

courbe pour la face p d'un cristal rhombique de barytine. On y voit quatre minima, correspondant aux rayons menés par le centre O parallèlement aux faces m , qui sont des faces de clivage.

La figure 155 donne la courbe des duretés d'une face p d'un

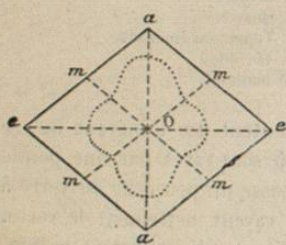


Fig. 152.

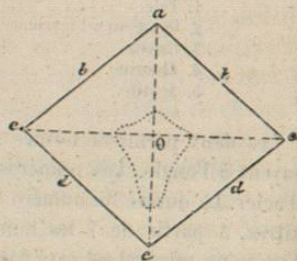


Fig. 153.

rhomboïdre de calcite. Enfin, dans la figure 154, on voit la répartition de la dureté sur une face cubique p d'un cristal de fluorine, substance dont les clivages sont parallèles aux faces de l'octaèdre a^4 .

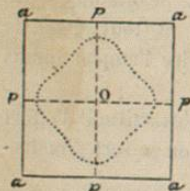


Fig. 154.

En raison des différences, parfois considérables, que présente la dureté suivant les faces d'un cristal clivable, c'est à la dureté *moyenne* que doit se rapporter le chiffre habituellement donné comme caractéristique de chaque espèce.

Conductibilité calorifique. — Les cristaux se comportent, pour la chaleur, exactement comme pour la lumière. C'est surtout dans l'étude de la *conductibilité* calorifique que se révèle cette analogie. Là se retrouve ce mode simple de distribution qui est exprimé par une surface ellipsoïdale.

Les variations de la conductibilité calorifique dans les cristaux peuvent être étudiées par une méthode dont le principe est dû à Sénarmont. On étale, sur la face à étudier, une couche mince de cire, et quand cette couche s'est consolidée, on chauffe un point déterminé de la surface à l'aide d'une pointe métallique. La cire fond tout autour du point échauffé, avec une vitesse d'autant plus grande que la chaleur se propage plus vite et, au bout d'un

temps donné, tous les points simultanément atteints par la fusion se trouvent distribués sur une courbe, dite *courbe thermique*. Si la chaleur se propageait également vite dans toutes les directions, cette courbe devrait être un cercle. Il en est ainsi pour tous les cristaux isotropes ainsi que pour les plaques normales à un axe principal. Dans tous les autres cas, la courbe thermique est une ellipse. Des dispositions ingénieuses ont été imaginées par M. Jannettaz, tant pour mesurer commodément le rapport des axes de l'ellipse thermique que pour soustraire la surface de la lame au rayonnement de la source de chaleur destinée à produire l'échauffement local.

Variations des courbes thermiques. — Les corps isotropes présentent la même conductibilité dans toutes les directions. Aussi les courbes thermiques y sont-elles toujours circulaires.

Dans les cristaux uniaxes, la direction de l'axe est celle du maximum ou du minimum de conductibilité. La courbe thermique n'est donc circulaire que pour les plaques normales à l'axe cristallographique principal. Pour toute autre direction, c'est une ellipse, dont l'un des axes est toujours compris dans la section principale de la plaque.

Enfin, dans les cristaux à deux axes, le maximum et le minimum de conductibilité se font sentir suivant deux directions rectangulaires, toujours liées aux éléments de symétrie du système.

On comprend que l'étude de la conductibilité puisse rendre de grands services, lorsque l'opacité d'une substance, d'ailleurs dépourvue de formes extérieures déterminables, empêche d'en faire l'examen optique. En pareil cas, la forme de la courbe thermique permet de reconnaître le système cristallin, et en mesurant, pour diverses plaques, la direction et la valeur relative des axes de conductibilité, on peut arriver à fixer les principaux éléments cristallographiques de la substance.

Les expériences de M. Jannettaz ont établi que la conductibilité thermique atteint son maximum suivant les plans de clivage.

Dilatabilité. — **Cristaux isotropes.** — On sait que les corps se dilatent, en général, lorsqu'on les chauffe, et l'on nomme *coefficient de dilatation linéaire*, en le désignant habituellement par α , le rapport $\frac{l - l_0}{l_0}$, dans lequel l est la longueur d'une

tige du corps, déterminée à zéro, et l' la longueur de la même tige à 100 degrés.

Cela posé, dans les cristaux isotropes, le coefficient de dilatation a la même valeur quelle que soit la direction. Par suite, les trois axes quaternaires s'allongeant, à toutes les températures, de la même quantité, leurs paramètres demeurent égaux entre eux.

Toute face, définie par les longueurs $\frac{1}{q}, \frac{1}{r}, \frac{1}{s}$, qu'elle intercepte sur les trois axes quaternaires, sera, à 100 degrés, définie par les longueurs

$$\frac{1}{q}(1 + \alpha) \quad \frac{1}{r}(1 + \alpha) \quad \frac{1}{s}(1 + \alpha).$$

Ces trois quantités étant toujours proportionnelles aux trois premières, les longueurs relatives qui servent à définir la face ne varient pas, c'est-à-dire que les angles que fait cette face avec les faces du cube sont invariables, quelle que soit la température. Ainsi, non seulement les cristaux cubiques demeurent cubiques à toutes les températures, mais les angles mutuels de leurs faces n'éprouvent aucune altération.

Cristaux anisotropes. Variabilité des angles dièdres.

