HAL
open science

Les cristaux liquides

O. Lehmann

▶ **To cite this version:**

O. Lehmann. Les cristaux liquides. J. Phys. Theor. Appl., 1909, 8 (1), pp.713-735. 10.1051/jphystap:019090080071300 . jpa-00241492

HAL Id: jpa-00241492

https://hal.science/jpa-00241492

Submitted on 4 Feb 2008

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

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

LES CRISTAUX LIQUIDES (1);

Par M. O. LEHMANN.

Qu'est-ce qu'un cristal? — Le mot « cristal » vient d'un mot grec, qui désigne la glace. Mais on a reconnu, depuis longtemps, qu'une foule de corps, comme la glace, possèdent cette même propriété de se solidifier en prenant des formes géométriques, et l'on a donné à tous ces corps solides le nom de « cristaux ».

Ces cristaux solides polyédriques, quand on les fait s'accroître, se développent toujours d'une manière anisotrope, ils s'accroissent inégalement dans les différentes directions, et toujours avec des faces planes, jamais avec des faces concaves ou convexes. Si même on taillait un de ces cristaux en forme de sphère et si on le faisait se développer dans une solution saturée, il s'y accroîtrait en forme de solide polyédrique à faces planes.

Mais cette anisotropie se révèle aussi dans d'autres phénomènes, et souvent par des propriétés optiques, le dichroïsme par exemple, comme on peut le voir, quand on tourne un cristal dans un microscope polarisant. Si l'on étudie une lame cristalline entre les nicols croisés, on la voit s'éteindre quatre fois pour une rotation complète (360°) dans le champ du microscope, à cause de la biréfringence.

Parce que le changement de la couleur ou de l'éclaircissement s'accomplit dans la masse tout entière, une telle expérience est de celles qui tendraient à nous faire penser que le corps cristallisé est nécessairement homogène, chaque point étant absolument semblable aux autres à tous les points de vue, et en particulier, que deux directions parallèles issues de deux points différents devraient jouir exactement de propriétés absolument identiques.

En effet, la définition classique du cristal est la suivante : « Un cristal est un corps solide homogène anisotrope ».

Naturellement, la définition suppose que le cristal n'est pas soumis

(1) Conférence faite à la Société française de Physique, le 16 avril 1909.

Cette conférence était illustrée par 114 projections, dont une cinématographique; on avait aussi exposé 64 photographies (19 × 28) et 124 positifs sur verre (13 × 13) fixant les résultats décrits. Les expériences elles-mêmes ont été répétées, par un grand nombre des membres de la Société, aux séances de manipulations faites à la Sorbonne après la conférence.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:019090080071300

à l'influence d'une force persistante, comme par exemple une feuille de mica courbée en cylindre.

Un cristal mou, courbé d'une façon durable sans l'action d'une force permanente, par exemple en forme d'anneau (*fig.* 1), est une impossibilité, car une telle formation ne pourrait s'accroître avec des faces planes, elle ne serait pas homogène relativement au dichroïsme et à la position des directions d'extinction, ainsi que relativement aux autres propriétés, en un mot, elle ne serait pas un cristal selon la définition donnée plus haut.

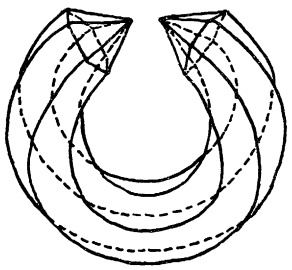

Fig. 1.

Oui, l'expérience, sur laquelle est basée la définition, est peut-être incomplète ; mais la théorie conduit au même résultat.

En effet tout polyèdre à face plane ne peut pas apparaître sous la forme d'un cristal, mais seulement les polyèdres, pouvant résulter de l'agrégation des molécules formant un réseau ou un système régulier de points.

L'idée qu'un cristal doive, en réalité, être considéré comme une agrégation de molécules produites par l'action d'une force, qui n'est pas seulement attractive, mais aussi orientante, est aussi prouvée par les phénomènes de l'élasticité.

Elle est en outre appuyée par l'anisotropie optique, car un corps amorphe isotrope (le verre par exemple) devient par pression ou traction d'autant plus optiquement anisotrope que les distances des molécules diminuent ou augmentent dans la direction de la force agissante, et exactement de la même manière la position des directions d'extinction des cristaux et leur dichroïsme sont en relation étroite avec la forme du réseau moléculaire, c'est-à-dire avec le système cristallin. La modification du réseau par déformation plas-

tique produirait, croyait-on, par conséquent, un changement du système cristallin et de toutes les propriétés de place en place ou enfin une destruction complète de l'arrangement moléculaire, la transformation en un corps amorphe.

En général les cristaux sont fragiles. Le fait que le fer, par exemple, peut être forgé, était expliqué par la rupture de ces cristaux produisant des parties extrêmement petites, restant liées entre elles par la cohésion. De cette manière le fer peut couler sous une forte pression.

Mais jusque-là on ne peut pas parler de « cristaux fluides » ; de même qu'une montre, qui coule sous la pression d'un lourd laminoir en une sorte de lame, ne peut pas être désignée comme « une montre fluide », parce que la lame n'est plus une montre.

On voit que l'existence des cristaux courbés ou liquides est aussi en contradiction avec la théorie ordinaire de l'édifice cristallin.

Mais comment s'explique-t-on les formes arrondies des étoiles de neige et des fleurs de glace déposées sur les vitres?

Vogelsang, qui en 1864 fit des observations avec de petits cristaux semblables existant dans les laves et les scories des hauts fourneaux, croyait, en se basant sur ses expériences sur la cristallisation du soufre, pouvoir faire rentrer ces « cristallites » dans la définition théorique par la supposition qu'ils étaient des agrégats de « globulites », des cristaux embryonnaires très petits, qui, s'attirant par une sorte de force magnétique, formeraient un édifice cristallin, comme des molécules, mais incomplètement régulier, parce que leur réseau et par conséquent l'anisotropie de leur force attractive ne se produirait que peu à peu à cause du frottement interne, de la même manière que la cristallisation du fer devenu amorphe par le forgeage.

