

Sommaire

- ▶ Avant-propos
- ▶ Préface
- ▶ Prologue
- Les cristaux dans les philosophies antiques**
 - ▶ Pythagore
 - ▶ Les atomistes - Platon
 - ▶ Aristote
 - ▶ Les pierres selon Pline
- Le Moyen Âge**
 - ▶ Les cristaux dans le premier Moyen Âge chrétien
 - ▶ Sciences et techniques en pays d'Islam - La chimie - L'art des paveurs - La projection stéréographique
 - ▶ En chrétienté après l'appropriation des sciences d'Islam
 - ▶ La minéralogie d'Albert le Grand
- La fin du Moyen Âge et la Renaissance**
 - ▶ L'automne du Moyen Âge
 - ▶ Le quattrocento
 - ▶ Studioli et le climat intellectuel du quinquecento
 - ▶ Réforme, Contre-Réforme et naissance de la science moderne
- Les cristaux au XVIIe siècle, les premiers physiciens**
 - ▶ La Strena de Kepler
 - ▶ René Descartes
 - ▶ Boyle, Hooke, Sténon, Bartholin
- Le XVIIe siècle, Newton contre Huygens**
 - ▶ Les nouvelles institutions scientifiques
 - ▶ Huygens : biréfringence et la structure de la calcite
 - ▶ Physique de Newton et propriétés des cristaux
 - ▶ L'essai de John Locke
- Les mille facettes des « Lumières »**
 - ▶ Le conflit entre cartésiens et newtoniens sur la gravitation
 - ▶ Techniques, électricité, magnétisme
 - ▶ La chimie
- ▶ Les salons, cabinets et diffusion des idées et des sciences
- ▶ Classer
- Décrire, comprendre et classer les minéraux au XVIIIe siècle**
 - ▶ Les premiers naturalistes du XVIIIe siècle
 - ▶ Buffon
 - ▶ Les cristaux dans la chimie
 - ▶ Les sensualistes
- Les lois de la cristallographie : Romé de l'Isle, Haüy**
 - ▶ Les premiers travaux de Haüy
 - ▶ La loi de constance des angles dièdres : Romé de l'Isle
 - ▶ La seconde théorie de la structure d'Haüy : la cristallographie est subsidiaire
 - ▶ Le cours à l'École normale de l'an III : cristallographie et chimie doivent se donner la main
 - ▶ Les évolutions de Haüy, du Traité de minéralogie (1801) à celui de cristallographie (1822) : -1. La classification des minéraux : de la complémentarité chimie-cristallographie à la supériorité de cette dernière - 2. La « loi » des décroissements rationnels : d'une loi empirique à une loi construite -3. La loi de symétrie : d'une loi générale à de « merveilleuses exceptions »
- Cristallographie et théories de la lumière se fécondent**
 - ▶ La Révolution et l'Empire
 - ▶ La polarisation de la lumière -1. La réflexion polarise la lumière -2. La polarisation chromatique des cristaux
 - ▶ Le retour des ondes -1. Une nouvelle théorie ondulatoire de la lumière -2. Les propriétés optiques des cristaux sont, selon leur symétrie, de trois types différents
 - ▶ Lames minces cristallines en lumière convergente
 - ▶ La polarisation rotatoire du quartz
 - ▶ Le principe de Neumann
- Le dénombrement des classes de symétries et des modes de réseaux**
 - ▶ Les cristaux dans la Naturphilosophie
 - ▶ Weiss, les axes de symétries et le dénombrement des classes

▶ Les molécules polyédriques de Delafosse

▶ Les réseaux de Bravais

- Qu'apporte Pasteur à la cristallographie ?

Les groupes d'espace et le principe de Curie

▶ Les groupes de Sohncke

▶ Les groupes de Fedorov et Schönflies

▶ La diffraction des rayons X

▶ La radiocristallographie

▶ Le principe de Curie

▶ Les brisures de symétries

▶ Les mésomorphes (« cristaux liquides »)

▶ Les quasi-cristaux

Épilogue

▶ Bibliographie ▶ Glossaire ▶ Index des noms de personnes

Préface

La préhistoire est datée par les âges d'une matière que découvrent, taillent et polissent nos lointains ancêtres ; ils en fabriquent des matériaux de plus en plus performants pour l'agriculture et la chasse. Mais, dans le même temps, ils découvrent l'élégance des cristaux et remplacent les colliers de coquillages par des pierres de couleur qui serviront aussi de monnaie d'échange. La cristallographie est sans doute née de la collection et du troc.

