

T. Prusot 1911

LES SYNTHÈSES MINÉRALOGIQUES

LEÇON D'OUVERTURE

DU

COURS DE MINÉRALOGIE

14 Novembre 1905

PAR

M. H. DOUXAMI

Maitre de Conférences de Géologie et de Minéralogie
à la Faculté des Sciences



LILLE

IMPRIMERIE LIÉGEOIS-SIX
Rue Léon Gambetta, 244

—
1905

Les Synthèses minéralogiques

Leçon d'ouverture du cours de Minéralogie

14 Novembre 1905

par M. H. Douxami

La Minéralogie est une science aussi ancienne que le monde, car, en effet, de tout temps — comme encore de nos jours l'enfant sur la plage ou le berger dans la montagne — l'homme a dû être frappé par certains cailloux brillants aux faces taillées et polies par la nature. Il a su très tôt utiliser certains minéraux, soit pour ses instruments et ses armes ou bien à cause de leur dureté et de leur éclat, les employer pour sa parure et leur attribuer aussi jusqu'au XVII^e siècle des propriétés médicinales ou des vertus merveilleuses qu'ont énumérées Pline, Marbodius, Albert-le-Grand, Robert de Boèce, vertus auxquelles d'ailleurs croient encore certaines personnes aujourd'hui. Bien que cette Minéralogie élémentaire ait dû être accompagnée d'un certain nombre de connaissances permettant de reconnaître et de distinguer les minéraux employés et leurs gisements, ce n'est que vers la fin du XVIII^e siècle, sous l'impulsion de Haüy et de Romé de l'Isle, qu'elle commença à prendre vraiment rang honorable parmi les sciences naturelles, avec sa méthode particulière, ses lois spéciales. Pendant que les

grands problèmes de la Cristallographie sont posés et étudiés sinon tous résolus, l'étude des propriétés optiques des minéraux, des modifications que les milieux cristallins font subir aux rayons lumineux, fournit des procédés d'examen extrêmement précis et délicats, et permet d'établir les relations entre les lois cristallographiques et ces propriétés optiques.

La Chimie, fondée elle aussi presque en même temps que la Minéralogie, lui apporte bientôt son concours et permet de déterminer exactement les éléments constitutifs des minéraux et des minerais, d'étudier les phénomènes si importants de l'isomorphisme. En même temps, la Minéralogie spécifique, c'est-à-dire la description des espèces minérales, de leurs associations naturelles et de leurs conditions de gisement, prend en France comme en Angleterre et en Allemagne un essor considérable.

L'attention des savants fut aussi appelée, pour la Minéralogie comme pour toutes les sciences physiques et naturelles, sur les problèmes de synthèse et l'on se préoccupa bien vite de réaliser au moins en petit dans nos laboratoires les combinaisons cristallines que l'on rencontre dans la nature, soit sous forme de minéraux, soit sous forme de roches.

A côté de l'attrait immédiat pour l'homme que pouvait offrir la fabrication de pierres précieuses comme le diamant, le rubis qui est en effet devenu, paraît-il, un véritable produit industriel, ou de minéraux utiles comme le graphite ou l'émeri qui s'obtiennent aussi aujourd'hui artificiellement, il y avait un intérêt scientifique de premier ordre pour le savant à pouvoir réaliser des synthèses minéralogiques et à se renseigner ainsi sur les conditions et les causes qui ont dû intervenir dans la formation des minéraux naturels et des roches : problèmes qui intéressent non seulement le minéralogiste proprement dit,

mais qui sont aussi de la plus haute importance pour le géologue.

Pendant longtemps on a cru qu'il y avait incompatibilité entre les procédés de la nature et ceux de nos laboratoires et qu'en dehors du facteur temps dont nous ne sommes pas le maître, la nature disposait en outre de masses énormes ou de forces incommensurables et mystérieuses que l'homme était incapable de mettre en jeu. A plus forte raison, croyait-on, devait-il en être ainsi pour les associations minérales réalisées par la nature et il n'y a pas très longtemps, avant les mémorables expériences de synthèse des roches de MM. Fouqué et Michel Lévy (1), que Zirkel, l'un des chefs de l'école allemande, écrivait encore ces lignes :

« La nature travaille dans de tout autres conditions que le chimiste dans son laboratoire et engendre, par suite, des associations minérales essentiellement différentes. Celui qui n'est pas arrivé à partager cette conviction ne peut être considéré comme ayant pénétré dans le sanctuaire de la science. »

Grâce au développement de l'analyse microscopique des minéraux, le minéralogiste, en même temps qu'il acquérait le moyen de reconnaître d'une façon certaine les cristaux souvent très petits qu'il obtient dans son laboratoire, était mieux renseigné sur la genèse des minéraux naturels, grâce à la connaissance de leurs inclusions, de leurs associations dans les roches, de leur ordre de formation dans un même gisement. L'observation et l'étude plus approfondies des minéraux naturels constituaient ainsi des guides assurés dans les expériences de reproduction. En outre, nos laboratoires disposent actuellement d'appareils qui se perfectionnent tous les

(1) Synthèse des minéraux et des roches, Paris, Masson, 1882

jours et qui permettent d'obtenir, soit les plus hautes températures (1), soit des pressions considérables, bien différentes de celles réalisées par les premiers expérimentateurs dans des tubes de verre scellés à la lampe et chauffés à des températures ne dépassant pas 200°.

Aujourd'hui on a reproduit artificiellement plusieurs centaines de minéraux naturels depuis les plus rares ou les plus précieux comme le diamant, jusqu'aux plus communs, comme la calcite qui se forme d'ailleurs tous les jours sous nos yeux et aussi la plupart des roches d'épanchement (andesites, basaltes, labradosites, leucotephrites, ophites, etc.). Si certains minéraux d'ailleurs extrêmement rares, et surtout si certaines roches dont la plus importante est le granite n'ont pas encore pu être obtenus dans nos laboratoires, ce n'est pas croyons-nous parce que nous ne savons pas encore dans quelles conditions opérer, mais tout simplement parce que les conditions impliquent une série d'expériences dangereuses dues aux pressions hydrothermales énormes qu'il faudrait pouvoir réaliser dans des conditions de sécurité absolue qui n'ont pas encore pu être trouvées, mais qui le seront certainement un jour ou l'autre.

Quel est le but que doit atteindre une synthèse minéralogique. Quels sont les procédés qui ont été employés? Enfin quels sont les résultats pratiques et théoriques des synthèses qui ont été réalisées jusqu'à nos jours? Tels sont, Messieurs, les trois points que je voudrais examiner rapidement avec vous dans cette première leçon du Cours de minéralogie.

I

Les synthèses minéralogiques doivent d'abord chercher à reproduire un minéral possédant la même composition

(1) Le four électrique Moissan donne des températures de plus de 3000°.

chimique que le minéral naturel, appartenant au même système cristallin, avec les mêmes paramètres, les mêmes formes : l'identité devra autant que possible se continuer dans la production des macles s'il y en a, le développement de certaines faces plutôt que d'autres, des propriétés optiques, inclusions, etc., si le fait de reproduire un minéral cristallisé est intéressant en lui-même, il perd beaucoup de son importance au point de vue minéralogique s'il ne trouve pas son application dans la genèse probable des minéraux naturels. Ainsi par exemple la *Greenockite* (CdS) a été obtenue artificiellement par sept procédés différents (1) : aucun d'eux sauf peut-être l'action d'une dissolution d'acide sulfureux sur le cadmium en vase clos à 200° ne paraît être un procédé utilisé par la nature. De même la *Galène* (PbS) dont la cristallisation se produit facilement dans les usines où les minerais de plomb sont traités ou utilisés, dans les dépôts de l'eau minérale de Bourbonne-les Bains, a été reproduite par neuf procédés différents : les procédés de Senarmont (PbS amorphe et dissolution saturée d'acide sulfhydrique, chauffés en vase clos à 150°), de Becquerel (chauffait sous une forte pression une dissolution d'un sel de plomb et un sulfure solide), de Rodwell (PbS amorphe chauffé longtemps dans l'hydrogène, le gaz carbonique ou l'oxyde de carbone) peuvent expliquer les gisements ordinaires de la galène dans les filons concrétionnés ; le procédé de Durocher (action de H_2S sur PbCl_2) peut expliquer la présence de la galène dans les gîtes stannifères ; les autres (2) ne reçoivent pas d'application en minéralogie.