Moi-même, je me suis occupé de ces questions depuis de longues années, quand j'ai commencé (1872) à étudier les analogies que présente la croissance des êtres vivants avec le développement des cristaux.

Le matériel, dont je me suis servi dans ces études, est relativement simple. C'est un microscope que l'on a disposé de façon à pouvoir chauffer ou refroidir les préparations pour les faire fondre ou cristalliser, de manière aussi qu'on puisse les maintenir à température constante, ou même que l'on puisse maintenir une différence de température entre deux points de la préparation, dans le champ du microscope.

Les figures montrent des formes anciennes différentes de ce « microscope de cristallisation », qui sont actuellement exposées à Dresde ; la dernière représente un appareil microphotographique [1].

De nouveaux instruments sont exposés ici, par exemple un microscope très simplifié de la maison *Voigt* et *Hochgesang* à Göttingen et un autre tout à fait complet et arrangé pour les projections, de la maison *Zeiss* à Iéna.

Avec ces instruments, je trouvai que les globulites de Vogelsang ne sont que des gouttes liquides, qui n'affectent point du tout une structure cristalline et qui ne s'attirent point à distance.

Les cristaux-squelettes se présentaient plutôt en réalité comme des difformités, causées par les courants de diffusion et de conductibilité calorifique plus forts aux sommets et aux arêtes du cristal que sur les autres parties.

Quant aux formes courbées, je croyais, en effet, au début de mes recherches, devoir les considérer comme des agrégats, naissant par l'épaississement d'un cristal capillaire, élastiquement courbé par l'action persistante de la tension superficielle, plus grande aux sommets et aux arêtes que sur les faces.

Toute autre explication semblait être exclue en partant de la définition d'un cristal et de la théorie du polymorphisme.

Le fait, par exemple, qu'un cristal jaune d'iodure de mercure devient rouge par pression, était expliqué à cette époque par le changement brusque du réseau. En échauffant le cristal rouge, il devait naître une tension interne, qui, à une température limite définie, reproduisait la structure antérieure du réseau en triomphant du frottement intérieur (limite d'élasticité).

Mais par des observations au moyen du microscope de cristallisation je trouvai, premièrement dans le nitrate d'ammonium, qu'il existe une « température de transformation », à laquelle les deux modifications, même en contact, sont en équilibre et que chaque changement de température dans le champ du microscope causait aussitôt un déplacement de la limite des deux modifications (*fig.* 2) dans l'un ou l'autre sens, tantôt rapide, tantôt lent.

Il n'y avait donc pas d'empêchement à la modification moléculaire produite par un frottement intérieur; autrement il eût fallu, en outre,

---

(1) Voir : O. Lehmann, *Molecularphysik*, Leipzig. W. Engelmann, 1, 119, 1888, et J. Frick (O. Lehmann), *Physikalische Technik*, Braunschweig, Vieweg und Sohn, 7e éd., I (1), 615, 1904, et II (2), 1194, 1909.

que chaque transformation fût associée à un dégagement de chaleur, tandis qu'en réalité, comme dans le cas de la dissociation, la chaleur se dégage quand la température décroît et devient latente quand la température monte.

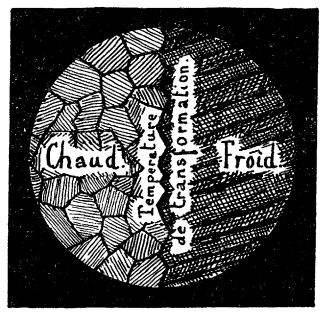

Fig. 2.

Il ne restait qu'à admettre que dans la transformation polymorphique les molécules se changent elles-mêmes, quoiqu'il ne soit pas possible par des déterminations du poids moléculaire et de la structure chimique de constater avec précision ce changement, ainsi que dans les combinaisons dites « moléculaires ».

La modification du réseau n'est, comme on voit, qu'une conséquence du changement de la nature des molécules.

Cette nature différente ressort aussi de ce que deux modifications polymorphes peuvent se séparer de la même solution en même temps, naturellement l'une faisant disparaître l'autre à cause de la solubilité moindre de la première, si la température n'est pas la température de transformation. Les recherches sur la formation des squelettes cristallins avaient montré que la séparation d'un cristal suppose la solubilité de celui-ci ; dans le cas en question, en effet, il serait absurde d'admettre une solution simultanée de deux modifications, si les molécules étaient identiques.

Le résultat de mes expériences fut que : une seule sorte de molécules ne peut se disposer que sur un seul réseau et la répartition de celles-ci sur un autre est impossible.

La destruction complète du réseau, c'est-à-dire le passage à l'état amorphe, ne peut même avoir lieu ; car je trouvai que l'amorphie ne peut pas être produite artificiellement par forgeage, comme on le

croyait autrefois; le chlorure d'ammonium, écrasé sous le marteau, par exemple, est toujours un agrégat de fragments cristallins, dont les propriétés, surtout la faculté de se développer, ne sont pas changées.

Le réseau cristallin n'est donc pas facilement destructible.

Au cours de ces études, je reconnus avec certitude qu'il y a des cristaux, comme le nitrate d'ammonium, qui sont incontestablement plastiques, qui peuvent subsister, bien que leurs diverses parties soient orientées différemment.

Il n'est donc pas permis de considérer l'homogénéité physique comme une condition essentielle de l'existence du cristal.

Mais si la destruction complète du réseau est impossible, qu'est-ce alors que les corps amorphes?

La relation entre la plasticité des cinq modifications du nitrate d'ammonium, que j'ai trouvées et la température posait la question : « Le corps fondu n'est-il pas, à ce point de vue également, une modification polymorphe; ses molécules aussi ne sont-elles pas différentes de celles des états solides? »

En effet, l'accroissement des cristaux de glace dans de l'eau, qui gèle, fait admettre la solution de la glace dans l'eau, qui n'est pas possible, si les molécules sont identiques.