L'ouvrage de Bernard Maitte invite à une riche visite historique des cristaux. Cette promenade est guidée, et les divers domaines de l'histoire des sciences sont sollicités dans ce parcours. Naturellement, y sont présents en premier les atomistes de la Grèce classique, celle du siècle de Thucydide qu'affectionnait Jacqueline de Romilly. D'autres compagnons participent à ce voyage : en premier, les minéralogistes, bien sûr, qui collectionnent et organisent des cristaux par leurs formes et leurs couleurs indépendamment de leurs tailles, conduisant ainsi à des classifications comparables à celles des herbiers ; les géologues soucieux d'extraire de la Terre des éléments utilisables pour l'homme. Les chimistes ont aussi leur mot à dire en particulier dans leur réflexion sur la cristallisation. L'optique jouera un rôle essentiel, et les travaux sur la biréfringence d'un cristal de calcite décrits en détails dans ce livre nous font en particulier mieux connaître le personnage de Huygens (un peu éclipsé par la formidable personnalité de son contemporain Newton). Le débat onde-corpuscule fait alors rage et Bernard Maitte lui donne une large place tant les interactions lumière/matière sont essentielles dans le développement de la science. Ce débat conduira au triomphe des ondes avec des expériences cruciales de Young à Fresnel mais la vision particulière reste aujourd'hui bien présente dans cette dualité quantique.

La démarche inductive d'observation se confronte, au long de ce livre, à celle de déduction à partir de modèles géométriques. La division ultime de la matière en atomes impliquait de la construire à partir d'édifices atomiques. Une vision atomiste reste toujours présente alors même qu'il faudra attendre le xx^e siècle pour faire sortir l'atome du statut d'un modèle sans justification !

La plus grande partie du livre est donc consacrée aux va-et-vient de cette pensée scientifique, qui s'enrichit d'autres cultures, traduit les textes plus anciens, invente et fait appel parfois à l'art des alchimistes. Comme dans l'ouvrage qu'a publié Bernard Maitte sur l'arc-en-ciel, nous voyons qu'on ne peut dater précisément un changement de perspective ou de paradigme (comme le serait une de ces révolutions scientifiques chères à Thomas Kuhn). La science avance, comme les vaguelettes sur la plage à la marée montante, progresse par couches successives, réinventions et, parfois, marche en arrière. Progressivement se construit l'édifice de cette science des cristaux accompagnée d'autres découvertes.

L'ouvrage suit donc le fil des siècles tout en se posant plus longuement sur la période des Lumières, marquée en particulier par l'abbé Haüy, même si ses découvertes et théories dans le domaine ont été remplacées depuis longtemps. Mais son rôle, en particulier dans ses cours donnés à l'École normale de l'an III et jusqu'au Traité de cristallographie trente ans plus tard, montre le passage du monde de la description à celui d'une construction géométrique.

La promenade va conduire à une étape fondamentale, celle de l'utilisation des rayons X pour l'étude de la structure cristalline. Que la lumière X se diffracte sur un monocristal en faisant des taches discrètes sur un écran confirme à la fois le côté ondulatoire de cette source de lumière mais aussi de la périodicité des empilements cristallins et donne une mesure directe des distances entre plans cristallins et des symétries du réseau cristallin. Et ce domaine va prendre tout son essor en s'appuyant sur la formalisation des symétries

des réseaux cristallins qui avait été établie, dès le XIX^e siècle, en particulier par les travaux en Allemagne de Christian Samuel Weiss complétant l'œuvre de Haüy et avant les réseaux de Bravais.

Naturellement, comme le souligne Bernard Maitte, un second ouvrage resterait à écrire portant sur l'histoire récente qu'annonçaient les travaux pionniers de von Laue. La cristallographie utilise aujourd'hui les nouveaux outils de la spectroscopie et de l'imagerie. Mais, après avoir servi la physique des solides pendant le demi-siècle passé, elle est devenue un outil essentiel de la biologie : l'objectif de ces études sera d'étudier la molécule elle-même comme la structure globulaire de l'hémoglobine par Perutz et Kendrew (colauréats du prix Nobel de chimie en 1962) ou la double hélice de l'ADN.