(1) Action de H_2S sur CdCl_2 à l'état de vapeurs ; CdS amorphe chauffé à haute température et refroidi lentement ; Cd , BaS et CaCl_2 fondus ensemble ; CdS chauffé au rouge blanc dans un courant d'hydrogène ; Cd chauffé au rouge blanc en vase clos avec une dissolution d'acide sulfureux ; CdO dans vapeur de soufre.

(2) Action du plomb sur HgS ; soufre en canon sur une dissolution alcaline d'oxyde de plomb ; galène et craie chauffés au rouge dans un creuset ; litharge pyrite de fer et silice chauffés sous une couche de borax fondu ; Soufre en vapeur sur un silicate de plomb au rouge ; courant d' H_2S au rouge sombre sur un sel, un oxyde, ou PbS amorphe.

Il faut donc que le chimiste, comme l'indiquait déjà, en 1851, Sénarmont (1), se double le plus souvent d'un géologue (2) et d'un minéralogiste, qu'il utilise tout au moins les données que ces sciences ont recueillies *a priori* « sur toutes les particularités conditionnelles de structure, » de gisement, d'association ou d'exclusions mutuelles » auxquelles certaines espèces minérales doivent satisfaire. Il faut, en un mot, que toutes les circonstances où l'opération naturelle a laissé des traces caractéristiques découvertes par le géologue se retrouvent dans l'opération artificielle du chimiste. »

Les minéraux sont souvent associés les uns aux autres, soit dans les filons métallifères, soit dans les roches, soit même quelquefois dans les druses. Les procédés chimiques devront justement chercher à reproduire à la fois tout un groupe de minéraux dans les conditions de gisement où ils se trouvent rassemblés, et même, si l'on constate un certain ordre dans la cristallisation des minéraux associés, il faudra que la méthode adoptée les ait reproduits dans cet ordre, avec les mêmes propriétés, les mêmes inclusions liquides ou gazeuses. C'est ainsi que lorsque MM. Fouqué et Michel-Lévy ont eu montré que, par simple fusion ignée suivie de refroidissements lents avec arrêts plus ou moins prolongés, on pouvait déterminer dans une masse homogène la cristallisation simultanée de plusieurs minéraux et que ces minéraux identiques aux minéraux naturels variaient avec les conditions d'expérience, il ne pouvait s'élever aucun doute que la nature avait dû employer en plus grand, sur des masses plus considérables, les mêmes procédés. De même la méthode de

(1) *C. R. Ac. Sc.*, t. XXXII, 1851, p. 409 et *Ann. de Ph. et de Ch.*, t. XXXII, 3^e série, 1851, p. 129 et suivantes.

(2) La présence dans la craie blanche de silice avec géodes de quartz parfaitement cristallisé, de rognons de pyrite empêche d'admettre que ce quartz et cette pyrite se sont produits par voie sèche; la limite des laves actuelles du Vésuve ne peut au contraire avoir une origine aqueuse.

Sénarmont qui consiste à chauffer un sulfure amorphe en vase clos à 200°, en présence d'une dissolution d'hydrogène sulfuré saturée sous pression, s'appliquant à un très grand nombre de corps, a les plus grandes chances pour expliquer la formation des sulfures naturels.

La conclusion de ce premier paragraphe est donc extrêmement nette ; l'union de la minéralogie, de la chimie et de la géologie sont nécessaires à la perfection d'une véritable synthèse minéralogique.

II

MÉTHODES DE REPRODUCTION ARTIFICIELLE DES MINÉRAUX ET DES ROCHES

Remarquons tout d'abord qu'un assez grand nombre de minéraux se forment actuellement sous nos yeux ou bien se trouvent reproduits artificiellement par des réactions si simples qu'on ne pense pour ainsi dire pas à y voir de véritables synthèses. Et pourtant je ne saurais trop appeler votre attention sur ces faits journaliers — que vous pourrez observer avec la plus grande facilité — parce qu'ils ont eu souvent beaucoup de peine à entrer dans le domaine des sciences géologiques et minéralogiques.

Pendant combien de temps, en effet, n'a-t-on pas discuté sur l'origine des masses énormes et si importantes pour l'industrie de sel gemme, de gypse, de carnallite alors que les observations que l'on peut faire sur ce qui passe dans les marais salants artificiels ou dans les lagunes naturelles de la Caspienne donnaient l'explication et l'origine des gîtes salifères de Lorraine et de Strassfurt ou de la pierre à plâtre du Bassin de Paris.

Les dépôts des eaux ordinaires nous permettent de constater le mode de formation de la calcite, de l'aragonite

et même de la silice. L'observation des sources minérales a fourni il y a déjà longtemps à Daubrée ⁽¹⁾ des données précieuses sur le mode de formation des zéolites et d'un grand nombre de minéraux superficiels. De même la pyrite de fer ou de cuivre se forme tous les jours dans les vases réductrices sublittorales ou dans les vases de nos ports ; le soufre par réduction des sulfates ou des sulfures dans une foule de points depuis le sous-sol de la place de la République jusqu'aux fumerolles des volcans ; les nitrates dans le sol végétal, les caves, les nitrières artificielles ; les matières organiques se transforment en phosphates de chaux et d'alumine sur le sol d'un grand nombre de grottes ; les phosphates se fluatissent aussi avec la plus grande facilité dans une foule de circonstances ainsi que l'a montré M. A. Carnot.

De nos jours, dans les éruptions volcaniques, on assiste pour ainsi dire à la formation de certains minéraux dus surtout à des procédés de sublimation et de métamorphisme : les observations récentes de M. A. Lacroix, à la Martinique sont particulièrement intéressantes à ce point de vue.

Enfin à chaque instant l'on peut observer des reproductions artificielles en quelque sorte accidentelles s'effectuant spontanément dans les produits des fourneaux de l'industrie : laitiers des hauts-fourneaux, culots des creusets de verrerie et d'un grand nombre d'industrie minérales ⁽²⁾. Ces synthèses artificielles qui ont été l'objet des études approfondies de la part des minéralogistes étrangers ont le gros défaut de donner le plus souvent des produits plus ou moins impurs et dont la genèse reste toujours plus ou moins obscure.

(1) Etudes synthétiques de Géologie expérimentale 1879 et les eaux souterraines 1887.

(2) Citons aussi les minéraux accidentels qui se produisent souvent dans les combustions lentes des houillères ou des terris de mines.

Je voudrais surtout vous entretenir des procédés de reproduction vraiment scientifique où l'expérimentateur prévoit les résultats qu'il veut obtenir et par conséquent dirige ses efforts vers un but bien défini de façon que, réussi ou non, cet essai de synthèse lui fournisse toujours au moins des renseignements exacts.