L'eau surfondue doit par suite être considérée comme une solution sursaturée de glace et s'il était possible de continuer la surfusion jusqu'à l'apparition d'une limite d'élasticité, comme dans le verre et d'autres corps qui se solidifient sous l'état amorphe, le corps surfondu serait aussi un mélange des molécules d'eau et de glace.

Les substances amorphes sont, comme on voit, toujours des mélanges de deux ou plusieurs sortes de molécules. Pour cette cause, ils n'ont ni un point de fusion déterminé, ni la faculté de croître; ils ne sont pas des « phases » comme les cristaux.

Les phases sont en général des mélanges; mais le chimiste purifie les corps par cristallisations fractionnées. Faut-il dire qu'un cristal est une phase chimiquement pure, c'est-à-dire qu'un réseau ne peut être formé que de molécules identiques?

Aussi longtemps qu'on a cru que le réseau des molécules est une formation très altérable, on était naturellement contraint d'admettre que des molécules étrangères ne pouvaient point du tout s'interposer sans produire un écroulement du tout.

Le fait que les corps isomorphes forment en réalité des cristaux mixtes était expliqué par l'introduction des molécules étrangères

dans des particules cristallines, assemblages d'un grand nombre de molécules, de sorte que toutes les particules du réseau conservaient la même structure.

Que, par exemple, les cristaux d'alun puissent être composés, d'une part, d'alun potassique, de l'autre, d'alun de chrome avec des mélanges en toute proportion sans changement du réseau et de la forme cristalline d'une extrémité à l'autre, c'était là un fait curieux qui exigeait l'hypothèse que les forces dans les molécules isomorphes soient identiques.

Mais j'ai trouvé, d'abord dans le chlorure d'ammonium et plus tard aussi dans beaucoup d'autres matières que, bien au contraire, non seulement la miscibilité des corps isomorphes est parfois nulle ou seulement partielle, mais aussi qu'une introduction de matières, certainement étrangères, peut avoir lieu, ainsi qu'un passage à la syncristallisation en parallèle des particules extrêmement fines.

Dans le cas, peu fréquent, de l'introduction des matières étrangères en grande quantité, j'ai observé une influence nette sur la forme et sur la structure des cristaux; il naît des formations courbées et ramifiées, et enfin des sphérolites (*fig.* 3).

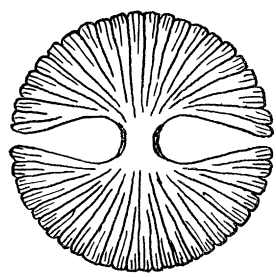

Fig. 3.

Par là l'explication des cristallites courbés était trouvée; mais en même temps un nouveau défaut de la définition d'un cristal se présentait :

« L'homogénéité chimique aussi bien que l'homogénéité physique n'est pas une condition essentielle de l'état cristallin. »

Les cristaux peuvent se composer de plusieurs matières comme les phases liquides (par exemple les solutions), ou les phases gazeuses (par exemple l'air ordinaire).

Déjà, il nous faut donc étendre davantage la définition classique du cristal, et nous pourrions peut-être dire :

« Un cristal est une phase solide sans discontinuité, et anisotrope, au moins à l'égard d'une propriété particulière. »

Mais le mot « solide », lui-même, doit-il être maintenu dans la définition?

Je crois pouvoir affirmer que non, et j'espère pouvoir vous en convaincre aujourd'hui. Il y a des cristaux visqueux, et même, quelque étrange que cela paraisse, il y a des cristaux qui sont franchement liquides.

Mes premières observations (1876) ont été faites sur l'iodure d'argent cubique, dont les cristaux, en apparence, coulaient autour d'une bulle d'air (*fig. 4 a*) comme de l'huile, si on faisait passer un courant électrique à travers la solution (*fig. 4 b*).

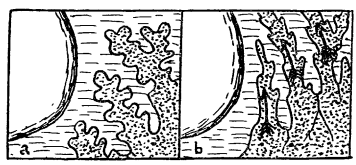

Fig. 4.

Ces cristaux sont-ils liquides ?

Qu'on se figure un tel cristal suspendu librement dans un fluide de même densité, comme dans le cas de la goutte d'huile de *Plateau*. Il ne prendrait pas comme la goutte une forme sphérique sous l'influence de la tension superficielle, probablement parce que son élasticité l'en empêche ; en d'autres termes : la forme polyédrique est une preuve indirecte de l'existence d'une limite de l'élasticité parfaite, qui est la caractéristique des corps solides.

Cette réflexion a été la cause que, au commencement, ni les cristaux mous d'iodure d'argent, ni ceux d'oléate d'ammonium, substance dont je m'étais d'abord occupé à cause de sa faculté de produire des formes myéliniques, ne me donnèrent l'occasion de parler des cristaux liquides ; que, par prudence, je nommais ces cristaux mous « coulants » ou « apparemment liquides ».

Quand on laisse refroidir sous le microscope une solution saturée d'oléate dans l'alcool, on voit apparaître des cristaux transparents

très biréfringents, qui ont la forme de doubles pyramides très allongées. Mais, si l'on fait couler le liquide ambiant, on voit les cristaux couler avec le liquide, mais se déformer en se déplaçant. Ils se courbent pour franchir les moindres obstacles, tels qu'une poussière ou une bulle d'air. Tout se passe, comme si ces cristaux étaient seulement une portion du liquide qui serait biréfringente. On peut même étirer un cristal en une longue bande homogène.

Comme il ne peut y avoir des fentes et des fragments, les directions d'extinction ne donnent, sans aucun doute, pas les axes des fragments, mais ceux des molécules.

Quand deux de ces cristaux se rencontrent, ils se réunissent en un seul (*fig.* 5), comme font d'habitude les gouttes d'eau, et cette goutte, je veux dire ce cristal unique, prend immédiatement la forme polyédrique des cristaux, qui lui ont donné naissance. Il y a donc autre chose que les actions ordinaires de la capillarité. Il faut certainement ajouter aux actions attractives et répulsives qui sont des *forces*, des actions capables de faire tourner les molécules des corps qu'on nomme des *couples*.