Un troisième livre que j'imagine volontiers – ce qui marque la richesse des voies ouvertes par la cristallographie – porterait sur la relation entre la cristallographie et la science des empilements. Les empilements périodiques furent la première source d'inspiration du cristallographe, comme ce fut le cas pour le « cadeau d'étrences » que rédige Johann Kepler en 1610 et que décrit le chapitre 4 du livre de Bernard Maitte. Kepler y met en évidence la symétrie « sexangulaire » du flocon de neige. Il décrit aussi les empilements rhomboédriques en volume que présentent des graines de grenade, première étape d'une utilisation – systématique aujourd'hui – d'empilements de sphères dures pour décrire à la fois les propriétés des matériaux granulaires et celle des cristaux. La conjecture de Kepler, annonçant que le réseau cubique à faces centrées réalise la plus forte compacité d'un empilement de sphères dures de même diamètre, ne recevra une démonstration rigoureuse qu'il y a quelques années ! Un siècle après Kepler, le révérend Stephen Hales utilisera des empilements de petits pois ; gonflés par l'eau, ils s'écrasent un peu et permettent de caractériser en moyenne la nature et le nombre de contacts entre les grains une fois séparés. Le résultat qu'il obtient : 12 faces pentagonales en moyenne (ce qui fait penser à des dodécaèdres) est inexact, comme son souhait, j'imagine, de s'approcher d'une structure périodique modèle.

Le désordre du sac de billes est autre chose qu'un ordre perturbé ! Ce dernier existe, bien sûr, et les cristallographes Bragg père et fils feront une description imagée des défauts dans les cristaux à partir de lits de bulles de même taille : elle sera reproduite dans les célèbres lectures de Feynman. Les physiciens auront ces images présentes à l'esprit. Charles Frank sera, avec Jacques Friedel, un des artisans de ces études sur les défauts après guerre ; cela lui fera écrire avec humour : « Les cristaux sont comme les humains ; ce sont les défauts qui les rendent intéressants. »

Les travaux des cristallographes vont les conduire à une étude du désordre dans les cristaux qui prolonge celle des cristaux parfaits. Et j'ai plaisir à rappeler ici la mémoire de André Guinier (avec lequel j'ai écrit ma première publication scientifique, il y a longtemps), dont l'ouvrage sur la radiocristallographie a été une bible pour tous les physiciens travaillant dans ce domaine. Guinier utilisera en particulier la structure diffuse autour des pics de Bragg des rayons X, qui rendent compte des empilements périodiques des cristaux pour identifier la formation de précipités dans des alliages métalliques. Il en donnera les caractéristiques géométriques et l'échelle de taille.

La situation extrême du désordre d'un empilement de sphères qu'évoque le livre de Maitte rappelle celle des matériaux amorphes et des verres pour lesquels il n'existe pas d'axes ou plans de symétrie privilégiés. Un empilement de billes dures en désordre a été d'ailleurs souvent utilisé pour se représenter ces structures. Le désordre des empilements à 3D est en effet la règle : le tétraèdre de base de quatre sphères en contact conduit au mieux à la construction d'un icosaèdre et à des symétries locales pentagonales. Les études d'il y a un demi-siècle ont approché la structure du verre et des liquides par des modèles utilisant des distributions de sphères en volume, tels que ceux du groupe de John Desmond Bernal et John Finney à Londres. Par un juste retour des choses les empilements de sphères jouent aujourd'hui un rôle important dans la compréhension de la statique des milieux granulaires dont l'étude sert considérablement dans de nombreux champs d'applications.

Me suis-je égaré dans un terrain très parcouru aujourd'hui et qui peut sembler éloigner du propos de l'ouvrage de Bernard Maitte. Et pourtant, il s'agit toujours comme, dans le sujet de ce livre, d'une science qui marche, qui explore et découvre la matière sur le bord du chemin, ici un diamant soulevé d'un coup de pied accidentel par un adolescent sud-africain, là le banal tas de cailloux. Mais il y a bien une même curiosité de la matière qui va de l'atome et de ses constructions atomiques et jusqu'aux édifices et aux matériaux. Cette construction et cette vision d'échelles sont celles que prophétisait Victor Hugo dans ce jardin de la rue Plumet :

« Rien n'est petit en effet. Que savons-nous si les créations de mondes ne sont point déterminées par des chutes de grains de sable ? Qui connaît les flux et les reflux réciproques de l'infiniment petit et de l'infiniment grand ? Un ciron importe ; le petit est grand, le grand est petit ; tout est en équilibre dans la nécessité. »

La science du cristal dont Bernard Maitte fait miroiter les facettes à travers ces divers éclairages de la science depuis l'Antiquité invite à cet aller-retour du petit au tout dans la matière.