— Il n'en est pas de même pour les autres systèmes cristallins. En général, chaque direction possède son coefficient de dilatation spécial. Si une face intercepte sur les trois axes conjugués Ox , Oy , Oz , des longueurs égales à $\frac{1}{q}a$, $\frac{1}{r}b$, $\frac{1}{s}c$, quand la température est égale à zéro, ces longueurs deviendront, à 100 degrés,

$$\frac{1}{q}a(1 + \alpha) \quad \frac{1}{r}b(1 + \beta) \quad \frac{1}{s}c(1 + \gamma),$$

α , β , γ étant les coefficients linéaires relatifs à Ox , Oy , Oz , et a , b , c , les paramètres de ces axes. Donc il n'y aura plus à 100 degrés, entre les longueurs interceptées, les mêmes rapports qu'à zéro. La direction de la face aura dû changer relativement aux éléments de la forme fondamentale. Ainsi pour tous les cristaux non isotropes, *les angles mutuels des faces varient avec la température*. De la sorte, la loi de l'invariabilité des angles, découverte par Romé de l'Isle, n'est absolue que pour une température déterminée.

Hâtons-nous de dire que, dans la pratique, cette variation des angles dièdres est peu sensible et que, dans les limites des expériences usuelles, elle ne dépasse pas un nombre peu considérable de minutes. Ainsi, d'après Mitscherlich, une élévation de température de 100 degrés ne réduit que de 8 minutes l'angle dièdre des faces p d'un rhomboèdre de calcite.

Permanence du parallélisme et du caractère général de la symétrie. — Mais si les angles mutuels des faces sont ainsi susceptibles de varier, les couples de faces parallèles demeurent parallèles à toutes les températures et, de plus, la symétrie du système cristallin reste la même, du moins dans la majorité des cas. Le premier résultat est facile à concevoir; car les longueurs interceptées sur les axes conjugués par deux faces parallèles QRS , $Q'R'S'$, étant proportionnelles entre elles, continueront à l'être après la dilatation. OQ sera devenu $OQ(1 + \alpha)$ et OQ' sera $OQ'(1 + \alpha)$. Le rapport $\frac{OQ}{OQ'}$ sera donc le même qu'auparavant.

Quant à la symétrie du système, l'expérience prouve que les lignes cristallographiques équivalentes éprouvent un égal allongement. Ainsi, dans un cristal uniaxe, l'axe principal est une ligne de maximum ou de minimum de dilatabilité. Dans le premier cas, les directions normales à l'axe sont toutes des directions de minimum; dans le second cas, c'est l'inverse. Il suit de là qu'un cristal uniaxe demeure tel à toutes les températures.

Les cristaux biaxes ont trois directions principales de dilatabilité, rectangulaires entre elles. Si les axes d'élasticité optique sont les mêmes pour toutes les couleurs, on observe que les mêmes directions sont aussi celles des axes principaux de dilatabilité.

Influence de la chaleur sur les propriétés optiques.

— La chaleur, en modifiant les distances mutuelles des molécules, ne peut manquer d'influer sur la distribution de l'éther interposé. C'est ce que l'expérience confirme, en montrant que, dans les solides, l'indice de réfraction, c'est-à-dire la vitesse de propagation de la lumière, change avec la température.

Cette variation respecte, en général, les conditions ordinaires de la symétrie. Ainsi un cristal isotrope demeure isotrope à toutes les températures. De même, un cristal uniaxe demeure uniaxe; mais les deux indices, ordinaire et extraordinaire, ne subissent pas toujours des variations proportionnelles. En pareil cas, il peut

arriver qu'un cristal, très peu biréfringent à la température ordinaire, ne présente plus, une fois chauffé, aucune différence entre l'indice ordinaire et l'autre. Dès lors, à la température correspondante, il sera devenu isotrope, mais *seulement pour une radiation déterminée*.

Dans les cristaux biaxes, les trois indices principaux éprouvant, avec la température, des modifications inégales, il en doit résulter des variations dans l'angle des axes optiques, lié à la valeur des élasticités optiques principales. Les importantes recherches de M. des Cloizeaux ont montré que ce changement était très diversement marqué suivant les substances; pour le plus grand nombre, la température de l'ébullition de l'eau ne produit qu'une altération de quelques degrés dans l'angle des axes. Le gypse est beaucoup plus sensible : bien au-dessous de cent degrés, l'angle de ses axes devient nul. Le cristal est alors uniaxe, mais seulement pour une radiation déterminée. Au delà de ce point, l'ancien indice minimum devient supérieur à l'indice moyen et le plan des axes optiques s'ouvre dans une direction rectangulaire avec celle où il était précédemment contenu.

La variation produite par la chaleur dans l'angle des axes est tantôt momentanée, tantôt permanente. Ainsi, les cristaux de feldspath orthose, chauffés au rouge sombre, éprouvent une altération définitive, ce qui ne les empêche pas de conserver, dans leur nouvel état, une certaine faculté de variation temporaire.

Pyroélectricité. — L'électricité peut se développer dans les cristaux, comme dans tous les corps, par le frottement. Mais ce qui présente surtout de l'intérêt, en raison de sa liaison avec le degré de symétrie, c'est le phénomène connu sous le nom de *pyroélectricité*. On appelle ainsi la propriété que possèdent certains cristaux de développer, aux deux extrémités, pendant qu'on les chauffe, des électricités contraires, dont la distribution devient exactement inverse pendant que les cristaux se refroidissent, et qui disparaissent quand la température est devenue constante. G. Rose a nommé pôles *analogues* ceux qui sont positifs par échauffement et pôles *antilogues* les autres.

Tous les cristaux qui offrent le phénomène de l'hémimorphisme, c'est-à-dire dans lesquels un même axe est terminé par des pointements dissemblables, sont pyroélectriques suivant cet axe. Tel est le cas de la tourmaline, de la calamine et de la topaze. Pour

cette dernière substance, la pyroélectricité ne se manifeste que sur les cristaux vraiment hémimorphes. Sur ceux où, sans doute par suite de macles, les deux extrémités de l'axe ne diffèrent pas, ces extrémités deviennent l'une et l'autre positives; en brisant un de ces cristaux suivant la base, qui est une face de clivage, celle-ci s'électrise négativement, tandis que le pointement est positif.