Ces « synthèses voulues » comme les appellent MM. Fouqué et Michel-Lévy ont surtout été effectuées en France, où en effet, les études de chimie minérale et celles de cristallographie ont toujours été et sont encore en honneur et où l'union si féconde de la minéralogie et de la chimie ou de la physique a toujours produit des résultats heureux : il faut en effet que les forces mises en jeu dans la nature soient connues et précisées aussi bien par le minéralogiste que par le chimiste ou le physicien. Aussi les noms des Gay-Lussac, Berthier, Durocher, Ebelmen, Senarmont, St^{te}-Claire Deville, Daubrée, Friedel, Hautefeuille, Margottet, Becquerel, Fouqué, Debray, pour ne citer que les plus connus des disparus nous rappellent-ils des savants qui sont célèbres à la fois dans les sciences physiques et chimiques et dans les sciences naturelles.

Ces travaux synthétiques ont déjà donné lieu à un certain nombre de publications françaises (1) ou étrangères (2) et par suite à des classifications des méthodes synthétiques employées. Daubrée en particulier divisait simplement ces méthodes en deux groupes : méthodes

(1) DUFRÉNOY : *Minéralogie*, 1845.

A. FAVRE : *Sur les minéraux artificiels*, *Bul. S. G.*, t. XIII, 1855-56, p. 307
Arch. Sc. Ph. et Nat., t. XXXI, 1856, p. 136.

FRIEDEL : *Revue scientifique*, septembre 1880, p. 242-48.

DAUBRÉE : *Rapport sur les progrès de la Géologie expérimentale*, 1867.

DAUBRÉE : *Études synthétiques de Géologie expérimentale*, 1870.— *Les eaux souterraines*, 1887.

FOUQUÉ et MICHEL LÉVY : *Synthèse des minéraux et des roches*, 1882.

(2) HAUSMANN : *Beiträge zur metallurgischen krystallkunde*, 1850-1859.

GURET : *Übersicht der pyrogeneten künstlichen Mineralien*, 1857.

LEONHARD : *Hüttenerzeugnisse und andere auf künstlichem Wege gebildete Mineralien als Stützpunkte geologischer Hypothesen*. Stuttgart, 1858.

FUCHS : *Die künstlich dargestellten Mineralien*, Haarlem, 1872.

par voie ignée et méthodes par voie aqueuses qui sont en effet, en somme, les deux grandes méthodes employées par la nature. MM. Fouqué et Michel-Lévy ont précisé ces notions et ont donné une classification plus précise que nous suivrons également en indiquant pour chaque subdivision les procédés qui nous paraissent pouvoir se rapporter aux conditions naturelles de formation et de gisement des substances reproduites artificiellement.

Pour qu'un corps puisse cristalliser, il faut en quelque sorte soustraire ses molécules aux actions extérieures, sauf celles de la symétrie cristalline et qu'il y ait passage lent d'une substance de l'état liquide ou gazeux à l'état solide. Cette mobilité des molécules pourra cependant être réalisée aussi bien à l'état solide, qu'à l'état liquide (fusion ou dissolution) ou à l'état de vapeur; elle sera favorisée en outre soit par la présence d'un gaz inerte comme l'azote; par l'endosmose, de faibles courants électriques; par ce que les anciens chimistes appelaient « l'état naissant » lorsque le corps se dégage d'une réaction chimique; soit aussi par la pression qui tend à rapprocher les molécules et à laquelle on a fait jouer pendant longtemps sous le nom de « dynamo métamorphisme » le rôle principal dans la formation des gneiss, des micaschistes et de tous les schistes plus ou moins cristallins; soit enfin la présence de cellules très petites comme celles que présentent les corps organisés, ou les substances alcalines ou acides sous pression, etc.

Tous ces différents procédés peuvent se grouper dans le tableau suivant, dû, comme nous venons de le dire à MM. Fouqué et Michel-Lévy.

1° Modifications moléculaires des corps à l'état solide

A. *Sans réaction chimique* : Le soufre prismatique (monoclinique) se transforme spontanément avec plus ou

moins de rapidité suivant la température en soufre octaédrique (orthorhombique) qui représente la forme stable du soufre cristallisé au-dessous de 60° (1).

Le fer, surtout sous des actions mécaniques diverses prend facilement la structure cristalline et devient alors facilement cassant : ce fait est bien connu des constructeurs et des ingénieurs.

Citons encore l'acide arsénieux surtout cristallisé dans la nature en octaèdres réguliers et que l'on obtient dans les laboratoires au-dessus de 250° en prismes orthorhombiques (2) lesquels se transforment rapidement en agrégats d'octaèdres : comme pour le soufre nous pouvons en conclure que dans la nature les circonstances qui ont permis la cristallisation ont dû être surtout celles qui correspondent aux formes stables.

B. *Avec réaction chimique* : Les exemples de synthèse qui pourraient rentrer dans cette catégorie sont en général complexes et paraissent rentrer plutôt dans les subdivisions qui vont suivre. Le plus célèbre est la synthèse du marbre réalisée dès 1801 par *Hall* (3) en chauffant en vase clos du calcaire : il est probable que le gaz carbonique mis partiellement en dissociation se recombine avec la chaux pour donner un produit cristallin et joue par conséquent le rôle de minéralisateur gazeux par rapport à la chaux solide.

2° *Modifications moléculaires de corps à l'état fondus.*

A. *Sans réaction chimique et sans dissolvant* : c'est-à-dire par simple fusion puis refroidissement. Ce procédé très simple, a en effet été employé dès l'origine pour la repro-

(1) GERNEZ : *C. R. Ac. Sc.*, t. LXXXIII, 1876, p. 217.

(2) DEBRAY : *C. R. Ac. Sc.*, t. LVIII, p. 1209.

(3) J. HALL : *Edimb. roy. Soc. Trans.*, 1801.

duction d'une foule de minéraux : des corps simples comme le soufre, le bismuth ; des composés binaires comme la stibine (Sb^2S^3), enfin des silicates plus ou moins complexes comme le péridot, l'enstatite, l'augite, la néphéline, la leucite, les feldspaths tricliniques ou plagioclases ; le pléonaste ; le fer oxydulé.

Pour les partisans de la théorie plutonienne il semblait qu'à priori tous les minéraux des roches et les roches cristallines devaient avoir cette origine. Dès 1798, J. HALL, en faisant refondre des basaltes, des laves, des mélaphyres et en variant les conditions de refroidissement obtenait tantôt des produits vitreux, tantôt des produits cristallisés. De même dans la reproduction des minéraux que nous venons d'énumérer et qui s'obtenait en mettant en présence le plus souvent les éléments de ces minéraux on a pu préciser peu à peu les conditions dans lesquels ces éléments ont pu prendre naissance dans la nature et nous pouvons les résumer de la façon suivante : la plupart des silicates passent lentement de l'état solide à l'état liquide et réciproquement traversant ce que Friedel appelait un état de « sous-fusion ». Cet état de sous fusion, qui se produit à des températures très élevées a pour effet comme l'a montré récemment M. J. JOLY (1) de faire varier le point de fusion des différents silicates d'autant plus que celui-ci a été maintenu plus longtemps à ces hautes températures et a permis aussi à MM. Fouqué et MICHEL-LÉVY d'assister en quelque sorte (2) aux passages de la substance vitreuse qu'une simple fusion suivie de refroidissement aurait donnée, à la formation des produits à formes arrondies (globulites), puis au groupement de ces globulites pour former des arborisations (cristallites), enfin à l'apparition de surfaces polyédriques et de cristaux

(1) *C. R. Congrès géol.*, Paris, 1900, p. 689.

(2) En particulier pour la Leucite, *Bull. Soc. Min.*, n° 5, 1880.

proprements dits (microlithes d'abord, puis cristaux de plus grande taille ensuite).

