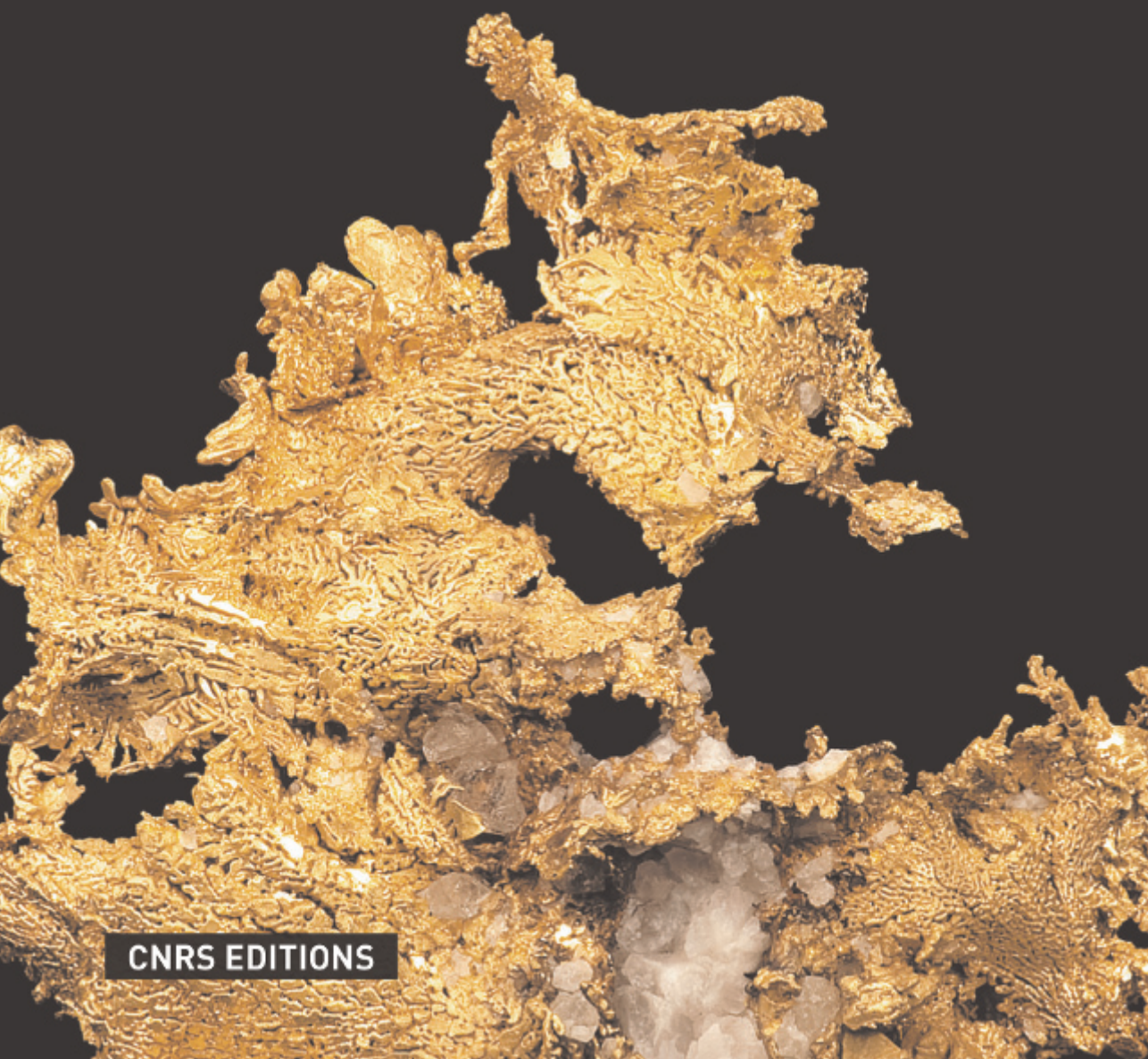


JEAN-CLAUDE BOULLIARD

Les minéraux

Sciences et collections



CNRS EDITIONS

Présentation de l'éditeur



Les minéraux Sciences et collections

Qu'est-ce qu'un minéral ? D'où viennent les noms des minéraux ? Sont-ils dangereux ? Comment se forment-ils au sein de la Terre ? Quelles sont les causes de leurs couleurs ? Pourquoi les minéraux ont-ils des formes géométriques aussi parfaites ? Combien vaut un beau cristal de calcite d'Elmwood ? Comment les collections de minéraux ont-elles évolué ? En répondant à ces questions – parmi beaucoup d'autres –, Jean-Claude

Boulliard comble une partie du fossé entre le monde du scientifique et celui de l'amateur ou du collectionneur.

Ce livre se compose de deux parties. Une première, générale et culturelle, offre des réponses aux questions des néophytes et amateurs, de manière claire et accessible, tout en offrant l'état de la science le plus à jour. La deuxième partie, plus encyclopédique, décrit près de 280 espèces minérales importantes, et réunit toutes les informations nécessaires à leur reconnaissance, leurs principales caractéristiques, leurs origines, leurs appréciations et leur cote. Chacune des notices qui composent cette partie est illustrée par des photographies de grande qualité, réalisées par Alain Jeanne-Michaud, au sein de la collection de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

Un grand livre de sciences minéralogiques, de découvertes et de passions.

Jean-Claude Boulliard est enseignant-chercheur et directeur de la collection des minéraux de l'Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie à l'université Pierre-et-Marie-Curie – Sorbonne Universités. Il est l'auteur, entre autres, du Cristal et ses doubles (CNRS Éditions, 2010).

Jean-Claude Boulliard

LES MINÉRAUX

Sciences et collections

Photographie : Alain Jeanne-Michaud

L'ensemble des minéraux photographiés fait partie de la collection des minéraux de l'université Pierre et Marie Curie, UPMC - Sorbonne Université à l'exception de ceux présentés p. 121 (diamant), 124, 250, 301, 324 (crocoïte en cristaux fins), 456, 470, 471, 491, 497, 503, 504, 583.

© CNRS, Paris, 2016

ISBN : 978-2-271-09062-1

INTRODUCTION

Que rien ne te demeure étranger, ni des pierreries et fructices de l'Orient, ni des métaux cachés au ventre des abîmes.

(Rabelais, Lettre de Gargantua à Pantagruel)

Bien souvent la science répond à des questions que l'on ne se pose pas. Réciproquement, elle ne répond pas toujours à des questions que l'on se pose. La minéralogie n'y échappe pas.

Qui, par exemple, s'intéresse de savoir que la calcite possède comme groupe d'espace $R\bar{3}C$? Qui encore est bouleversé d'apprendre que cette même calcite possède une maille cristalline quatre fois plus grande que la maille autrefois déduite des clivages? Quelques scientifiques, n'en doutons pas. Encore faudrait-il qu'ils fussent spécialistes en cristallographie. Discipline que je chéris, mais qui est « maudite » par bon nombre de mes confrères fâchés avec la géométrie. Quelques amateurs aussi. Pour le reste, l'immense majorité, ces questions ne se posent pas. Qu'est-ce qu'un groupe d'espace? Une maille cristalline? À quoi servent toutes ces notions?

Par contre un grand nombre des amateurs se pose régulièrement des questions qui n'intéressent pas vraiment les scientifiques. Reprenons l'exemple de la calcite. D'où vient ce nom et pourquoi a-t-il supplanté celui de spath? Pourquoi possède-t-elle tant de formes cristallines? Combien vaut un beau cristal d'Elmwood? Pourquoi le carbonate de calcium apparaît-il sous forme de calcite ou bien d'aragonite, pourquoi ces deux espèces? Pourquoi pas dix autres?

Le présent ouvrage se propose de combler une partie du fossé entre le monde du scientifique et celui du collectionneur et /ou de l'amateur. Le scientifique y répond à quelques questions posées par l'amateur, mais aussi à quelques-unes que l'amateur aurait intérêt à se poser. Le collectionneur apporte une histoire et une culture qui ont transformé des cailloux en objets précieux, admirés et avidement convoités. Deux grandes parties le composent.

La première expose des jalons qui permettront au collectionneur de maîtriser la culture propre à la minéralogie de collection, d'aborder plusieurs questions scientifiques fondamentales, d'appréhender plusieurs débats et controverses qui l'animent et d'entr'apercevoir ses évolutions récentes. Les différents thèmes sont présentés comme des réponses à des questions. On ne répond pas bien sûr à toutes les questions que se pose l'amateur. Souvent pour une raison très simple : c'est qu'il n'y a pas de réponse à ce jour. Parfois parce que la réponse dépasse le cadre de ce livre et qu'il a fallu faire des choix. Le plan de cette partie est de regrouper les questions en quatre chapitres selon le degré d'avancement dans la minéralogie.