Du reste, la pyroélectricité, qui témoigne d'une polarité électrique et par conséquent d'une dyssymétrie des molécules suivant certaines directions, doit se produire suivant toutes les lignes cristallographiques où cette dyssymétrie est mise en évidence par la différence des facettes.

Ainsi les expériences de M. Friedel ont montré que le quartz peut développer une pyroélectricité en rapport avec l'hémiedrie qui le caractérise. Les diagonales de base du prisme e^2 , aboutissant chacune à deux arêtes verticales, dont l'une porte les faces rhombes et plagiédres, tandis que l'autre en est dépourvue, sont des axes de pyroélectricité. Les arêtes latérales du prisme e^2 sont alternativement positives et négatives par échauffement, négatives et positives par refroidissement. Les arêtes positives par échauffement sont celles qui portent les faces rhombes et plagiédres; elles deviennent négatives par refroidissement. La même propriété s'observe dans les cristaux de blende suivant les axes ternaires, ce qui se comprend aisément, la blende étant tétraédrique.

Pour mettre la pyroélectricité du quartz en évidence, il ne faut pas prendre des cristaux naturels, auquel cas les trois axes d'hémimorphisme, c'est-à-dire les trois diagonales du prisme e^2 , se neutraliseraient réciproquement. Il faut tailler des baguettes parallèles à ces diagonales ou, mieux encore, des lames normales aux axes d'hémimorphisme.

Thermoélectricité. — Il est une autre propriété électrique que manifestent certains cristaux. On sait que quand deux morceaux de métaux différents, tels que l'antimoine et le bismuth, sont mis en contact et réunis, d'autre part, à l'aide d'un fil conducteur, si l'on chauffe le point de contact, il se développe un courant électrique. Cette propriété est connue sous le nom de *thermoélectricité*. Le courant se dirigeant, à partir du contact, de l'antimoine vers le bismuth, on dit que le premier métal est, au point de vue thermoélectrique, positif à l'égard du second. L'ob-

servation montre que l'antimoine est positif et le bismuth négatif pour tous les corps simples métalliques. Or la pyrite de fer FeS^2 se comporte de telle façon que certains cristaux sont positifs, même pour l'antimoine, et certains autres négatifs, même pour le bismuth. Il en résulte que deux cristaux de signe contraire, mis en contact et chauffés, développent un courant thermoélectrique plus intense que celui qui va de l'antimoine au bismuth. Très souvent, sur un même cristal, on trouve des parties positives et des parties négatives. M. Curie a constaté que les dodécaèdres pentagonaux de pyrite étaient positifs quand leurs faces portaient des stries parallèles aux arêtes cubiques, tandis qu'ils étaient négatifs si les stries étaient perpendiculaires à ces arêtes.

§ 2

GROUPEMENTS CRISTALLINS

Idee générale des groupements cristallins. — D'après la définition que nous avons donnée des corps cristallisés, chacun d'eux doit être formé de molécules identiques, orientées de la même manière et disposées sur les nœuds d'un assemblage parallélépipédique.

Mais cette identité absolue de composition et d'orientation, qui constitue ce qu'on pourrait appeler l'état de perfection des substances cristallines, n'est pas toujours réalisée. Tantôt l'observation et, en particulier, les expériences d'optique, montrent qu'un cristal, en apparence simple, est formé de parties différemment orientées, de telle sorte qu'une même plaque mince peut se diviser en *plages* distinctes, dont les phénomènes chromatiques font ressortir l'inégale orientation. Tantôt c'est la chimie qui reconnaît, dans une même espèce minérale cristallisée, une variabilité de composition telle, que, pour demeurer d'accord avec les données fondamentales de la science, il faut admettre que, dans le minerai, certaines substances peuvent se remplacer les unes les autres en *toutes proportions*.

Les groupements, soit de cristaux, soit de particules cristallines, loin d'être arbitraires, obéissent à des lois bien déterminées. Ce résultat ne doit pas étonner; car si l'on comprend que

toutes les parties d'un liquide en voie de cristallisation ne soient pas dans des conditions identiques, du moins on se rend compte que deux portions immédiatement voisines doivent exercer l'une sur l'autre une influence susceptible d'établir, entre les assemblages réticulaires, une certaine dépendance.

L'observation montre qu'il y a lieu de distinguer plusieurs sortes de groupements cristallins : 1° les groupements par accollement de deux ou plusieurs cristaux (*jumeaux* ou *zwillinge* des Allemands); 2° les groupements par pénétration ou *entre-croisement* de portions cristallines plus ou moins enchevêtrées; 3° les groupements *isomorphes*, où l'association se fait entre substances non identiques et comporte une substitution de molécule à molécule, ou tout au moins une juxtaposition de très petites particules de nature distincte.

Groupements par juxtaposition d'individus. — Les groupements par juxtaposition d'individus cristallins distincts se révèlent, au premier coup d'œil, par les *angles rentrants* auxquels donne lieu l'accolement. On leur a depuis longtemps appliqué la dénomination générique de *macles*.

Dans les macles, on remarque, le plus souvent, que deux individus s'accroissent suivant un plan, qui est une face commune à tous les deux et, de plus, ordinairement, une face de notation simple.

En outre, l'observation montre, en général, que la situation mutuelle de deux individus, se touchant par une face plane, peut être géométriquement définie, si l'on imagine que l'un d'eux, primitivement situé dans le prolongement exact de l'autre, ait exécuté une rotation de 180 degrés autour d'un certain axe. Une telle demi-rotation porte le nom d'*hémotropie* et se trouve complètement définie, si l'on indique à la fois la notation du *plan de jonction* et la direction de l'*axe d'hémotropie*.