Etienne Guyon

Directeur honoraire de l'ENS Ulm -
Professeur émérite des Universités -
Laboratoire PMMH ESPCI, Paris

Introduction

On a coutume d'affirmer que la cristallographie s'est constituée en tant que science avec les travaux d'Haüy (1743-1822). Celui-ci, initialement amateur de botanique, s'étonnait – selon Georges Cuvier- de la constance des formes des fleurs, des fruits, et ne concevait pas que les formes des minéraux, plus simples, ne fussent pas soumises à de mêmes lois. *Ce fut lorsqu'il était rempli de ces idées, qu'examinant quelques minéraux chez [...] M. Defrance, [...] il eut l'heureuse maladresse de laisser tomber un beau groupe de spath calcaire cristallisé en prismes. Un de ces prismes se brise de manière à montrer sur sa cassure des faces non moins lisses que celles du dehors, et qui présentaient l'apparence d'un cristal nouveau tout différent du prisme pour la forme. M. Haüy ramasse ce fragment ; il en examine les faces, leurs inclinaisons, leurs angles. À sa grande surprise il découvre qu'elles sont les mêmes que dans [...] le spath d'Islande.* Un monde nouveau semble à l'instant s'ouvrir pour lui. Il rentre dans son cabinet, prend un spath cristallisé en pyramide hexaèdre [...] dent de cochon ; il essaie de le casser, et il en voit encore sortir ce [...] spath d'Islande ; les éclats qu'il en fait tomber sont eux-mêmes de petits rhomboïdes : il casse un troisième cristal, [...] lenticulaire : c'est encore un rhomboïde qui se montre dans le centre, et des rhomboïdes plus petits qui s'en détachent.

Tout est trouvé, s'écrie-t-il ! les molécules du spath calcaire n'ont qu'une seule et même forme : c'est en se groupant diversement qu'elles composent ces cristaux dont l'extérieur si varié nous fait illusion ; et, partant de cette idée, il lui fut bien aisé d'imaginer que les couches de ces molécules s'empilant les unes sur les autres, et se rétrécissant à mesure, devaient former de nouvelles pyramides, de nouveaux polyèdres*1, et envelopper le premier cristal comme d'un autre cristal où le nombre et la figure des faces extérieures pourraient différer beaucoup des faces primitives, suivant que les couches nouvelles auraient diminué de tel ou tel côté, et dans telle ou telle proportion.

Si c'était là le véritable principe de la cristallisation, il ne pouvait manquer de régner aussi dans les cristaux des autres substances ; chacune d'elles devait avoir des molécules constituantes identiques, un noyau toujours semblable à lui-même, et des lames ou des couches accessoires, produisant toutes les variétés. M. Haüy ne balance pas à mettre en pièces sa petite collection ; ses cristaux, ceux qu'il obtient de ses amis éclatent sous le marteau : partout il retrouve une structure fondée sur les mêmes lois. Dans le grenat, c'est un tétraèdre ; dans le spath fluor, c'est un octaèdre* ; dans la pyrite, c'est un cube ; dans le gypse, dans le spath pesant [la barytine] ce sont des prismes droits à quatre pans, mais dont les bases ont des angles différents, qui forment les molécules constituantes ;[...] les faces extérieures se laissent toujours concevoir comme résultant du décroissement des lames superposées, décroissement plus ou moins rapide et qui se fait tantôt par les angles, tantôt par les bords. Les faces [...] ne sont que de petits escaliers [...] ; qui paraissent planes à l'œil à cause de leur ténuité. Aucun des cristaux qu'il examine ne lui offre d'exception à sa loi. Il s'écrie une seconde fois, et avec plus d'assurance : Tout est trouvé !

Il y aura un troisième cri « tout est trouvé ! » quand, appliquant le calcul au décroissement postulé des couches de molécules, Haüy trouva des mesures d'inclinaison des faces confirmées par l'expérience. Et Cuvier de conclure : *Haüy est [...] le seul véritable auteur de la science mathématique des cristaux. Suivant l'exemple de tous ceux qui ont véritablement servi les sciences... il a confirmé sa théorie, en montrant qu'elle explique réellement d'une manière rigoureuse les phénomènes connus, et qu'elle prévoit avec précision les phénomènes possibles [...] [il] a créé l'ensemble des détails d'une science nouvelle.*