Si maintenant l'on remarque en outre que les éléments que nous avons cités plus haut constituent, comme l'analyse microscopique nous l'a révélé, les éléments des roches volcaniques, l'on comprendra facilement que cette méthode entre les mains de MM. Fouqué et Michel-Lévy ait donné des résultats de la plus haute importance sur lesquels nous avons déjà attiré l'attention. Ces savants ont pu en effet, par simple fusion ignée suivie de refroidissements lents continus ou discontinus avec temps d'arrêts plus ou moins longs, sans aucune intervention de minéralisateurs — alors que tous les géologues avec Daubrée et Sorby croyaient ces éléments ainsi que la présence de l'eau indispensables — réaliser, non seulement à l'état isolé tous les minéraux des roches basiques (péridot, pyroxéne, enstatite, plagioclase, labrador, leucite, nepheline), — mais aussi avec tous les détails de structure ces roches elles-mêmes : Basaltes, Mélaphyres, Labradorites, Andésites, Ophites, Néphélinites, Leucitites, Leucitéphrites, Lherzolites et aussi quelques météorites. Ils ont pu conclure en outre que s'ils n'avaient pu reproduire par la méthode qu'ils ont employée ni le quartz, ni un certain nombre de silicates de roches acides, ni ces roches elles-mêmes, c'est que les procédés naturels ne comportent pas une simple fusion ignée des éléments ou d'un magma et sa consolidation à l'air libre sans pression.

B. *Fusion avec dissolvant sans réaction chimique exercée par lui.* — Bien que ce cas soit assez rare, car le plus souvent le dissolvant exerce une action chimique par lui-même, un certain nombre des synthèses réalisées par ce procédé ont trouvé cependant des applications pour les minéraux naturels.

C'est ainsi que FORCHHAMMER après avoir reproduit l'apatite chlorurée par le phosphate de chaux tribasique ou les os calcinés fondus dans le chlorure de sodium, l'apatite chlorurée et fluorée comme celle de la nature par un mélange d'apatite naturelle pulvérisée et de chlorure de sodium, a pu également la reproduire par le même procédé en traitant par le chlorure de sodium en excès des argiles ou des marnes dans lesquelles on savait qu'il existait de l'acide phosphorique (1).

La cristallisation du graphite a lieu journellement dans l'industrie par dissolution du charbon dans la fonte de fer; les lamelles de graphite atteignent facilement plusieurs centimètres et la fabrication du graphite est, paraît-il, entrée dans le domaine industriel.

C'est également par ce procédé que récemment M. MOISSAN grâce aux hautes températures réalisées dans le four électrique a pu, en dissolvant le charbon de sucre dans le fer et plongeant rapidement la masse dans l'eau froide de manière à provoquer une pression considérable à son intérieur, reproduire le diamant et les différentes variétés signalées dans les météorites: il attribue au diamant naturel, en particulier à celui du Cap une origine analogue (2).

Ce mode de cristallisation a permis à LECHARTIER (3) d'obtenir par fusion des éléments constitutifs dans le chlorure de calcium, les différentes variétés naturelles de pyroxènes, de périclites; Margottet (4) a reproduit la proustite et l'argyrythrose en fondant à plusieurs

(1) *Ann. Ch. Pharm.*, t. XC, p. 322. — Il reste cependant douteux que la nature ait véritablement employé cette réaction. Sainte-Claire Deville se servait du chlorure de calcium et a reproduit ainsi toute une série d'apatites de plomb, manganèse, fer, etc., *Ann. Ch. et Ph.*, 1863, p. 443

(2) Voir à ce sujet l'article de M. Moissan, in *Traité de chimie minérale Masson*, t. II, en cours de publication, où l'histoire des synthèses du graphite et du diamant est admirablement résumée.

(3) *C. R.*, t. LXVII, p. 41, 1868.

(4) *Ann. de Ph. et Ch.* t. XXII, 1848, p. 211 et t. XXXII, 1850, p. 762.

reprises ces substances dans le soufre à la température d'ébullition de ce corps.

Enfin, c'est aussi, semble-t-il, dans ce mode de cristallisation que rentrent les célèbres expériences de synthèse d'EBELMEN. En employant l'acide borique qui, fondu au rouge sombre, a la propriété de dissoudre un grand nombre d'oxydes et qui peut ensuite se volatiliser aux températures élevées comme celles que l'on obtient dans les fours à porcelaine de la manufacture de Sèvres il a pu reproduire ainsi, en partant des éléments chimiques, des émeraudes, des spinelles, des rubis, des saphirs, des silicates divers possédant la dureté, l'éclat, les nuances des minéraux naturels. Des résultats analogues furent obtenus par Ebelmen et d'autres expérimentateurs avec le borax et avec le phosphate de soude et d'ammoniac. Ebelmen put reproduire aussi les différents spinelles (ROR^2O^3) à l'état de pureté, compléter même la série naturelle des spinelles, et il terminait l'un de ses mémoires par les paroles suivantes au sujet du rôle possible de l'acide borique ou du borax dans les cristallisations précédentes : « sans vouloir prétendre que cela se soit passé ainsi dans la nature, il ne faut oublier la présence de l'acide borique dans les lagoni de Toscane, dans le cratère de Vulcano, du borax dans les lacs de l'Asie Mineure. »

C. *Fusion avec réactions chimiques* : Dans ce cas le fondant que l'on emploie et dont on se débarrassera après la réaction terminée joue en réalité le rôle d'un minéralisateur.

Ainsi, HAUTEFEUILLE ⁽¹⁾ a obtenu par ce procédé l'orthose, l'albite, le quartz ⁽¹⁾ à pointement aigu (e^5 et e^4 au lieu de p et $e^{1/2}$ du quartz naturel), la tridymite,

(1) C. R. Ac. Sc., t. LXXXVI, 1878, p. 1133.

la leucite en faisant intervenir pendant longtemps vers 8 à 900° les tungstates et vanadates alcalins : il est probable que dans ces conditions la silice décompose le tungstate, met l'acide tungstique en liberté et que celui-ci réagit à son tour sur les nouveaux silicates formés.

Les conditions de l'expérience diffèrent probablement beaucoup de celles dans lesquelles ces minéraux ont pris naissance dans la nature et il est justement intéressant de voir que les cristaux de quartz en particulier ne sont pas conformes du tout au type si remarquablement constant des cristaux naturels.

3° *Modifications moléculaires de corps volatilisés*

A. *Volatilisation proprement dite dans l'air ou dans un courant de gaz inerte* : La chaleur seule donne par sublimation un grand nombre de substances déjà connues des anciens alchimistes, tels sont en particulier le soufre, l'arsenic, l'acide arsénieux, le bichlorure de mercure ou sublimé corrosif, la blende qui se produit si fréquemment dans les usines à zinc et qui diffère de la blende naturelle par sa couleur plus foncée et sa porosité ; le cinabre, le calomel pour la purification duquel ce procédé est employé ; le realgar As_2S_3 fréquent dans les usines où l'on traite des minerais à la fois sulfurés et arseniés et dans les produits de sublimation des lignites ou des houilles embrasés.

La présence d'un gaz inerte favorise souvent la sublimation : ainsi un courant d'azote permet la sublimation de la blende à assez basse température ; c'est probablement de la même façon que la vapeur qui n'a aucune action chimique sur l'acide borique l'amène de profondeur dans les lagoni de Toscane et peut être aussi l'anorthite, le pyroxène et autres silicates cristallisés que

l'on peut recueillir dans les cheminées des volcans (1).

B. — *Volatilisation avec réactions chimiques en mettant en contact des gaz ou des vapeurs* : c'est à ce type qu'appartient la synthèse du fer oligiste que réalisa GAY-LUSSAC après un voyage au Vésuve en 1821 : des vapeurs de chlorure de fer semblables à celles qui se dégagent sur les flancs du Vésuve furent introduites dans un tube chauffé au rouge mélangées avec de la vapeur d'eau : aussitôt dans les parties froides du tube apparurent des paillettes brillantes identiques au fer oligiste du volcan (2). A la vérité ces cristaux d'oligiste artificiels sont très petits, comme d'ailleurs la plupart des cristaux obtenus artificiellement, mais cela tient uniquement à ce que les réactions du laboratoire ne sont pas suffisamment prolongées. Dans la domite du Puy-de-Dôme on trouve en effet une poussière formée de cristaux microscopiques de Fe^2O^3 aux abords de la fissure qui a laissé échapper les vapeurs chlorurées, tandis que dans la fissure les cristaux plus volumineux ont en quelque sorte été nourris par le passage répété des vapeurs.