Le plus souvent l'axe de rotation est normal à la face de jonction.

Macles des systèmes cubique, quadratique et rhomboédrique. — Les exemples d'hémotropies abondent dans la nature.

Dans le système cubique, les plus fréquentes sont celles qui s'accomplissent par rotation autour d'un axe ternaire, normal à a^1 . De ce nombre est la macle de deux octaèdres, réalisée dans les spinelles (fig. 155). L'octaèdre ayant été coupé par un plan

MNP, parallèle à ABC, c'est-à-dire à l'un de ses systèmes de faces, la rotation a eu lieu autour de l'axe ternaire normal à ABC, et comme un déplacement angulaire de 120 degrés procurerait simplement la substitution des sommets, il suffit, pour donner lieu à la macle, de faire tourner la partie mobile de 60 degrés, ce qui amène A en A', B en B', C en C'. De cette manière, les triangles, tels que AMN, isolés par la section, viennent faire face, par des angles rentrants, aux triangles immobiles tels que SNP, tandis que les éléments trapézoïdaux, comme MNA'B', se juxtaposent suivant l'arête de rupture MN en faisant naître des angles saillants.

Fig. 155.

Les hémitropies normales du système quadratique se font avec une face de jonction parallèle à une proto- ou deutéro-pyramide.

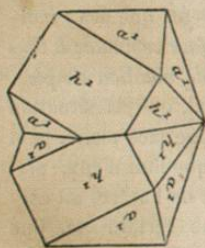


Fig. 156.

La figure 156 représente deux individus de cassitérite ou étain oxydé, maclés suivant une face parallèle à b^1 . La rencontre des pyramides a^1 , sur la gauche du dessin, donne lieu à un angle rentrant particulier, formé de quatre facettes triangulaires, qui porte le nom de *bec d'étain* et qu'on appelle quelquefois aussi macle *en visière*, à cause de son analogie avec la visière d'un casque.

Les macles rhomboédriques les plus habituelles, avec axe d'hémitropie normal, se font autour de l'axe ternaire; dès lors, une rotation de 60 degrés est suffisante. Appliquée au scalénoèdre (fig. 157), cette hémitropie fait naître un isocéloèdre, avec trois *becs* ou angles rentrants, c'est-à-dire un solide pourvu d'un plan de symétrie normal à l'axe ternaire, qui ferait défaut au scalénoèdre, sans la macle.

Dans le système rhombique, une macle très connue est celle de l'aragonite, où le plan de jonction est l'une des faces du protoprisme. Concevons (fig. 158) la section droite d'un cristal

allongé suivant g^1 et couronné par un brachydôme e^1 . Soit AB le plan de jonction, parallèle à l'une des faces m . Après la rotation, les deux individus forment, suivant l'arête projetée en A, un angle rentrant (fig. 159). Assez souvent cette macle se répète

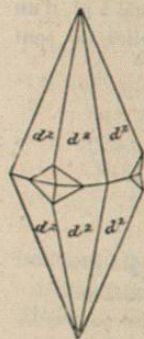


Fig. 157.

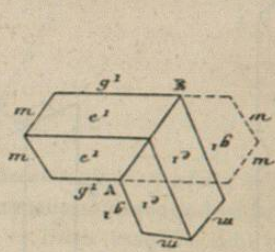


Fig. 158.

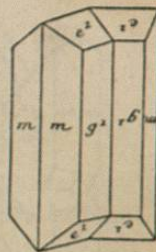


Fig. 159.

plusieurs fois, soit en sens alternatifs, en donnant lieu à une sorte d'escalier, soit dans le même sens, en faisant naître une espèce de polyèdre annulaire, où tous les angles rentrants sont tournés du même côté.

Macles des systèmes monoclinique et triclinique. — Comme exemple d'hémitropie du système monoclinique, nous ci-

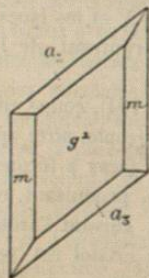


Fig. 160.

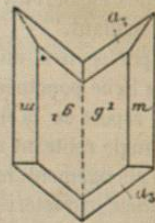


Fig. 161.

terons le gypse. Un cristal simple (fig. 160), offrant les faces m , g^1 et a_3 , est coupé en deux parties par un plan parallèle à h^1 . L'une des moitiés du cristal tourne de 180° autour de la normale à h^1 et vient se placer en regard de la précédente (fig. 161).

Parfois même la macle se double (fig. 162), chacune des moitiés se prolongeant à travers l'autre.

Des hémitropies très caractéristiques s'observent dans les feldspaths tricliniques. La plus commune est la *macle dite de l'albite*.

Représentons (fig. 163) la coupe, par un plan normal à g^1 , d'un cristal triclinique réduit aux faces p et g^1 , lesquelles ne sont

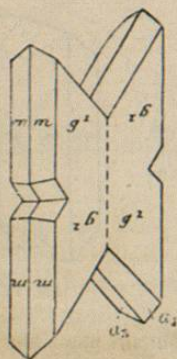


Fig. 162.

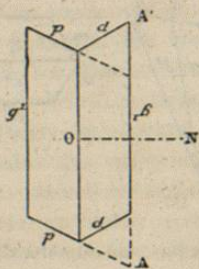


Fig. 163.

pas perpendiculaires l'une à l'autre. Coupons ce cristal, en son milieu, par un plan parallèle à g^1 et faisons tourner la moitié de droite de 180° autour de la ligne ON, normale à ce plan. Après la rotation, l'angle aigu A se sera transporté en A' et les faces p des deux moitiés formeront, d'un côté un angle rentrant, de l'autre un angle saillant.