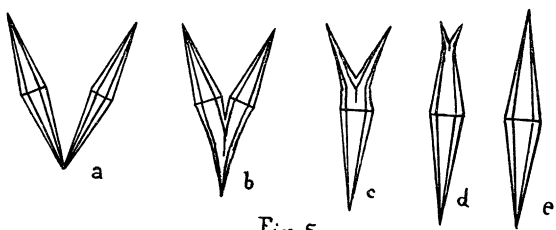

Fig. 5.

Ce phénomène est « l'homéotropie spontanée. »

Une remarque, cependant : Si les deux cristaux, qui se rencontrent, s'abordent presque à angle droit, ils se réunissent bien en un seul, mais ils ne se fusionnent pas en un seul polyèdre convexe, ils forment une sorte de macle (*fig.* 6).

La même chose peut arriver, quand la courbure d'un cristal devient trop forte. Il en résulte alors une macle en genou (*fig.* 7).

L'existence de ces cristaux maclés rend compte de ce fait qu'une masse un peu importante de ces cristaux peut ne pas posséder une transparence parfaite et peut paraître trouble, comme serait une suspension d'un solide franc dans un liquide franc ou une émulsion. Mais ce trouble tout spécial est dû seulement aux réfractions suc-

cessives de la lumière, quand elle passe de l'un à l'autre de ces cristaux maclés, parce que les individus sont biréfringents. A cela s'ajoute encore que l'adhésion aux parois du vase empêche l'arrangement parallèle. Au contraire, un agrégat des cristaux d'iodure d'argent cubique apparaît transparent, à cause de son isotropie.

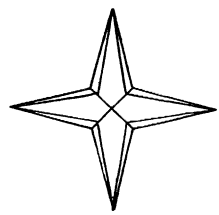

Fig. 6.

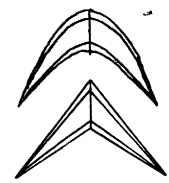

Fig. 7.

Bien entendu, chaque cristal isolé d'oléate d'ammonium est transparent. Avec un mélange avec du rouge de magdala, on obtient même des cristaux dichroïques.

L'opinion de plusieurs savants, que les masses troubles étaient des émulsions, est erronée; il est impossible qu'une émulsion forme des polyèdres ou montre le dichroïsme ou la biréfringence.

Revenons encore, si vous voulez bien, au cas d'un cristal unique d'oléate et, sous le microscope, étirons-le et coupons-le en deux fragments. Que va-t-il arriver? Les deux morceaux de ce cristal liquide vont-ils présenter une cassure pareille à celle d'un morceau de verre?

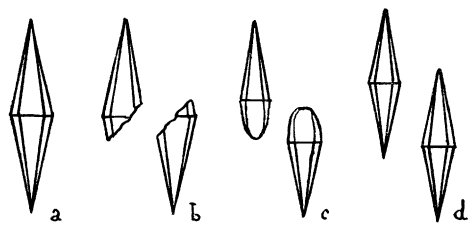

Fig. 8.

Ou bien va-t-il se faire une sorte de cicatrisation par l'apparition d'une goutte liquide à l'extrémité amputée? L'expérience montre qu'il se produit tout autre chose. Les deux morceaux du cristal primitif, dès qu'ils sont libres, reprennent chacun pour leur compte la forme polyédrique d'un cristal complet (*fig.* 8).

Cette expérience est particulièrement instructive, car elle prend sur le vif le jeu, et presque le mécanisme de ces forces d'orientation de ces couples, dont je parlais tout à l'heure.

L'élasticité ne peut pas produire une telle action; probablement la vraie cause est la tendance à l'expansion, causée par le mouvement des molécules et équilibrée par la force de cohésion. A cause de la disposition des molécules sur un réseau, elle doit être dépendante de la direction; la pellicule superficielle doit être par suite poussée en avant par les chocs moléculaires d'autant plus que la force d'expansion est plus grande.

J'ai appelé la force nouvelle « force de configuration ». De plus l'existence d'une limite d'élasticité n'ayant pu être mise d'aucune manière en évidence, je me suis vu contraint de désigner les cristaux en question, non comme au début par l'expression « apparemment liquides », mais comme « réellement liquides ».

Une propriété très curieuse de ces cristaux liquides est « l'homéotropie forcée ». Si, par exemple, sous le microscope on donne au couvre-objet, qui recouvre la préparation, un mouvement de va-et-vient plusieurs fois répété, tous les cristaux prennent des orientations identiques (*fig.* 9). Dans l'observation avec les nicols croisés, on voit par exemple tout le champ s'éteindre d'un seul coup.

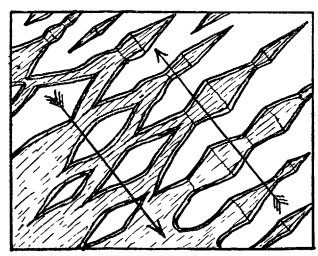

Fig. 9.

Si l'on introduit entre le porte-objet et le couvre-objet dans la masse cristalline de l'oléate une mince lame de verre, cette intervention trouble l'équilibre de position des cristaux, l'on voit la pointe de verre s'entourer d'une région homogène sur le fond multicoloré de la préparation (*fig.* 10) : les cristaux liquides ont tourné.

On ne peut s'empêcher en voyant cette expérience, de penser aux

phénomènes si complexes, qui se passent dans le travail mécanique, dans le poinçonnage des métaux, et il se pourrait bien que l'étude approfondie du cas des cristaux liquides vienne éclairer d'un jour nouveau la technique industrielle elle-même.

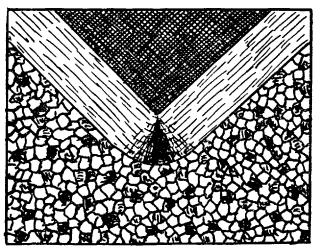

Fig. 10.

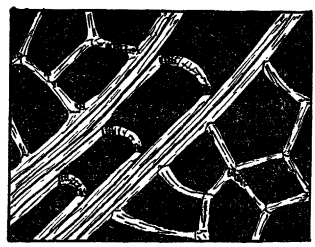

Fig. 11.