Le premier chapitre regroupe les questions régulièrement posées par les visiteurs profanes aux professionnels des musées. Certaines ont un caractère scientifique (Qu'est-ce qu'un minéral?) d'autres non (« D'où viennent les noms des minéraux? »). Le terme de profane ne signifie pas que le niveau des réponses soit bas. Dans le cas d'une question comme « D'où viennent les couleurs des minéraux? », il est impossible de répondre sans se référer à des notions qui sont assez complexes et qui, pour certaines, sont développées plus loin dans cette première partie. Le deuxième chapitre regroupe plusieurs interrogations du néophyte qui veut acquérir les connaissances de base. Elles ont un caractère surtout théorique et son parfois ardues. Elles ont trait au classement des minéraux et aux notions de chimie et de cristallographie utiles pour aborder la minéralogie sous un angle scientifique. Le troisième chapitre est plus spécialisé et a un caractère surtout pratique. Il répond à des questions que se pose souvent le minéralogiste amateur pour

reconnaître les minéraux ou bien savoir s'ils sont de dangereux ou non, s'ils ont été traités et quels sont les minéraux à connaître. Un effort particulier a été fait pour développer les aspects directement accessibles au collectionneur. Pour la cristallographie, par exemple, l'accent est mis sur les formes cristallines et leur analyse, et non pas, comme on le voit trop souvent sur les notions abstraites de réseau, mailles et autres qui ne sont utiles que si l'on a accès à un laboratoire hautement spécialisé. Le quatrième chapitre aborde des questions relatives à la collection comme objet culturel, patrimonial et d'investissement. Ce sujet est vaste et somme toute assez nouveau : il englobe l'histoire, les motivations, la valeur des objets, les critères de choix et les échelles d'appréciation.

Chaque section de cette partie est, à peu près, indépendante des autres, ce qui évite des renvois trop nombreux et permet au lecteur de se plonger dans un sujet particulier sans avoir à lire toutes les sections précédentes. Avec cependant un inconvénient : plutôt que des renvois, il y a quelques redites sur certains points, d'une section à l'autre.

Dans la deuxième partie, le lecteur trouvera la description d'espèces minérales importantes ainsi que leur classification. La description comprend des informations qui permettent leur reconnaissance ainsi que des informations plus spécifiques à la pratique de la minéralogie de collection. Les localités indiquées sont les plus importantes connues, en termes de qualité. On s'étonnera que certains minéraux très fréquents sont représentés par peu de localités : ce cas se présente lorsque quelques localités dominent toutes les autres. À l'inverse, des espèces plus rares sont parfois représentés par un nombre conséquent de localités lorsque aucune d'entre elles ne se distingue nettement des autres. Les localités les plus prolifiques ont été privilégiées, les localités confidentielles qui demandent une érudition et une grande spécialisation, ont été évitées. Ce défi n'a pas été respecté à la lettre, il est difficile de résister à l'envie de présenter des curiosités qui tiennent à cœur, comme certaines qui ont distingué la minéralogie française.

L'expérience montre que la présentation des localités minéralogiques est un exercice périlleux. Le premier écueil est l'orthographe : les erreurs sont inévitables. Les variations de frontières et de politiques apportent leur lot, les coquilles et les traductions aussi... ainsi que cette exception française qui veut que l'on francise systématiquement tous les noms géographiques. Ce point est particulièrement problématique pour le russe, où l'on trouve des transcriptions diverses. On a utilisé les transcriptions françaises pour les grandes divisions administratives, et celles, que l'on trouve dans les ouvrages et sites minéralogiques internationaux, pour les noms des gisements. Ce qui permettra au lecteur de retrouver rapidement des références, autres que françaises. Le deuxième écueil tient à ce que l'on entend par localité : est-elle administrative ou géologique ? La première option a été choisie... presque toujours. Le dernier point enfin a trait à la précision sur la localité. On voit par exemple des étiquettes où sont reportés le niveau de la mine, le nom du quartier (de mine), le nom de l'accès, le nom de la mine, du lieu-dit, de la commune, etc., jusqu'au nom du pays. L'option retenue ici est de ne pas chercher à être trop précis, car les erreurs s'amplifient rapidement avec la précision. L'important est de connaître les noms des mines ou districts qui marquent l'histoire de la minéralogie de collection.

PREMIÈRE PARTIE

**Jalons
minéralogiques**

**Vingt questions
et leurs réponses**

1^{re} PARTIE : JALONS MINÉRALOGIQUES – VINGT QUESTIONS ET LEURS RÉPONSES

Chapitre 1 : Six questions souvent posées par le profane	7
<i>Qu'est-ce qu'un minéral?</i>	7
<i>Comment se forment les minéraux?</i>	12
<i>D'où viennent les noms des minéraux?</i>	22
<i>Qui a sculpté les pierres?</i>	28
<i>Qu'est-ce qui colore les minéraux?</i>	38
<i>À quoi servent les minéraux?</i>	47
Chapitre 2 : Cinq questions souvent posées par le néophyte	53
<i>Comment classe-t-on les minéraux?</i>	53
<i>$Pb(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5H_2O$, que se cache-t-il derrière une formule chimique?</i>	58
<i>Qu'est-ce qu'un cristal et comment classe-t-on les cristaux?</i>	63
<i>Comment classe-t-on les silicates? Une introduction à la cristallographie</i>	69
<i>Quelles sont les espèces minérales qu'il vaut mieux connaître?</i>	76
Chapitre 3 : Quatre questions souvent posées par le minéralogiste amateur	81
<i>Comment détermine-t-on un minéral sans forme cristalline?</i>	81
<i>Comment analyse-t-on un cristal? Comment décrit-on les amas de cristaux?</i>	92
<i>Les minéraux d'arsenic sont-ils des poisons? Les minéraux sont-ils dangereux?</i>	103
<i>Les minéraux de collections peuvent-ils être améliorés, arrangés ou bidouillés?</i>	109
Chapitre 4 : Cinq questions souvent posées par le collectionneur	125
<i>De quand datent les collections et comment ont-elles évolué?</i>	125
<i>Pourquoi collectionne-t-on?</i>	140
<i>Qu'est-ce qu'un minéral de collection? Quelles sont les échelles de qualité?</i>	144
<i>Qu'est-ce qu'un minéral de collection? Quels sont les critères de choix?</i>	149
<i>Combien valent les minéraux de collection?</i>	158

CHAPITRE I

SIX QUESTIONS SOUVENT POSÉES PAR LE PROFANE

Qu'est-ce qu'un minéral ?

Observer la nature est la nourriture la plus plaisante de l'âme.

(Georg Pauer ou Bauer dit Georgius Agricola)

Du fossile au minéral

La définition du minéral n'a pas été une chose simple. Jusqu'au XVIII^e siècle et exceptionnellement jusqu'au début du XIX^e siècle, on utilisait plutôt le terme de fossiles qui incluait, selon Bertrand, « quidquid de terra effoditur » autrement dit et plus précisément, en français cette fois-ci : « tout ce qui croît ou se forme en terre, sans paraître avoir de vie ». Les objets issus de l'activité humaine étaient exclus. Encore fallait-il reconnaître leur origine humaine. Ainsi, parmi les glossopètes, que l'on a cru être des langues de serpent pétrifiées, on incluait ce qui sera reconnu plus tard être... des outils préhistoriques. Finalement ce terme désignera des dents de poissons, requins et autres, fossilisées.

C'est durant ce même XVIII^e siècle que Carl Linnaeus (1707-1778), plus connu sous le nom de von Linné qu'il a acquis en 1762 après son anoblissement en 1761, propose de faire la différence entre les pierres, les minéraux et les fossiles.

Cette distinction est quasiment acceptée à la fin de ce siècle. Les pierres sont devenues des roches, c'est-à-dire des matériaux, souvent des mélanges, aux caractéristiques précises, que l'on trouve sous terre sur des étendues notables. La science des roches, la pétrologie, est l'une des bases de la science de la terre, la géologie. Les fossiles sont des restes d'êtres vivants (animaux, plantes...) transformés en pierre. La science des fossiles, la paléontologie, est aujourd'hui liée aux sciences du vivant.

Les minéraux, quant à eux, sont, les substances de base des roches et fossiles. La naissance de la chimie et de la science des cristaux, la cristallographie, à la fin du XVIII^e et au début du XIX^e siècle, a permis de mieux analyser ces substances et de dégager la notion d'espèce minérale.