Vu en perspective, un cristal d'albite (fig. 164), coupé en deux suivant la ligne ponctuée et soumis à l'hémitropie, offre après la rotation l'aspect de la figure 165. Les deux faces p forment en haut un angle rentrant d'environ 175° degrés, produisant, en raison de l'allongement habituel des cristaux suivant l'arête pg^1 , une *gouttière* caractéristique. D'un côté le cristal est terminé par deux faces m , tandis que, du côté opposé, il y a deux faces t en contact.

Très souvent la macle par hémitropie des feldspaths tricliniques s'opère entre individus extrêmement minces et se répète un grand nombre de fois. La juxtaposition de ces lamelles hémitropes fait naître, sur les faces p , des stries ou cannelures correspondant

aux angles alternativement saillants et rentrants, et ces stries

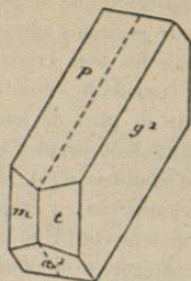


Fig. 164.

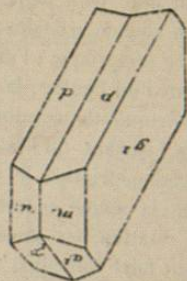


Fig. 165.

sont tout à fait caractéristiques des faces de clivage des feldspaths.

L'orientation cristallographique de deux lamelles contiguës étant différente, mais les lames ayant, de deux en deux, la même orientation, une plaque mince de feldspath hémitrope, examinée en lumière parallèle, se colore de deux teintes alternatives (fig. 166); les lamelles impaires s'éteignent toutes en même temps, pour une position donnée de la plaque relativement aux nicols croisés. Il en est de même des lamelles paires, et les directions d'extinction des deux séries, marquées sur la figure par des flèches, font des angles égaux avec la trace du plan de jonction.

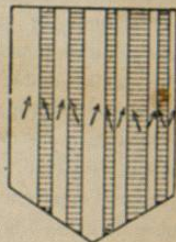


Fig. 166.

Toutes les macles qui viennent d'être énumérées sont des hémitropies normales; mais il y en a d'autres où la demi-rotation s'est accomplie autour d'un axe *situé dans le plan de jonction*. Telle est, par exemple, la macle de deux tétraèdres modifiés de cuivre gris (fig. 167). Les cristaux sont accolés suivant une face a^2 et l'un d'eux paraît avoir tourné, relativement à l'autre, de 180° autour d'un axe ternaire, contenu dans ce plan.

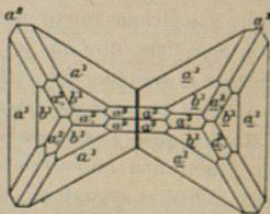


Fig. 167.

Explication des macles. — M. Mallard a donné une théorie,

très satisfaisante et très complète, des macles par accolement. Il a fait voir que, pour deux parties juxtaposées d'une même substance en voie de cristallisation, il y a deux positions admissibles d'équilibre réciproque : l'une, pour laquelle les deux cristaux se prolongent l'un l'autre ; la seconde, pour laquelle le second cristal est symétrique du premier relativement au plan de jonction. D'ailleurs, suivant qu'il s'agit de cristaux holoédriques ou de cristaux hémédriques, le second mode d'équilibre n'est pas satisfait de la même manière. Dans quelques cas, il exige une certaine rotation des molécules autour de leur centre de gravité et on peut faire voir ainsi qu'il y a trois catégories de macles : la première, qui s'exprime géométriquement par une *hémotropie normale* ; la seconde, pour laquelle il y a encore *hémotropie*, c'est-à-dire rotation de 180 degrés, mais autour d'un axe *parallèle* au plan de jonction ; enfin la troisième, où la rotation qui rend compte de l'accolement ne peut plus être de 180 degrés.

Pour nous, ce qu'il importe surtout de mettre en évidence, c'est ce qu'on pourrait appeler la *raison philosophique* des macles, telle qu'elle semble résulter de l'observation. En effet, on remarquera que la plupart des macles ont pour effet de donner, à l'assemblage des deux cristaux, une symétrie supérieure à celle de leur système. Ainsi le scalénoèdre de la calcite (fig. 157) acquiert l'apparence d'un isocéloèdre. De même, les cristaux accolés de gypse (fig. 161) ont conquis, par leur juxtaposition, un plan de symétrie d'ensemble, qui est h^1 et, quand la macle se double (fig. 162), on peut dire que le cristal complexe est en possession de trois plans de symétrie, savoir h^1 , g^1 , et le plan normal aux arêtes prismatiques. Enfin le fait est frappant pour les cristaux tricliniques, où la macle de l'albite (fig. 165) produit un édifice symétrique relativement au plan de jonction g^1 .

On peut donc dire que les macles par juxtaposition mettent en évidence la *tendance des cristaux vers la réalisation d'une symétrie plus élevée que celle qui appartient à leur système réticulaire*.

Macles par entre-croisement. — Dans les groupements par pénétration ou entre-croisement, la surface qui sépare les deux individus cristallins, d'orientation différente, cesse d'être plane. A ce mode de groupement appartiennent : la *macle de la croix de fer* (fig. 168) des cristaux de pyrite ; la macle en croix de deux tétraèdres (fig. 169), soit de cuivre gris, soit de diamant ;

la *macle cruciforme* ou *croisette* (fig. 170) de la staurotide, etc.

Ces divers exemples mettent bien sur la voie de l'explication qui convient à ce mode de groupement. Dans la figure 168, les

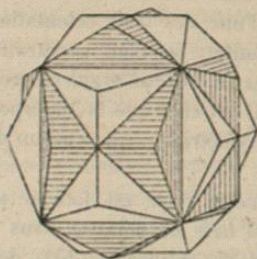


Fig. 168.