Si on presse l'oléate d'ammonium entre le porte-objet et le couvre-objet en une couche mince, il apparaît un autre phénomène curieux; la « pseudoisotropie ».. L'aspect que comporte la différence d'orientation des individus cristallins-fluides disparaît aussitôt; toute la couche apparaît alors noire entre les nicols croisés, sillonnée par un réseau de stries ou bandes (*fig.* 11), qui deviennent claires et sombres comme des cristaux, en faisant tourner la platine. A la lumière ordinaire, elles apparaissent comme des stries d'un liquide huileux.

Au début j'étais d'avis que la masse noire, en apparence isotrope, était un agrégat irrégulier de molécules, produit par la destruction du réseau, un corps amorphe, selon la vieille théorie de l'amorphie. Mais si on pose le porte-objet obliquement sur le trajet des rayons, la masse s'éclaire, elle doit par conséquent être uniaxe.

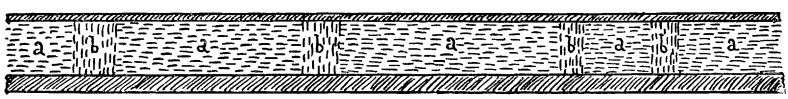

Fig. 12.

Les molécules se comportent donc comme des feuillets uniaxes, qui se disposent dans les endroits noirs parallèlement au verre, et dans les bandes brillantes se tiennent au contraire verticalement (*fig.* 12).

Une action encore plus grande que celle de la surface du verre,

qui naturellement peut seulement rendre parallèles les axes principaux, et non pas les axes secondaires, est exercée par la surface des cristaux solides, qui peuvent amener en position complètement parallèle des axes des molécules.

Inversement les molécules des cristaux d'oléate d'ammonium peuvent agir aussi d'une manière directrice sur les molécules des cristaux solides. Des lames minces de cholestérine se formant en même temps s'orientent sur ces derniers ; de même il y a la syncristallisation de rouge de magdala, déjà mentionnée, etc.

Une telle orientation des particules par l'action des corps voisins se fait encore sentir dans la formation des cristaux liquides mixtes. On fait se former facilement ces cristaux mixtes en rapprochant dans le champ du microscope deux cristaux liquides de nature différente. On voit parfois les deux cristaux se diffuser l'un dans l'autre ou, plutôt, l'un sur l'autre, celui qui a la tension superficielle moindre se coulant et se répandant sur l'autre cristal (*fig.* 13), comme ils font des gouttes.

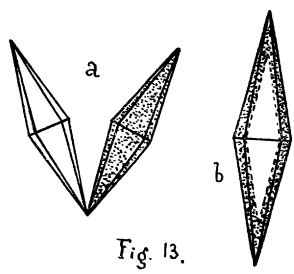

Fig. 13.

Cette diffusion présente un intérêt particulier, parce que non seulement la force expansive, nommée pression osmotique, entre en action, mais aussi la force moléculaire attractive et orientante, que néglige la théorie ordinaire, sans doute sans erreur sensible, parce que le travail d'absorption est compensé par le travail de désagrégation.

Lorsque les forces d'orientation sont faibles, les cristaux liquides, suspendus librement forment des gouttes sphériques, comme les liquides ordinaires. Mais ces gouttes liquides sont des cristaux ; elles sont anisotropes, et leur développement se ferait inégalement dans les différentes directions.

J'ai trouvé (1890) le premier exemple de telles gouttes cristallines sphériques avant la découverte des cristaux liquides d'oléate

d'ammonium dans les liquides troubles provenant de la fusion du paraazoxyanisol et du paraazoxyphénétol. M. *Gattermann* avait attiré mon attention sur ces matières à la suite de ma publication sur le trouble du benzoate de cholestérine de *Reinitzer*, fondu, au sujet duquel j'avais énoncé l'hypothèse, que ce dernier devait être une masse cristalline liquide, comme l'iodure d'argent régulier, quoiqu'il ne fût pas possible de reconnaître des cristaux isolés, à cause de leur petitesse.

Quand on chauffe, par exemple, du paraazoxyanisol solide à une certaine température, il passe à l'état liquide, franchement liquide, mais c'est un liquide trouble : c'est le liquide cristallin. Si l'on continuait à chauffer, à une température plus élevée, le liquide s'éclaircirait brusquement, les cristaux liquides auraient fondu à leur tour.

Ces gouttes liquides cristallines possèdent des propriétés extrêmement curieuses. D'après les recherches quantitatives de *Schenck*, ces liquides ont une fluidité comparable à celle de l'eau ou de l'alcool. Mais ces gouttes sont anisotropes, les particules y sont orientées en cercles concentriques autour d'axes de symétrie (*fig.* 14 *a*). Cette disposition spéciale donne lieu à des réfractions singulières, à une sorte de filandre.

Si on regarde à travers une goutte dans la direction de l'axe de symétrie, elle paraît contenir dans l'intérieur un noyau opaque, enveloppé d'une auréole grisâtre circulaire (*fig.* 14 *b*), comme on le reconnaît dans la photographie exposée.

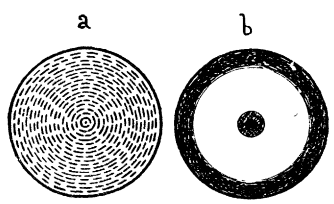

Fig. 14.

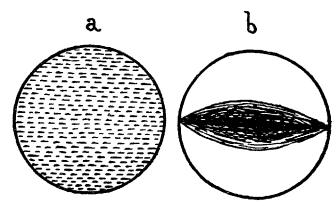

Fig. 15.

Quand la goutte est examinée perpendiculairement à l'axe de symétrie (*fig.* 15 *a*), le noyau central prend la forme d'une lentille biconvexe, dont les bords s'appuient sur la périphérie de la sphère.

En lumière polarisée, la goutte apparaît dans la première position, par suite du dichroïsme, divisée en quadrants alternativement

blancs et jaunes (*fig.* 16), surtout avec le paraazoxyphénétol, quand on ajoute, en outre, du paraazophénétol comme colorant jaune.