DUROCHER (3) a obtenu par l'action de l'hydrogène sulfuré sur les chlorures au rouge toute une série de sulfures : la galène, la nickeline, la stibine, la bismuthine $Bi S^3$, le cinabre, l'argyrose ; l'antimoine natif par l'action de l'hydrogène sur le chlorure d'antimoine au rouge. Ces réactions peuvent expliquer quelques-uns des gisements de ces corps dans la nature.

(1) Il est cependant vraisemblable, comme nous le verrons plus loin, que, pour ces derniers corps la vapeur d'eau, même seule, peut avoir une action chimique qui favorise le transport.

(2) *Ann. de Ph. et Ch.*, t. XXII, 1823, p. 415. Il a obtenu le même produit en faisant agir au rouge le chlorure de sodium et la vapeur d'eau sur les éléments ferrugineux des laves réalisant ainsi encore mieux les conditions naturelles de formation en fer oligiste volcanique.

(3) *C. R. Ac. Sc.*, t. XXXII, 1851, p. 825.

DAUBRÉE (1) enfin a obtenu par l'action de la vapeur d'eau au rouge soit sur les chlorures, soit sur les fluorures d'étain et de titane, la cassitérite et successivement les trois variétés connues d'oxyde de Titane HAUTEFEUILLE (2) : l'anatase au-dessous de 100°, la Brookite au rouge, et la rutile à très haute température et dans une atmosphère humide et acide. Il est presque certain que nous trouvons dans ces expériences l'explication des gisements d'acide titanique dans le granite, la diorite, la granulite, le quartz des filons concrétionnés stannifères et l'explication du rôle minéralisateur de l'acide chlorhydrique ou fluorhydrique.

C. *Action d'une vapeur ou d'un gaz jouant le rôle de minéralisateur sur un corps solide* : L'argent sulfuré ou selenié a été reproduit par l'action des vapeurs de soufre et de selenium au rouge sur de l'argent métallique dans un courant d'azote par MARGOTTET (3) qui a obtenu aussi toutes les formes de l'argent natif filiforme par l'action de l'hydrogène sur le sulfure d'argent au-dessus de 450° ; l'identité parfaite des produits obtenus avec les produits naturels semble bien indiquer que les mêmes procédés ont dû être mis en œuvre par la nature.

Enfin, dans la méthode créée par A. S^{te} CLAIRE DEVILLE, les *minéralisateurs* (4) c'est-à-dire les gaz ou les vapeurs employés purs ou mélangés à la vapeur d'eau, interviennent comme agents d'une série de combinaisons et de décompositions successives et sortent intacts après avoir déterminé une transformation complète des solides en expérience. Une faible quantité de minéralisateur peut ainsi transformer avec le temps une masse énorme

(1) *C. R. Ac. Sc.*, t. XXIV, 1849, p. 227.

(2) *Ann. de Ph. et Ch.*, 4, t. IV, p. 129, 1865.

(3) *C. R. Ac. Sc.*, t. LXXXV, 1877, p. 1142.

C. R. Ac. Sc., t. LII, p. 1264, 1861.

en quelque sorte indéfinie de substance. Vous comprenez déjà l'importance des résultats obtenus au point de vue de leur application à la géologie et à la minéralogie. Ainsi par exemple, le sesquioxyde de fer amorphe, les roches ferrugineuses comme les laves soumises à l'action du rouge d'un courant lent d'acide chlorhydrique donne naissance dans les laboratoires comme dans la nature à du fer oligiste bien cristallisé (1). Si dans un tube on introduit des couches alternatives de zircone (ZrO^2) et de silice (SiO^2) une quantité limitée de fluorure de silicium passant à haute température sur ces matières transforme le tout en zircon cristallisé ($Zr SiO^4$) (2), les silicates d'alumine ont été obtenus de la même façon. La Wurtzite ou Blende hexagonale, s'obtient très facilement en faisant passer un courant lent d'hydrogène au rouge vif sur le sulfate amorphe. HAUTEFEUILLE (3) en faisant passer au rouge vif, sur une colonne d'alumine un courant d'acide fluorhydrique a reproduit dans des conditions, se rapprochant certainement beaucoup des conditions naturelles, des cristaux de corindon d'autant plus gros que l'opération se prolongeait davantage.

4^o Modifications moléculaires de corps dissous dans l'eau

A. *Sous la pression ordinaire* : Par évaporation ou volatilisation. Vous reconnaissez le procédé communément employé en chimie pour obtenir ou purifier les substances susceptibles de cristalliser. C'est aussi le procédé qui, dans la nature, a fourni comme je l'ai indiqué plus haut les

(1) C'est le complément en quelque sorte de l'expérience de Gay Lussac et la mise en évidence du rôle minéralisateur de l'acide chlorhydrique.

(2) Le zircon s'obtient aussi par l'action à haute température du fluorure de silicium sur la zircone, ou de fluorure de zirconium sur la silice : toutes ces expériences concordent avec les conditions de gisement du zircon pour faire jouer au fluor le rôle de minéralisateur.

(3) *Ann. de Ph. et Ch.*, 1865, t. IV, p. 429.

chlorures de sodium, de potassium, de magnésium, un grand nombre des gypses et certains sulfates doubles des gîtes salifères.

Ce procédé a permis aussi d'étudier les diverses particularités de la formation des cristaux, de constater par exemple que plus l'évaporation est lente plus les cristaux sont volumineux et mieux formés. En suspendant un cristal unique à un fil fin comme un cheveu et en « nourrissant » le cristal dans des solutions saturées on a pu obtenir des cristaux plus gros et plus purs que les cristaux naturels. Il en est de même dans des solutions gélatineuses où le cristal peut flotter : conditions qui ont dû être réalisées dans la nature au milieu de boues argileuses ou argilo-calcaires. Celles-ci devenues des schistes ou des calcaires plus ou moins compacts, renferment des cristaux de pyrite et certaines variétés de quartz bipyramidé (1).

Les vapeurs peuvent aussi réagir chimiquement sur les corps solides tout en jouant encore en partie le rôle de minéralisateurs. C'est ainsi que DAUBRÉE (2) par l'action à haute température du chlorure de phosphore sur la chaux a pu obtenir le premier l'apatite : DUROCHER (3) a obtenu de la dolomie par l'action du chlorure de magnésium sur le calcaire : le chlorure de magnésium existe dans l'eau de mer et les observations récentes des géologues anglais dans les sondages poussés jusqu'à 400^m dans le récif de coraux calcaires de Funafuti montrent que le calcaire s'enrichit peu à peu en carbonate de magnésie non plus à chaud comme dans l'expérience de Durocher mais à des températures relativement basses.

(1) Ces cas sont fréquents dans les roches anciennes de l'Ardenne, nous en avons rencontré également des exemples dans les schistes liasiques ou les dépôts du flysch des Alpes.

(2) *Ann. des Mines*, 4^e série, t. XIX, p. 654.

(3) *C. R. Ac. Sc.*, t. XXXIII, p. 64, 1851.