La notion d'espèce minérale

En France, on considère que la chimie moderne est née avec Antoine Lavoisier (1743-1794). C'est vrai pour les bases théoriques, mais c'est oublié tout l'apport des chimistes d'autres pays et en particulier les travaux considérables du savant suédois Jöns Jacob Berzelius (1779-1848). Au début du XIX^e siècle, Berzelius développe l'analyse des minéraux. Il propose une classification chimique dont les hypothèses sont encore à la base des classifications actuelles. Il est considéré comme l'un des fondateurs de la chimie, « minérale » bien sûr !

René-Just Haüy (1743-1822), quant à lui, est considéré comme l'un des fondateurs de la cristallographie. Il a permis de différencier des substances aux caractéristiques chimiques proches ou similaires grâce à l'analyse des cristaux. Dans son dernier ouvrage de 1822, il écrit que : « on a donné le nom de *minéraux* aux corps qui, placés à la surface ou dans le sein du globe terrestre, sont dépourvus d'organisation et n'offrent que les assemblages de molécules similaires, liées entre elles par une force que l'on appelle *affinité*. » Et de citer, en exemple, les diamants, les rubis, l'or, l'argent et le fer. Précisons que le terme d'organisation doit être ici pris dans le sens de présence d'organes permettant la vie. Haüy a montré que n'importe quel cristal s'explique par l'accumulation, l'empilement régulier de « molécules » toutes identiques. Il ne parle pas, dans ce cas d'organisation, mais de « structure ».

À la fin du XIX^e, la définition d'un minéral ne semble plus poser beaucoup de problème. Selon Frédéric Wallerant (1858-1936) : « On appelle minéral tout corps simple ou composé, de composition chimique définie, entrant dans la constitution du sol. »

On aurait pu s'arrêter là. Malheureusement ce serait trop simple. D'autres définitions vont se succéder.

Aubert, Guillemin et Pierrot en 1978, en donnent une particulièrement détaillée :

« Un minéral est un solide naturel, homogène, possédant une composition chimique définie et une structure atomique ordonnée. »

D'apparence anodine cette définition est redoutablement contraignante, car chaque terme, « solide », « naturel », « homogène », « composition chimique définie » et « structure atomique ordonnée », demande des commentaires qui révèlent des exceptions qui n'ont parfois rien d'exceptionnel. Les termes « composition chimique définie » et « structure atomique ordonnée » seront discutés plus loin. Choisissons pour l'instant le terme le plus anodin, celui d'homogène qui, pour l'immense majorité des minéralogistes, va de soi.

Qu'entend-on par « homogène » ? La définition du dictionnaire « qui est formé de parties de même nature » ouvre la voie. Pour mieux l'illustrer, imaginons que l'on prenne un bloc de matière que l'on divise en plusieurs parties de formes exactement identiques : s'il n'est pas possible de distinguer les différentes parties avec toutes les méthodes dont on dispose, alors cette matière est dite homogène. La question est : jusqu'où peut-on poursuivre la division ? À partir de quelle dimension la division décompose la substance considérée en parties différentes. En général, pour un élément chimique donné, formé d'atomes tous identiques, ces dimensions sont, très petites, moins de 0,0000000001 m, soit un dixième de nanomètre typiquement. Or il existe des minéraux qui ont des structures, plus grandes, parfois sur plusieurs dizaines de nanomètres, comme celles dites « modulées », qui sont décrites comme l'alternance régulière d'une partie d'un minéral A et d'une autre partie d'un minéral B. Actuellement, une telle structure n'est pas polémique, elle est considérée comme un minéral à part entière alors que l'on pourrait y voir un mélange, certes ordonné, de deux minéraux. Les opales, quant à elles, montrent une variété d'arrangements constitués de billes ou d'agrégats plus complexes de dimensions variables, atteignant parfois plusieurs centaines de nanomètres, constituées de silice plus ou moins hydratée. Ces billes ou agrégats sont soudés par de la silice additionnelle. Ces arrangements ne sont pas homogènes. Certains minéralogistes préconisent de classer l'opale dans une autre catégorie : comme celle des roches, ce qui n'est pas simple, ou bien dans celle des « minéraloïdes » qui autorise un vaste champ d'interprétations. On trouve une situation, un peu similaire avec la chrysocolle, un silicate de cuivre, que certains décrivent comme un mélange de petites particules nanométriques de spertinite, un hydroxyde de cuivre, avec de la silice. Il existe des situations plus complexes, où la composition chimique varie continûment d'un bord à l'autre du cristal avec parfois passage d'une espèce à l'autre ? Dans tous ces cas, il n'y a pas *stricto sensu* d'homogénéité.

Oublions donc, pour l'instant, la définition d'Aubert, Guillemin et Pierrot.

La dernière définition officielle est due à Nickel en 1995 et fait suite à des demandes de la communauté minéralogique auprès de l'IMA, l'International Mineralogical Association, pour une définition compatible avec les dernières avancées technologiques. Elle stipule que :

« In general terms, a mineral is an element or chemical compound that is normally crystalline and that has been formed as a result of geological processes. »

« En règle générale, un minéral est un corps chimique simple ou composé qui est normalement cristallin et qui a été formé par des processus géologiques. »

Les limites d'une définition

Cette définition semble similaire des précédentes, mais on remarque tout de suite, qu'elle est moins contraignante, ou plus prudente, grâce aux termes de « générale » et « normalement ». Cette remarque étant faite, il y a encore des controverses. Entrons plus en détail dans les situations-limites « qui font débat ».

Le terme de cristallin, dans son sens actuel, caractérise les matériaux qui séparent (le terme exact est « qui diffractent ») un faisceau parallèle de rayons X en plusieurs faisceaux. Rappelons que les rayons X « normaux » ont des longueurs d'onde de l'ordre de 0,1 nanomètre ou 1 Angström pour prendre une ancienne unité encore très utilisée par les cristallographes.

Une première difficulté apparaît avec les minéraux qui n'ont pas de structure cristalline bien définie. Un exemple simple est celui de l'ancalime qui présente des symétries-limites. Ce concept, qui a été débattu en France durant le XIX^e siècle, désigne les cas où le minéral est à la limite de plusieurs structures cristallines. L'ancalime est ainsi triclinique, monoclinique, orthorhombique, rhomboédrique, quadratique, ou bien finalement cubique. Les différences tiennent à des petits déplacements. L'astuce pour remettre l'ancalime dans le droit chemin a été de dire qu'elle est triclinique et micromaclée : cette astuce est contestable, mais c'est là un débat bien compliqué.

Une deuxième difficulté est introduite par les substances géologiques homogènes qui ne sont pas « cristallines ». On y distingue deux cas :

La substance a été cristalline dans le passé et a perdu cette caractéristique à cause des radiations de la radioactivité naturelle. On parle, dans ces cas, de métamictes.

La substance, dès son apparition, n'a pas été cristalline. On parle alors d'amorphes.

Certains minéralogistes refusent systématiquement, les substances non cristallines, arguant qu'il est souvent impossible de statuer si la substance est un vrai composé chimique ou bien un mélange. Une façon, qui n'est pas neuve, de résoudre ces controverses est de ranger les cas litigieux dans une nouvelle catégorie. Le terme de « mineraloïde », déjà évoqué, a été proposé ! Il ne fait pas l'unanimité.

La situation actuelle est que les métamictes sont acceptés si on établit avec une bonne certitude quelle était la substance cristalline de base. Pour les amorphes, des techniques d'analyses complexes permettent de déterminer si l'on a un mélange ou non. Plusieurs amorphes comme la georgeite, un équivalent amorphe de la malachite, ou la calciouranoïte sont acceptés. Il reste cependant des cas inclassables. L'opale par exemple est souvent présentée comme amorphe alors qu'il existe des opales diffractant les rayons X. Ainsi, les spécialistes distinguent les opales A, amorphes, les opales C ou CT, un peu cristallines, et d'autres encore. Pas les minéralogistes.

Un cas plus marginal de substance amorphe est représenté par les liquides. Par convention, le mercure est considéré comme un minéral. Par contre l'eau fait l'objet de controverses d'autant plus âpres, que l'enjeu est insignifiant. Pour le plus grand nombre l'eau n'est pas un minéral mais... la glace en est un.