Entre les nicols croisés on voit une croix noire séparant les secteurs blancs et jaunes (*fig.* 17).

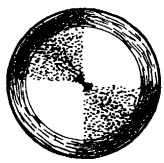

Fig. 16.

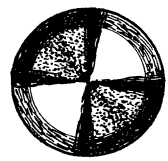

Fig. 17.

Dans le cas où la goutte est épaisse, il n'y a pas de couleurs d'interférence. Celles-ci apparaissent, surtout par l'addition d'une matière étrangère, qui diminue la biréfringence, comme par exemple de l'azobenzol, quand on diminue fortement l'épaisseur. Mais la structure des gouttes est alors modifiée (*fig.* 18), et en conséquence aussi la forme des croix noires (*fig.* 19).

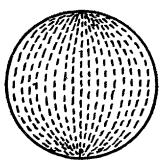

Fig. 18.

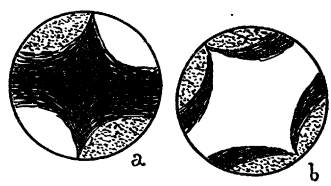

Fig. 19.

Fig. 20.

Les couleurs correspondent exactement à l'épaisseur ; on le reconnaît particulièrement bien, en prenant comme couvre-objet une lentille plan-convexe. Dans la position d'éclairage, le centre noir est alors entouré par des zones circulaires des gouttes colorées, en relation avec les anneaux colorés de Newton.

Souvent l'addition d'une matière étrangère, par exemple de la colophane, produit un arrangement hélicoïdal des molécules, qui se montre aussi bien en lumière ordinaire par torsion en spirale des filandres (*fig.* 20), qu'en lumière polarisée par une rotation extrêmement forte du plan de polarisation, de sorte qu'au lieu d'avoir des croix noires entre les nicols croisés, on a seulement des croix colorées ou

grises (ou des croix noires entre les nicols non croisés). Le système des anneaux colorés (obtenus, en appliquant une lentille comme couvre-objet), apparaît entouré par des zones sombres et claires alternantes régulièrement. Cela tient naturellement à ce que la grandeur de la rotation du plan de polarisation dépend aussi de l'épaisseur de la préparation.

De telles gouttes tordues prennent un mouvement de rotation rapide de sens opposé à celui des aiguilles d'une montre, quand on les échauffe en bas et les refroidit en même temps en haut. La cause est due probablement à ce que non seulement la croissance, mais encore la solution de ces gouttes s'effectuent anisotropiquement. Comme la tension superficielle rétablit aussitôt la forme sphérique, des courants superficiels doivent naître, qui, à cause de la torsion, ont la forme de spirales et produisent ainsi la rotation.

Si deux ou plusieurs gouttes se touchent, elles se fusionnent, comme deux gouttes d'huile, et la goutte résultante, naturellement plus grande, prend la structure normale : *aussitôt*, quand elle est suspendue librement, *lentement* ou pas du tout, quand elle est en contact avec le verre. Dans ce dernier cas, ces gouttes montrent deux ou plusieurs noyaux sombres, entourés d'une auréole circulaire, mais en outre il se produit d'autres noyaux sombres avec auréole carrée (*fig.* 21 *a*), dont le nombre est égal à celui des premiers moins un et qui correspondent aux points où les gouttes se sont d'abord touchées et fusionnées, parce qu'en ces endroits il se produit un trouble de la structure moléculaire (*fig.* 21 *b*).

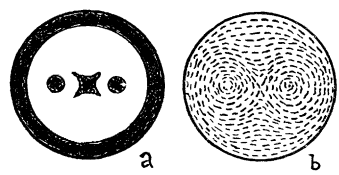

Fig. 21.

Naturellement il y a aussi d'autres modes de jonction ; et les figures projetées [1] en montrent des exemples ; et aussi des masses étendues

(1) Voir : O. Lehmann. *Flüssige Kristalle*, Leipzig, W. Engelmann, 1904 ; — *Die scheinbar lebenden Kristalle*, Esslingen a. N. I. F. Schreiber, 1907 ; — *Flüssige Kristalle und die Theorien des Lebens*, Leipzig, I. Ambr. Barth., 2. Aufl. 1908.

fluides cristallines en lumière naturelle, en lumière polarisée et entre les nicols croisés.

Les nombreuses photographies et les positifs sur verre exposés [1] montrent les mêmes phénomènes.

La tendance des gouttes à la rotation peut produire une hétérogénéité de structure, de sorte que les auréoles carrées apparaissent comme lieux de croisement des lignes de séparation des individus (*fig.* 22).

Par des mélanges convenables, la force moléculaire orientante des gouttes cristallines peut être réduite de telle sorte que l'absorption du verre l'emporte et que les gouttes cristallines, qui y adhèrent, apparaissent pseudo-isotropes, excepté sur le bord et les lignes de séparation (*fig.* 23).

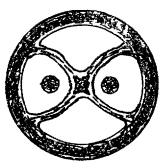

Fig. 22.

Fig. 23.

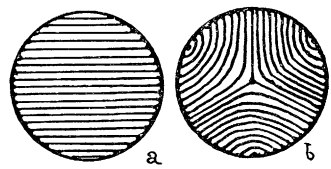

Fig. 24.

Par échauffement continu d'un mélange de dibenzalbenzidine et d'éthoxybenzalazine en parties égales avec de la colophane, on obtient des exemplaires géants d'individus pseudo-isotropes, qui apparaissent noirs entre les nicols croisés, séparés par des stries huileuses claires.

En chauffant seulement peu de temps, ces individus s'étendent en lamelles extrêmement minces. De telles gouttes lamellaires (*fig.* 24) montrent même à la lumière ordinaire une hachure extrêmement fine, qui peut produire des couleurs de diffraction.

Des gouttes semblables hachées se forment en mélangeant le caprinate de cholestérine avec le paraazoxyphénétol. Les cristaux mixtes représentent des formes de passage entre les cristaux liquides polyédriques de la première substance et les gouttes cristallines de la dernière; ils ont une forme ellipsoïdale ou cylindrique

---

(1) Voir O. Lehmann, *loc. cit.*, et plus haut, p. 713, note (1).