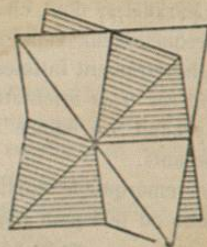


Fig. 169.

deux orientations qui conviennent au dodécaèdre pentagonal, suivant qu'il dérive de la demi-forme directe ou de la demi-forme inverse, sont simultanément réalisées, en sorte que la partie commune aux deux cristaux, croisés à angle droit, est le tétraèdre complet. De même, dans la figure 168, deux tétraèdres croisés à 90° reproduisent, par leur partie commune, l'octaèdre complet. Enfin, dans la staurotide (fig. 70), s'il ne paraît pas y avoir acquisition d'un degré supérieur de symétrie, il y a du moins formation d'une figure plus satisfaisante à ce point de vue.

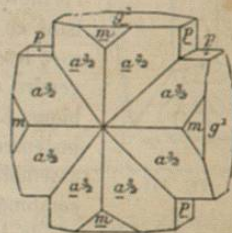


Fig. 170.

Cristaux à symétrie-limite. — M. Mallard a montré que tous les groupements par pénétration étaient formés, soit par des cristaux hémédriques qui combinent les deux orientations admissibles, soit par des cristaux à *symétrie-limite*, c'est-à-dire très voisins, par leurs paramètres, d'un degré de symétrie supérieur à celui de leur système.

Supposons un cristal rhombique dans lequel l'angle mm soit très voisin de 120°. En conservant à l'axe vertical sa direction, on pourra donner au système réticulaire trois positions, dans lesquelles l'un des axes horizontaux tournera successivement de

120°. Tandis que, dans le cas d'une symétrie hexagonale parfaite, les trois positions du réseau seraient identiques, ici elles seront simplement très peu différentes les unes des autres. Il pourra donc y avoir, ou bien accollement de trois cristaux à axes verticaux parallèles, dont chacun aura l'une des trois orientations (cas fréquemment réalisé dans l'aragonite), ou bien pénétration et enchevêtrement intimes de *portions de cristaux* ayant respectivement ces trois orientations, dont il est clair que la superposition produit un édifice total plus symétrique que chacun des composants.

Une remarquable application de cette règle est fournie par l'orthose ou feldspath monoclinique à base de potasse. Dans ce

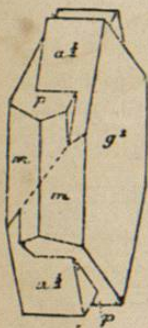


Fig. 171.

qu'on appelle la *macle de Carlsbad* (fig. 171), deux cristaux, ayant leurs plans de symétrie parallèles, tournent leurs bases en sens inverse, comme si l'un d'eux, d'abord orienté comme l'autre, avait tourné de 180° autour de l'arête prismatique *mm*. Or M. Mallard a montré que le réseau plan de l'orthose, dans le plan *g¹*, est presque rhombique. Dans ce cas, la combinaison de l'orthodiagonale avec les deux axes quasi-binaires du plan *g¹* engendre un assemblage à symétrie-limite rhombique. En tournant autour de l'arête *mm*, qui est justement l'un des deux axes quasi-binaires, cet assemblage prend une seconde position qui, combinée avec la première, fait naître un édi-

fice moins éloigné de la symétrie rhombique parfaite.

De la même façon, M. Mallard a montré que la macle de la staurotide résultait de ce que l'assemblage de la substance est pseudo-cubique, de telle sorte que l'axe horizontal, autour duquel a lieu la rotation, est *pseudo-quaternaire*.

§ 5

ISOMORPHISME. POLYMORPHISME

Notion de l'isomorphisme. — Le fait que des portions diversement orientées ou des molécules de formes non identiques

peuvent coexister dans un cristal, sans troubler sa forme extérieure, prouve que, dans la construction des édifices cristallins, l'*identité absolue* des matériaux n'est pas une condition rigoureuse. Cette tolérance, si l'on peut s'exprimer ainsi, s'étend, jusqu'à un certain point, à la nature chimique des molécules. C'est ce que prouvent les phénomènes habituellement rangés sous la désignation d'*isomorphisme*.

Mitscherlich a appelé de ce nom la propriété en vertu de laquelle des substances, de *composition chimique semblable et de même forme cristalline*, peuvent cristalliser ensemble en *toutes proportions*. De là résultent des *mélanges isomorphes*.

La quasi-identité de forme des corps chimiquement analogues est mise en évidence par de nombreux faits.

Ainsi il existe une série de carbonates, répondant à la formule RCO_3 , qui tous cristallisent en prismes rhombiques, d'angles presque identiques et possédant à peu près les mêmes clivages. Le tableau suivant les fait connaître :

ESPÈCES.	COMPOSITION.	ANGLE <i>mm</i> .
Aragonite.....	Ca CO ₃ .	116° 10'
Strontianite.....	Sr CO ₃ .	117° 19'
Cérusite.....	Pb CO ₃ .	117° 14'
Withérite.....	Ba CO ₃ .	117° 48'

Une série encore plus riche est celle des carbonates rhomboédriques. Ils ont la même formule chimique générale que les précédents, mais cristallisent en rhomboédres, dont les angles sont compris entre 105° et 108°. Ce sont :

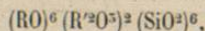
ESPÈCES.	COMPOSITION.	ANGLE <i>pp</i> .
Calcite.....	Ca CO ₃ .	105° 5'
Dolomie.....	Ca Mg CO ₃ .	106° 15'
Dialogite.....	Mn CO ₃ .	106° 51'
Sidérose.....	Fe CO ₃ .	107°
Giobertite.....	Mg CO ₃ .	107° 20'
Smithsonite.....	Zn CO ₃ .	107° 40'

De même, la série des *spinelles*, de formule générale RR^2O_4 , est remarquable par sa cristallisation en octaèdres. Cette série comprend le spinelle proprement dit $MgAl^2O_4$, la chromite $FeCr^2O_4$, la magnétite ou fer oxydulé $FeFe^2O_4$, etc.