Revenons maintenant sur le terme de corps chimique. Pour le chimiste un corps possède une composition bien précise. Cette précision admet de légères tolérances à cause des impuretés. Pour le minéralogiste la tolérance est beaucoup plus élevée. Un cas emblématique est celui des solutions solides appelées aussi séries continues où l'on passe d'une formule chimique à une autre en substituant les atomes d'un élément par ceux d'un autre. C'est le cas par exemple de la fosterite $Mg_2(SiO_4)$ qui, par remplacement progressif du magnésium par le fer devient la fayalite $Fe_2(SiO_4)$. Tant qu'il y a plus de magnésium que de fer, on écrit $(Mg,Fe)_2(SiO_4)$ et le minéral est une fosterite plus ou moins ferrifère. Tant qu'il y a moins de magnésium que de fer, on écrit $(Fe,Mg)_2(SiO_4)$ et le minéral est une fayalite. La frontière est à 50 % de fer et 50 % de magnésium.

Un minéral n'est donc pas toujours défini par une formule chimique précise mais plutôt par un intervalle de compositions chimiques. Il n'est pas toujours défini par une structure précise mais par un intervalle de structures voire un ensemble de structures... cristallines ou non. En résumé on voit que la définition d'un minéral admet un certain flou. À vouloir être trop précis on génère des difficultés. Que l'on ne s'étonne pas de la part d'arbitraire que l'on rencontre dans la définition de quelques minéraux.

Il nous reste maintenant le dernier terme de « processus géologique ». Il justifierait, à lui seul, la rédaction de longs textes. Rappelons tout d'abord que géologique signifie : « relatif à la science qui décrit et

analyse les différentes parties composant globe terrestre et qui cherche à reconstituer leur histoire ». Les cas suivants permettent d'entrevoir la nature des problèmes et interrogations qui se posent :

Le premier, vite résolu, est celui des minéraux extraterrestres, météorites et pierres rapportées des explorations spatiales. Ils sont acceptés au même titre que les minéraux terrestres. La tranquillityite a été le premier minéral lunaire : il a été retrouvé ensuite sur Terre.

Le deuxième, plus ou moins vite résolu, est celui où la substance appartient à la chimie organique, mais a été produite par un processus géologique. Les calculs rénaux cristallisés, comme ceux composés d'oxalate de calcium, ne sont pas considérés comme des minéraux, mais l'oxalate de calcium trouvé dans une mine est un minéral.

Le troisième est celui d'une substance d'origine biologique ensuite modifiée ou transformée par des processus géologiques. Les minéraux, qui se forment à partir d'amas de crottes d'oiseaux ou de chauve-souris déposés sur des roches, sont acceptés sans qu'il soit nécessaire de parler de minéralogie des guanos.

Le quatrième cas concerne tous les minéraux qui résultent de l'activité humaine et d'une partie géologique. Nous entrons là dans un terrain mouvant, aux contours mal définis. Il y a plusieurs situations :

La minéralogie des néoformations, c'est-à-dire celle des minéraux qui se forment dans une mine ou une carrière durant et/ou après son exploitation, sont bien acceptés mais à une condition : il faut prouver que la néoformation s'est formée sans qu'il y ait eu une volonté humaine.

La minéralogie des scories, c'est-à-dire celle des minéraux qui se forment dans les scories de métallurgie parfois rejetées en mer, a été bien acceptée un temps : pour les scories antiques des mines du Laurion, par exemple.

La minéralogie des houillères embrasées, c'est-à-dire celle des minéraux qui se forment suite à l'embrasement d'un terril ou d'une houillère, est, à ce jour, refusée. La raison, plus ou moins invoquée, est qu'il est facile d'y jeter des produits qui sont susceptibles de former de nouvelles espèces minérales.

La minéralogie des dépôts « anthropiques », autrement dit d'origine humaine, comme les dépôts d'ordures, ne jouit pas, pour le moment, de la même tolérance que celle des dépôts de fientes d'oiseaux.

La minéralogie des tombeaux est une sorte d'exception à ce qui précède. Elle a été autrefois acceptée. Dans sa minéralogie de la France, par exemple, Lacroix évoque un curieux gisement de brushite, un phosphate de calcium. Il s'agit d'un cercueil plombé trouvé à Paris et daté de 1630, à l'intérieur duquel il y avait des cristaux de brushite « abondants dans le crâne transformé en géode ».

Pour donner la mesure des situations, parfois abracadabrantesques, liées aux cas-limites, on prendra une anecdote sur la zincite, un oxyde de zinc. Ce minéral, plutôt rare, est bien connu. Il formait une bonne part du minerai des célèbres mines de Franklin (New Jersey, États-Unis). L'oxyde de zinc est aussi fabriqué par l'industrie, pour les peintures par exemple. Il se trouve, qu'il y a quelques années, de beaux cristaux de zincite se sont formés par inadvertance dans une usine en Pologne. Ils ont été commercialisés et l'un des vendeurs les a présentés comme naturels, avec comme argument qu'il n'y avait pas eu de volonté humaine pour leur apparition ! Si l'on voulait éviter une dispute, il valait mieux ne pas préciser qu'il n'y avait pas non plus de processus géologiques. Si l'on excepte le vendeur et quelques-uns de ses supporters, ces cristaux sont encore à ce jour considérés comme des synthèses.

L'avenir risque fort de nous présenter encore des changements. Les activités humaines ont de plus en plus d'impact sur le monde géologique. Pour être plus précis, il y a des dépôts, d'origine humaine, sur des étendues notables qui, à l'instar des anciens dépôts d'origine animale, ont un rôle similaire à ce que l'on appelle des roches. Des géologues ont donc créé un nouvel étage géologique, l'anthropocène. Ce nouvel étage permettra-t-il d'accepter de nouveaux minéraux ?

Conclusion

La notion d'espèce minérale, qui paraît simple intuitivement et qui est présentée comme telle dans de nombreux ouvrages, l'est beaucoup moins lorsque l'on s'y intéresse plus en détail. Quoique l'on fasse, il restera souvent une part de flou dans la composition et/ou la structure d'un minéral et on devrait plutôt parler d'intervalles de composition et de structure pour un minéral donné. En parallèle à ce problème, il y

a des cas limites qui ne doivent pas toujours être négligés, car ce sont eux qui permettent parfois de dégager de nouvelles découvertes fertiles. Un passé récent nous a donné les structures modulées des sulfosels, nous a démontré qu'il fallait parfois un seul atome sur des dizaines pour stabiliser une structure ou bien que des minéraux « géologiques » doivent leur apparition à l'activité bactérienne. Loin de desservir la minéralogie, les cas limites ou les controverses et polémiques, ne font que démontrer son dynamisme.

Références

- Aubert G., Guillemin C. et Pierrot R. (1978), *Précis de Minéralogie*, Masson, Paris.
- Bertrand, E. (1763), *Dictionnaire universel des fossiles propres et des fossiles accidentels*, Pierre Gosse junior et Daniel Pinet, la Haye.
- Berzelius J. J. (1819), *Nouveau système de minéralogie*, Méquignon-Marvis, Paris.
- Haüy R.-J. (1822), *Traité de minéralogie*, Bachelier et Huzard, Paris.
- Lacroix A. (1962, seconde édition), *Minéralogie de la France*, Libr. Scientifique et Technique Blanchard, Paris.
- Linnaeus C. (1735), *Systema naturae per regna tria naturae: secundum classes, ordines, genera, species cum characteribus, differentiis, synonymis, locis*, Leiden. Douze éditions, revues et augmentées suivront jusqu'en 1770.
- Nickel E. H. (1995), *The definition of a mineral*, The Canadian Mineralogist, vol. 33, p. 689-90.
- Wallerant F. (1909), *La cristallographie*, Lib. Polytechnique Ch. Béranger.

Comment se forment les minéraux ?

Le monde n'est qu'une branloire pérenne : toutes choses y branlent sans cesse, la terre, les rochers du Caucase, les pyramides d'Aegypte : et du branle public, et du leur. La constance mesme n'est autre chose qu'un branle plus languissant. Je ne puis assurer mon object : il va trouble et chancelant, d'une yvresse naturelle. Je le prens en ce point, comme il est, en l'instant que je m'amuse à luy.

(Montaigne, Essais, livre III, Chapitre 2 « du repentir », 1580).

Une planète est née, elle évolue

Ces dernières années, on a beaucoup évoqué sa théorie de l'évolution de Darwin exposée dans son ouvrage « De l'origine des espèces » paru 150 ans auparavant. Fin 2008, un article suggère ainsi qu'il existe une évolution des espèces minérales. Quelques Russes s'insurgent en prétendant avoir eu l'idée avant, quelques autres critiquent le mot évolution. Rien n'y fait, cet article connaît un grand succès. Sa genèse commence deux ans plutôt, lors du réveillon 2006. Le biologiste Harold Morowitz demande à son ami minéralogiste Robert Hazen s'il y avait de l'argile sur Terre il y a 3,8 milliards d'années. C'est une question importante car c'est à cette période que les premières formes de vie sont apparues et de nombreux scénarios sur l'origine de la vie, élaborés par des scientifiques, reposent sur l'argile. Plus précisément sur l'idée que les molécules organiques se seraient concentrées en se « fixant », en s'adsorbant pour utiliser le terme exact, sur les feuillettes dont sont constitués ces minéraux. Hazen prend alors conscience que le monde minéral a changé au cours du temps. Une question émerge : « Y aurait-il une évolution naturelle des minéraux ? ».