Les expériences de laboratoire de *Lavalle*, de *Pasteur* ont permis de se rendre compte de la façon dont un fragment cristallin souvent informe se « cicatrisait » de façon à reproduire la forme du cristal dont il est un débris; la formation de certaines faces plutôt que d'autres suivant la composition des eaux mères ou l'introduction de certaines substances dans les eaux mères (1). Les variations que la cristallisation même amène dans la solution produisent soit des altérations des angles de la forme qui avait d'abord pris naissance, soit des macles, font disparaître en un mot l'homogénéité des premiers cristaux, expliquent par suite les différences, soit dans le développement des faces, soit dans les valeurs des angles dièdres que l'on observe entre les cristaux de diverses provenances.

On obtient aussi dans les solutions sursaturées par semis de cristaux ou de fragments de cristaux un grand nombre de produits chimiques artificiels et, comme l'a indiqué M. GERNEZ, variables avec le cristal employé (2). Ce cas a dû certainement se produire dans la nature et expliquerait d'après LECOQ DE BOISBAUDRAN (3) la production des facettes secondaires des cristaux naturels et aussi, dans certaines roches éruptives, l'orientation des cristaux de quartz du second temps de cristallisation autour des cristaux anciens bipyramidés plus ou moins usés et brisés.

Les variations de température, à la pression ordinaire, des dissolutions salines ont aussi une grande influence sur la production des cristaux : le chlorure d'argent, la senarmontite (Sb_2O_3) en poudres plus ou moins amorphes sont transformés par des variations multiples de tempé-

(1) L'exemple classique est celui de l'alun qui peut donner, suivant les cas, un cube, un octaèdre, un cubo-octaèdre ou un dodécaèdre pentagonal.

(2) Nous avons déjà signalé le fait pour le soufre à l'état de surfusion.

3) C. R. Ac. Sc., LXXIX, p. 802, 806.

rature entre 0° et 100° dans l'eau en cristaux volumineux (1). Le même procédé a permis à DEBRAY d'obtenir la cristallisation d'un grand nombre de phosphates.

Enfin, à la pression ordinaire, on peut obtenir par double décomposition ou par dissociation un grand nombre de substances cristallisées. Dans la nature, par exemple, les eaux chargées de gaz carbonique peuvent dissoudre un grand nombre de substances: calcaire, silice, phosphates et les abandonnent ensuite, en général par départ du gaz carbonique, soit à l'état amorphe soit à l'état cristallisé. Au sujet du calcaire, GUSTAVE ROSE (1) a montré que dans une même dissolution on pouvait obtenir de l'aragonite par une évaporation rapide à chaud (100°), tandis que la calcite peut se produire aussi bien à chaud qu'à froid surtout au-dessous de 70°.

Lorsque l'on a affaire, comme c'est fréquemment le cas, à des substances peu solubles, on peut obtenir cependant leur cristallisation par voie aqueuse par des procédés spéciaux caractérisés en somme par la lenteur des actions qui donnent naissance au minéral étudié. Des liquides très dilués sont mis en contact progressif soit par diffusion, soit par dialyse, soit à travers des vases fêlés, soit par une mèche d'amiante (M. MACÉ) soit par adjonction mécanique très lente d'un des liquides (M. DE SCHLUCHTEN (2)): La barytine (sulfate de baryte) a été ainsi obtenu à l'aide de solutions salines appropriées réunies par un fil poreux ou séparées par des cloisons poreuses; de même, le spath fluor, l'anglésite, la cérusite, la calcite.

Ces actions lentes et très prolongées de solutions salines extrêmement diluées soit sur d'autres solutions salines, soit sur des corps solides se produisent évidemment à chaque instant dans la nature (1), par exemple

1) *Pogg. Ann.*, 1837, t. XII, p. 533.

(2) Nombreuses notes in. *Bul. Soc. Min.*

dans la circulation des eaux souterraines, depuis celles qui alimentent les nappes aquifères superficielles jusqu'aux eaux thermominérales venues souvent de grandes profondeurs lorsqu'elles circulent au voisinage de la surface. Il se produit ainsi, sous nos yeux, dans la partie superficielle du grand laboratoire de la nature, des synthèses minéralogiques qui ont appelé l'attention de nombreux observateurs. C'est ainsi que DAUBRÉE (2) a constaté la production accidentelle de diverses zéobites, apophyllite, chabasia, christianite, harmotome, mésotype, dans les bétons et les briques des canaux de captation d'un certain nombre d'eaux minérales (Plombières, Bourbonne-les-Bains, Bourbon-Lancy, Luxeuil, Saint-Honoré, Hamman-Meskoutine, etc.), par suite de l'action prolongée, exercée par les silicates alcalins dissous dans ces eaux sur les silicates alumineux des briques et des bétons dans des conditions analogues à celles que les observations géologiques ont révélé pour les zéolites naturelles. Les eaux thermo-minérales peuvent aussi déposer de véritables minerais métallifères (Blende, Pyrite, oxydes et carbonates), mais il est probable que ces minerais ont été empruntés à des filons existant en profondeur (3) et que, malgré le lien intime qui doit exister certainement, comme nous le montrerons un peu plus loin, entre les manifestations hydrothermales actuelles et les anciennes circulations métallifères, nous n'assistons pas cependant à la formation de véritables filons métallifères car il leur manque en effet, comme nous le verrons, de se produire en profondeur et sous pression.

(1) Rappelons que l'eau chargée de gaz carbonique dissout pour ainsi dire ou attaque tous les minéraux, comme on peut le constater par l'étude des roches superficielles et de leurs modifications.

(2) *Géol. expérimentale*, p. 181. Il signale en outre la Blende, le spath fluor.

(3) Parfois même aux tuyaux ou aux récipients de canalisation. A la surface des monnaies de bronze, des tuyaux de plomb restés longtemps au contact d'eaux thermales on voit se produire des minerais de filons.

En dernier lieu, signalons aussi l'influence exercée sur la cristallisation d'un certain nombre de substances de faibles courants électriques qui ont permis à BECQUEREL ⁽¹⁾ d'obtenir le protoxyde de cuivre cristallin, des carbonates métalliques, la Pyrite, la Barytine, la Celestine, l'Anglesite, la Cerusite, la Withérite, etc. et qui peut sans doute pouvoir s'appliquer à un certain nombre de minéraux naturels.

B. — *Emploi de l'eau sous haute pression ; soit pure soit faiblement chargée de carbonate alcalins* : L'on admet généralement que la pression a pour effet d'augmenter la solubilité des substances mises en présence et de développer certaines affinités chimiques ; elle tend aussi à faire prendre à un composé chimique quelconque le plus petit volume moléculaire possible ⁽²⁾.

Si vous voulez bien vous rappeler que l'eau existe dans toutes les roches depuis les plus superficielles jusqu'aux plus profondes, que M. A. GAUTIER a pu en retirer des proportions notables même du granite de Flamanville vous comprendrez de suite l'importance primordiale de ce mode de cristallisation dans la nature.

SCHAFHAUTL ⁽³⁾ dès 1845 en chauffant pendant huit jours dans la marmite de Papin de la silice gélatineuse avait annoncé avoir obtenu des prismes hexagonaux de quartz.

Mais cette méthode a surtout été employée et rendue pratique par SÉNARMONT ⁽⁴⁾ : le procédé a consisté à chauffer en vase clos, souvent pendant plusieurs jours, dans des vases en grès ou en verre épais pour les températures

(1) *Ann. de Ph. et Ch.*, t. XXXII, p. 244. 1823.

(2) Mais bien que du soufre et du fer comprimés fortement donnent naissance à du sulfure de fer, la pression seule ne peut donner naissance aux substances minérales complexes qui constituent par exemple les roches cristallophylliennes

(3) *Anzeigen*, 1845, p. 557.