Mélanges isomorphes. — Le choix du mode de cristallisation d'un corps étant déterminé par la forme et la symétrie de sa molécule, on conçoit que deux corps de même forme puissent se remplacer mutuellement en toutes proportions et donner des *mélanges isomorphes*.

Par exemple, en mélangeant des dissolutions des trois sulfates de magnésie, de manganèse et de zinc, on obtient des cristaux complexes où ces trois éléments peuvent figurer dans des rapports très variables. Les carbonates rhomboédriques s'unissent en toutes proportions, donnant naissance à des calcites ou dolomies *ferrifères*, dites aussi *spaths brunissants*. L'angle des rhomboèdres résultants, toujours compris entre 105 et 107 degrés, est d'autant plus voisin de ce dernier nombre que la quantité de fer est plus considérable.

Enfin les grenats sont des silicates dont la formule générale est toujours



mais où R peut être représenté aussi bien par Ca que par Fe ou Mn, tandis que R' admet la substitution de Fe à Al ou à Cr.

Néanmoins, si les mélanges isomorphes semblent théoriquement possibles, en toutes proportions, entre corps de formes extrêmement voisines, en pratique, il y a généralement certaines combinaisons plus stables et, par suite, plus souvent réalisées que d'autres.

En tout cas, ce qui caractérise essentiellement les mélanges isomorphes, par opposition aux combinaisons proprement dites, c'est que leurs propriétés physiques sont assez exactement représentées par une sorte de moyenne arithmétique des propriétés de chacun des éléments (en tenant compte, bien entendu, de leurs proportions relatives).

Ajoutons que la notion de l'isomorphisme est en réalité plus complexe et que la faculté de cristalliser ensemble peut appartenir à des corps qui, au premier aspect, semblent très différents par leurs formes. Mais dans ce cas, comme l'a montré M. Mallard,

il s'agit de *formes-limites* et, par une modification convenable des éléments cristallographiques, on arrive à faire rentrer, dans la même catégorie, ces cristaux susceptibles de se mélanger en toutes proportions.

Polymorphisme. — L'isomorphisme a une contre-partie : c'est le *dimorphisme* ou *polymorphisme*. On appelle ainsi la propriété que possèdent certains corps, chimiquement bien définis, d'offrir plusieurs formes cristallines incompatibles entre elles ; soit qu'elles appartiennent à des systèmes différents ; soit que, présentant le même genre de symétrie, elles impliquent des rapports paramétriques qui ne peuvent pas être ramenés les uns aux autres. Ainsi le soufre naturel est rhombique, tandis que celui qu'on obtient par fusion est clinorhombique. Le bisulfure de fer, FeS^2 , est cubique dans la pyrite jaune, et rhombique dans la marcasite ou pyrite blanche. L'oxyde de titane, TiO^2 , cristallise sous trois formes, dont une, la brookite, est rhombique, tandis que les deux autres, c'est-à-dire le rutile et l'anatase, sont quadratiques, mais avec des paramètres irréductibles.

Il résulte des travaux de M. Mallard que les apparences polymorphes sont généralement produites par des combinaisons inégales entre portions, diversement orientées, de cristaux à symétrie-limite. Ainsi une substance rhombique, dont les éléments cristallographiques ne diffèrent pas beaucoup de ce qui conviendrait à la symétrie cubique, pourra offrir : 1° des individus uniquement rhombiques, formés par une seule orientation cristalline ; 2° des individus produits par le groupement, plus ou moins enchevêtré, des six orientations que peut prendre le réseau pseudo-cubique ; 3° d'autres, où ces diverses orientations seront mélangées d'une manière assez intime pour que l'ensemble offre extérieurement des formes cubiques parfaites. La coexistence des formes du premier et du troisième type, qui sont incompatibles entre elles, constituera le dimorphisme.

§ 4

CRISTALLOGÉNIE

Inclusions cristallines. — L'examen des cristaux, surtout à l'aide du microscope, révèle dans leur structure des particula-

rités diverses, propres à mettre sur la voie de leur mode de formation. La plus importante est la présence d'*inclusions*, qui peuvent être gazeuses, vitreuses, liquides ou solides.

Les gaz des inclusions consistent généralement en azote, avec traces d'oxygène et d'acide carbonique; parfois on observe de l'hydrogène et des hydrocarbures. Les inclusions vitreuses sont des restes de matière amorphe. Il est des cas où elles sont limitées par un espace polyédrique, véritable cristal *négalif* ou en creux de la substance enveloppante. Mais le plus souvent leur forme est arrondie.

Telle est aussi la figure habituelle des inclusions liquides, consistant généralement en eau pure ou en dissolutions salines aqueuses. La plupart contiennent une *libelle*, ou bulle mobile, dont le volume varie avec la température. Quelques-unes renferment des cristaux, susceptibles de se dissoudre par échauffement,

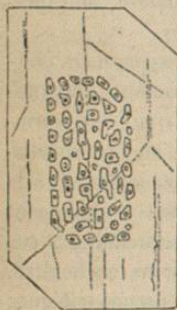


Fig. 172.

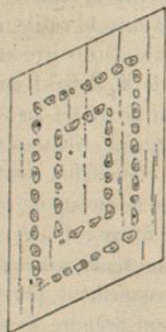


Fig. 175.

et de se reformer ensuite par refroidissement. C'est par les inclusions liquides du quartz et par leurs cristaux qu'on a pu se faire une idée de la température et de la pression sous lesquelles ce minéral a dû cristalliser.