Pour qui a un tant soit peu enseigné la minéralogie, la réponse est immédiate : « Bien sûr ! », suivie immédiatement de « Pourquoi n'y ai-je pas pensé avant ? ». Hazen y a pensé et avec l'aide de confrères de diverses disciplines, il a publié l'article de 2008. Un peu plus tard, en 2010, Urusov revient à la charge et relativise la primauté de cette découverte en montrant l'apport de certains savants, plutôt russes. Le point capital est qu'il met en relief une erreur communément commise sur la théorie de Darwin. Son originalité ne vient pas de la notion d'évolution que l'on trouve dans des théories antérieures comme celle du paléontologue français Lamarck (1744-1829). Le concept original est celui de sélection naturelle. Qu'Urusov reprend.

Ce point étant réglé, revenons sur Terre.

Tout le monde sait que La Terre a une histoire, elle évolue tous les jours comme le témoignent les terribles tremblements de Terre et les éruptions volcaniques. Cette évolution a commencé avec la formation des planètes et s'est accompagnée de l'apparition de minéraux. Hazen et ses collègues présentent une dizaine de stades, plus ou moins acceptés : les périodes ainsi que certains événements de l'histoire de notre planète sont encore discutés et le seront certainement encore pour longtemps. On présente ci-après un résumé simplifié de leur modèle qui suppose qu'il y a 4 900 minéraux sur Terre alors que le chiffre de 5 000 a été dépassé en 2015.

Le nuage primitif

Le premier stade débute avec la formation du système solaire, il y a plus de 4,6 milliards d'années. À l'origine, il y a un nuage d'hydrogène et d'hélium enrichi par des grains interstellaires qui se sont formés par condensation du gaz éjecté par l'explosion des étoiles mourantes. Les minéraux, qui constituent les grains, sont peu nombreux, car ils doivent être résistants aux températures et aux pressions qui régnaient

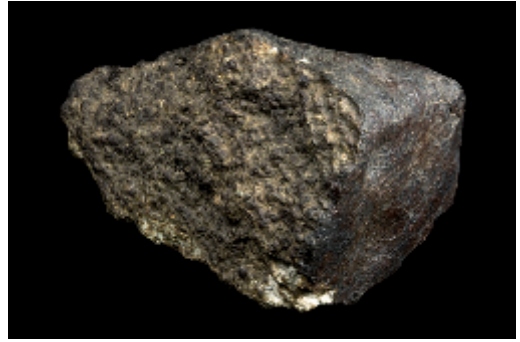
lors de leur apparition. Ils seraient à peine une douzaine. Le diamant qui se forme à très hautes pressions et températures serait peut-être le premier minéral apparu. Après lui on trouve le graphite, le fer, le corindon, le rutile, des spinelles, peu de silicates (la forsterite), des carbures et nitrures. Les éléments chimiques qui n'entrent pas dans ces douze minéraux étaient présents sous formes disséminées et à très faible concentration : les chiffres de quelques atomes par milliard ou dizaines de milliards sont avancés.

La formation du système solaire

Peu après, entre 4,6 et 4,56 milliards d'années, sous l'effet de la gravitation, le nuage s'effondre, le Soleil se forme en son centre. Les poussières fondent et se concentrent en gouttelettes qui, une fois refroidies, forment de petites billes appelées « chondres ». De nouveaux minéraux apparaissent, ils sont maintenant une soixantaine : les plus importants sont les péridots, les pyroxènes et la troilite, un sulfure de fer. Ces chondres continuent de s'agréger sous l'influence de la gravitation. Cette accréation des chondres conduit à la formation de corps plus gros que l'on connaît assez bien, car ce sont les météorites appelées chondrites.

L'accrétion et la différenciation

À partir de dimensions de quelques centaines de kilomètres de diamètre, les grains (chondres) des chondrites fondent sous les effets conjugués de la gravitation et d'éléments radioactifs aujourd'hui disparus. Ils forment les météorites dites achondrites. Les petits corps du système solaire continuent à s'agréger. Les planètes rocheuses comme la Terre se forment. La gravitation devient importante. C'est le stade de la différenciation, qui voit des éléments lourds comme le fer et le nickel migrer au centre, pour former un noyau entouré d'un manteau formé de couches de densité distinctes riches en oxydes et/ou en silicates. De nouveaux minéraux se forment comme le zircon, la titanite et les feldspaths. Vers 4,55 milliards d'années, la Terre compte environ 250 minéraux. Les éléments légers sont restés à proximité de la surface. Il en est de même pour des éléments qui ne sont pas compatibles avec les minéraux du manteau. Il se forme ainsi à la surface, une fine couche enrichie en éléments légers comme le béryllium, le lithium et le bore et en éléments lourds comme l'or, l'argent ou l'uranium.



Chondrite ordinaire trouvée dans le sud du Maroc. On remarque sur la partie droite une zone lisse : c'est la croûte de fusion formée par l'échauffement lors de l'entrée dans l'air. On discerne sur la surface d'aspect irrégulier, des grains. Ce sont les chondres qui se sont agglomérés pour former la météorite.



Météorite en fer et nickel appelée sidérite octaédrique tombée en 1836 à Gibeon en Namibie. Elle est issue du noyau d'un corps céleste différencié.



Premier exemple de météorite en fer et olivine, appelée pallasite, trouvée en 1749 au sud de Krasnojarsk, en Sibérie (Russie). Elle est issue de la zone de séparation entre le noyau et le manteau d'un corps céleste différencié.

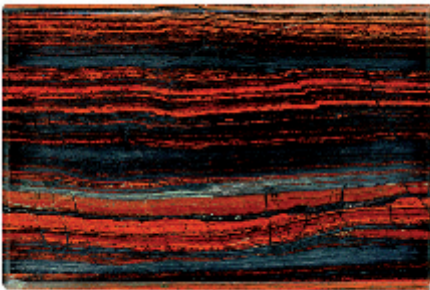
La Terre primitive

Les minéraux suivants apparaissent à partir de 4,55 milliards d'années avec le volcanisme puis la présence de l'eau. Le chiffre de 420 minéraux est atteint à 4 milliards d'années. Vers 3,5 milliards d'années, les granites se forment dans la croûte terrestre. Ces phénomènes mettent en mouvement de grandes masses de roches plus ou moins fondues que l'on appelle magma. D'où le terme de processus magmatiques. Les pegmatites se forment avec leurs béryl, tourmalines, spodumène et topaze.

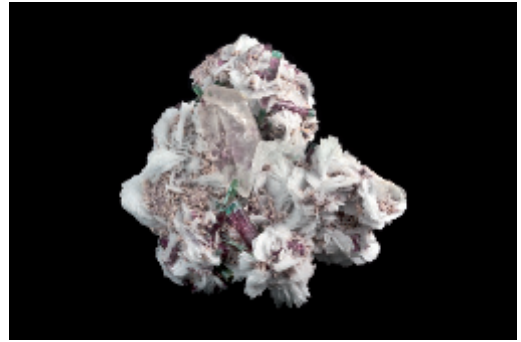
Les 1 000 minéraux sont dépassés. À partir de 3 milliards d'années, la tectonique des plaques déplace de grandes masses de roches déjà formées qui se transforment sous des processus de compression et échauffement que l'on qualifie de métamorphiques. Les schistes verts, les granulites et autres roches apparaissent. Avec ces phénomènes, la Terre abrite 1 500 minéraux. On y compte maintenant les jadéite, staurolite, andalousite, sillimanite et disthène ainsi que des sulfures.

L'oxydation sous-marine et la grande oxydation

L'apparition de la vie dans les océans il y a environ 4 milliards d'années affecte peu le nombre de minéraux. L'oxygène produit par les cyanobactéries se combine au fer et à mesure avec le fer dissout dans les océans pour former des couches d'oxyde de fer, les BIF (« banded iron formation » ou gisement de fer rubané) entre 2,7 et 2,5 milliards d'années surtout. L'oxygène commence à s'échapper dans l'atmosphère, il y a 2,5 milliards d'années environ. Ce gaz est corrosif et attaque les



Échantillon de BIF (banded iron formation) ou gisement de fer rubané qui est le résultat de l'oxydation du fer initialement contenu dans la mer.