(4) Expériences sur la formation des minerais par voie humide dans les gîtes métallifères concrétionnés, *Ann. Phys. et Ch.*, 3, t. XXXII, 1851.

inférieures à 200°, dans des tubes métalliques hermétiquement fermés pour les températures plus élevées (jusqu'à 400°), de l'eau contenant les réactifs de l'expérience soit en suspension dans le liquide, soit contenus dans une ampoule en verre que la chaleur faisait éclater. Le résultat de ces expériences a été la reproduction de presque tous les minéraux des filons métallifères : le quartz, les carbonates, les sulfures, les sulfates, les arseniures simples ou complexes, le spath-fluor, etc.

DAUBRÉE perfectionna la méthode en réussissant à chauffer les tubes clos jusqu'à 700°. Dans ces conditions le verre perd sa transparence, se gonfle, et se transforme en un agrégat de cristaux : du quartz se forme en abondance et, s'il y a du fer et de la magnésie, du pyroxène (1) verdâtre.

Plus récemment CH. FRIEDEL et SARRASIN (2) en appliquant cette méthode et chauffant les différentes substances employées pendant 24 heures au voisinage de 500° dans un tube d'acier doublé intérieurement de platine et solidement fermé ont pu reproduire la liebéthénite, l'olivénite, l'hopéite, l'adamine, la thorgénite, la leadhellite, l'analunite, enfin l'orthose et le quartz (3). L'orthose obtenu était identique à celui des filons métallifères et des roches granitoides; le quartz reproduit simultanément avec l'orthose a des formes plus raccourcies et plus rapprochées de celle du quartz bipyramidé des roches : c'est là un résultat extrêmement important au point de vue de la synthèse des roches acides et qui

(1) Le pyroxène des roches volcaniques est produit par voie sèche (Berthier), tandis que celui des roches acides granitoïdes serait d'après cela produit probablement par voie humide ce qui était déjà admis par les géologues.

(2) *Bul. Soc. mineral.*, 1879, p. 160. *Arch. Sc. phys. nat.*, Genève, 1891, la vraie nature chimique de l'hopéite (phosphate de zinc hydraté) a justement été déterminé par cette synthèse $(ZnO)^2(Ph_2O^5) + 4H^2O$.

(3) On chauffait plusieurs jours un mélange de silicate de potasse, de silicate d'alumine et d'eau : on avait des associations de quartz et d'orthose rappelant celles des micro-pagmatites.

permet de faire espérer tôt ou tard la synthèse du granite par une fusion combinée avec l'intersection d'éléments volatils lorsqu'on aura su réaliser un récipient capable de résister (1).

Dans toutes ces expériences, comme Arrhénius l'a montré, l'eau à haute température joue le rôle de minéralisateur: elle devient en effet un acide énergique déplaçant avec la plus grande facilité la silice de ses combinaisons et s'unissant aux bases, puis à plus basse température expulsée à son tour de ses hydrates et remise en liberté. Ces considérations expliquent en particulier la faible quantité d'eau mise en jeu dans les expériences précédentes et aussi l'action plus facile en présence de substances alcalines. Avec un carbonate alcalin et un sulfate de SÉNARMONT, on a obtenu très facilement la stibine, la bismuthine, le réalgar, la chalcoppyrite, la Proustite, le Mispickel (2), et la fluorine, qui accompagne si fréquemment les sulfures s'obtient par l'action du bicarbonate de soude sur le fluorure de calcium amorphe.

D'après toutes ces expériences la pression semble devoir jouer un rôle important dans la formation d'un grand nombre de substances filoniennes et de roches profondes. Et, il est facile d'imaginer et de comprendre, que des circulations thermales, minéralisées en profondeur et amenées à déposer leurs éléments entrés en dissolution sous pression (ou même tenus en suspension dans quelques cas), soit par sursaturation, soit par décompression, soit par refroidissement, soit par dégagement d'un principe dissolvant, donnent naissance à un filon métallifère dont la nature variera avec la profondeur, avec la

(1) M. LACROIX : *C. R. Ac. Sc.*, 28 mars 1904, dans cet ordre d'idée a signalé à la Martinique la formation presque sous ses yeux, à la superficie d'une andésite à hypersthène, sous la croûte superficielle retenant la vapeur d'eau, d'une roche quartzifère d'abord avec tridymite, puis avec quartz.

(2) Sulfure de fer, sulfoarséniate de soude, et bicarbonate de soude sous pression.

nature des minéralisateurs et avec l'éloignement de la masse éruptive profonde qui a fourni les éléments qui sont cristallisés.

5° *Combinaisons des méthodes précédentes*

Si accidentellement dans nos laboratoires, comme nous l'avons indiqué plus haut, plusieurs de ces méthodes se trouvent employées en même temps, il est certain et évident que la nature a dû presque toujours combiner les différents modes possibles de formation des minéraux soit dans les filons concrétionnés, soit dans les roches métamorphiques (gneiss et micaschistes), soit dans les roches acides (granitoïdes), soit enfin dans les minéraux des roches volcaniques.

Les synthèses partielles des minéraux des roches volcaniques par voie ignée et les synthèses de ces roches elles-mêmes obtenues par MM. Fouqué et Michel-Lévy nous permettent d'affirmer que la nature a surtout employé la fusion suivie de refroidissements lents et discontinus pour cette catégorie et de comprendre aussi pourquoi les phénomènes de volcanisme superficiel (1) se produisant à la pression ordinaire ou à des pressions très faibles ne donnent pas de véritables filons métallifères. Ils se réduisent le plus souvent à des phénomènes de sublimation (oligiste, sels de manganèse) et ne fournissent que des minéraux de fer, de manganèse, exceptionnellement de cuivre, de plomb, de cobalt, de mercure (Californie, Nouvelle Zélande) et surtout beaucoup de métalloïdes : soufre, chlore, carbone, arsenic (réalgar et orpiment), bore et alcalis qui se retrouvent ensuite dans les eaux des sources thermominérales des régions volcaniques.

(1) C'est-à-dire la cristallisation des roches d'épanchement à fusion purement ignée, l'étude des fumerolles gazeuses qui s'en dégagent, les modifications subies par la roche et par les fumerolles avec les variations de température, l'étude des cristallisations qui se produisent par l'action de ces magnas éruptifs sur les roches et terrains avoisinant, enfin l'observation des enclaves.

Pour les minéraux des filons concrétionnés que nous avons vu pouvoir se produire, soit par volatilisation, soit par dissolution à haute température et sous pression les expériences des synthèses permettent de les classer en deux groupes :

1^o Le groupe stannifère qui accompagne généralement les roches granitoïdes de profondeur et qui comporte l'intervention des minéralisateurs chlorurés ou fluorurés et de l'eau à haute pression, tandis que les sulfures, quoique présents, ne jouent qu'un rôle accessoire tout à fait secondaire ainsi que les borates.

2^o Le groupe des minéraux sulfurés (Plomb, Zinc, Fer) où les sulfures dominent au contraire et où l'intervention de l'eau pure ou faiblement chargée de carbonates alcalins, de l'hydrogène sulfuré agissant sur les chlorures, a fréquemment déterminé la cristallisation des minerais sulfurés, sulfo-antimoniés ou sulfo-arseniés. Ces minerais sont en relation surtout avec les roches basiques.

De sorte, que nous retrouvons ainsi, comme éléments essentiels de la minéralisation, mais dans des conditions de température et de pression différentes, le chlore, le soufre, le gaz carbonique, la vapeur d'eau, plus rarement l'arsenic et l'acide borique, c'est-à-dire les éléments mêmes qui jouent le rôle principal dans toutes les fumerolles éruptives (1).