Les inclusions solides sont des cristaux microscopiques, ou *micro-lithes*, souvent alignés

ou disposés en zones (fig. 172, 175), qui marquent des étapes successives dans la formation du cristal.

Particularités diverses. — Beaucoup de cristaux se sont développés, de préférence, soit à la surface, soit suivant certaines directions privilégiées (cristaux-enveloppes, cristaux squelettes). Le reste est rempli par la gangue même du minéral ou par diverses substances étrangères.

En tout cas, il y a une tendance marquée à l'orientation identique des éléments contigus, même quand la cristallisation s'est opérée en périodes successives. Les parties déjà consolidées

agissent par influence sur l'orientation cristallographique de celles qui, plus tard, viennent s'y adjoindre. Parfois même cette influence s'étend d'une espèce minérale à une autre, qui vient s'appliquer à la surface de la première.

Souvent un très grand nombre de facettes parallèles à une même direction se succèdent en bandes très minces sur un cristal, en faisant naître des faces courbes.

Expériences de cristallisation. — La cristallisation se fait de trois manières : 1° par sublimation; 2° par refroidissement lent après fusion ignée; 3° par dépôt tranquille dans une liqueur saturée.

De nombreuses expériences ont été entreprises dans le but de reproduire artificiellement des minéraux cristallisés. On fait ordinairement intervenir, soit des dissolvants, acides fluorhydrique, borique, titanique, etc., soit des vapeurs d'eau, de chlorures, de fluorures, etc., capables de réagir les uns sur les autres à haute température. Les cristaux qu'on obtient sont en général très petits; mais on en peut augmenter le volume en prolongeant les réactions.

La pression et la température jouent souvent un grand rôle dans ces expériences; mais leur intervention n'est pas toujours nécessaire, comme le prouvent les observations recueillies dans les stations thermales. Là, des silicates cristallisés se sont produits, avec le temps, au milieu d'anciens travaux datant des Romains, par la simple circulation d'eaux très peu chargées de principes actifs, sortant à la pression ordinaire, avec une température bien inférieure à celle de l'ébullition.

Dans les dissolutions saturées (ce qui suppose des espèces facilement solubles), on peut suivre les progrès de la cristallisation et en noter les diverses particularités. L'évaporation doit être très lente; mais on peut *nourrir* les cristaux en les transportant, une fois formés, dans une autre dissolution saturée de la même substance ou d'une substance isomorphe. Pour obtenir des cristaux complets, il faut qu'ils nagent au sein du liquide, suspendus par un fil très fin ou tenus en équilibre par l'introduction d'une matière gélatineuse, comme la colle.

Si l'on brise un cristal déjà formé et qu'on le reporte dans une dissolution saturée de la même substance, on constate que ses blessures se réparent avec une grande rapidité et ce n'est que

quand la cicatrisation est achevée que l'accroissement du cristal reprend son cours régulier. La température influe beaucoup sur le choix de la forme cristalline. L'alun, octaédrique dans les circonstances ordinaires, donne, en vases clos et au-dessus de cent degrés, des rhombododécaèdres ou des trapézoèdres.

Figures de corrosion. — Lorsque des cristaux ne sont pas suffisamment riches en facettes pour qu'on puisse apprécier pleinement le genre de leur symétrie, on parvient à mettre ce dernier en évidence à l'aide des *figures de corrosion*. Ce sont des impressions polyédriques que font naître, sur la face à étudier, des vapeurs ou des liquides capables de l'attaquer. La figure 174 montre la forme des cavités de corrosion qu'engendre, sur un cristal de quartz dextrogyre, l'action de l'acide fluorhydrique. On voit de suite, par la direction du grand axe des cavités, la différence qui s'établit entre les faces contiguës p et $e\frac{1}{2}$ du birhomboèdre.

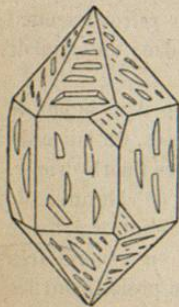


Fig. 174.

Les figures de corrosion ont souvent permis de reconnaître la nature hémihédrique d'un corps sur des formes qui, par leur espèce, n'étaient pas susceptibles de la mettre en évidence.

Pseudomorphoses, moulages. — On donne le nom de *pseudomorphoses* à de fausses apparences, par suite desquelles une substance revêt les formes cristallines d'une autre.

Il y a des pseudomorphoses de *moulage*, quand un corps cristallise par-dessus des cristaux déjà formés, ou dans le vide laissé par leur disparition. Ce sont les *pléomorphoses* de Kenngott.

Les véritables pseudomorphoses résultent d'une décomposition chimique, généralement lente et opérée par voie humide, qui a donné lieu à une substitution moléculaire. Ainsi les cristaux de fer carbonaté se transforment, sans perdre leur figure rhomboédrique, en limonite et la serpentine se substitue progressivement aux cristaux de péridot, etc.

LIVRE DEUXIÈME

DESCRIPTION DES ESPÈCES MINÉRALES

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESPÈCES MINÉRALES

§ 1

COMPOSITION ET NOTATION DES ESPÈCES

Corps simples. Leur définition. — Les espèces minérales sont formées par l'association, en proportions définies, de *corps simples*, c'est-à-dire d'éléments qui ont résisté jusqu'ici à toute tentative faite pour les décomposer. Dans l'état actuel de la science, le nombre de ces éléments ne paraît pas dépasser 70. Encore beaucoup d'entre eux sont-ils spéciaux à une catégorie très restreinte de minéraux, de telle sorte qu'un petit nombre d'éléments suffit à produire la grande diversité des espèces naturelles.

Chaque élément se caractérise par ses propriétés physiques à l'état isolé, par ses affinités chimiques, mais surtout par son *poinds atomique*. Le tableau suivant fait connaître simultanément les *symboles chimiques* des corps simples et la valeur des *poinds atomiques* correspondants.