Échantillon de pegmatite avec quartz, mica, feldspath et tourmaline (Minas Gerais, Brésil).



Échantillon de roche métamorphique, mica schiste à paragonite avec staurolite (brun) et cyanite (bleu) de l'Alpe Sponda (Pizzo Forno, Tessin, Suisse).

roches. C'est le début de la grande oxydation « paléoprotérozoïque » qui s'achève vers 1,85 milliard d'années. La Terre se couvre peu à peu de 4 500 minéraux. Beaucoup contiennent de l'oxygène. Par la suite, ce nombre augmente peu, jusqu'à la dernière période, la dixième, décrite par Hazen et ses collègues.

La diversification du vivant

La dernière période commence il y a 542 millions d'années avec la diversification du vivant. Près de 400 nouveaux minéraux. Ils sont directement issus de processus de biominéralisation. On y trouve une cinquantaine de minéraux organiques.

L'anthropocène

Le mot « anthropocène » a été inventé par Andrew C. Reevkin en 1992. Il désigne une nouvelle ère géologique caractérisée par des « roches » dont l'origine est liée à l'activité humaine. Son début est sujet de débats, 1610 pour certains, le début de l'industrialisation à la fin du XVIII^e siècle pour d'autres, pourquoi pas le 15 juillet 1945 date du premier essai de bombe atomique ou bien 1964 selon un article de 2015 paru dans Nature. Quoi qu'il en soit, cette ère est de plus en plus acceptée. Actuellement, l'IMA (International Mineralogical Association) refuse tout minéral qui aurait pour origine l'activité humaine. Mais la situation n'est pas si simple. Les minéraux apparaissant sur les parois de mines sont acceptés, ceux des terrils embrasés sont plutôt rejetés. Il s'y ajoute quelques cas où l'on n'a pas été trop regardant sur l'origine du minéral. Il est possible que ces minéralogies soient, à l'avenir, de mieux en mieux acceptées, quitte à les classer dans des catégories particulières.

Car, après tout, on constate que près des deux tiers des minéraux sont plus ou moins liés à des processus biologiques.

Hazen et ses collaborateurs ont donc introduit le terme d'évolution minérale par analogie avec la théorie de Darwin. Mais ils ne mentionnent pas la sélection naturelle qui est le concept le plus original de cette théorie. Or dans l'évolution présentée ci-dessus, il semble plus correct de parler de création de minéraux plutôt que de sélection. Que les minéralo-darwinistes en herbe se rassurent. Il y a un semblant de sélection dans ce que les géologues nomment le cycle géologique. La Terre est encore en mouvement et en changement. Les roches et les minéraux doivent s'adapter : la pression, la température, la présence d'eau, l'environnement chimique sélectionnent les minéraux et les roches. Cette sélection est particulièrement intense au voisinage de la surface de la Terre : la croûte terrestre. Ainsi une roche magmatique pourra devenir une (ou plusieurs) roche(s) sédimentaires ou résiduelle qui formeront ensuite des roches métamorphiques qui finalement replongeront sous Terre et redevenir des roches magmatiques.

En résumé, on ne trouve pas n'importe quel minéral, n'importe où.

Où trouve-t-on les minéraux ?

La science des lieux où l'on trouve des minéraux s'appelle la gîtologie : elle concerne surtout les minéraux qui fournissent des métaux. Avant de l'aborder, il est utile de revenir sur quelques aspects de notre planète.

Aperçu (simplifié) de la structure de la Terre

La Terre est constituée de couches successives concentriques. La plus externe est composée de gaz, c'est l'atmosphère. On trouve ensuite une couche, appelée croûte terrestre, divisée en deux grands domaines : le domaine continental et le domaine océanique. Le domaine continental est surtout formé de roches dures et son épaisseur moyenne varie entre 20 et 70 km. Le domaine océanique est composé d'une couche d'eau de 4,5 km de profondeur en moyenne reposant sur une couche de roches dures dont l'épaisseur moyenne est d'environ 7 km. La croûte terrestre repose sur une autre couche que l'on appelle le manteau. Le manteau est lui-même subdivisé en manteau supérieur, jusqu'à 700 km de profondeur, et en manteau inférieur, entre 700 et 2 900 km de profondeur. Au contact de la croûte, le manteau est composé de roches rigides dont l'épaisseur est d'environ 60 km sous les océans et 80 km sous les continents. La croûte terrestre et la partie externe et rigide du manteau forment ce que l'on appelle la lithosphère. Sous la lithosphère, on a un milieu visqueux qui est le siège de mouvements continuels. Sous le manteau, on trouve le noyau externe, composé de fer et nickel liquides, entre 2 900 et 5 100 km et enfin la graine, composée de fer et nickel solides, entre 5 100 km et le centre de la Terre à 6 370 km.

Comme on le voit, la couche rigide de notre planète, la lithosphère, est fine. Elle ne représente au mieux que 2 % du rayon de la Terre. Le brassage de matériaux visqueux dans le manteau affecte cette fine couche. Il y a des remontées de matière chaude qui la fondent localement et qui atteignent parfois la surface en formant des volcans. Certaines parties se faillent, se brisent, se déplacent, se heurtent ou plongent dans le manteau. On considère aujourd'hui que la lithosphère est formée de plaques qui flottent sur cette matière visqueuse. Le déplacement des plaques et l'apport de matière du manteau expliquent l'apparition ou la disparition des océans, l'édification des montagnes, le volcanisme et le déclenchement des tremblements de terre. Le contour des océans et des continents n'est pas fixe, ce que l'on connaît aujourd'hui est très différent de ce qui existait avant. Il y a 250 millions d'années, par exemple, il n'y avait qu'un seul supercontinent, la Pangée. D'ici quelques dizaines de millions d'années, la Méditerranée aura disparu sous l'avancée de l'Afrique. Tous ces phénomènes d'origine profonde sont favorables à l'apparition de minéraux, mais ils ne sont pas les seuls.

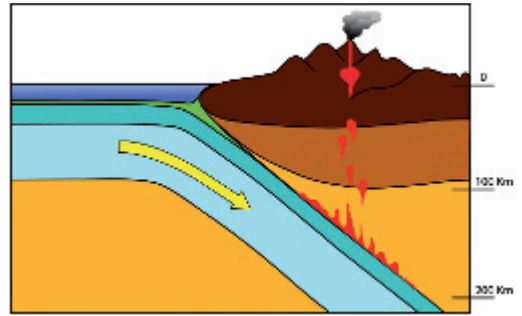


Schéma d'une subduction, c'est-à-dire de la plongée de la couche océanique sous la couche continentale sous l'effet des déplacements de plaque. Des reliefs se forment. Avec l'augmentation de la température et la présence d'eau, la roche qui s'enfonce fond. Les masses fondues remontent, se refroidissent plus ou moins profondément ou atteignent la surface et produisent des volcans.

L'atmosphère, les phénomènes météorologiques, l'activité vivante et d'autres phénomènes de surface contribuent aussi à la genèse des minéraux. La pluie entretient la circulation d'eau dans les roches. Les accumulations de matériaux d'origine animale ou végétale créent de nouvelles roches. Les bactéries altèrent et transforment certains minéraux. L'eau, le vent, les racines des arbres entre autres, participent à l'érosion des reliefs et rendent accessibles des roches et des minéraux qui sans eux seraient demeurés cachés.

La plupart des minéraux de collection sont trouvés à de faibles profondeurs. Selon l'estimation d'un professeur de géologie spécialisé dans les gisements, 80 % des minéraux de collection seraient récoltés dans des travaux, miniers ou autres, qui n'atteignent pas 50 mètres de profondeur.

Les gîtes volcaniques

Les volcans sont les témoins de la remontée de matériaux chauds profonds liquéfiés que l'on appelle magmas. La température d'un magma est d'au moins 600 °C et peut atteindre 1 200 °C. À plus basse pression, proche de la surface, les gaz et l'eau initialement dissous dans le magma s'en séparent pour former des bulles qui, à la surface, se libèrent et provoquent des éruptions.

Dans certains volcans la cheminée plonge très profondément. Leurs éruptions apportent en surface des cristaux profonds. C'est le cas des diamants, qui se forment à des profondeurs supérieures à 150 km. Comme leur remontée est rapide, leur structure est figée. Si la remontée avait été plus lente, le diamant se serait transformé graduellement en graphite qui est l'autre forme cristallisée, à basse pression du carbone.