Quant aux éléments des roches métamorphiques et des roches acides les expériences synthétiques (sauf celle si importante de Friedel et Sarrasin sur le quartz et l'orthose) ne nous ont fourni que bien peu de documents. Nous disposons cependant actuellement de moyens de chauffage capables de fondre tous les corps connus; l'insuccès des expériences de laboratoire où l'on fait

(1) DE LAUNAY : *La Science géologique*, 1905, chap. IX et XIV.

intervenir l'eau sous pression tient seulement très probablement à ce que, pour les températures élevées nous ne disposons pas encore de récipients capables de résister aux fortes pressions qu'il s'agit de développer. Il n'en reste pas moins démontré, dès à présent, que le rôle principal pour la cristallisation des éléments de ces deux catégories de roches doit être dévolu soit à l'eau pure, soit très faiblement minéralisé en particulier dans l'attaque des silicates et le transport de la silice.

Cette substance, indispensable à la vie, qui joue déjà dans les phénomènes géologiques et minéralogiques superficiels, un rôle primordial devient aussi l'agent principal des cristallisations profondes sous pression et à haute température ⁽¹⁾ des roches éruptives, du métamorphisme profond ou superficiel des terrains (M. CAYEUX).

III

RÉSULTATS DES SYNTHÈSES MINÉRALOGIQUES

Nous avons déjà dans le paragraphe précédent insisté sur les applications des synthèses de minéraux au point de vue de leur origine et de leur mode de formation dans la nature. Aussi, pourrions-nous être très bref et résumer très rapidement les résultats principaux et l'utilité des synthèses minéralogiques ⁽²⁾.

Si les résultats essentiellement pratiques sont rares et relativement peu importants (rubis artificiel au moyen de débris de rubis naturel, grenats artificiels, fabrication

(1) La pression seule aurait été pour les partisans du Dynamométamorphisme l'agent principal de la cristallinité et de la schistose des roches cristallophyllonnes, cette théorie ne peut résister à l'étude des séries cristallophyllonnes des Alpes ou des phénomènes de contact des roches cristallines. Des minéralisateurs et surtout l'eau sous pression ont certainement formé le rôle principal.

E. WEINSSCHENK : Mémoire sur le Dynamométamorphisme et la Trézoicristallisation, VIII^e Congr. Géol. Internat., Paris, 1900, t. I, p. 326-341.

TERMIER : Les schistes cristallins des Alpes occidentales, C. R. IX^e Congrès Géol. Internat. Vienne, 1905, p. 571-586.

(2) FOUQUÉ et MICHEL LÉVY, loc. cit. p. 12-20.

de l'éméri artificiel, du graphite, du carborandum, utilisation des laitiers, des verres dévitrifiées, etc.) il n'en est pas de même au point de vue des résultats théoriques.

Pour le mode de formation naturelle des minéraux ou de roches, les expériences sont venues confirmer les faits d'observation et montrer la part qu'il fallait attribuer à la fusion ignée dans les roches volcaniques d'épanchement comme les basaltes et toutes les roches volcaniques modernes, et celle dévolue à la fusion aqueuse sous pression dans les filons métallifères, le granite, la granulite, les porphyres.

En second lieu, alors que les minéraux naturels sont souvent impurs, ayant entraîné avec eux une partie des corps étrangers qui se trouvaient dans le milieu où ils se sont formés, les synthèses minéralogiques permettent la détermination exacte de la composition chimique des minéraux et la distinction des éléments accidentels, des éléments constitutifs ou des éléments d'altération et de substitution si fréquents dans les cristaux naturels. Alors que les analyses chimiques précises des cristaux naturels varient avec les échantillons, les expériences de laboratoire, en reproduisant ces minéraux d'après leur composition théorique pour la leucite, l'oligoclase, le labrador ou l'anorthite ont permis de se rendre compte et d'expliquer les modifications que ces minéraux ont pu subir dans la nature depuis leur formation.

En troisième lieu dans les grandes familles naturelles de minéraux, l'on constate des combinaisons très complexes tenant à ce fait que des protoxydes, des sesquioxides peuvent se remplacer par voie d'isomorphisme dans des proportions quelconques amenant des variations d'angles dièdres, de propriétés optiques : les synthèses ont permis de réaliser les types théoriques désignés par

des noms spéciaux et de préciser leurs caractères cristallographiques et optiques (1).

En outre, tandis que les synthèses d'Ebelmen montraient que la grande famille des Spinelles ($R O R^{2}O_3$) se composait de différents types passant les uns aux autres par voie d'isomorphisme, les expériences de MM. Fouqué et Michel-Lévy ont montré l'individualité propre de l'oligoclase et du labrador et que ces deux minéraux ne résultaient pas, comme Tschermak l'avait supposé du mélange des deux feldspaths albite et anorthite supposés complètement isomorphes et leur ont permis de préciser les conditions dans lesquelles ces feldspaths prennent naissance, soit isolément, soit simultanément. Dans ce dernier cas ces mélanges mécaniques des microlithes de différentes espèces correspondraient aux feldspaths intermédiaires de composition complexe signalés par Tschermak et ses disciples. L'impossibilité où ces auteurs ont été d'obtenir une oligoclase purement sodique, une néphéline purement potassique, confirme, sans d'ailleurs l'expliquer, l'absence de ces types minéralogiques dans la nature.

Par contre, certains types rares ou inconnus dans la nature, constituent des produits cristallisés de laboratoire très faciles à obtenir, tels sont le quartz à pointements très aigus d'Hautefeuille, les phosphates de chaux de Debray, de pyroxène magnésien (Ebelmen), des feldspaths à base de soude et de baryte, des strontiane ou de plomb (Fouqué et Michel-Lévy), les titanates bibasiques (Hautefeuille), un certain nombre d'apatites et de wagnérites, l'acide arsénieux rhombique (Debray, Pasteur), etc.

Les synthèses ont rendu à la minéralogie un service des plus considérables en produisant des séries plus complètes que les séries similaires naturelles. C'est ainsi qu'Ebelmen,

(1) Ex. la famille des Pyroxènes, des Apatites et des Wagnérites.

après avoir réalisé les différents types de la famille des spinelles; rigoureusement purs et nettement individualisés, arriva également à en produire d'autres qui ne figuraient pas dans la série connue, dépassant en quelque sorte la nature dans son œuvre et complétant par l'adjonction de nouveaux membres une famille minéralogique qu'elle avait laissée inachevée (1). Il put ainsi montrer la parenté des ferrites ($\text{Mo Fe}^2\text{o}^3$), des chromites ($\text{Mo Cr}^2\text{o}^3$) et des aluminates (Mo Al o^3).

H. Sainte-Claire Deville et Caron, en créant de nouvelles apatites et wernerites, complétèrent également deux familles que la nature avait laissées imparfaites, familles qui furent encore agrandies lorsque Debray puis Lechartier eurent reproduit des apatites et des wagnerites arséniées où l'arsenic remplaçait le phosphore.

Les phosphates furent complétés par Debray, les bisilicates par Lechartier, la famille des sesquioxides, par le sesquioxide de titane trouvé par Friedel et Guérin, les feldspaths comme nous venons de le voir plus haut par MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Tels sont, Messieurs, les principaux résultats obtenus par voie de synthèse. Dans ces dernières années les savants ont continué la belle série des découvertes synthétiques que nous venons de passer en revue, il me suffira de vous citer pour vous en convaincre la synthèse du diamant réalisée par M. Moissan, les synthèses nombreuses de M. de Schulten, Michel, Césaró, les observations synthétiques si remarquables de M. A. Lacroix, à la Martinique.

Je ne vous ai pas caché, au cours de cette étude, les lacunes et les problèmes qu'avaient encore à résoudre les minéralogistes expérimentaux, je l'ai fait dans l'espérance de susciter peut être parmi vous de nouvelles expériences amenant de nouvelles découvertes dont s'enrichira la Minéralogie appliquée.

(1) Fouqué : La Reproduction des minéraux, *Revue des Deux Mondes* 1^{er} Janvier 1883, p. 175.