Découverte fortuite. Un homme seul – préparé par des études préalables et à l'esprit aiguisé – prête attention à une observation facilement accessible à chacun, mais dont la particularité avait échappé à tous. Expérience reproduite systématiquement sur tous les minéraux disponibles. Principe unique déduit – la structure – qui explique les formes des cristaux, l'inclinaison possible des faces, qui permet les calculs, confirmés par les mesures. Fondation d'une science nouvelle : la cristallographie. Dans la structure de ce récit s'intègrent deux grands thèmes de l'art du conte : un événement inattendu et un travail opiniâtre conduisent à

une juste récompense. Mais l'unité de lieu, de temps et d'action – les trois principes cardinaux de la tragédie classique – sont eux aussi respectés, comme le sont ceux de la méthode hypothético-déductive idéalisée : observations, théorie, prévisions, confirmation expérimentale. N'est-ce pas un peu trop ? D'évidence, Cuvier nous propose un « récit d'origine » destiné à prendre place aux côtés du lustre de Galilée et de la pomme de Newton dans la galerie des histoires édifiantes censées marquer l'évolution de la science. Mais la lente élaboration et la vie des concepts, la fécondité née de controverses et confrontations, la richesse de la pensée scientifique, ne trouvent pas leur compte dans cette reconstruction. Cette fable masque, remplace, occulte le riche travail d'intellection mené pour comprendre pourquoi les cristaux possèdent des faces naturelles régulières, un travail dans lequel l'œuvre d'Haüy s'inscrit et dont nous allons rétablir les étapes, espérant contribuer à replacer l'art du conte à la place qui est la sienne.

Avant-propos

Il y a cinquante ans, déjà, je commençais mes enseignements en cristallographie. À l'intention des étudiants en sciences naturelles – qui observent les cas les plus complexes et ont, généralement, une formation en physique assez ténue –, j'essayais de simplifier les présentations au moyen de raisonnements par symétrie. Et puis, la cristallographie et moi nous sommes séparés. Elle restait en toile de fond scientifique, ré-émergeait à l'occasion de tel cours, de telle recherche, de telle discussion, de tel article, de telle création culturelle. Elle forme une part de moi.

Pour mon quarantième anniversaire, Corine m'offrit une « Histoire de la cristallographie », splendide livre broché dont la couverture portait le titre, l'éditeur et, comme auteur, mon nom. À l'intérieur, toutes les pages étaient blanches. À l'exception de quelques planches photographiques me représentant en bleu de travail, occupé à quelque construction, alignant ou déchargeant parpaings et briques. Les légendes : « L'auteur rangeant sa collection de cristaux » ; « L'auteur illustrant un assemblage tri-dimensionnel. » C'est dire que mes proches savaient que je pensais à écrire cette histoire.

Un jour, Jean Rosmorduc, ami historien des sciences, me demanda : « Tu n'étais pas cristallographe ? Il manque une histoire de la cristallographie. Tu ne veux pas en écrire une ? » L'idée était réactivée. J'ai promis. Puis, plus rien, je mis longtemps à pouvoir m'atteler à la tâche. Je n'arrivais pas à réveiller la belle endormie.

Vous pouvez témoigner que c'est chose faite. Mais auparavant, il fallait que je m'interroge : quelle histoire écrire ? Pour quels lecteurs ? Les sciences des cristaux sont protéiformes. Elles constituent des disciplines diverses et servent de base à de nombreuses autres. Parmi tous les chemins qui s'ouvraient, j'emprunte ici celui qui mène à la construction du concept de symétrie. La symétrie : cette notion transfrontalière qui relie l'immense diversité des phénomènes changeants et y révèle de fécondes connivences. Elle permet aussi de structurer nos savoirs. Il me restera à écrire un livre consacré à cette symétrie elle-même, à l'œuvre dans les arts, les techniques, les sciences, comme économie de pensée et d'action, comme recherche du Beau.

Je tiens à remercier ici tous les auteurs à qui j'ai emprunté : vous trouverez leurs noms en notes de bas de page. Toute ma gratitude va à Étienne Guyon, qui a relu ce texte stylo en mains et m'a fait bien des remarques pertinentes. L'équipe d'Adapt a accompli plus qu'un travail d'édition : ses relectures précises et minutieuses ont permis l'amélioration du manuscrit. Didier Nectoux, conservateur du Musée de minéralogie de l'École des mines de Paris, a bien voulu sélectionner et permettre de reproduire gracieusement les splendides photos que vous trouvez dans cet ouvrage, je tiens à lui exprimer ma reconnaissance et à associer à cet hommage la mémoire de Jean-Michel Le Cléac'h, conservateur adjoint, auteur des photos, disparu brusquement alors même que nous finalisions la mise en pages de ce livre. Je n'oublie pas mes amis, Rémi Franckowiak et Isabelle Rivière, pour leur aide, ainsi que tous ceux qui, à un moment ou un autre m'ont déstabilisé de leurs interrogations ou stimulé de leurs remarques taquines. Tano et Milo, qui cherchent et s'étonnent devant, entre autres, pierres et cristaux, ont fait beaucoup pour maintenir mon éveil à leur sujet.