(*fig.* 25) ou forment des macles, comme le montrent les figures (*fig.* 26).

Probablement par des mélanges convenables on pourra produire des passages continus entre les cristaux les plus durs et les gouttes de cristaux sphériques.

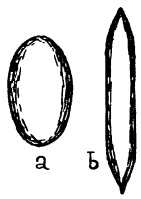

Fig. 25.

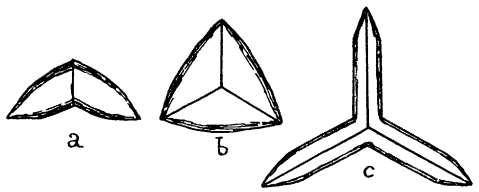

Fig. 26.

Par contact avec les faces des cristaux solides on peut produire des cristaux facilement coulants, étendus, avec extinction unique, c'est-à-dire d'une structure homogène ou avec molécules parallèles, dont les propriétés optiques sont suffisantes pour les ranger dans un des systèmes cristallins.

Dans le caprinate de cholestérine et dans d'autres matières, préparées par M. *Jaeger*, j'ai trouvé deux modifications fluides-cristallines, par conséquent trois états liquides en tout. Les deux premiers peuvent exister mélangés ensemble, et être en équilibre, comme dans le cas de dissociation. Ils produisent à la lumière réfléchie des apparitions de couleurs magnifiques, passant par toutes les teintes du spectre, depuis le violet jusqu'au rouge, d'un éclat semblable au chatoiement des ailes de papillon; surtout si on ajoute du para-azoxyphénétol et si on rend d'abord la masse par pression pseudoisotrope. Les mêmes couleurs se présentent entre les nicols croisés.

Si un cristal liquide d'oléate d'ammonium vient en contact avec une bulle d'air, il se répand sur cette dernière et l'enveloppe (*fig.* 27) finalement d'une couche uniformément épaisse. Il se forme alors une sorte de sphérocristal creux, dans lequel l'axe optique de chaque molécule est orienté perpendiculairement à la surface.

Une gouttelette d'un liquide étranger joue souvent le même rôle que la bulle d'air, et il peut aussi arriver, dans ce cas, que, au lieu de conserver une forme sphérique, la goutte cristalline s'allonge en des cormes très déliées, vermiculaires (*fig.* 28), dont l'équilibre n'est jamais atteint, parce qu'ils croissent irrégulièrement çà et là. De telles for-

mations cylindriques sont les formes myéliniques déjà mentionnées.

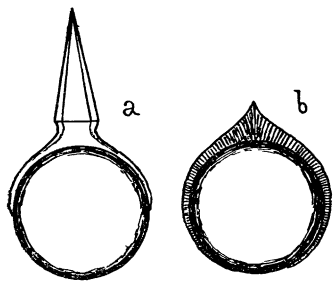

Fig. 27.

Fig. 28.

J'ai trouvé dans l'éther éthylique de l'acide paraazoxycinnamique préparé par *Vorländer* cristallisant d'une solution saturée à chaud dans une très petite quantité de naphtaline monobromée, des formes particulièrement surprenantes. De ce que les cristaux sont hémimorphes, il résulte que les gouttes cristallines montrent un aplatissement unilatéral (*fig.* 29 *a*). Des sphères avec plusieurs aplatissements peuvent naître par réunion de plusieurs gouttes n'ayant pas la même orientation (*fig.* 29 *b*). Deux sphères, aplaties en se rencontrant, forment des espèces de macles, des sphères doubles (*fig.* 29 *c*), qui se partagent facilement de nouveau, s'allongent en un bâtonnet vermiculaire qui prend la forme d'un serpent (*fig.* 30).

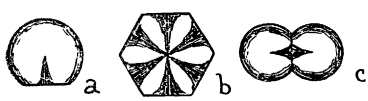

Fig. 29.

Fig. 30.

De telles formations se déplacent dans le liquide, y vont et viennent comme en rampant, s'y étendent, s'y allongent, y bourgeonnent et se fragmentent, tout à fait à la manière de certains organismes inférieurs, avec lesquels ils ont une ressemblance extérieure des plus curieuses.

Le cinématographe montre des photographies obtenues par M. *Sommerfeldt* d'après nature.

La force qui produit ces curieux phénomènes n'est pas seulement la force de configuration, mais encore la force de cristallisation, ou d'absorption, qui entraîne les molécules arrivées en dernier lieu entre celles déjà déposées et les oriente parallèlement à celles-ci.

Des effets de cette force de cristallisation dans les cristaux solides sont : l'accroissement d'un cristal, se développant en une couche poreuse contre la pesanteur, la syncristallisation de deux matières en couches parallèles et l'orientation régulière des cristaux de différentes sortes dans le cas de dissociation, ainsi que dans le cas de transformation polymorphique, par exemple dans l'acide protocatéchique, dans l'éther paradiquino-carbonique et dans le para-azophénétol.

La modification du réseau, qui produit dans les derniers cas une force de glissement (*fig.* 31) très considérable, est causée par la transformation des molécules, ensuite le travail mécanique est effectué aux dépens de l'énergie chimique.

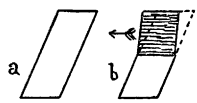

Fig. 31.

Il y a probablement, parce qu'il s'agit d'un changement de molécules, des passages aux forces qu'exercent les corps organiques dans le cas du changement de la quantité d'eau qu'ils contiennent (comme dans des muscles découpés, des tendons, des cheveux, des cordes, du bois, etc.).

La force musculaire des êtres vivants et les forces des autres matières contractiles qu'ils renferment, sont-elles en principe des forces identiques?

D'après la biologie, un autre facteur intervient dans les organismes, c'est l'âme, qui empêche les forces de suivre les lois naturelles et les dirige conformément au but de la conservation de soi-même et du bien-être, en percevant les excitations.