La majorité des volcans n'ont pas de cheminée profonde. Le magma est accumulé sous eux dans ce que l'on appelle une chambre magmatique. La pression et la température gouvernent la croissance des minéraux. Quelques-uns se forment précocement alors qu'il y a encore beaucoup de magma : les plus denses tombent au fond de la chambre et les moins denses remontent. Un exemple spectaculaire est celui du lac de lave du Mont Erebus (Antarctique) où flottent des cristaux d'anorthoclase, un feldspath alcalin. Il y a aussi des gisements de magnétite ou de chromite : ces minéraux ont cristallisé précocement lors du refroidissement de la chambre magmatique et se sont accumulés au fond grâce à leurs fortes densités.

On retrouve des minéraux précoces dans les coulées et les épanchements de lave, le refroidissement rapide de la lave ne permettant pas la formation de nouveaux cristaux. Les cristaux de sanidine et les nodules d'olivine d'Auvergne ou les cristaux de leucite du Vésuve sont emprisonnés dans une lave solidifiée.

Une autre manifestation des volcans est le rejet de gaz chauds au travers d'événements que l'on appelle les fumerolles. Certaines, appelées *solfatares*, sont tapissées de dépôts plus ou moins cristallisés de soufre. Les fumerolles du volcan Kudriary de l'île d'Uturup (îles Kouriles, Russie) produisent de la molybdénite, un sulfure de molybdène, et la rarissime rheniite, un sulfure de rhénium. Des cristaux très fins d'hématite sont trouvés dans les fumerolles des volcans.

Comme on le verra plus loin, les bulles piégées lors du refroidissement ou les vides divers laissés par la circulation des gaz, l'écoulement de la lave ou les laves « en coussins » formées en milieu marin, forment autant de réceptacles pour accueillir de futurs minéraux.

Les « fumeurs noirs » dans les volcans sous-marins des rides océaniques sont caractérisés par l'exhalaison de solutions chaudes, jusqu'à 300 °C, riches en sulfures. Ce type d'exhalaison est à l'origine des gisements volcano-sédimentaires comme les amas sulfurés qui sont des accumulations parfois énormes de sulfures de fer, de cuivre et de zinc. De nombreux filons d'or, d'argent et d'autres métaux recherchés, comme ceux de l'ouest des États-Unis, ont pour origine les fluides générés par l'activité volcanique.

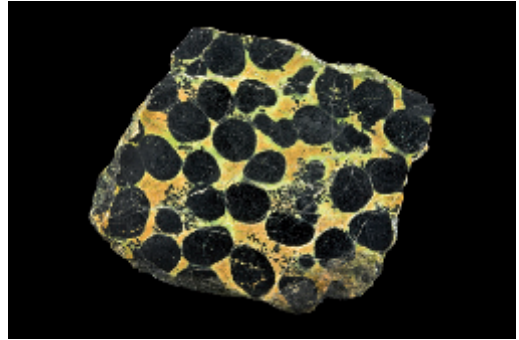
Certaines accumulations de sels (chlorures, sulfates ou borates) sont aussi d'origine volcanique. C'est le cas des *salars andins* que l'on trouve en Bolivie, en Argentine et au Chili. Ils n'ont pas la réputation d'avoir produit des minéraux cristallisés spectaculaires.

Le terme de subvolcanique est appliqué aux gisements qui sont liés à la remontée d'un magma qui a été stoppé à proximité de la surface.

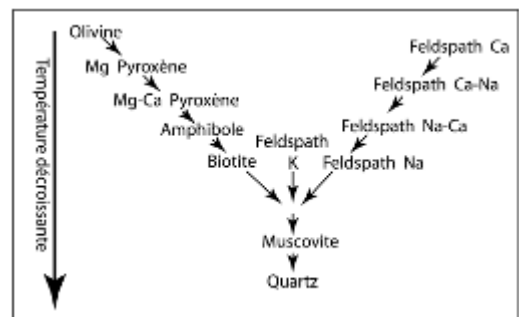
Les gîtes magmatiques précoces

Le magma n'atteint pas toujours la surface : il reste souvent piégé et se refroidit plus ou moins lentement selon la profondeur. Il forme ce que l'on appelle un « pluton » à l'origine de ce que l'on appelle les roches plutoniques. Au cours de ce lent refroidissement, les minéraux cristallisent selon un ordre bien défini en fonction de la température décroissante selon les séries dites de Bowen. Pour les magmas pauvres en silice, l'olivine, appelée aussi péridot, est l'un des premiers minéraux à apparaître, elle est suivie des pyroxènes, des amphiboles, des micas et des feldspaths (il va de soi que suivant la composition du magma certains minéraux peuvent apparaître ou non). Dans les magmas riches en silice, à l'origine de la formation de granites fréquents dans la croûte terrestre, l'ordre de cristallisation est : micas, feldspaths et enfin quartz.

La solidification par étape s'accompagne des déplacements de cristaux par gravité que l'on a déjà évoqués. Elle s'assortit d'un changement continu de la composition chimique du magma restant. Autrement dit, la partie qui ne s'est pas encore solidifiée, petit à petit, s'enrichit en fluides, comme l'eau, le chlore, le fluor ou le gaz carbonique, en éléments légers comme le bore, le béryllium ou le lithium ou en éléments rares comme l'uranium, le thorium, le tantale, le niobium ou les terres rares, qui ne sont pas compatibles avec les minéraux déjà formés. Ces phénomènes sont une différenciation, similaire à celle déjà évoquée pour la formation de la Terre.



Chromite. Cristaux arrondis de chromite de Soghan, Esfandaque (Kerman, Iran), concentrée dans le fond d'une chambre magmatique (8 × 7 × 2 cm).



Séries réactionnelles de Bowen.

Les gîtes magmatiques tardifs

À la fin de la cristallisation d'un magma, la partie la plus fluide, enrichie en gaz et en éléments légers et/ou rares atteint de fortes pressions qui fissurent les roches environnantes. Le magma s'injecte et se solidifie dans ses fissures périphériques du pluton. C'est ainsi que se forment certaines roches, telles les pegmatites. Suivant la température on distingue un stade pegmatitique entre 800 et 600 °C et un stade pneumatolytique entre 600 et 400 °C. La température de 400 °C ne doit rien au hasard, elle correspond à peu près à la température critique de l'eau à 374 °C. Rappelons que l'eau au-dessus de 374 °C, qualifiée de supercritique, n'est jamais sous forme liquide quelle que soit la pression. L'eau supercritique prend la forme de vapeur dont la densité peut être proche de celle de l'eau liquide : on parle alors aussi de vapeur dense.

Les pegmatites sont caractérisées par des cristaux bien formés et de grandes dimensions, typiquement supérieures au centimètre avec des records dépassant la dizaine de mètres. Si au cours du refroidissement, le gaz reste emprisonné, il forme des bulles qui permettent la croissance sans gêne des cristaux. Ces cavités aux parois tapissées de cristaux libres sont les célèbres miaroles, géodes, druses, cryptes, fours ou poches à cristaux. La plupart des pegmatites connues sont liées à des plutons granitiques et le terme de pegmatite, utilisé seul, sous-entend ce type. On connaît aussi des pegmatites liées à d'autres plutons composés de roches moins fréquentes comme les pegmatites dites de syénites néphéliniques.

Les cryptes à cristaux des pegmatites sont la source de très nombreux minéraux de collection. Les pegmatites granitiques que l'on trouve au Brésil, aux États-Unis, à Madagascar, en Russie, au Pakistan et en Afghanistan fournissent des feldspaths, le quartz, des micas (muscovite, lépidolite et phlogopite), toutes les variétés de béryls sauf l'émeraude, les tourmalines, les topazes, le spodumène, des silicates rares comme la petalite ou la pollucite, des borates comme la rhodizite, la schiavinatoite ou la jeremejevite, de nombreux phosphates comme la herderite, la brazilianite, la beryllionite, l'amblygonite-montebrazite et les phosphates de fer ainsi que des oxydes rares comme la tantalite, l'euxenite, la betafite, la thorianite et la tapiolite.

Les pegmatites liées au granite alcalin, riche en pyroxène, du Mont Malosa au Malawi fournissent les plus beaux cristaux connus d'aégrine, d'arfvedsonite et d'épididymite. Les cristaux d'orthose, associés à de la babingtonite, de la localité classique de Baveno (Italie) sont trouvés dans un granite miarolitique.

Plusieurs pegmatites liées aux syénites néphéliniques sont des monstres de la minéralogie : elles ont livré un nombre étonnant d'espèces nouvelles. C'est le cas de celles du MSH, le Mont Saint-Hilaire (Québec, Canada), de celles de la péninsule de Kola (Russie). Le MSH a fourni les plus beaux cristaux de serandite, de catapelite et d'elpidite.