Mais où est le siège de cette âme? En vue des phénomènes de régénération (par exemple dans les polypes) (1) et de transplantation [comme les figures (2) le montrent pour les vers et les têtards], de l'au-

(1) Voir : I. Frick (O. Lehmann), *loc.*, II (2), 1394, 1909.
(2) *Loc. cit.*, 1400.

todivision et de la copulation, l'âme doit être divisible et capable de se relier à d'autres âmes comme la matière.

Y a-t-il en conséquence des âmes de bio-molécules, d'atomes et d'électrons et des combinaisons de celles-ci à des âmes plus parfaites, comme le suppose la théorie de la vie monistique?

Les atomes, dont les âmes sont réunies, suivent-ils encore comme auparavant les lois naturelles ; ou bien l'influence directrice de l'âme s'explique-t-elle par les discordances?

Les réponses ne pourront être données sans la connaissance des forces moléculaires, qui se manifestent avec la plus grande clarté dans les cristaux liquides.

Comme il résulte des observations décrites, on peut dire : « Les cristaux liquides se comportent comme s'ils étaient composés de molécules avec des pôles magnétiques, qui peuvent s'orienter réciproquement, comme les particules de fer dans les houppes produites par un aimant. »

Les molécules sont-elles en réalité aimantées? Les gouttes et les masses cristallines de para-azoxyanisol, placées dans un champ

Fig. 32.

magnétique, se comportent en effet de telle manière, mais pas du tout les cristaux liquides en général. Il faut admettre plutôt que les molécules sont des couples astatiques (*fig.* 32), qui peuvent s'orienter en vérité réciproquement, mais qui ne sont pas affectés par un champ uniforme.

Par l'hypothèse des électrons tournoyant dans les molécules, qui exercent des forces magnétiques, j'ai essayé déjà autrefois d'expliquer la force moléculaire orientante dans les cristaux solides. On pourrait, par exemple, admettre que des ions positifs soient entourés par des électrons négatifs ; alors deux systèmes tournoyants de ce genre, approchés l'un de l'autre, auraient une tendance à se disposer parallèlement comme deux feuilles circulaires magnétiques. Les électrons de l'un des systèmes, en se mouvant dans le champ

magnétique de l'autre, seraient déplacés et entreraient en vibration, de sorte que leur parcours serait représenté par une sinusoïde, portée sur un axe d'abscisses en forme de cercle; dans le cas le plus simple par une ligne-nœud, comme le montre la figure (*fig.* 33).

De tels courants-nœuds se comportent comme des couches magnétiques avec des saillies, grâce auxquelles ils peuvent exercer l'un sur l'autre une force orientante et ils se déforment en même temps de telle sorte que la direction du courant devient la même dans toutes les parties parallèles.

Fig. 33.

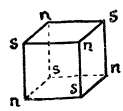

Fig. 34.

Cela est réalisé par l'arrangement de huit systèmes en un cube (*fig.* 34) ou à un parallélipipède, comme dans les modèles exposés [1], dont les sommets apparaissent alternativement, positivement et négativement aimantés. Cette formation est astatique, elle se comporte comme le groupement de douze aimants en forme de fer à cheval. Les ions positifs, placés aux sommets, se repoussent, mais ils sont reliés avec les électrons négatifs tournoyants et, dans le trajet de ces derniers, s'enlacent de plus de lignes de force magnétiques, comme le montre le modèle; par la tendance de ces lignes à se contracter, toute la construction est maintenue.

Tout comme dans le cas des systèmes astatiques plans, une disposition sur un réseau régulier peut avoir lieu à cause de leur force orientante mutuelle; c'est-à-dire que nous sommes amenés de cette manière à la structure des cristaux.

Nous cherchons la vérité! Nous l'aurons atteinte, s'il est possible de calculer d'avance tous les phénomènes. Dans ce but, nous avons besoin avant tout d'une connaissance complète des matières et des forces qui entrent en action.

Par la découverte des cristaux liquides, une lacune importante de cette connaissance est comblée. La définition fondamentale d'un cristal, les théories de la polymorphie, de l'amorphie, des états

[1] O. Lehmann, *Physikalische Zeitschrift*, 1900, Heft, 14, et *Archives d. sc. phys. et nat.*, Genève, 1909.

d'agrégation et toutes les autres, qui se basent sur celles-ci, doivent être modifiées en conséquence.

Le genre de répartition des molécules ne peut pas avoir sur les propriétés de la matière une si grande influence qu'on le croit ordinairement; c'est la nature de la molécule elle-même, qui joue le rôle le plus important.

Nous avons vu que les corps se comportent comme s'ils étaient composés de systèmes moléculaires magnétiques astatiques. Il est compréhensible, par suite de cette hypothèse, qu'il puisse exister des cristaux liquides, qu'ils puissent montrer l'homéotropie spontanée, l'homéotropie forcée, la pseudoisotropie et les autres phénomènes décrits, autrefois inconnus; de plus que la polarité des particules cristallines soit peut-être en relation avec celle qui cause l'homéotropie des amibes et l'existence d'un axe de croissance dans le protoplasma liquide des cellules embryonnaires.

Enfin il est compréhensible que, comme nous l'avons vu, la force de cristallisation ou d'absorption ne puisse pas uniquement provoquer la croissance des cristaux ou développer la résistance passive de l'élasticité, comme on l'acceptait jusqu'ici, qu'elle puisse au contraire produire en outre des mouvements et effectuer du travail mécanique directement aux dépens de l'énergie chimique sans perte également comme les forces des organismes.

Peut-être les cristaux liquides rendront vraiment possible la création d'une théorie quantitative de la structure de la matière et une mécanique des atomes, basée sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme; une théorie, qui apportera un certain profit non seulement à la cristallographie, mais aussi à la physique, à la chimie, à la biologie et à la technique.

Mais le but principal est l'application des nouveaux phénomènes découverts, par exemple, l'emploi des forces moléculaires pour la construction d'un moteur musculaire artificiel, qui aurait un plus grand rendement, que les moteurs thermodynamiques actuels, et qu'on pourra construire sans avoir la théorie des atomes, de même qu'on peut construire des machines électriques sans avoir une théorie des électrons.