La wolframite se rencontre dans les filons pneumatolytiques.

Les gîtes du métamorphisme général (ou régional)

La transformation à l'état solide de la texture et/ou de la composition minérale de roches sédimentaires ou magmatiques par élévation de la température et/ou la pression, souvent avec l'aide de l'eau, est désignée sous le terme de métamorphisme. Il apparaît de manière systématique avec l'enfouissement et/ou le mouvement des roches. Comme ces phénomènes affectent des roches sur une épaisseur et une surface importantes, on parle métamorphisme général ou régional. Suivant la pression et la température, il y a des domaines où des roches sont stables. Suivant la roche de départ, l'on obtient bien sûr des roches métamorphosées différentes. Dans ce que l'on appelle la séquence pélitique, par exemple, on part de roches argileuses qui se métamorphosent d'abord en schistes, puis en micaschistes, gneiss et leptynites. Au-delà, on entre dans le domaine du magmatisme avec de la fusion plus ou moins partielle. La séquence carbonatée est plus simple : les roches de départ sont des calcaires et celles à l'arrivée des marbres ou des cipolins.

Parmi les roches métamorphiques les plus typiques, il y a des roches feuilletées, cristallophylliennes, comme les ardoises, les micaschistes ou des roches zonées comme les gneiss qui sont des granites (orthogneiss) ou des argiles (paragneiss) métamorphosés.

De nombreux minéraux sont typiques du métamorphisme général. C'est le cas de la staurolite, l'andalousite, la cyanite (ou disthène), la zoisite-tanzanite, la cordierite, la jadéite et le grenat almandin des micaschistes.

Hydroboracite	336	<i>Supergroupe de l'alunite</i>	395
Tunellite.....	337	Groupe de la beudantite.....	395
Borcarite.....	338	Beudantite.....	395
Hambergite.....	339	Groupe de la plumbogummite.....	396
Jeremejevite.....	340	Plumbogummite.....	396
Rhodizite-londonite.....	341	<i>Groupe de l'amblygonite</i>	397
Schiavinitoite.....	342	Amblygonite-Montebrasite.....	397
Quelques autres borates.....	342	Brazilianite.....	398
Les carbonates	343	Cafarsite.....	399
<i>Groupe de la calcite</i>	344	Chervetite.....	400
Calcite.....	344	Clinoclase.....	401
Magnésite.....	348	Cornetite.....	402
Rhodochrosite.....	349	<i>Groupe de l'adelite-descloizite</i>	403
Sidérite.....	351	Descloizite.....	403
Smithsonite.....	353	Francevillite.....	404
<i>Groupe de la dolomite</i>	354	Hydroxylherderite.....	405
Dolomite.....	354	<i>Groupe de la lazulite</i>	406
<i>Groupe de l'aragonite</i>	356	Lazulite.....	406
Aragonite.....	356	Phosphophyllite.....	407
Cérusite.....	358	Picropharmacolite.....	408
Strontianite.....	360	Pseudomalachite.....	409
Witherite.....	361	<i>Groupe de la variscite</i>	410
Artinite.....	362	Variscite.....	410
Azurite.....	363	Scorodite.....	411
Aurichalcite.....	365	Viitaniemiite.....	412
<i>Groupe de la rosasite</i>	366	Vanuralite.....	413
Rosasite.....	366	Wavellite.....	414
Malachite.....	367	Quelques autres phosphates.....	415
Parisite-(Ce).....	369	La silice	417
<i>Groupe de la mckelveyite (ex-groupe de la donnayite)</i>	370	Le quartz et ses variétés (améthyste, cristal	
Weloganite.....	370	de roche, quartz fumé, etc.).....	418
Quelques autres carbonates.....	371	Opale.....	424
Les phosphates, vanadates et arséniates	373	Les autres formes de la silice.....	426
<i>Groupe de l'apatite</i>	374	Les néosilicates	427
Apatite, apatite-(CaF).....	374	<i>Groupe de l'olivine</i>	428
Pyromorphite.....	377	Olivine – périclote.....	428
Vanadinite.....	379	<i>Groupe des grenats</i>	430
Mimetite.....	381	Almandin.....	430
<i>Groupe de la vivianite</i>	383	Spessartine.....	432
Vivianite.....	383	Ouvrovite (uvarovite).....	434
Erythrite.....	385	Grossulaire.....	435
Ludlamite.....	386	Andradite.....	437
<i>Groupe de l'autunite</i>	387	<i>La triade andalousite-sillimanite-cyanite</i>	439
Autunite.....	387	Andalousite.....	439
Novacekite.....	389	Sillimanite.....	441
Torbernite.....	390	Cyanite-disthène.....	442
Uranocircite.....	391	<i>Groupe de la gadolinite – datolite</i>	443
<i>Groupe de l'olivine</i>	392	Datolite.....	443
Olivenite.....	392	<i>Le supergroupe de la dumortierite</i>	444
Adamite.....	393	Dumortierite.....	444

LES MINÉRAUX

Euclase.....	445	<i>Groupe de la benitoite</i>	504
<i>Groupe de la humite</i>	446	Benitoite.....	504
Norbergite.....	446	<i>Groupe de l'osumilite (ou groupe de la milarite)</i> ...	505
<i>Groupe de la sklodowskite</i>	447	Milarite.....	505
Cuprosklodowskite.....	447	Les autres cyclosilicates.....	506
Kasolite.....	448	Les inosilicates	507
<i>Groupe de la phenacite</i>	449	<i>Supergroupe des amphiboles</i>	508
Phenacite (phenakite).....	449	Ferro-actinolite.....	508
Willemite.....	451	Richterite (richterite et ferrichterite).....	509
<i>Groupe de la staurolite</i>	452	Arfvedsonite.....	510
Staurolite-Staurodite.....	452	<i>Groupe des pyroxènes</i>	511
<i>Groupe de la titanite</i>	453	Aegirine (aegyrine, acmite).....	511
Titanite, sphène.....	453	Hedenbergite.....	513
Topaze.....	455	Diopside.....	514
<i>Groupe de l'uranophane</i>	458	Enstatite, ferrosilite.....	516
Uranophane (ex-uranotile).....	458	Jadéite.....	517
<i>Groupe du zircon</i>	459	Spodumène.....	518
Zircon.....	459	<i>Groupe des pyroxénoïdes</i>	520
Poldervaartite-olmiite.....	461	<i>Groupe de la rhodonite</i>	520
Autres néosilicates.....	462	Rhodonite.....	520
Les sorosilicates	463	Babingtonite.....	522
Hémimorphite.....	464	<i>Groupe de la wollastonite</i>	524
<i>Supergroupe de l'épidote</i>	466	Pectolite.....	524
Épidote.....	466	Serandite.....	525
Clinozoisite.....	469	Okenite.....	526
Zoisite.....	470	<i>Supergroupe de la saphirine</i>	527
<i>Groupe de la vesuvianite</i>	472	Saphirine.....	527
Vesuvianite.....	472	<i>Groupe de la neptunite</i>	528
<i>Groupe de l'axinite</i>	474	Neptunite.....	528
Axinite.....	474	Inesite.....	529
Bertrandite.....	476	Shattuckite.....	530
<i>Groupe de la lawsonite</i>	477	Autres inosilicates.....	531
Ilvaite.....	477	Les phyllosilicates	533
<i>Groupe de la chevkinite</i>	479	<i>Groupe des micas</i>	534
Chevkinite-(Ce).....	479	Lépidolite.....	534
Autres sorosilicates.....	480	Muscovite.....	536
Les cyclosilicates	481	Phlogopite.....	537
<i>Groupe du béryl</i>	482	<i>Groupe des argiles</i>	539
Le béryl et ses variétés (aigue-marine, émeraude, goshenite, héliodore, morganite).....	482	Vermiculite.....	539
Pezzottaite.....	490	<i>Groupe de la chlorite</i>	541
Cordierite.....	491	Clinochlore (kammererite).....	541
<i>Groupe des tourmalines</i>	492	<i>Groupe de la kaolinite-serpentine</i>	542
Schorl.....	492	Cronstedtite.....	542
L'elbaite et ses variétés (rubellite, verdelite et indicolite).....	494	Chrysotile.....	543
Liddicoatite.....	499	<i>Groupe de la gyrolite</i>	544
Uvite.....	501	Gyrolite.....	544
Dioptase.....	502	Chrysocolle.....	545
		<i>Groupe de l'apophyllite</i>	547
		Apophyllite.....	547
		Cavansite.....	549